



การใช้พืชบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

Phytoremediation of Arsenic - Contaminated in the Environment

ขนิษฐา สมตระกูล^{1,*} วราภรณ์ ฉวยฉาย²

¹ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ นครสวรรค์ 60000

Khanitta Somtrakoon^{1,*} Waraporn Chouychai²

¹Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University,
Maha Sarakham 44150

²Faculty of Science and Technology, Nakhonsawan Rajabhat University, Nakhon Sawan 60000

Received 30 January 2022; Received in revised 3 May 2022; Accepted 6 May 2022

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนสารหนูทั้งในดินและน้ำเป็นปัญหาที่น่ากังวลต่อสุขภาพของมนุษย์ทั่วโลก การบำบัดสารหนูเพื่อลดอันตรายต่อมนุษย์และระบบนิเวศเป็นสิ่งที่ต้องทำอย่างเร่งด่วน การบำบัดด้วยพืชเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในสิ่งแวดล้อมแม้ว่าสารหนูจะไม่ใช้ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช พืชน้ำหลายชนิดรวมทั้งพืชไผ่เหนือ น้ำ พืชลอยน้ำ และพืชใต้น้ำ มีรายงานว่าสามารถสะสมสารหนูในชีวมวล สำหรับการปนเปื้อนสารหนูในดิน มีพืชบกหลายชนิดที่ใช้ในการกำจัดสารหนู รวมทั้ง ไม้ดอกไม้ประดับ เฟิร์น วัชพืช และหญ้า การสกัดด้วยพืชและการตรึงด้วยพืชเป็นกลไกที่สำคัญสำหรับการบำบัดสารหนูในดิน อย่างไรก็ตามการมีชีวมวลที่จำกัดของพืชเมื่อเจริญเติบโตในดินที่ปนเปื้อนสารหนูจะลดประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยพืช การเติมสารปรุงแต่งหลายชนิด เช่น ปุ๋ยหมักและฟอสเฟต มีรายงานว่าสามารถปรับปรุงศักยภาพของพืชในการนำสารหนูออกจากดิน การจัดการชีวมวลของพืชหลังการบำบัดด้วยพืชจำเป็นต้องนำมาพิจารณาอย่างรอบคอบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนซ้ำ

คำสำคัญ: การบำบัดด้วยพืช; พืชน้ำ; พืชบก; สารหนู

Abstract

Arsenic contamination in soil and water is a problem concerning human health worldwide. Removal of arsenic to reduce its hazards to human and the ecosystem have to be urgently done. Phytoremediation is an effective method to remove contaminated arsenic in the environment, even though arsenic is not an essential element for plant growth. Several aquatic plants, including emerged plants, floating plants, and submerged plants, have been reported to accumulate arsenic in their biomass. For arsenic-contaminated soil, several terrestrial plants are used to remove arsenic, including ornamental plants, fern, weeds and grass. Phytoextraction and phytostabilization are the important mechanisms for remediating arsenic in the soil. However, the limited biomass of plants grown in arsenic-contaminated soil can decrease phytoremediation capacity. The addition of several amendments, such as composting and phosphate, have been reported to improve plant capacity to extract arsenic. The management of plant biomass after phytoremediation has to consider carefully to prevent re-contamination.

Keywords: Phytoremediation; Aquatic plant; Terrestrial plant; Arsenic

1. บทนำ

สารหนู (Arsenic) เป็นธาตุที่พบตามธรรมชาติในเปลือกโลก สารหนุมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 รูปแบบ ได้แก่ As(-III), As(0), As(II) และ As(V) ในสภาวะรีดิวซ์พบสารหนูในรูปอาร์เซไนต์ (Arsenite; As(III)) ส่วนในสภาวะที่มีออกซิเจนพบสารหนูในรูปอาร์เซเนต (As(V)) [1] โดยสารหนูในรูปอาร์เซเนตจับกับไฮดรอกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ในดินได้ดี [2] สารหนูปรากฏในสิ่งแวดล้อม 2 รูปแบบ ได้แก่ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารหนูถูกปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้จากกิจกรรมที่หลากหลาย ทั้งจากการเกิดขึ้นเองทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ การชะล้างพังทลายของดินและหิน การทำเหมืองแร่ การใช้สารหนูเป็นสารกำจัดศัตรูพืชและน้ำยารักษาเนื้อไม้ เป็นต้น [3] การปนเปื้อนสารหนุมีรายงานในหลายประเทศทั่วโลก ได้แก่ สหรัฐอเมริกา อังกฤษ แคนาดา ออสเตรเลีย อาร์เจนตินา ซิลิ และเม็กซิโก ส่วนประเทศที่มีปัญหาจากสารหนูอย่างรุนแรงคือจีน บังกลาเทศ และอินเดีย [1, 4, 5] สารหนูที่พบปนเปื้อนในน้ำใต้ดินเกิดจากการออกซิเดชันของ

อาร์เซนไฟไรต์ในดินซึ่งเป็นรูปของสารหนูที่พบมากที่สุดในโลก [1] หรือการรีดักชันของออกซีไฮดรอกไซด์ โดยสารหนูที่พบปนเปื้อนประมาณหนึ่งในสามของโลกมีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ [1]

สารหนูเป็นธาตุลำดับสองที่พบปนเปื้อนในน้ำผิวดินและมีระดับการปนเปื้อนสูงกว่าค่าที่แนะนำโดยองค์การอนามัยโลกและสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาแนะนำสำหรับคุณภาพน้ำดื่มในประเทศอินเดีย ปากีสถาน บังกลาเทศ และไนจีเรีย [6] การรับสารหนูเข้าสู่ร่างกายมักมาจากการบริโภคน้ำและอาหารที่ปนเปื้อนทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ นอกจากนี้การได้รับผ่านผิวหนังเป็นปัจจัยเสี่ยงอีกประการในการทำให้เกิดโรคจากสารหนูเช่นกัน [6] สารหนูที่พบปนเปื้อนในแหล่งน้ำอยู่ในรูปของสารหนูอนินทรีย์ ได้แก่ อาร์เซเนตและอาร์เซไนต์ และสารหนูที่อยู่ในรูปของสารประกอบ ได้แก่ มอนอเมทิลอาร์ซีนิก (Monomethylarsonic) และไดเมทิลอาร์ซีนิก (Dimethylarsinic) [7] สารหนูพบปนเปื้อนในน้ำใต้ดินที่ใช้เป็นน้ำดื่มในหลายบริเวณทั่วโลกในบางพื้นที่ของบังกลาเทศพบว่าน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน

สารหนูมีความเข้มข้นของสารหนูถึง 2 มิลลิกรัม/ลิตร [1] นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนสารหนูในดินและน้ำผิวดินด้วย [8] ในสหรัฐอเมริกา มีรายงานว่าประชากรอย่างน้อย 32 ล้านคนที่สัมผัสกับน้ำดื่มที่มีสารหนูปนเปื้อนถึง 2 มิลลิกรัม/ลิตร เช่นกัน [1] ในบัลแกเรียพบว่าที่อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับโลหะที่ KZM-Plovdiv มีการปนเปื้อนสารหนูในระดับสูงทำให้พื้นที่เกษตรกรรมในบริเวณใกล้เคียงมีสารหนูปนเปื้อนสูงถึง 53 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เป็นต้น [9] ปริมาณสารหนูที่ยอมรับให้ตรวจพบได้ในน้ำดื่มของสหรัฐอเมริกาซึ่งกำหนดโดยสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐคือต้องมีค่าไม่เกิน 10 ส่วนในสิบล้านส่วน ในขณะที่ปริมาณสารหนูในน้ำดื่มในบางประเทศมีค่าสูงมาก เช่น บังกลาเทศมีค่ามากกว่า 3,000 ส่วนในสิบล้านส่วน [3] ความกังวลจากอันตรายของสารหนูคือการใช้พื้นที่ปนเปื้อนในการทำเกษตรกรรมและการประกอบอาหาร รวมทั้งการปนเปื้อนของสารหนูในอาหารที่มีส่วนประกอบจากข้าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สิ่งมีชีวิตสัมผัสกับสารหนูและก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตตามมา โดยสารหนูเป็นอันตรายอย่างร้ายแรงต่อทารกและเด็กแม่สัมผัสในระดับต่ำ [3, 5] ซึ่งข้าวเป็นพืชที่มีศักยภาพในการสะสมสารหนูโดยเฉพาะสารหนูอนินทรีย์พบการสะสมได้ในส่วนต่างๆ ของข้าวรวมทั้งเมล็ด [10]

ในประเทศไทยพบว่าอุบัติการณ์การปนเปื้อนของน้ำใช้ในครัวเรือนจากสารหนูจนส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์เคยมีรายงานในอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อ พ.ศ. 2530 โดยทำให้เกิดโรคพิษจากสารหนู (Arsenic poisoning) หรือที่คนไทยรู้จักในชื่อโรคใช้ดำ [11] การปนเปื้อนในครั้งนี้มีสาเหตุจากทางแร่จากการทำเหมืองแร่ดีบุกซึ่งเป็นแหล่งปลดปล่อยสารหนูทำให้เกิดการปนเปื้อนของดิน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินจากสารหนู [11] นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนสารหนูในดินและน้ำประปาที่มาจากเหมืองดีบุกเก่าที่ตำบลองค์พระ อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี เมื่อ พ.ศ. 2553 [12] จากข้อมูล

เมื่อ พ.ศ. 2551 ความเข้มข้นของสารหนูที่อำเภอ ร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบในดินระหว่าง 2.53 – 151 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในน้ำพบระหว่าง ≤ 0.007 ไมโครกรัม/ลิตร – 0.036 มิลลิกรัม/ลิตร พบในพืช ≤ 0.009 มิลลิกรัม/กิโลกรัม – 7.70 มิลลิกรัม/กิโลกรัม [13] และจากข้อมูลเมื่อ พ.ศ. 2552 ความเข้มข้นของสารหนูที่ตำบลองค์พระ อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี พบในดินระหว่าง 8.96 – 92.35 มิลลิกรัม/กิโลกรัม พบในพืช ≤ 0.009 มิลลิกรัม/กิโลกรัม – 1.235 มิลลิกรัม/กิโลกรัม [13] อีกบริเวณหนึ่งในประเทศไทยที่พบการปนเปื้อนสารหนูคือที่อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย โดยปริมาณสารหนูที่พบในดินที่ทำการเกษตรอยู่ระหว่าง 4.90 – 7.19 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งมากกว่า 3.9 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ยอมให้พบได้ในดินทางการเกษตรที่กำหนดโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติของประเทศไทย การปนเปื้อนนี้เกิดจากเหมืองแร่เหล็กบริเวณนั้น [14] นอกจากการปนเปื้อนที่มีสาเหตุมาจากเหมืองแร่แล้ว ยังมีรายงานว่าพบสารหนูปนเปื้อนในดินในบริเวณบ้านที่รับซื้อขยะและบริเวณกำจัดขยะขององค์การบริหารส่วนตำบลที่ตำบลโคกสะอาด อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นแหล่งที่มาของสารหนู ได้แก่ แผงวงจรไฟฟ้าของโทรทัศน์และคอมพิวเตอร์ จอซีอาร์ที (CRT) จอแอลซีดี (LCD) จอพลาสมาและวัสดุสำหรับโดปซิลิคอน [15, 16] นอกจากนี้จากการสำรวจปริมาณสารหนูในประเทศไทยโดยกองวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้สำรวจปริมาณโลหะหนักในพื้นที่ปลูกพืชเศรษฐกิจหลัก 5 ชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง และสับปะรด ในพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศ จากการเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศไทย จำนวน 3,186 ตัวอย่าง ที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร พบปริมาณสารหนูในช่วง $< 0.001 - 46.0$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [17]

สารหนูเป็นธาตุกึ่งโลหะที่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิตโดยระบบทางชีววิทยาหลายประการ เช่น การทำงานของเอนไซม์ ทรานสคริปชันภายในเซลล์ ระบบประสาท กระเพาะอาหาร ลำไส้ และผิวหนัง ความเป็นพิษของสารหนูมีทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง [8] ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันทำให้ปากไหม้ ปากแห้ง อาการปวดเสียดที่ผิดปกติ อาเจียน ท้องร่วง ปัสสาวะมีเลือดปน กล้ามเนื้อเป็นตะคริว บวม ความผิดปกติที่หัวใจและซอกไตอย่างรวดเร็วเพราะสูญเสียน้ำ [8] การสัมผัสกับสารหนูเป็นเวลานานทำให้เกิดความเป็นพิษแบบเรื้อรัง เช่น มะเร็งผิวหนัง มะเร็งไต มะเร็งปอด และมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ รวมถึงโรคผิวหนัง โรคเกี่ยวกับระบบประสาท และโรคเกี่ยวกับระบบไหลเวียนโลหิต เป็นต้น [8] ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทำให้การกำจัดสารหนูออกจากสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนจึงเป็นเรื่องจำเป็นเร่งด่วน

2. การใช้พืชบำบัดสภาพแวดล้อมและเมแทบอลิซึมของสารหนูในพืช

การใช้พืชบำบัดสภาพแวดล้อมเป็นวิธีที่นำมาใช้ในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ [4] กระบวนการบำบัดสภาพแวดล้อมด้วยพืชเป็นการอาศัยความสามารถของพืชในการกักเก็บรวบรวมสารมลพิษหรือปรับสภาพแวดล้อมภายในดินเพื่อลดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษเข้าสู่สิ่งมีชีวิต [18] ตามปกติกลไกการบำบัดสภาพแวดล้อมด้วยพืชแบ่งเป็น 6 ประเภท ได้แก่

1) การกรองด้วยพืช (Phytofiltration) เป็นกลไกที่พืชดูดซึม เก็บรวบรวม หรือตกตะกอนสารมลพิษในแหล่งน้ำ [4] การกรองด้วยพืชมี 3 ลักษณะ ได้แก่ การกรองด้วยรากพืช (Rhizofiltration) การกรองด้วยยอดพืช (Caulofiltration) และการกรองด้วยต้นกล้าพืช (Blastofiltration) กรณีการกรองด้วยรากพืชพบว่าสารที่หลั่งจากรากพืชมีบทบาทในการเปลี่ยนแปลงพีเอชและสภาพแวดล้อมบริเวณรอบรากพืชจึงช่วยลดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษไม่ให้ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้ดีขึ้น [18]

2) การตรึงด้วยพืช (Phytostabilization) เป็นกลไกที่พืชตรึงรูปสารมลพิษด้วยกลไกการขับ ตกตะกอน เกิดสารประกอบเชิงซ้อน หรือรีดิวซ์เพื่อลดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษไปสู่บริเวณอื่น [4] นอกจากการตรึงด้วยพืชจะช่วยลดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษลงสู่ดินชั้นล่างและน้ำใต้ดินแล้วยังช่วยลดการแพร่กระจายของสารมลพิษไปกับอนุภาคของดินที่ถูกกระแสลมพัดพาไปด้วย [18]

3) การสกัดด้วยพืช (Phytoextraction) หรือการสะสมด้วยพืช (Phytoaccumulation) เป็นกลไกที่พืชดูดซึมสารมลพิษ ทำให้เข้มข้น หรือตกตะกอนสารมลพิษไว้ในชีวมวลของพืช [4] การสกัดด้วยพืชเป็นกลไกที่สำคัญที่สุดในการนำมาบำบัดสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนจากโลหะหรือกึ่งโลหะ ขั้นตอนการสกัดด้วยพืชประกอบด้วย การเคลื่อนย้ายโลหะมาที่บริเวณรอบรากพืช การขนส่งโลหะเข้าสู่รากพืช การเคลื่อนย้ายโลหะจากรากสู่ยอด และการกักเก็บโลหะไว้ในเนื้อเยื่อของพืชบริเวณที่อยู่เหนือพื้นดิน กลุ่มพืชที่มีศักยภาพในการสะสมโลหะได้เป็นปริมาณมากในบริเวณชีวมวลเหนือพื้นดินโดยไม่แสดงอาการผิดปกติเรียกว่าเป็นไฮเปอร์แอคคูมูเลเตอร์ (Hyperaccumulator) [18] ตามปกติพืชที่ถูกจัดเป็นไฮเปอร์แอคคูมูเลเตอร์จะต้องมีค่า Bioconcentration factor และค่า Translocation factor มากกว่า 1 แต่ในกรณีของวัชพืชน้ำ (Aquatic weed) ซึ่งใช้กลไกการบำบัดโลหะหรือกึ่งโลหะด้วยกระบวนการกรองด้วยรากพืชพบว่าค่า Bioconcentration factor ของพืชกลุ่มนี้ยังคงมากกว่า 1 แต่ค่า Translocation factor น้อยกว่า 1 ได้ [19]

4) การระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization) เป็นกลไกที่พืชสกัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนบริเวณรากแล้วปลดปล่อยสารมลพิษนั้นออกสู่บรรยากาศผ่านทางกระบวนการคายน้ำของพืช [4] กลไกนี้มีประโยชน์ในการบำบัดสารมลพิษเพียงบางชนิด เช่น เมอร์คิวรี ซีลีเนียม และสารมลพิษอินทรีย์ที่ระเหยได้ กลไกนี้ยังคงเป็นที่

ถกเถียงกันถึงประสิทธิภาพในการบำบัดเนื่องจากเป็นเพียงการเคลื่อนย้ายสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินหรือน้ำไปสู่บรรยากาศเท่านั้น แต่ไม่สามารถกำจัดสารมลพิษออกจากสิ่งแวดล้อมได้อย่างถาวร [20]

5) การย่อยสลายด้วยพืช (Phytodegradation) เป็นกลไกที่พืชใช้ระบบเมแทบอลิซึมของพืชในการกำจัดสารมลพิษออกจากสิ่งแวดล้อม [4] สารมลพิษที่ถูกกำจัดด้วยกลไกนี้เป็นสารอินทรีย์ เอนไซม์สำคัญที่พืชใช้ในการย่อยสลายสารมลพิษ ได้แก่ เอนไซม์ในกลุ่มออกซิจีเนส (Oxygenase) และดีฮาโลจีเนส (Dehalogenase) เป็นต้น [20]

6) การย่อยสลายบริเวณรอบรากพืช (Rhizodegradation) เป็นกลไกที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างพืชและจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์บริเวณรอบรากพืช โดยรากพืชจะขับเอนไซม์รวมถึงโมเลกุลของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น ฟลาโวนอยด์ คาร์โบไฮเดรต และกรดอะมิโนขึ้นมากกระตุ้นกิจกรรมการย่อยสลายจากจุลินทรีย์ได้ [20]

อย่างไรก็ตามกลไกที่มีแนวโน้มนำมาใช้ในการบำบัดสารหนูมีเพียงการกรองด้วยพืช การตรึงด้วยพืช การสกัดด้วยพืช และการระเหยด้วยพืชเท่านั้น เนื่องจากการย่อยสลายด้วยพืชและการย่อยสลายบริเวณรอบรากพืชเป็นกลไกที่ใช้บำบัดสารมลพิษอินทรีย์ สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนโลหะหรือกึ่งโลหะด้วยพืชจำเป็นต้องเข้าใจกลไกที่พืชใช้ในการสะสมและทนทานต่อโลหะหรือกึ่งโลหะในกรณีของสารหนูซึ่งเป็นธาตุกึ่งโลหะพบว่าพืชมีกลไกการขนส่งสารหนูที่อยู่ในรูปของอาร์เซเนตและอาร์เซไนต์เข้าสู่พืชด้วยกลไกที่ต่างกัน 3 สมมติฐาน [2, 18] ดังนี้

1) อาร์เซเนตซึ่งเป็นรูปของสารหนูที่มักพบในสถานะที่มีออกซิเจนถูกนำเข้าสู่เซลล์พืชด้วยกลไกเดียวกับการขนส่งฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์ เนื่องจากสารหนูในรูปอาร์เซเนตมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับฟอสเฟตจึงสามารถเข้าจับกับโปรตีนที่ใช้ขนส่งฟอสเฟตที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์พืชได้ ทั้งพืชบกและพืชน้ำสามารถกล้ำเลีย

อาร์เซเนตเข้าสู่เซลล์ได้ด้วยกลไกนี้ [2, 7]

2) อาร์เซไนต์ซึ่งเป็นรูปของสารหนูที่มักพบในสถานะที่ไร้ออกซิเจนถูกนำเข้าสู่เซลล์โดยอาศัยโปรตีนอะควาพอริน (Aquaporin) หรืออะควากลิเซอโรพอริน (Aquaglyceroporin) โปรตีนดังกล่าวเป็นโปรตีนที่อยู่ในตระกูลของ Water channel protein ซึ่งโครงสร้างสามมิติของโปรตีนจะมีช่องที่ยอมให้โมเลกุลของน้ำ สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และโมเลกุลที่มีสภาพเป็นกลางเคลื่อนผ่านได้ [2, 7] สันนิษฐานว่ากลไกการนำอาร์เซไนต์และสารหนูในรูปของสารประกอบเมทิลเข้าสู่เซลล์ในลักษณะนี้พบในข้าว [7] กลไกนี้ยังถูกใช้ในการขนส่ง Dimethylarsinous acid และ Monomethylarsonic acid เข้าสู่พืชน้ำด้วย [7]

3) การนำเข้าสู่เซลล์ด้วยการดูดซับด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์เคมีเข้ากับพื้นผิวราก กลไกนี้คาดว่าสารหนูในรูปอาร์เซเนตจะถูกดูดซับเข้ากับไอรอนออกไซด์ (Iron oxide) ที่บริเวณพื้นผิวของพืช กลไกนี้เป็นสมมติฐานสำหรับการขนส่งสารหนูในพืชน้ำ [7]

เมื่อสารหนูเข้าสู่เซลล์พืชแล้วจะถูกเมแทบอลิซึมภายในเซลล์พืช โดยปฏิกิริยาสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึมประกอบด้วย 3 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยารีดักชันของอาร์เซเนต (Arsenate reduction) ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและการกักเก็บ (Complexation and sequestration) และปฏิกิริยาเมทิลเลชัน (Methylation) [2]

1) ปฏิกิริยารีดักชันของอาร์เซเนต เมื่อพืชนำสารหนูเข้าสู่เซลล์แม้เป็นสารหนูในรูปอาร์เซเนตก็ตาม แต่พืชจะมีความสามารถในการรีดิวซ์อาร์เซเนตไปเป็นอาร์เซไนต์ ซึ่งเป็นรูปของสารหนูที่มักปรากฏในเนื้อเยื่อพืช กลไกนี้เป็นกลไกเบื้องต้นในการลดความเป็นพิษของสารหนูในพืช [7]

2) ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและการกักเก็บอาร์เซไนต์ (As^{3+}) มักจับกับหมู่ซัลฟ์ไฮดริล (Sulphydryl, $-SH$) ของเปปไทด์ เช่น กลูตาไทโอน (Glutathione) หรือไฟโตคีเลติน (Phytochelatin) [7]

ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรในช่วงพีเอช ตั้งแต่ 1.5 ถึง 7.0-7.5 และจะแตกตัวเมื่อพีเอชสูงขึ้น ปฏิกริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอาร์เซนิตกับไฟโตคีเลตินเป็นปฏิกริยาที่ช่วยลดความเป็นพิษของสารหนูในพืชได้ [2]

3) ปฏิกริยาเมทิลเลชัน กลไกนี้สันนิษฐานว่า ปฏิกริยาเมทิลเลชันของสารหนูแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็น Monomethylarsonic acid และ Dimethylarsinic acid สามารถเกิดขึ้นได้เองภายในเซลล์พืช [2]

ในพืชที่ไม่ใช่พืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคูมูเลเตอร์พบว่าเมื่อสารหนูเคลื่อนย้ายเข้าสู่รากพืชแล้วสารหนูในรูปของอาร์เซนเตตจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นอาร์เซนไนด์ภายในรากพืชได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของสารที่มีหมู่ไทออลเป็นองค์ประกอบ แล้วจึงถูกกักเก็บไว้ในแวคิวโอลบริเวณรากพืช ทำให้สารหนูถูกเคลื่อนย้ายไปสู่ยอดได้จำกัด [2] นอกจากการสะสมโลหะหรือกึ่งโลหะในแวคิวโอลแล้วพบว่าโลหะหรือกึ่งโลหะยังสามารถถูกกักเก็บและสะสมไว้ในตำแหน่งอื่นๆ ของพืช เช่น ก้านใบ กาบใบ และไตรโคม [18] ในกรณีกลุ่มพืชสะสมโลหะพบว่าโลหะหรือกึ่งโลหะที่ถูกสะสมไว้ในแวคิวโอลจะถูกเคลื่อนย้ายมาที่ท่อของเนื้อเยื่อลำเลียง (Stele) แล้วเข้าสู่กระแสของไซเลม (Xylem stream) ผ่านทางซิมพลาสต์ในเนื้อเยื่อราก จากนั้นจึงเคลื่อนย้ายสู่ยอดผ่านทางเวสเซลในไซเลม [18]

3. พืชที่ใช้บำบัดสารหนู

พืชที่ใช้บำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดินและในน้ำเป็นกลุ่มพืชต่างชนิดกัน การเลือกชนิดพืชให้เหมาะสมต่อตัวกลางที่ปนเปื้อนมีแนวโน้มทำให้การบำบัดประสบผลสำเร็จได้ งานวิจัยจำนวนมากศึกษาการบำบัดสารหนูด้วยพืชที่ต่างกัน รวมทั้งสารหนูในงานวิจัยแต่ละงานมีการปนเปื้อนสารหนูอยู่ในตัวกลางที่ต่างกันด้วย แต่ละงานวิจัยจึงประสบผลสำเร็จในการบำบัดสารหนู

ต่างกัน โดยตัวอย่างปัจจัยที่ส่งผลต่อการบำบัดสารหนู เช่น ความเข้มข้นของสารหนู รูปของสารหนูที่ปนเปื้อน ความทนทานของพืชที่เลือกใช้บำบัด กลไกที่พืชใช้ในการบำบัดสารหนู รวมทั้งปัจจัยทางกายภาพภายในตัวกลางที่ปนเปื้อนสารหนูด้วย ในกรณีของการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำนิยมใช้พืชน้ำทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก มีทั้งพืชน้ำกลุ่มที่เป็นพืชลอยน้ำ เช่น จอก (*Pistia stratiotes*) โดยจอกสามารถสะสมสารหนูได้ทั้งในรากและใบ การสะสมสารหนูพบได้มากเมื่อจอกสัมผัสกับสารหนูในรูปอาร์เซนไนด์ที่ระดับความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์เป็นเวลา 4 วัน โดยพบสารหนูในรากและใบเท่ากับ 1,120.40 และ 31.60 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ ปริมาณสารหนุมักพบที่รากมากกว่าใบเมื่อพิจารณาจากค่า Translocation factor ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 1.0 [21] พืชใล่ล่เหนือน้ำ เช่น ผีอก (*Colocasia esculenta*) ซึ่งสะสมสารหนูที่รากได้ 195 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้งของพืช เมื่อสัมผัสสารหนูที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 28 วัน [11] และพืชใต้น้ำ เช่น *Vallisneria denseserrulata* เจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีพีเอช 7.0 และสามารถสะสมสารหนูได้ 1,700 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 3.5 ถึง 7.0 ช่วยเพิ่มการสะสมสารหนูในพืช พืชน้ำชนิดนี้สามารถลดความเป็นพิษของสารหนูโดยปฏิกริยารีดักชันอาร์เซนเตตไปเป็นอาร์เซนไนด์ สารหนูที่พบในพืชจะสะสมไว้ในแวคิวโอลประมาณร้อยละ 56-72 และสารหนูที่พบในแวคิวโอล อยู่ในรูปอาร์เซนไนด์มากกว่าร้อยละ 80 [22] และสาหร่ายไก่อ (*Cladophora* sp.) ซึ่งรอดชีวิตได้เมื่อมีระดับของสารหนู 6 มิลลิกรัม/ลิตร และสามารถลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำจาก 6 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือเพียงต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร ภายในเวลา 10 วัน [23] ใน (Table 1) ได้สรุปตัวอย่างพืชที่มีศักยภาพในการสะสมสารหนูในสภาวะที่แตกต่างกัน

Table 1 Arsenic accumulation potential in plants.

Plants	Maximum concentration in plants	Tested conditions	Ref.
<u>Aquatic condition</u>			
<i>Pistia stratiotes</i>	1,120.40 and 31.60 µg/g dw in root and shoot	10 µM of NaAsO ₂	[21]
<i>Colocasia esculenta</i>	194.87 and 3.33 µg/g dw in root and shoot	1 mg/l of Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	[11]
<i>Heliconia spittacorom</i>	82.81 and 7.20 µg/g dw in root and shoot	1 mg/l of Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	[11]
<i>Hydrilla verticillata</i>	197.2 ± 17.4 µg/g dw in whole biomass	375 µg/l of arsenate	[24]
<i>Spirodela polyrhiza</i>	0.353 ± 0.003 µmol/g dw in whole biomass	4.0 µM of Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	[25]
<i>Thalia dealbato</i>	122.90 and 7.03 µg/g dw in root and shoot	1 mg/l of Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	[11]
<i>Vallisneria denseserrulata</i>	500 and 1,200 µg/g dw in root and shoot	2 ppm of Na ₂ HAsO ₄	[22]
<u>Soil condition</u>			
<i>Acroccras amplexens</i>	271 and 164 µg/g in root and shoot	304 µg/g of As / Adani Wetlands, Enugu State, Nigeria	[26]
<i>Cyperus exaltatus</i>	321 and 197 µg/g in root and shoot	442 µg/g of As / Adani Wetlands, Enugu State, Nigeria	[26]
<i>Pteridium aquilinum</i>	622 and 100 µg/g in root and shoot	442 µg/g of As / Opi-Agu Lakes, Enugu State, Nigeria	[26]
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	37. 25 and 25. 69 µg/ g in root and shoot seedling	4.0 mg/l of NaAsO ₂ / Loamy soil / Pot experiment	[27]
<i>Salix tetrasperma</i>	35. 76 and 13. 76 µg/ g in root and shoot seedling	4.0 mg/l of NaAsO ₂ / Loamy soil / Pot experiment	[27]
<i>Terminalia arjuna</i>	24. 13 and 12. 52 µg/ g in root and shoot seedling	4.0 mg/l of NaAsO ₂ / Loamy soil / Pot experiment	[27]

กรณีของการปนเปื้อนสารหนูในดิน มีพืชบกหลายชนิดที่สามารถใช้ในการบำบัดสารหนูได้ พืชที่นิยมในการบำบัดมักเป็นพืชที่ไม่ใช่พืชอาหาร แต่เป็นไม้ดอกไม้ประดับ เช่น ดาวเรือง โดยดาวเรืองนักเก็ต (Nugget marigold) ที่เป็นลูกผสมระหว่างดาวเรืองอเมริกัน (*Tagetes erecta*) และดาวเรืองฝรั่งเศส (*Tagetes patula*) เป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมสารหนู โดยสะสมสารหนูในใบร้อยละ 46.2 และสะสมในดอกได้ร้อยละ 5.8 [28] เฟิร์น เช่น *Pteris cretica cv Mayii* สามารถสะสมสารหนูได้ [29] หรือเป็นพืชป่าหรือวัชพืช เช่น *Calotropis procera* L. ซึ่งเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งเจริญได้ในดินที่ปนเปื้อนสารหนู 10 - 200 มิลลิกรัม/

กิโลกรัม และสะสมสารหนูได้ในช่วงเวลา 15-30 วัน โดยดินที่นำมาทดสอบมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 4.58 ± 0.18 meq / 100 กรัม พีเอช 7.20 การสะสมสารหนูพบในยอดมากกว่ารากเมื่อสัมผัสกับสารหนู 100 - 200 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เป็นเวลา 30 วัน มีค่า Translocation factor มากกว่า 1 การทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น Superoxide dismutase, Ascorbate peroxidase, Guaiacol peroxidase และ Catalase ใน *C. procera* เพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับสารหนู [30] นอกจากนี้พืชวงศ์หญ้ายังเป็นพืชอีกกลุ่มหนึ่งที่นิยมใช้ในการบำบัดสารหนู กลไกที่ใช้ในการบำบัดส่วนใหญ่เป็นการสะสมไว้ทั้งในส่วนของราก เช่น Perennial

ryegrass สะสมสารหนูได้ดีที่ราก ปริมาณสารหนูที่พบในรากเท่ากับ 5.52 มิลลิกรัม/กิโลกรัม แต่มีค่า Bioconcentration factor น้อยกว่า 0.1 เมื่อปลูก Perennial ryegrass ในดินที่มีการปนเปื้อนในระดับภาคสนามทางตอนเหนือของเมืองเกอจีวู (Gejiu) อำเภอ Zhadian มณฑลยูนนาน ประเทศจีน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างแคดเมียมและสารหนูที่ระดับความเข้มข้น 5.09 และ 226.13 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ โดยดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าพีเอชในช่วง 7.64-8.19 และมีปริมาณสารอินทรีย์ในดิน 40.26 กรัม/กิโลกรัม [31] บางรายงานพบการสะสมของสารหนูในส่วนของลำต้นเหนือดินด้วย เช่น หญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) เจริญเติบโตได้ดีในภาคโลทรกรรมจากเหมืองทองที่มีการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างสารหนูและแมงกานีสสูงถึง 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 1670 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ โดยหญ้าเนเปียร์สะสมสารหนูในส่วนของลำต้นเหนือดินและลำต้นใต้ดินได้มากถึง 15.5 และ 1.8 มิลลิกรัม/พืชทั้งต้น ตามลำดับ เมื่อปลูกเป็นระยะเวลา 180 วัน ส่วนหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) สะสมสารหนูในส่วนของลำต้นเหนือดินและลำต้นใต้ดินได้ 4.0 และ 2.6 มิลลิกรัม/พืชทั้งต้น ตามลำดับ [32] ตัวอย่างพืชชนิดอื่นๆ ที่มีศักยภาพในการใช้บำบัดสารหนูสรุปใน (Table 1)

เนื่องจากในสภาพแวดล้อมจริง สารหนูมิได้เป็นสารมลพิษที่ปนเปื้อนเพียงลำพังเท่านั้น แต่ยังปนเปื้อนร่วมกับสารมลพิษอื่นๆ ดังนั้น จึงมีการศึกษาบำบัดสารหนูด้วยพืชที่มีการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างสารหนูและสารมลพิษชนิดอื่นๆ เช่น การบำบัดบริเวณที่ปนเปื้อนเพนตะคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol) ร่วมกับโครเมต คอปเปอร์ อาร์เซนิต เป็นเวลา 4 ปี ด้วยการปลูก *Festuca arundinacea* ถั่วอัลฟัลฟา (*Medicago sativa*) และ *Salix purpure* บริเวณทางตอนใต้ของรัฐควิเบก ประเทศแคนาดา บริเวณดังกล่าวมีการปนเปื้อนสารหนูประมาณ 8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม พบว่าตรวจพบสารหนูในเนื้อเยื่อพืชส่วนเหนือดินต่ำกว่าปริมาณต่ำสุดของวิธีการที่สามารถวิเคราะห์

ได้ อย่างไรก็ตามถั่วอัลฟัลฟา *F. arundinacea* และ *S. purpurea* สะสมโลหะชนิดอื่นในเนื้อส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้ดี โดยตรวจพบคอปเปอร์ 6.5, 10.0 และ 8.75 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตรวจพบนิกเกิล 1.45, 1.75 และ 2.65 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตรวจพบสังกะสี 19.25, 28.75 และ 121.75 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของถั่วอัลฟัลฟา *F. arundinacea* และ *S. purpurea* ตามลำดับ [33]

นอกจากใช้การปลูกพืชเพียงลำพังแล้ว ยังมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของพืชในการสะสมสารหนูหลายวิธีการด้วยกัน วิธีการหนึ่งที่มีการศึกษาคือการใช้สารปรุงแต่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น การใช้ปุ๋ยหมักและฟอสเฟต เป็นต้น เช่น ข้าวโพด (*Zea mays*) มีแนวโน้มใช้บำบัดสารหนูได้ จากการปลูกข้าวโพดเป็นเวลา 2 เดือนพบว่าในสภาวะที่ไม่ใช้ปุ๋ยหมักพบว่าข้าวโพดที่เจริญเติบโตในดินร่วนปนทราย (Sandy loam soil) ซึ่งมีระดับความเข้มข้นของสารหนูตั้งแต่ 0-120 มิลลิกรัม/กิโลกรัม สามารถสะสมสารหนูในชีวมวลที่อยู่เหนือพื้นดินได้ในระดับ 12-18.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นค่ามากกว่าข้าวโพดที่เจริญในดินร่วนเหนียว (Clay loam soil) ประมาณ 1.20-1.71 เท่า การเติมปุ๋ยหมักลงในแต่ละระดับความเข้มข้นของสารหนูพบว่าในดินร่วนเหนียวซึ่งมีการปนเปื้อนสารหนู 120 มิลลิกรัม/กิโลกรัม สามารถสะสมสารหนูได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 13 แต่ลดการนำสารหนูเข้าไปสะสมในพืชที่ปลูกในดินร่วนปนทรายร้อยละ 27 ตามปกติปุ๋ยหมักจะส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายสารหนูและมักลดการเคลื่อนย้ายเข้าสู่สะสมในพืช อย่างไรก็ตามผลของการใช้ปุ๋ยหมักขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ระดับการปนเปื้อนของสารหนู และธรรมชาติของปุ๋ยหมักเองด้วย [34] ฟอสเฟตในรูปของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัมช่วยให้พืชสะสมสารหนูในยอดได้มากขึ้น และช่วยเพิ่มชีวมวลของพืช ฟอสเฟตช่วยเพิ่มการดูดซึมสารหนูใน *Brassica napus* ได้มากกว่า *Brassica juncea* ถึงประมาณ 2 เท่าที่ระดับการใช้ฟอสเฟตความ

เข้มข้น 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัมเหมือนกัน *Brassica napus* ยังมีค่า Translocation factor และ Bioconcentration factor มากกว่า *Brassica juncea* ที่ทุกระดับความเข้มข้นของสารหนูที่ทดสอบในสภาวะที่เติมฟอสเฟต (ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 0-75 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) การใช้ฟอสเฟตจึงมีแนวโน้มนำมาใช้ในการบำบัดสารหนูด้วยวิธีการสะสมในชีวมวลได้ เนื่องจากช่วยลดความรุนแรงของสารหนูที่จะเกิดกับพืช ตามปกติพืชที่ทนทานต่อสารหนูจะมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายและดูดซึมฟอสเฟตได้มากกว่าสารหนู ทำให้พืชที่ทนทานต่อสารหนูสามารถรักษาสัดส่วนระหว่างฟอสเฟตและสารหนูไว้ได้สูง การเติมฟอสเฟตในดินช่วยเพิ่มการเคลื่อนย้ายของสารหนูออกจากดินที่ถูกดูดซับไว้มาสู่รูปที่สามารถนำเข้าสู่พืชได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเคลื่อนย้ายสารหนูในดินหลังเติมฟอสเฟตลงไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางประจุของดินและขึ้นอยู่กับชนิดของพืชด้วยว่าจะสามารถกำจัดสารหนูเข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้นหรือไม่ [35]

นอกจากนี้ยังมีการใช้ระบบการปลูกพืชร่วมกับกับพืชหลักนำมาบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในนาข้าวที่มหาวิทยาลัย South China Agricultural เมืองกว่างโจว (Guangzhou) อำเภอเทียนเหอ (Tianhe) มณฑลกว่างตุ้ง ประเทศจีน โดยปลูกข้าว (*Oryza sativa* L.) ร่วมกับผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica* Forsk) (T1) ผักชีล้อม (*Oenanthe javanica* (Blume) DC.) (T2) หรือชาเขียด (*Sagittaria sagittifolia* L. var) (T3) และใช้การปลูกข้าวแต่เพียงลำพังเป็นชุดควบคุม ดินในนาข้าวมีระดับของสารหนูปนเปื้อนทั้งหมด 63.68 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ผลการวิจัยพบว่าความเข้มข้นของสารหนู ค่า Bioaccumulation factor และค่า Translocation factor ในข้าวที่ปลูกร่วมกับกับพืชอื่นๆ มีค่าต่ำกว่าข้าวที่ปลูกเพียงลำพัง โดยผักบุ้งกำจัดสารหนูได้ดีกว่าพืชอื่นๆ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้มากกว่าผักชีล้อมและชาเขียด 7.04 และ 1.47 เท่า ตามลำดับ [36]

4. การจัดการชีวมวลพืชหลังบำบัด

การบำบัดสารมลพิษด้วยพืชมีการใช้งานหลากหลายและควรมีการจัดการชีวมวลที่เกิดขึ้นจากการใช้พืชบำบัดอย่างถูกวิธีด้วย หากไม่มีการจัดการที่ดีจะทำให้เกิดการปนเปื้อนซ้ำซ้อนได้ [37] การจัดการชีวมวลของพืชที่มีการปนเปื้อนจากโลหะ อโลหะ หรือกึ่งโลหะเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อเลือกใช้วิธีการบำบัดสภาพแวดล้อมด้วยพืช วิธีการที่ใช้ในการจัดการกับชีวมวลของพืชภายหลังการบำบัดมีหลากหลายวิธีการสามารถแบ่งตามลักษณะของการดำเนินการได้ดังนี้

1) การเผา (Incineration) ให้กลายเป็นเถ้าร่วมกับฝังกลบ (Landfill) การเผาดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน อุณหภูมิที่แบ่งเป็น 3 ระยะ ระยะแรกใช้อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างสมบูรณ์ ระยะที่สองเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 400 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดการย่อยสลายเซลล์โลสและเอมิเซลล์โลสและลดชีวมวลของพืช และระยะที่สามมักใช้อุณหภูมิระหว่าง 400-697 องศาเซลเซียส เพื่อให้คาร์บอนในพืชถูกย่อยสลายต่อเนื่อง [38] ข้อดีของวิธีการคือลดชีวมวลของพืชลงได้ประมาณร้อยละ 99 และโลหะจะอยู่ในส่วนของเถ้าที่สามารถนำไปจัดการด้วยวิธีที่ปลอดภัยได้ง่ายขึ้น พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างเผาไหม้สามารถนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ [38, 39] อุปสรรคของการใช้ความร้อนในการจัดการชีวมวลของพืช เช่น การเผาชีวมวลของพืชน้ำเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่ดีจำเป็นต้องลดปริมาณน้ำออกจากชีวมวล อุปสรรคสำคัญอีกประการคือการเผาอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยสารหนูให้ปนเปื้อนในอากาศได้ [7, 39] ตามปกติการเผาชีวมวลของพืชที่ผ่านใช้บำบัดสารมลพิษมักทำควบคู่กับการนำไปฝังกลบ เนื่องจากเถ้าที่ได้จากการเผายังคงมีการปนเปื้อนของโลหะ/กึ่งโลหะที่เป็นพิษปนเปื้อนอยู่จึงต้องจัดการหาที่จัดเก็บที่ปลอดภัย [40]

2) การฝังกลบ (Landfill) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในการจัดการขยะ การดำเนินการของระบบ

จะต้องมีการติดตั้งระบบการจัดเก็บขยะ การจัดเก็บน้ำ ขยะจากหลุมฝังกลบ และระบบการจัดเก็บแก๊สจากหลุมฝังกลบ วิธีการนี้ก่อให้เกิดความเสี่ยงในการปนเปื้อนซ้ำซ้อนได้ และต้องใช้พื้นที่ในการดำเนินการค่อนข้างมาก [38] การนำชีวมวลของพืชมาทำปุ๋ยหมักหรือฝังกลบ จำเป็นต้องป้องกันการรั่วไหลของน้ำชะซึ่งจำเป็นต้องเก็บรวบรวมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนซ้ำซ้อนไปสู่ดินบริเวณข้างเคียงและน้ำใต้ดิน การทำปุ๋ยหมักด้วยพืชที่นำมาบำบัดโลหะหนักอาจไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม [39]

3) กระบวนการสกัด (Extraction treatment) เป็นวิธีการสกัดเอาโลหะ อโลหะ หรือกึ่งโลหะออกจากชีวมวลของพืชโดยใช้สารเคมีที่เหมาะสม [38] วิธีการในการสกัดโลหะคือใช้วิธีเชิงกลและกายภาพในการแยกส่วนที่เป็นโลหะออกจากส่วนที่ไม่เป็นโลหะ และนำส่วนที่เป็นโลหะกลับคืนมาด้วยปฏิกิริยาเคมีที่ใช้อนุมูลอิสระสูง วิธีการสกัดโลหะแบ่งได้เป็นการเผาให้เป็นเถ้า สกัดส่วนที่เป็นโลหะด้วยตัวทำละลายที่มีคลอรีน จากนั้นจึงแยกโลหะออกมาแล้วทำให้บริสุทธิ์ แต่ประสิทธิภาพในการสกัดโลหะออกจากเถ้าที่เหลือจากการเผาชีวมวลของพืช เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา อย่างไรก็ตามกระบวนการสกัดนี้มีบทบาทมากในการสกัดโลหะที่มีค่าซึ่งมีปริมาณน้อยออกจากดินด้วยพืช หรือ Phytomining ที่ไม่คุ้มค่า หากใช้วิธีการทำเหมืองแร่แบบดั้งเดิม [41]

4) การนำชีวมวลของพืชที่ได้จากการบำบัดมาหมักเป็นเอทานอลชีวภาพ โดยเปลี่ยนเซลลูโลสที่ผนังเซลล์เป็นเอทานอล นอกจากนี้ ยังมีการหมักชีวมวลของพืชเช่น ฟางข้าวสาลีด้วยกระบวนการหมักอะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล โดยแบคทีเรียสกุล *Clostridium* แต่การหมักด้วยกระบวนการนี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การเกิดกรด ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นในการหมักน้อยเกินไป หรือการปรากฏของลิกนินในชีวมวล การกำจัดลิกนินออกจากชีวมวลของต้นสนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการหมักและป้องกันการเกิดกรดได้ดี [42] อย่างไรก็ตามลิกนินในผนังเซลล์สามารถเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิง

ชีวภาพได้เช่นกัน เช่น ลิกนินถูกเปลี่ยนเป็นไขมันได้โดยแบคทีเรียบางชนิด เช่น *Rhodococcus opacus* ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้ [43] อุปสรรคสำคัญคือต้องมีการปรับสภาพสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปที่นำไปหมักเป็นเอทานอลได้ และควรพิจารณาถึงการจัดการโลหะหนักหรือสารหนูที่อาจปนเปื้อนอยู่ในผลผลิตเพื่อป้องกันการปนเปื้อนซ้ำซ้อน [7]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการชีวมวลของพืชยังคงมีจำกัด แต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบที่แตกต่างกัน การเลือกวิธีการควรคำนึงถึงความเหมาะสมด้านข้อกำหนดของแต่ละประเทศ ค่าใช้จ่าย ความปลอดภัย และต้องระวังการปลดปล่อยโลหะออกจากชีวมวลของพืชที่อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนซ้ำ การวิจัยในหัวข้อนี้ยังคงต้องศึกษาให้ถี่ถ้วนต่อไป [44]

5. สรุป

สารหนูจัดเป็นสารมลพิษสำคัญที่พบปนเปื้อนในดินและน้ำ โดยเฉพาะน้ำใต้ดิน การทำเหมืองแร่และขยะอิเล็กทรอนิกส์จัดเป็นแหล่งที่มาที่สำคัญของสารหนูที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และทำให้เกิดการปนเปื้อนในพืชอาหารตามมา ดังนั้น การบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดการสัมผัสสารหนูของมนุษย์ การใช้พืชเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนทั้งในน้ำและในดิน มีรายงานเกี่ยวกับกลไกพืชที่หลากหลายในการกำจัดสารหนูออกจากสิ่งแวดล้อมทั้งในพืชน้ำและพืชบก พืชที่ไม่ได้ใช้เป็นพืชอาหารหลายชนิด เช่น ไม้ดอกไม้ประดับ วัชพืช รวมทั้งพืชวงศ์หญ้าเป็นกลุ่มที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้บำบัดสารหนูในสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากสภาวะทางสิ่งแวดล้อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของพืชในการบำบัดสารหนู การเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสารหนูของพืชจึงเป็นประเด็นที่มีการศึกษามากมาย การเติมฟอสเฟตจัดเป็นวิธีที่เหมาะสมในการเพิ่มการสะสมสารหนูของพืช นอกจากนั้น การปลูกพืชที่สะสมสารหนูได้ร่วมกับพืชเศรษฐกิจยังช่วยเพิ่มผลผลิตและลดการสะสมสารหนูในพืชเศรษฐกิจได้ด้วย การ

กำจัดชีวมวลของพืชหลังการบำบัดเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง และวิธีที่สามารถนำไปใช้ต่อยอดในการผลิตพลังงานได้ ย่อมเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

6. References

- [1] Naja, G.M. and Volesky, B., 2009, Toxicity and Sources of Pb, Cd, Hg, Cr, As and Radionuclides in the Environment, pp. 14-58, In Wang, L.K., Chen, J.P., Hung, Y. and Shammasm N.K. (Eds), Heavy Metals in the Environment, Taylor & Francis's Group, Boca Raton.
- [2] Zhao, E.J., Ma, J.F., Meharg, A.A. and McGrath, S.P., 2009, Arsenic uptake and metabolism in plants, *New Phytol.* 181: 777-794.
- [3] National Institute of Environmental Health Sciences, Arsenic, Available Sources: <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/arsenic/index.cfm>, September 5, 2021.
- [4] Berg, E.C. and Borges, A.C., 2020, Use of plants in the remediation of arsenic-contaminated waters, *Water Environ. Res.* 92: 1669-1676.
- [5] World Health Organization, Arsenic, Available Source: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>, September 5, 2021.
- [6] Kumar, V., Parihar, R.D., Sharma, A., Bakshi, P., Sidhu, G.P.S., Bali, A.S., Karaouzas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A.K., Gyasi-Agyei, Y. and Rodrigo-Comino, J., 2019, Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses, *Chemosphere.* 236: 124364.
- [7] Rahman, M. and Hasegawa, H., 2011, Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes, *Chemosphere.* 83: 633-646.
- [8] Liu, H., Liu, R., Qu, J. and Zhang, G., 2009, Arsenic Pollution: Occurrence, Distribution, and Technologies, pp. 225-232, In Wang, L.K., Chen, J.P., Hung, Y. and Shammasm, N.K. (Eds.), Heavy Metals in the Environment, Taylor & Francis's Group, Boca Raton.
- [9] Krumova, K., Nukolovska, M. and Groudeva, V., 2008, Isolation and identification of arsenic-transforming bacteria from arsenic contaminated sites in Bulgaria, *Biotechnol. Biotechnol. Equip.* 22(2): 721-728.
- [10] Mitra, A., Chatterjee, S., Moogouei, R. and Gupta, D.K., 2017, Arsenic accumulation in rice and probable mitigation approaches: A review, *Agron.* 7: 67.
- [11] Aksorn, E. and Visoottiviset, P., 2004, Selection of suitable emergent plants for removal of arsenic from arsenic contaminated water, *ScienceAsia.* 30: 105-113.
- [12] Tiankao, W. and Chotpantararat, S., 2018, Risk assessment of arsenic from contaminated soils to shallow groundwater in Ong Phra Sub-District, Suphan Buri Province, Thailand, *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 19: 80-96.
- [13] Sukreeyapongse, O., Tepwituksakit, C. and Notesiri, N., 2009, Arsenic in Soil, Water and Plant at Contaminated Sites and in

- Agricultural Soil of Thailand, Available source: http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/marco/marco2009/english/W1-14-2_Sukreeyapongse_Orathai.pdf, January 30, 2022.
- [14] Weerasiri, T., Wirojanagud, W. and Srisatit, T., 2014, Assessment of potential location of high arsenic contamination using fuzzy overlay and spatial anisotropy approach in iron mine surrounding area, *Sci. World J.* 2014: 905362.
- [15] Vassanadumrongdee, S., 2015, Electronic waste situation, *Environ. J.* 19 (3): 1-18. (In Thai)
- [16] Wittayaanumas, S., 2017, Electronic Waste Management in Thailand, TDRI Report, Volume 133, October, 2017, Available Source: <https://tdri.or.th/wp-content/uploads/2018/04/wb133.pdf>, November 23, 2020.
- [17] Land Development Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Soil Management Data, Available Sources: https://www.ldd.go.th/Web_Soil/polluted.htm, September 5, 2021. (In Thai)
- [18] Yan, A., Wang, W., Tan, S.W., Mohd Yusof, M.L., Ghosh, S. and Chen, Z., 2020, Phytoremediation: A Promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land, *Front. Plant Sci.* 11: 359.
- [19] Roy, D., Sreekanth, D., Pawar, D., Mahawar, H. and Barman, K. K., 2021, Phytoremediation of Arsenic Contaminated Water Using Aquatic, Semi-Aquatic and Submerged Weeds. In Mendes, K.F., de Sousa, R.O. and & Mielke, K.C. (Eds.), *Biodegradation Technology of Organic and Inorganic Pollutants*. IntechOpen. Available Sources: <https://doi.org/10.5772/intechopen.98961>
- [20] Iqbal, K.K. and Nasrullah., 2019, Phytoremediation of arsenic in soil & water, *Res. & Rev.: J. Bot. Sci.* 8(3): 9-16.
- [21] de Campos, F.V., de Oliveira, J.A., da Silva, A.A., Ribeiro, C. and dos Santos Farnese, F., 2019, Phytoremediation of arsenite-contaminated environments: is *Pistia stratiotes* L. a useful tool?, *Ecol. Indic.* 104: 704-801.
- [22] Irshad, S., Xie, Z., Nawaz, A., Wang, J., Luo, Y., Wang, Y., Mehmood, S., Mao, Q. and Faheem, M., 2020, Influence of aquatic pH on chemical speciation, phytochelation and vacuolar compartmentalization of arsenic in *Vallisneria denseserrulata* (Makino), *Int. J. Phytorem.* 22(11): 1147-1155.
- [23] Jasrotia, S., Kansal, A. and Mehra, M., 2017, Performance of aquatic plant species for phytoremediation of arsenic-contaminated water, *Appl. Water Sci.* 7: 889-896.
- [24] Zhao, Y., Zhen, Z., Wang, Z., Zeng, L. and Yan, C., 2020, Influence of environmental factors on arsenic accumulation and biotransformation using the aquatic plant species *Hydrilla verticillate*, *J. Environ. Sci.* 90: 244-252.
- [25] Rahman, M.A., Hasegawa, H., Ueda, K., Maki, T., Okumura, C. and Rahman, M.M., 2007, Arsenic accumulation in duckweed (*Spirodela polyrhiza* L.): A good option

- for phytoremediation, *Chemosphere*. 69: 493-499.
- [26] Onyia, P.C., Ozoko, D.C. and Ifediegwu, S.I., 2021, Phytoremediation of arsenic-contaminated soils by arsenic hyperaccumulating plants in selected areas of Enugu State, Southeastern, Nigeria, *Geol. Ecol. Landscapes*. 5(4): 308-319.
- [27] ud Din Ahmad, F., Ahmad, N., Masood, K.R., Hussain, M., Malik, M.F. and Qayyum, A., 2018, Phytoremediation of arsenic-contaminated soils by *Eucalyptus camaldulensis*, *Terminalia arjuna* and *Salix tetrasperma*, *J. Appl. Bot. Food Qual.* 91: 8-13.
- [28] Chintakovid, W., Visoottiviseth, P., Khokiatwong, S. and Lauengsuchonkul, S., 2008, Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand, *Chemosphere*. 70: 1532-1537.
- [29] Cho, Y., Bolick, J.A. and Butcher, D.J., 2009, Phytoremediation of lead with green onions (*Allium fistulosum*) and uptake of arsenic compounds by moonlight ferns (*Pteris cretica* cv Mayii), *Microchem. J.* 91: 6-8.
- [30] Singh, S. and Fulzele, D.P., 2021, Phytoextraction of arsenic using a weed plant *Calotropis procera* from contaminated water and soil: growth and biochemical response, *Int. J. Phytorem.* 23 (12): 1310-1318.
- [31] Yang, J., Hang, Z., Jiang, N., Li, Z., Bonheur, G. and Zu, Y., 2021, Comparison of cadmium and arsenic accumulation characteristics and remediation potential of different forage plants, *IOP C. Ser. Earth Env.* 787: 012057.
- [32] Sampanpanish, P. and Suwattiga, P., 2017, Removal of arsenic and manganese from the tailing storage facility of a gold mine using *Vetiveria zizanioides*, *Bambusa bambos* and *Pennisetum purpureum*, *Soil Environ.* 36(2): 114-119.
- [33] Yanitch, A., Kadri, H., Frenette-Dussault, C., Jolya, J., Pitrea, F.E. and Labrecque, M., 2020, A four-year phytoremediation trial to decontaminate soil polluted by wood preservatives: Phytoextraction of arsenic, chromium, copper, dioxins and furans, *Int. J. Phytorem.* 22(14): 1505-1514.
- [34] Mehmood, T., Liu, C., Niazi, N.K., Gaurav, G.K., Ashraf, A. and Bibi, I., 2021, Compost-mediated arsenic phytoremediation, health risk assessment and economic feasibility using *Zea mays* L. in contrasting textured soils, *Int. J. Phytorem.* 23(9): 899-910.
- [35] Niazi, N.K., Bibi, I., Fatimah, A., Shahid, M., Javed, M.T., Wang, H., Ok, Y.S., Bashir, S., Murtaza, B., Saqib, Z.A. and Shakoor, M.B., 2017, Phosphate-assisted phytoremediation of arsenic by *Brassica napus* and *Brassica juncea*: Morphological and physiological response, *Int. J. Phytorem.* 19(7): 670-678.
- [36] Huang, S.Y., Zhuo, C., Du, X.Y. and Li, H.S., 2021, Remediation of arsenic-contaminated paddy soil by intercropping aquatic

- vegetables and rice, *Int. J. Phytorem.* 23(10): 1021-1029.
- [37] Song, U. and Park, H., 2017, Importance of biomass management acts and policies after phytoremediation, *J. Ecol. Environ.* 41: 13.
- [38] Liu, Z. and Tran K.-Q., 2021, A review on disposal and utilization of phytoremediation plants containing heavy metals. *Ecotox. Environ. Safe.* 236: 112821.
- [39] Ghosh, D. and Maiti, S.K., 2021, Biochar assisted phytoremediation and biomass disposal in heavy metal contaminated mine soils: A review, *Int. J. Phytorem.* 23(6): 559-576.
- [40] Edgar, V.N., Fabián, F.-L., Mario, P.-C.J. and Ileana, V.R., 2021, Coupling plant biomass derived from phytoremediation of potential toxic-metal-polluted soils to bioenergy production and high-value by-products - A review, *Appl. Sci.* 11: 2982.
- [41] Dinh, T., Dobo, Z. and Kovacs, H., 2022, Phytomining of noble metals – A review, *Chemosphere.* 286: 131805.
- [42] Li, J., Zhang, Y., Shi, S. and Tu, M., 2020, Effect of residual extractable lignin on acetone–butanol–ethanol production in SHF and SSF processes, *Biotechnol. Biofuels.* 13: 67.
- [43] Liu, Z., Xie, S., Lin, F., Jin, M. and Yuan, J.S., 2018, Combinatorial pretreatment and fermentation optimization enabled a record yield on lignin bioconversion, *Biotechnol. Biofuels.* 11: 21.
- [44] Song, U. and Park, H., 2017, Importance of biomass management acts and policies after phytoremediation, *J. Ecol. Environ.* 41: 13.