



การบำบัดสารหนูโดยวิธีพืชบำบัดในดินและตะกอนดิน: กลไกและการจัดการ

Arsenic Phytoremediation in Soil and Sediment: Mechanism and Management

จอมจันทร์ นทีวัฒนา¹

บทคัดย่อ

สารหนูถูกนำมาใช้ในกิจกรรมของมนุษย์มากมาย ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ จึงมีการหาแนวทางในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้แก่ วิธีพืชบำบัด ซึ่งประกอบด้วย 5 กระบวนการได้แก่ 1) ไฟโตแอกควิมูเลชัน หรือไฟโตแอคแทรกชัน 2) ไฟโตคีราเดชัน หรือไฟโตทรานส์ฟอร์เมชัน 3) ไฟโตโวลลาไทไลเซชัน 4) ไฟโตสโตบิไลเซชัน และ 5) เพลท แอสซีส ไบโอบีโอดีเอชัน โดยมีพืชหลายชนิดที่มีการนำมาใช้บำบัดสารหนูประกอบด้วย พืชน้ำและพืชบกชนิดต่าง ๆ กลไกการดูดสะสมสารหนูของพืชขึ้นกับชนิดของสารหนู โดยการดูดสะสมอาร์เซเนตผ่านตัวขนส่งเดียวกับฟอสฟอรัส และการดูดสะสมอาร์เซไนด์ผ่านอะควากลิเซอโรโพริน การดูดสะสมสารหนูและการเคลื่อนย้ายสารหนูของพืชจะขึ้นกับ ความเข้มข้นสารหนู ชนิดของสารหนู และสภาวะแวดล้อมเช่น ความเป็นกรด-ด่าง ผลกระทบของสารหนูที่มีต่อพืชคือ ส่งผลต่อการเจริญเติบโต การแพร่พันธุ์ โครงสร้าง และการทำงาน โดยวิธีการที่พืชตอบสนองต่อสารหนูประกอบด้วย การควบคุมออกซิเดทีฟ สเตรสในพืช โดยผลิตสารต้านอนุมูลอิสระ การแสดงคุณสมบัติเป็นไฮเปอร์แอคควิมูเลชัน ไฟโตแอคแทรกชัน การสังเคราะห์ไฟโตคีเลติน และการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบออสโมไลต์ สำหรับวิธีการบำบัดและกำจัดพืชที่ผ่านการบำบัดสารหนูได้แก่ การบดอัด การนำมาทำเป็นพลังงานเช่น การเผาหรือการทำเป็นถ่าน การหมัก และการฝังกลบแบบปลอดภัย

¹คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

ABSTRACT

Arsenic has been widely used for many human activities resulting in environmental contamination and health risk. Then there are many solutions for arsenic remediation in environment. Phytoremediation is especially effective and friendly method. It consisted of 5 methods being 1. phytoaccumulation or phytoextraction 2. phytodegradation or phytotransformation 3. phytovolatilization 4. Phytostabilization 5. plant-assisted bioremediation. Many kinds of plants are allowed to treat arsenic including aquatic and terrestrial plants. Mechanisms of accumulation depend on arsenic forms. Pathway of arsenate accumulation transfers by phosphate transporter and arsenite are accumulated by using aquaporins/aquaglyceroporins channel. Factors of Arsenic accumulation and transportation depend on concentration and speciation arsenic as well as environmental conditions such as pH. Arsenic contaminated environment exhibit the decrease in their growth rate and reproduction. Moreover they change structure, physiology and function. Plants processes respond to arsenic include controlling oxidative stress by antioxidants, being hyperaccumulation and phytoextraction of arsenic, synthesizing phytochelatin, and changing in osmolytes content. Remediation methods of treated plants are compaction, energy production, and fermentation. In addition disposal strategy is secure landfill.

คำสำคัญ: สารหนู พิษบำบัด ไฟโตแอคคิวมูเลชันหรือไฟโตแอคแทรกชัน ไฟโตดีกราเดชันหรือไฟโตทรานส์ฟอร์เมชัน ไฟโตโวลลาไทล์ไลเซชัน ไฟโตสแตบิไลเซชัน เพลทแอสซิสไบโอรีเมดิเอชัน

Keywords: Arsenic, Phytoremediation, Phytoaccumulation or phytoextraction, Phytodegradation or phytotransformation, Phytovolatilization, Phytostabilization, Plant-assisted bioremediation

บทนำ

สารหนูเป็นธาตุกึ่งโลหะ มีเลขอะตอมเท่ากับ 33 มีความเข้มข้นในเปลือกโลกประมาณ 1.5 ส่วนในล้านส่วน โดยพบมากในถ่านหิน รวมทั้งน้ำมันปิโตรเลียม สารหนูถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์ การเกษตร โลหะวิทยา และอิเล็กทรอนิกส์ การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นได้ทั้งในดิน ตะกอนดิน น้ำบาดาล และน้ำใต้ดิน ซึ่งเกิดจากธรรมชาติและมนุษย์ ปรากฏใน 4 รูปแบบ ได้แก่ อาร์เซเนต [arsenate, As(+5)] อาร์เซไนต์

[arsenite, As(+3)] อาร์เซนิค [arsenic, As(0)] และ อาร์ซีน [arsine, As(-3)] และอาจพบในรูปสารประกอบอินทรีย์จำพวกสารอนุพันธ์ของเมธิล (methylated derivatives) (Sharma and Sohn, 2009) การปนเปื้อนสารหนูในสิ่งแวดล้อมส่วนมากมาจากการถลุงแร่ การเผาไหม้ถ่านหิน สารเคมีทางการเกษตร ยารักษาเนื้อไม้ สารเคมีที่ใช้กับปศุสัตว์ และการเผาขยะ ซึ่งมีปริมาณการปล่อยสารหนูสู่สิ่งแวดล้อมรวมกันถึงปีละหลายหมื่นตัน (Jorg, 2000)

พื้นที่กว่า 70 ประเทศเป็นพื้นที่เสี่ยงภัยจากสารหนู ซึ่งนับได้ว่าเป็นอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิต โดยมีประชากรจำนวน 150 ล้านคนได้รับผลกระทบ และประมาณ 110 ล้านคนอาศัยใน 10 ประเทศทั้งในเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ อินเดีย บังคลาเทศ ปากีสถาน จีน ไต้หวัน เนปาล ลาวพม่า เวียดนาม และกัมพูชา (Jorg, 2000; Hugh and Peter, 2009 และ Subhas et al., 2013) มีรายงานว่า พื้นที่ที่ประสบปัญหาสารหนูแรงได้แก่ แคว้นเวสต์ เบงกอล (west Bengal) ในประเทศอินเดีย มีผู้ป่วยเรื้อรังจากพิษสารหนูจำนวนมาก โดยพบสารหนูในน้ำมีความเข้มข้นมากกว่า 4,000 ไมโครกรัมต่อลิตร (Subhas et al., 2013) นอกจากนี้ Ravenscroft (2011) รายงานว่า ในบังคลาเทศมีคน 27 ล้านคนดื่มน้ำที่มีสารหนูมากกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลิตร และอีก 50 ล้านคน ดื่มน้ำปนเปื้อนสารหนูเกินมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO, 2011) คือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับในประเทศไทยพบพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากสารหนูที่สำคัญได้แก่ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งอดีตเคยมีการทำเหมืองแร่ดีบุก โดยจากรายงานกรมทรัพยากรธรณีพบราษฎรมีความผิดปกติเกี่ยวกับผิวหนังจำนวนกว่า 1,000 คนในปี 2531 และในปี 2535 มีการตรวจเลือดในกลุ่มนักเรียนที่อาศัยในบริเวณดังกล่าวพบว่า มีสารหนูเกินมาตรฐานถึงร้อยละ 87 โดยความเข้มข้นสารหนูที่พบในบริเวณดังกล่าวมีในน้ำใต้ดินสูงถึง 5.11 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับในดินพบสารหนูเข้มข้นถึง 168.10–174.80 มิลลิกรัมต่อลิตร และตะกอนท้องน้ำพบ 212.11–305.00 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสาเหตุเกิดจากกองกากแร่ที่ปนเปื้อนสารหนูในปริมาณเข้มข้นและการชะล้างจากบริเวณที่ปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม (อนงค์, 2540)

จากผลกระทบที่รุนแรงของสารหนูในสิ่งแวดล้อม นำมาสู่การค้นคว้าวิจัยเพื่อหาแนวทางการบำบัดด้วยวิธีต่าง ๆ เกือบ 3 ทศวรรษ วิธีพิชบำบัดถูกพัฒนาขึ้นจากความรู้ในหลายสาขาวิชาาร่วมกัน เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมในการบำบัดสารพิษ วิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาใช้อย่างแพร่หลายในประเทศต่าง ๆ เช่น สหรัฐอเมริกา ยุโรป และเอเชียใต้ ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปนเปื้อนในดิน ตะกอนดิน และน้ำ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์โดยตรง ปัจจุบันพิชถูกนำมาใช้บำบัดโลหะมีพิษ สารกัมมันตรังสี และสารอินทรีย์บางประเภท แม้ว่าสารพิษจำพวกโลหะจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในดินเหมือนสารอินทรีย์ แต่วิธีการพิชบำบัดสามารถเคลื่อนย้ายและเปลี่ยนรูปโลหะบางประเภท เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ปนเปื้อน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดการปนเปื้อนโดยอาศัยธรรมชาติ และมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายมวลสารที่มีความเข้มข้นน้อย ซึ่งต้องใช้ต้นทุนสูงมากในการบำบัด (Ghosh and Singh, 2005 และ Hazrat, et al., 2013)

นอกจากนี้ข้อดีของวิธีพิชบำบัดคือ สามารถบำบัดได้ทั้งในและนอกพื้นที่ โดยสารพิชเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ อนินทรีย์ หรือ กัมมันตรังสี นอกจากนี้วิธีนี้ยังไม่เข้าไปก่อควนดินเหมือนวิธีอื่น ๆ รวมทั้งมีความสะอาด ราคาถูก ไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ พืชที่ผ่านการบำบัดสามารถนำมาสกัดเอาโลหะมีค่าที่พิชสะสมไว้ออกมา โดยวิธีการสกัดจากแร่เรียกว่า ไบโอ-ออเร (bio-ore) หรือสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานความร้อน (thermal energy) แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือสามารถบำบัดดิน หรือตะกอนดินได้ในระดับความลึกของรากพืช และใช้เวลานานหลายปี บำบัดได้เฉพาะสารพิษที่มีความเข้มข้นไม่สูงมาก รวมทั้งการเติบโตของพืชยังถูกจำกัดด้วยสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ โรคและแมลง รวมไปถึงชนิดพืชที่เลือกมาบำบัดควรมี

ลักษณะเป็นพืชท้องถิ่น โตเร็ว มวลมาก มีประสิทธิภาพในการบำบัด สามารถเคลื่อนย้ายสารพิษมาสู่ส่วนเหนือดินได้ดี เก็บเกี่ยวง่าย วงชีวิตไม่ยาวนาน และไม่ควรเป็นพืชอาหารของมนุษย์และสัตว์ เพราะจะทำให้สารพิษหลุดเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (Ghosh and Singh, 2005 และ Jae, 2013)

1. เทคนิคของวิธีพืชบำบัด

ไฟโตรเรเมเดชัน (phytoremediation) เป็นกระบวนการที่ใช้พืช เพื่อกำจัดความเป็นพิษของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม โดยมีกลไกในต้นพืชเป็น 2 รูปแบบดังต่อไปนี้ การดูดสะสมแล้วเคลื่อนย้าย เพื่อนำไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช หรือการดูดสะสมแล้วเคลื่อนย้าย เพื่อนำไปย่อยสลาย (Vamerali et al., 2010) โดยประกอบด้วย 5 กระบวนการหลักดังนี้ โดยกระบวนการแรกได้แก่ ไฟโตแอกคิวมูลชัน (phytoaccumulation) หรือไฟโตแอกแทรกชัน (phytoextraction) เป็นกระบวนการที่พืชดูดสะสมสารพิษจากดินและน้ำที่ปนเปื้อนแล้วลำเลียงเคลื่อนย้ายเข้าสู่ต้นพืชและสะสมในส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก ลำต้น ใบ โดยจะไม่มีการย่อยสลายสารพิษที่ผ่านการบำบัดออกจากรากแล้วเคลื่อนย้ายออกมาก่อน หรือนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย (Sakakibara et al., 2007) มีการศึกษาการใช้กระบวนการนี้ในไฮเปอร์แอกคูมิวเลติง เพลท (hyperaccumulating plant) ที่ทนทานสารหนูในสิ่งแวดล้อม (Vamerali et al., 2010) กระบวนการที่สองได้แก่ ไฟโตดีกราดชัน (phyto-degradation) หรือไฟโตทรานส์ฟอร์เมชัน (phyto-transformation) เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปหรือการย่อยสลายสารมลพิษผ่านทางวิถีเมแทบอลิซึม จนมีพิษน้อยลง หรือไม่มีเลย โดยจะเปลี่ยนรูปเป็นสารตัวกลางอื่น หรือสารผลิตภัณฑ์อื่น เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อตัวพืชเอง เกิด

จากกระบวนการทางชีวภาพเช่น การเกิดปฏิกิริยาคอนจูเกชัน (conjugation reaction) (Shiny et al., 2010) สำหรับกระบวนการที่สามได้แก่ ไฟโตโวลติไลเซชัน (phyto-volatilization) เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปสารพิษให้เป็นสารระเหยได้ที่มีความเป็นพิษน้อยลง และปล่อยออกไปจากต้นพืชผ่านทางปากใบ กระบวนการที่สี่คือ ไฟโตสเตบิไลเซชัน (phyto-stabilization) เป็นกระบวนการสร้างความเสถียรไม่ให้ออกไป สารพิษแพร่กระจายออกไป โดยทำให้เกิดการตกตะกอน หรือลดการละลายน้ำลง ซึ่งเกิดขึ้นโดยการปล่อยสารบางชนิดออกมาจากรากพืช (Sakakibara et al., 2007) กระบวนการสุดท้ายได้แก่ เพลทแอสซิสต์ไบโอรีเมเดชัน (plant-assisted bioremediation) เป็นกระบวนการเร่งการย่อยสลาย ที่พืชทำงานร่วมกับจุลินทรีย์ในดินโดยแบ่งเป็น 2 กระบวนการย่อยคือ ไรโซฟิวเทรชัน (rhizofiltration) และไรโซสตีมูลชัน (rhizostimulation) กลไกที่เกิดขึ้นได้แก่ พืชจะปล่อยของเหลวที่เรียกว่า แอคซูเดต (exudates) ซึ่งประกอบด้วย กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน น้ำตาล และเมือก เพื่อช่วยปรับสภาพให้เหมาะสมแก่การดำรงชีวิต และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ จุลินทรีย์จะช่วยย่อยสลายสารพิษที่เป็นอันตรายต่อพืช รวมทั้งช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ที่ก่อโรคและวัชพืชต่าง ๆ สร้างความเสถียรแก่โครงสร้างดินบริเวณโดยรอบรากพืช กระบวนการไรโซฟิวเทรชัน เมื่อมีการดูดสะสมสารพิษเข้าไปจะเกิดการกรองโดยพืชและจุลินทรีย์ที่ปรารากพืชซึ่งอยู่ในน้ำ เป็นการบำบัดสารพิษที่ปนเปื้อนในน้ำ และกระบวนการไรโซสตีมูลชัน คือ กระบวนการที่แบคทีเรียกลุ่มพืจีพีอาร์ (PGPR; plant growth promoting rhizobacteria) เข้าไปกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช โดยแบคทีเรียจะอาศัยบริเวณรากพืช ซึ่งจะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี ทนทานต่อความแห้งแล้งและโรคพืช

รวมทั้งช่วยย่อยสลายสารพิษที่ปนเปื้อนดินบริเวณโดยรอบ (Rajkumat et al., 2012)

ในการพัฒนาด้านไฟโตรีเมเดชันมีการใช้ความรู้หลากหลายสาขาสมาผสมผสานกัน โดยมุ่งเน้นการศึกษากลไกการดูดสะสมสารหนูในพืช พืชจะสะสมสารหนูผ่านทางรากดูดซึมของรากโดยช่องทางเดียวกับวิธีพอสพอรัสคือ แอคทิฟ อะโปพลาสติก (active apoplatic) หรือกลไกซิมพลาสติก (symplastic mechanism) เพื่อเคลื่อนย้ายสารหนูสู่ส่วนบนของลำต้นพืช หรือเก็บไว้ที่หน่อหรือไหลของพืช (Virender and Mary, 2009)

2. พืชที่มีการศึกษาเพื่อการบำบัดสารหนู

2.1 พืชน้ำ

พุทธรักษา (*Canna L.*) กกอียิปต์ (*Cyperus papyrus L.*) บอน (*Colocasia esculenta L.*) และธูปฤาษี (*Typha angustifolia L.*) ถูกนำมาใช้ในการดูดสะสมสารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิดได้แก่ อาร์เซนิตและอาร์เซนไนต์ มีการดูดสะสมอาร์เซนิตมากกว่าอาร์เซนไนต์ และมีประสิทธิภาพดีในการดูดสะสม โดยพุทธรักษาสะสมที่ส่วนลำต้นส่วนใต้ดินคือ เหง้า และราก มากกว่าส่วนเหนือดินคือ ลำต้น และใบ กกอียิปต์เป็นพืชที่มีการสะสมสูง ลำดับของส่วนที่มีการสะสมจากมากไปน้อยได้แก่ ราก ใบ ลำต้น และไหล พืชชนิดนี้มีความเหมาะสมในการบำบัด รวมทั้งเป็นพืชที่มีมวลมาก จึงถูกเลือกให้เป็นพืชบำบัดสารหนูในพื้นที่ชุ่มน้ำ บอนถูกนำมาทดสอบเพื่อบำบัดสารหนู มีหัวขนาดใหญ่อยู่ใต้ดิน หน่อ และมียาวชีวภาพมาก พบว่า มีการสะสมที่หัวใต้ดินและรากเป็นจำนวนมาก รองลงมาได้แก่ ใบและลำต้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sannop (2011) ที่พบว่า บอนและกกอียิปต์มีการสะสมมากในราก ธูปฤาษีมีการสะสมสารหนูมากที่สุด สำหรับต้นที่ใส่อาร์เซนไนต์ แต่ในต้นที่มีการใส่อาร์เซนิตพบว่า มีการ

สะสมสูงสุดที่ราก พืชชนิดนี้ที่มีความแตกต่างจากพืชอื่นที่ทดสอบ เนื่องจากสามารถสะสมสารหนูได้ดีในสภาพที่เป็นอาร์เซนไนต์ ธูปฤาษีเป็นพืชที่มีการนำมาทดสอบมากที่สุดตัวหนึ่ง เนื่องจากมีความทนทานสามารถขึ้นได้ทุกที่บริเวณที่มีน้ำขัง และมีมวลมาก โดยพบว่า ประสิทธิภาพของพืชน้ำที่ต้นไหลพื้นน้ำเป็นพืชทางเลือกที่มีประสิทธิภาพดีในการบำบัดสารหนูในตะกอนดิน รวมทั้งมีความสะดวกในการเก็บเกี่ยว โดยเมื่อเปรียบเทียบ 4 ชนิดพบว่า กกอียิปต์เป็นพืชที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดใน 4 ชนิดที่ถูกนำมาทดสอบ (Kyambaddea et al., 2004; Jomjun et al., 2009a; 2009b; 2009c)

จอกหูหนู (butterfly fern; *Salvinia*) เป็นพืชลอยน้ำขนาดใหญ่ พบได้ทั่วไป เจริญเติบโตรวดเร็ว มีศักยภาพในการบำบัดสารหนู ถูกนำมาทดลอง 2 ชนิดได้แก่ *Salvinia natans L.* และ *Salvinia minima* พบว่า มีประสิทธิภาพดี (Hoffman et al., 2004; Rahman et al., 2008) จอก (water lettuce; *Pistia Stratiotes L.*) เป็นสปีชีส์เดียวในตระกูลอะราชีเอ (Araceae) และสกุลพิสเทีย (*Pistia*) มีชื่อทั่วไปว่า วอเตอร์แคบเบจ (water cabbage) หรือวอเตอร์เลกตัส (water lettuce) เป็นพืชลอยน้ำ ถูกนำมาทดสอบบำบัดโลหะหนัก และสารหนูซึ่งพบว่า มีการดูดสะสมปริมาณมาก แต่เป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Zhang et al., 2008) สลัดน้ำ (watercress; *Nasturtium officinale R.Br.*, *Nasturtium microphyllum Boenn. ex Rchb.* หรือ *Rorippa nasturtium-aquaticum L.*, *Rorippa microphylla Boenn. ex Reichenb.*) เจริญเร็ว พบได้ทั่วไป ใช้น้ำเป็นอาหารได้ แต่มีการสะสมสารพิษอยู่มาก จากการเก็บตัวอย่างดิน น้ำในแม่น้ำ และทะเลสาบบริเวณที่ปนเปื้อน พบสารหนูสูงใน 2 สปีชีส์ ได้แก่ *Lepidium sativum L.* และ *Nasturtium microphyllum* มี

ความเสี่ยงต่อสุขภาพ หากบริโภคเข้าไป (Lee et al., 1991 และ Robinson et al., 2003) วอเตอร์วีต (waterweed; *Elodea canadensis*) และนิ้ดัลสไปเคอร์รัส (Needle spikerush; *Eleocharis acicularis*) โดย *E. Canadensis* เป็นพืชใต้น้ำ (submerge macrophyte) มีการศึกษาการดูดสารพิษจำพวกพลวง สารหนู ทองแดง และสังกะสีพบว่า มีศักยภาพสูงในการเป็นพืชบำบัดน้ำที่มีโลหะหนักสูง (Ha et al., 2009) เอสชไวท วอเตอร์วีต (*Esthwaite waterweed; Hydrilla verticillata*) พบได้ทั่วไปในน้ำสะอาด มีเพียงชนิดเดียวในวงศ์นี้ได้แก่ *H. verticillata* แต่แบ่งเป็นหลายสปีชีส์ นำมาทดสอบการดูดสะสม และการบำบัดสารหนู รวมทั้งโลหะหนักอื่น ๆ ซึ่งสามารถดูดโลหะหนักได้ดี แต่จะตายเมื่อความเข้มข้นโลหะหนักสูง ๆ โดยพืชนี้มีค่าปัจจัยสะสมชีวภาพ (bioaccumulation factor) หรือปัจจัยการเพิ่มความเข้มข้นของสาร (enrichment factor) สูงสุดได้ถึงประมาณ 11,000 (Pei-ying and Chang-zhou, 2011) แหน (duckweed) เป็นพืชลอยน้ำขนาดเล็ก มีการลดรูปเป็นใบแบนและเล็กเรียกว่า ฟรอนด์ (frond) ประกอบด้วย 4 สกล 34 สปีชีส์ ใช้แทนบำบัดน้ำจากเหมืองที่ปนเปื้อนสารหนูพบว่า ชนิดแหนเล็ก (*Lemna minor* L.) มีอัตราการเคลื่อนย้ายประมาณ 5% ผำ (*Wolffia globosa*) มีศักยภาพเป็นอาร์เซนิก ไฟโตฟิเตรชัน (arsenic phytofiltration) (Alvarado et al., 2008; Zhang et al., 2009; Zhang et al., 2011) แหนแดง (water fern; *Azolla*) เป็นเฟิร์นลอยน้ำขนาดเล็ก พบได้ทั่วไป มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารพิษจากน้ำเสีย มีการศึกษาแหนแดง 3 ชนิด ในการดูดซับสารหนูได้แก่ *Azolla caroliniana* Willd, *Azolla filiculoides* L. และ *Azolla pinnata* R.Br ซึ่งพบว่าบริเวณใบของแหน (fronds) มีศักยภาพในการดูดซึมสูงสุด โดยสารหนูอินทรีย์และอนินทรีย์ ถูก

ดูดซับประมาณ 5% และ 25–60% ตามลำดับ (Zhang et al., 2008) ผักตบชวา (water hyacinth) เป็นพืชลอยน้ำ จัดอยู่ในสกุลอีซอร์เนีย (*Eichhornia*) ซึ่งประกอบด้วย 7 ชนิด พบได้ทั่วไป เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทนทานสูงต่อมลพิษ และมีความสามารถในการดูดสะสมโลหะหนัก และเคลื่อนย้ายสารหนูจากน้ำ (Alvarado et al., 2008; Rahman and Hasegawa, 2011)

2.2 พืชบก

พืชจำพวกเฟิร์นได้มีการนำมาทดสอบหลายสปีชีส์ (species) โดยคุณสมบัติหลักได้แก่ การเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลชันซึ่งสามารถดูดสะสมสารหนูได้ในปริมาณสูง (Sakakibara et al., 2007) โดยจากการศึกษาของ Andrew (2002) เกี่ยวกับการสะสมสารหนูในกลุ่มของ *Pteris* genus พบว่า *Pteris argyreaea*, *Pteris cretica chilsil*, *Pteris cretica crista*, *Pteris cretica mayii*, *Pteris cretica parkerii*, *Pteris cretica rowerii*, *Pteris longifolia* พบว่า มีการสะสมไนโบ (frond) เท่ากับ 361 1,358 1,506 1,239 2,493 1,425 และ 2,361 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ รวมทั้งยังศึกษาในกลุ่มของ Equisetales และ Blechnales พบว่า แม้จะไม่อยู่ในกลุ่มพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลชัน แต่ยังสามารถสะสมสารหนูในระดับสูงที่ใบประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเติบโตบนดินที่มีความเข้มข้นในระดับเดียวกัน โดยเฟิร์นที่ได้รับความนิยมในการนำมาบำบัดสารหนูได้แก่ *Pteris vittata* และ *Pteris cretica* (Muhammad, 2014) นอกจากนี้เฟิร์นชนิด *Pityrogrammacalomelanos* ยังถูกทดสอบในพื้นที่อำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราชพบว่า มีคุณสมบัติเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลชัน ซึ่งมีการสะสมสารหนูสูงกว่า 8,350 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมที่ใบ (frond) และ 88–310 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมที่ไรซอยด์ (rhizoid) และมีการ

สะสมเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตและจุลินทรีย์ในไรโซสเฟียร์ (rhizosphere bacteria) (Jankong, 2007; Kevin, 2002) รวมทั้งพื้นที่นี้ยังถูกบำบัดด้วยต้นดาวเรือง (Nugget marigold) พบว่า รากมีการสะสมสูงสุดเท่ากับ 720 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมในดินที่มีสารหนูเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับในลำต้นและรากพบว่า มีความเข้มข้น 531 และ 144 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อปลูกในดินที่มีสารหนูเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Watchara, 2008)

3. การดูดสะสมสารหนูของพืช

ชนิดของสารหนูที่พบอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้แก่ อาร์เซนไนต์ อาร์เซนเต กรดโมโนเมธิลอาร์โซนิค (monomethylarsonic acid; MMAA) และกรดไดเมธิลอาร์เซนิก (dimethylarsinic acid; DMAA) กลไกในการดูดสะสมสารหนูได้แก่ 1. การดูดสะสมแบบแอคทีฟผ่านตัวขนส่งฟอสเฟต (active uptake through phosphate uptake transporters) 2. การดูดสะสมแบบพาสซีฟผ่านอะควาไกลิเซอโรพอริน (passive uptake through aquaglyceroporins) และ 3. การดูดซับทางเคมีกายภาพบนผิวราก (physiochemical adsorption on root surface) โดยวิธีการแรกเป็นวิธีการที่พบได้บ่อยที่สุด สำหรับอีก 2 กลไกเป็นกลไกที่ช่วยสนับสนุน (Zhao et al., 2009) สำหรับกลไกการดูดสะสมแบบแอคทีฟผ่านตัวขนส่งฟอสเฟต พืชจะดูดซับอาร์เซนไนต์ในช่องทางเดียวกับการขนส่งฟอสเฟต แต่สำหรับอาร์เซนไนต์ กรดโมโนเมธิลอาร์โซนิค และกรดไดเมธิลอาร์เซนิกจะถูกเคลื่อนย้ายผ่านกลไกที่ 2 โดยเฉพาะอาร์เซนไนต์สามารถอธิบายได้ว่า อาร์เซนไนต์ถูกเคลื่อนย้ายผ่านทางรากโดยโนดูลิน-26-ไลค์ อิน-ทรินซิคเมมเบรนโปรตีน (nodulin-26-like intrinsic membrane protein; NIPs) ซึ่งเป็นวงศ์ย่อย (subfamily) ของอะควาโพริน สารหนูชนิด

อาร์เซนไนต์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปไม่มีประจุ ทำให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายโดยวิธีนี้ อาร์เซนไนต์จะถูกส่งผ่านพลาสมาเมมเบรน (plasma membrane) แล้วจึงผ่านอะควาโพริน หรืออะควาไกลิเซอโรพอริน กลไกที่ 3 การดูดซับทางเคมีกายภาพบนผิวราก เกิดขึ้นจากการออกไซด์ของเหล็กที่แขวนลอยอยู่บนผิวนอกของรากจะดูดซับและสะสมสารหนูเอาไว้ โดยจะดูดซับสารหนูทุกชนิดเอาไว้ แต่ *S. polyrhiza* L. จะใช้กลไกนี้ดูดซับอาร์เซนเตไว้อย่างชัดเจน และถูกแทรกแซงโดยฟอสเฟต (Rahman et al., 2008a)

สารหนูไม่ใช้ธาตุจำเป็นต่อพืช เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ ตามปกติความเข้มข้นของสารหนูในดินที่ไม่มีกรปนเปื้อนพบประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ในดินที่ปนเปื้อนอาจสูงถึง 30,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทางกรมเกษตรระดับที่ยอมรับได้คือ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งในพืชหากมีความเข้มข้นเพียง 5 พีพีเอ็ม ก็แสดงความเป็นพิษต่อพืช สารหนูในสิ่งแวดล้อมจำแนกตามออกซิเดทีฟสเตตส มี 4 รูป ได้แก่ (-3), (0), (+3), และ (+5) ซึ่งแต่ละรูปที่ปรากฏ จะส่งผลต่อความเป็นพิษแตกต่างกัน รูปที่พบบ่อยเมื่อ pH น้อยกว่า 2 ได้แก่ H_2AsO_4 ที่ pH 3-6 ได้แก่ $H_2AsO_4^{-1}$ ที่ pH 7-8 ได้แก่ $H_2AsO_4^{-1}$ และ $HAsO_4^{-2}$ ที่ pH 8-11 ได้แก่ $HAsO_4^{-2}$ และ ณ pH มากกว่า 11 ได้แก่ AsO_4^{-3} การดูดซึมและดูดซับสารหนู (sorption) ในดิน ทำให้เกิดการยับยั้งการเคลื่อนที่ของสารหนู ซึ่งกิจกรรมของสารหนูในสารละลายดินถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเชิงซ้อนที่พื้นผิว โดยหากผิวดินปรากฏออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ (oxides/hydroxides) ของอะลูมิเนียม แมงกานีส และเหล็กจะส่งผลต่อการดูดซึมและดูดซับ ซึ่งขึ้นกับคุณลักษณะของดินและค่าพีเอช กล่าวคือ ณ ค่าพีเอชเท่ากับ 4-7 อาร์เซนเตจะถูกดูดซับได้ดี ในรูปไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (hydrous oxides) สำหรับอาร์เซนไนต์จะถูกดูดซับได้ดี

ที่พืชเเข้เท่ากับ 7–10 แต่สภาวะที่อาร์เซนิตและอาร์เซไนต์จะถูกดูดซับได้ดีที่สุดคือ ณ พีเอช 5.5 และพีเอชสูงกว่า 8.5 ตามลำดับ (Virender and Mary, 2009)

การค้นพบเฟิร์นซึ่งมีความสามารถในการสะสมสารหนูได้สูง (hyperaccumulation plants) ก่อให้เกิดการบำบัดสารหนูในดินบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนโดยพืชจะสะสมอยู่บริเวณรากและสะสมน้อยลงตามลำต้นเหนือดินขึ้นไป การเปลี่ยนแปลงทางสรีระ โดยเข้าแทรกแซงกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช ส่งผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช โดยสารหนูจะเข้าไปก่อกวนกับหมู่ซัลไฮไดรล (sulhydryl, -SH) ในโปรตีนเกิดการแทรกแซงโครงสร้าง โดยเข้าไปแทนที่ธาตุสำคัญ และเข้ายับยั้งกิจกรรมชีวเคมีของพืช ความเข้มข้นของสารหนูที่สูงจะกระตุ้นการก่อรูปของอนุมูลอิสระและรีแอคทีฟ ออกซิเจน สปีชีส์ได้แก่ O_2^\cdot , OH^\cdot , และ H_2O_2 ผลจากการเกิดออกซิเดทีฟ สเตรส สารหนูจะแข่งขันกับฟอสเฟตในเอทีพี (ATP) โดยรูปที่ไม่เสถียรของอะดีโนซีน ไตรฟอสเฟต อาร์เซนิต [adenosine diphosphate-As(+5)] ส่งผลต่อการขัดขวางการไหลของพลังงานในเซลล์ (Zhao et al., 2009) อาร์เซนิตและฟอสเฟตมีสมบัติคล้ายกันจึงใช้ตัวขนส่ง (transporter) ชนิดเดียวกับที่อยู่ในพลาสมาเลมมาของราก จึงเกิดการแข่งขันกันเข้าสู่ต้นพืช ส่งผลให้เกิดการยับยั้งซึ่งกันและกัน การสะสมฟอสเฟตจึงเป็นหนทางในการลดการดูดสะสมสารหนูของพืช แต่ฟอสเฟตมีความเสถียรมากในช่วง pH ที่กว้างกว่าในดิน ทั้งฟอสเฟตและอาร์เซนิตจะปรากฏในสภาวะออกซิเดชัน สำหรับกลไกการดูดสะสมของฟอสเฟตจะอาศัยตัวขนส่งร่วม (co-transporter) ซึ่งมีประมาณ 100 ชนิด ในตระกูลฟอสเฟตทรานส์พอร์ตเตอร์วัน (phosphate transporter I (phi) family) ซึ่งปรากฏในรากเป็นส่วนใหญ่ แต่ผลกระทบของสารหนูจะเกิดที่หน่อไม่ใช่ราก เมื่อพืชดูดสะสมอาร์เซนิตผ่านทางราก

จะส่งบางส่วนไปยังหน่อผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ (Neera and Priyanka, 2011)

ปริมาณสารหนูในพื้นที่ปนเปื้อนลดลงอย่างมาก เนื่องมาจากออกซิแอนไอออนอาร์เซไนต์และอาร์เซนิต กลไกที่ลดความเป็นพิษในพืชคือ อาร์เซนิตจะเปลี่ยนรูปเป็นอาร์เซไนต์ในเนื้อเยื่อพืช แล้วขนส่งในรูปไดเมธิลอาร์เซนิกแอซิด (dimethyl arsenic acid) ไปยังหน่อและเก็บสะสมในรูปของอาร์เซไนต์-ทริสไธโอเลท คอมเพล็กซ์ [As(+3)-trithiolate complex] สำหรับสารหนูที่ตกค้างในรากจะพบในรูปอาร์เซไนต์-ทริส-กลูตาไธโอน [As(+3) -tris-glutathione] สารที่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปอาร์เซนิตไปเป็นอาร์เซไนต์ ได้แก่ ไธโอเลตโดเนอร์ (thiolate donors) ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งกลูตาไธโอน (glutathione; GSH) หรือไฟโตคีเลติน เอ็นโดจีนัส เพลนท์ เอ็มไซม์ อาร์เซนิต รีดักเตส [phytocheletins endogenous plant enzyme arsenate reductase (AcR)] (Neera and Priyanka, 2011) การดูดสะสมอาร์เซไนต์จะผ่านทางช่องทางขนส่งกลีเซอรอล (glycerol-transporting channel) ซึ่งไม่มีความเกี่ยวข้องกับอาร์เซนิต โดยการขนส่งอาร์เซไนต์จะแข่งขันกับกลีเซอรอล และอะควาโพริน (aquaporins) ซึ่งกลไกนี้เป็นการลดความเป็นพิษของสารพิษในพืช (Neera and Priyanka, 2011)

4. ผลกระทบของสารหนูดอพืช

สารหนูจะเข้าไปแทรกแซงกระบวนการเมแทบอลิซึม ส่งผลให้มวลชีวภาพลดลง รากและหน่อมีมวลลดลง รวมทั้งลดความสูงของลำต้น ความยาวของหน่อ อัตราการงอก และผลผลิต ทำให้สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป และส่งผลให้พืชตายได้เร็วที่สุด โดยมีการทดสอบในพืชหลายชนิดพบว่า มะเขือเทศมีการเปลี่ยนแปลงใบและราก ข้าวมีสรีระผิดปกติและเมล็ดข้าวมีจำนวนลดลง ในข้าวสาลีมีน้ำหนักของรากและหน่อ

ลดลง (Ahmed et al., 2006) สำหรับพืชน้ำเช่น ฐูบถาซี บอน พุทธรักษา และกะกืออีปีด มีมวลดลงอย่างเห็นได้ชัด ใบมีจำนวนลดลง ลำต้นเตี้ย และแครงแกรน มีจำนวนรากและหน่อลดลง (Jomjun, 2009b) เมื่อสารหนูมีความเข้มข้นสูงส่งผลต่อการดูดสะสมธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง มีการศึกษาใน *Pteris vittata* L. พบว่า เมื่อมีความเข้มข้นสารหนูน้อยในกิ่งจะมีการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม แต่ในหน่อมีการเพิ่มขึ้นของแมกนีเซียม แมงกานีส และสังกะสี การศึกษาในรากของ *Pisum sativum* L. มีการลดลงของฟอสฟอรัส การศึกษาในข้าวฟ่าง เมสควิท (mesquite) และลูปีน (lupine) เมื่อเจริญเติบโตในพื้นที่ปนเปื้อนสารหนู ความเข้มข้นของธาตุอาหารรองจะลดลง ความเข้มข้นของสารหนูจะเข้ายับยั้งการสะสมฟอสเฟต และทำลายเซลล์ (Stoeva and Bineva, 2003; Carbonell-Barrachina et al., 1998)

สารหนูส่งผลต่อการทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อ นำไปสู่ความไม่สมดุลของธาตุอาหารและน้ำ ลดความสามารถในการลำเลียงน้ำผ่านลำต้นของปากใบ มีการศึกษาในต้นโอ้ทพบว่า สารหนูส่งผลกระทบต่อกระบวนการหายใจ การสะสมสารอาหารและน้ำ และลดอัตราการคายน้ำ (transpiration potential) และค่าศักย์ในใบ (leaf water potential) โดยทำการวัดปริมาณน้ำในพืชตระกูลถั่วพบว่า มีการลดลงอย่างช้า ๆ (Stoeva and Bineva, 2003) สารหนูเข้าไปทำลายเนื้อเยื่อคลอโรพลาสต์ และก่อความไม่เป็นระบบ (disorganized) โดยส่งผลให้หน้าที่ของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลต่อการสังเคราะห์เม็ดสี นอกจากนี้สารหนูยังส่งผลต่ออัตราการจับตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ และกิจกรรมหน้าที่ของระบบแสง II ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง ซึ่งมีการทดสอบในต้นโอ้ทพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงการ

แลกเปลี่ยนก๊าซทางใบ เปลี่ยนแปลงอัตราคลอโรฟิลล์ ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence ratio; Fv/Fm) การสังเคราะห์แสงขององค์ประกอบของคาร์โรทีนอยด์ (carotenoid) และกิจกรรมหน้าที่ของระบบแสง II ลดลง โดยการศึกษาในต้นข้าวโพด มีการลดลงของอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกิจกรรมหน้าที่ของระบบแสง II อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารหนูเข้าไปทำลายเนื้อเยื่อคลอโรพลาสต์ และก่อความไร้ระบบของเนื้อเยื่อ แต่สำหรับใน *Pteris vittata* L. การรับสารหนูไม่ลดความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ (Singh et al., 2006)

5. การตอบสนองของพืชต่อสารหนู

การสร้างความทนทานและการบำบัดอาร์เซนิก สเตรสในพืช เริ่มต้นมาจากการปรับปรุงการเพาะปลูกในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารหนู โดยลดการดูดสะสมหรือจำกัดการเคลื่อนที่ไปสู่ส่วนต่าง ๆ เช่น ผลและเมล็ด รวมทั้งสารให้พืชมีการปรับตัวให้ทนทานต่อโลหะหนัก และไม่เกิดอาการพิษ สามารถเติบโตได้อย่างปกติ โดยอาศัยการตอบสนองทางชีวเคมีในวิธีการที่หลากหลายดังนี้ การสร้างพันธะกับไอออนของโลหะ การลดการไหลเข้าของโลหะ การสร้างสารต้านอนุมูลอิสระ และการลดรูปอาร์เซนิกไปเป็นอาร์เซนิกโดยเอมไซม์ในพืช (Garg and Manchanda, 2009)

5.1 การควบคุมออกซิเดทีฟ สเตรส (oxidative stress) ในพืชโดยสารต้านอนุมูลอิสระ

การรับออกซิเจนทำให้เกิดแอโรบิกเมแทบอลิซึมซึ่งจะไปกระตุ้นอนุมูลออกซิเจนได้แก่ซิงเกิลต์ ออกซิเจน (singlet oxygen; 1O_2), ซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (superoxide anion; O_2^-), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H_2O_2) และไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical; HO^\bullet) ซึ่งเป็นพิษ คือ เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว และ

นำไปสู่การเกิดการทำลายเซลล์โดยการเกิดออกซิเดชันกับไขมัน โปรตีน และกรดไดออกซีไรโบนิวคลีอิก แอซิด (deoxyribonucleic acid) ในเซลล์ ซึ่งรีแอกทีฟออกซิเจนสปีชีส์ (reactive oxygen species) ถูกผลิตขึ้นอย่างมากมาจากวิถีเมแทบอลิซึมในไมโทคอนเดรียของคลอโรพลาสต์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ โดยรีแอกทีฟออกซิเจนสปีชีส์สร้างจากการเคลื่อนย้ายจากสถานะพื้นไปสู่สถานะที่ถูกกระตุ้นในคลอโรฟิลล์ เพื่อผลิตซิงเกิ้ลต ออกซิเจน หรือโดยการรีดักชันออกซิเดชันออกซิเจนในปฏิกิริยาเมเธเลอร์ (Mehler reaction) จากการทดลองดังกล่าวพบว่า การรับสารหนูอินทรีย์จำนวนมากของพืชส่งผลต่อการสร้างรีแอกทีฟออกซิเจน สปีชีส์ในไมโทคอนเดรีย ซึ่งนับได้ว่าเป็นการสร้างอาการออกซิเดทีฟ สเตรส (oxidative stress syndrome) ในพืชโดยเกิดในวิถีเมแทบอลิซึมเป็นหลัก ส่งผลให้เกิดการยับยั้งกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนในเนื้อเยื่อไทลาคอยด์ (thylakoid membranes) ส่งผลให้เกิดอาการพิษจากสารหนู (Garg and Manchanda, 2009)

รวมทั้งสารหนูจะเข้าไปกระตุ้นไลปิดเปอร์ออกซิเดชัน และเพิ่มการสะสมมาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอาร์เซนิก สเตรส (arsenic stress) โดยมีการวัดจากความเข้มข้นไทโอบาร์บาริค ไบโธริค แอซิด (thiobarbituric acid) ซึ่งสิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดการทำลายเซลล์ในที่สุด (Meloni et al., 2003) จากการศึกษาพบว่าอีกว่า ปริมาณที่สูงของไลปิด เปอร์ออกซิเดชันจับคู่กับปริมาณที่สูงของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเข้าไปทำลายคลอโรพลาสต์ ลดมวลชีวภาพของพืช ยับยั้งความเข้มของคลอโรฟิลล์และโปรตีนในพืช โดยดัชนีที่ใช้ชี้วัดอาร์เซนิก สเตรสที่สำคัญอีก 2 ชนิด ได้แก่ โททอลไธออล (total thiol) และมาลอนไดอัลดีไฮด์โดยพบว่า ความเข้มข้นรวมของไธออล

(thiol) จะสูงมากในปมราก (nodules) ตามด้วยใบ ลำต้น และรากของพืชที่เจริญในกระถางที่ใส่อาร์เซนเนต สำหรับระดับมาลอนไดอัลดีไฮด์ สูงที่สุดในรากตามด้วยปมราก แล้วไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช (Vazquez et al., 2008)

การป้องกันการทำลายของออกซิเดทีฟในพืชเกิดจากระบบการกำจัดอนุมูลอิสระ (radical scavenging systems) ประกอบด้วยสาร 2 กลุ่มได้แก่ สารประกอบจำพวกเอมไซม์ ตัวอย่างเช่น แอนติออกซิเดนท์ เอมไซม์ แอสคอร์เบท เพอร์ออกไซด์ (antioxidant enzyme ascorbate peroxidase) กลูตาไธโอน รีดักเตส (glutathione reductase) และซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส (superoxide dismutase) และอีกกลุ่มคือ สารประกอบที่ไม่ใช่เอมไซม์ได้แก่ กลูตาไธโอน (glutathione) คาโรทีนอยด์ (carotenoids) และแอสคอร์เบท (ascorbate) เมื่อพืชได้รับสารหนูจะเกิดกิจกรรมเปอร์ออกซิเดส (peroxidase activity) และไลปิด เปอร์ออกซิเดชันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่พืชแสดงอาการออกซิเดชัน สเตรส โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เกิดจากการสกัดโดยแคตตาเลส (catalase) และซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส และเพิ่มการก่อกำเนิดของซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (O_2^-) จากการรับโลหะหนัก ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มกิจกรรมของนิโคตินาไมด์ อะดีนีน ไดนิวคลีโอไทด์ ฟอสเฟต ออกซิเดส [nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH) oxidase activity] ซึ่งบางส่วนจะส่งผลเชื่อมต่อการเพิ่มการก่อกำเนิดของออกซิเจน และปฏิกิริยาวิสิจัสโมเนท (jasmonate pathway reaction) กับการเพิ่มกิจกรรมของซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส (superoxide dismutase activity) ซึ่งถูกทดสอบในข้าวโพดที่ได้รับอาร์เซนเนตและอาร์เซนเนต (Mylona et al., 1998)

พืชจำพวกเฟิร์นจะตอบสนองในการต่อต้านพิษของสารหนูมากกว่าการเกิดแอนติออกซิเดทีฟ (antioxidative) กล่าวคือ ไม่ได้เกิดเพียงซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส แคตตาลาส และแอสคอร์เบทเพอร์ออกซิเดส (ascorbate peroxidase) แต่จะเกี่ยวข้องกับกลไกการลดความเป็นพิษของสารหนู (detoxification mechanism) โดยไม่มีการเพิ่มเกี่ยวคอลเปอร์ออกไซด์ (guaiacal peroxide) หรือกลูตาไรโอนรีดักเทส (Srivastava et al., 2005) จากกิจกรรมที่เพิ่มขึ้นของแอนติออกซิเดทีฟ เอ็มไซม์ (antioxidative enzyme) และระดับที่ลดลงของกรดไรโอบาร์บิวทริก (thiobarbituric acid) ในพืชที่ทดลองใส่สารหนูพบว่า มีความสัมพันธ์ต่อการเป็นอาร์เซนิก ไฮเปอร์แอคคิวมูเลชันของเฟิร์น ทำให้ไม่ปรากฏอาการจากพิษจากสารหนูซึ่งแตกต่างจากการทดลองในข้าวสาลี นอกจากนี้ในการทดลองกับเฟิร์น *P. ensiformis* พบว่า มีการขาดอาร์เซนิก ดีไฮโดรแอสคอร์เบท (arsenic dehydroascorbate) มากกว่าใน *Pteris vittata* L. เนื่องจากดีไฮโดรแอสคอร์เบท (dehydroascorbate) จะถูกรีดกลับกลับไปเป็นแอสคอร์เบท (ascorbate) โดย กลูตาไรโอน และไฮออล ซึ่งแอสคอร์เบทเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีจำนวนมากที่สุดในพืช และมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ในพืชที่เป็นไฮเปอร์แอคคิวมูเลชัน เช่น *Pteris vittata* L. และ *P. ensiformis* จะมีการแสดงสมบัติของเอ็มไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระ 2 ตัวได้แก่ กลูตาไรโอนรีดักเทส และเอ็มไซม์แคตตาลาส (catalase enzyme) ในการต่อต้านพิษของสารหนูยังมีการทดสอบในพืชผักกาดเขียวปลี (Indian mustard) พบว่า พืชชนิดนี้จะลดการเกิดพิษของสารหนูโดยกลไกการต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant defense mechanism) (Geng et al., 2006)

5.2 พืชที่มีคุณสมบัติเป็นไฮเปอร์แอคคิวมูเลชัน (hyperaccumulation) ไฟโตเอกแทรกชัน (phytoextraction) ของสารหนูในพืช

พืชที่เป็นไฮเปอร์แอคคิวมูเลชันจะต้องมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ (bioaccumulation factor; BF) และปัจจัยการเคลื่อนย้าย (translocation factor; TF) โดยปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของโลหะในมวลพืชต่อความเข้มข้นของโลหะในดิน ซึ่งปัจจัยการสะสมทางชีวภาพจะบ่งชี้ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายโลหะจากดินไปยังพืช และปัจจัยการเคลื่อนย้ายคือ การเคลื่อนย้ายของโลหะจากส่วนที่อยู่ใต้ดินของพืชไปสู่ส่วนเหนือดิน ซึ่งหากพืชจะมีคุณสมบัติเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลชันจะต้องมี ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ และปัจจัยการเคลื่อนย้ายมากกว่า 1 รวมทั้งการสะสมแบบรวม (total accumulation) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สารหนูในมวลพืช การดูดสะสมสารหนูของพืชขึ้นกับชนิด และปริมาณของสารหนู การลดการดูดสะสมสารหนูสามารถทำได้โดยอาศัยฟอสเฟต ซึ่งอาร์เซนเตจจะมี การสะสมในช่องทางเดียวกัน ณ ความเข้มข้นฟอสเฟตสูงพืชจะดูดสะสมฟอสเฟตโดยเป็นระบบการดูดสะสมแบบแข่งขันน้อย (low affinity uptake system) ในทางตรงข้าม หากมีความเข้มข้นฟอสเฟตต่ำ ๆ จะเป็นระบบการดูดสะสมแบบแข่งขันสูง (high affinity uptake system) ชักนำให้เกิดการควบคุมการดูดสะสมฟอสเฟต มีการทดสอบใน *H. lanatus* พบว่า ตัวต้านทานสารหนูจะสามารถขัดขวางระบบการดูดสะสมฟอสเฟตแบบแข่งขันสูง จึงสามารถอธิบายได้ว่า หากทั้งฟอสเฟตและอาร์เซนเตจมีความเข้มข้นต่ำ การสะสมทั้ง 2 ไอออนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวต้านทานถูกยับยั้งการทำงาน ในพืชที่มีความต้านทานอาร์เซนเตจจะมีการสะสมสารหนูในเนื้อเยื่อสูง การดูดสะสมสารหนูเป็นผล

จากการก่อกำเนิดระหว่างไฮดรอกซิลและโมโนเมธิวอร์เซ-
เนต เมื่อมีสารหนูเข้มข้นมาก มีการปรับปรุงพันธุ์พืชให้
รีดิวซ์อาร์เซเนตไปเป็นอาร์เซไนต์ในใบพืชและมีการก่อก
พันธะระหว่างอาร์เซไนต์กับไฮดรอกซิล เพปไทด์ คอมเพล็กซ์
(thiol-peptide complexes) โดยพืชที่ถูกปรับปรุง
พันธุ์จะสะสมสารหนู 3 เท่าที่ลำต้นเหนือดิน ทำให้มี
ความทนทานต่อสารหนุมากกว่าพืชปกติ นอกจากนี้พืช
ยังทำการเปลี่ยนอาร์เซเนตไปเป็นอาร์เซไนต์ในราก
และยับยั้งการเคลื่อนย้ายสารหนูในดิน (Su et al.,
2008)

ยีนเอซีอาร์ 2 (ACR2) มีหน้าที่ในการ
เคลื่อนย้ายอาร์เซเนตไปยังส่วนลำต้นเหนือดิน โดย
ทำงานร่วมกับอาร์เซเนต รีดักเตส มิวเทนท์ (arsenate
reductase (arsc) mutant) ซึ่งแสดงออกโดยเป็นส่วน
ประกอบของแกมมา-กลูตามิโนไซสทีน ซินทีเตส
(γ -glutamylcysteine synthetase) โดยมีกลไกการ
ทำงานคือ ยีนจะส่งสัญญาณให้ยีนเอซีอาร์ 2 ทำงาน
ส่งผลให้มีการเก็บสะสมสารหนุมากไปไว้ที่ลำ
ต้นเหนือดิน การทดลองในข้าวพบว่า มีการส่งสารหนู
จากดินน้ำขังสู่ท่อลำเลียงน้ำ เพื่อไปสะสมในลำต้นพืช
โดยตัวขนส่งที่สำคัญคือ โนดูลิน-26-ไลค์ อินทรินซิก
โพรตีน (nodulin-26-like intrinsic protein; NIPs)
ซึ่งเป็นวงศ์ย่อย (subfamily) ของอะควาโพริน ซึ่งเป็น
ตัวเลือกผ่านเฉพาะอาร์เซไนต์ แต่ไม่เลือกผ่านอาร์เซ-
เนตต่อมามีการปรับปรุงต้นข้าวให้มีการสะสมสารหนูใน
หน่อและเมล็ดน้อยลง (Raab et al., 2005)

5.3 การสังเคราะห์ไฟโตคีเลติน (phytochelatin synthesis)

การเกิดไฟโตคีเลตินเป็นกระบวนการสำคัญที่
ตอบสนองภาวะออกซิเดทีฟ สเตรส และความเป็นพิษ
จากโลหะหนักของพืช กลไกการสร้างความต้านทาน
โดยไฟโตคีเลตินจะทำโดยลดรูปอาร์เซเนตไปเป็น
อาร์เซไนต์โดยอาศัยอาร์เซเนต รีดักเตส (arsenate

reductase) ได้แก่ กลูตาไทโอนในปฏิกิริยาคลูตาไทโอน
ดีเพนเดนท อาร์เซไนต์ [glutathione dependent
reaction AS(+3)] โดยมีการก่อกำเนิดกับไฮดรอกซิลเป็น
อาร์เซนิค ซัลไฮไดรล คอมเพล็กซ์ (arsenic sulfhydryl
(-SH) complex) แล้วเคลื่อนย้ายไปสู่คลิวโอโดยตัว
ขนส่งวายซีเอฟ 1 (YCF 1 transporters) การเพิ่มขึ้น
ของการเกิดไฟโตคีเลติน ซึ่งมีสาเหตุจากอาร์เซนิค
สเตรส เกิดจากความทนทานต่อสารหนูที่มีอยู่เดิมของ
พืชและการปรับตัวของพืชต่อโลหะหนัก อย่างไรก็ตาม
มีการค้นพบว่า การเกิดไฟโตคีเลติน ไม่มีความสัมพันธ์
โดยตรงกับปริมาณและความเข้มข้นของสารหนู การทำ
พืชจำลองพันธุ์ (transgenic plant) เพื่อเพิ่มความ
ต้านทานต่อสารหนู ทำได้โดยการเพิ่มยีนที่สังเคราะห์
ไฟโตคีเลตินให้แก่พืช ซึ่งนับได้ว่า เป็นทางเลือกหนึ่งใน
การปรับปรุงพืชที่ใช้ในการบำบัดสารหนู (Raab et al.,
2005)

5.4 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบออสโมไลต์ (osmolytes)

กลไกการปรับตัวของพืชต่อสิ่งแวดล้อมที่มี
การปนเปื้อนสารพิษ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต
กลไกที่สำคัญอันหนึ่งคือ การสะสมของสารอินทรีย์ที่
เกิดจากการเมแทบอลิซึมของสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ
โดยมีการเมแทบอลิซึมให้เป็นสารละลายที่เข้ากันได้กับ
เซลล์ เช่น โฟโตโพลีไฮดรอกซิลเลต (photopoly
hydroxylated) น้ำตาล แอลกอฮอล์ กรดอะมิโน และ
อนุพันธ์ของสารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบเทอร์เชียรี
ซัลโฟเนียม (tertiary sulphonium compounds)
และสารประกอบควาเทอร์นารี แอมโมเนียม
(quaternary ammonium compounds) ซึ่งไม่
ปรากฏในพืชโดยทั่วไป (Groppa et al., 2001)

บทบาทหลักของเมแทบอลิซึมคือ ช่วยส่งเสริม
ให้เกิดการป้องกันออสโมติกของสารออสโมไลต์อินทรีย์
(organic osmolytes osmotic protection) เมื่อพืช

อยู่ในสภาวะที่มีสารพิษที่มีความเข้มข้นสูง การออสโมไลท์จะเพิ่มความสามารถในการรักษาน้ำของเซลล์ไม่ให้เกิดการเหี่ยวของเซลล์ปกติ โดยมีการสะสมโพรไลน์ (proline) สะสมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการป้องกันพิษจากรีแอกทีฟ ออกซิเจน สปีชีส์ (reactive oxygen species) บทบาทสำคัญของออสโมรีกูเลชัน (osmoregulation) ได้แก่ การผลิตเอมไซม์ การสังเคราะห์โปรตีนเพื่อการควบคุมกรดไซโตโซลิก (cytosolic acid) มีความเสถียร และกำจัดอนุมูลอิสระ ฮิสทีดีน (histidine) และกลูตาไธโอน ก่อให้เกิดไฟโตคีเลตินที่ก่อพันธะเชื่อมโยงกับโลหะเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ ตัวคีเลเตอร์โลหะ (metal chelators) เป็นตัวป้องกันเซลล์พิษจากการเหนี่ยวนำโลหะที่ก่อให้เกิดออสซิเดทีฟ สเตรส ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีความกดดัน (Stoeva et al., 2005)

6. วิธีการบำบัดและกำจัดพิษที่ผ่านการบำบัดสารหนู

การกำจัดพิษที่ผ่านการบำบัดสารหนูต้องมีการดำเนินการอย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้ปนเปื้อนแพร่กระจายสารหนูต่อไป วิธีการที่เป็นทางเลือกในการบำบัดและกำจัด (Jomjun et al., 2009a, และ 2009b) ได้แก่ การนำมาทำให้แห้งแล้วบดอัด (compaction) เพื่อลดน้ำหนักและปริมาตร แล้วนำมาทำให้แข็งตัวด้วยซีเมนต์ ตรวจสอบการชะล้างสารพิษ เพื่อเข้าสู่กระบวนการฝังกลบแบบปลอดภัยต่อไป (Ghosh and Singh, 2005) อีกวิธีหนึ่งที่มีการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ได้แก่ การนำมาผลิตเป็นพลังงานซึ่งประกอบด้วย วิธีการนำไปหมัก เพื่อเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ และการนำไปเผาให้เกิดพลังงานสำหรับวิธีการหมัก (fermentation) เนื่องจากพิษมีสารหนูสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อ วิธีนี้อาจไม่เหมาะสมในการ

นำไปปฏิบัติจริง อย่างไรก็ตามวิธีการควบคุมสารหนูในเชื้อเพลิงชนิดนี้จะคล้ายคลึงกับที่ใช้กับถ่านหินหรือน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งมีสารหนูเป็นองค์ประกอบ โดยมีการทดลองแบ่งเป็น 2 กรณีคือ **วิธีแรกเป็นการหมักและการไฮโดรไลซิส (hydrolysis)** เป็นการนำพิษที่ผ่านการบำบัดมาหมักกับน้ำตาล เพื่อทำให้เกิดไฮโดรไลซิสทางเคมี (chemical hydrolysis) โดยใส่น้ำตาลลงไป เป็นอาหารของยีสต์ ซึ่งจะเกิดผลพลอยได้เป็นเชื้อเพลิงเหลวเช่น เอทานอล แล้วนำไปผ่านกระบวนการกลั่นให้บริสุทธิ์ โดยทำการควบคุมสภาวะในการกลั่นให้เหมาะสม (Ghosh and Singh, 2005) นับได้ว่าเป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตเชื้อเพลิง ข้อควรระวังคือ การจัดการกับเศษกากตะกอนที่มีสารหนูเป็นส่วนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก (Gunnarson and Peterson, 2007) **วิธีที่ 2 ได้แก่ การหมักและการย่อยในที่ไร้อากาศ** เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดโดยแบคทีเรียกลุ่มแอนแอโรบิก ทำการย่อยกรดอินทรีย์ในที่ขาดออกซิเจน และได้ก๊าซมีเทนเป็นผลพลอยได้ ซึ่งก๊าซมีเทน (CH_4) หรือก๊าซชีวภาพจะนำไปใช้เป็นพลังงาน เป็นทางเลือกหนึ่งในการจัดการกับพิษที่ผ่านการบำบัด อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การปนเปื้อนของก๊าซอาร์ซีน (AsH_3) ที่ผสมอยู่ในก๊าซชีวภาพ ทำให้กลายเป็นมลสารกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งต้องคำนึงถึงการกำจัดกากตะกอนที่เหลือจากการบำบัด นอกจากนี้ปัญหาที่พบคือ พิษบางชนิดมีลิกนินสูง จะลดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ และหากใช้พิษน้ำจะมีโพรงอากาศสูง ทำให้มีช่องว่างมาก อัตราการหมักจึงไม่มีประสิทธิภาพ มีการศึกษาโดยใช้พิษที่ผ่านการบำบัดมาหมัก เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้แก่ พิษน้ำผสมกับฟางข้าว ต้นข้าวโพด ต้นฝ้าย (Gunnarson and Peterson, 2007)

วิธีที่มีการทดลองใช้ในการจัดการกับพิษที่ผ่านการบำบัดอีกวิธีหนึ่งได้แก่ การเผา ซึ่งจำแนกได้ 2

รูปแบบคือ การนำไปทำให้แห้งแล้วเผาโดยตรง และวิธีการปรับสภาวะในการเผาเช่น การทำไพโรไลซิส พีชหลายชนิดที่ผ่านการบำบัดสารหนูถูกนำมาเผาไหม้โดยตรงเช่น ผักตบชวา พบว่า ปัญหาสำคัญที่จะก่อผลกระทบต่อตามมาคือ การที่สารหนูจะลอยปะปนไปในอากาศและแพร่กระจายไปได้กว้างขวางยิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องแน่ใจว่า มีการเผาในระบบควบคุมคุณภาพอากาศ โดยฝุ่นควันและอากาศเสียที่ปล่อยออกไปไม่มีสารหนูหลุดรอดสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้หากทำในพีชน้ำที่ผ่านการบำบัดจะต้องลดปริมาณน้ำจากพีชก่อน โดยการทำคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) รวมทั้งมีการจัดการกับเถ้าจม (bottom ash) ที่เกิดจากการเผาไหม้อย่างเหมาะสม เพราะอาจมีโลหะหนักตกค้างอยู่ (Gunnarson and Peterson, 2007; Jomjun, 2012) วิธีการนี้สามารถลดปริมาณจนเหลือเพียง 2–5% สำหรับวิธีไพโรไลซิสเป็นการเผาในที่อับอากาศ โดยผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นคือ น้ำมัน (fluid oil) และถ่านโค้ก (coke) (Bridgwater, 1999) ซึ่งอาจมีสารหนูสะสมอยู่ในเชื้อเพลิง การนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงอาจต้องมีการผสมผสานการตรึงสารหนูในลักษณะเดียวกับการเผาไหม้ถ่านหินคือ การพ่นปูนขาว (lime) ส่วนทางกับอากาศเสียที่ปล่อยออกมา อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากพีชที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีนี้ยังคงอยู่ในขั้นตอนการศึกษาวิจัย เพื่อปรับปรุงให้เป็นเชื้อเพลิงที่ปลอดภัยต่อการใช้งาน

ขั้นตอนสุดท้ายในการจัดการกับเถ้าจมหรือกากของเสียของพีชที่ผ่านการบำบัดได้แก่ **การฝังกลบแบบปลอดภัย (secured landfill)** โดยมีวิธีการดังนี้ พีชที่ผ่านการบำบัดหรือเถ้าถ่านที่มีสารหนูปะปนอยู่จะถูกนำมาทำให้แห้งแล้วบดเป็นผง ก่อนที่จะนำมาทำให้แข็งตัวโดยใช้ซีเมนต์แล้วจึงถูกนำมาฝังในบ่อดินที่ขุดเตรียมไว้ พร้อมทั้งบุผนังและก้นบ่อด้วยวัสดุกันซึม เช่น ดินเหนียว หรือแผ่นพลาสติกเอชดีพีอี (high density

polyethylene; HDPE) จำนวน 2 ชั้น เพื่อป้องกันของเสียอันตรายและน้ำเสียไหลซึมปนเปื้อนน้ำใต้ดิน และระหว่างชั้นให้มีท่อเพื่อระบายน้ำเสียที่เกิดจากขยะสลายตัวแล้วป้อนออกมาทำการบำบัดต่อไป เมื่อฝังของเสียอันตรายจนเต็มบ่อแล้วก็จะกลบฝังด้วยดินเหนียวอัดแน่นบน ปิดทับด้วยแผ่นพลาสติกอีกชั้น แล้วจึงปิดด้วยดินชั้นบนอีกชั้นหนึ่ง โดยจะต้องมีการตรวจวัดระดับสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน น้ำบาดาล และน้ำใต้ดินอย่างต่อเนื่อง (Lawrence et al., 2010)

สรุปและวิจารณ์

การบำบัดสารหนูด้วยวิธีพีชบำบัด จะทำการบำบัดตะกอนดิน ดิน และน้ำผิวดิน โดยในพื้นที่ชุ่มน้ำส่วนใหญ่จะใช้พีชน้ำ 2 ระบบคือ พีชลอยน้ำ และพีชน้ำที่ลำต้นโผล่พ้นน้ำ ซึ่งพบว่า พีชหลายชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดสะสมสารหนู สำหรับพีชบกที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้มากได้แก่ พีชจำพวกเฟิร์น ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไฮเปอร์แอคคิวมูเลชัน การศึกษายังมีการค้นหากลไกการลดความเป็นพิษของสารหนูในต้นพีชลงเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดในพื้นที่จริง เพราะไม่เป็นเพียงการเคลื่อนย้ายสารหนู เพื่อนำไปบำบัดและกำจัด แต่ยังเป็นการป้องกันการแพร่กระจายมากขึ้นในสิ่งแวดล้อม และลดการสะสมในห่วงโซ่อาหาร ผลกระทบของสารหนูที่มีต่อพีช จะส่งผลให้สัญญาณเปลี่ยนแปลงไป การเจริญเติบโตและมวลชีวภาพลดลง รวมทั้งส่งผลกระทบต่อกระบวนการต่าง ๆ ในพีช โดยกลไกในการสะสมสารหนูของพีชมีความแตกต่างกันตามชนิดของสารหนูกล่าวคือ อาร์เซนิตจะสะสมผ่านทางวิถีพอสพอรัส และอาร์เซไนต์จะสะสมในต้นพีชผ่านอะควาโพริน อย่างไรก็ตามกลไกที่พืชตอบสนองต่อสารหนูแต่ละชนิดยังต้องทำการศึกษาค้นคว้ากันต่อไป สำหรับกลไกการตอบสนองของพืชต่อสารหนูแต่ละชนิด ส่วนใหญ่เป็นไปเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดการดูด

สะสม และการปรับตัวให้ทนทานต่อโลหะหนักโดยไม่ก่อให้เกิดอาการพิษ ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ตามปกติ โดยหลักการทั่วไปคือ การเกิดออกซิเดทีฟ สเตรส โดยมี การสร้างรีแอกทีฟออกซิเจน สปีชีส์ พืชจะผลิตสารต้านอนุมูลอิสระในวิถีเมแทบอลิซึม ซึ่งลดอาการพิษจากการรับสารหนูจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่า พืชจะแสดงคุณสมบัติเป็นไฟโต-แอกติวเมชัน และไฟโตเคเลติน โดยจะทำการเปลี่ยนรูปอาร์เซนิตไปเป็นอาร์เซไนต์ แล้วเก็บสะสมไว้ในแวคิวโอ ทำให้สะสมสารหนูได้ในปริมาณมากโดยไม่ก่ออาการพิษต่อพืช และยังมี การตอบสนองของพืชโดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบออสโมไลต์ผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึม เพื่อลดความเป็นพิษต่อต้นพืช วิธีการกำจัดพืชที่ปนเปื้อนสารหนูยังคงอยู่ในการทดลองดังนี้ ใช้วิธีลดปริมาณโดยการบดอัดแล้วทำให้แข็งตัว ก่อนนำไปฝังกลบแบบปลอดภัย อีกทั้งสามารถนำไปผลิตเป็นพลังงาน โดยการนำไปหมักเพื่อผลิตเป็นก๊าซชีวภาพหรือเอทานอล หรือนำไปเผาไหม้เป็นถ่านหรือเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิส ในปัจจุบันยังไม่มี ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากยังอยู่ในขั้นทดลอง และกระบวนการขั้นตอนสุดท้ายในการกำจัดกากพืชบำบัดที่เหลือจากกระบวนการต่าง ๆ คือ การกำจัดโดยนำไปฝังกลบแบบปลอดภัย

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอบคุณประโยชน์ต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์นายแพทย์ วิชัย เทียนถาวร ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.ไมตรี สุทธิจิตต์ บุคลากร คณะแพทยศาสตร์ทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งครูอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และที่สำคัญที่สุดบิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ผู้เขียนจึงขอพระขอบคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์. (2540). การศึกษาติดตามปัญหาและการแก้ไขการแพร่กระจายของสารหนู อำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. กองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี.
- Ahmed, S. F. R., Killham, K. and Alexander, I. (2006). Influences of arbuscular fungus *Glomus mosseae* on growth and nutrition of lentil irrigated with arsenic contaminated water. *Plant Soil* 258: 33–41.
- Alvarado, S., Guédez, M., Lué-Merú, M. P., Nelson, G., Alvaro, A., Jesús, A. C. and Gyula, Z. (2008). Arsenic removal from waters by bioremediation with the aquatic plants Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and Lesser Duckweed (*Lemna minor*). *Bioresource Technology* 99(17): 8436-40.
- Andrew, A. M. (2002). Variation in arsenic accumulation hyperaccumulation in ferns and their allies. *New Phytologies* 157: 25-31.
- Bridgwater, A.V., Meier, D. and Radlein, D. (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass. – *Org. Geochem.* 30: 1479–1493.
- Carbonell-Barrachina, A. A., Burlo, F. and Mataix, J. (1998). Response of bean micronutrient nutrition to arsenic and salinity. *Journal of Plant Nutrition* 21(6): 1287–1299.
- Garg, N. and Manchanda, G. (2009). ROS generation in plants: boon or bane? *Plant Biosystems.* 143(1): 81–96.
- Geng, C. N., Zhu, Y. G., Hu, Y., Williams, P. and Meharg, A. A. (2006). Arsenate causes differential acute toxicity to two P-deprived genotypes of rice seedlings (*Oryza sativa* L.). *Plant Soil* 279: 297–306.
- Ghosh, M. and Singh, S. P. (2005). A review of phytoremediation of heavy metals and

- utilization of its byproducts. Applied ecology and environment research 3(1): 1–18.
- Groppa, M., Tomara, M. and Benavides, M. (2001). Polyamines as protectors against cadmium or cooper – induced oxidative damage in sunflower leaf discs. Plant Science 161: 481–488.
- Gunnarsson, C. C. and Petersen, C. M. (2007). Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: a literature review. Waste Management 27: 117–129.
- Ha, N. T. H., Sakakibara, M. and Sano, S., (2009). Phytoremediation of Sb, As, Cu, and Zn from contaminated water by the aquatic macrophyte *Eleocharis acicularis*. Clean Soil, Air, Water 37: 720–725.
- Hazrat, A., Ezzat, K. and Muhammad, A. S. (2013). Phytoremediation of heavy metals— Concepts and applications. Chemosphere 91: 869–881.
- Hoffmann, T., Kutter, C. and Santamaria, J. (2004). Capacity of *Salvinia minima* Baker to tolerate and accumulate As and Pb. Engineering in Life Science 4: 61–65.
- Hugh, B. and Peter, R. (2009). Arsenic in groundwater: A threat to sustainable agriculture in South and South-east Asia. Environment International 35: 647–654.
- Jankonga, P., Visoottivisettha, P. and Khokiattiwongb, S. (2007). Enhanced phytoremediation of arsenic contaminated land. Chemosphere 68(10): 1906–1912.
- Jomjun, N., Siripen, T., Maliwan, S., Jintapat, N., Prasak, T., Somporn, C. and Petch, P. (2009a). Application of wetland aquatic plants; *Canna glauca* (L.), *Colocasia esculenta* (L.) Schott, *Cyperus papyrus* (L.) and *Typha angustifolia* (L.) in arsenic phytoremediation of submerged soil. International Journal of Phytoremediation 13: 35–46.
- Jomjun, N. (2009b). Phytoremediation of arsenic contaminated submerged soil by aquatic plants. Ph.D. thesis. Chulalongkorn University. Bangkok.
- Jomjun, N., Siripen, T., Maliwan, S., Jintapat, N., Prasak, T., Petch, P. and Somporn, C. (2009c). Monitoring of arsenic in aquatic plants, water, and sediment of wastewater treatment ponds at the Mae Moh Lignite Power Plant at Lampang Province, Thailand. Environmental Monitoring and Assessment 165: 585–594.
- Jomjun, N. (2012). Technology used for environmental arsenic remediation. Naresuan Phayao Journal 5: 258–270.
- Jorg, M. (2000). Arsenic in the geosphere – review. The science of the Total Environment 249: 297–312.
- Kyambaddea, J., Kansimeea, F., Gumaeliusb, L. and Dalhammar, G. (2004). A comparative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum*-based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate. Water Research 38(2): 475–485.
- Lawrence, K., Wang, Yung – T. S. E. H. and Nazih, K. S. (2010). Handbook of advanced industrial and hazardous wastes treatment. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Lee, C. K., Low, K. S. and Hew, N. S. (1991). Accumulation of arsenic by aquatic plants. Science Total Environment 103: 215–227.
- Lee, J. H. (2013). An overview of phytoremediation as a potentially promising technology for environmental pollution control. Biotechnology and Bioprocess Engineering 18: 431-439.

- Meloni, D. A., Oliva, M. A., Martinez, C. A. and Cambraia, J. (2003). Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. *Environmental and Experimental Botany* 49: 69–76.
- Muhammad, A. K., Amna, Rabia, M., Nadia, M., Jabir, H. S., Asghari, B., Muhammad, T. J., Muhammad, F. H. M., Zhiyuan, T. and Hassan, J. C. (2014). The potential of the flora from different regions of Pakistan in phytoremediation: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 21: 801–812.
- Mylona, P. V., Polidoros, A. N. and Scandalios, J. G. (1998). Modulation of antioxidant responses by arsenic in maize. *Free Radical Biology and Medicine* 25: 576–585.
- Neera, G. and Priyanka, S. (2011). Arsenic toxicity in crop plants: physiological effects and tolerance mechanisms. *Environmental Chemistry Letters* 9: 303–321.
- Pei-ying, X. and Chang-zhou, Y. (2011). Arsenic accumulation and translocation in the submerged macrophyte *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle. *Chemosphere* 85(7): 1176–1181.
- Raab, A., Schat, H., Meharg, A. A. and Feldmann, J. (2005). Uptake, translocation and transformation of arsenate and arsenite in sunflower (*Helianthus annuus*): formation of arsenic-phytochelatin complexes during exposure to high arsenic concentrations. *New Phytologist* 168: 551–558.
- Rahman, M. A., Hasegawa, H., Rahman, M. M., Miah, M. A. M. and Tasim, A. (2008). Straighthead disease of rice (*Oryza sativa* L.) induced by arsenic toxicity. *Environmental and Experimental Botany* 62(1): 54–59.
- Rajkumar, M., Sandhya, S., Prasad, M. N. V. and Freitas, H. (2012). Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnology Advances* 30: 1562–1574.
- Ravenscroft, P. (2011). Arsenic Pollution of Groundwater in Bangladesh. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, *Encyclopedia of Environmental Health* 181–192.
- Rahman, M. A. and Hasegawa, H. (2011). Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere* 83: 633–646.
- Robinson, B., Duwig, C., Bolan, N., Kannathasan, M. and Saravanan, A. (2003). Uptake of arsenic by New Zealand watercress (*Lepidium sativum*). *Science Total Environment* 301(1-3): 67-73.
- Sakakibara, M., Sano, S., Inouhe, M., Watanabe, A. and Kaise, T. (2007). Phytoextraction and phytovolatilization of arsenic from As-contaminated soils by *Pteris vittata*. *Contaminated Soils, Sediments and Water* 12: 267–272.
- Sannop, N., Pornsawan, V., Somkiat, K. and Wantana, S. (2011). Management of arsenic-accumulated waste from constructed wetland treatment of mountain tap-water. *Journal of Hazardous Materials* 185: 1081–1085.
- Sharma, V. K. and Sohn, M. (2009). Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environmental International* 35: 743–759.
- Shiny, M., Lena, Q. M., Bala, R., Seenivasan, N. and Uttam, K. S. (2010). Arsenic transformation in the growth media and biomass of hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Bioresource Technology*. 101: 8024–8030.

- Singh, N., Ma, L. Q., Srivastava, M. and Rathinasabapathi, B. (2006). Metabolic adaptations to arsenic induced oxidative stress in *Pteris vittata* L. and *Pteris ensiformis* L. *Plant Science Journal* 170: 274–282.
- Srivastava, M., Ma, L. Q., Singh, N. and Singh, S. (2005). Antioxidant responses of hyper-accumulator and sensitive fern species to arsenic. *Journal of Experimental Botany* 56: 1335–1342.
- Stoeva, N. and Bineva, Tz. (2003). Oxidative changes and photosynthesis in Oat plants grown in As-contaminated soil. *Bulgarian Journal of Plant Physiology* 29(1–2): 87–95.
- Stoeva, N., Berova, M., Vassilev, A. and Zlatev, Z. (2005). Effect of exogenous polyamine diethylenetriamine on oxidative changes and photosynthesis in As-treated Maize plants (*Zea may* L.). *Journal of Experimental Botany* 6(3): 367–374.
- Su, Y. H., McGrath, S. P., Zhu, Y. G. and Zhao, F. J. (2008). Highly efficient xylem transport of arsenite in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata*. *New Phytologist* 180: 434–441.
- Subhas, C. S., Alok, C. S., Piyal, B., Satabdi, B., Anirban, B. and Jayjit, M. (2013). Arsenic in foodchain and community health risk: a study in Gangetic West Bengal. *Procedia Environmental Sciences* 18: 2–13.
- Vamerali, T., Bandiera, M., Mosca, G. (2010). Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. *Environmental Chemistry. Letters* 8: 1–17.
- Vazquez, S., Esteban, E. and Carpena, R. O. (2008). Evolution of arsenate toxicity in nodulated White Lupine in a long-term culture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(18): 8580–8587.
- Virender, K. S. and Mary, S. (2009). Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environment International* 35: 743–759.
- Watchara, C., Pornsawan, V., Somkiat, K. and Siriporn, L. (2008). Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand. *Chemosphere* 70: 1532–1537.
- World Health Organization. (2011). WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth Edition, Geneva, Switzerland.
- Zhang, X., Lin, A. J., Zhao, F. J., Xu, G. Z., Duan, G. L. and Zhu, Y. G. (2008). Arsenic accumulation by the aquatic fern *Azolla*: Comparison of arsenate uptake, speciation and efflux by *Azolla caroliniana* and *Azolla filiculoides*. *Environmental Pollution* 156: 1149–1155.
- Zhang, X., Zhao, F. J., Huang, Q., Williams, P. N., Sun, G. X. and Zhu, Y. G. (2009). Arsenic uptake and speciation in the rootless duckweed *Wolffia globosa*. *New Phytologist* 182: 421–428.
- Zhang, X., Hu, Y., Liu, Y. and Chen, B. (2011). Arsenic uptake, accumulation and phytofiltration by duckweed (*Spirodela polyrhiza* L.). *Journal of Environment Sciences (China)* 23(4): 601–606.
- Zhao, F. J., Ma, J. F., Meharg, A. A. and McGrath, S. P. (2009). Arsenic uptake and metabolism in plants. *New Phytologist* 181: 777–794.

