Environmental Journal

Volume 24 | Issue 4 Article 4

2020-10-01

# บทความ: การกำจัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ด้วยพืชพลังงานและจลนศาสตร์ไฟฟ้าอย่างยั่งยืน

อุดมศักดิ์ บุญมีรติ

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

Follow this and additional works at: https://digital.car.chula.ac.th/cuej

Part of the Environmental Sciences Commons

## Recommended Citation

บุญมีรติ, อุดมศักดิ์ and สัมพันธ์พานิช, พันธวัศ (2020) "บทความ: การกำจัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ด้วยพืชพลังงานและจลนศาสตร์ไฟฟ้าอย่างยั่งยืน," *Environmental Journal*: Vol. 24: Iss. 4, Article 4.
Available at: https://digital.car.chula.ac.th/cuej/vol24/iss4/4

This Article is brought to you for free and open access by the Chulalongkorn Journal Online (CUJO) at Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Environmental Journal by an authorized editor of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

# บทความ: การกำจัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ด้วยพืชพลังงานและจลนศาสตร์ไฟฟ้าอย่างยั่งยืน

**อุดมศักดิ์ บุญมีรติ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช**

หน่วยปฏิบัติการวิจัย “การจัดการเหมืองสีเขียว” สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

---

**การอ้างอิง:** อุดมศักดิ์ บุญมีรติ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2563). การกำจัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ด้วยพืชพลังงานและจลนศาสตร์ไฟฟ้าอย่างยั่งยืน. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 24 (ฉบับที่ 4).

---

## กากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนู

กากโลหกรรม (Mine Tailing) เป็นผลพลอยได้มาจากกระบวนการแต่งแร่ (Mineral Processing) ประกอบไปด้วยส่วนผสมของทราย อนุภาคขนาดเล็ก น้ำ สารเคมี โลหะหนัก และมีแร่ปะปนอยู่เล็กน้อย และถูกกักเก็บอยู่ภายในบ่อกักเก็บกากโลหกรรม (Tailing Storage Facility, TSF) โดยทั่วไปกากโลหกรรมจะมีการปนเปื้อนโลหะหนักที่มีโอกาสสูงที่จะแพร่กระจายจากการพัดพาโดยลม (Wind Erosion) และการถูกชะล้างโดยน้ำ (Water Erosion) ซึ่งทำให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของฝุ่นขนาดเล็ก และน้ำกรดจากเหมือง (Acid Mine Drainage; AMD) โดยพบการปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู แมงกานีส ทองคำ เงิน ทองแดง สังกะสี และดีบุก เป็นต้น (Abad-Valle et al., 2018) ในประเทศไทยพบการปนเปื้อนสารหนูในกากโลหกรรมของเหมืองแร่ทองคำที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มก./กก. (Sampanpanish and Suwattiga, 2017)

สารหนูในกากโลหกรรมโดยทั่วไปอยู่ในรูปของแร่ซัลไฟด์ (Sulphide Mineral) ซึ่งส่วนใหญ่จะพบในรูปของอาร์เซโนไพไรต์ (Arsenopyrite, FeAsS) รีอัลการ์ (Realgar, AsS) และออร์พิเมนต์ ($As_2S_3$) (Abad-Valle et al., 2018; Bowell et al., 2014) แร่ซัลไฟด์เหล่านี้ไม่เสถียรภายใต้สภาพบรรยากาศ โดยเมื่อสัมผัสกับอากาศและน้ำ สารหนูในแร่ซัลไฟด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ที่ละลายน้ำในรูปของอาร์เซเนตอิออน ($H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ และ $AsO_4^{3-}$) (Morin and Calas, 2006) อย่างไรก็ตามสารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Fe) ที่พบได้มากในกากโลหกรรม และมีความจำเพาะกับสารหนูจะดูดซับ (Adsorption) และ/หรือ ตกตะกอนร่วม (Co-Precipitation) กับอาร์เซเนตอิออนอย่างรวดเร็ว (Morin and Calas, 2006; Bowell et al., 2014) ทำให้การเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหกรรมส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการชะลายของสารประกอบเหล็ก ส่งผลต่อการแพร่กระจายของสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อม และความสามารถในการดูดสะสมสารหนูของพืช (Phytoavailability)

แนวทางในการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหกรรมอย่างยั่งยืน จึงเป็นเรื่องที่สำคัญยิ่งในการควบคุมและป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเกิดขึ้นต่อชุมชนโดยรอบกิจการทำเหมืองนั้น ซึ่งตามพระราชบัญญัติแร่

พ.ศ. 2560 ระบุให้คณะกรรมการแร่ เป็นผู้กำหนดให้ผู้ถือประทานบัตรต้องทำการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองตามแผนฟื้นฟู การพัฒนา การใช้ประโยชน์ และการเฝ้าระวัง ผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของประชาชน ทั้งในช่วงระหว่างที่มีการทำเหมือง และภายหลังจากการปิดเหมือง (พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต และพันธวัศ สัมพนธ์พานิช, 2561) โดยการปลูกพืชเป็นวิธีการที่มักถูกนำมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมือง เนื่องจากทำให้พื้นที่การทำเหมืองกลับไปมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่เดิม และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของประชาชน

**การฟื้นฟูบ่อกักเก็บกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูด้วยพืชพลังงาน**

พืชหลายชนิดถูกนำมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมือง ซึ่งรวมถึงบ่อกักเก็บกากโลหกรรม โดยพืชที่ปลูกปกคลุมอยู่บนกากโลหกรรมจะช่วยลดการพัดพาโดยลม และการชะล้างโดยน้ำของอนุภาคกากโลหกรรมที่ระดับผิวหน้า ส่งผลให้การแพร่กระจายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมลดลง อีกทั้งยังช่วยปรับสภาพพื้นที่ และสภาพภูมิทัศน์ให้มีความสวยงาม (Xie and Zyl, 2020) อย่างไรก็ตามอุปสรรคหลักในการฟื้นฟูบ่อกักเก็บกากโลหกรรมด้วยพืช คือ สภาพความแห้งแล้ง การขาดแคลนธาตุอาหารและอินทรียวัตถุ และความเป็นพิษของโลหะหนัก (Borišev et al., 2018) ซึ่งพบว่า มีพืชหลายชนิดสามารถปรับสภาพ และเจริญเติบโตได้บนกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู เช่น ปอปลาร์ (*Populus davidiana*) (Chang et al., 2005) ยูคาลิปตัส (King et al., 2008) กระถินเทพา (*Acacia mangium*) และกระถินณรงค์ (*Acacia auriculiformis*) (Sampanpanish, 2018) ทำให้พืชเหล่านี้มักถูกนำมาปลูกในพื้นที่เหมืองแร่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองควบคู่ไปกับการใช้พืชในการบำบัดสารหนูรวมทั้งโลหะหนักชนิดอื่นๆ

การบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถดำเนินการได้ในพื้นที่ปนเปื้อน (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558; Wang et al., 2017) โดยพืชที่มีความสามารถในการดูดดึงและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมากมีเพียงไม่กี่ชนิด เช่น เฟิร์นเงิน (*Pityrogramma calomelanos*) และกูดหมาก (*Pteris vittata)* (Anh et al., 2017) อย่างไรก็ตามพบว่า พืชทั้งสองชนิดมีวงจรชีวิตที่ยาวนาน และมีมวลชีวภาพต่ำ อีกทั้งไม่ทนต่อสภาพที่แห้งแล้ง จึงทำให้เป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการนำพืชเหล่านี้มาใช้ในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรม

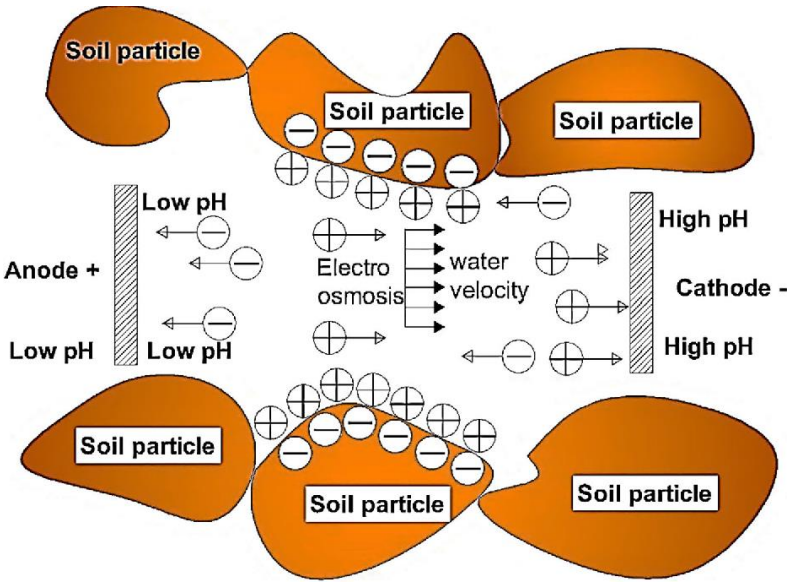
ปัจจุบันพืชพลังงาน (Energy Plant) หลายชนิดถูกเลือกใช้ในการนำมาบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมควบคู่ไปกับการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมือง เนื่องจากพืชพลังงานส่วนใหญ่จะมีมวลชีวภาพสูง และสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี โดยได้มีการรายงานการใช้พืชตระกูลหญ้าชนิดต่างๆ ในการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูจากเหมืองแร่ทองคำ เช่น หญ้าไรย์ (*Lolium perenne*) (Couto et al., 2015) หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum sinese Roxb*) (Ma et al., 2016) หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) และหญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) (Sampanpanish and Suwattiga, 2017; Sampanpanish, 2018)

การปลูกพืชพลังงานบนพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่ไม่มีความเหมาะสมต่อการปลูกพืชอาหารถือเป็นการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปกับการผลิตพลังงานชีวภาพที่ทำให้เกิดความยั่งยืนทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากทำให้สามารถเพาะปลูกพืชพลังงาน เพื่อตอบสนองต่อความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นทั่วโลกได้ โดยไม่กระทบต่อพื้นที่การเพาะปลูกพืชอาหาร ทั้งนี้การปลูกพืชพลังงานในพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรม จึงเป็นแนวทางเลือกที่คาดว่าจะมีความเหมาะสม และยั่งยืนในการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมือง ควบคู่ไปกับการป้องกันการแพร่กระจายของอนุภาคกากโลหกรรม และยังเป็นการนำพื้นที่มาใช้ประโยชน์ได้อย่างยั่งยืน

**จลนศาสตร์ไฟฟ้า...เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารหนู**

ประสิทธิภาพของการบำบัดโลหะหนักด้วยพืชขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยรูปทางเคมีของโลหะหนักถือเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการดูดดึงและสะสมโลหะหนักของพืช ในกรณีกากโลหกรรมที่พบว่า สารหนูอยู่ในรูปของอาร์เซเนตอิออน ซึ่งจะถูกดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กที่พบได้มากในกากโลหกรรม จึงทำให้สารหนูอยู่ในรูปที่ถูกดูดดึงไปใช้ประโยชน์โดยพืชได้น้อย และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูของพืชลดลง

จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetics) ถูกนำมาใช้ร่วมกับการบำบัดด้วยพืช เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ดิน (Cameselle et al., 2013) และดินจากเหมือง (Mine Soil) (Couto et al., 2015) ด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ในระดับต่ำที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยสภาวะกรดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่ขั้วบวกหรือขั้วแอโนด (Anode) จะทำให้โลหะหนักถูกชะละลายอยู่ในรูปของไอออน และเกิดสภาวะด่างจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วลบหรือขั้วแคโทด (Cathode) ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไอออนที่เกิดขึ้นจะเกิดการเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าได้ด้วย 2 กลไกหลัก (รูปที่ 1) คือ อิเล็กโตรออสโมซิส (Electro-osmosis) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำที่ผ่านไปตามช่องว่างขนาดเล็ก ซึ่งโดยทั่วไปน้ำจะเคลื่อนที่จากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ทำให้เกิดการพัดพาไอออนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบตามการเคลื่อนที่ของน้ำ และอิเล็กโตรไมเกรชัน (Electromigration) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้าม โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ และไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก การเคลื่อนที่ของไอออนที่เกิดขึ้นทำให้พืชมีโอกาสในการดูดสะสมโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สามารถบำบัดโลหะหนักในบริเวณที่อยู่ลึกกว่า หรือบริเวณที่ไกลจากรากพืชได้ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการบำบัดโลหะหนักด้วยพืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัย เช่น ชนิดของพืช และประเภทของกระแสไฟฟ้าตรงหรือสลับ เป็นต้น (Cameselle et al., 2013)




**รูปที่ 1** การเคลื่อนที่ของไอออนในดินภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วยกลไกอิเล็กโตรออสโมซิส (Electro-osmosis) และอิเล็กโตรไมเกรชัน (Electromigration)

ที่มา: Moghadam et al., 2016

ปัจจุบันมีรายงานการวิจัยในการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักในดินด้วยพืชเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ในการศึกษาการกำจัดสารหนูในกากโลหกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv.Mott) ร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า ดังตัวอย่างรูปที่ 2 ที่พบว่า ขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Aboughalma et al. (2008) ที่รายงานว่า การให้ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในดินระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้มันฝรั่ง (*Solanum tuberosum* var. Kuras) มีมวลชีวภาพลดลง และทำให้ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) และแคดเมียม (Cd) ในดินที่บริเวณต่างๆ มีความแตกต่างกัน ในขณะที่การให้ไฟฟ้ากระแสสลับไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของโลหะหนักในดินที่บริเวณต่างๆ อีกทั้งยังช่วยให้มวลชีวภาพของมันฝรั่งเพิ่มสูงขึ้น โดยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับทำให้มันฝรั่งมีความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนรากเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนเหนือดินมีค่าลดลงเมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับ ในขณะที่ Bi et al. (2011) รายงานว่า การให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการสลับขั้วทุก 3 ชั่วโมง ไม่ส่งผลต่อมวลชีวภาพของผักกาดก้านขาว (*Brassica napus*) แต่ส่งผลให้มวลชีวภาพของยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) มีค่าลดลง ในขณะที่การให้ไฟฟ้ากระแสสลับ ส่งผลให้ผักกาดขาวมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อมวลชีวภาพของยาสูบ อย่างไรก็ตามการให้ไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ปริมาณการสะสมโลหะหนัก (Zn, Pb, Cu และ Cd) ของส่วนเหนือดินของผักกาดก้านขาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ผลการวิจัยบ่งชี้ว่า พืชแต่ละชนิดตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าได้แตกต่างกัน นอกจากนี้ Cang et al. (2011) รายงานว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้าของดินที่บริเวณต่างๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เมื่อมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มวลชีวภาพของผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งทำให้พืชมีแนวโน้มการสะสมโลหะหนัก (Zn, Pb, Cu และ Cd) ลดลงเช่นเดียวกัน โดย Couto et al. (2015) รายงานว่า การบำบัดพลวง (Sb) และสารหนู (As) ที่ปนเปื้อนในดินจากเหมืองด้วยผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) และหญ้าไรย์ (*Lolium perenne*) ร่วมกับการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดของสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้มวลชีวภาพพืชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และส่งผลให้พืชสามารถสะสมโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อมีการเติมสารฟอสเฟตเพิ่มลงไปพบว่า พืชสามารถสะสมโลหะหนักในส่วนรากได้เพิ่มขึ้นด้วย

แม้ว่าการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักด้วยพืชด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง จะทำให้เกิดผลกระทบต่อมวลชีวภาพของพืช จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง หากแต่การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากการให้ไฟฟ้ากระแสตรง จะมีทิศทางที่แน่นอน ต่างจากการให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำให้โลหะหนักเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางที่สลับไปมาตามความถี่ของกระแสไฟฟ้า จึงทำให้โลหะหนักมีโอกาสที่จะเกิดการเคลื่อนที่ไปนอกบริเวณรากพืช และเกิดการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น การให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อพืชแต่ละชนิด จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักด้วยพืชควบคู่ไปกับการเพิ่มชีวมวลของพืชพลังงาน

**รูปที่ 2** การทดลองการกำจัดสารหนูในกากโลหกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า
ที่มา: อุดมศักดิ์ บุญมีรติ

**บทสรุป**

กากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูภายในบ่อกักเก็บกากโลหกรรมจัดได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องมีการควบคุม และการป้องกันการแพร่กระจายอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ ซึ่งการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองแร่ ถือเป็นมาตรการทางสิ่งแวดล้อมที่ผู้ประกอบการทำเหมืองแร่จะต้องดำเนินการ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และสุขภาพอนามัยของประชาชนโดยรอบทั้งในระยะสั้น และในระยะยาว ซึ่งการนำพืชหลากหลายชนิดมาใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรม โดยเฉพาะการนำพืชพลังงาน เช่น หญ้าเนเปียร์ มาใช้ในการบำบัดสารหนู และนำไปผลิตเป็นพลังงาน ชีวมวลด้วยกระบวนการต่างๆ ถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงและสะสมสารหนูของพืชพลังงานด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า จึงเป็นแนวทางเลือกที่คาดว่า จะมีการบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจาก ทำให้สามารถผลิตพืชพลังงานในพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรมควบคู่ไปกับการบำบัดสารหนูได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นรูปธรรม ส่งผลให้บ่อกักเก็บกากโลหกรรมมีความเป็นพิษลดลง จนสามารถใช้ประโยชน์พื้นที่ในด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของประชาชนโดยรอบพื้นที่การทำเหมืองได้อย่างปลอดภัย

---

**เอกสารอ้างอิง**

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2558). การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. 1,000 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต และพันธวัศ สัมพนธ์พานิช. (2561). *เหมืองแร่...กับการพัฒนาที่ยั่งยืน : ความเข้าใจที่ถูกต้องเพื่อการใช้ทรัพยากรที่จำกัดอย่างมีคุณค่า*, หน้า 99. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Abad-Valle, P., Álvarez-Ayuso, E., Murciego, A., Muñoz-Centeno, L.M., Alonso-Rojo, P., and Villar-Alonso, P. (2018). Arsenic distribution in a pasture area impacted by past mining activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety,* 147: 228-237. http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.031

Anh, B.T.K., Ha, N.T.H., Danh, L.T., Van Minh V., and Kim D.D. (2017). Phytoremediation applications for metal-contaminated soils using terrestrial plants in Vietnam. In: Ansari, A., Gill, S., Gill, R., Lanza, G.R., Newman, L. (editors). *Phytoremediation*. Springer, Cham p.157-181. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52381-1_6

Aboughalma, H., Bi, R., and Schlaak, M. (2008). Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 43: 926-933. https://doi.org/10.1080/10934520801974459

Bi, R., Schlaak, M., Siefert, E., Lord, R., and Connolly, H. (2011). Influence of electrical fields (AC and DC) on phytoremediation of metal polluted soils with rapeseed (*Brassica napus*) and tobacco (*Nicotiana tabacum*). *Chemosphere*, 83: 318-326. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.12.052

Borišev, M., Pajević, S., Nikolić, N., Pilipović, A., Arsenov, D., and Župunski, M. (2018). Mine site restoration using silvicultural approach. In: Prasad, M.N.V, Favas, P.J.C., Maiti, S.K. (editors). *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier. p.3-31.

Bowell, R.J., Alpers, C.N., Jamieson, H.E., Nordstrom, D.K., Majzlan, J. (2014). The environmental geochemistry of arsenic - An overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 79: 1-16. https://doi.org/10.2138/rmg.2014.79.1

Cameselle, C., Chirakkara, R.A., and Reddy, K.R. (2013). Electrokinetics-enhanced phyto-remediation of soils: Status and opportunities. *Chemosphere*, 93: 626-636. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.06.029

Cang, L., Wang, Q.Y., Zhou, D.M., and Xu, H. (2011). Effects of electrokinetic-assisted phyto-remediation of a multiple-metal contaminated soil on soil metal bioavailability and uptake by Indian mustard. *Separation and Purification Technology*, 79: 246-253. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.02.016

Chang, P., Kim, J., and Kim, K. (2005). Concentrations of arsenic and heavy metals in vegetation at two abandoned mine tailings in South Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, 27: 109-119. https://doi.org/10.1007/s10653-005-0130-7

Couto, N., Guedes, P., Zhou, D., and Ribeiro, A. (2015). Integrated perspectives of a greenhouse study to upgrade an antimony and arsenic mine soil - Potential of enhanced phytotechnologies. *Chemical Engineering Journal*, 262: 563-570. https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.021

King, D.J., Doronila, A.I., Feenstra, C., Baker, A.J.M., and Woodrow, I.E. (2008). Phytostabilisation of arsenical gold mine tailings using four Eucalyptus species: Growth, arsenic uptake and availability after five years. *Science of The Total Environment*, 406: 35-42. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.054.

Ma, C., Ming, H., Lin, C., Naidu, R., and Bolan, N. (2016). Phytoextraction of heavy metal from tailing waste using Napier grass. *Catena*, 136: 74-83. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.001

Moghadam, M.J., Moayedi, H., Sadeghi, M.M., and Hajiannia, A. (2016). A review of combinations of electrokinetic applications. *Environmental Geochemistry and Health*, 38: 1217-1227. https://doi.org/10.1007/s10653-016-9795-3

Morin, G., and Calas, G. (2006). Arsenic in soils, mine tailings, and former industrial sites. *Elements*, 2(2): 97-101. https://doi.org/10.2113/gselements.2.2.97

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 and Environment*, 36(2): 114-119. https://doi.org/10.25252/SE/17/51183

Sampanpanish, P. (2018). Arsenic, manganese, and cyanide removal in a tailing storage facility for a gold mine using phytoremediation. *Remediation*, 28: 83-89. http://doi.org/10.1002/rem.21563

Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., and Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184: 594-600. http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025

Xie, L., and Zyl, D. (2020). Distinguishing reclamation, revegetation and phytoremediation, and the importance of geochemical processes in the reclamation of sulfidic mine tailings: A review. *Chemosphere*, 252: 126446. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126446