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

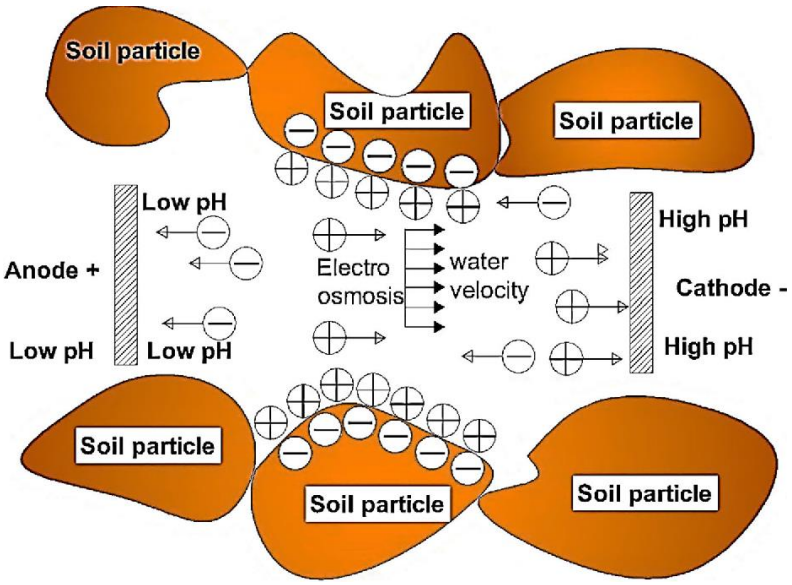
ปัจจุบันพืชพลังงาน (Energy Plant) หลายชนิดถูกเลือกใช้ในการนำมาบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมควบคู่ไปกับการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมือง เนื่องจากพืชพลังงานส่วนใหญ่จะมีมวลชีวภาพสูง และสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี โดยได้มีการรายงานการใช้พืชตระกูลหญ้าชนิดต่างๆ ในการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูจากเหมืองแร่ทองคำ 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