บทความ: การประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

กฤษฎี วานิชสวัสดิ์วิชัย และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

หน่วยปฏิบัติการวิจัย “การจัดการเหมืองสีเขียว”

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การอ้างอิง: กฤษฎี วานิชสวัสดิ์วิชัย และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2562). การประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 23 (ฉบับที่ 4).

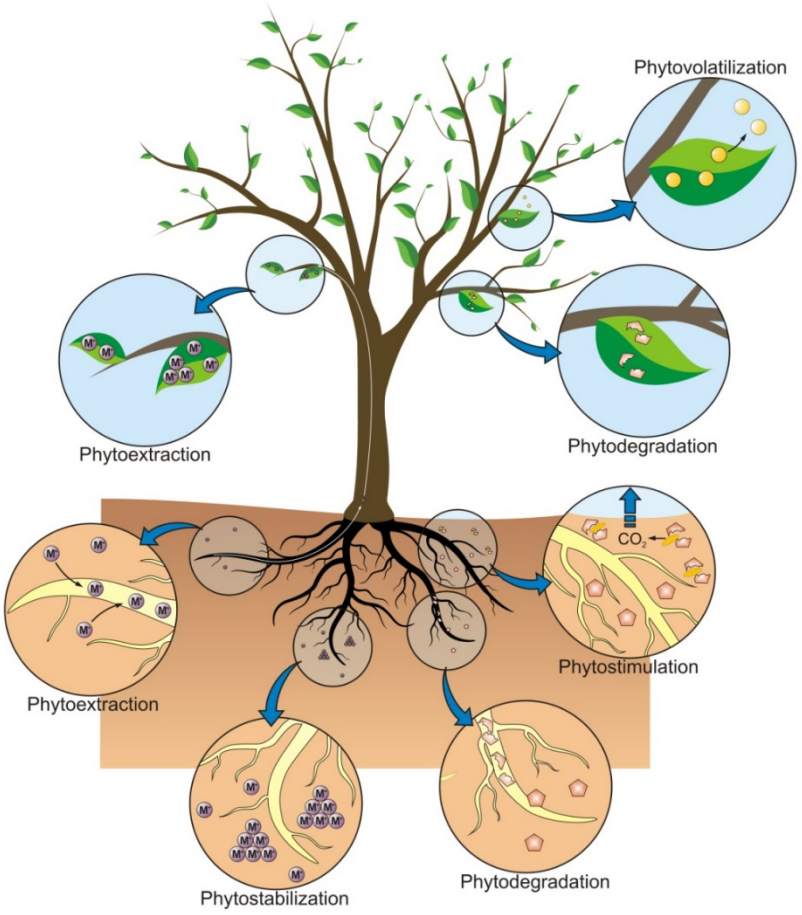
ปัญหาสิ่งแวดล้อม

คำว่าสิ่งแวดล้อมถือได้ว่าเป็นคำที่มีความหมายอย่างกว้างขึ้นอยู่กับนิยามของแต่ละบุคคล แต่ถ้ามองให้ถึงแก่นแท้ของคำว่าสิ่งแวดล้อมนั้น หมายถึง ทรัพยากรธรรมชาติที่เปรียบได้ดั่งสิ่งที่หล่อเลี้ยงสิ่งมีชีวิตในโลกใบนี้ หรือเป็นที่ ๆ มนุษย์เรียกว่า “บ้าน” จากอดีตจนถึงปัจจุบันทรัพยากรธรรมชาติมีแนวโน้มเสื่อมโทรมและถูกทำลายเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันสิ่งแวดล้อมทางวัตถุนิยมที่มนุษย์ได้สร้างขึ้นมาแทนที่ สาเหตุหลักมาจากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและระบบเศรษฐกิจที่ควบคู่ไปกับการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก อีกทั้งยังถูกค่านิยมของสังคมที่บีบบังคับให้ต้องแข่งขันกันในการดำรงชีวิตจนส่งผลให้สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติเสื่อมโทรมลงอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับประเทศไทยนั้นความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อมที่เป็นปัญหาหลักอย่างหนึ่ง คือ การปนเปื้อนโลหะหนักทั้งในดิน น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ตะกอนท้องน้ำ และกากโลหกรรมที่ถูกกักเก็บไว้ในบ่อกักเก็บกากแร่จากการทำเหมืองแร่ ปัจจุบันพบการปนเปื้อนสารหนูบริเวณตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช การปนเปื้อนสารตะกั่วในลำห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี การปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และการปนเปื้อนตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีที่นิคมอุตสาหกรรมลำพูน อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) จากปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักดังกล่าวมักส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของคนในชุมชน ซึ่งแนวทางเลือกของการแก้ไขปัญหานั้นมีหลากหลายวิธีที่ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น แต่สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนในบทความนี้ มีความสนใจในการนำแนวคิดของการใช้พืชที่มีชีวิต (Green plants) มาบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน หรือที่เรารู้จักกันดี คือ เทคโนโลยีการใช้พืช (Phytoremediation) โดยนำมาใช้ร่วมกับอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่มีชื่อว่า จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic)

เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

เทคโนโลยีการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโดยใช้พืช (Phytoremediation) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้พืชในการบำบัด และฟื้นฟูพื้นที่ ๆ ปนเปื้อนสารมลพิษต่าง ๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเป็นพิษของสารมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีนี้สามารถใช้ในการบำบัด รวมทั้งยังกำจัดสารมลพิษที่อยู่ในรูปต่าง ๆ ได้แก่ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในดิน น้ำ และอากาศได้ สิ่งสำคัญของการใช้เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช คือ การเลือกชนิดของพืชให้เหมาะสมกับการบำบัดสารมลพิษในบริเวณที่มีการปนเปื้อนนั้น นอกจากนี้ยังต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของสารมลพิษที่จะทำการบำบัดรวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืชจึงเป็นแนวทางเลือกอีกหนึ่งวิธี สำหรับใช้ในการบำบัดสารมลพิษโดยการพึ่งพาสิ่งที่มีอยู่แล้วในสิ่งแวดล้อม ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนในการบำบัด โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้วิธีที่มีต้นทุนที่สูงและเป็นสาเหตุของการทำลายสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้สารเคมี วิธีชะล้างดิน และการตักหรือขุดลอกหน้าดินไปกำจัดนอกพื้นที่ เป็นต้น ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืชมีหลายประเภท (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558) ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 1



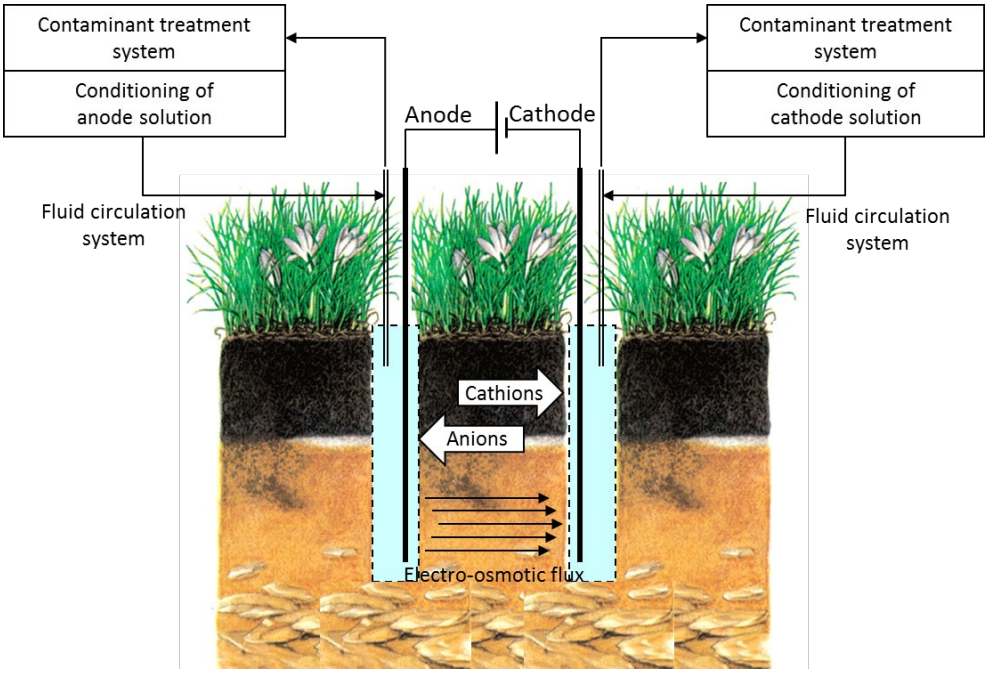
รูปที่ 1 กระบวนการการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

ที่มา: Favas และคณะ (2014)

การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืชสามารถจำแนกได้เป็นหลายประเภทตามกระบวนการกำจัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นภายนอกและภายในของพืช โดยประเภทของกระบวนที่เกิดขึ้นภายนอกของพืชแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ 1) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization) เป็นการลดและจำกัดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษในพื้นที่ปนเปื้อน โดยการตรึงสารมลพิษไว้บริเวณรากพืช และ 2) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation) เป็นการสลายตัวของสารมลพิษด้วยจุลินทรีย์บริเวณรอบ ๆ รากพืช ส่วนประเภทของกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในพืชแบ่งได้เป็น 4 กระบวนการ ได้แก่ 1) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation) เป็นการดูดดึงสารมลพิษเข้าในพืชและย่อยสลายด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึมจากเอนไซม์ต่าง ๆ 2) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization) เป็นการเปลี่ยนแปลงพันธะเคมีของสารมลพิษภายในพืชและระเหยกลายเป็นไอทางปากใบออกสู่บรรยากาศ 3) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration) เป็นการกรองและดูดซับสารมลพิษเข้าไปสะสมไว้เฉพาะบริเวณรากพืช และ 4) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) เป็นการดูดดึง เคลื่อนย้ายสารมลพิษ และสะสมในบริเวณราก ต้น และใบ โดยพืชที่ใช้มักจะเป็นกลุ่มไฮเปอร์แอกคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator) ดังนั้นงานวิจัยที่ต้องการให้มีการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงได้มีการนำเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้ามากระตุ้นใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช โดยกระบวนการของพืชที่นำมาใช้ร่วมส่วนใหญ่มักเป็นกระบวนการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่สารมารถกำจัดสารมลพิษออกจากพื้นที่ ๆ ปนเปื้อนได้อย่างถาวร อีกทั้งยังสอดคล้องและต่อเนื่องหลังจากใช้การบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้าแล้ว

เทคโนโลยีการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic remediation)

การบำบัดโดยวิธีจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic treatment) เป็นเทคนิคที่มีการประยุกต์และปรับปรุงมาใช้ในการบำบัดโลหะหนักจากดิน และน้ำใต้ดิน เป็นต้น ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่ใช้กระแสไฟฟ้าทำให้น้ำ ไอออน และอนุภาคขนาดเล็กที่อยู่ในน้ำระหว่างอนุภาคดินหรือระหว่างเม็ดดินเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า หลังจากนั้นก็จะถูกนำไปบำบัดต่อด้วยวิธีการที่แตกต่างออกไป ซึ่งเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้านั้นมีความเหมาะสมกับดินที่มีอนุภาคละเอียดอย่างดินเหนียว อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของวิธีนี้มีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ เป็นอย่างมาก ได้แก่ รูปแบบของโลหะหนักที่ปนเปื้อน ซึ่งต้องอยู่ในสภาพที่ละลายอยู่ในน้ำ รวมทั้งองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของดินแต่ละชนิด จากที่กล่าวมานั้นสามารถขยายความให้ละเอียดยิ่งขึ้น คือ จลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถทำให้โลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายและมีประจุไม่ว่าจะบวกหรือลบเคลื่อนที่ผ่านเนื้อดินโดยน้ำระหว่างอนุภาคดินได้ โดยใช้วิธีการวางขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ลงในดินและทำการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งจะเกิดการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านอนุภาคดินบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้านั้น และทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักที่ปนเปื้อนไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีชนิดของประจุตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 2 เทคนิคการบำบัดนี้สามารถทำได้โดยไม่ต้องทำการขุดดินขึ้นมาบำบัด (ex-situ)

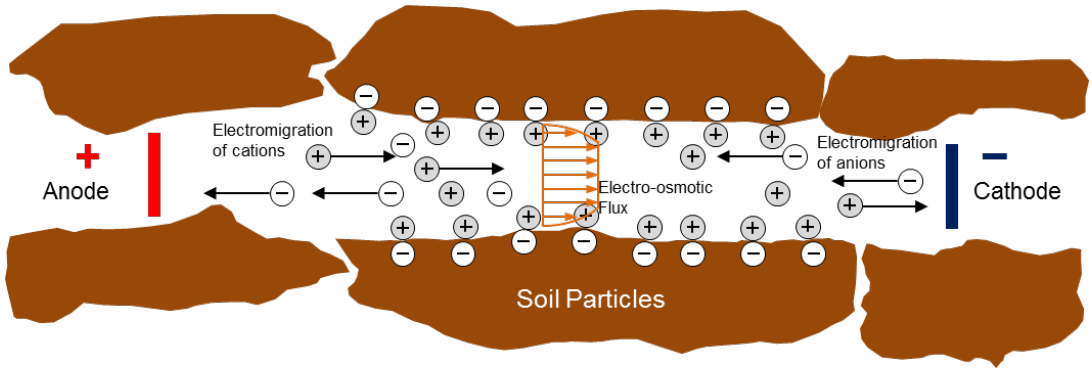


รูปที่ 2 การบำบัดดินด้วยกระบวนการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ที่มา: Cameselle และคณะ (2013)

การบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วย 2 กลไกหลัก ได้แก่ 1) อิเล็กโตรออสโมซิส (Electroosmosis) และ 2) อิเล็กโตรไมเกรชัน (Electromigration) ด้วยรายละเอียดต่อไปนี้

1) อิเล็กโตรออสโมซิส (Electroosmosis) คือ การเคลื่อนที่ของน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดินโดยแรงจากสนามไฟฟ้า ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีน้ำในช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาคดินที่มีประจุลบบนพื้นผิว เมื่อเกิดการสัมผัสกันกับน้ำ ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของไอออน เรียกว่า อิเล็กทริคดับเบิลเลเยอร์ (Electric double layer) ทำให้เกิดการสมดุลของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด หรือกล่าวได้ว่าเมื่อพื้นผิวของอนุภาคดินที่มีประจุลบ ไอออนบวกที่อยู่ในน้ำจะถูกแรงยึดเหนี่ยวให้เข้ามาอยู่บริเวณผิวอนุภาคดิน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงลักษณะของอิเล็กทริคดับเบิลเลเยอร์ (Electric double layer)

ที่มา: Cameselle และคณะ (2013)

2) อิเล็กโตรไมเกรชัน (Electromigration) คือ การเคลื่อนตัวของไอออนต่าง ๆ ในน้ำ โดยไอออนของสารที่มีประจุจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้าม (รูปที่ 3) กล่าวได้ว่า โลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบหรือขั้วแคโทด (Cathode) ในขณะที่โลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกหรือขั้วแอโนด (Anode) (Acar and Alshawabkeh, 1993)

เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้ากับการนำไปใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการใช้พืช

การใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับเทคโนโลยีการใช้พืชนั้น มักจะเป็นการใช้ประโยชน์ที่แสดงถึงประเภทของการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) เป็นส่วนใหญ่ เพราะเนื่องจากเป็นการบำบัดที่สามารถกำจัดสารมลพิษออกไปจากพื้นที่ที่ปนเปื้อนแบบถาวร ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคการบำบัดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ในช่วงเริ่มแรกของงานวิจัยด้านการบำบัดพื้นที่ที่ปนเปื้อนนั้นมักจะนิยมใช้เทคนิคการบำบัดด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างเช่น Senneset และ Strout (1998 ได้ทำการศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนทองแดง โครเมียม และสารหนู และการศึกษาของ Pamukcu และ Huang (2001 ซึ่งศึกษาการจำลองการปนเปื้อนสารหนูในดินเหนียว และทราย และทำการทดสอบการบำบัดในห้องปฏิบัติการ จากที่กล่าวมานั้นในยุคเริ่มแรกของงานวิจัยด้านนี้จะมุ่งเน้นในด้านการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับชนิดของดินและโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่และตำแหน่งหรือรูปแบบการวางขั้วอิเล็กโทรดเป็นหลัก โดยมีจุดมุ่งหมายในการจำกัดขอบเขตของการปนเปื้อนมากกว่าการกำจัดสารมลพิษออกจากพื้นที่ หรือในบางกรณีที่เป็นพื้นที่ที่ปนเปื้อนไม่กว้างมากมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำก็จะมีการใช้เทคนิคอื่น ๆ เช่น การล้างดินเข้ามากำจัดสารมลพิษด้วย เป็นต้น

ในช่วงที่สองของการพัฒนางานวิจัยด้านนี้ได้มีการนำเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้ามาร่วมกับการใช้พืชบำบัด ตัวอย่างเช่น Bi และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตของต้นผักกาดหอม (*Lactuca sativa*) ที่ปลูกไว้ในสารละลายที่มีและไม่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม และให้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีค่าความต่างศักย์ต่างกัน นอกจากนี้ Cang และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาการปลูกผักกาดสีน้ำตาล (Indian mustard) ร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และ สังกะสี โดยทำการทดลองการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของพืชและประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะออกจากดินที่ปนเปื้อน

จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้นจะเห็นได้ว่าช่วงเวลานี้จะเป็นการทดลองการบำบัดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืชเป็นหลัก ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ว่ามีข้อดีข้อเสียอย่างไรบ้าง เช่น ในส่วนของกระแสไฟฟ้านั้นก็จะมีการเปรียบเทียบระหว่างไฟฟ้ากระแสตรง (DC) กับกระแสสลับ (AC) โดยผลที่ได้ก็จะมีความแตกต่างกันไป กล่าวคือ ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) นั้นจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสารมลพิษไปสะสมในพื้นที่ที่ต้องการในปริมาณที่มากกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่จะมีลักษณะของสนามไฟฟ้าสลับขั้วไปมาไม่ได้มีทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าทิศทางเดียวแบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แต่อย่างไรก็ตามในด้านมวล

ชีวภาพของพืชที่ใช้ในการบำบัดนั้นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จะส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของพืชมากกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แต่งานวิจัยส่วนใหญ่มักจะนิยมใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบถึงผลการทดลองที่ได้ โดยพิจารณาจากปัจจัยในการทดลองต่าง ๆ รวมถึงความอันตรายของไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีมากกว่าไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ด้วย นอกจากนี้ในด้านของชนิดพืชที่ใช้ส่วนใหญ่ก็จะใช้พืชอายุสั้นที่โตเร็ว ขยายพันธุ์และดูแลรักษาง่าย มีมวลชีวภาพและความสามารถในการดูดดึงสารมลพิษที่สูงเป็นหลัก (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

ในช่วงสุดท้ายจนถึงปัจจุบันได้มีการเติมสารเคมีลงไปในพื้นที่ที่ปนเปื้อน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพอีกทางหนึ่ง ตัวอย่างเช่น Tahmasbian และ Sinegani (2015) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วโดยใช้พืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารคีเลเตอร์ (Chelators) สำหรับขั้นตอนการทดลองใช้ดินที่ปนเปื้อนบริเวณรอบเหมืองโดยนำมาเติมสารคีเลเตอร์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอาเซติก (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) มูลสัตว์ปีก (Poultry manure extract; PME) และมูลวัว (Cow manure extract; CME) ดังนั้นส่วนของงานวิจัยในช่วงนี้จึงเป็นการลงลึกไปทางด้านโครงสร้างและปฏิกิริยาเคมีของสารคีเลเตอร์ที่จำเพาะเจาะจงต่อชนิดของสารมลพิษมากกว่า

บทสรุป

การแก้ไขปัญหาพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักนั้นมีหลากหลายแนวทาง ซึ่งแต่ละแนวทางมีจุดประสงค์เดียวกัน คือ มุ่งเน้นการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนให้สะอาด ลดหรือปราศจากการปนเปื้อนและตกค้างจากสารพิษและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นการนำเทคโนโลยีการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) ร่วมกับเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic) มาใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนร่วมกันจะสามารถให้ผลลัพธ์ได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางอื่น ๆ เนื่องจากวิธีการสกัดสารมลพิษด้วยพืช ถือได้ว่าเป็นวิธีที่ใช้ธรรมชาติบำบัดธรรมชาติ ซึ่งจะเป็นการกำจัดสารมลพิษอย่างถาวร อีกทั้งยังใช้ต้นทุนในการดำเนินการที่ต่ำ แต่การใช้พืชเพียงอย่างเดียวจะมีข้อเสียในด้านการใช้ระยะเวลาที่นานในการบำบัดแต่ละครั้ง ซึ่งประเด็นนี้ส่งผลให้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาพื้นที่ปนเปื้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในปัจจุบันได้ทัน ทำให้ต้องนำเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่มีจุดเด่นในด้านการกำจัดและลดขอบเขตการปนเปื้อนมาสู่บริเวณที่ต้องการได้ในระยะเวลาอันสั้น อีกทั้งกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่เหมาะสมที่พืชได้รับจะไปกระตุ้นกลไกภายในพืชส่งผลให้มีการดูดดึงสารมลพิษไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ดีกว่าการใช้พืชเพียงอย่างเดียว

จากที่กล่าวมานั้น แม้ว่าเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic) จะมีต้นทุนที่สูงในการบำบัด แต่เมื่อนำมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีกระบวนการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) ที่สามารถกำจัดสารมลพิษในปริมาณมากออกจากพื้นที่ปนเปื้อนอย่างถาวรด้วยระยะเวลาที่สั้นลง ทำให้การนำสองเทคนิคนี้มาใช้ร่วมกันจึงเป็นวิธีการที่ให้ผลลัพธ์คุ้มค่าต่อต้นทุนที่เกิดขึ้น ทั้งยังเป็นการแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนต่อพื้นที่ด้วย

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2559. เทคโนโลยีการบาบัดด้วยพืช (Phytoremediation). ส่วนน้ำเสียอุตสาหกรรม. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2558. การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Acar, Y.B., and Alshawabkeh, A.N. 1993. Principles of electrokinetic remediation. *Environmental Science and Technology*, 27, 2638-2647.

Bi, R., Schlaak, M., Siefert, E., Lord, R., and Connolly, H. 2010. Alternating current electrical field effects on lettuce (*Lactuca sativa*) growing in hydroponic culture with and without cadmium contamination. *Journal of applied electrochemistry*, 40(6), 1217-1223.

Cameselle, C., Gouveia, S., Akretche, D.E., and Belhadj, B. 2013. Advances in electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils. *Organic Pollutants Monitoring Risk and Treatment*, 209-229.

Cang, L., Wang, Q.Y., Zhou, D.M., and Xu, H. 2011. Effects of electrokinetic-assisted phytoremediation of a multiple-metal contaminated soil on soil metal bioavailability and uptake by indian mustard. *Separation and Purification Technology*, 79, 246-253.

Favas, P.J.C., Pratas, J., Varun, M., D'Souza, R., and Paul, M.S. 2014. Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora. *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, 485-517.

Pamukcu, S., and Huang, C.P. 2001. In situ remediation of contaminated soils by electrokinetic processes. In 'Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook'. CRC Press: Florida.

Senneset, K.G., and Strout, J.M. 1998. Applicability of electrokinetic remediation to Norwegian soils: a model study. In 'Contaminated and derelict land: the proceedings of GREEN 2: the second international symposium on geotechnics related to the environment held in Krakaow, Poland. Thomas Telford: London

Tahmasbian, I., and Safari Sinegani, A.A. 2015. Improving the efficiency of phytoremediation using electrically charged plant and chelating agents. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 2479-2486.