บทความวิชาการ

การประยุกต์ใช้แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชร่วมกับเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่นเพื่อบำบัดสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน

เก่ง เจียมกิจวัฒนา[1] และ วสุ ปฐมอารีย์[2*]

บทคัดย่อ

สารโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ นับเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบอย่างกว้างขวางต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม สารโลหะหนักไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จึงต้องหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมเพื่อบำบัดและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก กระบวนการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพโดยการใช้พืชด้วยเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่นมีความน่าสนใจ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและต้นทุนต่ำ รวมทั้งมีความเหมาะสมสำหรับแก้ปัญหาการปนเปื้อนของสารโลหะหนักในดินซึ่งไม่อาจได้รับการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้จุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม อุปสรรคและข้อจำกัดสำคัญของการนำเทคโนโลยีนี้ไปประยุกต์ใช้คือพืชสามารถนำโลหะหนักที่ติดอยู่กับอนุภาคดินไปใช้ได้น้อย และใช้ระยะเวลาดำเนินการที่ยาวนาน แต่อาจแก้ปัญหาได้โดยการนำแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีนี้ด้วยการผลิตสารเมแทบอไลต์หลายชนิดที่มีผลช่วยส่งเสริมการเจริญของพืช และส่งเสริมให้พืชดูดซึมโลหะหนักได้ดีขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อม งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในอนาคต

คำสำคัญ: ไฟโตเอกซ์แทรคชั่น แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช สารโลหะหนัก

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[2]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, email: wasu.p@cmu.ac.th

Application of Plant Growth Promoting Bacteria with Phytoextraction Technology for Remediation of Contaminated Heavy Metals in Soil

Keng Jiamkitwattana[1] and Wasu Pathom-aree[2*]

ABSTRACT

Contaminated heavy metals in environment generated from human activities became major health and environmental problems. Heavy metals are immutable by any natural biodegradation process that is still in need of an effective and proper clean up process. Phytoextraction, which is one type of phytoremediation, is a promising technology because it is clean, environmental friendly and cost effective. It is also superior for metals clean-up than microbial bioremediation which is ineffective at addressing this type of contamination, particularly in soil. However, a major hurdle to apply this technology is the low bioavailability of heavy metals in soil and time consuming is also another disadvantage of this technology. These problems can be solved by the application of plant growth promoting bacteria (PGPR) with this technology. Many metabolites produced from these bacteria can promote plant growth and help both direct and indirect way to improve plant's heavy metals removal efficiency. Many research papers showed that this technology is potentially applicable in the near future.

Keywords: Phytoextraction, Plant growth promoting bacteria (PGPR), Heavy metals

[1]Department of Environmental Science, Faculty of Science, Chiang Mai University

[2]Department of Biology, Faculty of Science, Chiang Mai University

[*]Corresponding author, e-mail: wasu.p@cmu.ac.th

บทนำ

การพัฒนาเศรษฐกิจโดยมุ่งเน้นด้านอุตสาหกรรมของประเทศไทยส่งผลกระทบอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อมและการดำรงชีวิตของประชาชน โดยเฉพาะสารมลพิษหลากหลายชนิดที่เกิดขึ้นตั้งแต่กระบวนการผลิตในระบบโรงงานอุตสาหกรรมไปจนถึงขยะจากซากผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้อีกต่อไป สารมลพิษเหล่านี้ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจนส่งผลเสียต่อสุขภาพของประชาชนอย่างกว้างขวาง [1]

รูปที่ 1 พื้นที่ปนเปื้อนสารพิษในประเทศไทย อ้างอิงข้อมูลจาก [1]

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าสารมลพิษกลุ่มโลหะหนักเช่น สารหนู ตะกั่ว แคดเมียม สร้างปัญหามลพิษในหลายพื้นที่ ซึ่งหากประชาชนในพื้นที่ได้รับสารโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายย่อมเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากมีผลรบกวนการทำงานของเซลล์จากการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์สำคัญในเซลล์ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวโมเลกุล [2] จนทำให้เกิดโรคพิษจากโลหะหนัก (Heavy metal poisoning) ซึ่งมีอาการทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง [3]

แหล่งที่มาของสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้มาจากทั้งเหมืองแร่ โรงงานอุตสาหกรรม ของเสียจากชุมชนและการเกษตร ซึ่งปนเปื้อนลงสู่ดิน ก่อนไหลลงสู่แหล่งน้ำและสะสมอยู่ในตะกอนดินใต้น้ำ นำไปสู่การเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารผ่านทางพืชและสัตว์น้ำและกระจายความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่นตามห่วงโซ่อาหารต่อไป [4]

โลหะหนักไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ เป็นเหตุให้เกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมและถ่ายทอดเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารจนอาจเกิดการสะสมของสารโลหะหนักปริมาณมากในร่างกาย ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนจากการเจ็บป่วยด้วยโรคพิษจากโลหะหนัก เช่น โรคมะเร็ง ไตวาย โลหิตจาง รบกวนการทำงานของระบบประสาทและสมอง รวมทั้งโรคจากความผิดปกติในการทำงานของต่อมไร้ท่อ [4] ดังนั้นการบำบัดและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนของโลหะหนักอันตรายเหล่านี้จึงเป็นสิ่งที่ไม่อาจละเลยได้ เทคโนโลยีการบำบัดสารมลพิษ (Remediation technology) เป็นกระบวนการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม การบำบัดสารมลพิษเป็นกระบวนการที่สามารถทำได้ทั้งทางกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ เพื่อลดผลกระทบของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม แต่ละกระบวนการมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไปโดยการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับสถานการณ์และสถานที่ อาจใช้เพียงกระบวนการใดเพียงกระบวนการเดียวหรือใช้หลายกระบวนการร่วมกันก็ได้ การบำบัดและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน สามารถกระทำได้โดยวิธีทางกายภาพและเคมี แต่มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้นทุนในการดำเนินงานสูง อาศัยแรงงานมาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดั้งเดิมต่างๆ ของดิน และรบกวนจุลินทรีย์ประจำถิ่นในดิน [4] ดังนั้นการใช้วิธีการทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมเนื่องจากต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้สิ่งมีชีวิตที่นิยมใช้ในการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการทางชีวภาพได้แก่ จุลินทรีย์ และพืช อย่างไรก็ตามเนื่องจากกลไกการบำบัดสารมลพิษโดยจุลินทรีย์ (Microbial remediation) นั้น อาศัยกระบวนการเมตาบอลิซึมและเอนไซม์หลากหลายชนิดของจุลินทรีย์เพื่อไปเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของสารมลพิษให้กลายเป็นสารที่มีความเป็นพิษลดลงหรือไม่เป็นพิษเลย การบำบัดสารมลพิษโดยจุลินทรีย์ จึงเหมาะกับสารมลพิษอินทรีย์ (Organic pollutants) แต่ไม่เหมาะกับสารโลหะหนักซึ่งไม่สามารถถูกกระบวนการใดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีได้ การบำบัดสารโลหะหนักโดยจุลินทรีย์จึงทำได้เพียงเปลี่ยนสถานะออกซิเดชั่น (Oxidation state) ของโลหะหนักให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นพิษน้อยกว่า สุดท้ายแล้วสารโลหะหนักก็ยังคงตกค้างอยู่ในดินเช่นเดิม [5]

กระบวนการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพโดยการใช้พืช (Phytoremediation)

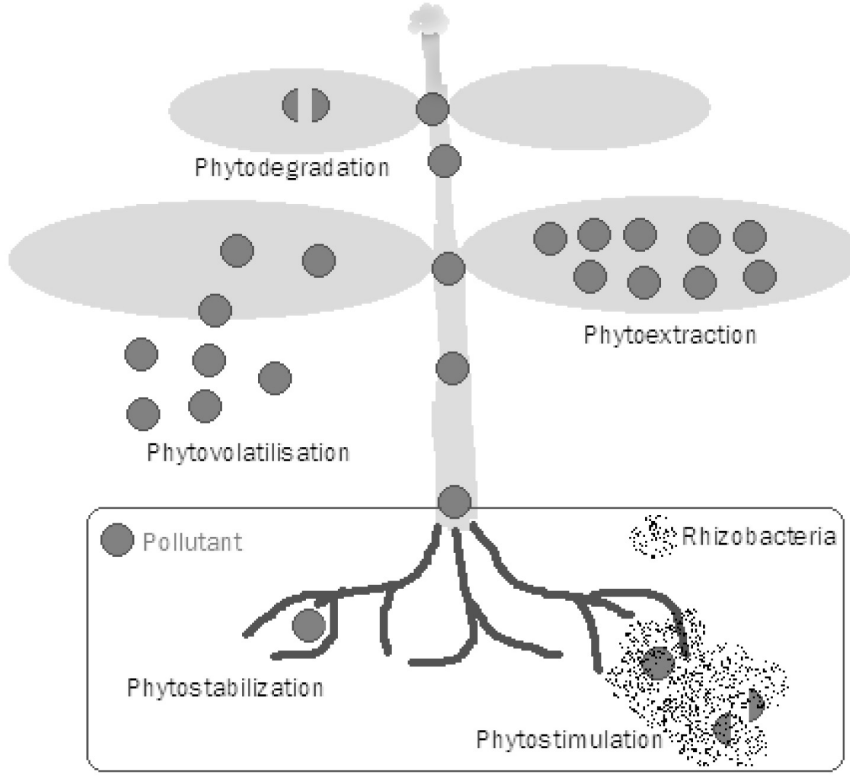
กระบวนการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพโดยการใช้พืช (Phytoremediation) ซึ่งมีรากศัพท์มาจากภาษากรีกคำว่า “Phyto” ที่แปลว่า พืช ผสมกับ ภาษาลาตินคำว่า “Remedium” ซึ่งแปลว่า การคืนสมดุลกลับมา โดยรวมแล้วหมายถึงความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ใช้พืชบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม [6] จัดเป็นกระบวนการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจ สามารถนำมาช่วยบรรเทาปัญหาการปนเปื้อนของสารมลพิษโดยเฉพาะสารโลหะหนักในดิน ซึ่งไม่อาจได้รับการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้จุลินทรีย์ (Microbial bioremediation) เพียงอย่างเดียว [7]

อย่างไรก็ดี กระบวนการบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยพืช มีข้อดีและข้อจำกัดเช่นเดียวกับกระบวนการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีอื่น ซึ่งสามารถสรุปข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยพืชได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อจำกัดของการบำบัดมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยใช้พืช (ดัดแปลงจาก Chappell, 1998 ใน [8])

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. ค่าใช้จ่ายถูก	1. บำบัดได้เฉพาะสารมลพิษที่ปนเปื้อนบริเวณพื้นผิวที่ไม่ลึกมากนัก
2. ประหยัดพลังงาน ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นตัวขับเคลื่อน	2. พืชอาจเจริญเติบโตได้ไม่ดีเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ
3. ได้รับการยอมรับจากสาธารณชน	3. ใช้เวลานานกว่าจะประสบผลสำเร็จโดยเฉพาะพืชที่โตช้า และมีมวลชีวภาพน้อย
4. เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่บำบัด เช่น หน้าดิน น้อยที่สุด	4. มีความเป็นไปได้ที่สารผลิตภัณฑ์ผลลัพธ์จากกระบวนการบำบัดสารมลพิษในพืชอาจเป็นสารที่มีอันตรายมากกว่าเดิม
5. มีขยะที่เป็นผลมาจากกระบวนการบำบัดค่อนข้างน้อย	5. สารมลพิษที่สะสมในพืชอาจเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร

เทคโนโลยีที่ใช้บำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยพืช สามารถแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ [9] ได้แก่



รูปที่ 2 กลไกในการกำจัดสารมลพิษที่เป็นไปได้เมื่อใช้วิธีการบำบัดโดยพืช โดยวงกลมแทนสารมลพิษซึ่งอาจถูกตรึง ทำลายบริเวณรากโดย Rhizobacteria ถูกดูดซับ ถูกทำลายภายในเนื้อเยื่อพืช หรือ ระเหยออกไปในอากาศ อ้างอิงข้อมูลจาก [9]

Phytodegradation หมายถึงการใช้พืชดูดซับ กักเก็บ สารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมไว้ในเนื้อเยื่อพืช เพื่อให้เนื้อเยื่อพืชทำลายสารมลพิษนั้นต่อไป

Phytovolatilisation หมายถึงการใช้พืชที่สามารถดูดซับสารมลพิษเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชและสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสาร ให้กลายเป็นสารระเหยออกสู่บรรยากาศได้

Phytostabilization หมายถึงการใช้พืชโดยเฉพาะบริเวณรากตรึงหรือจับสารมลพิษไม่ให้กระจายออก ไปปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมากกว่าที่เป็นอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถูกชะล้างจากดินสู่แหล่งน้ำหรือน้ำบาดาล สำหรับคำว่า Rhizofiltration หมายถึงการใช้รากพืชเพื่อดูดซับและกักเก็บสารพิษ ซึ่งมีความหมายค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยข้อแตกต่างที่สำคัญคือ Phytostabilization ใช้บำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดิน ขณะที่ Rhizofiltration ใช้บำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำ

Phytostimulation or rhizodegradation หมายถึงการใช้จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณรากพืชร่วมกับพืชในการทำลายสารมลพิษ

Phytoextraction หมายถึงการใช้พืชดูดซับ เคลื่อนย้าย และกักเก็บสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมไว้ในเนื้อเยื่อพืช เมื่อพืชเจริญเต็มที่ก็จะตัดส่วนต้นและใบที่สะสมสารพิษเพื่อนำไปทำลาย

เทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่น (Phytoextraction) เพื่อบำบัดสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน

หลักการของเทคโนโลยีนี้คือการใช้พืชดูดซับและกักเก็บสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมไว้ในเนื้อเยื่อพืชและเก็บเกี่ยวพืชนั้นเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการกำจัด เช่น การเผาทำลายด้วยความร้อนสูง (Incineration) ซึ่งถือได้ว่ามีความเหมาะสมต่อการกำจัดสารโลหะหนักที่มีความคงตัวและไม่สามารถถูกทำลายโดยกระบวนการทางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะนำสารโลหะหนักซึ่งถูกกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อพืชเข้าสู่กระบวนการสกัดเอาสารโลหะหนักที่มีมูลค่ากลับมาใช้ใหม่ได้ [10]

จุดเริ่มต้นที่นำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่น เริ่มขึ้นจากการค้นพบพืชป่าหรือพืชพื้นถิ่นบางชนิดที่สามารถดูดซับสารโลหะหนักได้ดีเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับพืชทั่วไป [7] โดยพืชที่สามารถเจริญได้ในดินที่มีธาตุโลหะหนักอยู่มากกว่าปกติ (Metalliferrous plant) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ

1. Excluder คือพืชที่ทนอยู่ในดินที่มีโลหะหนักอยู่ได้โดยไม่ดูดซึมธาตุโลหะหนักเอาไว้ในลำต้น โดยความเข้มข้นของธาตุโลหะหนักบริเวณรากจะมากกว่าบริเวณส่วนลำต้นและใบ

2. Indicator คือพืชที่สะสมธาตุโลหะหนักเอาไว้ในลำต้นในระดับที่สามารถสะท้อนปริมาณธาตุโลหะหนักที่มีอยู่ในดินได้

3. Hyperaccumulator คือพืชที่สะสมธาตุโลหะหนักเอาไว้ในลำต้นได้ในปริมาณมากกว่าปกติโดยที่ไม่มีอาการผิดปกติใดเกิดขึ้นกับต้นพืช โดยพืชชนิดใดที่สามารถสะสมแคดเมียมได้มากกว่า 100 มิลลิกรัม ต่อ 1 กิโลกรัมน้ำหนักพืช ทองแดง โคบอลต์ โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว ได้มากกว่า 1,000 มิลลิกรัม ต่อ 1 กิโลกรัมน้ำหนักพืช หรือสะสมแมงกานีสหรือสังกะสีไว้ในต้นพืชได้มากกว่า 10,000 มิลลิกรัม ต่อ 1 กิโลกรัมน้ำหนักพืช อาจจัดเป็นพืช hyperaccumulator ได้ หรือพืชที่มีอัตราส่วนการสะสมโลหะหนักในส่วนใบหรือยอดต่อรากมากกว่า 1 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าเกิดการเคลื่อนที่ของสารโลหะหนักจากรากสู่บริเวณส่วนบนของต้นพืชอาจจัดเป็น hyperaccumulator ได้เช่นกัน [11] โดยสันนิษฐานว่าปรากฏการณ์นี้มีหน้าที่เพื่อใช้ปกป้องพืชจากสัตว์กินพืชและแมลง [7]

พืชโดยทั่วไปมีแนวทางจัดการความเป็นพิษจากโลหะหนักด้วยการเก็บโลหะหนักไว้ในผนังเซลล์และแวคิวโอล (Vacuole) ของรากเพื่อแยกโลหะหนักไม่ให้เข้าสู่ส่วนไซโตพลาซึมของราก ในขณะเดียวกันก็เป็นการป้องกันโลหะหนักไม่ให้ไปสู่ส่วนยอดของพืช เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงอันเนื่องมาจากโลหะหนัก [12] อีกแนวทางหนึ่งที่ป้องกันความเป็นพิษจากโลหะหนักได้ คือการสร้างสารบางอย่างออกมาจากรากพืชเพื่อดักจับธาตุโลหะหนักไม่ให้เข้าสู่เซลล์รากได้ ดังเช่นตัวอย่างของข้าวโพดสายพันธุ์ที่ทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม (Al) จะสร้างกรดซิตริกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารคีเลต (Chelating agents) กับอะลูมิเนียม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะลูมิเนียมที่ไม่อาจผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ [6] พืชทั่วไปที่ใช้กลไกเหล่านี้ในการจัดการความเป็นพิษจากสารโลหะหนักจึงไม่เหมาะที่จะนำไปพัฒนาสำหรับเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่นได้

สำหรับพืช hyperaccumulator มีกลไกสำหรับจัดการสารโลหะหนักที่แตกต่างออกไปโดย บริเวณรากจะมีโปรตีนขนส่ง (Transporter) สำหรับสารโลหะหนักอย่างหนาแน่น ทำให้ระดับการนำสาร โลหะหนักเข้าสู่เซลล์อยู่ในระดับสูงตลอดเวลา [12] รวมทั้งการผลิตสาร phytosiderophore ซึ่งเป็น สารอินทรีย์ที่โดยปกติแล้วพืชจะสร้างขึ้นในสภาวะขาดแคลนธาตุเหล็ก โดยการปลดปล่อยออกมาจากราก (Root exudation) ให้แทรกซึมเข้าไปอยู่ในระหว่างอนุภาคดิน (Soil particles) เพื่อสร้างสารประกอบ เชิงซ้อนกับธาตุเหล็กที่เกาะติดอยู่อนุภาคดิน โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะนำเอาธาตุเหล็กเข้าสู่ เซลล์รากพืชผ่านทาง high affinity transporter ที่อยู่บริเวณผิวของรากพืช (Root surface) ต่อมาได้มีการ ค้นพบว่า phytosiderophore มีคุณสมบัติช่วยนำสารโลหะหนักชนิดอื่นเช่น สังกะสี ทองแดง แมงกานีส นิเกิล และแคดเมียมที่ติดอยู่กับอนุภาคดินเข้าสู่เซลล์รากได้มากขึ้น [6, 7, 13]

สำหรับการลำเลียงสารโลหะหนักจากรากไปสู่ยอดนั้น สันนิษฐานว่าช่วงระยะเวลาที่พืชเจริญใน พื้นที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเป็นเวลานาน ทำให้เพิ่มขนาดการลำเลียงสารโลหะหนักผ่านไซเลม (Enhanced xylem loading) อย่างต่อเนื่อง ช่วยให้พืชเกิดการปรับตัวจนทนต่อความเป็นพิษและมีความสามารถในการ ลำเลียงสารโลหะหนักจากรากสู่ยอด (Translocation) ได้ดีขึ้น [12] ด้วยเหตุที่สารโลหะหนักไม่สามารถ สลายตัวได้ พืชจึงต้องมีกลไกที่จะเก็บสารเหล่านี้ไว้โดยไม่เป็นอันตรายต่อพืช กลไกที่เป็นไปได้ที่สุดคือ การใช้เปปไทด์ที่อุดมไปด้วยกรดอะมิโนซิสเทอิน (Cysteine rich peptides) 2 ชนิดคือ metallothioneins และ phytochelatins โดยโลหะหนักหลายชนิด เช่น แคดเมียม และนิกเกิลจะสร้างพันธะกับธาตุกำมะถัน ของกรดอะมิโนซิสเทอินซึ่งเป็นองค์ประกอบในเปปไทด์เหล่านี้ และนำไปเก็บไว้ในแวคิวโอลเพื่อป้องกัน ความเป็นพิษจากโลหะหนักต่อเซลล์พืช [6, 7]

มีการนำเสนอแนวคิดที่ใช้พืชที่มีความสามารถพิเศษเหล่านี้ในการบำบัดสารโลหะหนักตั้งแต่ช่วง ทศวรรษที่ 80 (ค.ศ. 1980) แต่ด้วยอุปสรรคหลายอย่าง เช่นพืชเหล่านี้มีมวลชีวภาพต่ำ การขาดเทคโนโลยี เพื่อใช้ในการเพาะปลูกพืชเหล่านี้ในเชิงเกษตรกรรมขนาดใหญ่ และขาดความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยทาง ชีววิทยาและสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลให้พืชเหล่านี้สะสมสารโลหะหนักได้มากเป็นพิเศษ ต่างเป็นตัวขัดขวางการ พัฒนาเทคโนโลยีนี้มาเป็นเวลานาน ทำให้การวิจัยได้เปลี่ยนเป้าหมายไปเน้นการค้นหาศักยภาพในการสะสม สารโลหะหนักของพืชที่มีมวลชีวภาพสูง และสามารถเพาะปลูกในเชิงเกษตรกรรมได้ง่าย [7]

คุณสมบัติของพืชที่เหมาะจะนำมาใช้ในเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่นประกอบด้วย [14]

1. โตเร็วและให้มวลชีวภาพปริมาณมาก

2. สามารถทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนักได้ โดยพืชที่ทนต่อสารโลหะหนักได้สามารถปรับ ตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมที่เป็นพิษจากโลหะหนักเหล่านี้ได้

3. สะสมสารโลหะหนักได้ในส่วนของพืชที่อยู่เหนือพื้นดิน และสามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย

4. มีค่าปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ (Bioconcentration factor) [15] มากกว่า 1 แสดงถึง ประสิทธิภาพในการดูดซึมสารมลพิษเข้าสู่เนื้อเยื่อพืช โดยไม่เกิดอาการผิดปกติหรือเป็นพิษต่อพืช

มีการศึกษาวิจัยและพบว่าพืชหลายชนิดมีศักยภาพเพื่อนำมาใช้ในเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่น สำหรับบำบัดสารโลหะหนักดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พืชที่มีศักยภาพในการบำบัดสารโลหะหนักบางชนิด

โลหะหนัก	พืช (ชื่อสามัญอังกฤษ/ชื่อวิทยาศาสตร์)	อ้างอิง
โครเมียม	ข้าว (Rice/*Oryza sativa* L.)	[16]
โครเมียม	ต้นหลิว (Willow/*Salix babylonica* L.)	[17]
สารหนู	ข้าวโพด (Maize/*Zea mays* L.)	[18]
แคดเมียม	มะแว้งนก (Black nightshade/*Solanum nigrum* L.)	[19]
ทองแดง	ทานตะวัน (Sunflower/*Helianthus annuus* L.)	[20]
ทองแดง	ดาวเรือง (marigold/*Tagetes erecta* L.)	[21]
สังกะสี	โคมไฟจีน (Chinese lantern/*Physalis alkekengi* L)	[22]
นิกเกิล	ผักกาดก้านขาว (Rapeseed/*Brassica napus* L)	[23]
ตะกั่ว	ทานตะวัน (Sunflower/*Helianthus annuus* L.)	[24]

อย่างไรก็ตาม อุปสรรคสำคัญของการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ในการบำบัดสารโลหะหนักในดิน คือ พืชสามารถนำโลหะหนักที่ติดอยู่กับอนุภาคดินไปใช้ได้น้อย (Low bioavailability) มีการทดลองนำพืชโตเร็วและให้มวลชีวภาพปริมาณมาก รวมทั้งสามารถเพาะปลูกในเชิงเกษตรกรรมได้ดีอย่างผักกาดเขียว (*Brassica juncea*, Indian mustard) ซึ่งมีสายพันธุ์ใกล้ชิดกับพืช hyperaccumulator หลายชนิดในวงศ์ *Brassicaceae* มาเพาะเลี้ยงแบบไฮโดรโปนิกส์ (Hydroponic) ในสารละลายที่มีสารโลหะหนักปริมาณสูง พบว่าสามารถสะสมสารโลหะหนักได้ดีแต่เมื่อปลูกพืชลงในดินที่ปนเปื้อนสารโลหะหนักปริมาณสูง ความสามารถในการสะสมสารโลหะหนักกลับลดลง [7] ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่ารากมีศักยภาพในการดูดซับสารโลหะหนักได้ดีเพราะมีพื้นที่ผิวมากและมีตัว receptor ที่มีความสามารถในการจับกับสารเคมีต่างๆ ได้ดี เมื่อเพาะเลี้ยงในสารละลายรากจึงสามารถดูดซับโลหะหนักได้ในปริมาณมาก แต่เมื่ออยู่ในดินการดูดซับต้องแย่งกับอนุภาคในดิน การดูดซับจึงไม่ดีดังเดิม [6]

การเติมสารคีเลต เช่น EDTA เพื่อให้ไปสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักอิสระ (Free metal) เมื่อปริมาณโลหะหนักอิสระลดลงก็จะทำให้โลหะหนักที่เกาะอยู่กับอนุภาคดินหลุดออกมาเป็นอิสระเป็นการทดแทนไปตามหลักสมดุลความเข้มข้น พร้อมกันนั้นพืชสามารถดูดซับสารโลหะหนักที่สร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA เข้าไปในเซลล์รากได้ จึงเป็นการช่วยให้รากพืชสามารถดูดซับสารโลหะหนักจากดินได้ดีขึ้น [7] อย่างไรก็ตามสารเคมี เช่น EDTA มีความเป็นพิษต่อพืช รวมทั้งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในดินที่มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญและพัฒนาการของพืช [25]

แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช (Plant Growth Promoting Bacteria หรือ PGPB)

แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช หมายถึงกลุ่มแบคทีเรียสายพันธุ์ต่างๆที่แยกได้จากสิ่งแวดล้อมที่มีความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในด้านต่างๆ [26] โดย PGPB มักอาศัยบริเวณรากพืชที่อุดมไปด้วยสารอาหารที่ปล่อยออกมาจากพืช (Plant exudates) เช่น กรดอะมิโน หรือน้ำตาลหลายชนิด จึงเป็นแหล่งอาหารอันอุดมสมบูรณ์สำหรับแบคทีเรีย โดย PGPB นั้นอาจอาศัยอยู่บริเวณดินรอบๆ ราก (Rhizophere) บริเวณผิวราก (Rhizoplane) หรืออยู่ในเซลล์รากก็ได้ ดังนั้นจึงอาจเรียกชื่อแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้อีกชื่อหนึ่งว่า Plant Growth Promoting Rhizobacteria หรือ PGPR [27]

กลไกการส่งเสริมการเจริญของพืชโดย PGPB นั้น มีได้หลายรูปแบบดังรายละเอียดต่อไปนี้ [28]

1. การตรึงไนโตรเจน (Nitrogen fixation) ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักของพืช แม้ว่าในอากาศจะมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ถึงประมาณร้อยละ 78 แต่อยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ไนโตรเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแอมโมเนีย ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยอาศัยกลไกภายในจุลินทรีย์ที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้ (Nitrogen fixing microorganisms) ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียไรโซเบียม (*Rhizobium* spp.) ที่อาศัยอยู่ในปมรากของพืชตระกูลถั่ว

2. การเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดินให้อยู่ในรูปที่พืชดูดซึมไปใช้ได้ (Phosphate solubilization) ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักที่มีความสำคัญรองลงมาจากไนโตรเจน แม้จะมีฟอสฟอรัสอยู่ในดินเป็นจำนวนมากแต่ฟอสฟอรัสในรูปที่พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้กลับมีน้อย เนื่องจากฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ไม่ดีพืชจึงดูดซึมไปใช้ไม่ได้ แม้แต่การเติมปุ๋ยเคมีฟอสเฟตให้แก่พืชก็พบว่าพืชดูดซึมไปใช้ได้น้อยและปุ๋ยฟอสเฟตส่วนที่เหลือก็จะเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ไม่ดีอยู่ในดินต่อไป แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งเรียกว่า Phosphate-solubilizing bacteria มีความสามารถในการเปลี่ยนฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ไม่ดีให้ละลายได้ดีขึ้นจึงช่วยให้พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ดี โดยกลไกการผลิตกรดอินทรีย์เพื่อให้ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในดินละลายน้ำได้ดีขึ้น (Solubilization of inorganic phosphorus) และการผลิตเอนไซม์ฟอสฟาเทส (Phosphatase) เพื่อย่อยฟอสฟอรัสอินทรีย์ให้กลายเป็นธาตุอาหารที่พืชนำไปใช้ได้ (Mineralization of organic phosphorus) ตัวอย่างของแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ แบคทีเรียในจีนัส *Azotobacter, Pseudomonas, Rhizobium*

3. การผลิตสารไซเดอโรฟอร์ (Siderophore production) ธาตุเหล็กเป็นธาตุอาหารสำคัญต่อทั้งพืชและจุลินทรีย์ที่แม้ต้องการในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้เพราะมีความเกี่ยวข้องกันต่อกระบวนการสำคัญในการดำรงชีวิต เช่น การทำงานของเอนไซม์ การขนส่งอิเล็คตรอนในกระบวนการสร้างพลังงาน เป็นต้น [29] อย่างไรก็ตามธาตุเหล็กที่อยู่ในดินที่มีสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เป็นกลางจะอยู่ในรูปของเฟอริก (Fe^{3+}) และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ที่ละลายน้ำได้ยาก [30] ทำให้ทั้งพืชและจุลินทรีย์ไม่สามารถนำเหล็กไปใช้ได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวทั้งพืชและจุลินทรีย์จึงผลิตสารไซเดอโรฟอร์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์มวลโมเลกุลต่ำที่มีความสามารถในการจับธาตุเหล็กในดินเพื่อนำมาเข้าสู่เซลล์ได้ง่าย ทั้งนี้คำว่าไซเดอโรฟอร์ (Siderophore) มักจะหมายถึงสารไซเดอโรฟอร์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์โดยอาจเรียกให้เฉพาะเจาะจงได้ว่า microbial siderophore สำหรับคำว่าไฟโตไซเดอโรฟอร์ (Phytosiderophore) หมายถึงสารไซเดอโรฟอร์ที่ผลิตได้โดยพืช

สารไซเดอโรฟอร์ที่ผลิตขึ้นมาทั้งจากพืชและจุลินทรีย์มีคุณสมบัติที่เหมือนกันหลายอย่างเช่น ถูกสร้างขึ้นมาในสภาวะขาดแคลนธาตุเหล็ก จึงมีหน้าที่หลักในการนำพาธาตุเหล็กที่อยู่ในดินเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ในกิจกรรมที่สำคัญของเซลล์ นอกจากธาตุเหล็กแล้วสารไซเดอโรฟอร์จากทั้งพืชและจุลินทรีย์ยังสามารถจับกับโลหะหนักชนิดอื่นเช่น อะลูมิเนียม แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง ได้ด้วย [29] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะทำหน้าที่และมีความสามารถที่คล้ายกันแต่ยังมีความแตกต่างในโครงสร้างทางเคมีและประสิทธิภาพในการจับธาตุเหล็ก โดยสารไซเดอโรฟอร์จากจุลินทรีย์อาจแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มตามโครงสร้างเคมีที่แตกต่างกัน ได้แก่ catecholates, carboxylates, hydroxamates และแบบที่มีโครงสร้างหมู่ฟังก์ชันทั้ง 3 แบบหลักที่ได้กล่าวไปผสมกัน (Mix of the main functional groups) ซึ่งทั้ง 4 กลุ่มมีประสิทธิภาพในการจับธาตุเหล็กได้ไม่เท่ากัน โดยแบบ catecholates มีความสามารถในการจับเหล็กได้แน่นที่สุด [29, 30] สำหรับสารไซเดอโรฟอร์จากพืชมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีไม่หลากหลายเท่าของจุลินทรีย์และมีความสามารถในการจับเหล็กต่ำกว่า กล่าวคือมีค่าความสามารถในการจับเหล็กใกล้เคียงกับสารไซเดอโรฟอร์กลุ่ม carboxylates ซึ่งเป็นกลุ่มของสารไซเดอโรฟอร์จากจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการจับเหล็กต่ำที่สุด [29]

สารไซเดอโรฟอร์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ มีความสามารถในการจับธาตุเหล็กที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน (Complexing iron) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนเฟอริก-ไซเดอโรฟอร์ (Fe^{3+}-siderophore complex) จะผ่านกระบวนการรีดักชันบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์กลายเป็นเฟอรัส (Fe^{2+}) ซึ่งแยกหลุดออกมาจากสารไซเดอโรฟอร์เพื่อเข้าสู่เซลล์ โดยพืชสามารถใช้ประโยชน์จากไซเดอโรฟอร์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์โดยการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนเฟอริก-ไซเดอโรฟอร์ เข้าสู่เซลล์พืชโดยตรงและนำธาตุเหล็กไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตของพืชได้ นอกจากนี้สารไซเดอโรฟอร์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นสามารถจับกับธาตุโลหะหนักชนิดอื่นนอกเหนือไปจากเหล็ก ส่งผลให้ปริมาณและความเป็นพิษของสารโลหะหนักเหล่านี้ต่อพืชลดลง ซึ่งช่วยส่งเสริมการเจริญของพืชเช่นกัน [28]

4. การผลิตฮอร์โมนพืช (Phytohormone production) กว่าร้อยละ 80 ของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณรอบราก (Rhizospheric Microbes) สามารถผลิตกรดอินโดลอะซิติก (Indole-3-acetic acid; IAA) [28] ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่พืชสังเคราะห์ขึ้นเพื่อทำหน้าที่เป็นฮอร์โมนออกซิน (Auxin) และแม้ว่าพืชจะสามารถสังเคราะห์สารอินทรีย์อีกหลายชนิด เช่น อินโดลเอทานอล (Indole ethanol) กรดฟีนิลอะซิติก (Phenylacetic acid) เพื่อทำหน้าที่เป็นฮอร์โมนออกซินได้เช่นกัน แต่กรดอินโดลอะซิติกมีบทบาทสำคัญที่สุดในการทำหน้าที่ฮอร์โมนออกซิน [31] โดยส่งผลต่อการแบ่งเซลล์ (Cell division) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อทำหน้าที่เฉพาะของเซลล์พืช (Cell differentiation) กระตุ้นการงอกของเมล็ด (Seed germination) เพิ่มอัตราพัฒนาการของไซเลมและราก (Xylem and root development) การตอบสนองต่อแสงและแรงโน้มถ่วง (Response to light and gravity) และการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis)

กรดอินโดลอะซิติกที่สร้างโดยแบคทีเรียบริเวณรอบราก (Rhizobacteria) มีฤทธิ์เพิ่มพื้นที่ผิวและความยาวของรากพืชจึงช่วยให้พืชหาสารอาหารในดินได้ดีขึ้น ในขณะเดียวกันก็มีฤทธิ์ลดความแข็งแรงของผนังเซลล์พืช (Loosen plant cell wall) จึงช่วยให้มีสารอาหารที่ปล่อยออกมาจากรากพืชเพิ่มขึ้นเป็นประโยชน์ต่อการเจริญของแบคทีเรียด้วยเช่นเดียวกัน [28]

5. การสร้างเอนไซม์ ACC deaminase เมื่อพืชต้องเผชิญกับสภาวะต่างๆ ที่ไม่เหมาะต่อการเจริญเช่น ความแห้งแล้ง สารโลหะหนัก ระดับของฮอร์โมนเอทิลีน (Ethylene) จะเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลกระทบด้านลบต่อการเจริญของพืช โดยกลไกการสังเคราะห์ฮอร์โมนเอทิลีนในพืชเริ่มจากเอนไซม์ ACC synthase เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารอะดีโนซิลเมไธโอนีน (S-adenosyl methionine; SAM) เป็นสารอะมิโนไซโคลโพรเพนคาร์บอกซีเลต (1-aminocyclopropane-1-carboxylate; ACC) จากนั้นเอนไซม์ ACC oxidase จะเปลี่ยน ACC เป็นฮอร์โมนเอทิลีน ซึ่งส่งผลกระทบต่อพืชดังที่ได้กล่าวไปแล้ว เอนไซม์ ACC deaminase ที่แบคทีเรียสร้างขึ้นเป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการสลาย ACC ให้กลายเป็นแอมโมเนียและแอลฟาคีโตบิวทีเรต (α-ketobutyrate) [32] ดังนั้นจึงเป็นการตัดวงจรการสร้างฮอร์โมนเอทิลีนเมื่อพืชเจอสภาวะต่างๆ ที่ไม่เหมาะต่อการเจริญก็จะไม่มีการสังเคราะห์ฮอร์โทนเอทิลีนขึ้นมาและไม่ส่งผลกระทบด้านลบต่อการเจริญของพืช พืชจึงยังคงเจริญได้

การประยุกต์ใช้แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชกับเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่น

ความสำเร็จของการนำเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่นไปใช้ขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งจากพืชที่ควรมีมวลชีวภาพมาก (High biomass) และการทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก (Metal stress) และปัจจัยในการดูดซึมโลหะหนักคือพืชสามารถนำโลหะหนักที่ติดอยู่กับอนุภาคดินไปใช้ได้ แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชสามารถช่วยส่งเสริมปัจจัยแห่งความสำเร็จเหล่านี้ได้และส่งผลให้พืชดูดซึมโลหะหนักได้ดีขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อม [25]

การช่วยส่งเสริมให้พืชดูดซึมโลหะหนักได้ดีขึ้นโดยทางตรงคือเพิ่มความสามารถของพืชในการดูดซับและเคลื่อนย้าย (Translocation) สารโลหะหนักไปเก็บไว้ในเนื้อเยื่อพืชได้ดีขึ้นโดยกลไกที่เป็นไปได้ประกอบด้วย

1. การผลิตสารไซเดอโรฟอร์ สารไซเดอโรฟอร์สามารถจับกับโลหะหนักชนิดอื่นนอกจากธาตุเหล็กดังที่กล่าวไปแล้ว ช่วยให้โลหะหนักที่ถูกดูดซับอยู่กับอนุภาคดินอยู่ในสถานะที่จะถูกดูดซึมโดยพืชได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามผลที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีกลไกในการดูดซับสารโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ที่แตกต่างกันดังนั้นพืชที่ไม่อาจดูดซึมสารไซเดอโรฟอร์ที่ผลิตจากแบคทีเรียเข้าสู่เซลล์ได้ก็อาจได้ผลลัพธ์ที่ตรงกันข้ามคือสามารถดูดซับสารโลหะหนักเข้าสู่เซลล์พืชได้ลดลงเนื่องจากสารโลหะหนักถูกดูดซับไว้โดยแบคทีเรียที่ผลิตสารไซเดอโรฟอร์ได้

2. กรดอินทรีย์มวลโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight organic acids (LMWOAs) กรดอินทรีย์สามารถสร้างพันธะกับไอออนโลหะหนักได้ โดยกรดอินทรีย์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (COOH) มากจะสามารถจับกับโลหะหนักได้ดีกว่า ดังนั้นกรดซิตริก (Citric acid) ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิล 3 หมู่ (Tricarboxylic acid) จึงสามารถสร้างพันธะกับโลหะหนักได้ดีมาก สารประกอบกรดอินทรีย์กับโลหะหนักจะถูกพืชแยกเอาเฉพาะโลหะหนักออกมา (Dissociated) โดยกระบวนการที่เกิดบริเวณผิวรากพืชทำให้การนำโลหะหนักเข้าสู่รากทำได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการสร้างพันธะระหว่างกรดอินทรีย์กับโลหะหนักเช่น ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในดิน ปัจจัยทางกายภาพและเคมีของดิน (Physicochemical properties) ซึ่งก็ส่งผลถึงความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักเข้าสู่เซลล์รากพืชเช่นกัน

3. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (Biosurfactants) เป็นสารแอมฟิฟิลลิก (Amphiphilic molecule) คือมีทั้งส่วนที่มีขั้วจึงชอบน้ำ (Hydrophilic) และไม่มีขั้วจึงไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ที่ผลิตขึ้นมาโดยแบคทีเรียที่อาศัยบริเวณรอบราก โดยสารลดแรงตึงผิวสามารถสร้างพันธะและดึงธาตุโลหะหนักที่เกาะอยู่กับดิน ทำให้โลหะหนักอยู่ในสภาพที่ง่ายต่อการถูกดูดซึมได้โดยพืช

สำหรับการช่วยส่งเสริมให้พืชดูดซึมโลหะหนักได้ดีขึ้นโดยทางอ้อมคือการช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชทำให้พืชมีมวลชีวภาพมากและทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดโลหะหนักด้วยเทคโนโลยีนี้ [25] อีกทั้งการช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้เร็วช่วยแก้ไขข้อจำกัดสำคัญของการบำบัดสารโลหะหนักโดยใช้พืชคือระยะเวลาดำเนินการที่ค่อนข้างนานได้อีกด้วย [33] สำหรับกลไกการส่งเสริมการเจริญโดยแบคทีเรียได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น จึงขอไม่อธิบายซ้ำอีก

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารเคมีเช่น EDTA เพื่อช่วยให้พืชดูดซึมสารโลหะหนักได้ดีขึ้นนั้น แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชมีข้อได้เปรียบคือสารเมแทบอไลต์ที่แบคทีเรียสร้างขึ้นสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จึงเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า [25] ทั้งนี้มีงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชมีศักยภาพที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่น ตัวอย่างเช่น

Pseudomonas fluorescens สายพันธุ์ Pf27 เพิ่มมวลชีวภาพและความสามารถในการดูดซับสังกะสี ทองแดงและแคดเมียมจากดินเข้าสู่เนื้อเยื่อของผักกาดเขียว *(Brassica juncea)* ได้ดีขึ้น [33]

Sphingomonas สายพันธุ์ SaMR12 ซึ่งเป็นเชื้อที่อาศัยอยู่ในราก (Endophyte) และแยกเชื้อได้จากรากของต้น *Sedum alfredii* ซึ่งเป็นพืชพื้นถิ่นของประเทศจีน ช่วยเพิ่มมวลชีวภาพและความสามารถของต้น *Sedum alfredii* ในการดูดซับสังกะสีที่ปนเปื้อนในดินให้ดียิ่งขึ้น [34]

Streptomyces sp. MC1 ช่วยส่งเสริมการเจริญและเพิ่มมวลชีวภาพของข้าวโพด *(Zea mays)* ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนโครเมียม รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมออกจากดินได้ดีขึ้นด้วย [35]

Streptomyces tendae F4 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ทนต่อแคดเมียมและสามารถสร้างสารไซเดอโรฟอร์ได้ คลุกผสมลงในดินที่ผ่านการฆ่าเชื้อและเติมแคดเมียมลงไป จากนั้นจึงนำเมล็ดทานตะวัน *(Helianthus annuus)* ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วมาเพาะปลูกลงในดินที่ปรับสภาวะให้เหมาะสมต่อการสร้างสารไซเดอโรฟอร์ของเชื้อ พบว่าเชื้อช่วยส่งเสริมการเจริญและการดูดซับแคดเมียมของดอกทานตะวันให้ดียิ่งขึ้น [36]

บทสรุป

เทคโนโลยีไฟโตเอกซ์แทรคชั่นมีศักยภาพในการนำมาใช้เพื่อบำบัดสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินที่เป็นปัญหาสำคัญในปัจจุบันและมีแนวโน้มรุนแรงขึ้นในอนาคต เนื่องจากข้อดีที่มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีนี้ยังมีข้อจำกัดและอุปสรรคในการนำไปประยุกต์ใช้จริง แต่อาจแก้ปัญหาได้โดยการนำแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีนี้ ซึ่งงานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นถึงศักยภาพและแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในอนาคต อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างพืชและแบคทีเรียรวมทั้งกลไกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุโลหะหนักของพืชให้มากขึ้นกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

1. มูลนิธิโลกสีเขียว. 2556. เปิดแผนที่ปนเปื้อนสารพิษในประเทศไทย ผลลัพธ์จากการพัฒนา. ได้จาก http://www.web.greenworld.or.th/greenworld/local/2311. 25 มี.ค. 2558.
2. สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2556. มลพิษจากโลหะหนัก. ได้จาก http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter2/chapter2_airpolution11.htm. 25 มี.ค. 2558.
3. สำนักระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. 2548. พิษโลหะหนัก. ได้จาก http://www.boe.moph.go.th/Annual/Annual47/part1/48-Heavy metal poisoning.pdf. 25 มี.ค. 2558.
4. Alia, H., Khanb, K., and Sajadc M.A. 2013. Phytoremediation of Heavy Metals-Concepts and Applications. *Chemosphere.* 91(7): 869-881.
5. Garbisu C. and Alkorta I. 2003. Basic Concepts on Heavy Metal Soil Bioremediation. The *European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection.* 3:58-66.
6. Meagher R.B. 2000. Phytoremediation of Toxic Elemental and Organic Pollutants. *Current Opinion in Plant Biology.* 3:153-162.
7. Raskin I., Salt D.E. and Smith R.D. 1997. Phytoremediation of Metals: Using Plants to Remove Pollutants from the Environment. *Current Opinion in Biotechnology.* 8(2): 221-226.
8. Doty S.L. 2008. Enhancing Phytoremediation through the Use of Transgenics and Endophytes. *New Phytologist.* 179:318-333.
9. United Nations Environment Programme. 2012. Phytoremediation: An Environmentally Sound Technology for Pollution Prevention, Control and Redmediation. Available from URL: http://www.unep.or.jp/Ietc/Publications/Freshwater/FMS2/2.asp. 25 March 2015.
10. Institute for green energy and clean environment. 2010. Phytoremediation and Phytosensing Technologies. Available from URL: http://www.igece.org/WRKY/BrachyWRKY/WRKY. 25 March 2015.
11. Sessitsch A., Kuffner M., Kidd P., Vangronsveld J., Wenzel W.W., Fallmann K. and Puschenreiter M. 2013. The Role of Plant-Associated Bacteria in the Mobilization and Phytoextraction of Trace Elements in Contaminated Soils. *Soil Biology and Biochemistry.* 60:182-194.
12. Milner M.J. and Kochian L.V. 2008. Investigating Heavy-Metal Hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a Model System. *Annals of Botany.* 102(1):3-13.
13. Schenkeveld W.D.C., Oburger E., Gruber B., Schindlegger Y., Hann S., Puschenreiter M., Kraemer S.M. 2014. Metal Mobilization from Soils by Phytosiderophores-Experiment and Equilibrium Modeling. *Plant Soil.* 383(1-2):59-71.

14. Vangronsveld J., Herzig R., Weyens N., Boulet J., Adriaensen K., Ruttens A., Thewys T., Vassilev A., Meers E., Nehnelajova E., van der Lelie D. and Mench M. 2009. Phytoremediation of Contaminated Soils and Groundwater: Lessons from the Field. *Environmental Science and Pollution Research.* 16:765-794.
15. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2549. ความเป็นอันตรายทางกายภาพ. ได้จาก http://eis.diw.go.th/haz/DOC/purple_book /01_Part 1 and 2.doc. 25 มีนาคม 2558.
16. Mohanty M., Pattnaik M.M., Mishra A.K. and Patra H.K. 2012. Bio-Concentration of Chromium--an *in situ* Phytoremediation Study at South Kaliapani Chromite Mining Area of Orissa, India. *Environmental Monitoring and Assessment.* 184:1015-1024.
17. Yu X.Z., Peng X.Y. and Xing L.Q. 2010. Effect of Temperature on Phytoextraction of Hexavalent and Trivalent Chromium by Hybrid Willows. *Ecotoxicology.* 1:61-68.
18. Ding D., Li W., Song G., Qi H., Liu J. and Ta J. 2011. Identification of QTLs for Arsenic Accumulation in Maize (*Zea mays* L.) Using a RIL Population. *PLOS ONE.* 6: e25646.
19. Ji P., Song Y., Sun T., Liu Y., Cao X., Xu D., Yang X. and McRae T. 2011. *In-Situ* Cadmium Phytoremediation Using *Solanum Nigrum* L.: the Bio-Accumulation Characteristics Trail. *International Journal of Phytoremediation.* 13:1014-1023.
20. Kolbas A., Mench M., Herzig R., Nehnevajova E. and Bes C.M. 2011. Copper Phytoextraction in Tandem with Oilseed Production Using Commercial Cultivars and Mutant Lines of Sunflower. *International Journal of Phytoremediation.* 13:55-76.
21. Castillo O.S., Dasgupta-Schubert N., Alvarado C.J., Zaragoza E.M. and Villegas H.J. 2011. The Effect of the Symbiosis between Tagetes erecta L. (Marigold) and *Glomus intraradices* in the Uptake of Copper (II) and its Implications for Phytoremediation. *New Biotechnology.* 29(1):156-64.
22. Qu J., Yuan X., Wang X. and Shao P. 2011. Zinc Accumulation and Synthesis of ZnO Nanoparticles Using *Physalis alkekengi* L. *Environmental Pollution.* 159(7):1783-1788.
23. Shevyakova N.I., Il'ina E.N., Stetsenko L.A. and Kuznetsov V.V. 2011. Nickel Accumulation in Rape Shoots (*Brassica napus* L.) Increased by Putrescine. *International Journal of Phytoremediation.* 13(4):345-356.
24. Seth C.S., Misra V., Singh R.R. and Zolla L. 2011. EDTA-Enhanced Lead Phytoremediation in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Hydroponic Culture. *Plant and Soil.* 347:231-242.
25. Rajkumar M., Sandhya S., Prasad M.N. and Freitas H. 2012. Perspectives of Plant-Associated Microbes in Heavy Metal Phytoremediation. *Biotechnology Advances.* 30(6): 1562-1574.

26. Bashan L.E., Hernandez J.P. and Bashan Y. 2012. The Potential Contribution of Plant Growth-Promoting Bacteria to Reduce Environmental Degradation-A Comprehensive Evaluation. *Applied Soil Ecology.* 61:171-189.
27. Beneduzi A., Ambrosini A. and Passaglia L.M.P. 2012. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR): Their Potential as Antagonists and Biocontrol Agents. *Genetics and Molecular Biology.* 35(4):1044-1051.
28. Ahemad M. and Kibret M. 2014. Mechanisms and Applications of Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Current Perspective. *Journal of King Saud University-Science.* 26(1):1-20.
29. Ahmed M. and Holmström S. J. M. 2014. Siderophores in Environmental Research: Roles and Applications. *Microbial Biotechnology.* 7(3): 196-208
30. มานิตา คำแจ่ม และ วสุ ปฐมอารีย์. 2557. สารไซเดอโรฟอร์จากจุลินทรีย์. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว* 30(1): 229-242.
31. Saupe S.G. 2009. Plant Hormones-Auxin. Available from URL: http://employees.csbsju.edu/ssaupe/ biol327/Lecture/hormone-auxin.htm. 25 March 2015.
32. Arshad M., Saleem M. and Hussain S. 2007. Perspectives of Bacterial ACC Deaminase in Phytoremediation. *Trends in Biotechnology.* 25(8):356-362.
33. Fuloria A., Saraswat S. and Rai J.P.N. 2009. Effect of *Pseudomonas fluorescens* on Metal Phytoextraction from Contaminated Soil by *Brassica juncea. Chemistry and Ecology.* 25(6):385-396.
34. Chen B., Shen J., Zhang X., Pan F., Yang X. and Feng Y. 2014. The Endophytic Bacterium, *Sphingomonas* SaMR12, Improves the Potential for Zinc Phytoremediation by its Host, *Sedum alfredii. PLOS ONE.* 9(9):e106826.
35. Polti M.A., Atjiána M.C., Amoroso M.J. and Abatea C.M. 2011. Soil Chromium Bioremediation: Synergic Activity of Actinobacteria and Plants. *International Biodeterioration and Biodegradation.* 65:1175-1181.
36. Dimkpa C.O., Merten D., Svatos A., Büchel G. and Kothe E. 2009. Siderophores Mediate Reduced and Increased Uptake of Cadmium by *Streptomyces tendae* F4 and Sunflower *(Helianthus annuus),* Respectively. *Journal of Applied Microbiology.* 107:1687-1696.

ได้รับบทความวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2558
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 31 มีนาคม 2558