

ชีวโมเลกุล ของการบำบัดมลพิษด้วยพืช

Biomolecular aspect of Phytoremediation



กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์

ชีวโมเลกุล ของการบำบัดมลพิษด้วยพืช

Biomolecular aspect of Phytoremediation



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์
สาขาสิ่งแวดล้อม คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ชีวโมเลกุลของการบำบัดมลพิษด้วยพืช

Biomolecular Aspect of Phytoremediation

ผู้เขียน	ผศ. ดร.กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์
บรรณาธิการบริหาร	จุฑาทิพย์ สุกาญจนาศเรษฐ
บรรณาธิการ	รัชณธร หล่อพิเชียร
กองบรรณาธิการ	กฤษฎาญจน์ โพธิ์ฟ้า, ชุตินา สัมพันธ์
ศิลปกรรม	พลิชฐ์สัทคุณ จุลละมณฑล, สุธน ดิยะมณี

หนังสือเล่มนี้สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558

Copyright © 2022 ห้ามนำส่วนหนึ่งส่วนใดในหนังสือเล่มนี้เพื่อเป็นการผลิตใหม่ ห้ามทำซ้ำ ห้ามทำการละเมิดลิขสิทธิ์ด้วยการส่งเนื้อหาสาระสำคัญทั้งทางอิเล็กทรอนิกส์หรือรูปแบบต่างๆ รวมถึงการถ่ายเอกสาร การทำสำเนา การเก็บข้อมูลในทุกรูปแบบ โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์.

ชีวโมเลกุลของการบำบัดมลพิษด้วยพืช.--นนทบุรี : สยามจุลละมณฑล, 2568.

244 หน้า

1. อนุชีววิทยา. 2. อนุชีววิทยาพืช. 3. การบำบัดโดยพืช. I. ชื่อเรื่อง.

611.01816

ISBN 978-616-94710-1-1

พิมพ์ครั้งที่ 1 มกราคม 2568 จำนวน 50 เล่ม

พิมพ์และจัดจำหน่ายโดย

บริษัท สยามจุลละมณฑล จำกัด

เลขที่ 98/28 ถนนเขตอำพัฒนา ตำบลบางคูรัด อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110

โทร. 063-451-9359, 061-519-3641, 092-425-5229

www.siamclmt.com • E-mail: siamclmtcenter@siamclmt.com

ราคา 250 บาท

คำนำสำนักพิมพ์

หนังสือ “ชีวโมเลกุลของการบำบัดมลพิษด้วยพืช Biomolecular Aspect of Phytoremediation” เล่มนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ผู้อ่านตระหนักถึงกระบวนการทางชีวโมเลกุลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพืชและจุลินทรีย์ ความสำคัญของการกำจัดมลพิษที่อาจปนเปื้อนในพืช และสารชีวโมเลกุลที่พืชหลั่งออกมาเพื่อใช้ในการบำบัดมลพิษ

หนังสือเล่มนี้ประกอบด้วย 7 บท โดยเนื้อหาบทที่ 1 จะกล่าวถึงกระบวนการบำบัดโดยพืช (phytoremediation) และสรีรวิทยาของพืชที่เกี่ยวข้อง บทที่ 2 เกี่ยวข้องกับบทบาทของโปรตีนด้วยกระบวนการสกัดด้วยพืช (phytoextraction) รวมถึงกระบวนการกรองด้วยรากพืช (rhizofiltration) บทที่ 3 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับเอนไซม์ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารมลพิษด้วยพืช (phytotransformation และ rhizodegradation) กระบวนการปฏิกิริยาและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง บทที่ 4 จะกล่าวถึงกระบวนการทำให้ระเหยด้วยพืชและกระบวนการตรึงด้วยรากพืช (phytovolatilization และ phytostabilization) บทที่ 5 การใช้กระบวนการบำบัดโลหะหนักและมลพิษอินทรีย์ด้วยพืชทางชีวโมเลกุล บทที่ 6 การตระหนักถึงหลักการลดปริมาณฝุ่นขนาดเล็กโดยต้นไม้และความสำคัญของฐานวิทยาของต้นไม้ในการดักจับฝุ่นที่ใบ และสุดท้ายในบทที่ 7 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับการใช้เทคนิคทางชีวโมเลกุลในการเพิ่มประสิทธิภาพพืชบำบัดในยุคสภาพอากาศแปรปรวน

สำนักพิมพ์ฯ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผู้อ่านจะได้รับความรู้ใหม่ ๆ ทั้งในเชิงกว้างและเชิงลึกจากหนังสือเล่มนี้ เพื่อนำศาสตร์นี้ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านการบำบัดมลพิษด้วยพืชได้

สำนักพิมพ์จุลละมณฑล

คำนำผู้เขียน

การบำบัดมลพิษในปัจจุบันมีเทคโนโลยีทั้งทางเคมีและทางชีวภาพที่ประยุกต์ใช้ได้ตามพื้นที่และประเภทของมลพิษ อย่างไรก็ตาม การบำบัดด้วยกลไกธรรมชาติเป็นวิธีที่ลดต้นทุน แม้ว่าจะใช้ระยะเวลานานกว่าแต่ถือว่าการฟื้นฟูระบบนิเวศไปพร้อม ๆ กัน วิธีทางชีวภาพมีทั้งใช้จุลินทรีย์บำบัด (bioremediation) และการใช้พืชบำบัด (phytoremediation) โดยที่กระบวนการใช้พืชบำบัดอาศัยกลไกตามธรรมชาติที่พืชต้องดำรงชีวิตด้วยการหายใจและสังเคราะห์ หากมีมลพิษต่าง ๆ ที่แปลกปลอมเข้ามาปนเปื้อนก็จะส่งผลต่อพืชได้เช่นกัน โดยอาจส่งผลให้พืชตายได้ ดังนั้นพืชเองจึงต้องมีการจัดการพิษเหล่านั้น กลไกในระดับโมเลกุลของพืชมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการบำบัดในพืช เช่น สารชีวโมเลกุลที่พืชหลั่งในระบบรากเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินให้เอื้ออำนวยต่อการบำบัดได้ การทำงานของเอนไซม์หรือสารอินทรีย์ที่พืชปล่อยออกนอกเซลล์จะยึดจับกับสารปนเปื้อน การทำงานของโปรตีนช่วยนำสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารด้วยเอนไซม์ได้

หนังสือเล่มนี้ “ชีวโมเลกุลของการบำบัดมลพิษด้วยพืช Biomolecular Aspect of Phytoremediation” กล่าวถึง การทำงานในระดับชีวโมเลกุลของพืชในการบำบัดสารปนเปื้อนด้วยกลไกต่าง ๆ เช่น Phytoextraction Phytodegradation, Phytostabilization, Phytovolatilization และ Rhizofiltration นำไปสู่การปรับปรุงด้วยเทคโนโลยีชีวภาพ พันธุวิศวกรรม และวิศวกรรมโปรตีน รวมถึงนำไปสู่การพัฒนาการใช้พืชในกระบวนการ Phytomining เก็บเกี่ยวธาตุต่าง ๆ ที่จำเป็นหรือหายาก เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์

สารบัญ

คำนำสำนักพิมพ์	3
คำนำผู้เขียน	4
สารบัญ	5
สารบัญตาราง	9
สารบัญรูป	10
บทที่ 1 การบำบัดด้วยพืชและสรีรวิทยาของพืชที่เกี่ยวข้อง	16
1.1 ปัจจัยในการบำบัดด้วยพืชหรือไฟโตริเมดิเอชัน	17
1.2 ประเภทของการบำบัดด้วยพืช	20
1.3 การรับและการเคลื่อนย้ายสารมลพิษอินทรีย์โดยพืช	25
1.4 กลไกของเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดด้วยพืช	30
1.5 สรีรวิทยาของพืชที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดด้วยพืช	33
สรุปท้ายบท	47
เอกสารอ้างอิง	48
บทที่ 2 บทบาทสำคัญของโปรตีนในกระบวนการสกัดด้วยพืช (Phytoextraction) และการกรองด้วยราก (Rhizofiltration)	50
2.1 กลไกการสกัดด้วยพืช (phytoextraction)	51
2.2 การกรองด้วยรากพืช (rhizofiltration)	57
2.3 โปรตีนขนส่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกัดด้วยพืช	62
2.4 บทบาทสำคัญของโปรตีนในกระบวนการบำบัดมลพิษด้วยพืช	74
สรุปท้ายบท	77
เอกสารอ้างอิง	78

บทที่ 3 เอนไซม์ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารมลพิษด้วยพืช	82
(Phytotransformation and Rhizodegradation)	
3.1 เอนไซม์	83
3.2 กลไกกระบวนการบำบัดด้วยการเปลี่ยนแปลงสารมลพิษด้วยพืช (phytotransformation)	85
3.3 กลไกปฏิกิริยาและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง	88
3.4 กระบวนการย่อยสลายสารที่ราก (rhizodegradation)	101
3.5 เอนไซม์บริเวณราก (Rhizosphere enzymes)	106
สรุปท้ายบท	109
เอกสารอ้างอิง	110
 บทที่ 4 กลไกการทำให้ระเหยด้วยพืชและการตรึงด้วยรากพืช	 114
(Phytovolatilization and Phytostabilization)	
4.1 กระบวนการทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (phytovolatilization)	115
4.2 กลไกการระเหยด้วยพืช	118
4.3 บทบาทของโปรตีนในปฏิกิริยาไฟโทโวลาทิลไลเซชัน	123
4.4 การบำบัดด้วยการตรึงด้วยรากพืช (phytostabilization)	125
สรุปท้ายบท	133
เอกสารอ้างอิง	134
 บทที่ 5 ชีวโมเลกุลกับการบำบัดโลหะหนักและมลพิษอินทรีย์ด้วยพืช	 136
5.1 การบำบัดโลหะหนักด้วยพืช	137
5.2 การเคลื่อนย้ายโลหะหนักด้วยพืช	143
5.3 กลไกการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช	145
5.4 กลไกพืชบำบัดมลพิษกลุ่มสารประกอบอินทรีย์	153

5.5 การรับสารปนเปื้อนอินทรีย์ทางระบบราก	156
5.6 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงสาร	162
สรุปท้ายบท	163
เอกสารอ้างอิง	164
บทที่ 6 พืชลดฝุ่นขนาดเล็กในบรรยากาศ	166
6.1 ฝุ่นอนุภาคขนาด 2.5 ไมครอน (PM2.5)	167
6.2 หลักการลดปริมาณฝุ่นโดยต้นไม้	170
6.3 สันฐานวิทยาของต้นไม้ในการดักจับฝุ่นที่ใบ	170
6.4 กลไกการลดฝุ่นของพืช	172
6.5 แนวทางการนำต้นไม้แบบจัดภูมิทัศน์ไปใช้ในพื้นที่ที่มีมลภาวะ PM2.5	177
สรุปท้ายบท	181
เอกสารอ้างอิง	182
บทที่ 7 เทคนิคทางชีวโมเลกุลในการเพิ่มประสิทธิภาพพืชบำบัด	184
ในยุคสภาพอากาศแปรปรวน	
7.1 พันธุวิศวกรรม (Genetic engineering)	185
7.2 พืชตัดแต่งทางพันธุกรรมเพื่อการบำบัดสารมลพิษในกลุ่มสารอินทรีย์	190
7.3 การปรับปรุงพันธุกรรมพืชบำบัดเพื่อสกัดโลหะ (phytomining)	193
7.4 การปรับปรุงพันธุกรรมพืชเพื่อใช้ประโยชน์ในยุคการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	200
7.5 เทคนิคการศึกษาโครงสร้าง 3 มิติของโปรตีน	203
สรุปท้ายบท	211
เอกสารอ้างอิง	212

บรรณานุกรม	218
ดัชนี	238
ประวัติผู้แต่ง	242

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแต่ละชนิดเข้าสู่เซลล์พืช	26
ตารางที่ 1.2	แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนแบบอะโพพลาสต์และซิมพลาสต์	35
ตารางที่ 2.1	พืชที่มีกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการการสกัดด้วยพืช	57
ตารางที่ 3.1	เอนไซม์ออกซิเดทีฟ (Oxidative enzymes) หรือกลุ่มเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากเชื้อในระบบรากที่ช่วยในกระบวนการบำบัดแบบไรโซดีทริคาเดชัน	107
ตารางที่ 4.1	แสดงองค์ประกอบของสารคัดหลั่งจากราก	129
ตารางที่ 5.1	พืชที่บำบัดโลหะหนักแบบธาตุเดี่ยวด้วยกลไกต่างชนิดกัน	142
ตารางที่ 5.2	วงศ์พืช (Families) และสกุลพืช (Genus) ที่สำคัญสำหรับการบำบัดด้วยการทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช	147
ตารางที่ 6.1	แสดงตัวอย่างพืชที่แสดงปรากฏการณ์การนอนของใบ	176

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	กลไกการบำบัดด้วยพืชที่ต่างกันระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์	24
รูปที่ 1.2	แสดงภาพรวมของการบำบัดด้วยพืชประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ	25
รูปที่ 1.3	จำลองโปรตีนขนส่ง นำพาโลหะจากดินเข้าสู่รากเคลื่อนที่ไปยังไซเลม	34
รูปที่ 1.4	การทำงานของแคลโลสเกี่ยวข้องกับการขยายตัวของพลาสโมเดสมิตา ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารแบบซิมพลาสต์	36
รูปที่ 1.5	ระบบท่อลำเลียงในพืช	38
รูปที่ 1.6	กลไกการเปิดปากใบเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง	42
รูปที่ 1.7	องค์ประกอบในเซลล์พืช แสดงให้เห็นขนาดของแวคิวโอล	46
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของสารประกอบในกลุ่มไฟโตไซด์โอโรฟอร์	53
รูปที่ 2.2	โครงสร้างของสารประกอบที่จับกับไอออนเหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิล	53
รูปที่ 2.3	ช่องทางโปรตีน (channel protein) และโปรตีนตัวพา (carrier protein)	63
รูปที่ 2.4	จำลองโปรตีนขนส่ง นำพาโลหะจากดินเข้าสู่รากเคลื่อนที่ไปยังไซเลม	64
รูปที่ 2.5	การทำงานของโปรตีนขนส่งในกลุ่มเพอริกิติกเทสและกลุ่มออกซิเดส	66
รูปที่ 2.6	โปรตีนขนส่งในกลุ่มเอบีซีจากฐานข้อมูลของธนาคารข้อมูลโปรตีน (PDB) รหัส 4YMU	68
รูปที่ 2.7	ภาพรวมการเคลื่อนที่ของโลหะไอออนผ่านโปรตีนขนส่งต่าง ๆ จากดินบริเวณราก มาสู่ระบบลำเลียงไซเลมและโฟลเอ็ม นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นความจำเพาะของชนิด เนื้อเยื่อ ชนิดของไอออน และทิศทางของการขนส่ง	69
รูปที่ 2.8	โปรตีนขนส่งที่อยู่ออร์แกเนลล์ต่าง ๆ ภายในเซลล์ ได้แก่ แวกคิวโอล เอนโดไซติก เรติคูลัม และเอนโดพลาสมิกเรติคูลัม	73
รูปที่ 3.1	สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำและสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ	86
รูปที่ 3.2	การบำบัดมลพิษตามทฤษฎีการทำงานของตับในการกำจัดสารพิษ ทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารมลพิษ	87

รูปที่ 3.3	ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสารประกอบคลอไรด์	89
รูปที่ 3.4	แสดงการทำงานของเอนไซม์ไซโทโครมพี 450 ในระยะที่ 1	90
รูปที่ 3.5	การเติมหมู่ไฮดรอกซิลที่วงแหวนอะโรมาติกในสารไดโคลโฟป (Diclofop) และเบนทาโซน (Bentazon) หลังจากนั้นสารไฮดรอกซี-ไดโคลโฟป (Hydroxy-diclofop) และไฮดรอกซี-เบนทาโซน (Hydroxy-bentazon) จะถูกจับกับโมเลกุลโอ-กลูโคไซด์ (O-glucosides)	91
รูปที่ 3.6	การทำงานของซูเปอร์ออกไซด์ของเอนไซม์อัลโด-คีโตรีดักเตส	92
รูปที่ 3.7	เอนไซม์ฟีนอลออกซิเดสเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันให้กับวงเบนซิน	93
รูปที่ 3.8	การเกิดปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์กลูตาไทโอนเอส-ทรานส์เฟอเรส	96
รูปที่ 3.9	การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับน้ำตาลโอ-กลูโคซิเลชันและเอ็น-กลูโคซิเลชัน	96
รูปที่ 3.10	สารประกอบเชิงซ้อนกับการดอะมิโน	97
รูปที่ 3.11	กลไกการบำบัดสารแปลกปลอม 2,3'-ไดคลอโรไบฟีนิลประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ตามทฤษฎีการทำงานของตับในการกำจัดสารพิษ โดยในระยะที่ 1 เกิดปฏิกิริยาเติมหมู่ไฮดรอกซิลหรือปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันกับโมเลกุลของพีซีบี ในระยะที่ 2 พีซีบีที่ผ่านการไฮดรอกซิเลชันจะถูกจับกับน้ำตาล และในระยะที่ 3 สารประกอบที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปเก็บในแควิวโอลหรือถูกพาไปยังผนังเซลล์	100
รูปที่ 3.12	ภาพรวมของกลไกไฟโทดีเกรชันหรือไฟโททรานส์ฟอร์เมชัน	100
รูปที่ 3.13	แสดงการอาศัยอยู่ของกลุ่มจุลินทรีย์บริเวณรากพืช	104
รูปที่ 3.14	การทำงานของเอนไซม์ไนไตรเลส	107
รูปที่ 4.1	การปนเปื้อนสารระเหยหรือสารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารระเหย สารบางชนิดพืชจะนำเข้าสู่เซลล์แล้วเปลี่ยนเป็นสารระเหยออกไป	116
รูปที่ 4.2	กระบวนการระเหยด้วยพืชเกิดได้ทั้งแบบโดยตรงและโดยอ้อม	117
รูปที่ 4.3	เมแทบอลิซึมของซิลิเนียมในเซลล์พืช	120

รูปที่ 4.4	แสดงโซนอิมอากาศ (vadose zone) หรือโซนไม่อิ่มน้ำ (unsaturated zone) คือ โซนที่ลึกจากพื้นผิวดินลงไปประมาณ 1-2 เมตร ซึ่งมีรูพรุนจำนวนมากที่เกิดจากการขนไซของทั้งพืชและสัตว์ ทำให้น้ำซึมผ่านลงสู่ด้านล่างได้ดี รูพรุนในโซนอิมอากาศจึงประกอบด้วยอากาศเป็นส่วนใหญ่และมีน้ำเพียงเล็กน้อย	126
	ขณะที่โซนอิมน้ำ (phreatic zone หรือ saturated zone) คือ โซนที่ลึกลงไปถัดจากโซนอิมอากาศ รูพรุนทั้งหมดเต็มไปด้วยน้ำที่ไหลซึมผ่านมาจากโซนอิมอากาศ ซึ่งอยู่ด้านบน	
รูปที่ 5.1	เปรียบเทียบการนำโลหะเข้าสู่แควคิวโอลของพืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (hyperaccumulator) ตัวนำพาเข้าสู่แควคิวโอลสำหรับแคดเมียม ในพืชกลุ่มที่ไม่ใช่ไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (non-hyperaccumulator plants) พบว่า แคดเมียมจะเคลื่อนที่เข้าสู่แควคิวโอลที่รากผ่านตัวนำพาโปรตีนเอชเอ็มเอ 3 โปรตีนในกลุ่มการแลกเปลี่ยนแคตไอออนและตัวขนส่งเอเปซีที่แปลเป็นภาษาท้องถิ่น ซึ่งเคลื่อนที่ไปยังส่วนเหนือรากได้น้อย ในขณะที่พืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์จะเน้นการเคลื่อนที่ของแคดเมียมจากรากไปสู่ส่วนเหนือรากมากกว่า และกักเก็บไว้ที่แควคิวโอลในใบได้มาก โดยพบว่าตัวนำพาโปรตีนเอชเอ็มเอ 3 มีบทบาทสำคัญในพืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์	148
รูปที่ 5.2	เซเลโนซิสเทอีนและเซเลโนซิสทีน (เลข 4) เซเลโนเมไทโอนีน (เลข 5) และเมทิลเซเลโนซิสเทอีน (เลข 6) ซีลีโนอะมิโนแอซิดส์ (เลข 7)	149
รูปที่ 5.3	แสดงการทำงานของเอนไซม์เมอร์คิวรีรีดักเตส บี	150
รูปที่ 5.4	แสดงโครงสร้างสามมิติของเอนไซม์เมอร์คิวรีรีดักเตส บี	150
รูปที่ 5.5	แสดงการเปลี่ยนแปลงสารประกอบสารหนูไปสู่สารระเหย	152
รูปที่ 5.6	แสดงการจับกันระหว่างสารโพรพาคลอร์ (Propachlor) และกลูตาไทโอน	159

รูปที่ 5.7	แสดง 3 ขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบซินโนโบอิดิกส์ (functionalization-conjugation- compartmentalization) ในสารกำจัดศัตรูพืชอินทรีย์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น สารกำจัดวัชพืช 2,4-ดี ถูกคอนจูเกตด้วยกลูโคสและมาโลนิลเรซิดิวโดยไฮดรอกซิลเลชัน และต่อมาเก็บไว้ในเซลล์แวคิวโอล	160
รูปที่ 5.8	การบำบัดสารของสารกำจัดวัชพืช 2,4-ดี ตัวอย่างเช่น สาร 2,3,4,5,6-เพนตาคลอโรฟีนอลจะถูกเปลี่ยนเป็นเบต้า-ดี-กลูโคไซด์ (β -D-glucoside) ที่ละลายน้ำได้ง่ายและเป็นคอนจูเกตโอ-มาโลนิล-เบต้า-ดี-กลูโคไซด์ (O-malonyl- β -D-glucoside) ซึ่งจะเคลื่อนเข้าสู่แวคิวโอล อย่างไรก็ตาม เมื่อสารพิษนี้ได้รับหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งที่ 2 ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงสาร จะรวมเข้ากับกลีนิลและเก็บไว้ในผนังเซลล์	160
รูปที่ 5.9	การบำบัดสาร 2,3,4,5,6-เพนตาคลอโรฟีนอล	161
รูปที่ 5.10	กระบวนการโฟโตโวลตาติไลเซชันของสารอินทรีย์ 2,4-ไดบรอมอเฟีนอล (2,4-Dibromophenol) และ 2,4-ไดบรอมอานิสอล (2,4-Dibromoanisol)	161
รูปที่ 6.1	ภาพรวมการเคลื่อนตัวของฝุ่นอนุภาคขนาดเล็กในธรรมชาติ เป็นการเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิด ซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมและการจราจรไปสู่บรรยากาศ หากความเข้มข้นมาก จะกระเจิงแสงอาทิตย์แล้วส่งผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชและฝุ่น ก่อนจะลดความเข้มข้นลงด้วยกลไกการพัดพาไปสะสมแบบแห้งและเปียก และเคลื่อนตัวตามกระแสลมไปในระยะทางไกล ๆ ได้	169
รูปที่ 6.2	แสดงขนาดปากใบของพืชโคกอินเดีย (<i>P. longifolia</i>) ที่มีความกว้างและความยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 15 X 20 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้ฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก 2.5 ไมโครเมตร เข้าสู่ปากใบพืชได้	173
รูปที่ 6.3	ปรากฏการณ์การนอนของใบ (night sleepless movement) ของต้นหางนกยูงไทย ในลักษณะหลังใบประกบกัน	175

รูปที่ 7.1	ขั้นตอนกระบวนการโปรตีนวิศวกรรม	188
รูปที่ 7.2	ขั้นตอนกระบวนการโปรตีนวิศวกรรมที่ปรับปรุงโปรตีนให้ทนทานต่ออุณหภูมิ	189
รูปที่ 7.3	กระบวนการใช้พีซีดูดซับโลหะเพื่อทำเหมืองโลหะ	195
รูปที่ 7.4	แสดงตำแหน่งการตัดต่อยีนที่สร้างรูบิสโก ในคลอโรพลาสต์ของต้นยาสูบด้วยยีนจากไซยาโนแบคทีเรีย โปรโมเตอร์ในการสร้างโปรตีนพีอาร์บีซีแอล (PrbcL) นั่นคือยีนที่สร้างเอนไซม์รูบิสโก ตำแหน่ง NdeI คือตำแหน่งเอนไซม์ตัดจำเพาะของ NdeI ในขณะที่ตำแหน่ง NheI คือตำแหน่งเอนไซม์ตัดจำเพาะของ NheI ทั้ง rbcL, rbcS และ rbcX คือยีนที่สร้างรูบิสโกจากไซยาโนแบคทีเรีย	202
รูปที่ 7.5	การศึกษาโครงสร้างของโปรตีนเพื่อนำมาเทียบเคียงโครงสร้างจากฐานข้อมูลของธนาคารข้อมูลโปรตีน ตรวจสอบความบริสุทธิ์ของโปรตีนด้วยเอสดีเอส-เพจ (A) จากนั้นนำไปตกผลึกโปรตีน (B) และเทียบเคียงโครงสร้าง 3 มิติ จากฐานข้อมูล (C)	206
รูปที่ 7.6	แสดงโครงสร้าง 3 มิติของโปรตีนด้วยโปรแกรม PyMOL ภาพโครงสร้างทุติยภูมิในโครงสร้าง 3 มิติ และภาพพื้นผิวโปรตีนร่วมกับแสดงสีตามโครงสร้างทุติยภูมิที่จับอยู่กับอะตอมสารหนูอาร์เซไนต์และเอส-อะเดโนซิล-แอล-โฮโมซิสเทอีน (S-adenosyl-L-homocysteine; SAH) สีเขียวที่จับกับพื้นผิวโปรตีน (C) พื้นผิวบริเวณจับกับสาร (D) ตัวอย่างการแสดงผลด้วยไฟล์ 6CX6.pdb	209
รูปที่ 7.7	แสดงภาพโมเลกุลที่จับกับบริเวณจับสารของเอส-อะเดโนซิล-แอล-โฮโมซิสเทอีนที่จับอยู่กับอะตอมสารหนูอาร์เซไนต์และเอส-อะเดโนซิล-แอล-โฮโมซิสเทอีน สีเขียวด้วยโปรแกรม PyMOL ช่วยให้วิเคราะห์กรดอะมิโนที่เกี่ยวข้องกับการจับโมเลกุลเป้าหมาย ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาโมเลกุลที่ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ต่อไป ตัวอย่างการแสดงผลด้วยไฟล์ 6CX6.pdb	210

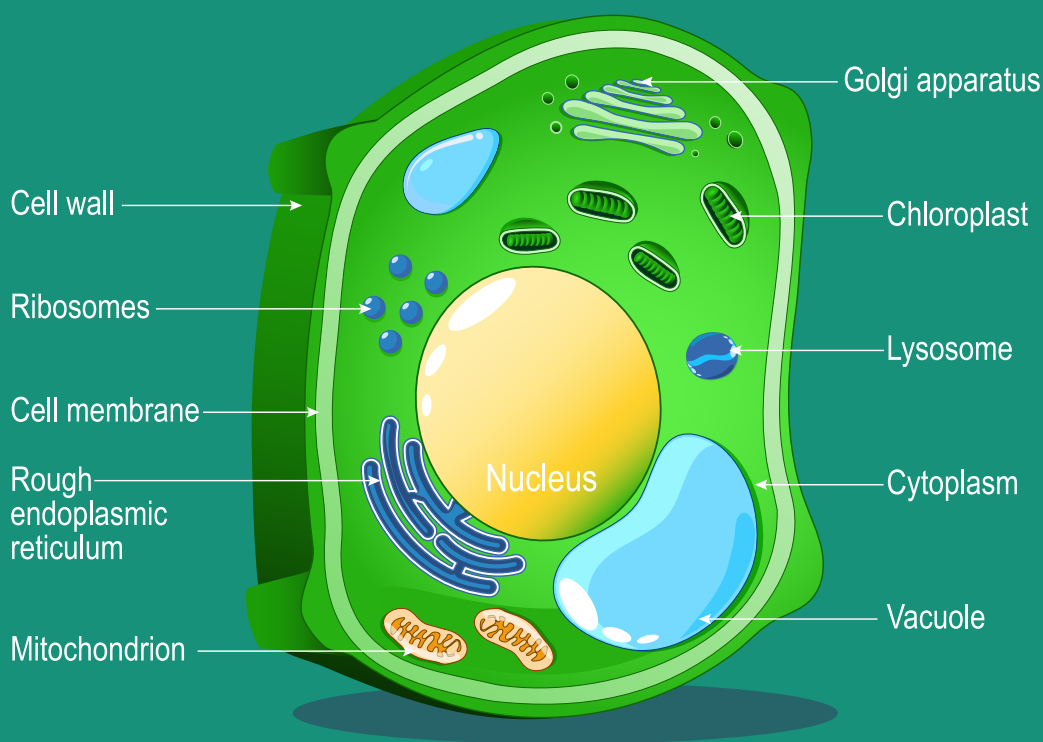
“

การทำงานในระดับชีวโมเลกุลของพืชในการบำบัด
สารปนเปื้อนด้วยกลไกต่าง ๆ
นำไปสู่การปรับปรุงด้วยเทคโนโลยีชีวภาพพันธุวิศวกรรม
และวิศวกรรมโปรตีน
รวมถึงนำไปสู่การพัฒนาการใช้พืชในระบบการ
Phytomining เก็บเกี่ยวธาตุต่าง ๆ ที่จำเป็นหรือหายาก
เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้

”

บทที่ 1

การบำบัดโดยพืชและสรีรวิทยาของพืช ที่เกี่ยวข้อง



การบำบัดมลพิษในปัจจุบันมีเทคโนโลยีทั้งทางเคมีและทางชีวภาพที่ประยุกต์ใช้ได้ตามพื้นที่และประเภทของมลพิษ อย่างไรก็ตาม การบำบัดด้วยกลไกธรรมชาติเป็นวิธีที่ลดต้นทุนและเป็นการฟื้นฟูระบบนิเวศไปพร้อม ๆ กัน โดยวิธีทางชีวภาพมีทั้งใช้จุลินทรีย์บำบัด ซึ่งเรียกว่า ไบโอรีเมดิเอชัน (bioremediation) และการใช้พืชบำบัดซึ่งเรียกว่า ไฟโตรรีเมดิเอชัน (phytoremediation) ทั้งสองกระบวนการอาศัยกลไกตามธรรมชาติที่จุลินทรีย์และพืชต้องดำรงชีวิตด้วยการนำสารอาหารต่าง ๆ เข้าสู่ระบบเมแทบอลิซึมหรือมีการตอบสนองและปรับตัวเมื่อต้องเจริญเติบโตในสภาพแวดล้อมที่มีสารแปลกปลอม ดังนั้นพื้นที่ที่มีสารแปลกปลอมหรือสารมลพิษปนเปื้อนอยู่นั้น ก็จะมีกลุ่มจุลินทรีย์หรือพืชที่มีกลไกการย่อย การสลายหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารเหล่านั้นให้สมบัติที่จะนำเข้าสู่เซลล์ได้ง่ายและนำไปสู่กลไกทางชีวเคมีให้เป็นสารที่ไม่มีพิษหรือเป็นพิษลดลง หรือแม้กระทั่งนำไปเป็นสารอาหารและแหล่งพลังงานให้แก่เซลล์ได้ต่อไป หากสารพิษมีมากเกินไปก็จะส่งผลต่อเซลล์ทั้งจุลินทรีย์และพืชเอง อย่างไรก็ตาม พืชเป็นสิ่งมีชีวิตที่มองเห็นและสังเกตลักษณะต่าง ๆ ได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นการแสดงอาการผิดปกติของพืชจะสังเกตได้ อีกทั้งพืชยังอาจได้รับการบำรุงดูแลรักษาให้เติบโตยิ่งขึ้นหรือถูกกำจัดหากมีมากเกินไป ทำให้การใช้พืชกำจัดสารปนเปื้อนจึงมีความสะดวกต่อการจัดการพื้นที่ได้

1.1 ปัจจัยในการบำบัดด้วยพืชหรือไฟโตรรีเมดิเอชัน

กระบวนการบำบัดด้วยพืชอาศัยกลไกตามธรรมชาติที่ต้องดำรงชีวิตด้วยการแลกเปลี่ยนก๊าซ การสังเคราะห์ด้วยแสง และการลำเลียงสารละลายผ่านไซเลม (xylem) และจะนำพาสารอาหารผ่านโฟลเอ็ม (phloem) นอกจากนั้นยังมีระบบป้องกันตนเองจากสารพิษหรือระบบชีวเคมีพิเศษที่เกิดกับพืช ซึ่งทำให้พืชเติบโตในพื้นที่ที่มีสารพิษมากได้ เช่น พืชบางชนิดมีเอ็นไซม์สำหรับสร้างเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาอย่างจำเพาะเจาะจงในสารพิษบางชนิด หรือพืชบางชนิดมีโปรตีนนำพาสารแปลกปลอมเข้าออกเซลล์ได้ กระบวนการเหล่านี้ทำให้พืชลำเลียงและกักเก็บสารที่เป็นพิษน้อยหรือไม่เป็นพิษแล้วไว้ในเซลล์พืชได้ รวมถึงความสามารถของราก คุณสมบัติของราก และการปลดปล่อยสารเมือก (root exudate) ยังส่งเสริมการบำบัดสารพิษและสารปนเปื้อนโดยทำงานร่วมกับจุลินทรีย์ที่รากพืช หรือพืชบางชนิดมีเอนไซม์พิเศษที่เซลล์รากใน

การสลายพันธะเคมีของสารปนเปื้อน นอกจากนั้นพืชอาจเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยา (plant morphology) เช่น พืชมีรากแขนงมากขึ้น ลักษณะใบที่ส่งเสริมการสังเคราะห์ด้วยแสง และการคายน้ำ หรือพืชมีการตอบสนองทางสรีรวิทยา (plant physiology) เช่น การเปลี่ยนแปลงระดับการทำงานของยีน การเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตเอนไซม์ การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาชีวเคมี รวมถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราการคายน้ำได้ด้วยเช่นกัน

ปัจจัยด้านสมบัติทางเคมีของสารปนเปื้อน

ปัจจัยในการบำบัดนั้นเกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อม สมบัติของพืช และสมบัติของสารปนเปื้อนเองด้วย เนื่องจากพืชนำสารเหล่านี้เข้าสู่เซลล์ผ่านระบบรากและระบบลำเลียงในพืช ส่งผลให้สารที่ละลายน้ำได้ดีถูกดูดซึมมาพร้อมกับน้ำที่ระบบราก เช่นเดียวกับสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ได้ดีด้วยเช่นกัน ดังนั้นประสิทธิภาพของพืชในการดูดซึมสารปนเปื้อนเข้าสู่เซลล์พืชจะเกี่ยวข้องกับสมบัติต่าง ๆ ของสารปนเปื้อน ได้แก่ สมบัติความเป็นขั้ว (polarity) สมบัติการละลายน้ำ (water solubility) สมบัติการระเหย (vapor pressure) น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) และสมบัติการแยกชั้นน้ำ (octanol-water partition coefficient) โดยเฉพาะคุณสมบัติการแยกชั้นน้ำซึ่งจะบ่งบอกด้วยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (partition coefficient; P) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการละลายของสารในตัวทำละลาย 2 ชนิดที่ผสมกันไม่ได้ (immiscible) โดยนิยมเปรียบเทียบการละลายของสารในชั้นน้ำและน้ำมัน เนื่องจากการละลายน้ำได้ดีแสดงถึงการกระจายตัวในระบบนิเวศได้ดี ขณะที่การละลายในน้ำมันแสดงถึงโอกาสที่จะสะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตได้ โดยการหาค่าการละลายจะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์คือ ออกทานอล (n-octanol) แทนชั้นน้ำมันซึ่งเป็นตัวแทนของชั้นเนื้อเยื่อ (membrane) ต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต โดยสมบัติการละลายของสารในชั้นสารละลายทั้งสองเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารในชั้นน้ำและชั้นออกทานอล (n-octanol/water partition coefficient; P_{ow}) การที่เลือกใช้ออกทานอลแทนชั้นน้ำมันหรือเนื้อเยื่อ เนื่องจากเมื่อออกทานอลอิมมิดด้วยน้ำจะเป็นขั้วใกล้เคียงกับเซลล์เมมเบรนซึ่งเป็นชั้นไขมันของเซลล์สิ่งมีชีวิต และนอกจากนี้โครงสร้างของออกทานอลมีลักษณะคล้ายคลึงกับองค์ประกอบหลักของชั้นไขมัน (phospholipid) ในเยื่อหุ้มเซลล์สิ่งมีชีวิต

ปัจจัยด้านสภาวะของสิ่งแวดล้อม

ปัจจัยสภาพแวดล้อมในบริเวณที่อยู่อาศัยของพืชส่งผลต่อพืชและส่งผลต่อสมบัติบางประการของสารปนเปื้อน ในสภาวะแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อกระบวนการต่าง ๆ ในพืช เช่น ปริมาณแสงมากจะกระตุ้นอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงให้สูงขึ้น ส่งผลต่อการสร้างพลังงานในพืชเองด้วย หรืออุณหภูมิที่สูงขึ้น จะกระตุ้นอัตราการคายน้ำของพืชให้สูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการดูดซึ่มสารและการลำเลียงสารละลายต่าง ๆ นอกจากนั้นความเป็นกรดต่างในดินหรือในน้ำเองก็เกิดจากการมีสารประกอบที่รับหรือให้อิเล็กตรอน หรือรับหรือให้โปรตอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นไอออน ส่งผลต่อการละลายของสารปนเปื้อน นำไปสู่การดูดซึ่มสารที่ต่างกันไป นอกจากดินและน้ำแล้ว สภาพบรรยากาศเองก็ส่งผลต่อการดูดซึ่มสาร เช่น ความชื้นในบรรยากาศส่งผลต่อการคายน้ำ ดังนั้นปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง สารประกอบอื่น ๆ ในพื้นที่ และความชื้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยพืช

ปัจจัยด้านลักษณะของพืช

ลักษณะของพืชที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่างกันไป เช่น ระบบรากฝอยเพิ่มพื้นที่ผิวที่รากช่วยดูดซึ่มสารได้เพิ่มขึ้น ความยาวรากช่วยให้ดูดซึ่มสารที่อยู่ลึกลงไปในพื้นที่ได้ลึกมากขึ้น องค์ประกอบของเซลล์ ผนังเซลล์ ส่งผลต่อการนำสารเข้าสู่เซลล์ โดยหากเซลล์พืชมีโปรตีนขนส่งมากจะนำสารเข้าสู่เซลล์ได้ดี และยิ่งขึ้นกับจำนวนชนิดของโปรตีนขนส่งด้วยเช่นกัน ความแตกต่างของยีนนำไปสู่การแสดงออกของยีนที่ต่างกัน ส่งผลต่อชนิดเอนไซม์ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างด้านลักษณะของพืช เช่น การแตกกิ่งก้านของพืช ลักษณะสัณฐานของใบ ปากใบ ความหนาใบ พื้นผิวใบ หรือแม้กระทั่งพืชที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่หากมีความแตกต่างทางพันธุกรรมยังส่งผลต่อการผลิตเอนไซม์และโปรตีนต่าง ๆ ได้ เช่น โปรตีนขนส่ง (transporter protein) ช่องทางโปรตีน (protein channel) และเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเปลี่ยนแปลงสาร

1.2 ประเภทของการบำบัดด้วยพืช

กลไกการบำบัดสารปนเปื้อนด้วยพืชจำแนกได้หลายประเภทตามกระบวนการกำจัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นภายนอกและภายในของพืช

กระบวนการที่เกิดขึ้น *ภายนอก* ของพืชแบ่งเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่

1) กลไกการตรึงสารมลพิษด้วยพืชหรือไฟโตสเทบิไลเซชัน (phytostabilization) เป็นการลดและจำกัดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษในพื้นที่ปนเปื้อน โดยการตรึงสารมลพิษไว้บริเวณรากพืช

2) กลไกการย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืชหรือไรโซดีกราเดชัน (rhizodegradation) เป็นการสลายตัวของสารปนเปื้อนด้วยจุลินทรีย์บริเวณรอบ ๆ รากพืชที่เรียกว่า ไรโซสเฟียร์ (rhizospheres)

กระบวนการที่เกิดขึ้น *ภายใน* ของพืชแบ่งได้เป็น 4 กระบวนการ ได้แก่

1) กลไกการย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืชหรือไฟโตดีกราเดชัน (phytodegradation) หรือเรียกอีกอย่างว่า ไฟโททรานส์ฟอร์มชัน (phytotransformation) เป็นการดูดซับสารมลพิษเข้าไปในพืชและย่อยสลายด้วยกระบวนการเมแทบอลิซึมจากเอนไซม์ต่าง ๆ

2) กลไกการทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืชหรือไฟโตโวลาทิลไลเซชัน (phytovolatilization) เป็นการเปลี่ยนแปลงพันธะเคมีของสารมลพิษภายในพืชและระเหยกลายเป็นไอทางปากใบออกสู่บรรยากาศ

3) กลไกการกรองสารมลพิษด้วยรากพืชหรือไรโซฟิลเทรชัน (rhizofiltration) เป็นการกรองและดูดซับสารมลพิษเข้าไปสะสมไว้เฉพาะบริเวณรากพืช

4) กลไกการสกัดสารมลพิษด้วยพืชหรือไฟโตเอ็กซ์แทรกชัน (phytoextraction) เป็นการดูดซับ เคลื่อนย้ายสารมลพิษ รวมถึงสะสมไว้ในบริเวณราก ต้น และใบ โดยพืชที่ใช้มักจะเป็นกลุ่มไฮเปอร์แอ็กคิวมูเลเตอร์ (hyperaccumulator)

กลไกการตรึงโดยพืชและกลไกการสกัดด้วยพืชมักจะพบในการบำบัดสารปนเปื้อนที่เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic contaminants) ขณะที่กลไกแบบอื่น ๆ มักจะพบในกระบวนการ

บำบัดสารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ (organic contaminants) นอกจากนี้รากพืชเองยังปล่อยสารเมือกต่าง ๆ เพื่อตรึงหรือจับกับสารปนเปื้อนไว้ในเนื้อดินได้ ซึ่งช่วยลดการเคลื่อนย้ายสารพิษเหล่านั้น และพืชบางชนิดจะดูดดึงสารพิษมาสะสมไว้ที่รากพืชได้เช่นกัน โดยจำแนกได้ตามกระบวนการกำจัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นภายนอกและภายในของพืชดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังจัดกลุ่มประเภทของการบำบัดด้วยพืชตามพฤติกรรมของพืชโดยแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ การดูดดึงสารพิษด้วยพืช การย่อยสลายหรือทำลายสารมลพิษโดยจุลินทรีย์ด้วยราก และการเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีในดิน

1.2.1 การดูดดึงสารพิษด้วยพืช

อาศัยการดูดดึงสารมลพิษที่ปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม เช่น ดิน น้ำ และอากาศ ไปเก็บไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยมีกลไกการบำบัดที่เกี่ยวข้องดังนี้

กลไกการสกัดด้วยพืช (phytoextraction/phytoaccumulation)

พืชดูดซึมสารมลพิษขึ้นจากดินหรือน้ำเข้าสู่รากของพืช แล้วนำไปสะสมที่ยอดหรือรากนั้นเกี่ยวข้องกับการดูดซึมสารเข้าสู่พืช จากนั้นจะเก็บสะสมสารไว้ในเซลล์ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนทานพิษของสารในพืชเอง (tolerance mechanism) โดยในกระบวนการนี้เกิดเองได้ตามธรรมชาติด้วยความสามารถของพืช (natural phytoextraction) หรือเติมสารที่ช่วยให้เกิดการดูดซึมเข้าสู่เซลล์พืชได้มากขึ้น (induced phytoextraction)

กลไกการระเหยด้วยพืช (phytovolatilization)

เป็นการทำให้ธาตุโลหะหรือสารประกอบระเหยออกทางใบ โดยการดูดซับขึ้นมาจากดินด้วยแรงดึงจากการคายน้ำ เกิดขั้นตอนการเติมหมู่ฟังก์ชันหรือเปลี่ยนแปลงไอออนให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้ จากนั้นปล่อยออกทางใบ โดยสารประกอบหรือธาตุโลหะเมื่ออยู่ในรูปที่เป็นไอแล้วมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้อยลง

กลไกการสลายด้วยพืช (phytodegradation/phytotransformation)

พืชดูดซึมสารมลพิษเข้าไปในพืชแล้วย่อยสลายหรือเปลี่ยนแปลงด้วยเมแทบอลิซึมของพืชเอง หรือเปลี่ยนเป็นสารที่แบคทีเรียย่อยสลายต่อไปได้ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับกลไกการทำงานกลไกการดูดซึมสารโดยสารที่ละลายน้ำได้ดีจะเข้าสู่รากในระบบลำเลียงน้ำในพืชได้ง่าย

ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายต่างกัน พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ Log Kw (octanol water partition coefficient) สารที่มีค่า Log Kw น้อยกว่า 0.5 จะละลายน้ำดีมาก ส่วนสารที่มีค่า Log Kw มากกว่า 3 จะเป็นสารที่เกาะกับรากพืชอย่างแน่นและเกี่ยวข้องกับการขบวนการชีวเคมีภายในเซลล์พืชซึ่งมี 3 ขั้นตอน คือ การเปลี่ยนรูป (transformation) การรวมกัน (conjugation) และการแยกสัดส่วน (sequestration) ตามทฤษฎีของการทำงานของตับในการกำจัดสารพิษ (Green Liver model) โดยเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสาร เช่น

- เอนไซม์ดีฮาโลจีเนส (Dehalogenase) เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบคลอรีน
- เอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์หรือเพอร์ออกไซด์อินทรีย์
- เอนไซม์ไนโตรรีดักเทส (Nitroreductase) เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนเตรต
- เอนไซม์ไนทริเลส (Nitrilase) เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไซยาไนด์
- เอนไซม์ฟอสฟาเทส (Phosphatase) เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารปราบศัตรูพืชในกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต (Organophosphate)

1.2.2 การย่อยสลายหรือทำลายสารมลพิษโดยจุลินทรีย์ที่ระบบรากพืช

เป็นการกระตุ้นให้จุลินทรีย์ที่ระบบรากมาช่วยสลายสารปนเปื้อนหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้สารมีสมบัติเป็นพิษลดลง หรือระบบรากที่ช่วยกรองอนุภาคขนาดใหญ่ของสารปนเปื้อน และมีกลุ่มจุลินทรีย์ที่อาศัยในชั้นเนื้อเยื่อพืชหรือผนังเซลล์ของพืชมาช่วยย่อยสลายสารปนเปื้อนไปได้

กลไกการสลายที่รากพืช (rhizodegradation/phytostimulation)

รากหลั่งสารออกมาจากรากพืชที่ยังมีชีวิตอยู่หรือจากการสลายตัวของรากพืชที่ตายแล้ว เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในดิน หรือเชื้อราไมคอร์ไรซา ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารมลพิษได้ดีขึ้น เป็นกระบวนการที่ใช้กับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้น้อย เช่น

สารปิโตรเลียม สารตกค้างกลุ่มพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหรือสารในกลุ่มพีเอเอช (Polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) และสารกลุ่มพอลิคလိုริเนตเตดไบฟีนิลหรือสารในกลุ่มพีซีบี (Polychlorinated biphenyls; PCBs)

กลไกการกรองด้วยพืช (Rhizofiltration)

การดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) พืชจะดูดซับหรือตกตะกอนสารมลพิษด้วยรากหรือดูดซับไว้ในเซลล์ พืชที่มีกลไกนี้ส่วนใหญ่เป็นพืชน้ำ เนื่องจากมีระบบรากใต้ดินหรือลำต้นใต้น้ำที่เป็นเหมือนชั้นกรอง ดักสารต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยสารปนเปื้อนจะยึดติดกับรากหรือดูดซึมโดยรากตามกระบวนการทางชีวภาพ ในระหว่างกระบวนการเหล่านี้สารปนเปื้อนอาจถูกนำหรือขนส่งโดยพืช ตัวอย่างเช่น การใช้พืชที่มีกลไกการกรองด้วยพืช เพื่อกำจัดสารกัมมันตรังสีหรือโลหะออกจากน้ำที่ปนเปื้อน พืชที่ใช้ในวิธีนี้จะปลูกบนดินที่ปนเปื้อนโดยตรงหรือจะถูกเลี้ยงด้วยไฮโดรโปนิคส์ในน้ำสะอาดแทนดินจนพืชมีระบบรากที่มากขึ้นและเติบโตในพื้นที่กว้างขึ้น เมื่อพืชมีระบบรากที่สมบูรณ์แล้วจะถูกส่งไปยังแหล่งน้ำที่ปนเปื้อน เพื่อให้ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่และทำหน้าที่บำบัดแหล่งน้ำนั้น ๆ เมื่อพืชเจริญเติบโตมากหรือเสื่อมโทรมลงก็จะถูกเก็บเกี่ยวนำไปทิ้งในพื้นที่พิเศษที่เตรียมไว้กักเก็บสาร นอกจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติแล้ว ยังสร้างบ่อจำลองหรือบึงประดิษฐ์เลียนแบบธรรมชาติได้อีกด้วย

1.2.3 การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีในดิน

พืชจะหลั่งสารอินทรีย์บางชนิดหรือมีการแลกเปลี่ยนไอออนและประจุต่าง ๆ ส่งผลให้สภาพทางเคมีในดินหรือน้ำที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ระบบรากเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อน

กลไกการตรึงด้วยพืช (phytostabilization)

กลไกนี้จะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของราก ที่ปลดปล่อยสารอินทรีย์บางชนิดออกมารอบรากพืช (root/rhizome exudates) เช่น คาร์โบไฮเดรตบางชนิดถูกปลดปล่อยออกมาครอบรากพืชและกักเก็บสารพิษ โดยพืชจะดูดซับสารพิษไว้อยู่ในรูปที่เคลื่อนที่ได้น้อยลงหรืออยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ไม่ได้ กลไกการบำบัดด้วยพืชแบบการตรึงด้วยพืชจะเหมาะสมกับการบำบัดพื้นที่ที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ เช่น โลหะหนักต่าง ๆ ดังรูปที่ 1.1