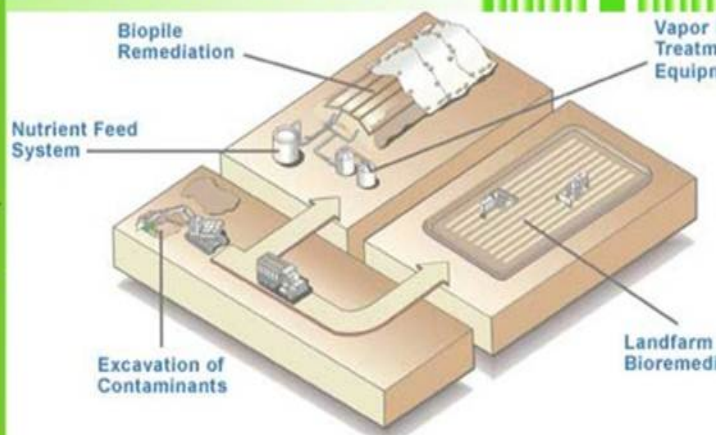




กรมโรงงานอุตสาหกรรม
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL WORKS

แนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อน จากการประกอบการอุตสาหกรรม

ส่วนมลพิษดิน สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน
กรมโรงงานอุตสาหกรรม



แนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อน
จากการประกอบการอุตสาหกรรม

ส่วนมลพิษดิน

สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน

กรมโรงงานอุตสาหกรรม

(2554)



คำนำ

การจัดการมลพิษทางดินให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลทางวิทยาศาสตร์จากแหล่งต่างๆมาประกอบการพิจารณาวางแผนและตัดสินใจ อาทิเช่น แหล่งกำเนิดมลพิษ การปล่อยหรือระบายมลพิษ หรือการจัดการสารเคมีและวัตถุอันตราย เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องทำการสำรวจระดับการปนเปื้อนในดินด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณพื้นที่อ่อนไหวที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน การใช้ประโยชน์ที่ดิน การเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และระบบนิเวศโดยรวม ซึ่งหากตรวจพบว่า พื้นที่ใดที่มีการปนเปื้อนสารมลพิษในระดับสูง ควรต้องมีการฟื้นฟูดินปนเปื้อนอย่างเหมาะสมเพื่อให้ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดินลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนระดับห้องปฏิบัติการ เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับสารปนเปื้อนที่พบในพื้นที่ศึกษา ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการจะนำไปขยายผลทำการทดลองสาธิตในพื้นที่จริงต่อไปเพื่อปรับสภาพการฟื้นฟูให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อนจากการประกอบการอุตสาหกรรมที่มีลักษณะการปนเปื้อนคล้ายคลึงกันได้อย่างเหมาะสมไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีขั้นตอนดำเนินงานภายใต้ปัจจัยควบคุมต่างๆ ที่ชัดเจน

คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าแนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อนจากการประกอบการอุตสาหกรรมที่จัดทำขึ้นนี้จะประโยชน์ต่อผู้สนใจทั่วไปในการทำความเข้าใจ และเป็นแนวทางในการจัดการการปนเปื้อนดิน เพื่อที่ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องจะได้ร่วมกันดูแลรักษาทรัพยากรดินให้ยั่งยืนตลอดไป

คณะผู้จัดทำ

กันยายน 2554

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	1
สารบัญ	2
1. บทนำ	3
2. แหล่งที่มาของสารปนเปื้อน	5
3. ชนิดของสารปนเปื้อน	5
4. การเกิดมลพิษดินจากการประกอบการอุตสาหกรรม	6
5. ความหมายของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม	6
6. ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกเทคโนโลยีการฟื้นฟู	7
7. เทคนิคในการฟื้นฟูดินปนเปื้อน	9
8. การประยุกต์ใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรม	35
เอกสารอ้างอิง	38

1. บทนำ

แนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อนจากการประกอบการอุตสาหกรรมฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่ายมีความเข้าใจที่ตรงกันและเป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงศึกษาเพื่อเตรียมความพร้อมในการดำเนินการตามนโยบายของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่จะควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดินภายในบริเวณโรงงาน ซึ่งต่อไปเมื่อกฎหมายมีผลบังคับใช้แล้ว ผู้ประกอบการรายใดทำให้เกิดการปนเปื้อนจนเกินความเสียหายที่ยอมรับได้ก็จะต้องทำการฟื้นฟูดินปนเปื้อนเพื่อลดระดับความเข้มข้นของสารปนเปื้อนลงให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะทางธรรมชาติของดินและการเกิดการปนเปื้อนในเบื้องต้น ก่อนที่จะนำเทคนิคการฟื้นฟูต่างๆ และการประยุกต์ใช้

ดินคือ วัตถุที่ปกคลุมผิวโลกเป็นชั้นบางๆ เกิดจากการสลายตัวของเปลือกโลกรวมกับสารอินทรีย์ น้ำ และอากาศ ดินประกอบด้วยแร่ธาตุประมาณร้อยละ 45 สารอินทรีย์ร้อยละ 5 อากาศหรือช่องว่างเม็ดดินประมาณร้อยละ 25 และน้ำซึ่งอยู่ตามช่องว่างของเม็ดดินประมาณร้อยละ 25 โดยมีองค์ประกอบของธาตุโดยเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 1

มลพิษดิน หมายถึง ดินที่เสื่อมค่าไปจากเดิม และมีสารปนเปื้อนเกินขีดจำกัดจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ ตลอดจนการเจริญเติบโตของพืช และสัตว์ทั้ง โดยทางตรงและทางอ้อม

สารปนเปื้อน หมายถึง สิ่งแปลกปลอมที่เข้ามาผสมกับตัวกลางเดิมทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นจากเดิม หรือเป็นการเพิ่มสารชนิดนั้นๆ ลงไปในตัวกลางนั้นๆ ระดับของการปนเปื้อนเป็นดัชนีชี้วัดความเป็นอันตรายและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของผู้สัมผัส สารปนเปื้อนในดินสามารถจำแนกได้ 3 พวกคือ 1) สารปนเปื้อนที่มีชีวิต (Biological Contaminants) เป็นสารปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดโรคต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในดิน 2) สารปนเปื้อนเคมี (Chemical Contaminants) เป็นสารปนเปื้อนที่ถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร และจะเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นตามลำดับชั้นของผู้บริโภคและ 3) สารปนเปื้อนกัมมันตรังสี (Radiological Contaminants) เป็นสารปนเปื้อนที่มีผลทำให้สิ่งมีชีวิตบางชนิดเกิดการกลายพันธุ์ได้

ตารางที่ 1 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกโลก (หน่วย : มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ธาตุ (element)	เปลือกโลก (crust) ^a	ดิน (soil) ^b
เหล็ก (iron)	41,000	32,000
อะลูมิเนียม (aluminum)	82,000	67,000
สารหนู (arsenic)	1.50	11.30
แคดเมียม (cadmium)	0.11	0.60
โครเมียม (chromium)	100	84
ทองแดง (copper)	50	26
ตะกั่ว (lead)	14	29
แมงกานีส (manganese)	950	760
ปรอท (mercury)	0.05	0.10
นิกเกิล (nickel)	80	34
ซีลีเนียม (selenium)	0.05	0.40
สังกะสี (zinc)	75	60

ที่มา ^a Brown (1979), ^b Ure (1982)

2. แหล่งที่มาของสารปนเปื้อน

สารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมอาจมีที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เกิดขึ้นและถูกปล่อยจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการปนเปื้อนที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ อาจมีการรั่วไหลหรือปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมแบบตั้งใจ และไม่ตั้งใจ โดยแหล่งที่มาของสารปนเปื้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แหล่งหลักดังนี้

2.1 แหล่งที่มาแบบระบุตำแหน่งได้ (Point source) เป็นแหล่งของสารปนเปื้อนที่สามารถระบุแหล่งที่มาได้อย่างชัดเจน เช่น จุดปล่อยของเสียของอุตสาหกรรม เตาเผาขยะอุตสาหกรรม ระบบบำบัดของเสีย เป็นต้น

2.2 แหล่งที่มาแบบไม่สามารถระบุตำแหน่ง (Non-point source) เป็นแหล่งของสารปนเปื้อนที่ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน เช่น ของเหลวที่ไหลจากแหล่งเกษตรกรรมที่ปนเปื้อนด้วยสารกำจัดวัชพืชหรือปุ๋ยสังเคราะห์ ตะกอนดินที่มีการปนเปื้อนด้วยสารปนเปื้อน สารปนเปื้อนในอากาศ การทับถมของฝุ่นผงหรืออนุภาคต่างๆ ในอากาศ เป็นต้น สารปนเปื้อนที่กระจายตัวอยู่ในบริเวณต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถที่จะระบุได้ว่ามาจากแหล่งใด

3. ชนิดของสารปนเปื้อน

3.1 สารปนเปื้อนประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic pollutant) ที่พบมากมักเป็นสารกลุ่ม โลหะหนัก ได้แก่ ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง สังกะสี แมงกานีส สารหนู และนิกเกิล เป็นต้น

3.2 สารปนเปื้อนประเภทสารปนเปื้อนอินทรีย์ (Organic pollutant) มีหลายชนิดที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ สารก่อระเบิด ตัวทำละลาย เป็นต้น โดยสารปนเปื้อนอินทรีย์มักขึ้นอยู่กับพื้นที่บริเวณนั้น หรือบริเวณใกล้เคียง เช่นพื้นที่เกษตรมักพบกลุ่มสารกำจัดวัชพืชและสัตว์ พื้นที่ยุทธโประกรณ์ของกองทัพ หรือโรงงานผลิตอาวุธสงคราม มักพบกลุ่มสารก่อระเบิด

4. การเกิดมลพิษดินจากการประกอบการอุตสาหกรรม

การประกอบการอุตสาหกรรม อาจเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดมลพิษดินซึ่งเกิดในขั้นตอนต่างๆของกระบวนการผลิต เช่น สารเคมีในกระบวนการผลิต ของเสียที่เกิดขึ้น เป็นต้น ซึ่งหากมีการจัดการที่ไม่เหมาะสมหรือเกิดอุบัติเหตุจะทำให้สารเคมีเหล่านั้นปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม รวมถึงดิน สารปนเปื้อนจากอุตสาหกรรมมีหลายรูปและชนิด และเมื่อเกิดการปนเปื้อนในดิน มักพบว่ามีระดับการปนเปื้อนที่รุนแรง ตัวอย่าง สารปนเปื้อนที่มักพบในอุตสาหกรรม ได้แก่ สารอินทรีย์ระเหยในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า และยานยนต์ การปล่อยน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นน้ำเสียที่เกิดจากการชะล้างผ่านสารเคมีต่างๆ ในอุตสาหกรรม เช่น สารพีซีบี (PCB) ที่ใช้ในการผลิตสีและพลาสติก สารเฮกซีบี (HCB) ที่ใช้ในการผลิตยางสังเคราะห์ และการปนเปื้อนโลหะหนักชนิดต่างๆ จากอุตสาหกรรมชุบโลหะหรือเหมืองแร่ นอกจากนี้ยังมีการปนเปื้อนของสารอันตรายระหว่างกระบวนการสกัดแร่ในเหมือง เช่น การปนเปื้อนของไซยาไนด์ที่ใช้เป็นสารสกัดทองคำ เป็นต้น

การรั่วไหลสารกัมมันตรังสี จากการทดลองหรือจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือจากเตาปฏิกรณ์ปรมาณู สารกัมมันตรังสีจะถูกดูดซึมไปอยู่ในใบและดอกของพืช แล้วผ่านทางห่วงโซ่อาหารมาจนกระทั่งถึงตัวมนุษย์

การใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งวัสดุเหลือใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทิ้งวัสดุเหลือใช้อันตรายซึ่งยากต่อการย่อยสลาย จะเกิดการสะสมในดินจนทำให้เกิดภาวะมลพิษดิน

5. ความหมายของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม

การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม (Environmental Remediation) คือ การทำความสะอาดสิ่งแวดล้อม (Cleaning the environment) กระบวนการของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมมีความซับซ้อนต้องพิจารณาปัจจัยหลายด้านประกอบการดำเนินการ ซึ่งมักดำเนินการเมื่อเกิดอุบัติเหตุ หรือการจัดเก็บและการจัดการอย่างไม่เหมาะสมของสารเคมีและ/หรือสารโลหะหนัก เป็นสาเหตุของการรั่วไหลและการแพร่กระจายจนทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารเหล่านั้น การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมมีเป้าหมายในการนำสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนนั้นกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้ตามสภาพเดิมก่อนการปนเปื้อน ซึ่งต้องคำนึงถึงระบบนิเวศของพื้นที่นั้นๆ เทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการฟื้นฟูจะรวมถึงเทคโนโลยีในการบำบัดสารปนเปื้อนด้วย

การบำบัด (Treatment) คือ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีกับตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่เป็นเป้าหมาย ได้แก่ น้ำ ดิน หรือ อากาศ เพื่อที่จะย้าย หรือ ทำลายสารมลพิษนั้นออกจากตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมนั้น เช่น การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย การบำบัดดินปนเปื้อนสารอินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งหลังการบำบัดด้วยเทคโนโลยีเหล่านี้แล้ว

อาจต้องใช้เทคโนโลยีในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เข้ามาปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ให้สามารถใช้ประโยชน์ต่อไปได้ด้วย

6. ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกเทคโนโลยีการฟื้นฟู

การฟื้นฟูดินปนเปื้อนมีความจำเป็นต้องสำรวจพื้นที่และเก็บรวบรวมข้อมูลของสารปนเปื้อนเพื่อนำมาประกอบการพิจารณาในการคัดเลือกแนวทางและเทคโนโลยีในการฟื้นฟูที่เหมาะสมกับพื้นที่นั้นๆ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้คือ

1) ชนิดของสารปนเปื้อน ชนิดของสารปนเปื้อนเป็นปัจจัยอย่างแรกที่ต้องคำนึงถึงเพราะวิธีการฟื้นฟูแต่ละวิธีถูกออกแบบมาให้มีความเหมาะสมและเฉพาะเจาะจงกับสารปนเปื้อน เช่นวิธีการฟื้นฟูแบบ Soil Vapor Extraction (SVE) ถูกออกแบบมาให้ใช้กับสารปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติในการระเหยเท่านั้น สารปนเปื้อนใดที่มีความสามารถในการระเหยต่ำ ละลายน้ำได้ดี หรือ โลหะหนักเกือบทุกชนิด ไม่สามารถใช้วิธีการนี้ได้

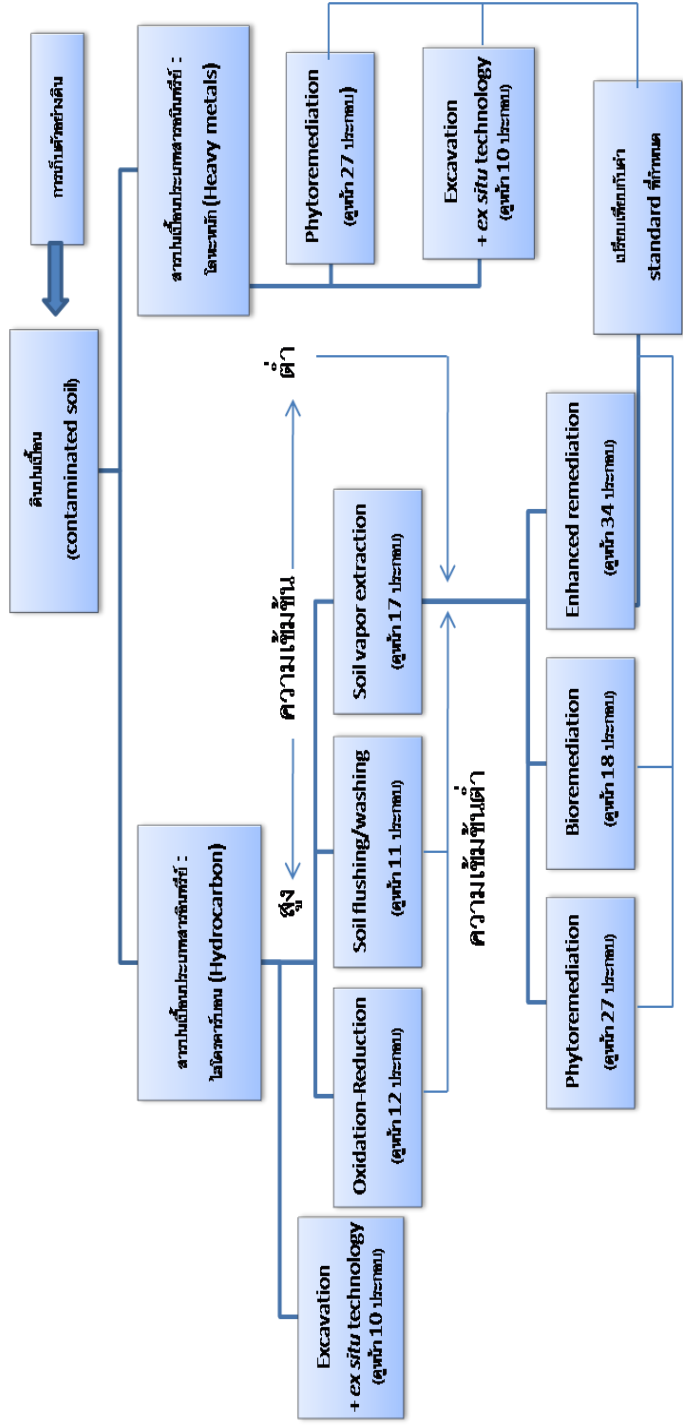
2) ปริมาณและความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจะสัมพันธ์กับปริมาณของสารปนเปื้อนและปริมาณดินที่มีการปนเปื้อนนั้นๆ ตัวอย่างเช่น กรณีที่สารปนเปื้อนมีปริมาณมากและความเข้มข้นสูงก็ไม่สามารถใช้เทคโนโลยีฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพเนื่องจากจะทำให้พืชหรือจุลินทรีย์ตายลง ทำให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูลดลง

3) ตัวกลางที่ปนเปื้อน เช่น การฟื้นฟูสารชนิดหนึ่งที่ปนเปื้อนในดินจะใช้วิธีการที่แตกต่างกันกับการฟื้นฟูสารชนิดหนึ่งที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ดินแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน และมีอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างดินและสารปนเปื้อนที่แตกต่างกันด้วย เช่น ดินที่เป็นดินเหนียว เนื้อดินละเอียดจะดูดซับสารปนเปื้อนได้ดี และเนื้อดินมีร่วนซุยต่ำ ดังนั้นประสิทธิภาพในการฟื้นฟูโดยวิธีการฟื้นฟูแบบ SVE หรือ Soil Flushing อาจมีประสิทธิภาพต่ำ

4) ลักษณะของพื้นที่ที่ปนเปื้อน ประกอบด้วย ความลาดชัน ความลึกถึงระดับน้ำใต้ดิน สภาพภูมิประเทศ และ ภูมิอากาศ เป็นต้น อาทิเช่นถ้าพื้นที่มีความลาดชันสูงการใช้วิธีทางเคมีเช่น Permeable barrier อาจทำไม่ได้ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องการออกแบบ

5) วิธีและการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน เป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนในดินในทุกมิติ ซึ่งการเลือกวิธีการฟื้นฟูต้องเลือกวิธีที่สามารถจะฟื้นฟูให้มีความครอบคลุมมากที่สุด

แผนผังการเลือกแนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อน



7. เทคนิคในการฟื้นฟูดินปนเปื้อน

การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนสามารถทำได้ทั้งในพื้นที่ที่ปนเปื้อน (*in situ*) หรือ สามารถนำออกมาฟื้นฟูภายนอกพื้นที่ปนเปื้อน (*ex situ*) เทคโนโลยีการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปแบ่งเป็น 4 กลุ่ม คือ

1) การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ เป็นการใช้แรงเชิงกล ไม่ว่าจะเป็แรงงานคนหรือเครื่องจักรมาใช้ ในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม เช่น การทำคลุม (*capping*) หรือ ตักออก (*excavation*) ทั้งสองวิธีนี้ใช้เมื่อดินเกิดการปนเปื้อนในปริมาณที่ต่ำ และสารปนเปื้อนมีแพร่กระจายตัวต่ำ

2) การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมทางกายภาพและทางเคมี (*Physical and chemical remediation*) เป็นวิธีการที่ใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมีของสารปนเปื้อนมาใช้ในการออกแบบวิธีการฟื้นฟู เช่น คุณสมบัติการละลาย (*solubility*) หรือ ความดันไอ (*vapor pressure*) เช่น วิธี *soil flushing*, *soil vapor extraction (SVE)* และ *air sparging* เป็นต้น

3) การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมทางเคมี (*Chemical remediation*) เป็นการฟื้นฟูโดยใช้สารเคมีใส่ลงไปในดิน เพื่อทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนให้สารปนเปื้อนเปลี่ยนรูปเป็นสารที่มีความความเป็นพิษต่ำลงหรือได้ผลผลิตสุดท้ายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เช่น *permeable reactive barrier* หรือ *chemical oxidation* เป็นต้น

4) การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพ (*Bioremediation*) เป็นการฟื้นฟูโดยใช้พืชหรือจุลินทรีย์ทำการดูดซับหรือย่อยสลายสารปนเปื้อนในดิน เช่น *landfarming*, *bioventing* หรือ *phytoremediation* เป็นต้น

นอกจากนี้เทคโนโลยีการฟื้นฟูสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของการดำเนินการได้ดังนี้

7.1 การฟื้นฟูดินปนเปื้อนทางกายภาพและทางเคมี (*Physical and chemical remediation*)

การฟื้นฟูดินปนเปื้อนด้วยวิธีการทางกายภาพและเคมี มีด้วยกันหลายวิธี เช่น การตักดินไปฟื้นฟู หรือ การคลุมดิน (*excavation and capping*) ใช้ได้กับสารปนเปื้อนทุกประเภท การล้างดิน (*soil washing*) เหมาะสมกับสารปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำสูง เช่น โลหะหนัก พวกกลุ่มตัวทำละลาย เป็นต้น โดยส่วนใหญ่การคลุมหรือการตักออกจะใช้กับดินปนเปื้อนในปริมาณที่น้อยกว่า 1 ดัน การใช้กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมี (*chemical oxidation-reduction processes*) เหมาะสมกับสารปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติในการให้และรับอิเล็กตรอน การสกัดด้วยความร้อน (*soil thermal extraction*) การสกัดไอ (*soil vapor extraction*) การใช้ไอน้ำความร้อน (*steam thermal extraction*) เหมาะสมกับสารปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติในการระเหยสูง เช่น กลุ่ม *VOCs* การใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (*electrokinetics*) โดยมากใช้สำหรับการฟื้นฟูดินปนเปื้อนโลหะหนัก ทั้งนี้วิธีการที่กล่าวมาสามารถทำได้ทั้งในพื้นที่ที่ปนเปื้อน (*in situ*) หรือ สามารถนำออกมาฟื้นฟูภายนอกพื้นที่ปนเปื้อน (*ex situ*) โดยส่วนใหญ่การฟื้นฟูทางกายภาพและทางเคมีจะใช้สำหรับพื้นที่ปนเปื้อนที่มีความเข้มข้น

ของสารปนเปื้อนในระดับที่สูง เพื่อลดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนลงจนถึงระดับที่การฟื้นฟูทางชีวภาพ หรือ กระบวนการลดลงตามธรรมชาติ (natural attenuation)

7.1.1 การตัดดินไปฟื้นฟู และ การคลุมดิน (Excavation and Capping)

เป็นการฟื้นฟูดินปนเปื้อนในกรณีที่ดินปนเปื้อนมีปริมาณต่ำกว่า 1 ตัน และมีขอบเขตการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนต่ำ Excavation นั้นสามารถทำได้ทั้งในดินที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงหรือต่ำ โดยการตัดดินที่ปนเปื้อนออกไปนอกพื้นที่ (*ex situ*) นำไปเข้าเตาเผาหรือ ผ่านขั้นตอนการทำให้เสถียรก่อนนำไปหลุมฝังกลบสำหรับของเสียอันตราย ดังแสดงในภาพที่ 1 สำหรับการ Capping ส่วนใหญ่เป็นการทำเพื่อป้องกันการและควบคุมการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อม และอาจปล่อยให้กระบวนการทางธรรมชาติ (natural attenuation) ทำการฟื้นฟูดินด้วยตัวเอง ส่วนมากจะทำการคลุมด้วยพลาสติกกันน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 การตัดดินปนเปื้อนไปฟื้นฟู (contaminated soil excavation)

ที่มา: <http://www.alphaenvironmental.net>

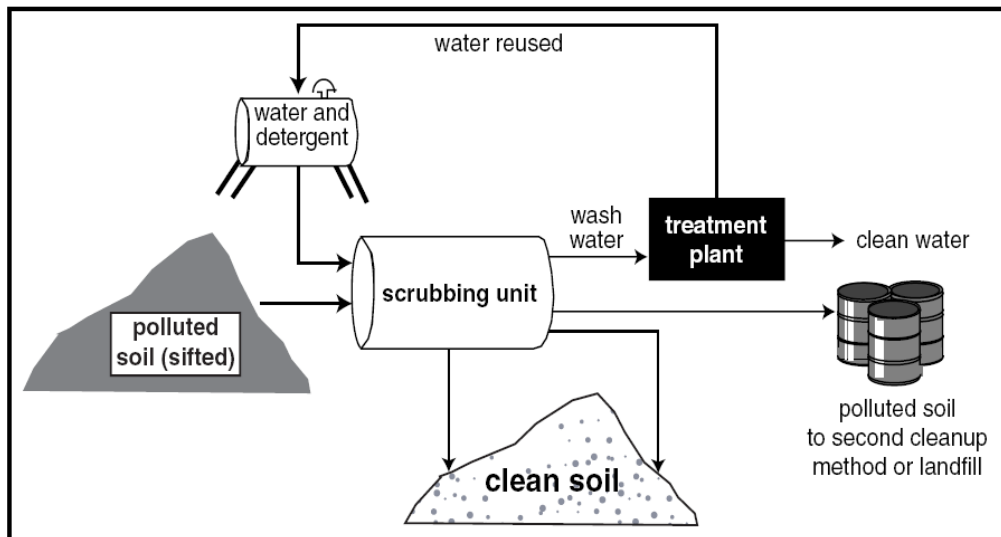


ภาพที่ 2 การคลุมดินปนเปื้อน (Capping)

ที่มา http://fabricarchitecturemag.com/articles/0708_iaa9_cap.html

7.1.2 การล้างดิน (Soil Washing, SW)

การล้างดิน หรือเรียกอีกชื่อว่าการชะดิน (soil washing) เป็นการนำดินที่มีการปนเปื้อนด้วยสารปนเปื้อนมาทำการล้างด้วยน้ำหรือสารละลาย อาทิเช่น สารลดแรงตึงผิว (surfactants) หรือ สารละลายกรดอ่อน ค่างอ่อน เพื่อให้สารปนเปื้อนที่ปนเปื้อนนั้นหลุดออกมาจากอนุภาคของดิน ซึ่งเป็นหนึ่งในการฟื้นฟูแบบ *ex situ* สำหรับระบบการล้างดิน ดังแสดงในภาพที่ 3 ระบบการล้างดินจะประกอบด้วย ส่วนใหญ่ 2 คือ Scrubbing Unit และ Treatment Unit ดินที่มีการปนเปื้อนจะเข้าสู่ระบบ Scrubbing unit ซึ่งจะมีการเติมน้ำหรือสารละลาย โดยดูจากค่าความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อน โดยสารปนเปื้อนที่หลุดออกมาจากอนุภาคดินจะละลายอยู่ในส่วนของของเหลว จากนั้นของเหลวที่ผ่านระบบ Scrubbing Unit จะเข้าสู่ระบบ Treatment Unit และทำการบำบัดสารปนเปื้อนตามวิธีการที่เหมาะสมต่อไป ส่วนดินที่ผ่านการบำบัดแล้วจะนำไปฝังกลบไว้ที่เดิม

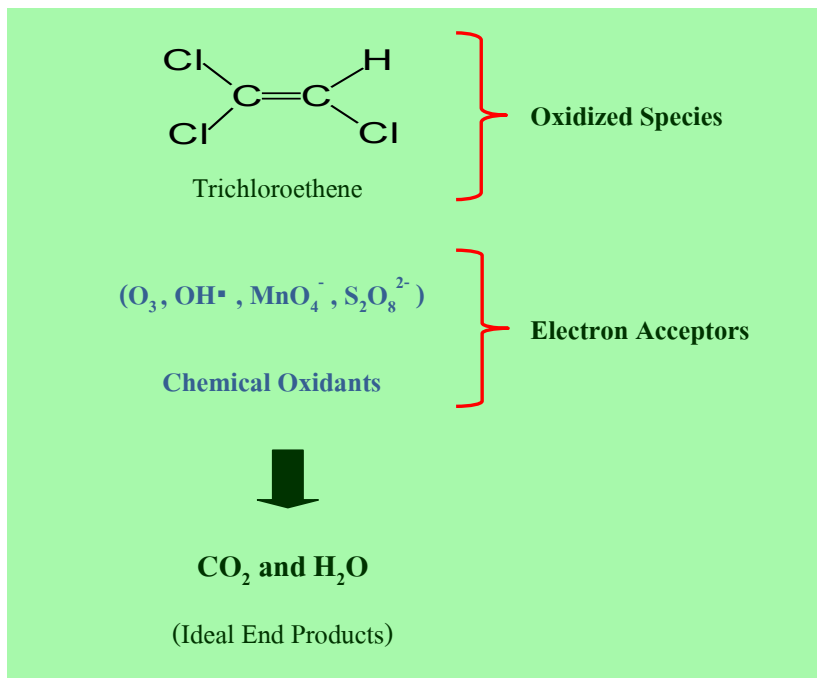


ภาพที่ 3 การฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนด้วยระบบการล้างดิน

ที่มา: United States Environment Protection Agency (2001) A Citizen's Guide to Soil Washing

7.1.3 การฟื้นฟูดินทางเคมีโดยใช้วิธีการ Oxidation-Reduction

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) เป็นกระบวนการลดพิษ (detoxify) ของสารปนเปื้อนโดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปของสารที่มีพิษน้อยลง เช่น การใช้สาร oxidizing agent ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โอโซน (O_3) เปอร์แมงกานेट (MnO_4^-) เปอร์ซัลเฟต ($S_2O_8^{2-}$) และคลอรีน เป็นต้น เนื่องจากสารเคมีกลุ่มนี้เป็นสารเคมีที่หาง่าย ความเป็นพิษต่ำเมื่อเทียบกับสารออกซิแดนท์ประเภทอื่น และง่ายต่อการใช้งาน เพื่อมาทำลายโครงสร้างของสารปนเปื้อนอินทรีย์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมทั้งในพื้นที่ (*in situ* chemical oxidation, ISCO) และกระบวนการ advanced oxidation process (AOP) อาทิเช่น เฟนตอนออกซิเดชัน (fenton oxidation) การใช้โอโซน การใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกานेट ($KMnO_4$) และ Activated sodium persulfate ($Na_2S_2O_8$) ดังแสดงในภาพที่ 4



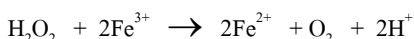
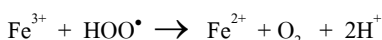
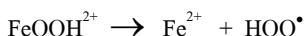
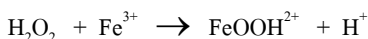
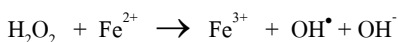
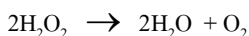
ภาพที่ 4 การบำบัดสารปนเปื้อนโดยใช้สารออกซิแดนต์

อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารออกซิแดนต์ในการฟื้นฟูดินต้องคำนึงถึงชนิดของสารปนเปื้อน ความสะดวกและความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน เป็นสำคัญ

1) H_2O_2 and Fenton oxidation

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิแดนต์ที่มีความรุนแรงในการย่อยสลายสารปนเปื้อน เมื่อการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกเร่งปฏิกิริยาโดยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ที่เป็นโลหะทรานซิชัน เช่น เหล็ก (Fe^{2+}) หรือ ทองแดง (Cu^{2+}) ในสภาวะกรดที่มี pH อยู่ในช่วง 3-4 จากปฏิกิริยาดังกล่าว ผลผลิตที่ได้คือ ไฮดรอกซิลแรดิคัล (hydroxyl radicals, OH^\bullet) โดย OH^\bullet จะเป็นสารออกซิแดนต์ที่มีความรุนแรงและเกิดปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน ทำให้สารปนเปื้อนเกิดการสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว ตัวอย่างสารปนเปื้อนที่ OH^\bullet สามารถทำการบำบัดได้เช่น TCE, PCE, PAHs, PCBs, และ chlorinated dioxins เป็นต้น (Watt, 1997) โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการ

Metal



2) Fenton reagent

การใช้ Fenton reagent ในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมในพื้นที่นั้น สำหรับดินทำได้โดยการเติม H_2O_2 ลงสู่ดินที่มีการปนเปื้อน โดยโลหะทรานซิชันที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Fenton oxidation นั้น จะมีอยู่แล้วในดิน แต่อาจจะอยู่ในรูปของออกไซด์ หรือไฮดรอกไซด์ Teel *et al.* (2001) พบว่า iron oxy-hydroxide เช่น goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Fenton oxidation ในการฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อน TCE ได้ อย่างไรก็ตามการที่จะให้ประสิทธิภาพของการฟื้นฟูดินด้วย Fenton oxidation ให้ได้ผลดีที่สุด ดินจะต้องถูกปรับ pH ให้เหมาะสม

3) เปอร์แมงกานेटไอออน (MnO_4^-)

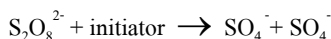
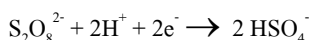
การใช้เปอร์แมงกานेटไอออน (MnO_4^-) เป็นตัวออกซิแดนต์ที่สามารถใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินหลายประเภท อาทิเช่น chlorinated ethenes, phenols, sulfides, organosulfur compound, และ double bond non aromatic organic compound ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและรวดเร็ว สำหรับ fuel, aromatic organic compound (เช่น benzene), chloromethanes (เช่น carbon tetrachloride) และ methyl-tert-butyl ether (MTBE) ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้เปอร์แมงกานेटไอออนในการบำบัด โดยถ้าเปรียบเทียบกับสารออกซิแดนต์อื่นเช่น H_2O_2 โอโซน หรือที่ใช้ในกระบวนการ Chemical oxidation ในการบำบัดสารปนเปื้อนแล้ว เปอร์แมงกานेटไอออนจะให้ค่า reaction rate ที่ต่ำกว่า และมีความเฉพาะเจาะจงกับสารปนเปื้อนมากกว่า

4) โอโซน (O₃)

การใช้โอโซน (O₃) อยู่ในสถานะแก๊สที่สามารถผลิตได้จากอากาศหรือแก๊สออกซิเจนในพื้นที่ที่ตั้งใจจะใช้ได้ โอโซนเป็นหนึ่งในตัวออกซิเดนต์ที่มีความรุนแรงและย่อยสลายสารอินทรีย์บางชนิด โดยเฉพาะพวก PAHs ได้ดีกว่า OH[•] โดยโครงสร้างของโอโซนอาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Zwitter ion กล่าวคือในตัวโมเลกุลของโอโซนเองไม่มีประจุเป็นกลาง แต่แบกรับประจุบวกและลบไว้บนโครงสร้างโมเลกุล

5) Activated sodiumpersulfate (Na₂S₂O₈)

การใช้ Activated sodiumpersulfate (Na₂S₂O₈) แอนไอออนเปอร์ซัลเฟต (S₂O₈) เป็นสารออกซิเดนต์ที่สำคัญในการบำบัดสารปนเปื้อนในดิน เช่น chlorinated alkenes, chlorinated alkanes, BTEX, PAHs, Freon, PCBs, di/tri-chlorobenzene และ MTBE โดยปฏิกิริยาของเปอร์ซัลเฟตดังสมการ



แนวทางการฟื้นฟูดินโดยวิธี Chemical oxidation นั้นสามารถทำการฟื้นฟูได้สองระดับคือ การปนเปื้อนดินระดับตื้น (top soil) จากผิวดินจนถึงความลึกประมาณไม่เกิน 20 เซนติเมตร สามารถทำได้โดยการนำสารออกซิเดนต์ และตัวเร่งปฏิกิริยาใส่และคลุกคล้ากับดินปนเปื้อนได้โดยตรง ดังแสดงในภาพที่ 5 อย่างไรก็ตาม ผู้ปฏิบัติงานควรคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้สารเคมี อาทิเช่น เครื่องแต่งกายป้องกันและแว่นตา เพื่อป้องกันอันตรายจากการใช้สารเคมี สำหรับการปนเปื้อนในระดับลึกที่อาจเกิดจากการรั่วไหลของถังบรรจุสารเคมีใต้ดิน (understorage tank) ต้องทำการศึกษาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในพื้นที่ก่อน จากนั้นสามารถทำการขุดและฉีด (inject) สารออกซิเดนต์ลงไปในพื้นที่ปนเปื้อนได้ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 การฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยใช้ sodium persulfate

ที่มา: http://www.clu-in.org/athens/download/Organic_Contaminants/US-Robert_Siegrist.pdf

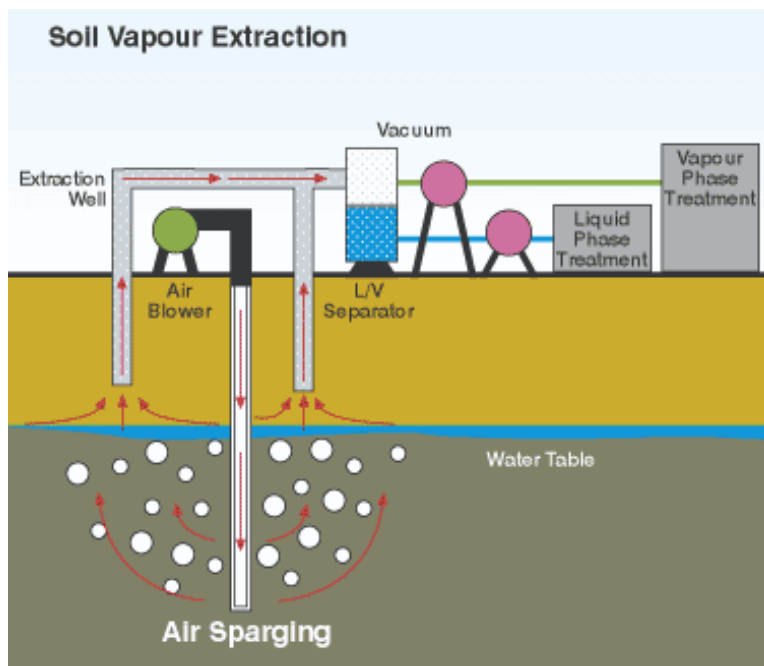


ภาพที่ 6 การขุดและฉีด (inject) สารออกซิเจนลงไปใน subsurface

ที่มา: Enviro Engineering Solutions (2011)

7.1.4 กระบวนการสกัดไอ (Soil Vapor Extraction; SVE)

Soil Vapor Extraction (SVE) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารมลพิษที่มีคุณสมบัติในการระเหย โดยเฉพาะสารระเหยอินทรีย์ (volatile organic compounds, VOCs) และสารอินทรีย์ระเหยบางส่วน (semi-volatile organic compounds, semi VOCs) และสารไฮโดรคาร์บอน พวกน้ำมันเชื้อเพลิง หรือน้ำมันดิบ โดยใช้ vacuum pump ทำการดูดอากาศผ่านบ่อสกัดไอ (extraction well) แล้วดูดไอของสารปนเปื้อนขึ้นมาผ่านระบบบำบัดอากาศเสียที่ตั้งอยู่ด้านบน หรือบางส่วนจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยดินที่ปนเปื้อนจะต้องมีค่าการซึมผ่าน (k) มากกว่า 10^{-8} cm² ซึ่งเนื้อดินควรเป็นดินร่วน หรือดินร่วนปนทราย มีช่องว่างระหว่างอนุภาคดินสูงจะทำให้อากาศไหลผ่านได้เป็นอย่างดี และดินควรมีค่าความชื้น (moisture content) ต่ำ เนื่องจากน้ำจะไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินทำให้การไหลของอากาศลดลง



ภาพที่ 7 การฟื้นฟูดินด้วยวิธี Soil Vapor Extraction (SVE)

ที่มา: Mel Environmental Solution (2006)

7.2 การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Bioremediation)

เทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

in situ technology เป็นเทคโนโลยีการฟื้นฟูโดยการบำบัดสารเคมีที่ปนเปื้อนในพื้นที่โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายตัวกลางไปที่อื่น

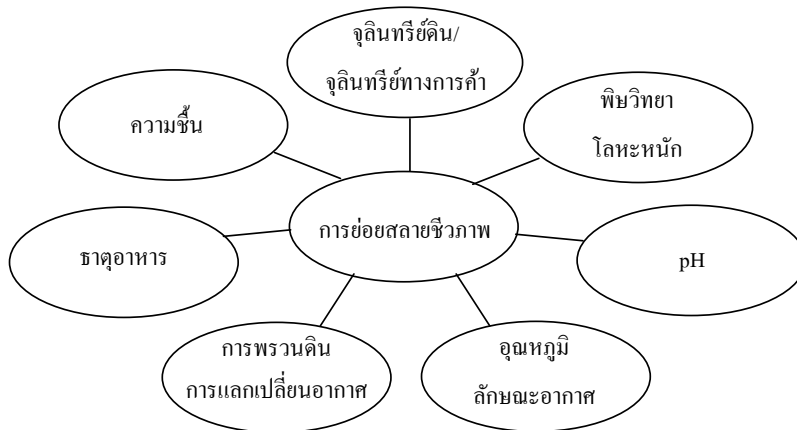
ex situ technology เป็นเทคโนโลยีการฟื้นฟูโดยการเคลื่อนย้ายตัวกลางที่ปนเปื้อนไปบำบัดหรือกำจัดอยู่ในสถานที่อื่น

เทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กระบวนการย่อยสลายทางธรรมชาติของจุลินทรีย์ เพื่อลดความเป็นพิษของสารปนเปื้อนเช่นปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนหรือไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เป็นต้น จุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนพบได้ทั่วไปในธรรมชาติและก่อให้เกิดการฟื้นฟูด้วยธรรมชาติในพื้นที่ปนเปื้อนหลายพื้นที่ เทคโนโลยีการฟื้นฟูด้วยวิธีทางชีวภาพจะกระตุ้นและเร่งกระบวนการฟื้นฟูตามธรรมชาติโดยจัดให้มีธาตุอาหาร ออกซิเจนและสภาวะต่างๆที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ เทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพมักจะใช้ภายหลังจากการดำเนินการทางกลหรือทางเคมี แต่ก็สามารถใช้เป็นเทคโนโลยีหลักในการฟื้นฟูได้ถ้า ไม่มีการปนเปื้อนน้ำมันอิสระ และ พื้นที่ปนเปื้อนอยู่ห่างไกลและไม่มีควมจำเป็นเร่งด่วนในการฟื้นฟู

วิธีทางชีวภาพมีศักยภาพสูงในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเนื่องจากองค์ประกอบในน้ำมันส่วนใหญ่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ความสำเร็จของการฟื้นฟูจะขึ้นกับความสามารถในการ สร้างและรักษาสภาวะที่กระตุ้นอัตราการย่อยสลายในพื้นที่ปนเปื้อน (ภาพที่ 8) ซึ่งสามารถทำได้ 2 แนวทางคือ bioaugmentation หมายถึงการเติมจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารปนเปื้อนในกรณีที่จุลินทรีย์เริ่มต้นในดินมีน้อย และ biostimulation ซึ่งกระตุ้นการเจริญของจุลินทรีย์โดยการเติมธาตุอาหารหรือสารอื่นๆรวมทั้งการปรับสภาวะแวดล้อมต่างๆ การฟื้นฟูทางชีวภาพมีข้อได้เปรียบวิธีการอื่นคือเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเปลี่ยนสารปนเปื้อนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่เกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดคือการฟื้นฟูจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีจุลินทรีย์ที่เหมาะสมอยู่ในพื้นที่ในปริมาณที่เพียงพอภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมซึ่งปัจจัยต่างๆที่มีผลจะต้องได้รับการจำแนกอย่างถูกต้อง นอกจากนี้กระบวนการยังใช้เวลานานหลายสัปดาห์หรือหลายเดือนจึงไม่เหมาะถ้าต้องการฟื้นฟูเร่งด่วน ดังได้สรุปไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปข้อดี-ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพ

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ	1. กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพไม่สามารถเกิดขึ้นได้กับสารทุกชนิด
2. สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์	2. สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลาย อาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้
3. กระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นสมบูรณ์ได้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลผลิต	3. ต้องการสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งเป็นลักษณะที่ค่อนข้างมีความจำเพาะเจาะจงสูง
4. สามารถทำการฟื้นฟูในพื้นที่จริงได้	4. ใช้เวลานาน
5. ค่าใช้จ่ายน้อย	
6. เป็นที่ยอมรับของสาธารณชน	



ภาพที่ 8 ปัจจัยที่ต้องการประเมินในการดำเนินการฟื้นฟูด้วยวิธีทางชีวภาพ
ที่มา: คัดแปลงจาก Aerobic biodegradation of oily wastes, US EPA (2003)

ขั้นตอนในการเลือกและประยุกต์วิธีทางชีวภาพในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนมีลำดับขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งขั้นตอนหลักต่างๆประกอบด้วย

1) การประเมินก่อนบำบัด

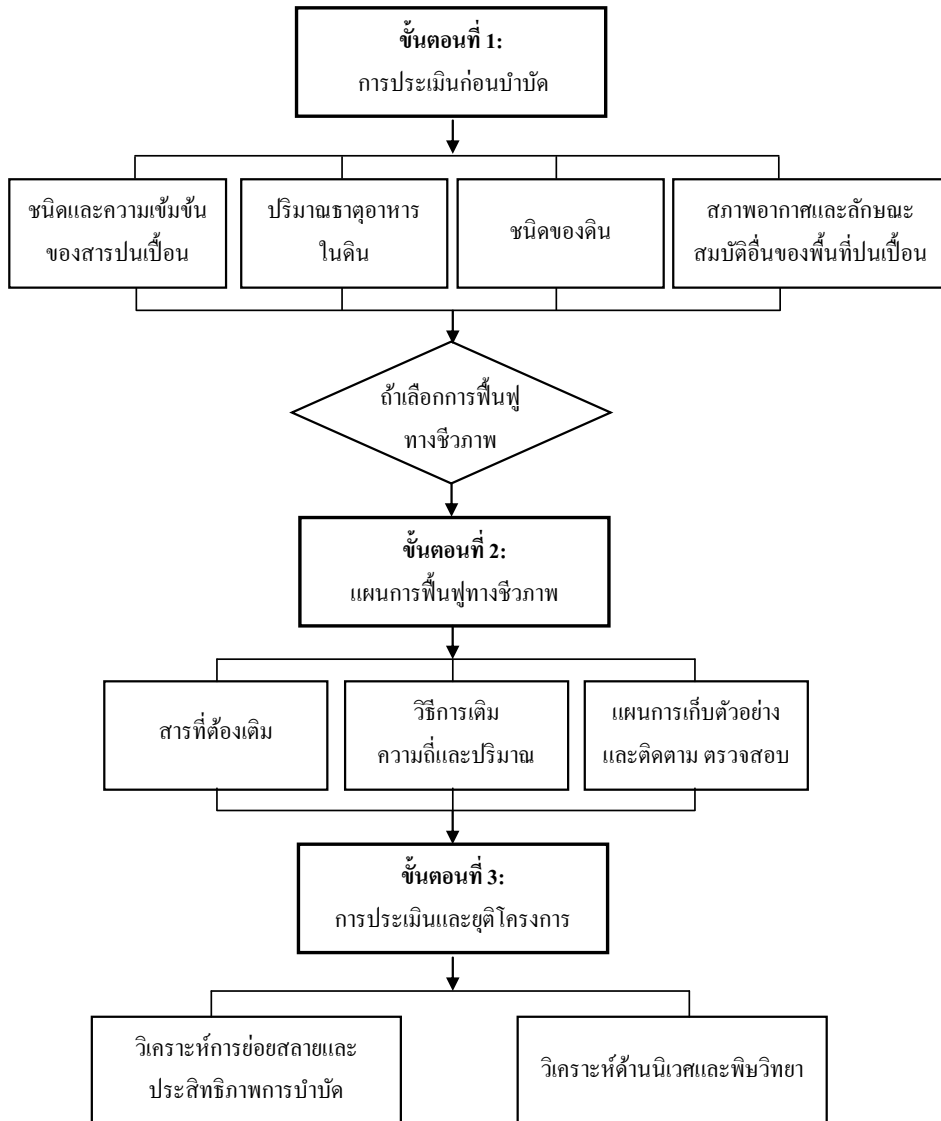
เป็นการประเมินความเป็นไปได้ของการฟื้นฟูด้วยวิธีทางชีวภาพ ประกอบด้วยชนิดของสารปนเปื้อน ความเข้มข้นสารปนเปื้อน จำนวนของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน ปริมาณธาตุอาหารในดิน ชนิดของดินที่ปนเปื้อนและสภาวะแวดล้อมอื่นๆ (เช่น pH อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณออกซิเจน ที่ตั้งของพื้นที่ปนเปื้อน เป็นต้น)

2) การออกแบบระบบและแผนการติดตามตรวจสอบ

หลังจากมีการเลือกใช้วิธีทางชีวภาพในการฟื้นฟูก็จะต้องมีการประเมินละเอียด ออกแบบและวางแผนก่อนดำเนินการจริง ในขั้นนี้ประกอบด้วยทางเลือกวิธีที่เหมาะสม การศึกษาปัจจัยจำกัด แนวทางการดำเนินการ เป้าหมายการฟื้นฟูและระยะเวลาดำเนินการ การวางแผนการเก็บตัวอย่างและการติดตามตรวจสอบ ซึ่งต้องติดตามตรวจสอบทั้งประสิทธิภาพการฟื้นฟูและผลของการฟื้นฟูต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

3) การประเมินและสิ้นสุดโครงการ

หลังจากดำเนินการฟื้นฟูตามแผนที่ได้วางไว้แล้วจึงต้องมีการประเมินประสิทธิภาพการฟื้นฟู สิ้นสุดโครงการที่เหมาะสมซึ่งต้องประเมินทั้งด้านเคมี พืชวิทยาและนิเวศวิทยา



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการคัดเลือกและประยุกต์ใช้การฟื้นฟูด้วยวิธีทางชีวภาพ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Guidelines for the bioremediation of marine shorelines and freshwater wetlands (2001)

7.2.1 Landfarming

Landfarming เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับคความนิยมและสามารถฟื้นฟูดินปนเปื้อนไฮโดรคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจัดเป็นการบำบัดด้วยผืนดิน (land treatment) ดินที่ปนเปื้อนที่ถูกขุดขึ้นมาจะถูกนำมาแผ่ลงบนพื้นที่ที่เตรียมไว้ (*ex situ*) แล้วกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินโดยการให้อากาศ บางครั้งมีการเติมแร่ธาตุ ธาตุอาหารและความชื้นร่วมด้วย ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารปนเปื้อนที่ปนเปื้อนในดิน ถ้าการปนเปื้อนในดินไม่ลึกมากมีความเป็นไปได้ที่จะทำการฟื้นฟูโดยไม่ต้องขุดดินออกมา (*in situ*) แนวทางการประเมินการใช้ Landfarming สามารถใช้ checklist ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 10 กระบวนการ Landfarming ในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน
ที่มา: <http://www.etecllc.com/landfarming-bioremediation.asp>

เทคโนโลยี Landfarming มีความเหมาะสมที่จะใช้ในสภาวะดังนี้

- มีพื้นที่กว้าง
- น้ำใต้ดินอยู่ลึกหรือสามารถสร้างโครงสร้างป้องกันน้ำใต้ดินได้ง่าย
- ความเข้มข้น Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) เริ่มต้นต่ำกว่า 5%
- ไม่มีความจำเป็นเร่งด่วนในการฟื้นฟู



ตัวอย่าง CHECKLIST สำหรับการประเมินการใช้ LAND FARMING ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนน้ำมัน

ข้อมูลเบื้องต้น			
มีการควบคุมจุดกำเนิดการปนเปื้อน	<input type="checkbox"/> ใช่	<input type="checkbox"/> ไม่ใช่	
ระดับความเข้มข้น	[TPH]=	[Metals]=	[others]=
ระดับการปนเปื้อนที่ยอมรับได้			
ความเข้มข้นต่ำกว่าระดับการปนเปื้อนที่ยอมรับได้หรือไม่?	<input type="checkbox"/> ใช่		<input type="checkbox"/> ไม่ใช่
ข้อมูลอื่นๆที่ปรากฏ	<input type="checkbox"/> Rocky land?	<input type="checkbox"/> Flood plains?	<input type="checkbox"/> High mineral deposit? <input type="checkbox"/> [TPH] >5%
คุณลักษณะของดิน			
ชนิดดิน	Sand <input type="checkbox"/> Clay <input type="checkbox"/>		
ความชื้น	ค่าที่ต้องการ <5%	ค่าที่ตรวจวัดได้	%
ความชื้น	ค่าที่ต้องการ 50-70%	ค่าที่ตรวจวัดได้	%
pH	ค่าที่ต้องการ 6-8 unit	ค่าที่ตรวจวัดได้	Units
ความเค็ม	ค่าที่ต้องการ EC < 1dS/m	ค่าที่ตรวจวัดได้	dS/m
CEC	ค่าที่ต้องการ 5-25 meq/100 g soil	ค่าที่ตรวจวัดได้	Meq/100 g
โลหะ	มากกว่าค่าที่มีอยู่ในพื้นที่ ที่มีความธรรมชาติ	<input type="checkbox"/> ใช่	<input type="checkbox"/> ไม่ใช่
ความหนาแน่นจุลินทรีย์ชนิด	ค่าที่ต้องการ ช่วง $10^5 - 10^6$ bacteria per gram	ค่าที่ตรวจวัดได้	
ต้องการจุลินทรีย์เพิ่มเติม?	<input type="checkbox"/> ใช่	<input type="checkbox"/> ไม่ใช่	
คุณลักษณะปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน			
API gravity	ค่าที่ตรวจวัดได้		API < 20, ไม่เหมาะที่จะใช้การฟื้นฟูด้วยวิธีทางชีวภาพ
ปริมาณซัลเฟอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้		
ผลการศึกษาการบำบัดเบื้องต้น	การลดความเข้มข้นที่เหมาะสม: 20-60% ในเวลา 3-6 สัปดาห์	การบำบัด	%
		ระยะเวลา	สัปดาห์
ความลึกของการปนเปื้อน	<input type="checkbox"/> < 1 foot	<input type="checkbox"/> In-situ	<input type="checkbox"/> > 1 foot <input type="checkbox"/> Ex-situ
การออกแบบ land treatment unit	<input type="checkbox"/> Berms?	<input type="checkbox"/> Liner?	<input type="checkbox"/> Irrigation? <input type="checkbox"/> อื่นๆ
อุณหภูมิ	ค่าที่ตรวจวัดได้	°C	อุณหภูมิ < 8 °C ไม่เหมาะที่จะใช้การฟื้นฟูด้วยวิธีทางชีวภาพ
TPH Loading			%
ตัวแปรใน Landfarming			
ธาตุอาหาร (C:N:P:K)	ค่าที่ต้องการ 100:5:1:1	:	:
อุณหภูมิ	ค่าที่ต้องการ 75-95 °F		°F
ความชื้น	ค่าที่ต้องการ 50-70%		%
pH	ค่าที่ต้องการ 6-8 units		Units

ที่มา: ดัดแปลงจาก Aerobic biodegradation of oily wastes: A field guidance book for federal on-scene coordinators, US EPA (2003)

7.2.2 Composting

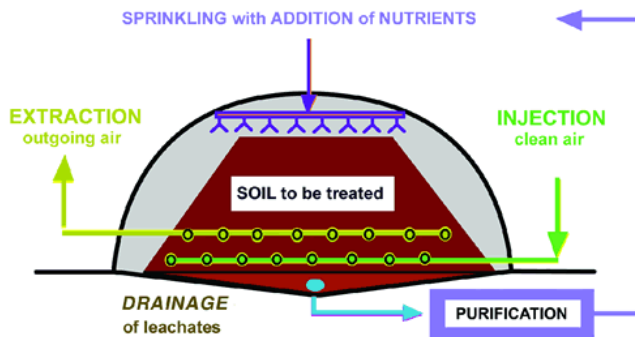
เป็นการนำดินปนเปื้อนที่ถูกขุดออกมาผสมกับ bulking agents และ อินทรีย์วัตถุ เช่น ขี้เลื่อย มูลสัตว์ ซากพืช เป็นต้น อินทรีย์วัตถุที่เติมลงไปจะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของประชากรจุลินทรีย์ โดยทั่วไปการนำดินปนเปื้อนสารอินทรีย์อันตรายมาหมักเป็นปุ๋ยต้องรักษาสภาวะอุณหภูมิสูงไว้ (thermophilic conditions, 54 - 65 °C) โดยอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลจากความร้อนที่เกิดจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์ ส่วนใหญ่กระบวนการนี้สามารถทำได้โดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงสุดในสภาวะการให้อากาศ

เทคโนโลยี composting มีความเหมาะสมที่จะใช้ในสภาวะดังนี้

- มีพื้นที่จำกัด
- สภาพอากาศไม่เหมาะสม (ฤดูฝน อุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่จุลินทรีย์จะทำงานได้)
- ดินไม่เหมาะสม (เป็นกรวดทราย ดินเป็นก้อน)
- มีความจำเป็นต้องฟื้นฟูดินปริมาณมากในระยะเวลาจำกัด
- ความเข้มข้น Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) สูงมาก
- ต้องการควบคุมสารระเหยง่าย

7.2.3 Biopile

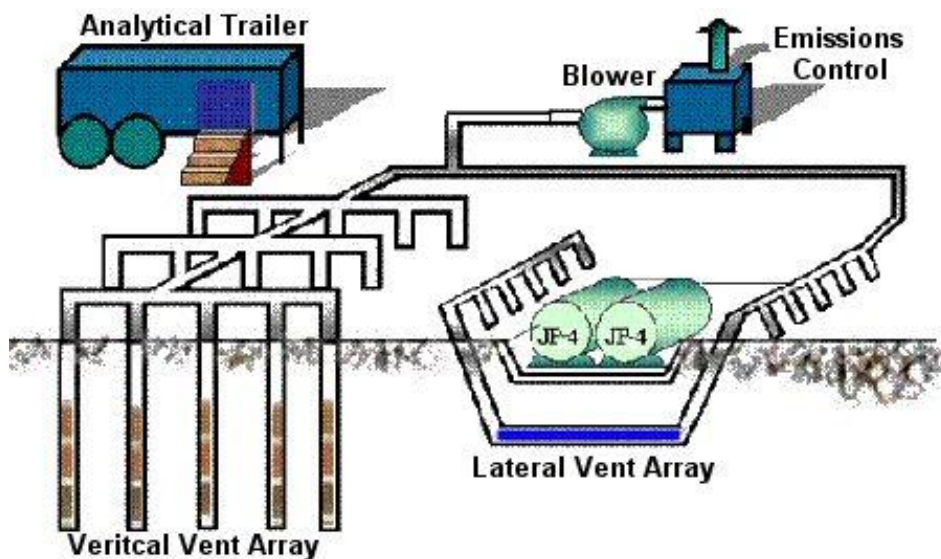
เป็นเทคโนโลยีที่นำดินปนเปื้อนมากองเป็นชั้นๆ ในโครงสร้างที่มีระบบป้องกันการแพร่กระจายสารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม กองดินมักมีระบบกระจายอากาศอยู่ข้างใต้เพื่อให้อากาศแก่กองดิน อาจจะเป็นแบบสุญญากาศหรือแบบให้อากาศ กองดินควรมีความสูงไม่เกิน 2-3 เมตร ควรควบคุมความชื้น ความร้อน ธาตุอาหาร ออกซิเจนและความเป็นกรดต่าง



ภาพที่ 11 กระบวนการ *ex situ* biopile ในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน
ที่มา: <http://www.cedre.fr/project/erocips/wp23/gb/trait/trait.htm> และ
http://www.excaliburgrpllc.com/proj_eng%20&%20rem.htm

7.2.4 Bioventing

เป็นเทคโนโลยีที่ดำเนินการในพื้นที่โดยการเติมอากาศและสารอาหารลงไปในระบบ ซึ่งการเติมอากาศของ bioventing จะเป็นการเติมในอัตราที่ช้าไม่มีการเพิ่มแรงดัน เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอต่อการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์เท่านั้น การให้อากาศจะช่วยให้สารปนเปื้อนระเหยออกมาด้วย ซึ่งก็จะถูกย่อยสลายต่อไป เมื่อไอระเหยเคลื่อนที่ไปในดินที่มีกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์



ภาพที่ 12 กระบวนการ bioventing ในการฟื้นฟู unsaturated zone ที่ปนเปื้อน
ที่มา: [http://www.afce.af.mil/resources/technologytransfer/programsandinitiatives/sourcezonetreatment/
background/bioventing-biosp/index.asp](http://www.afce.af.mil/resources/technologytransfer/programsandinitiatives/sourcezonetreatment/background/bioventing-biosp/index.asp)

7.3 การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยใช้พืช (Phytoremediation)

เป็นการใช้พืชในการบำบัดสารปนเปื้อนในบริเวณพื้นที่ปนเปื้อน เพื่อลดอันตรายของสารปนเปื้อนต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อน ทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่ำ และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลาง ดิน น้ำหรือ อากาศ ซึ่งการบำบัดนี้อาศัย ประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษลดลง

คุณสมบัติของพืชที่เหมาะสมต่อการทำ Phytoremediation

- มีความทนทานต่อสารพิษที่ปนเปื้อนในพื้นที่
- เป็นพืชที่ง่ายต่อการปลูกและดูแลรักษา
- มีการเจริญเติบโตเร็ว
- มีวงจรชีวิตสั้น
- ขยายพันธุ์หรือสืบพันธุ์ได้ในอัตราสูง
- มีปริมาณของมวลชีวภาพมาก
- มีการสะสมสารพิษหรือโลหะหนักที่ระดับสูง

สิ่งที่สำคัญของการฟื้นฟูสารปนเปื้อนโดยใช้พืชบำบัด คือ ขั้นตอนการเลือกใช้พืชเพื่อฟื้นฟูสารปนเปื้อนในบริเวณพื้นที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้ยังต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของสารปนเปื้อนที่จะทำฟื้นฟูในตัวกลางนั้นๆ และปัจจัยร่วมอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเพื่อช่วยให้การฟื้นฟูมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ เคมี และ ชีววิทยา ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้ฟื้นฟูสารปนเปื้อนโดยอาศัยหลักเกณฑ์การพิจารณาสิ่งที่มีอยู่แล้วในระบบธรรมชาติเพื่อฟื้นฟูสารปนเปื้อน ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนในการฟื้นฟูสารปนเปื้อน

ระยะเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูโดยใช้พืช นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดและปริมาณของพืชที่เลือกใช้ ชนิดและปริมาณของสารปนเปื้อนที่ปนเปื้อน ความกว้างและความลึกของพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน และชนิดของดิน นอกจากนี้ข้อควรระวังในการใช้พืช คือ หากพืชที่ปลูกไว้ ได้รับความเสียหายหรือถูกสัตว์ทำลาย ต้องมีการปลูกพืชซ้ำซึ่งจะทำให้ระยะเวลาให้การดำเนินการนานมากขึ้น โดยปกติแล้วการใช้กระบวนการฟื้นฟูด้วยพืชจะใช้เวลานานเป็นปี

การใช้พืชฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนในพื้นที่ (*in-situ*) เป็นการพึ่งพาลิ่งที่มีอยู่เดิมในธรรมชาติ จึงทำให้มีต้นทุนต่ำ มีประสิทธิภาพดี สามารถบำบัดได้ในพื้นที่กว้าง ไม่ทำลายคุณสมบัติทางกายภาพรวมไปถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน ช่วยลดการกระจายของสารปนเปื้อน สามารถนำโลหะที่มีค่ากลับมาใช้ใหม่ เป็นการวางแผนการฟื้นฟูดินปนเปื้อนอย่างยั่งยืน ประเภทของการกระบวนการ Phytoremediation สามารถจำแนกได้เป็น

7.3.1 Phytoextraction หรือ Phytoaccumulation

เป็นการใช้พืชที่มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักจากดินเพื่อเข้ามาสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยโลหะหนักจะเคลื่อนย้ายผ่านทางระบบรากและไปสะสมในส่วนเหนือดินของพืช พืชที่มีคุณสมบัติสะสมโลหะหนักมากกว่าพืชชนิดอื่นจะเรียกว่า phytoaccumulator การเก็บเกี่ยวส่วนของพืชออกจากพื้นที่เป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักออกจากดินได้

7.3.2 Rhizofiltration

เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการดูดซับ หรือ กรอง สารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปสารละลายรอบ ๆ บริเวณรากพืช เข้าไปในรากพืช ส่วนมากมักใช้กับการกำจัดสารปนเปื้อนที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น น้ำใต้ดิน และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ เนื่องจากเฉพาะส่วนของรากพืชเท่านั้นที่มีการสะสมมลพิษ ซึ่งส่วนนี้จำเป็นต้องอาศัยขั้นตอนอื่นมาบำบัดต่อไป ส่วนของใบ และ ลำต้นที่ไม่มีสารปนเปื้อน หลังจากการเก็บเกี่ยว ก็จะทิ้งไปหรือนำไปทำประโยชน์อย่างอื่นได้ ขึ้นกับชนิดของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด เช่น พืชบางชนิดมีดอกที่สวยงาม จึงสามารถเก็บดอกไปขายในช่วงเวลาระหว่างการบำบัดได้อีกด้วย

7.3.3 Phytostabilization

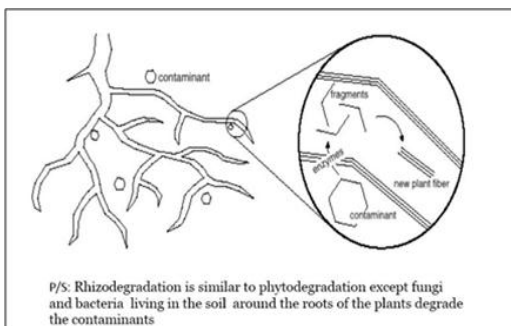
เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการจำกัดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดิน หรือ ในน้ำใต้ดิน โดยผ่านกระบวนการดูดซับ (sorption) การตกตะกอน (precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน (complexation) และการรีดิวซ์เวเลนซ์โลหะ (metal valence reduction) สารปนเปื้อนจะถูกเก็บสะสมอยู่ที่บริเวณเนื้อเยื่อพืชและสะสมที่บริเวณดินรอบ ๆ รากทำให้ไม่สามารถละลายน้ำ หรือ เคลื่อนที่ได้ ช่วยลดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน ไม่ให้ไปสู่ น้ำใต้ดิน และระเหยสู่บรรยากาศ ช่วยลดโอกาสที่สารปนเปื้อนจะเข้าไปปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร

7.3.4 Phytodegradation หรือ Phytotransformation

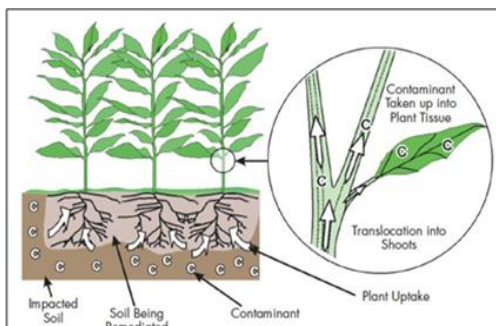
กระบวนการนี้เป็นการสลายพิษของสารปนเปื้อน โดยอาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของพืช หรือ อาศัยสารประกอบที่ปล่อยออกมาจากรากพืช เช่น เอนไซม์ เพื่อย่อยสลายพิษของสารปนเปื้อนที่ปนเปื้อนในดิน โดยสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนจะถูกย่อยสลายให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง และ สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกรวมเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชเพื่อใช้เสริมสร้างเซลล์พืช และ ใช้ในการเจริญเติบโต พืชมีเอนไซม์ที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมีได้ โดยเอนไซม์แต่ละชนิดสามารถสลายพิษของสารประกอบได้อย่างหลากหลาย ได้แก่ สารละลายสารประกอบที่มีองค์ประกอบของคลอรีน เช่น TCE และ สารกำจัดศัตรูพืช รวมทั้งของเสียจากวัฏจักรเบ็ด เป็นต้น

7.3.5 Phytovolatilization

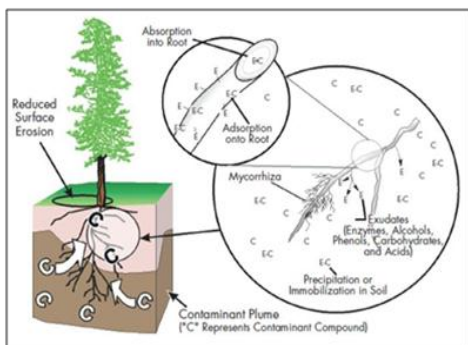
กระบวนการนี้เป็นการใช้พืชเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่สามารถละลายน้ำได้ และเคลื่อนย้ายสารเหล่านั้นออกสู่บรรยากาศ เป็นการกำจัดสารที่ปนเปื้อนออกจากน้ำ โดยพืชจะดูดซับสารปนเปื้อน แล้วด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในต้นพืชเองได้ทำการเปลี่ยนรูปสารปนเปื้อน (transformation) ให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้และมีความเป็นพิษลดลงจากเดิม หลังจากนั้น สารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปที่ระเหยได้ จะถูกกำจัดออกโดยผ่านทางใบพืช โดยพืชแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการก่อให้เกิดการระเหยของสารปนเปื้อนแตกต่างกัน เช่น ต้น poplar tree มีประสิทธิภาพในการบำบัดสาร TCE ที่ปนเปื้อนในน้ำผ่านกระบวนการระเหยได้สูงถึง 90% ของปริมาณ TCE ทั้งหมดที่สะสมในพืช



Phytodegradation



Phytoextraction


























Phytostabilization



Phytovolatilization

ภาพที่ 13 กระบวนการบำบัดโดยใช้พืช

ที่มา: <http://www.biology-online.org>

CONTAMINANT		TYPICAL PLANTS			
As	Arsenic	 Chinese Brake Fern <i>Pteris vittata L.</i>	 Sunflower <i>Helianthus annuus</i>	 Highland Bent Grass <i>Agrostis castellana</i>	
Cr	Chromium	 Alpine Pennycress <i>Thlaspi caerulescens</i>		 Giant Duckweed <i>Spirodela polyrrhiza</i>	
Pb	Lead	 Blue Sheep Fescue <i>Festuca ovina</i>	 Indian mustard <i>Brassica juncea L.</i>	 Common Wheat <i>Triticum estivum</i>	
Hg	Mercury			 Common Ragweed <i>Brassica oleracea</i>	
PCB	Polychlorinated biphenyls	 Paul's Scarlet Rose <i>Rosa</i>	 Zucchini <i>Curcubita pepo</i>		
TCE	Trichloroethylene	 Willow Salix	 Pine <i>Pinus</i>	 Eastern cottonwoods <i>Populus deltoides</i>	
MTBE	Methyl tertiary butyl ether				
DDT	Dichlorophenyltrichloroethane	 White rot fungus <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	 Pumpkin <i>Curcubita</i>		
PCP	Pentachloropheno			 Crested Wheatgrass <i>Agropyron cristatum</i>	

ภาพที่ 14 ตัวอย่างทางเลือกของการใช้พืชฟื้นฟูดินปนเปื้อน

ที่มา: <http://urbanomnibus.net> (2009)

ตารางที่ 3 สรุปข้อดี-ข้อจำกัดแนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อน

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อจำกัด	ประมาณค่าใช้จ่าย
การฟื้นฟูโดยวิธีทางกายภาพ/เคมี			
Chemical Oxidation	-สามารถกำจัดและลดความเข้มข้นของมลพิษได้อย่างรวดเร็ว -ใช้ระยะเวลาสั้น	-ต้องมีการดูแลสารเคมีที่ใช้เนื่องจากเป็นสารอันตราย -มลพิษบางตัวไม่ถูกออกซิไดซ์ จึงกำจัดไม่ได้โดยวิธีนี้	-ไม่สามารถประมาณการค่าใช้จ่ายได้เนื่องจากปริมาณ และสารที่เลือกใช้ นั้นขึ้นอยู่กับชนิดมลพิษ
Solidification/Stabilization	-สามารถใช้ได้กับมลพิษเกือบทุกประเภท -ลดการเคลื่อนตัวของมลพิษจากดินลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินมากกว่า 95%	-ไม่สามารถใช้ได้ถ้าดินปนเปื้อนอยู่ในระดับลึกมาก (เกิน 6 เมตร) -การผสมสารปรับเสถียรในพื้นที่จะไม่สะดวกเท่ากับการทำนอกพื้นที่ -ดินในสภาพเสถียรและแข็งตัว อาจใช้ทำประโยชน์ในอนาคตไม่ได้ -อาจขัดขวางการเติมน้ำ (Dewatering) ในชั้นน้ำด้านล่าง	-ค่าใช้จ่ายประมาณ 50-80 USD/ดิน 1 ลบ.ม. (กรณีเป็นดินระดับตื้น) -ค่าใช้จ่ายประมาณ 190-330 USD/ดิน 1 ลบ.ม. (กรณีดินปนเปื้อนอยู่ลึก)
Electrokinetic Separation	-กำจัดหรือลดมลพิษได้รวดเร็ว -ใช้ระยะเวลาสั้น -สามารถนำสารมาแยกและนำกลับมาใช้ใหม่ได้	-ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดอยู่ในช่วงที่ดินหรือของเสียที่มีความชื้นประมาณ 14-18% เท่านั้น -ประสิทธิภาพต่ำในสภาวะที่ pH ของดินเป็นกรดหรือด่างมาก -การเกิดปฏิกิริยาจากวิธีนี้อาจได้แก๊สพิษ เช่น แก๊สคลอรีน	-ค่าใช้จ่ายมาจากกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และมีค่าใช้จ่ายประมาณ 117 USD/ดิน 1 ลบ.ม.



เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อจำกัด	ประมาณค่าใช้จ่าย
Soil Flushing	<ul style="list-style-type: none">-ใช้ได้กับมลพิษในหลายกลุ่มรวมถึงกลุ่มสารกัมมันตรังสี-กรณีเป็นมลพิษประเภทน้ำมันหรือของเสียปิโตรเลียมสามารถเข้ากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้-สารลดแรงตึงผิวที่เติมเพื่อเพิ่มการละลายโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารประเภท Nontoxic จึงมีผลกระทบต่อหากหลงเหลือในดิน-ค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ	<ul style="list-style-type: none">-ไม่เหมาะกับดินที่มีการซึมต่ำ-สารลดแรงตึงผิวในบางครั้งจะดูดซับบนผิวดินและลด Effective Soil Porosity-อาจมีปฏิกริยาระหว่างสารเติมในน้ำชะกากและการเคลื่อนที่ของมลพิษ-ต้องมีระบบการบำบัดในขั้นตอนต่อไปสำหรับน้ำชะกากที่แยกออกมาจากดินปนเปื้อน	<ul style="list-style-type: none">-ค่าใช้จ่ายจะขึ้นกับสององค์ประกอบหลัก คือการซึมของดิน และความลึกของชั้นน้ำใต้ดิน-สำหรับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดเล็กอยู่ในระหว่าง 42-64 USD ต่อดิน 1 ลบ.ม.-สำหรับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 24-35 USD ต่อดิน 1 ลบ.ม.
การฟื้นฟูโดยวิธีทางชีวภาพ			
Bioventing	<ul style="list-style-type: none">-ใช้ได้กับดินปนเปื้อนน้ำมันที่ไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ สารปราบศัตรูพืช และสารอินทรีย์อื่นๆ	<ul style="list-style-type: none">-มีข้อจำกัดในการใช้กับดินที่มีความชื้นต่ำ-ไม่เหมาะสมกับดินที่มีความชื้นต่ำและมีระดับน้ำใต้ดินลึกมาก-ต้องมีขั้นตอนในการตรวจสอบไอระเหยและบำบัดมลพิษที่หลุดออกมา-ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงที่มีอุณหภูมิต่ำ	<ul style="list-style-type: none">-ค่าใช้จ่ายจะขึ้นกับสององค์ประกอบหลักคือลักษณะของดินและพื้นที่ผิวของดินที่ปนเปื้อน-สำหรับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดเล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 928-970 USD ต่อดิน 1 ลบ.ม.-สำหรับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 79-109 USD ต่อดิน 1 ลบ.ม.

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อจำกัด	ประมาณค่าใช้จ่าย
Enhanced Bioremediation	-เป็นระบบที่ทำให้สมบูรณ์ในพื้นที่ โดยไม่ต้องมีการนำมลพิษไปบำบัดเพิ่มเติมอีก	-องค์ประกอบรวมในดินอาจยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ -ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงที่อุณหภูมิต่ำ -โลหะหนักและสารปนเปื้อนบางประเภทอาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ -ระยะเวลาในการบำบัดนาน	-ค่าใช้จ่ายจะขึ้นกับคุณลักษณะของดิน ประเภทของมลพิษ และระดับของความเข้มข้น โดยค่าใช้จ่ายประมาณการอยู่ในช่วงระหว่าง 30-100 USD ต่อดิน 1 ลบ.ม.
Phytoremediation	-ใช้ได้กับมลพิษหลายกลุ่ม รวมถึงพวกโลหะหนัก สารปราบศัตรูพืช น้ำมัน และน้ำชะจากจากหลุมฝังกลบ	-กำจัดมลพิษในดินที่ปนเปื้อนได้ไม่ลึกจากผิวดิน (อยู่ในระยะรากพืช) -ไม่เหมาะกับพื้นที่ปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงเพราะมลพิษอาจเป็นพิษต่อพืช -ความเป็นพิษ และ วิธีการย่อยสลายสำหรับสารอินทรีย์บางตัวยังไม่มีรายงานการศึกษาย่างชัดเจน -ผลผลิตที่ได้อาจเคลื่อนที่และปนเปื้อนสู่ชั้นน้ำใต้ดิน	-ค่าใช้จ่ายสำหรับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดเล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 626-2,322 USD ต่อดิน 1 ลบ.ม. -ค่าใช้จ่ายสำหรับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 147-483 USD ต่อดิน 1 ลบ.ม.

ที่มา: คัดแปลงจากคู่มือแนวทางปฏิบัติที่ดีด้านสิ่งแวดล้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

8. การประยุกต์ใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรม

จากการศึกษาพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง และพื้นที่ลัดลอบทิ้งกาก ของเสีย พร้อมทั้งสุ่มเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์เบื้องต้นและศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการ จำนวน 3 แห่ง นั้น ผลวิเคราะห์ตรวจพบว่ามีสารปนเปื้อนประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและสารโลหะหนัก ซึ่งจากการศึกษาทบทวนเทคนิคการฟื้นฟูด่างๆ เมื่อเกิดการปนเปื้อนในดินแล้ว อาจเลือกใช้เทคนิคการฟื้นฟูดินที่เหมาะสมกับสถานการณ์นั้นๆ ได้หลายวิธี เช่น ใช้วิธีทางกายภาพ-เคมีเพียงอย่างเดียว หรือการใช้วิธีการอื่นๆ ร่วมด้วยหลังการฟื้นฟูด่างด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมีเพื่อลดความเข้มข้นลงให้เหมาะสมกับวิธีการในลำดับต่อไป

8.1 กรณีศึกษาฟื้นฟูดินปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี

การศึกษาพบว่า วิธีทางกายภาพ-เคมี มีความเหมาะสมฟื้นฟูดินปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าวิธีอื่น โดยผลจากการศึกษา ในระดับห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าวิธีทางกายภาพ-เคมี สามารถฟื้นฟูดินที่มีความเข้มข้นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูงให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูด่าง และใช้ระยะเวลาในการฟื้นฟูด่าง ในที่นี้ศึกษาสองวิธีคือ วิธีการล้างดิน และวิธีการออกซิเดชันทางเคมี การล้างดินทำได้โดยการนำดินปนเปื้อนมาฟื้นฟูด่างด้วยวิธีการล้างดินด้วยตัวทำละลาย (น้ำ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1% (w/v) กรดไนตริก (HNO₃) ความเข้มข้น 0.1% (v/v) และน้ำสบู่ความเข้มข้น 10% (w/v) นำดิน 1 ส่วนต่อตัวทำละลาย 2 ส่วน เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 180 ต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพ 5-36 % ต่อการล้างดิน 1 รอบ และต้องใช้ตัวทำละลายในปริมาณมากเพื่อให้ดินมีประสิทธิภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้ ซึ่งการใช้ตัวทำละลายที่ค่อนข้างมาก จะก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณ 600 – 2,600 ลิตรต่อดิน 100 กิโลกรัม จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการบำบัดน้ำเสียมากด้วยเช่นกัน

สำหรับการฟื้นฟูดินปนเปื้อนด้วยวิธีออกซิเดชันทางเคมี โดยเปรียบเทียบการใช้ เฟนตอนออกซิเดชัน (10-35% (v/v) H₂O₂) โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (100 – 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (1000-100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยการทดลองใน soil slurry ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนรอบที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า การใช้เฟนตอนออกซิเดชัน และการใช้โซเดียมเปอร์ซัลเฟตให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูด่างถึง 90 % ดีกว่าการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้มีความเข้มข้นสูงถึง 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีสีเป็นสีม่วงจึงทำให้ตกค้างอยู่ในดินหลังจากการฟื้นฟูด่าง อีกทั้งแมงกานีสไอออนยังพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและจุลินทรีย์ในดินอีกด้วย และเมื่อได้วิธีการที่ดีที่สุดจึงทดลองนำไปทำกับ soil incubation พบว่าให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูด่างไม่

แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อนำเทคนิคเหล่านี้ไปใช้ในพื้นที่จริงผลของการฟื้นฟูอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมต่างๆ

นอกจากนี้ การฟื้นฟูดินปนเปื้อน โดยวิธีทางกายภาพ-เคมี นั้นยังสามารถทำการประยุกต์ไปใช้ฟื้นฟูได้ในสองระดับคือ กรณีเกิดการปนเปื้อนดินระดับต้น (top soil) และกรณีที่เกิดการปนเปื้อนในดินระดับลึกที่อาจเกิดจากการรั่วไหลของถังบรรจุสารเคมีใต้ดิน (understorage tank) ได้ด้วย

8.2 กรณีศึกษาฟื้นฟูดินปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยวิธีชีวภาพ

เมื่อศึกษาศักยภาพการฟื้นฟูดินปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความเข้มข้นต่ำ (TPH < 350 mg/kg) ด้วยวิธีทางชีวภาพและทำการประเมินเบื้องต้น โดยวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพ เคมีและชีวภาพของดินปนเปื้อน พบว่าดินปนเปื้อนมีดินเหนียวเป็นองค์ประกอบ 41% pH เป็นกลาง ความชื้น 12% มีธาตุอาหารมาก แต่ไม่พบไนเตรดซึ่งสามารถทำน้ำที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน นอกจากนี้ยังพบว่ามีโลหะหนักปนเปื้อน มีความหนาแน่นจุลินทรีย์ดิน 3.4×10^5 CFUต่อกรัม แสดงว่ากิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินปนเปื้อนเกิดขึ้นในระดับปกติแม้ว่าจะมีความชื้นที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญและมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก จึงทำการเตรียมสภาวะจำลองศึกษาที่ความชื้นช่วง 20-80% โดยทดลองในรูปแบบของระบบนิเวศจำลอง (microcosms) 2 สภาวะหลักได้แก่สภาวะที่ถ่ายเทอากาศจำกัดและสภาวะที่มีการถ่ายเทอากาศได้ดี สภาวะที่ถ่ายเทอากาศจำกัดเป็นการจำลองสภาวะในธรรมชาติเนื่องจากการถ่ายเทอากาศจากบรรยากาศสู่ใต้ผิวดินจะเป็นไปอย่างจำกัดและที่ใต้ผิวดินไม่เหมือนดินเมตรอาจเกิดเป็นสภาวะไร้ออกซิเจนได้ ในการทดลองนี้จึงได้เติมไนเตรดและ ซัลเฟตซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเสริมที่นิยมใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ลงไปด้วย ส่วนสภาวะถ่ายเทอากาศได้ดีเป็นการจำลองเทคโนโลยี *in situ* landfarming ที่ใช้ฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนที่ระดับความลึกไม่เกิน 1 เมตร โดยทำการไถพรวนเพื่อเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดินโดยไม่ดักดินออกจากพื้นที่ ในสภาวะการทดลองที่การถ่ายเทอากาศเป็นไปได้ดีพบว่าไม่สามารถกระตุ้นการกำจัดไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในดินได้ การปรับความชื้นในช่วง 60-80%และเติมตัวรับอิเล็กตรอนเพิ่มสามารถกระตุ้นการกำจัดไฮโดรคาร์บอนในสภาวะออกซิเจนจำกัด โดยสามารถกำจัดไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนได้จนมีความเข้มข้นต่ำกว่า ความสามารถที่จะตรวจวัดได้ ภายในระยะเวลา 4 สัปดาห์

8.3 กรณีศึกษาฟื้นฟูดินปนเปื้อนสารโลหะหนักโดยใช้พืช

จากการศึกษาการฟื้นฟูดินปนเปื้อนสารโลหะหนักโดยใช้พืชในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดินตัวอย่างที่มีคุณลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย มีอนุภาคดินเหนียว 26.67 % อินทรีย์วัตถุ 6.93 % CEC 21.67 cmol.kg^{-1} pH 7.1 โดยบรรจุดินตัวอย่างในกระถางๆ ละ 10 กิโลกรัม โรยเมล็ดพันธุ์พืช 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวฟ่าง ทานตะวัน และดาวเรือง รดน้ำทุกวันตลอดระยะเวลาการปลูก หลังการปลูก 8 สัปดาห์ มีเพียงต้นข้าวฟ่างเท่านั้นที่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ เมื่อนำลำต้น รากและดินไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก พบว่า

(1) แคลเดียมมีการสะสมทั้งในส่วนของราก ลำต้นและใบ เมื่อนำมาคำนวณค่า transfer factor (TF) ได้ค่า TF ของแคลเดียมเท่ากับ 1.55

(2) สารหนูมีการสะสมอยู่เฉพาะในส่วนของราก เมื่อนำมาคำนวณค่า transfer factor (TF) ได้ค่า TF ของสารหนูเท่ากับ 0.11

(3) การลดลงของโลหะหนักทั้งสองชนิดคือ แคลเดียมและสารหนู เมื่อคำนวณเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ปนเปื้อนในดิน แคลเดียมมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 80.68 % สารหนูมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 46.59 %

8.4 สรุปผล

1) วิธีการฟื้นฟูทางกายภาพและเคมีเหมาะสมกับการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนความเข้มข้นสูง แต่อย่างไรก็ตามในการฟื้นฟูโดยวิธีการล้างดินจะทำให้เกิดน้ำเสียเพิ่มขึ้น

2) วิธีการฟื้นฟูด้วยพืชเหมาะสมกับการฟื้นฟูดินปนเปื้อนสารโลหะหนัก ที่มีอยู่ร่วมกับสารปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยปรับสภาพแวดล้อมให้อีกกับการฟื้นฟูด้วยวิธีทางชีวภาพไปพร้อมกันด้วย แล้วทำการประเมินความเข้มข้นปนเปื้อนเป็นระยะๆ ซึ่งหลังการฟื้นฟูด้วยพืชสิ้นสุดลง ถ้ามีความจำเป็นต้องฟื้นฟูสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกจึงดำเนินการฟื้นฟูโดยวิธีทางชีวภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

จันทน์ แจ่มแสงทอง. 2553. การบำบัดสารปนเปื้อนโดยใช้เทคโนโลยี phytoremediation.

แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104v.html>, 5 มกราคม 2553.

พันธุวิศ สัมพันธ์พานิช. 2009. Phytoremediation. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

(อัครสำเนา)

ส่วนมลพิษดิน สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือแนวทางปฏิบัติที่ดีด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนดินและน้ำใต้ดินสำหรับสถานประกอบการหลุมฝังกลบของเสียอันตราย. หน้า 79-80.

Baker, K. H. and D. S. Herson. 1994. Introduction and overview of bioremediation. In Bioremediation.

Edited by Katherine H. Baker and Diane S.Herson. McGraw-Hill, New York. 1-7.

Boopathy, R. 2000. Factors limiting bioremediation technologies: Review. Bioresource Technology 74:

63-67.

Browen, H.J.M. 1979. Environmental Chemistry of the Elements. Academic, London New York Toronto.

Iwasaki, H. 2001. Action to Remediation of Soil contamination (1) Heavy metals

http://www.apec-vc.or.jp/e/modules/tinyd00/index.php?id=30&kh_open_cid_00=5

Matheson, L. J and P. G Tratnyek. 1994. Reductive dehalogenation of chlorinated methane by iron metal.

Environmental Science and Technology 28: 2045-2053.

Muhammad, N. B.Y., N.B.M. Intan, B. B. Nuradliza, J. S. Yeow and B. M. A. Hanafi. 2008.

Phytoremediation. <http://www.biology-online.org/articles/phytoremediation-a-lecture/phytoextraction.html>

Nyer, E. K., and B. Morello. 1993. Trichloroethylene remediation and treatment. Ground water

Monit. & Remed. 13: 98-103.

Siegrist, R. L. 2006. Site remediation using chemical oxidation technologies,

http://www.cluin.org/athens/download/Organic_Contaminants/US-Robert_Siegrist.pdf



- Teel, A. L., C. R. Warberg, D. A. Atkinson, and R. J. Watts. 2001. Comparison of mineral and soluble iron Fenton's catalyst for the treatment of trichloroethylene, *Water Res.* 35: 977-984.
- United States Environment Protection Agency. 2001. A Citizen's Guide to Phytoremediation.
<http://clu-in.org/download/citizens/citphyto.pdf>
- United States Environment Protection Agency. 2001. Guidelines for the bioremediation of marine shorelines and freshwater wetlands.
- United States Environment Protection Agency. 2001. A Citizen's Guide to Soil Washing. EPA. 542-F-01-008 document.
- United States Environment Protection Agency. 2003. Aerobic biodegradation of oily wastes. A field guidance book for federal on-scene coordinators.
- Ure, A.M. and Berrow M.L. 1982. The chemical constituents of soils, pp. 94 -202. In H.J.M.
- Vidali, M. 2001. An Overview of Bioremediation. *Appl Chem.* 73(7): 1163-1172 .
- Watt, J. R. 1997. Hazardous wastes: sources, pathways, receptors. John Wiley&Son, Inc., New York.
- http://fabricarchitecturemag.com/articles/0708_iaa9_cap.html
- <http://www.afcee.af.mil/resources/technologytransfer/programsandinitiatives/sourcezonetreatment/background/bioventing-biosp/index.asp>
- <http://www.alphaenvironmental.net>
- <http://www.cedre.fr/project/erocips/wp23/gb/trait/trait.htm>
- http://www.clu-in.org/athens/download/Organic_Contaminants/US-Robert_Siegrist.pdf
- <http://www.corrlog.com/images/p1010035.JPG>
- http://www.cranetechnik.com/images/1155805544/P1000618_resize.JPG
- http://www.dem.ri.gov/programs/director/emeresp/pictures/industrial_accidents/slides/ia12.html
- <http://www.etecllc.com/landfarming-bioremediation.asp>
- http://www.excaliburgprllc.com/proj_eng%20&%20rem.htm
- <http://www.melltd.com/nhvsoil.htm> (2006)
- <http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104v.html>



ส่วนมลพิษดิน สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน

กรมโรงงานอุตสาหกรรม

<http://www.diw.go.th>

โทรศัพท์ 0 2202 4135 โทรสาร 0 2202 4170

