

เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและตะกอนลำน้ำ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กทม. 10330

E-mail: thares.s@chula.ac.th

การฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ การปนเปื้อนที่อยู่บนดินและการปนเปื้อนเมื่อตกลงสู่แหล่งน้ำและทำให้ตะกอนในลำน้ำเกิดการปนเปื้อน โดยมีเทคโนโลยีในการฟื้นฟูดังนี้

1. เทคโนโลยีการฟื้นฟูดิน

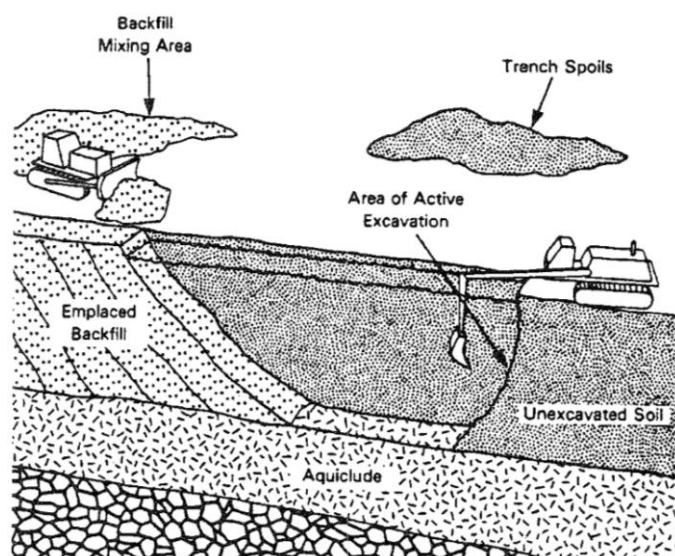
เทคโนโลยีในการฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนสารโลหะหนัก As, Cd, Cr, Hg, and Pb มีดังนี้ (US.EPA, 1997; Ravi Naidua, 2012; กรมควบคุมมลพิษ, 2556; สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

1) Monitored Natural Attenuation (MNA)

Monitored Natural Attenuation (MNA) เป็นเทคนิคการปล่อยให้เกิดการย่อยสลายเองตามธรรมชาติ โดยการติดตามตรวจวัดเป็นระยะ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการบำบัดอาจขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สภาพแวดล้อม ปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อน เป็นต้น

2) การขุด/ตักดินไปฟื้นฟู (Excavation)

เป็นการฟื้นฟูดินปนเปื้อนที่สามารถทำได้ทั้งในดินที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงหรือต่ำโดยการตักดินที่ปนเปื้อนออกไปนอกพื้นที่ (Ex-situ) นำไปเข้าเตาเผาหรือผ่านขั้นตอนการทำให้เสถียรก่อนนำไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบของเสียอันตราย (รูปที่ 1)



ที่มา : Sharma, H.D., and Reddy, K.R. 2004

รูปที่ 1 การขุด/ตักดินไปฟื้นฟู

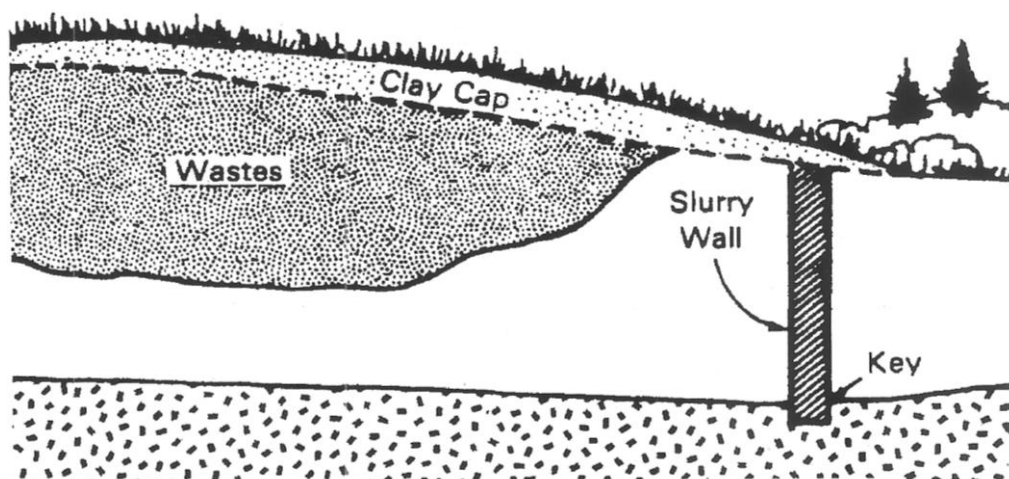
3) การปิดคลุม

การปิดคลุมหรือการคลุม (Capping) เป็นการปกปิดวัสดุที่ปนเปื้อนเช่นหลุมฝังกลบหรือดินที่ปนเปื้อน การคลุมไม่ได้เป็นการทำลายหรือขนย้ายสารปนเปื้อน แต่เป็นการแยกเก็บไว้ไม่ให้เกิดการปนเปื้อนแพร่กระจาย และป้องกันไม่ให้เกิดการสัมผัสสารปนเปื้อน

หลักการทำงาน การคลุมเป็นการแยกและป้องกันการกระจายจากหลายสาเหตุเช่น

- ป้องกันฝนไม่ให้ซึมเข้าไปชะล้างสารปนเปื้อนออกมาปนเปื้อนน้ำใต้ดิน
- ป้องกันไม่ให้น้ำฝนพัดพาสารปนเปื้อนออกนอกพื้นที่หรือลงสู่ทะเลสาบและแม่น้ำ
- ป้องกันไม่ให้ลมพัดพาสารปนเปื้อนออกนอกพื้นที่
- ป้องกันก๊าซประเภทระเหยง่ายที่ผลิตและปล่อยออกมาจากการระเหย
- ป้องกันประชาชนและสัตว์ป่าจากการเข้าไปสัมผัสสารอันตรายและสารปนเปื้อนติดออกไปนอกพื้นที่

การเลือกแบบที่ปกคลุมสำหรับพื้นที่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่นชนิดและความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ขนาดพื้นที่ ปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่และการใช้งานในอนาคต การก่อสร้างแผ่นคลุมอาจเป็นแบบง่ายๆ สำหรับดินที่ปนเปื้อนน้อย หรืออาจต้องใช้วัสดุหลายชั้นและหลายชนิดเพื่อจะกันของเสียที่มีการปนเปื้อนสูง หรือบางครั้งมีการทำกำแพงกันบริเวณที่มีการปิดคลุมเพื่อป้องกันการแพร่กระจายการปนเปื้อนด้วย (รูปที่ 2)



ที่มา : Sharma, H.D., and Reddy, K.R. 2004

รูปที่ 2 การปิดคลุมและทำกำแพงกัน

4) การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็งและการปรับเสถียร (Solidification and Stabilization)

การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็งและการปรับเสถียร (Solidification and Stabilization) คือวิธีการที่จะป้องกันหรือทำให้สารปนเปื้อนในดิน ตะกอนดิน หรือกากตะกอน (sludge) ปล่อยออกมาช้าลงวิธีเหล่านี้โดยปกติจะไม่ทำลายสารปนเปื้อนแต่เป็นการเก็บสารปนเปื้อนไม่ให้ชะล้างออกมาสู่สิ่งแวดล้อม

รอบๆ เกล็ดที่ปลดปล่อย การชะล้างเกิดขึ้นเมื่อน้ำจากน้ำฝนหรือแหล่งอื่นๆ ละลายสารปนเปื้อนและไหลไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ดิน ทะเลสาบและแม่น้ำ

Solidification คือ การตรึงของเสียไว้ในก้อนวัสดุที่เป็นของแข็งและยึดติดไว้กับที่ ประกอบด้วย การผสมสิ่งปนเปื้อนกับสารที่ทำหน้าที่จับสารปนเปื้อน ซึ่งเป็นสารที่ทำให้วัตถุที่จับกันหลวมๆ ติดกันแน่นขึ้น สารที่ทำหน้าที่ตรึงโดยทั่วไป เช่น ซีเมนต์ เถ้าลอยและดินเหนียวโดยต้องมีการผสมน้ำเพื่อจะให้มีการยึดจับ หลังจากนั้นจะปล่อยให้แห้งเพื่อให้ได้ก้อนที่แข็ง

ส่วน Stabilization คือ การทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งตรึงสารปนเปื้อนไม่ให้ชะล้างออกสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อยลง คล้ายๆ กับ Solidification ประกอบด้วย การผสมสิ่งปนเปื้อนกับน้ำและสารที่ทำหน้าที่ตรึง แต่สารที่ทำหน้าที่ตรึงในขณะเดียวกันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่จะทำให้สารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยลงไปด้วย

การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็งและการปรับเสถียร (Solidification and Stabilization) สามารถดำเนินการได้ทั้งในพื้นที่ (In-situ) และนอกพื้นที่ (Ex-situ)

การดำเนินการในพื้นที่ วิธีการประกอบด้วยขั้นตอนการเจาะบ่อหรือรูโดยใช้รถเจาะ กับเครื่องผสมหรือสว่านขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งเติมและผสมสารที่เติมเข้าไปกับสิ่งที่ปนเปื้อนบริเวณใต้ดิน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อนำดินปนเปื้อนโลหะหนักมาผสมกับน้ำและปูนขาว ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ สารที่เติมเข้าไปจะผสมกับสิ่งที่ปนเปื้อน ณ ที่ปนเปื้อน จำนวนของบ่อหรือรูขึ้นอยู่กับขนาดสว่านและพื้นที่ปนเปื้อน บางกรณีอาจจำเป็นต้องขุดบ่อหรือรูจำนวนมาก ถ้าหากสารปนเปื้อนพบในบริเวณพื้นจะขุดดินที่ปนเปื้อนขึ้นมาและผสมกับสารเติมแต่งเหนือพื้น (ณ ที่ปนเปื้อน) หรือใช้รถขุดเจาะที่เรียกว่า pug mills จะสามารถบดและผสมสิ่งปนเปื้อนได้ในเวลาเดียวกัน ทำให้สิ่งปนเปื้อนแข็งตัวหรือเสถียรบริเวณเหนือพื้น

การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็งและการปรับเสถียร (Solidification and Stabilization) มักจะใช้ควบคู่กันไปเพื่อป้องกันประชาชนและสัตว์ป่าจากการสัมผัสสารปนเปื้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากโลหะและกัมมันตภาพรังสี

ส่วนการดำเนินการนอกพื้นที่ ได้แก่ การขุดหรือตักดินที่ปนเปื้อนออกจากบริเวณพื้นที่ปนเปื้อน จากนั้นนำสารปนเปื้อนเข้าสู่กระบวนการการเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็งและการปรับเสถียร (Solidification and Stabilization) และนำไปฝังกลบยังหลุมฝังกลบที่ปลอดภัย

5) การล้างดิน (Soil Washing)

การล้างดิน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการชะดิน (soil washing) เป็นการนำดินที่มีการปนเปื้อนจากสารปนเปื้อนมาทำการล้างด้วยน้ำหรือสารละลาย อาทิเช่น สารลดแรงตึงผิว (surfactants) หรือสารละลายกรดอ่อน สารละลายด่างอ่อน เพื่อให้สารปนเปื้อนนั้นหลุดออกมาจากอนุภาคของดิน ซึ่งเป็นหนึ่งในการฟื้นฟูแบบ Ex-situ ระบบการล้างดินจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ คือ Scrubbing Unit และ Treatment Unit ดินที่มีการปนเปื้อนจะเข้าสู่ระบบ Scrubbing unit ซึ่งจะมีการเติมน้ำหรือสารละลาย โดยดูจากค่าความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อนนั้น โดยสารปนเปื้อนที่หลุดออกมาจากอนุภาคดินจะละลายอยู่ในส่วนของของเหลว จากนั้นของเหลวที่ผ่านระบบ Scrubbing Unit จะเข้าสู่ระบบ Treatment

Unit และทำการบำบัดสารปนเปื้อนตามวิธีการที่เหมาะสมต่อไป ส่วนดินที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นจะนำไปฝังกลบไว้ที่เดิม

6) จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic)

เป็นกระบวนการสกัดโลหะหนัก และ/หรือสารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ออกจากดินด้วยวิธีการทางไฟฟ้า โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางขั้วไฟฟ้า (electrodes) ซึ่งเป็นขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathode) โดยสารปนเปื้อนจะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าที่ได้มีการติดตั้งไว้

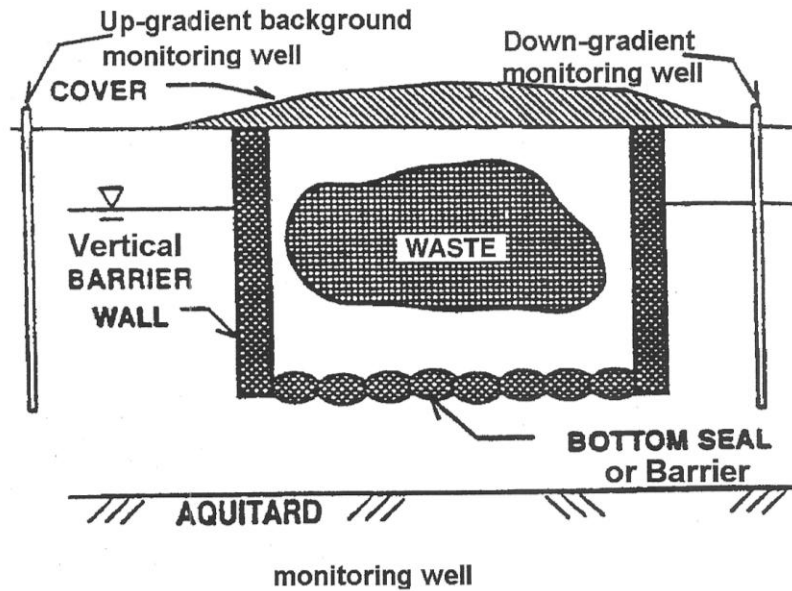
7) การสร้างกำแพงกัน (Vertical Engineering Barriers)

การสร้างกำแพงกัน (Vertical Engineering Barriers, VEB) คือ ผนังที่กั้นลงไปในดินเพื่อจะควบคุมการไหลของน้ำใต้ดิน VEB อาจใช้เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไม่ให้สัมผัสกับบ่อน้ำดื่ม พื้นที่ชุมชนน้ำ หรือแม่น้ำลำธาร หรืออาจใช้สำหรับการกักเก็บและแยกดินและน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไม่ให้ผสมกับน้ำใต้ดินที่สะอาด

VEB ทำจากวัสดุที่น้ำซึมผ่านไม่ได้หรือซึมผ่านได้น้อย ซึ่งหมายถึงการป้องกันหรือลดการไหลของน้ำและสารปนเปื้อนผ่านผนัง ผนังชนิดที่พบมากที่สุด คือ กำแพงทึบน้ำ (slurry wall) ก่อสร้างโดยขุดคูแคบๆ โดยทั่วไปกว้างประมาณ 2- 4 ฟุต (ประมาณ 60 – 120 เซนติเมตร) เติมวัสดุที่ใช้ทำกำแพงลงในหลุมซึ่งประกอบด้วยดินผสมน้ำและดินเหนียวสังเคราะห์ซึ่งนิยมใช้เบนโทไนท์ (bentonite) สาเหตุที่นิยมใช้เบนโทไนท์เพราะมีคุณสมบัติขยายตัวเมื่อเปียกน้ำจนปิดหลุมหรือคูที่ขุดไว้ โดยอาจมีการผสมซีเมนต์เพื่อให้กำแพงแข็งแรงขึ้น

VEB ยังสามารถสร้างโดยใช้แผ่นเหล็ก ไวนิล หรือวัสดุอื่นๆ ซ้อนกันแล้วใช้เครื่องมือตอกให้แผ่นวัสดุฝังลงไปในดิน ในพื้นที่ปนเปื้อนบางแห่ง สามารถก่อสร้าง VEB และตอกให้ลึกลงไปถึงชั้นของดินหรือหินที่น้ำซึมผ่านได้น้อย ทำให้ช่วยกักน้ำใต้ดินไม่ให้ซึมบริเวณด้านล่างของผนังออกไป อาจมีการติดตั้งแผ่นคลุมที่ด้านบนของ VEB เพื่อป้องกันความเสียหายจากยานพาหนะหรือกิจกรรมอื่นๆ

ถึงแม้ว่าจะมีการล้อมรอบโดย VEB น้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนอาจเกิดขึ้นในบริเวณอื่นหรืออาจไหลออกจากรูเล็กๆ ใน VEB ไปในบริเวณที่ยังไม่ปนเปื้อน ดังนั้นเพื่อป้องกันการปนเปื้อนบริเวณอื่นอีกอาจต้องมีการขุดบ่อนอกบริเวณเพื่อสูบน้ำที่ปนเปื้อนขึ้นมาบำบัด VEB รวมทั้งมีการติดตั้งบ่อตรวจสอบเพื่อตรวจสอบว่าพื้นที่ปนเปื้อนยังคงถูกแยกไว้และน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไม่กระจายออกมาปนเปื้อนบริเวณอื่น (รูปที่ 3)



ที่มา : Sharma, H.D., and Reddy, K.R. 2004

รูปที่ 3 การทำกำแพงกันและป้องกันการซึมด้านล่าง

8) การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยใช้พืช (Phytoremediation)

เป็นการใช้พืชในการบำบัดสารปนเปื้อนในบริเวณพื้นที่ปนเปื้อน เพื่อลดอันตรายของสารปนเปื้อนต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อน ทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่ำ และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลาง ดิน น้ำ หรืออากาศ ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืช ในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษลดลง

คุณสมบัติของพืชที่เหมาะสมต่อการทำ Phytoremediation มีดังนี้

- มีความทนทานต่อสารพิษที่ปนเปื้อนในพื้นที่
- เป็นพืชที่ง่ายต่อการปลูกและดูแลรักษา
- มีการเจริญเติบโตเร็ว
- มีวงจรชีวิตสั้น
- ขยายพันธุ์หรือสืบพันธุ์ได้ในอัตราสูง
- มีปริมาณของมวลชีวภาพมาก
- มีการสะสมของสารพิษหรือโลหะหนักที่ระดับสูง

2. เทคโนโลยีการฟื้นฟูตะกอน

จากคำแนะนำของ US.EPA. ซึ่งระบุไว้ใน Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites (US.EPA., 2005) ได้ให้นิยามของคำว่า ดินตะกอนปนเปื้อน (Contaminated sediment) ว่าหมายถึง ดิน ทราย สารอินทรีย์หรือแร่ธาตุอื่นๆ ที่สะสมอยู่ด้านล่างของลำน้ำและมีสารที่เป็นพิษหรืออันตรายปะปนอยู่ในระดับที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม

ในรายงานดังกล่าว US.EPA. ได้สรุปแนวทางแก้ไขสำหรับตะกอนปนเปื้อน เป็น 2 แนวทางหลัก คือ การแก้ไขในพื้นที่ (In-situ Approaches) และการแก้ไขนอกพื้นที่ (Ex-situ Approaches) รายละเอียดดังตารางที่ 1

โดยมีรายละเอียดของแต่ละวิธีการดังนี้

2.1 การฟื้นฟูโดยธรรมชาติพร้อมการติดตามตรวจสอบ (Monitored natural recovery, MNR)

การฟื้นฟูโดยธรรมชาติพร้อมการติดตามตรวจสอบ (Monitored Natural Recovery, MNR) เป็นวิธีการแก้ไขสำหรับดินตะกอนที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่อง โดยใช้กระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นที่จะมีการทำลายหรือลดประสิทธิภาพหรือความเป็นพิษของสารปนเปื้อนในตะกอน

MNR อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นเพื่อลดความเสี่ยงในผู้รับที่เป็นมนุษย์หรือระบบนิเวศ กระบวนการเหล่านี้รวมถึงกลไกทางกายภาพ ชีวภาพและทางเคมีที่ทำหน้าที่ร่วมกันเพื่อลดความเสี่ยงที่เกิดจากการปนเปื้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารปนเปื้อนและสภาพแวดล้อม กลไกที่เกิดขึ้น เช่น

- สารปนเปื้อนเปลี่ยนรูปเป็นสารที่มีพิษลดน้อยลงจากกระบวนการเปลี่ยนรูป เช่น การย่อยสลายทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามสารปนเปื้อนจำนวนมากไม่สามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกทำลายได้ง่าย
- การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ (bioavailability) ลดลงผ่านการดูดซึมหรือกระบวนการยึดติดของสารปนเปื้อนในตะกอน
- ระดับความเข้มข้นที่ได้รับ (exposure levels) จะลดลงโดยการลดลงของระดับความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในบริเวณใกล้เคียงผิวหน้าของบริเวณที่เกิดการตกตะกอนโดยการฝังหรือการผสมด้วยตะกอนที่สะอาด

ตารางที่ 1 แนวทางแก้ไขสำหรับตะกอนปนเปื้อน

การแก้ไขในพื้นที่ (In-situ Approaches)	การแก้ไขนอกพื้นที่ (Ex-situ Approaches)
1. การฟื้นฟูโดยธรรมชาติพร้อมการติดตามตรวจสอบ (Monitored Natural Recovery, MNR) - การแยกด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือกระบวนการอื่นๆ (Physical isolation or other processes) - การเปลี่ยนรูปหรือแยกตัวทางเคมี (Chemical transformation/sequestration) - การเปลี่ยนรูปหรือแยกตัวทางชีวภาพ (Biological transformation/sequestration)	1. การขุดลอก (Dredging) - การขุดลอกและขนส่งโดยใช้ระบบไฮดรอลิก เครื่องจักรกล หรือแบบผสมเพื่อนำตะกอนขึ้นฝั่ง (Hydraulic, mechanical, or combination/hybrid dredging and transport to shore) - การบำบัดตะกอนที่ขุดลอกและ/หรือน้ำที่สูบออก (Treatment of dredged sediment and/or removed water) - การกำจัดตะกอนที่ขุดลอกออกหรือการบำบัดเศษที่เหลือในพื้นที่ฝังกลบที่มีการป้องกันการซึม (Disposal of dredged sediment or treatment residuals in upland landfill, confined disposal facility, or other placement) - การถมกลับคืนบริเวณพื้นที่ที่ขุดลอกออกตามความจำเป็นหรือความเหมาะสม (Backfill of dredged area, as needed or appropriate)
2. การคลุมบริเวณแหล่งที่ปนเปื้อน (In-situ Capping) - การคลุมชั้นเดียวด้วยวัสดุที่เป็นเม็ด (Single-layer granular caps) - การคลุมหลายชั้นด้วยวัสดุที่เป็นเม็ด (Multi-layer granular caps) - การคลุมแบบผสมระหว่างวัสดุที่เป็นเม็ดและ Geotextile (Combination granular/geotextile caps)	
3. แนวทางผสม (Hybrid Approaches) - การแทนที่ด้วยชั้นทรายหรือวัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มการฟื้นฟูการสะสมตามธรรมชาติ (Thin layer placement of sand or other material to enhance recovery via natural deposition)	2. การขุด (Excavation) - คือการขุดลอกหลังการนำน้ำออก (Water diversion or dewatering) - การขุดตะกอนและการขนส่งเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการต่อไป (Excavation of sediment and transport to staging or processing)

ตารางที่ 1 แนวทางแก้ไขสำหรับตะกอนปนเปื้อน (ต่อ)

การแก้ไขในพื้นที่ (In-situ Approaches)	การแก้ไขนอกพื้นที่ (Ex-situ Approaches)
4. การควบคุมโดยหน่วยงานที่รับผิดชอบ (Institutional Controls) - ให้คำแนะนำในการบริโภคปลา (Fish consumption advisories) - การห้ามจำหน่ายปลา (Commercial fishing bans) - การเข้มงวดการใช้ลำน้ำหรือใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น การห้ามทอดสมอเรือ หรือทำให้น้ำขุ่นขึ้น หรือควบคุมการขุดลอก (Waterway or land use restrictions (e.g., no anchor or no wake zones, limitations on navigational dredging)) - ข้อตกลงในการบำรุงรักษาเขื่อนหรือโครงสร้างอื่นๆ ในลำน้ำ เช่น สะพาน ท่าเทียบเรือ (Dam or other structure maintenance agreements)	- การบำบัดตะกอนที่ขุดออก (Treatment of excavated sediment) - การกำจัดตะกอนที่ถูกขุดออกหรือการบำบัดเศษที่เหลือในในพื้นที่ฝังกลบที่มีการป้องกันการซึม (Disposal of excavated sediment or treatment residuals in upland landfill, confined disposal facility, or other placement) - การถมกลับคืนบริเวณพื้นที่ที่ขุดออกตามความจำเป็นหรือความเหมาะสม (Backfill of excavated area, as needed or appropriate)
5. การบำบัดในพื้นที่ (In-situ Treatment) - การปิดคลุม (Reactive caps) - สารเร่งปฏิกิริยา/เพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพ (Additives/enhanced biodegradation)	

ที่มา : US.EPA., 2005

จาก Presenter's Manual for Remediation of Contaminated Sediments ของ US.EPA. (US.EPA.) ได้ระบุข้อดีของการใช้ MNR คือ

- ไม่มีการรบกวนสังคมทางชีววิทยาในปัจจุบัน
- ไม่รบกวนสังคมมนุษย์โดยรอบ
- มีค่าใช้จ่ายการดำเนินงานที่ค่อนข้างต่ำ
- ไม่ต้องการพื้นที่ในการจัดการหรือรองรับตะกอนที่ถูกขุดออก
- ไม่ต้องการกำจัดหรือบำบัดนอกพื้นที่

ส่วนข้อจำกัดของการฟื้นฟูโดยธรรมชาติพร้อมการติดตามตรวจสอบ (Monitored natural recovery, MNR) คือ

- ใช้เวลาในการฟื้นฟูนานกว่าวิธีอื่นๆ
- ไม่สามารถระบุถึงประสิทธิภาพในการฟื้นฟูที่แน่ชัด
- จำเป็นต้องมีการติดตามตรวจสอบในระยะยาว
- เหตุการณ์ทางธรรมชาติ เช่น พายุ อาจทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนที่ปนเปื้อน
- กิจกรรมของมนุษย์ เช่น เรือ หรือการเดินลึยนํ้าอาจทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอน

โดยวิธี MNR เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมหรือระบบนิเวศที่มีความอ่อนไหวจากการทำให้ตะกอนฟุ้งกระจายจากกิจกรรมการนำสารปนเปื้อนออก (US.EPA, 2005)

ประเด็นสำคัญในการฟื้นฟูด้วยวิธีการ MNR ได้แก่ (US.EPA., <http://www.clu-in.org/download/contaminantfocus/sediments/Presenters-Manual-Dredging.pdf>.)

- ต้องมีการควบคุมที่แหล่งกำเนิดเพื่อป้องกันการปนเปื้อนซ้ำ
- MNR ไม่ใช่วิธีการที่ไม่มีดำเนินการ (no action) แต่เป็นวิธีการที่ต้องการการติดตามตรวจสอบอย่างระมัดระวังเพื่อติดตามผลของ MNR
- ชุมชนเป็นส่วนสำคัญในการตัดสินใจใช้ MNR
- MNR ประกอบด้วยกลไกทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมีที่ดำเนินการเพื่อลดความเสี่ยง
- การประเมิน MNR ต้องอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ของแต่ละพื้นที่จำนวนหลายๆ ปี
- ต้องมีมาตรการฉุกเฉินสำหรับรองรับกรณีมาตรการ MNR ไม่ประสบความสำเร็จในระยะเวลาที่กำหนด
- โดยทั่วไป MNR ควรใช้เป็นส่วนหนึ่งของวิธีการแก้ไขปัญหาและระมัดระวังการใช้มาตรการเดียวในการลดความเสี่ยง
- ต้องมีการใช้ความรู้ทางวิศวกรรมหรือทางเคมีเข้าช่วยประกอบกัน อาทิ การสร้างฝายชะลอตะกอน เพื่อลดการเดินทางของตะกอนหรือการใส่ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดักสารพิษในตะกอน เพื่อลดการกระจายหรือละลายออกมา เป็นต้น

2.2 การคลุมบริเวณแหล่งที่ปนเปื้อน (In-situ Capping)

วัตถุประสงค์ของการคลุมบริเวณที่แหล่งปนเปื้อน มี 2 ประการ ได้แก่

- เพื่อลดการสัมผัสของสิ่งมีชีวิตในน้ำกับสารปนเปื้อน
- เพื่อลดการฟุ้งกระจายของสารปนเปื้อนสู่ผิวน้ำเนื่องมาจากการขุดของสิ่งมีชีวิตหรือการปั่นป่วนของน้ำ

โดยปกติแล้ว วัสดุที่ใช้คลุมบริเวณแหล่งที่ปนเปื้อน ได้แก่ วัสดุที่เป็นเม็ด เช่น ตะกอนที่สะอาด ทราย หรือหิน รวมถึงวัสดุคลุมอื่นๆ ที่ถูกออกแบบขึ้นมา เช่น แผ่นใยสังเคราะห์ (geotextiles) หรือวัสดุที่ซึมผ่านไม่ได้ การออกแบบวัสดุคลุมจะขึ้นอยู่กับสารที่ปนเปื้อนและสภาพแวดล้อม โดยมีปัจจัยเบื้องต้นดังนี้ (US.EPA.)

- การแยกตะกอนที่ปนเปื้อนทางกายภาพเพื่อจะลดการสัมผัสโดยตรงและลดความสามารถในเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนไปยังพื้นผิวน้ำ
- รักษาเสถียรภาพของตะกอนที่ปนเปื้อนและป้องกันการกัดกร่อนของตะกอนและวัสดุคลุม และลดการแยกเป็นชั้นและการเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณอื่น
- การแยกตะกอนที่ปนเปื้อนทางเคมีเพื่อลดการละลายและคอนลอยด์ของสารปนเปื้อนสู่ทางน้ำ

1) องค์ประกอบการแยกทางกายภาพ (Physical Isolation Component)

เพื่อลดการสัมผัสระหว่างสารปนเปื้อนกับน้ำ วัสดุคลุมควรได้รับการออกแบบมาเพื่อแยกตะกอนที่ปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมทางน้ำ และเพื่อการป้องกันในระยะยาววัสดุที่ใช้คลุมต้องมีความหนาเพียงพอที่จะมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนที่ปนเปื้อนจากสิ่งมีชีวิตที่อาศัยหรือหาอาหารในน้ำ

การออกแบบองค์ประกอบของการคลุม จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ เช่น ระดับความลึกของน้ำ บริเวณที่เกิดการผสม (mixing zone) จำนวนและความหนาแน่นของสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมบางบริเวณที่มีสิ่งมีชีวิตทางน้ำที่มีพฤติกรรมการขุดลึกลงในดินตะกอน (เช่น กุ้งบางชนิด) อาศัยอยู่

2) องค์ประกอบการป้องกันเสถียรภาพ/การกัดกร่อน (Stabilization/Erosion Protection Component)

องค์ประกอบปัจจัยนี้เพื่อรักษาเสถียรภาพทั้งของวัสดุคลุมและตะกอนที่ปนเปื้อนในการแยกชั้นและการเคลื่อนที่จากบริเวณที่ถูกคลุม ส่วนการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับแรงเฉือนเนื่องจากแม่น้ำ คลื่น กระแสน้ำ กระแสคลื่น หรือความปั่นป่วนที่เกิดจากเรือ นอกจากนี้ยังมีประเด็นที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมอื่นๆ เช่น การคลุมตะกอนที่ปนเปื้อนที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงจะเกิดก๊าซจากการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจนเกิดขึ้นซึ่งจะทำให้การคลุมโดยใช้วัสดุที่มีการซึมผ่านต่ำยกตัวขึ้น

3) องค์ประกอบการแยกทางเคมี (Chemical Isolation Component)

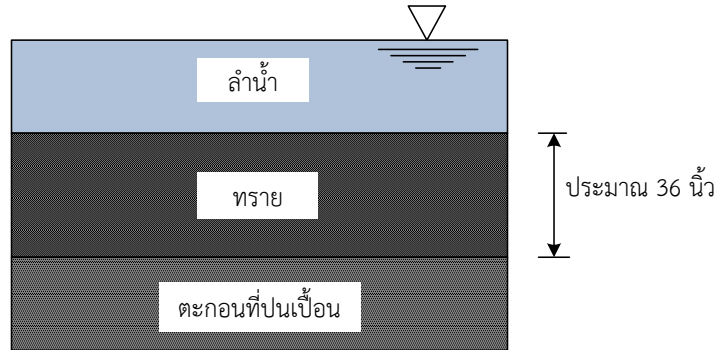
เมื่อมีการคลุมเป็นระยะเวลานาน สารปนเปื้อนสามารถละลายและเคลื่อนตัวตามแนวตั้งผ่านวัสดุคลุมได้เนื่องมาจากกระบวนการเคลื่อนตามแนวนอนของอากาศ (advection) และการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนโดยการแพร่กระจาย (diffusion) ของโมเลกุล

ในการออกแบบการคลุมบริเวณที่มีการปนเปื้อน ต้องมีการพิจารณาในประเด็นต่างๆ นอกเหนือจากองค์ประกอบข้างต้น เช่น

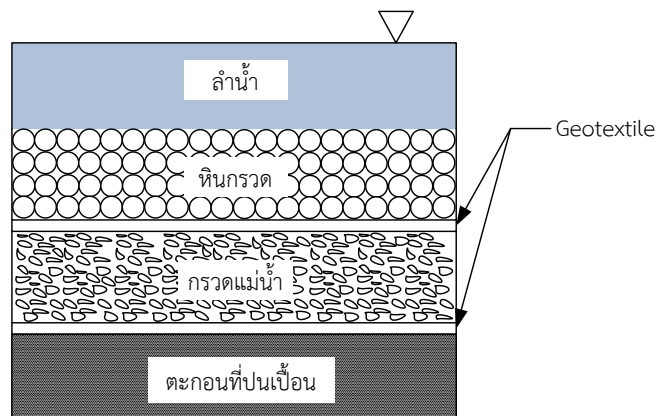
1) การจำแนกวัสดุที่ใช้คลุม (Identification of Capping Materials)

โดยทั่วไปแล้วจะใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดที่สะอาด เช่น ทราย โดยในการเลือกใช้วัสดุคลุมต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากสัตว์หน้าดินที่ดำรงชีพด้วยการฝังตัวอยู่ในดินตะกอนจะกวนดินตะกอน (bioturbation) การทำให้รวมตัวกัน (consolidation) การกัดกร่อน (erosion) และกระบวนการอื่นๆ ที่จะเกิดขึ้นทั้งในระยะสั้นและระยะยาวจากสารปนเปื้อน

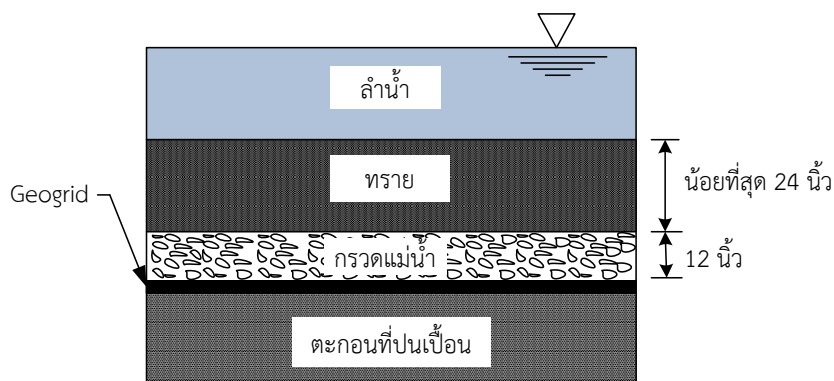
ตัวอย่างการออกแบบวัสดุคลุมในประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 4



ก) Eagle Harbor, วอชิงตัน



ข) Sheboygan, วิสคอนซิน



ค) Convair Lagoon, แคลิฟอร์เนีย

ที่มา : US.EPA., 2005

รูปที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบวัสดุคลุมในประเทศสหรัฐอเมริกา

2) การพิจารณาด้านธรณีเทคนิค (Geotechnical Consideration)

โดยปกติแล้วตะกอนปนเปื้อนอนุภาคที่ละเอียด มีองค์ประกอบของน้ำสูงและมีแรงเฉือนต่ำจะเคลื่อนที่ได้ง่ายหรือเกิดการพังกระจายระหว่างการคลุม ดังนั้นขณะที่ทำการคลุมจะต้องมีการพิจารณาด้านธรณีเทคนิคในประเด็นของความเสถียรและการอยู่กับที่ของการคลุม

ปัญหาด้านธรณีเทคนิคของการคลุมคือการเคลื่อนตัวหรือการผสมของวัสดุที่ใช้ปกคลุมและตะกอนที่ปนเปื้อน ในการคลุมจะต้องทำให้มีความเสถียรทันที

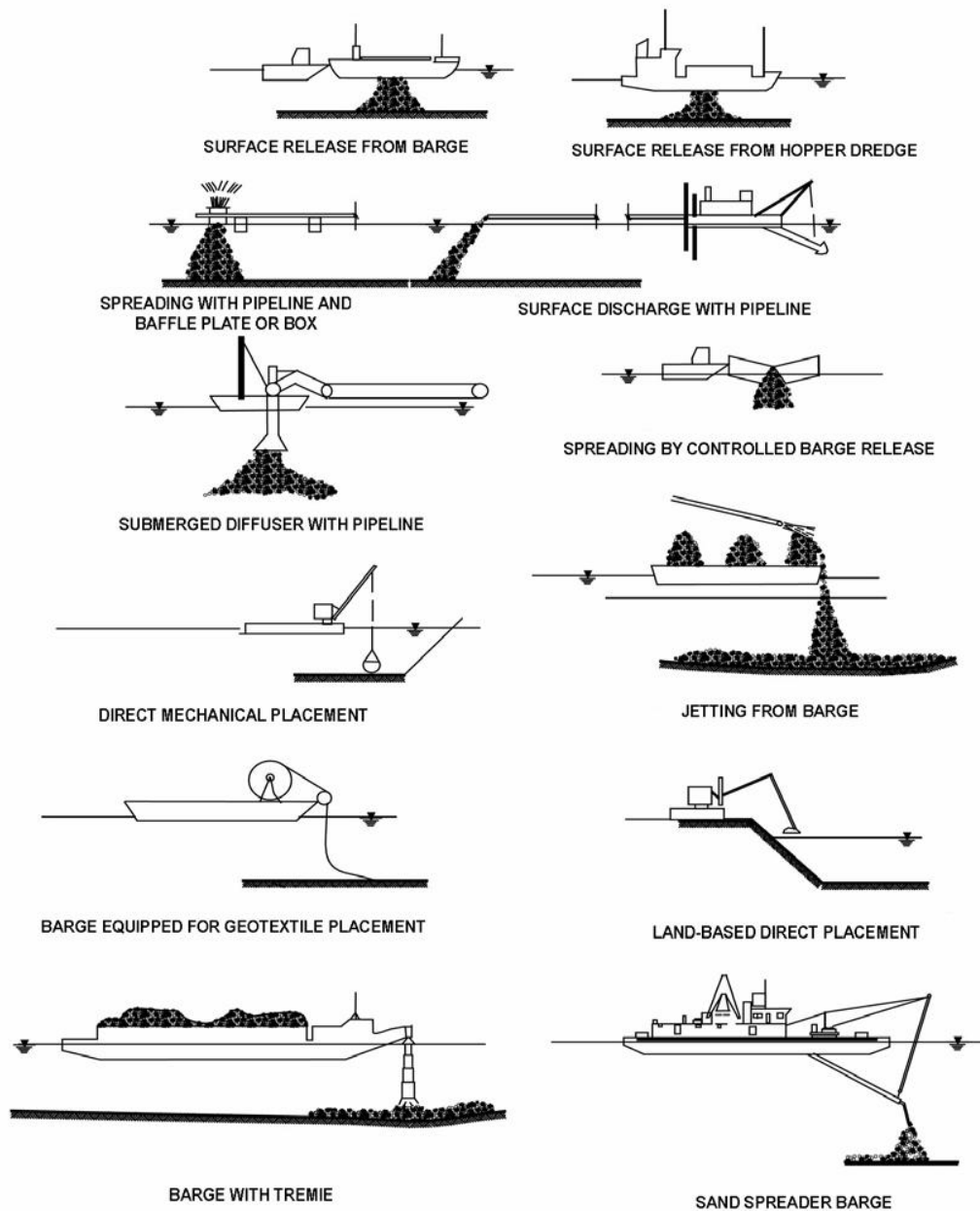
3) วิธีการจัดวาง (Placement Methods)

ประเด็นสำคัญในการพิจารณาเลือกวิธีการจัดวาง ได้แก่ ความสามารถในการควบคุมและความแม่นยำในการวางของวัสดุที่ใช้คลุม หากไม่สามารถควบคุมการจัดวางวัสดุที่ใช้คลุมได้ อาจส่งผลให้เกิดการพังกระจายของสารปนเปื้อนในลำน้ำและทำให้เกิดโคลนเหลวที่สามารถเคลื่อนตัวออกจากบริเวณที่มีการคลุมได้ ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้คลุมและเทคนิคการจัดวาง ดังรูปที่ 5

4) การตรวจสอบประสิทธิภาพ (Performance Monitoring)

ประเด็นที่ควรตรวจสอบเช่น

- การกัดกร่อนหรือการรบกวนทางกายภาพอื่นๆ ของวัสดุที่ใช้คลุม
- สารปนเปื้อนที่เป็นของเหลวที่เคลื่อนที่ไปยังวัสดุคลุมและน้ำผิวดินจากด้านล่างของตะกอนที่ปนเปื้อน
- การเคลื่อนที่ของผิวหนังวัสดุที่คลุม (Recolonization) และผลที่เกิดจากสัตว์หน้าดินที่ดำรงชีพด้วยการฝังตัวอยู่ในดินตะกอนจะกวนดินตะกอน (bioturbation)



ที่มา : US.EPA. 1998 อ้างถึงใน US.EPA.2005

รูปที่ 5 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้คลุมและเทคนิคการจัดวาง

โดย US.EPA. ได้สรุปประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อมีการดำเนินการด้วยวิธีคลุมในพื้นที่ ได้แก่

- ต้องมีการควบคุมที่แหล่งกำเนิดเพื่อป้องกันการปนเปื้อนซ้ำ
- การคลุมในพื้นที่สามารถลดความเสี่ยงผ่าน 3 ปัจจัยเบื้องต้น ได้แก่ การแยกทางกายภาพ ความเสถียรและการลดการเคลื่อนที่ของการปนเปื้อน
- การคลุมจะเหมาะสมที่สุดเมื่อน้ำมีระดับความลึกที่เหมาะสม ความลาดชันปานกลาง การไหลของน้ำได้ดินต่ำ หรือการปนเปื้อนไม่เคลื่อนที่ และมีแหล่งของวัสดุที่จะใช้คลุม

- การประเมินทางเลือกของการคลุมและการออกแบบต้องพิจารณาระบบสาธารณูปโภคที่ถูกฝังอยู่บริเวณนั้นด้วย เช่น ท่อน้ำ ท่อน้ำโสโครก แนวสายไฟฟ้า สายโทรศัพท์ หรือท่อเชื้อเพลิง
- ต้องมีการประเมินผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจากทางเลือกของวัสดุที่ใช้และผลของผลของการคลุม
- การประเมินผลของการคลุมต่อสภาพแวดล้อมของแม่น้ำ
- การประเมินผลจากการทำให้การคลุมพังทลายจากมนุษย์และธรรมชาติ รวมถึง การเกิดน้ำท่วมในคาบ 100 ปี เป็นต้น
- การเลือกวัสดุที่จะใช้คลุมต้องทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนที่ปนเปื้อนน้อยที่สุด
- ดำเนินการโดยผู้รับเหมาที่มีประสบการณ์ในการก่อสร้างทางทะเล
- การติดตามตรวจสอบระหว่างการจัดวางวัสดุที่ใช้คลุมและหลังการจัดวางในระยะยาว การอพยพกลับคืนของสิ่งมีชีวิตและการปนเปื้อนซ้ำ
- การบำรุงรักษาการคลุมตามกำหนดระยะเวลา

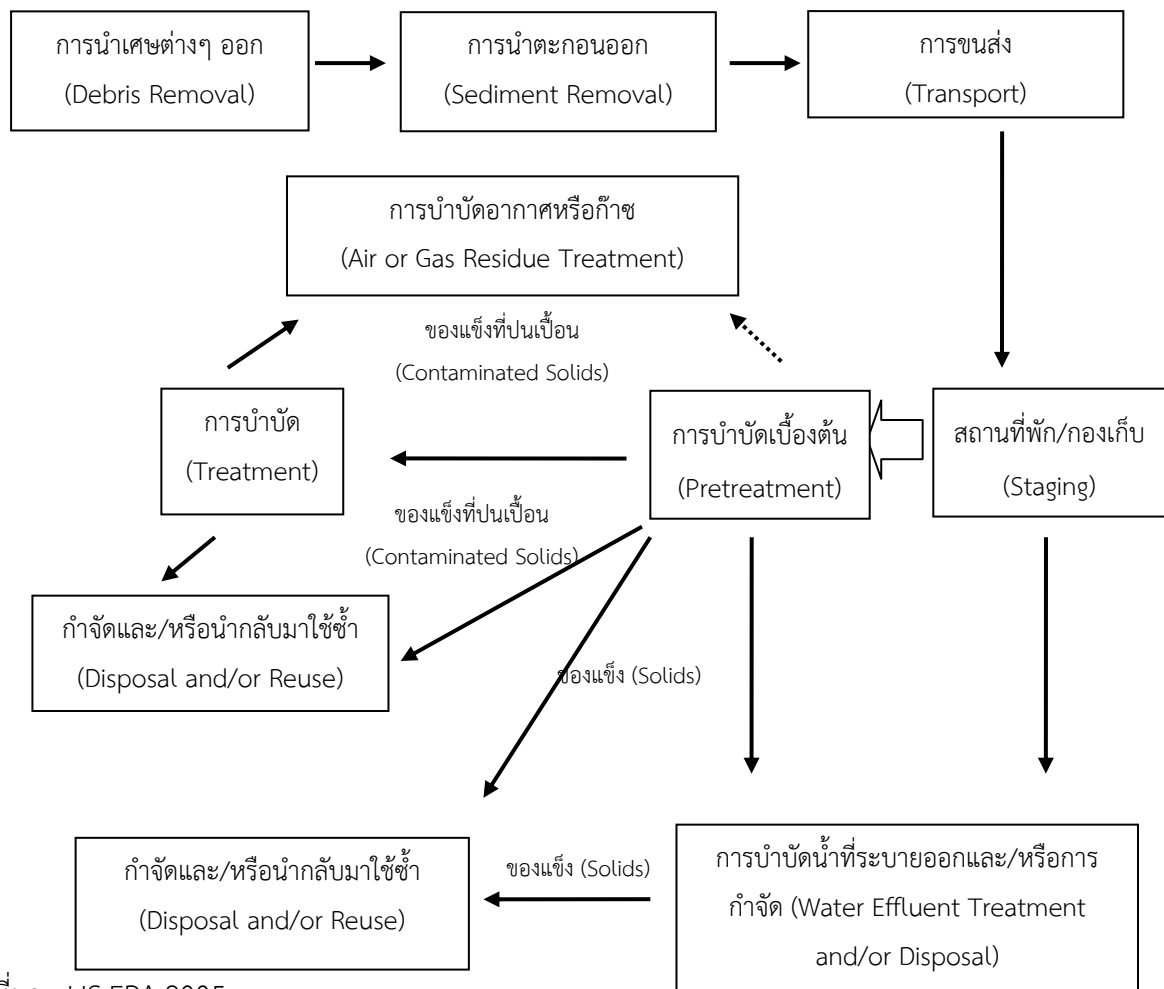
2.3 การขุดลอก (Dredging)

การขุดลอก (Dredging) เป็นการเคลื่อนย้ายตะกอนที่ปนเปื้อนออกจากลำน้ำ

องค์ประกอบที่สำคัญในการประเมินเมื่อจะใช้วิธีการขุดลอก ได้แก่ การเคลื่อนย้ายตะกอน การขนส่ง สถานที่พัก (staging) การบำบัด และการกำจัด โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 6

การดำเนินการฟื้นฟูโดยการขุดลอก มีประเด็นที่จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ คือ (Michael R. Palermo, Paul R. Schroeder, Trudy J. Estes, and Norman R. Francingues, 2008)

- มีสถานที่กำจัดที่เหมาะสมและอยู่ใกล้เคียง
- วัสดุที่ถูกขุดลอกจะต้องมีสถานที่เหมาะสมที่จะพักและดำเนินการ
- บริเวณแนวชายฝั่งและระบบสาธารณูปโภคสามารถรองรับการขุดหรือการขุดลอก เช่น สามารถเข้าถึงได้สะดวก
- แผนงานหรือตารางการขุดลอกของหน่วยงานที่รับผิดชอบ
- ระดับความลึกของน้ำเหมาะสมที่จะทำการขุดลอก
- ลดความเสี่ยงในระยะยาวจากการนำตะกอนออกเมื่อเทียบกับการรบกวนตะกอนและการทำลายถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์หน้าดิน
- มีการผันน้ำหรือความเร็วของกระแส น้ำต่ำ เพื่อลดการฟุ้งกระจายระหว่างการขุดลอก
- การขุดลอกตะกอนเฉพาะที่ปนเปื้อนโดยไม่นำตะกอนที่สะอาดขึ้นมา
- ตะกอนมีเศษต่างๆ เช่น ไม้ เศษหินต่างๆ ปะปนน้อย หรือมีการกำจัดเศษเหล่านั้นก่อนการขุดลอก



ที่มา : US.EPA.2005

รูปที่ 6 ตัวอย่างผังสำหรับการขุดลอก/การขุด

- ตะกอนที่มีความเข้มข้นปนเปื้อนสูงกระจายไม่ต่อเนื่องบริเวณพื้นที่
- สารปนเปื้อนมีความสัมพันธ์อย่างมากกับขนาดของตะกอน (เพื่อความสะดวกในการแยกและการลดค่าใช้จ่ายการกำจัด)

ข้อดีของการฟื้นฟูโดยการขุดลอก คือ ถ้าสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกได้ จะช่วยลดความเสี่ยงที่อาจเกิดผลกระทบในระยะยาวจากตะกอนเหล่านั้น รวมทั้งความมั่นใจในการใช้แหล่งน้ำนั้นในอนาคต และสามารถฟื้นฟูได้อย่างรวดเร็วกว่าการดำเนินการด้วยวิธี MNR

ส่วนข้อด้อยหรือข้อจำกัดของการขุดลอก คือ การดำเนินการมักจะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า MNR หรือการคลุมในพื้นที่ รวมทั้งมีความจำเป็นต้องพิจารณาในด้านการขนส่ง สถานที่พัก การบำบัด และการกำจัดตะกอนที่ขุดลอก นอกจากนี้ยังมีประเด็นของความไม่แน่นอนของการปนเปื้อนตกค้างในตะกอนที่เหลืออยู่หลังจากการขุดลอกหรือในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุปกรณ์

ที่ใช้ขุดลอก ความชำนาญของผู้ทำการขุดลอก แผนการดำเนินงานที่เหมาะสม ลักษณะสมบัติของตะกอน และลักษณะของพื้นที่ รวมทั้งข้อดีที่สำคัญอีกประการของการขุดลอกคือการทำให้อ่างเก็บน้ำเกิดการพังกระจาย ส่งผลต่อสภาพของลำน้ำได้

การขุดลอกตะกอนอาจทำได้โดยการสูบน้ำหรือผันน้ำออกจากพื้นที่และทำการขุดตะกอนเมื่อน้ำแห้ง โดยใช้ Sheet piling, Earthen dams, Cofferdams, Geotubes inflatable dams, การเปลี่ยนเส้นทาง โดยใช้เขื่อนชั่วคราวหรือท่อ หรือการเปลี่ยนเส้นทางอย่างถาวร อย่างไรก็ตามในบางพื้นที่อาจทำการขุดในฤดูแล้งได้โดยไม่ต้องมีการผันน้ำ

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2556. **เทคโนโลยีการบำบัดดินและน้ำใต้ดิน**. (ออนไลน์). สืบค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2557 จาก <http://ptech.pcd.go.th/cac/index.php/2013-12-09-07-36-40/374-2013-12-12-04-01-10>.

ส่วนมลพิษดิน สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. **แนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อนจากการประกอบการอุตสาหกรรม**. กันยายน 2554.

Michael R. Palermo, Paul R. Schroeder, Trudy J. Estes, and Norman R. Francingues. 2008. **Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments**. Environmental Laboratory .U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Ravi Naidua. **Recent Advances in Remediation Technologies**. 2012 Taipei International Conference on Remediation and Management of Soil and Groundwater Contaminated Sites. International Convention Center National Taiwan University Hospital, Taipei, Taiwan. 2012.

Sharma, H.D., and Reddy, K.R. 2004. **Geoenvironmental Engineering**. John Wiley&Sons, Hoboken, New Jersey. USA.

United States Environmental Protection Agency (US.EPA). 2005. **Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites**. Office of Solid Waste and Emergency Response EPA-540-R-05-012 OSWER 9355.0-85. December 2005.

United States Environmental Protection Agency (US.EPA). **Presenter's Manual for Remediation of Contaminated Sediments**. Available on; <http://www.clu-in.org/download/contaminantfocus/sediments/Presenters-Manual-Dredging.pdf>.

United States Environmental Protection Agency (US.EPA). 1997. **Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb**. Office of Emergency and Remedial Response Washington DC. EPA/540/S-97/500. August 1997.