Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 76–89

TÁI SỬ DỤNG ĐẤT ĐÀO TỪ MÁY ĐÀO KHIÊN CÂN BẰNG ÁP LỰC ĐẤT TRONG CÔNG TRÌNH NGẦM ĐÔ THỊ: ĐỊNH HƯỚNG ÁP DỤNG CHO CÁC DỰ ÁN METRO HÀ NỘI

Đoàn Tùng[a,*], Nguyễn Quốc Bảo[a]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 06/8/2026, Sửa xong 19/10/2026, Chấp nhận đăng 28/10/2026

Tóm tắt

Bài báo xây dựng và kiểm chứng một khung định lượng để quản lý, phân loại và tái sử dụng đất đào phát sinh từ máy đào khiên cân bằng áp lực đất (EPB TBM) trong các dự án metro ngầm tại Hà Nội. Sự cần thiết của nghiên cứu xuất phát từ thực tế các tuyến metro ngầm tạo ra khối lượng mùn thải rất lớn, trong khi vữa chèn lấp đồng bộ lại tiêu thụ nhiều bentonit và cát thương phẩm. Phương pháp nghiên cứu gồm ba bước: xây dựng hệ tiêu chí phân loại định lượng theo chỉ số dẻo và mô-đun độ lớn từ tài liệu kỹ thuật quốc tế; kiểm chứng hệ tiêu chí qua hai công trình thực tế tại Metro Zhengzhou, Trung Quốc; và áp dụng hệ tiêu chí lên địa tầng thực tế của Metro Hà Nội Tuyến 3 theo Báo cáo Địa kỹ thuật Cơ sở. Trên tổng khối lượng đất đào ước tính khoảng 452.000 m^3, kết quả phân loại cho thấy khoảng 37% (165.000 m^3) có thể tái sử dụng trực tiếp thay thế bentonit; khoảng 3% (13.000 m^3) thuộc nhóm mặt đào hỗn hợp; khoảng 52% (236.000 m^3) cần kiểm chứng thực nghiệm trước khi sử dụng thay cát; và khoảng 8% (38.000 m^3) không phù hợp. Dữ liệu thực nghiệm môi trường đo trực tiếp tại Tuyến 3 xác nhận mùn TBM từ ba lớp địa tầng chính đạt quy chuẩn ngưỡng chất thải nguy hại, tạo cơ sở pháp lý và kỹ thuật đầu tiên được công bố tại Việt Nam cho việc tái sử dụng. Nghiên cứu cũng đề xuất quy trình phân loại nhanh bốn bước tại hiện trường gắn với hệ tiêu chuẩn TCVN hiện hành.

Từ khoá: đất đào TBM-EPB; chỉ số dẻo; mô-đun độ lớn; vữa chèn lấp đồng bộ; metro Hà Nội; kinh tế tuần hoàn; phân loại vật liệu; an toàn môi trường.

REUSE OF EXCAVATED SOIL FROM EARTH PRESSURE BALANCE TUNNEL BORING MACHINES IN URBAN UNDERGROUND CONSTRUCTIONS: ORIENTATION FOR HANOI METRO PROJECTS

Abstract

This paper develops and validates a quantitative framework for managing, classifying and reusing excavated soil from Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines (EPB TBM) in underground metro projects in Hanoi, Vietnam. The need for this study arises from the fact that underground metro lines generate very large volumes of muck, while synchronous backfill grouting consumes considerable amounts of bentonite and commercial sand. The methodology comprises three steps: establishing a quantitative classification system based on the plasticity index and the fineness modulus derived from international technical literature; validating the system against two real projects of Zhengzhou Metro, China; and mapping the system onto the actual stratigraphy of Hanoi Metro Line 3 based on the Geotechnical Baseline Report. Out of an estimated total excavated volume of about 452,000 m^3, the classification results show that about 37% (165,000 m^3) can be directly reused as a bentonite replacement; about 3% (13,000 m^3) belongs to the mixed-face group; about 52% (236,000 m^3) requires experimental validation before being used as a sand replacement; and about 8% (38,000 m^3) is unsuitable. Environmental test data measured directly on Line 3 confirm that TBM muck from the three main strata complies with the national hazardous waste threshold regulation, providing the first published legal and technical basis in Vietnam for such reuse. The study also proposes a four-step rapid classification procedure for site implementation, linked to the existing TCVN standard system.

Keywords: EPB TBM excavated soil; plasticity index; fineness modulus; synchronous backfill grouting; Hanoi metro; circular economy; material classification; environmental safety.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-06 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Công nghệ khiên đào cân bằng áp lực đất (Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine – EPB TBM) ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các dự án metro ngầm đô thị, đặc biệt tại các thành phố

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* tungd@huce.edu.vn (Tùng, Đ.)

lớn của châu Á. Đây là công nghệ phù hợp với nền đất yếu đô thị, cho phép kiểm soát lún mặt đất và thi công liên tục trong điều kiện áp lực nước ngầm cao. Cùng với sự mở rộng của hệ thống metro, khối lượng đất đào phát sinh ngày càng lớn, đặt ra yêu cầu cấp thiết về quản lý và tái sử dụng vật liệu thải theo hướng bền vững [1, 2]. Tuyến đường sắt đô thị thí điểm Hà Nội đoạn Nhổn – Ga Hà Nội (Metro Tuyến 3) là công trình đầu tiên ứng dụng công nghệ TBM-EPB trong điều kiện địa tầng đô thị mềm yếu đặc trưng của Hà Nội, với đoạn hầm đào từ Ga S9 (Kim Mã) đến Ga S12 (Trần Hưng Đạo), độ sâu 12–27 m [3]. Nếu không được quản lý hợp lý, đất đào – còn gọi là mùn TBM hay mùn thải – trở thành nguồn gánh nặng hậu cần (logistics), làm tăng chi phí vận chuyển và gây tắc nghẽn giao thông đô thị. Trong khi đó, vữa chèn lấp đồng bộ được bơm vào khoảng trống vành khăn phía sau đuôi khiên đào ngay trong quá trình lắp dựng vỏ hầm lại tiêu thụ một lượng lớn bentonit và cát thương phẩm. Thay thế các nguyên liệu này bằng đất đào EPB phù hợp sẽ tạo ra hiệu quả kinh tế và môi trường đáng kể.

Nghiên cứu về phân loại và tái sử dụng mùn TBM-EPB trên thế giới có thể chia thành ba nhóm. Nhóm thứ nhất xây dựng các sơ đồ phân loại theo trạng thái và khả năng xử lý của mùn sau đào. Oggeri và cs. [4] phân loại mùn hầm theo đặc trưng cơ lý và đánh giá khả năng cải thiện bằng vôi cho các thành tạo đất yếu; Kataguiri và cs. [5] đề xuất lưu đồ đặc trưng hóa để sàng lọc tiềm năng tái sử dụng đất đào đô thị theo các chỉ tiêu địa kỹ thuật và môi trường; Wu và cs. [6] làm rõ độ ổn định của bọt cải tạo đất dưới áp lực, còn Luo và cs. [7] thử nghiệm tái sử dụng mùn làm vữa chèn lấp đồng bộ. Nhóm thứ hai định lượng hóa tiêu chí phân loại gắn với một ứng dụng cụ thể là vữa chèn lấp đồng bộ. Zhang và cs. [8] lần đầu đề xuất hệ ngưỡng định lượng theo chỉ số dẻo IP cho nhánh hạt mịn và mô-đun độ lớn MX cho nhánh hạt thô, xây dựng trên yêu cầu kỹ thuật của bentonit và cát xây dựng; Xu và cs. [9] kiểm chứng ngược hệ ngưỡng này và chỉ ra rằng IP lớn hơn 7% mới là điều kiện cần chứ chưa đủ khi thành phần hạt bụi chiếm ưu thế. Nhóm thứ ba mở rộng sang quan hệ giữa thông số cải tạo đất và khả năng tái chế: Lu và cs. [10] thiết lập tương quan định lượng giữa nhóm chỉ số cải tạo và nhóm chỉ số tái chế đối với đất sét có độ bão hòa cao, trong khi Wang và cs. [11] khảo sát tính lưu biến của mùn EPB khi được tái sử dụng làm phụ gia cải tạo đất.

Từ tổng quan trên có thể nhận thấy ba hạn chế. Thứ nhất, hệ ngưỡng định lượng IP và MX [8, 9] được thiết lập và kiểm chứng hoàn toàn trên địa tầng Trung Quốc; chưa có nghiên cứu nào ánh xạ hệ ngưỡng này lên địa tầng trầm tích trẻ, mềm yếu và xen kẹp mạnh của đồng bằng sông Hồng, nơi tỉ trọng đất chuyển tiếp mang đồng thời đặc trưng của cả hai nhánh phân loại là rất lớn. Thứ hai, các nghiên cứu hiện có tách rời tiêu chí kỹ thuật với thủ tục pháp lý về chất thải: khả năng tái sử dụng được kết luận thuần túy trên cơ sở cơ lý, trong khi tại Việt Nam mùn thải chỉ được đưa ra khỏi nhóm chất thải phải kiểm soát khi có kết quả phân định theo quy chuẩn ngưỡng chất thải nguy hại; do đó một kết luận kỹ thuật thuận lợi vẫn chưa đủ để triển khai trên công trường. Thứ ba, phần lớn các sơ đồ phân loại dừng ở mức khuyến nghị học thuật, chưa được chuyển thành quy trình ra quyết định gắn với hệ tiêu chuẩn thí nghiệm sẵn có để kỹ sư áp dụng trực tiếp tại hiện trường. Ở trong nước, hướng tái sử dụng chất thải rắn đô thị làm vật liệu xây dựng đã có những kết quả bước đầu, chẳng hạn đánh giá khả năng tái sử dụng bùn hồ đô thị Hà Nội sau xử lý làm vật liệu san lấp và nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng [12]; tuy nhiên đối tượng mùn thải từ máy đào TBM vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống. Xuất phát từ ba khoảng trống nêu trên, bài báo này hướng đến bốn mục tiêu: (i) hệ thống hóa khung định lượng phân loại đất đào EPB theo hai nhánh chỉ số dẻo IP và mô-đun độ lớn MX; (ii) kiểm chứng khung qua các công trình thực tế quốc tế nhằm xác định rõ vùng tin cậy và vùng biên của hệ ngưỡng; (iii) ánh xạ khung phân loại lên dữ liệu địa kỹ thuật thực tế của Metro Hà Nội Tuyến 3, đồng thời kết hợp với dữ liệu phân định môi trường đo trực tiếp tại tuyến để giải quyết song song cả điều kiện kỹ thuật và điều kiện pháp lý; và (iv) đề xuất quy trình phân loại nhanh tại hiện trường gắn

với hệ tiêu chuẩn TCVN hiện hành, kèm ước tính bậc một về lợi ích kinh tế và phát thải tránh được.

Hệ ngưỡng IP và MX được kế thừa từ [8, 9]; đóng góp của bài báo nằm ở ba điểm bổ sung cho khung gốc. Thứ nhất, bài báo đề xuất quy tắc xử lý trường hợp mà khung gốc chưa bao quát là đất chuyển tiếp SM/SC thỏa mãn đồng thời điều kiện của cả hai nhánh nhưng cho hai kết luận khác nhau: xét song song hai nhánh và lấy thử nghiệm vữa quy mô nhỏ làm căn cứ phân định cuối cùng (Mục 3.1, Hình 1); trường hợp này chiếm 52% khối lượng đất đào Tuyến 3 nên không phải ngoại lệ hiếm gặp. Thứ hai, hàm lượng hữu cơ được đưa vào khung như một điều kiện chặn độc lập với IP và MX, xuất phát từ thực tế lớp GU1-s đạt ngưỡng IP của Nhóm A nhưng bị giới hạn bởi bản chất bụi hữu cơ (Mục 4.2). Thứ ba, kết quả đo 16 chỉ tiêu trên chính mùn của Tuyến 3 là hồ sơ đầu tiên được công bố tại Việt Nam cho phép đưa mùn TBM-EPB ra khỏi nhóm chất thải phải kiểm soát, chuyển kết luận tái sử dụng từ khả thi kỹ thuật sang khả thi pháp lý.

2. Tổng quan kỹ thuật về đất đào từ máy đào khiên cân bằng áp lực đất

2.1. Ảnh hưởng của cải tạo đất đến tính chất và khả năng tái sử dụng

Trong TBM-EPB, cải tạo đất được sử dụng để biến đất tại mặt đào thành một môi trường dẻo, có khả năng truyền áp lực ổn định, giảm mô-men xoắn và kiểm soát phát thải tại trục vít. Các chất điều hòa đất phổ biến bao gồm bọt, polyme (polymer) và bentonit; việc lựa chọn phụ gia và thông số phun có ảnh hưởng trực tiếp đến tính chất mùn sau đào [13], qua đó ảnh hưởng đến khả năng tái sử dụng. Tại Dự án Metro Hà Nội Tuyến 3, nhà thầu Hyundai E&C – Ghella JV (HGJV) đã sử dụng hai loại bọt CONDAT là CLB F5/AC (chống tắc đất sét, dùng cho lớp GU3&4 và GU5-a) và CLB F5/TM (điều kiện hỗn hợp), với tỉ lệ phun bọt (FIR) 20–40% và tỉ lệ nở bọt (FER) 5–14 tùy địa tầng [14]. Cải tạo đất có thể làm thay đổi đáng kể các đặc trưng cơ bản của đất đào [15, 16], bao gồm độ ẩm và trạng thái vật lý, tính lưu biến và các đặc trưng địa kỹ thuật tức thời. Tuy nhiên, đối với bọt phân hủy nhanh như CLB F5/AC (chu kỳ bán rã lớn hơn 16 phút; phân hủy sinh học 89% sau 28 ngày theo OECD 301 [17]), các thay đổi này chủ yếu mang tính tạm thời. Carigi và cs. [18] xác nhận rằng phần lớn các chỉ tiêu địa kỹ thuật của đất đào EPB phục hồi trong vòng 7 ngày sau khi ra khỏi máy; do đó, thời gian ủ tối thiểu 7 ngày trước khi thử nghiệm IP và MX là bắt buộc để đảm bảo tính đại diện của kết quả phân loại.

Trên cơ sở trạng thái thực tế sau đào, đất đào EPB có thể được sàng sơ bộ thành các nhóm như trình bày trong Bảng 1 [4–7]. Bước sàng theo trạng thái này là tiền đề để lựa chọn mẫu đưa vào thử nghiệm định lượng IP/MX được trình bày ở Mục 3.

Bảng 1. Phân loại sơ bộ các nhóm đất đào sau khi ra khỏi máy và hướng xử lý tương ứng

Trạng thái	Mô tả	Hướng xử lý tiềm năng
Dạng bùn lỏng (slurry)	Độ ẩm cao, không tự đứng, sau khi thoát bọt	Xử lý tách nước, sau đó phân loại lại
Dạng nhão (pasty)	Dẻo, biến dạng được, sau 7 ngày ủ	Phân loại theo IP/MX thành Nhóm A hoặc B
Dạng rời (granular)	Tơi xốp, hạt phân tách, đất thô	Phân loại theo MX thành Nhóm B hoặc C
Không phù hợp	Hữu cơ cao, ô nhiễm, hoặc MX > 3,2	Đổ thải theo quy định

Nguồn: tổng hợp từ [4–7].

2.2. Vật liệu đắp, lấp và bài toán hậu cần mùn thải

Ngoài vữa chèn lấp, đất đào EPB còn có thể tái sử dụng làm vật liệu đắp nền, hoàn trả mặt bằng, đắp kỹ thuật hoặc vật liệu nền và móng đường. Đây là hướng tiêu thụ khối lượng lớn, đặc biệt phù hợp với các nhóm mùn không đạt tiêu chí thay bentonit. Tuy nhiên, hướng này vướng ba rào cản kỹ thuật đặc thù của mùn EPB. Thứ nhất, yêu cầu về sức chịu tải và cường độ của vật liệu đắp (CBR, mô-đun đàn hồi, độ chặt đầm nén K) thường khó đạt với mùn sét dẻo có độ ẩm cao sau cải tạo. Thứ hai, tính không đồng nhất theo lý trình đào, với sự xen kẹp sét, cát và bùn hữu cơ, khiến khó kiểm soát chất lượng lô vật liệu nếu không phân luồng và ủ theo nhóm. Thứ ba, dư lượng phụ gia cải tạo và độ ẩm vượt trội đòi hỏi xử lý tách nước, ổn định bằng vôi hoặc xi măng, hoặc phơi ủ trước khi đạt yêu cầu đắp [4, 5]. Vì vậy, trong phạm vi bài báo này, hướng đắp nền được xem là kênh tiêu thụ thứ cấp cho các nhóm B và C, trong khi vữa chèn lấp đồng bộ là hướng tái sử dụng giá trị cao và được ưu tiên.

Dù theo hướng tái sử dụng nào, hậu cần của mùn thải phải được xem là một mắt xích trong dây chuyền sản xuất hầm, chứ không phải công đoạn phụ trợ. TBM-EPB đào liên tục theo nhịp lắp vỏ hầm, tạo ra dòng mùn đều đặn nhưng không thể gián đoạn; nếu năng lực vận chuyển và tập kết không theo kịp, áp lực tích tụ tại cửa hầm sẽ buộc máy phải dừng, kéo theo gián đoạn thi công và chi phí lớn [19]. Mặt khác, yêu cầu ủ tối thiểu 7 ngày trước khi lấy mẫu phân loại đồng nghĩa với việc cần bãi trung chuyển đủ rộng để lưu giữ đồng thời nhiều lô mùn theo nhóm, là ràng buộc không nhỏ trong đô thị mật độ cao như Hà Nội. Do đó, tái sử dụng mùn không chỉ là bài toán vật liệu mà còn là bài toán tổ chức không gian và thời gian. Bảng 2 tóm tắt chuỗi hậu cần điển hình.

Bảng 2. Chuỗi hậu cần đất đào EPB từ máy đào đến điểm tái sử dụng

Bước	Hoạt động	Thời gian tiêu biểu	Yêu cầu kiểm soát
1	Đất đào ra khỏi TBM (vít tải)	$T = 0$	Ghi nhận lý trình, lớp địa chất
2	Vận chuyển nội bộ (goòng/băng tải)	0 – 1 giờ	Tránh lẫn lộn địa tầng khác nhau
3	Tập kết tại bãi trung chuyển	1 – 7 ngày	Ủ ≥ 7 ngày trước lấy mẫu
4	Lấy mẫu và thử nghiệm IP/MX	Ngày 7–10	TCVN 4197:2012 [27]; TCVN 4198:2014 [21]
5	Phân luồng theo nhóm A/B/C	Sau khi có kết quả thí nghiệm	Quyết định: tái sử dụng / đổ thải
6	Vận chuyển đến điểm tái sử dụng	Theo kế hoạch	Phối hợp với tiến độ vữa

Nguồn: tổng hợp từ [19]. Thời gian ủ tối thiểu 7 ngày trước thí nghiệm phân loại là bắt buộc [18].

3. Phương pháp phân loại định lượng theo chỉ số dẻo và mô-đun độ lớn

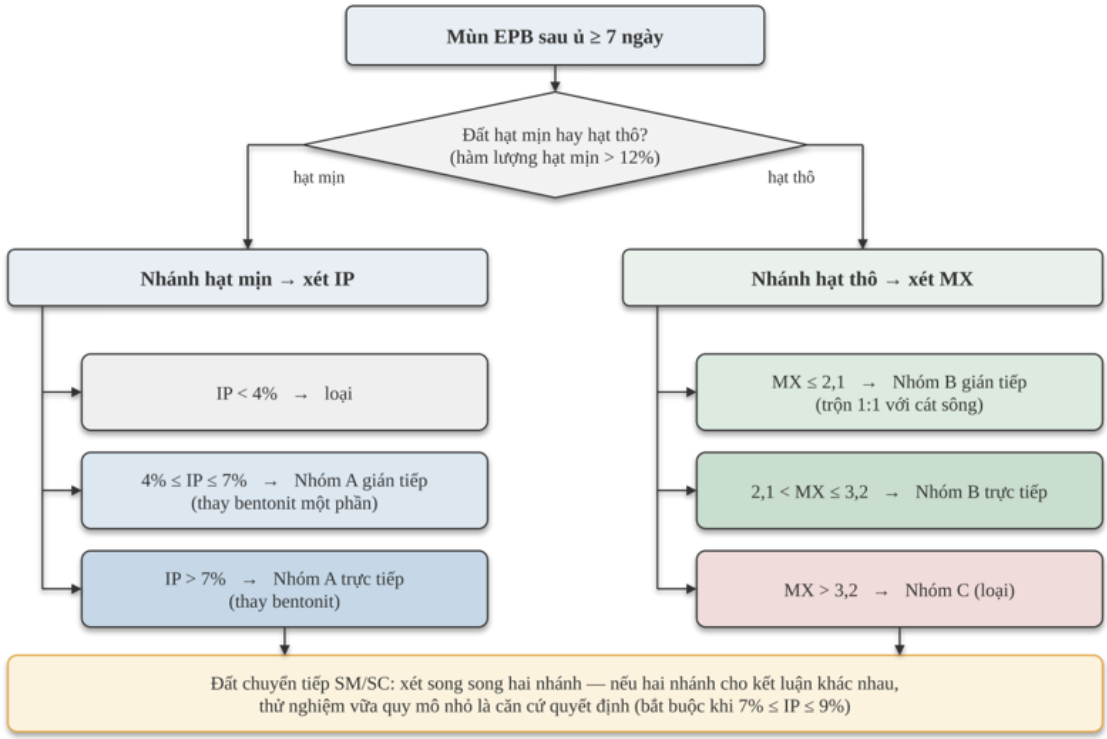
3.1. Vữa chèn lấp đồng bộ và cơ sở của hệ tiêu chí phân loại

Vữa chèn lấp đồng bộ sau đuôi khiên đào có nhiệm vụ lấp đầy khoảng trống vành khăn giữa vỏ hầm lắp ghép và đất nền xung quanh, kiểm soát lún mặt đất và đảm bảo ổn định kết cấu hầm. Vữa thông thường gồm xi măng, tro bay, bentonit, cát và nước, phải đạt các tiêu chí về độ chảy, độ tách nước và cường độ nén [8]. Đây là hướng tái sử dụng giá trị cao vì tiêu thụ trực tiếp bentonit và cát, hai thành phần mà đất đào EPB phù hợp có thể thay thế.

Dựa trên tiêu chuẩn GB/T 5005-2010 về bentonit và GB/T 14684-2011 về cát xây dựng, Zhang và cs. [8] đề xuất hệ tiêu chí phân loại định lượng đất đào EPB như sau. Đối với đất hạt mịn, phân loại

theo chỉ số dẻo IP: IP < 4% thì không sử dụng được; 4% ≤ IP ≤ 7% thì thay bentonit gián tiếp, cần bổ sung bentonit khi phối trộn, tương ứng Nhóm A gián tiếp; IP > 7% thì thay bentonit trực tiếp, tương ứng Nhóm A trực tiếp. Đối với đất hạt thô, phân loại theo mô-đun độ lớn MX: MX > 3,2 thì không sử dụng được, tương ứng Nhóm C; 2,1 < MX ≤ 3,2 thì thay cát sông trực tiếp, tương ứng Nhóm B trực tiếp; MX ≤ 2,1 thì trộn theo tỉ lệ 1:1 với cát sông trước khi sử dụng, tương ứng Nhóm B gián tiếp.

Cần nhấn mạnh rằng IP và MX không phải là hai mức của cùng một thang phân loại mà là chỉ tiêu của hai nhánh vật liệu khác nhau: nhánh hạt mịn xét theo IP và dẫn đến Nhóm A (thay bentonit), nhánh hạt thô xét theo MX và dẫn đến Nhóm B (thay cát). Do đó, một mẫu có IP nằm trong khoảng 4–7% được xếp vào Nhóm A gián tiếp chứ không phải Nhóm B. Đối với đất chuyển tiếp mang đồng thời đặc trưng của cả hai nhánh, chẳng hạn nhóm SM/SC, cần xét song song hai nhánh; khi hai nhánh cho kết luận khác nhau, thử nghiệm vữa quy mô nhỏ là căn cứ quyết định cuối cùng. Hình 1 tóm tắt toàn bộ lôgic phân loại theo hai nhánh.



Hình 1. Lưu đồ khung phân loại đất đào EPB theo hai nhánh chỉ số dẻo IP và mô-đun độ lớn MX

Cần lưu ý rằng Xu và cs. [9] phát hiện ngưỡng IP lớn hơn 7% là điều kiện cần nhưng chưa đủ đối với đất bùn sét gần ngưỡng. Cụ thể, đất có IP bằng 8,7%, tức chỉ vượt ngưỡng 1,7%, vẫn không thể thay thế bentonit khi thành phần hạt bụi chiếm ưu thế. Do đó, thử nghiệm vữa quy mô nhỏ (mini-batch) là bắt buộc đối với các lớp nằm ở vùng biên giới có IP từ 7% đến 9%.

3.2. Các chỉ tiêu kỹ thuật cần kiểm soát trong vữa chèn lấp

Các chỉ tiêu kỹ thuật của vữa chèn lấp đồng bộ phụ thuộc vào tiêu chuẩn áp dụng, công nghệ TBM, điều kiện địa chất và yêu cầu thiết kế. Các chỉ tiêu quan trọng nhất được tổng hợp trong Bảng 3.

Bảng 3. Các chỉ tiêu kỹ thuật cần kiểm soát đối với vữa chèn lấp đồng bộ

Chỉ tiêu	Yêu cầu	Mục đích kiểm soát
Độ chảy (Fluidity)	160–200 mm (độ chảy loang)	Bơm được qua đường ống
Độ tách nước (Bleeding)	< 5% sau 3 giờ	Tránh phân tách hỗn hợp
Cường độ nén 7 ngày (UCS-7d)	≥ 0,1 MPa	Hỗ trợ vỏ hầm sớm
Cường độ nén 28 ngày (UCS-28d)	≥ 0,5 MPa (thường 1–3 MPa)	Ổn định lâu dài
Thời gian đông kết ban đầu	4–8 giờ (tùy thiết kế)	Tránh đông quá sớm trong đường ống

Nguồn: theo Zhang và cs. [8]; yêu cầu có thể thay đổi theo tiêu chuẩn và chỉ dẫn kỹ thuật của từng dự án.

3.3. Kiểm chứng khung phân loại qua công trình thực tế quốc tế

Để xác nhận tính đúng đắn của khung phân loại IP/MX trước khi áp dụng cho Hà Nội, hai công trình thực tế được phân tích và đối chiếu với dự báo của khung. Cách tiếp cận đối chiếu dự báo với kết quả thực đo này cũng được nhiều nghiên cứu gần đây sử dụng để hiệu chỉnh chỉ số tái sử dụng cho đất sét có độ bão hòa cao và để đánh giá tính lưu biến của mùn EPB tái chế [10, 11].

Trường hợp thứ nhất là Metro Zhengzhou Tuyến 3, Trung Quốc [8], sử dụng máy TBM-EPB đường kính 6,2 m đi qua hai địa tầng khác nhau. Tại đường hầm phía Đông với đất sét nhẹ, IP bằng 11,23% lớn hơn 7% nên khung dự báo Nhóm A; kết quả thực tế cho vữa đạt độ chảy 165 mm và cường độ nén 28 ngày 2,37 MPa. Tại đường hầm phía Tây với cát rất mịn, MX bằng 1,55 nhỏ hơn 2,1 nên khung dự báo Nhóm B với yêu cầu trộn 1:1 cát sông; sau khi trộn, MX đạt 2,2 và cường độ nén 28 ngày đạt 2,51 MPa. Cả hai dự báo đều chính xác.

Bảng 4. Tổng hợp kết quả kiểm chứng khung phân loại IP/MX từ công trình thực tế quốc tế

Nguồn	Địa chất	IP (%) hoặc MX	Dự báo khung	Kết quả thực tế	Hàm ý cho Hà Nội
Zhang và cs. [8] (hầm phía Đông)	Đất sét nhẹ	IP = 11,23%	Nhóm A	UCS-28d = 2,37 MPa; độ chảy = 165 mm	GU1-s, GU3&4 (IP = 18–21%): Nhóm A
Zhang và cs. [8] (hầm phía Tây)	Cát rất mịn	MX = 1,55	Nhóm B	UCS-28d = 2,51 MPa (sau trộn 1:1)	GU5-a (IP = 7%, MX ước tính 2,0–2,5): Nhóm A/B, thay cát sau kiểm chứng
Xu và cs. [9]	Bùn sét (hạt bụi ưu thế)	IP = 8,7% (gần ngưỡng)	Nhóm A (dự báo sơ bộ)	Thực tế Nhóm B (bentonit thất bại)	GU5-a (IP = 7%): bắt buộc thử nghiệm vữa

Nguồn: tổng hợp từ [8, 9].

Trường hợp thứ hai là Metro Zhengzhou Tuyến 6, Trung Quốc [9], với đất đào là bùn sét có tỉ trọng hạt 2,70, giới hạn chảy 24,1% và IP bằng 8,7%, tức trên ngưỡng 7%. Khung dự báo sơ bộ cho Nhóm A, nhưng kết quả thực tế cho thấy việc thay thế bentonit natri không đạt độ chảy và độ tách

nước vượt giới hạn, tức vật liệu thực chất hoạt động như Nhóm B. Nguyên nhân là hạt bụi chiếm ưu thế với tỉ lệ trên 60%, không đủ khả năng trương nở đặc thù của bentonit. Do IP lớn hơn 7% chưa đủ, lớp GU5-a (IP bằng 7%, vùng biên 7–9%, hai nhánh cho kết luận khác nhau) bắt buộc phải thử nghiệm vữa quy mô nhỏ. Kết quả kiểm chứng được tổng hợp trong Bảng 4.

4. Kết quả phân loại và tiềm năng áp dụng tại Hà Nội

4.1. Đặc thù địa tầng và tổng khối lượng đất đào

Điều kiện địa tầng Hà Nội trong các tuyến metro ngầm bao gồm sự xen kẹp giữa sét pha, sét hữu cơ, bùn yếu, cát mịn, cát hạt trung và cát cuội sỏi. Dựa trên Báo cáo Địa kỹ thuật Cơ sở của gói thầu CP-03 thuộc tuyến Metro số 3 Hà Nội [20], phân bố địa tầng chính gồm năm nhóm đơn vị địa chất với các đặc trưng IP và MX khác nhau rõ rệt. Tổng khối lượng đất đào, tính theo tổng khối lượng của các đơn vị địa chất với đường kính đào ngoài 6,5 m và hệ số tơi 1,2, ước tính khoảng 452.000 m^3.

4.2. Kết quả phân loại đất đào theo địa tầng Metro Hà Nội

Áp dụng hệ tiêu chí IP/MX trình bày ở Mục 3.1 lên số liệu thực đo về giới hạn Atterberg trong Báo cáo Địa kỹ thuật Cơ sở [20], kết hợp xác nhận thực nghiệm môi trường cho các lớp GU1-s, GU3&4 và GU5-a, thu được kết quả phân loại như sau, tính trên tổng 452.000 m^3. Nhóm A chiếm khoảng 37% (165.000 m^3), gồm GU1-s với IP bằng 18% và GU3&4 với IP bằng 21%, có thể thay thế bentonit trực tiếp. Nhóm A* chiếm khoảng 3% (13.000 m^3), là mặt đào hỗn hợp GU1-s và GU5-a với IP tổ hợp khoảng 12–13%. Nhóm A/B chiếm khoảng 52% (236.000 m^3), là lớp GU5-a với IP bằng 7%, ưu tiên thay cát sau kiểm chứng thí nghiệm. Nhóm C chiếm khoảng 8% (38.000 m^3), gồm GU7&8 với MX lớn hơn 3,2, không sử dụng được trong vữa chèn lấp. Chi tiết được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 5. Phân loại đất đào TBM-EPB theo địa tầng Metro Hà Nội theo khung định lượng IP/MX

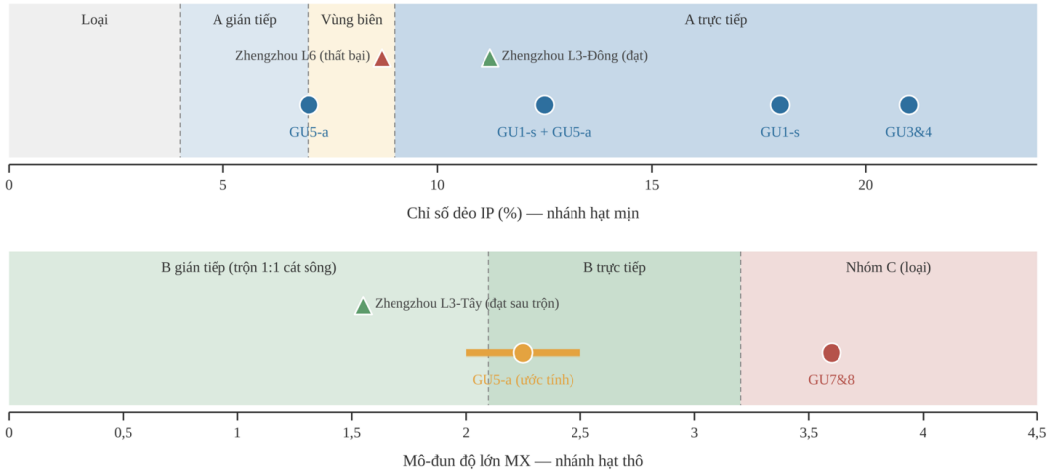
Đơn vị địa chất	Mô tả USCS	IP (%) [20]	MX	Nhóm phân loại	Khối lượng ước tính (m^3)	Tỉ lệ (%)
GU1-s	Bụi hữu cơ (silt)	18	1,5–2,0 (ước tính)*	A	~52.000	~12
GU3&4	Sét bùn (CH/MH)	21	– (hạt mịn)	A	~113.000	~25
GU1-s + GU5-a (hỗn hợp)	Giáp ranh	~12–13 (tổ hợp)	–	A*	~13.000	~3
GU5-a	Cát bụi pha sét (SM/SC)	7	2,0–2,5 (ước tính)*	A/B	~236.000	~52
GU7&8	Cát thô – cuội sỏi (SP/GW)	~0	> 3,2	C	~38.000	~8
TỔNG	–	–	–	–	~452.000 (hệ số tơi 1,2)	100

Ghi chú: giá trị IP theo Báo cáo Địa kỹ thuật Cơ sở [20]. Giá trị MX đánh dấu (*) là ước tính từ mô tả phân loại USCS, chưa đo trực tiếp (xem Mục 4.2); với lớp phân loại theo nhánh hạt mịn (GU1-s, GU3&4), MX chỉ nêu để tham chiếu chéo, không dùng làm căn cứ phân nhóm. Lớp GU5-a là đất chuyển tiếp SM/SC cho hai kết luận khác nhau theo hai nhánh nên được ký hiệu A/B và bắt buộc thử nghiệm vữa quy mô nhỏ theo quy tắc ở Mục 3.1.

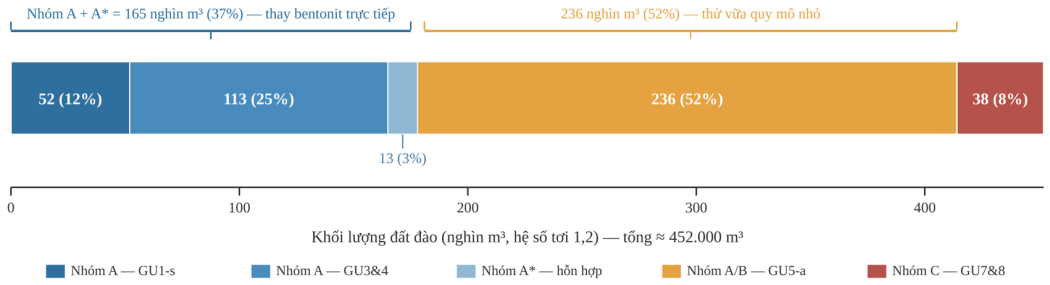
Một điều kiện kèm theo cần được nêu rõ đối với lớp GU1-s. Lớp này được mô tả là bụi hữu cơ trong Báo cáo Địa kỹ thuật Cơ sở [20], trong khi chất hữu cơ hòa tan là tác nhân ức chế quá trình

thủy hóa xi măng, làm kéo dài thời gian đông kết và suy giảm cường độ nén của vữa chèn lấp. Vì vậy, việc xếp GU1-s vào Nhóm A chỉ dựa trên chỉ số dẻo IP bằng 18% là điều kiện cần nhưng chưa đủ: trước khi xác nhận sử dụng, cần xác định hàm lượng hữu cơ theo phương pháp mất khi nung, và chỉ chấp nhận khi hàm lượng hữu cơ không vượt quá 5%; trường hợp vượt ngưỡng, lớp này phải được chuyển sang kênh tiêu thụ thứ cấp là vật liệu đắp nền như đã phân tích ở Mục 2.2. Khối lượng chịu ràng buộc này là khoảng 52.000 m^3, tương đương 12% tổng khối lượng đất đào. Bên cạnh đó, giá trị MX của lớp GU1-s và GU5-a trong Bảng 5 mới là giá trị ước tính từ mô tả phân loại USCS; trước khi phối trộn vữa ở quy mô đại trà, cần thực hiện thí nghiệm rây sàng xác định thành phần hạt theo TCVN 4198:2014 [21] trên mẫu mùn thực tế đã ủ tối thiểu 7 ngày để xác định MX, đặc biệt đối với lớp GU5-a vì lớp này chiếm tỉ trọng khối lượng lớn nhất và nằm ngay tại vùng biên của khung phân loại.

Hình 2 biểu diễn vị trí của các đơn vị địa chất Metro Hà Nội Tuyến 3 trên hai thang tiêu chí IP và MX, đặt cạnh ba trường hợp kiểm chứng của Metro Zhengzhou đã phân tích ở Mục 3.3; qua đó thấy rõ GU5-a là lớp duy nhất nằm tại vùng biên và quyết định phần lớn kết quả phân loại. Hình 3 thể hiện phân bố khối lượng theo nhóm tái sử dụng.



Hình 2. Vị trí các đơn vị địa chất của Metro Hà Nội Tuyến 3 và hai công trình kiểm chứng Zhengzhou trên thang tiêu chí IP và MX



Hình 3. Phân bố khối lượng đất đào TBM-EPB của Metro Hà Nội Tuyến 3 theo nhóm tái sử dụng

4.3. Xác nhận thực nghiệm về an toàn môi trường tại Metro Hà Nội Tuyến 3

Rào cản pháp lý là yếu tố quyết định đối với việc tái sử dụng mùn thải TBM tại Việt Nam. Theo Thông tư 02/2022/TT-BTNMT [22], đất thải xây dựng được phân loại dưới mã 11 05 01 là chất thải công nghiệp phải kiểm soát, trừ khi được phân định là chất thải rắn công nghiệp thông thường theo

QCVN 07:2009/BTNMT [23]. Việc đánh giá tính tương thích môi trường của hỗn hợp đất và phụ gia trước khi tái sử dụng cũng là yêu cầu được nhấn mạnh trong các quy trình quốc tế [24, 25].

Trong quá trình thi công đường hầm Tuyến 3, nhà thầu HGJV đã ủy quyền cho Viện Công nghệ Môi trường thuộc Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam thực hiện phân tích 6 mẫu hỗn hợp đất trộn phụ gia khoan hầm, lấy ngày 16/3/2021 tại Ga S9 Kim Mã, từ các lớp địa tầng GU1-s, GU3&4 và GU5-a, trộn với hai loại bọt CLB F5/AC và CLB F5/TM [14]. Kết quả phân tích 16 chỉ tiêu theo QCVN 07:2009/BTNMT [23] được tóm tắt trong Bảng 6.

Bảng 6. Kết quả phân tích 16 chỉ tiêu môi trường của mẫu đại diện trộn bọt CLB F5/AC tại Ga S9, Metro Hà Nội Tuyến 3

TT	Chỉ tiêu	Kết quả (mg/L ngâm chiết)	Giới hạn QCVN 07 (mg/L)	Kết quả (ppm tuyệt đối)	Giới hạn QCVN 07 (ppm)	Đánh giá
1	pH	6,38	–	–	–	Đạt
2	Asen (As)	< 0,01	2	1,89	14,92	Đạt
3	Bari (Ba)	0,41	100	64,92	746	Đạt
4	Cadimi (Cd)	< 0,01	0,5	< 1,8	3,73	Đạt
5	Chì (Pb)	< 0,01	15	13,95	111,9	Đạt
6	Coban (Co)	0,05	80	9,94	596,8	Đạt
7	Kẽm (Zn)	0,21	250	151,72	1.865	Đạt
8	Niken (Ni)	0,03	70	22,16	522,2	Đạt
9	Selen (Se)	< 0,01	1	< 1,8	7,46	Đạt
10	Thủy ngân (Hg)	< 0,01	0,2	< 0,2	1,492	Đạt
11	Crôm VI (Cr^{6+})	< 0,5	5	< 0,015	37,3	Đạt
12	Tổng dầu	17,34	50	< 50	373	Đạt
13	Phenol	Không phát hiện	1.000	< 0,005	7.460	Đạt
14	Benzen	< 0,003	0,5	< 0,003	3,73	Đạt
15	Tổng xyanua	–	–	< 0,54	220,07	Đạt
16	Bạc (Ag)	< 0,01	5	< 1,8	37,3	Đạt

Nguồn: Báo cáo thí nghiệm số 00071.1/2021/PKQ [26]. Ghi chú: hai cột kết quả là hai phép thử độc lập, không phải hai cách quy đổi của cùng một phép đo — cột mg/L là nồng độ trong dịch ngâm chiết so với ngưỡng Ctc, cột ppm là hàm lượng tuyệt đối trong mẫu rắn so với ngưỡng Htc của QCVN 07:2009/BTNMT; mẫu chỉ được phân định là chất thải rắn công nghiệp thông thường khi đạt đồng thời cả hai ngưỡng. Giá trị tổng dầu 17,34 mg/L phản ánh lượng bọt CLB F5/AC tồn dư, thấp hơn ngưỡng 50 mg/L.

Toàn bộ 6 mẫu, gồm 3 mẫu trộn CLB F5/AC và 3 mẫu trộn CLB F5/TM, đều không có thông số nào vượt ngưỡng QCVN 07:2009/BTNMT. Trên cơ sở đó, nhà thầu đã chính thức phân định hỗn hợp đất thải là chất thải rắn công nghiệp thông thường theo Điều 72 khoản 1c Luật Bảo vệ Môi trường 2020 [14]. Đây là căn cứ pháp lý và thực tiễn đầu tiên được công bố tại Việt Nam cho phép tái sử dụng mùn TBM-EPB trong xây dựng. Cần nhấn mạnh rằng dữ liệu này xác nhận an toàn môi trường bằng đo đạc trực tiếp nhưng không đo IP và MX; do đó nó bổ trợ chứ không thay thế cho khung phân loại IP/MX và kết quả kiểm chứng ở Mục 3.3.

4.4. Quy trình phân loại nhanh tại hiện trường

Quy trình trình bày trong Bảng 7 hướng dẫn phân loại đất đào EPB tại hiện trường từ khi lấy mẫu đến khi ra quyết định nhóm sử dụng, gắn với hệ tiêu chuẩn TCVN hiện hành [27]. Ngưỡng quyết định trong quy trình được lấy theo hệ tiêu chí đã trình bày ở Mục 3.1.

Bảng 7. Quy trình phân loại đất đào EPB tại hiện trường theo bốn bước

Bước	Hoạt động	Tiêu chuẩn	Ngưỡng quyết định	Nhóm
1	Ủ ≥ 7 ngày sau đào, lấy mẫu	Carigi và cs. [18]	Đủ 7 ngày: tiếp tục	–
2	Xác định IP (giới hạn Atterberg); riêng lớp được mô tả là bụi hoặc sét hữu cơ (GU1-s) xác định thêm hàm lượng hữu cơ theo phương pháp mất khi nung	TCVN 4197:2012 [27]	IP < 4%: loại; 4% ≤ IP ≤ 7%: Nhóm A gián tiếp (thay bentonit một phần, cần bổ sung bentonit khi phối trộn); IP > 7%: Nhóm A trực tiếp. Nếu là đất chuyển tiếp SM/SC, xét song song bước 3. Với lớp hữu cơ, chỉ giữ Nhóm A khi hàm lượng hữu cơ ≤ 5%; nếu vượt ngưỡng thì chuyển sang kênh vật liệu đắp nền (Mục 4.2)	A trực tiếp, A gián tiếp hoặc loại
3	Xác định MX (thành phần hạt)	TCVN 4198:2014 [21]	MX ≤ 2,1: B gián tiếp (trộn 1:1 với cát sông); 2,1 < MX ≤ 3,2: B trực tiếp; MX > 3,2: loại	B trực tiếp, B gián tiếp hoặc C
4*	Thử nghiệm vữa quy mô nhỏ khi 7% ≤ IP ≤ 9%, hoặc khi bước 2 và bước 3 cho kết luận khác nhau	Theo Zhang và cs. [8]	Đạt đồng thời độ chảy, độ tách nước và cường độ nén: giữ Nhóm A; không đạt: hạ xuống Nhóm B	A hoặc B

Ghi chú: bước 4 là bắt buộc đối với lớp GU5-a (IP bằng 7%) vì hai nhánh cho kết luận khác nhau; kết quả thử nghiệm vữa là căn cứ phân loại cuối cùng.

4.5. Chương trình thử nghiệm đề xuất và khoảng trống nghiên cứu

Dựa trên khung phân loại và kết quả kiểm chứng, chương trình thử nghiệm bốn giai đoạn được đề xuất: (1) lập hồ sơ vật liệu trước thi công, dùng Bảng 5 để lập bản đồ phân loại nhóm A, B, C theo lý trình đào; (2) thí nghiệm đặc trưng mùn sau cải tạo, đo IP, MX, độ ẩm và hàm lượng hữu cơ theo TCVN 4197:2012 [27] và TCVN 4198:2014 [21]; (3) thử nghiệm vữa quy mô nhỏ theo bước 4 của Bảng 7 cho lớp GU5-a và các lớp biên, đo độ chảy, độ tách nước và cường độ nén ở 7 và 28 ngày, đây là giai đoạn được ưu tiên; (4) kết nối kết quả thí nghiệm với dữ liệu vận hành TBM để dự báo nhóm mùn theo lý trình.

Dữ liệu thực nghiệm môi trường tại Tuyến 3 đã giải quyết một phần khoảng trống quan trọng là xác nhận tính an toàn môi trường của mùn TBM-EPB trong điều kiện địa tầng Hà Nội. Tuy nhiên, ba khoảng trống còn lại cần được tiếp tục nghiên cứu: thiếu dữ liệu thực nghiệm về IP và MX đo trực tiếp trên mùn EPB sau ủ 7 ngày tại Hà Nội; chưa có thử nghiệm vữa quy mô nhỏ sử dụng mùn thực tế của Hà Nội; và thiếu dữ liệu vận hành TBM theo từng lớp địa tầng để mô hình hóa mối liên hệ giữa cải tạo đất, tính chất mùn và khả năng tái sử dụng. Đây cũng là các hướng đang được quan tâm trong nghiên cứu gần đây về chỉ số tái chế đất sét bão hòa cao và vật liệu nền chế tạo từ chất thải rắn công

nghiệp [10, 28].

5. Thảo luận về giải pháp nâng cao và kinh tế tuần hoàn

5.1. Từ quản lý chất thải sang quản lý dòng vật liệu

Cách tiếp cận kinh tế tuần hoàn đòi hỏi chuyển cách nhìn từ xử lý đất thải sang quản lý dòng vật liệu: mùn TBM vừa là đầu ra của quá trình đào hầm vừa là đầu vào của quá trình sản xuất vữa chèn lấp. Sự kết nối này giảm tải giao thông đô thị, giảm khai thác tài nguyên và giảm chi phí xử lý, phù hợp với xu hướng tái sử dụng vật liệu thải trong công trình ngầm đô thị [2] và các nghiên cứu tái sử dụng chất thải đô thị tại Hà Nội [12].

5.2. Tích hợp phân loại nhanh với dữ liệu thi công

Một hướng nâng cao là tích hợp phân loại nhanh với dữ liệu thi công TBM: lý trình, loại địa tầng, thông số vận hành máy và thông số bọt (FER, FIR, nồng độ chất tạo bọt) [14] được ghi liên tục nên có thể dùng để dự báo sơ bộ nhóm mùn trước khi lấy mẫu chính thức, rút ngắn thời gian ra quyết định tại hiện trường.

5.3. Lợi ích vòng đời và các rào cản triển khai

Tái sử dụng đất đào EPB tạo ra lợi ích ở nhiều cấp độ: giảm khối lượng vận chuyển đến bãi đổ thải, giảm nhu cầu khai thác bentonit và cát thương phẩm, và giảm phát thải khí nhà kính từ vận chuyển. Với khoảng 165.000 m^3 thuộc Nhóm A trong tổng 452.000 m^3 của Tuyến 3 như đã xác định ở Mục 4.2, tiềm năng kinh tế là đáng kể. Các nghiên cứu về cải thiện vật liệu đắp, lấp từ đất sét và vật liệu nền chế tạo từ chất thải rắn công nghiệp còn cho thấy dư địa mở rộng giá trị tái sử dụng vượt ra ngoài phạm vi vữa chèn lấp [28, 29].

Để định lượng các lợi ích này ở mức bậc một cho Metro Tuyến 3, một mô hình tính toán đơn giản được xây dựng theo hai kênh. Kênh thứ nhất là thay thế vật liệu trong vữa chèn lấp. Với hầm đôi S9–S12 dài $2 \times 4{,}0$ km, thể tích vành khăn lý thuyết giữa đường kính đào 6,55 m và đường kính ngoài vỏ hầm 6,30 m là 2,52 m^3/m, hệ số bơm vữa 1,45, tổng nhu cầu vữa khoảng 29.200 m^3. Với hàm lượng điển hình 65 kg bentonit và 850 kg cát trên mỗi m^3 vữa [8], khối lượng vật liệu thương phẩm được thay thế là khoảng 1.900 tấn bentonit và 24.800 tấn cát, tương đương 16.500 m^3 cát. Kênh thứ hai là tránh chi phí đổ thải: toàn bộ khối lượng thuộc Nhóm A, A* và A/B, khoảng 414.000 m^3, được chuyển sang tái sử dụng tại chỗ hoặc làm vật liệu đắp thay vì vận chuyển đến bãi thải.

Kết quả ước tính được trình bày trong Bảng 8. Tổng chi phí tránh được khoảng 85 tỷ đồng, tương đương 3,3 triệu USD, và tổng phát thải tránh được khoảng 2.900 tấn CO_2 tương đương, tương ứng khoảng 735 tấn CO_2 tương đương trên mỗi ki-lô-mét tuyến. Hai nhận xét đáng chú ý được rút ra. Thứ nhất, vữa chèn lấp là kênh tái sử dụng có giá trị đơn vị cao nhưng khối lượng nhỏ: chỉ khoảng 14.600 m^3 mùn được hấp thụ vào vữa, tương đương 3% tổng khối lượng đất đào; phần lớn lợi ích khối lượng đến từ việc khung phân loại và hồ sơ môi trường cho phép khoảng 414.000 m^3 (Nhóm A, A*, A/B) không phải vào bãi thải. Thứ hai, cả chi phí và phát thải tránh được đều bị chi phối bởi kênh vận chuyển và đổ thải, chiếm khoảng 80% tổng lợi ích ở cả hai chỉ tiêu. Điều này hàm ý rằng đơn giá xử lý chất thải do cơ quan quản lý ấn định có ảnh hưởng đến hiệu quả kinh tế của việc tái sử dụng lớn hơn bất kỳ thông số kỹ thuật nào của vữa.

Các rào cản triển khai chính gồm bốn nhóm. Về pháp lý, đất đào thường bị mặc định là chất thải; tuy nhiên kết quả thực nghiệm trình bày ở Mục 4.3 đã giải quyết rào cản này cho điều kiện địa tầng Hà Nội. Về kỹ thuật, cần thử nghiệm vữa quy mô nhỏ cho từng lô mùn, đặc biệt ở vùng biên giới của chỉ số dẻo. Về hậu cần, cần quy trình và hạ tầng tập kết, ủ và phân loại riêng như đã phân tích ở Mục 2.2. Về hành chính, cần sự phối hợp chặt chẽ giữa nhà thầu, tư vấn giám sát và cơ quan quản lý môi trường.

Bảng 8. Ước tính bậc một lợi ích kinh tế và phát thải tránh được khi tái sử dụng đất đào EPB, Metro Hà Nội Tuyến 3

Hạng mục	Giá trị ước tính	Ghi chú tính toán
Nhu cầu vữa chèn lấp	≈ 29.200 m^3	8,0 km × 2,52 m^3/m × hệ số bơm 1,45
Bentonit thương phẩm được thay thế	≈ 1.900 tấn	65 kg/m^3 vữa
Cát thương phẩm được thay thế	≈ 24.800 tấn (16.500 m^3)	850 kg/m^3 vữa
Mùn được hấp thụ vào vữa	≈ 14.600 m^3 (3% tổng)	0,5 m^3 mùn tơi/m^3 vữa
Khối lượng không phải đổ thải	≈ 414.000 m^3	Nhóm A + A* + A/B
Chi phí vật liệu tránh được	≈ 16,5 tỷ đồng	Bentonit 4,9 tỷ + cát 11,6 tỷ
Chi phí đổ thải tránh được	≈ 68,3 tỷ đồng	414.000 m^3 × chênh 165.000 đồng/m^3
Tổng chi phí tránh được	≈ 85 tỷ đồng (≈ 3,3 triệu USD)	Tổng hai kênh
Phát thải tránh được — vật liệu	≈ 470 tấn CO_2tđ	Bentonit 285 t + cát 186 t
Phát thải tránh được — vận chuyển	≈ 2.460 tấn CO_2tđ	745.000 tấn × 30 km × 0,11 kg/tấn·km
Tổng phát thải tránh được	≈ 2.900 tấn CO_2tđ (≈ 735 tấn/km tuyến)	Tổng hai kênh

Ghi chú: đơn giá tham chiếu thị trường Hà Nội năm 2026 — bentonit 2,6 triệu đồng/tấn [30], cát xây dựng 700.000 đồng/m^3 theo công bố giá vật liệu của Sở Xây dựng Hà Nội [30]; đơn giá xử lý bùn thải TBM 210.000 đồng/m^3 và chi phí vận chuyển tái sử dụng nội bộ 45.000 đồng/m^3 theo hồ sơ dự án [14]. Hệ số phát thải: bentonit 0,15 kg CO_2tđ/kg, cát 0,0075 kg CO_2tđ/kg, vận chuyển đường bộ 0,11 kg CO_2tđ/tấn·km [31]; dung trọng mùn tơi 1,8 tấn/m^3; chênh lệch cự ly vận chuyển giữa bãi thải và điểm tái sử dụng lấy bằng 30 km. Đây là ước tính bậc một nhằm xác định thứ tự độ lớn; phân tích độ nhạy đầy đủ nằm ngoài phạm vi bài báo.

6. Kết luận

Bài báo đã xây dựng, kiểm chứng và áp dụng một khung định lượng để phân loại và tái sử dụng đất đào từ TBM-EPB trong vữa chèn lấp đồng bộ cho điều kiện địa tầng và pháp lý của Metro Hà Nội. Các kết luận chính như sau:

(1) Hệ tiêu chí định lượng IP/MX phân loại đất hạt mịn theo chỉ số dẻo và đất hạt thô theo mô-đun độ lớn đã được kiểm chứng bằng hai công trình thực tế tại Metro Zhengzhou, với dự báo phù hợp kết quả thực đo.

(2) Áp dụng khung phân loại lên địa tầng Metro Hà Nội Tuyến 3 cho thấy trong tổng khối lượng ước tính 452.000 m^3 có khoảng 37% (165.000 m^3) thuộc Nhóm A, 3% (13.000 m^3) thuộc Nhóm A*, 52% (236.000 m^3) thuộc Nhóm A/B và 8% (38.000 m^3) thuộc Nhóm C.

(3) Ngưỡng IP lớn hơn 7% là điều kiện cần nhưng chưa đủ đối với đất bùn sét có hàm lượng hạt bụi chiếm ưu thế. Lớp GU5-a (IP bằng 7%) cho kết luận khác nhau theo hai nhánh nên thuộc Nhóm A/B, bắt buộc thử nghiệm vữa quy mô nhỏ.

(4) Kết quả phân tích 16 chỉ tiêu môi trường trên mùn TBM-EPB của Tuyến 3 đều đạt QCVN 07:2009/BTNMT và được phân định là chất thải rắn công nghiệp thông thường, tạo nền tảng pháp lý

thực tiễn đầu tiên được công bố tại Việt Nam cho việc tái sử dụng loại vật liệu này.

(5) Quy trình phân loại nhanh bốn bước tại hiện trường, từ xác định giới hạn Atterberg đến thử nghiệm vữa quy mô nhỏ, tương thích với hệ tiêu chuẩn TCVN hiện hành và dữ liệu địa kỹ thuật sẵn có của dự án.

(6) Ước tính bậc một cho Tuyến 3 cho thấy tổng chi phí tránh được khoảng 85 tỷ đồng và phát thải tránh được khoảng 2.900 tấn CO_2tđ, trong đó kênh vữa chèn lấp chỉ hấp thụ khoảng 3% khối lượng mùn còn khoảng 80% lợi ích đến từ việc không phải vận chuyển và đổ thải. Hàm ý là đơn giá xử lý chất thải có ảnh hưởng đến hiệu quả kinh tế của việc tái sử dụng lớn hơn bất kỳ thông số kỹ thuật nào của vữa.

Nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào thí nghiệm trực tiếp đo IP và MX trên mùn TBM sau ủ 7 ngày tại Hà Nội, thử nghiệm vữa quy mô nhỏ sử dụng mùn thực tế từ Tuyến 3, và phân tích dữ liệu vận hành TBM để mô hình hóa mối liên hệ giữa cải tạo đất, tính chất mùn và nhóm tái sử dụng.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng Claude để cải thiện ngôn ngữ hoặc khả năng diễn đạt của bản thảo. Tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Hale, S. E., Roque, A. J., Okkenhaug, G., Sørmo, E., Lenoir, T., Carlsson, C., Kupryianchyk, D., Flyhammar, P., Žlender, B. (2021). The reuse of excavated soils from construction and demolition projects: Limitations and possibilities. *Sustainability*, 13(11):6083.

[2] Sharghi, M., Jeong, H. (2024). The potential of recycling and reusing waste materials in underground construction: A review of sustainable practices and challenges. *Sustainability*, 16(12):4889.

[3] Ban Quản lý Đường sắt Đô thị Hà Nội (MRB) (2025). *Báo cáo đánh giá tác động môi trường Dự án tuyến đường sắt đô thị số 3, đoạn Nhổn – Ga Hà Nội*. Hà Nội, Việt Nam.

[4] Oggeri, C., Fenoglio, T. M., Vinai, R. (2014). Tunnel spoil classification and applicability of lime addition in weak formations for muck reuse. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44:97–107.

[5] Kataguiri, K., Boscov, M. E. G., Teixeira, C. E., Angulo, S. C. (2019). Characterization flowchart for assessing the potential reuse of excavation soils in Sao Paulo city. *Journal of Cleaner Production*, 240: 118215.

[6] Wu, Y., Mooney, M. A., Cha, M. (2018). An experimental examination of foam stability under pressure for EPB TBM tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77:80–93.

[7] Luo, G., Xiao, C., Liu, Y., Feng, K., Ren, Q. (2022). Research on the reuse of discharged soil from EBP shield tunnels in synchronous grouting material. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1):8102488.

[8] Zhang, C., Yang, J., Fu, J., Wang, S., Yin, J., Xie, Y. (2020). Recycling of discharged soil from EPB shield tunnels as a sustainable raw material for synchronous grouting. *Journal of Cleaner Production*, 268:121947.

[9] Xu, J., Xiao, C., Wu, H.-N., Kang, X. (2020). Reuse of excavated clayey silt in cement–fly ash–bentonite hybrid back-fill grouting during shield tunneling. *Sustainability*, 12(3):1017.

[10] Lu, Y., Huang, M., Lai, F., Xu, C., Peng, L. (2024). Quantitative interrelations of conditioning and recycling indices of high-saturation clay soils for EPB shield tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 154:106083.

[11] Wang, X., Zhao, W., Wang, Z., Wang, Z., Sun, D., Tang, X. (2023). Recycling the discharged soil from EPBS tunnels as a soil conditioner and its rheological behaviors. *Journal of Cleaner Production*, 418: 138224.

[12] Anh, T. T., Huyền, Đ. T. T., Hạ, T. Đ., Khải, N. M. (2026). Đánh giá khả năng tái sử dụng bùn hồ sau bãi lọc trồng cây làm vật liệu xây dựng. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 20(2V):42–53.

[13] Vinai, R., Oggeri, C., Peila, D. (2008). Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3):308–317.

[14] Hyundai E&C – Ghella JV (2023). *Report on the hazard identification of soil-sludge mixture during tunnel construction, Hanoi Pilot Light Metro Line, Section Nhon – Hanoi Railway Station*. Document No. HGU-MLT-00701-23-E, Hà Nội, Việt Nam (tài liệu dự án, không công bố trực tuyến).

[15] Ye, X., Wang, S., Yang, J., Sheng, D., Xiao, C. (2017). Soil conditioning for EPB shield tunneling in argillaceous siltstone with high content of clay minerals: Case study. *International Journal of Geomechanics*, 17(4):05016002.

[16] Kim, T.-H., Kim, B.-K., Lee, K.-H., Lee, I.-M. (2019). Soil conditioning of weathered granite soil used for EPB shield TBM: A laboratory scale study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(4):1829–1838.

[17] CONDAT (2020). *Technical data sheets – CLB F5/AC and CLB F5/TM soil conditioning foaming agents*. Chasse-sur-Rhône, France (tài liệu kỹ thuật của nhà sản xuất).

[18] Carigi, A., Todaro, C., Martinelli, D., Amoroso, C., Peila, D. (2020). Evaluation of the geo-mechanical properties property recovery in time of conditioned soil for EPB-TBM tunneling. *Geosciences*, 10(11): 438.

[19] Carigi, A., Todaro, C. (2025). Reuse of EPB-tunnelling excavated soil: An approach of logistic constraints estimation through modified Proctor test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 157:106263.

[20] SYSTRA, Hyundai-Ghella JV (2018). *Geotechnical baseline report – Package CP-03, Hanoi Metro Line 3 (Nhon – Hanoi Railway Station)*. Ban Quản lý Đường sắt Đô thị Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam (tài liệu dự án, không công bố trực tuyến).

[21] TCVN 4198:2014. *Đất xây dựng – Các phương pháp xác định thành phần hạt trong phòng thí nghiệm*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, Việt Nam.

[22] Thông tư 02/2022/TT-BTNMT (2022). *Quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật Bảo vệ môi trường*. Bộ Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội, Việt Nam.

[23] QCVN 07:2009/BTNMT. *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về ngưỡng chất thải nguy hại*. Bộ Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội, Việt Nam.

[24] Bavasso, I., Vilardi, G., Sebastiani, D., Di Giulio, A., Di Felice, M., Di Biase, A., Miliziano, S., Di Palma, L. (2020). A rapid experimental procedure to assess environmental compatibility of conditioning mixtures used in TBM-EPB technology. *Applied Sciences*, 10(12):4138.

[25] Sauvaget, B., de Fouquet, C., Le Guern, C., Brunet, J.-F., Belbeze, S., Roussel, H. (2020). Anticipating geochemical compatibility to reuse excavated soils at urban scale: Are usual statistical tools effective? *Journal of Geochemical Exploration*, 213:106522.

[26] Institute of Environmental Technology (IET), Vietnam Academy of Science and Technology (2021). *Testing report: Testing and assessment of mixture of soil and foam, Hanoi Pilot Light Metro Line, Package HPLML/CP03*. Report No. 00071.1/2021/PKQ (Vilas 386, Vimcerts 079), Hà Nội, Việt Nam (tài liệu dự án, không công bố trực tuyến).

[27] TCVN 4197:2012. *Đất xây dựng – Phương pháp xác định giới hạn dẻo và giới hạn chảy trong phòng thí nghiệm*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, Việt Nam.

[28] Xu, C., Wang, X., Liu, L., Li, Y. (2025). Investigation on the properties of alkali-activated industrial solid waste and excavated-soil-based controlled low-strength materials. *Materials*, 18(11):2474.

[29] Prum, S., Jumnongpol, N., Eamchotchawalit, C., Kantiwattanakul, P., Sooksatra, V., Jarearnsiri, T., Passananon, S. (2019). Guideline for backfill material improvement for water supply pipeline construction on Bangkok clay, Thailand. *Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19)*. Paper No. ICSECT 152.

[30] Sở Xây dựng Hà Nội (2026). *Công bố giá một số vật liệu xây dựng quý II năm 2026*. Số 02.01/2026/CBGVL-SXD, ngày 20/6/2026, Hà Nội, Việt Nam.

[31] Ecoinvent Association (2021). *ecoinvent database version 3.8*. Zürich, Switzerland.