

ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG TÁI SỬ DỤNG Bùn HỒ SAU BÃI LỌC TRỒNG CÂY LÀM VẬT LIỆU XÂY DỰNG

Trần Thúy Anh^a, Đặng Thị Thanh Huyền^{a,*}, Trần Đức Hạ^b, Nguyễn Mạnh Khải^c

^aKhoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
số 55 đường Giải Phóng, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

^bHội Cấp thoát nước Việt Nam, số 1 Phạm Huy Thông, Phường Giảng Võ, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
số 334 Nguyễn Trãi, Phường Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 20/3/2026, Sửa xong 23/4/2026, Chấp nhận đăng 20/5/2026

Tóm tắt

Bùn hồ đô thị Hà Nội đã được nhiều nghiên cứu khẳng định sự phù hợp để tái sử dụng trong sản xuất vật liệu xây dựng. Tuy nhiên, loại bùn trên cần được xử lý nhằm tách nước và ổn định các chất ô nhiễm cũng như cần được phân loại các hướng tái sử dụng khác nhau. Vì thế, nghiên cứu này tập trung vào đánh giá đặc tính các nhóm bùn hồ đô thị tại Hà Nội sau tiền xử lý bằng bãi lọc trồng cây theo định hướng làm vật liệu xây dựng. Kết quả thực nghiệm từ hai hồ đại diện của từng nhóm cho thấy bùn sau xử lý không phải là chất thải nguy hại. Hàm lượng SiO₂ cao (64,8–65,8%) và tỷ lệ hạt tương đương cát nghiền. Bùn hồ Bảy Mẫu (Hồ 1, đại diện cho hồ đã tách nước thải) có hàm lượng kim loại nặng cao, phù hợp làm vật liệu san lấp cho đất loại 3 (theo QCVN 03:2023/BTNMT) và thay thế một phần đất sét sản xuất gạch nung. Trong khi đó, bùn hồ Kim Liên nhỏ (Hồ 2, đại diện cho các hồ đang tiếp nhận nước thải) có độ ẩm (17,2%) và hàm lượng kim loại nặng thấp hơn nên thích hợp để san nền đất loại 2 và sản xuất cốt liệu nhẹ. Các kết quả trên cho thấy tiềm năng tái sử dụng của bùn hồ đô thị sau khi đã được xử lý và làm khô bằng bãi lọc trồng cây. Qua đó, đóng góp vào phát triển kinh tế tuần hoàn của ngành xây dựng.

Từ khóa: bùn hồ đô thị; bãi lọc trồng cây; tái sử dụng bùn thải; vật liệu san nền; vật liệu xây dựng.

EVALUATING THE REUSE POTENTIAL OF LAKE SEDIMENT TREATED BY CONSTRUCTED WETLANDS AS CONSTRUCTION MATERIALS

Abstract

Numerous studies have confirmed that Hanoi's urban lake sediment is suitable for reuse in the production of construction materials. However, this sediment needs to be treated for dewatering and pollutant stabilization, and classified into different reuse directions. Therefore, this study focuses on evaluating the characteristics of Hanoi's urban lake sediment groups after pre-treatment by constructed wetlands oriented towards application on construction materials. Experimental results from two representative lakes of each group show that the treated sediment is not hazardous waste. High SiO₂ content (64.8–65.8%) and a particle size distribution are equivalent to crushed sand. Bay Mau Lake sediment (Lake 1, representing lakes with separated wastewater) has a high heavy metal content, making it suitable as a leveling material for type 3 soil (per QCVN 03:2023/BTNMT) and partly as a clay substitute in fired brick production. Meanwhile, Small Kim Lien Lake sediment (Lake 2, representing lakes currently receiving wastewater) has lower moisture (17.2%) and lower heavy metal content, making it appropriate for leveling type 2 soil and producing lightweight aggregates. These results demonstrate the reuse potential of post-treated urban lake sediment, contributing to the development of the circular economy in the construction sector.

Keywords: urban lake sediment; constructed wetland; waste sludge reuse; leveling material; construction materials.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(2V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(2V)-04) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Hệ thống hồ đô thị đóng vai trò quan trọng trong việc điều hòa vi khí hậu, cải thiện cảnh quan và tiêu thoát nước tại các đô thị Việt Nam [1]. Tuy nhiên, do quá trình đô thị hóa nhanh và hạ tầng thoát nước chưa đồng bộ, nhiều hồ đô thị (HĐT) trở thành điểm tiếp nhận đồng thời nước mưa và nước thải chưa qua xử lý. Từ đó, dẫn đến hiện tượng tích tụ trầm tích kéo dài. Theo Quyết định số

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

1614/QĐ-UBND năm 2023, Hà Nội sẽ có 3.164 hồ, ao và đầm không được phép san lấp. Số lượng lớn các hồ nêu trên sẽ tạo ra lượng lớn bùn HĐT sau nạo vét. Các HĐT có chế độ tiếp nhận nước thải và tần suất nạo vét rất khác biệt, từ nạo vét định kỳ 3–5 năm/lần đến hầu như không được nạo vét. Trong 125 HĐT nội thành Hà Nội, chỉ có 51 hồ (40,8%) đã được xây dựng hệ thống bao tách nước thải [2]. Tại Đà Nẵng, 23 trong tổng số 30 hồ nội đô vẫn đang tiếp nhận trực tiếp nước thải sinh hoạt [3]. Vì thế, dựa vào đặc điểm hạ tầng và công tác duy tu, HĐT được phân thành hai nhóm chính: hồ đã tách nước thải, được nạo vét định kỳ và hồ tiếp nhận nước thải, ít được nạo vét [4].

Phương pháp chôn lấp bùn tại các bãi đổ thải hoặc đổ thải ra biển không chỉ tốn kém mà còn gây ô nhiễm môi trường dài hạn [5, 6]. Thời gian gần đây, tái sử dụng (TSD) bùn nạo vét thành vật liệu xây dựng (VLXD) đang được xem là hướng tiếp cận bền vững hơn [7, 8]. Sử dụng bùn nạo vét sản xuất gạch lát mang lại hiệu quả kinh tế cao nhất, trong khi làm vật liệu san lấp giúp tối ưu hóa chi phí xử lý [5]. Kết quả đánh giá vòng đời của một số giải pháp TSD bùn nạo vét cũng kết luận rằng ổn định, hóa rắn bùn để sản xuất vật liệu san lấp có ảnh hưởng thấp đến môi trường trong cả ngắn hạn và dài hạn [6]. Kết quả thống kê tại Hoa Kỳ cho thấy tiềm năng của bùn nạo vét trong sản xuất bê tông, VLXD, nền đường, phục hồi sinh cảnh, lớp lót bãi chôn lấp và cải tạo đất nông nghiệp [7]. Tổng quan các nghiên cứu về tái sử dụng trầm tích nước ngọt trong sản xuất cốt liệu, gạch, phụ gia thay thế xi măng và vật liệu kích hoạt kiềm đã nhấn mạnh vai trò của tái sử dụng trầm tích trong giảm khai thác tài nguyên và thúc đẩy kinh tế tuần hoàn. Tuy nhiên, trầm tích thường giàu hữu cơ (>30%) nên cần có các giải pháp tách nước và xử lý bùn trước khi TSD [7, 8].

Ở Việt Nam, bùn HĐT thường có khối lượng lớn, độ ẩm cao và thành phần phức tạp. Kết quả phân tích bùn hồ Tây và hồ Hoàn Kiếm cho thấy bùn không thuộc nhóm chất thải nguy hại nhưng có độ ẩm rất lớn, cần tách nước và xử lý trước khi TSD, ví dụ như xi măng hóa rắn trước khi được dùng trong san nền [9]. Tổng hợp dữ liệu từ nhiều HĐT tại Hà Nội cho thấy bùn HĐT có hàm lượng hữu cơ dao động rộng (10–65% khối lượng khô), giàu Phốt-pho (2,6–3,8%) và Ni-tơ (2,9–4,3%), chủ yếu từ nguồn thải bên ngoài [10]. Bùn HĐT có KLN tích lũy dưới ngưỡng chất thải nguy hại theo QCVN 50:2013/BTNMT nên có thể được quản lý như chất thải thông thường. Tương tự như trên, tại Đà Nẵng, bùn HĐT có hàm lượng cát cao (52,2–90,1%), pH trung tính và hữu cơ thấp (1,1–6,0%). Bùn HĐT ở Đà Nẵng có nhiễm KLN nhưng vẫn phù hợp cho TSD làm vật liệu xây dựng sau xử lý [11]. Như vậy, nếu được tách nước và ổn định các chất ô nhiễm, bùn HĐT ở Việt Nam có tiềm năng TSD trong sản xuất VLXD như làm vật liệu san lấp, phụ gia cát nghiền và thay thế đất sét trong gạch.

Để đáp ứng đồng thời yêu cầu tách nước và ổn định bùn này, bãi lọc trồng cây (BLTC) hoạt động theo mẻ, phù hợp với chế độ nạo vét bùn tại Hà Nội đã được thử nghiệm [4]. Công nghệ trên giúp tăng hiệu quả tách nước nhờ các quá trình nén bùn, thấm lọc và bay hơi. Đồng thời, BLTC khoáng hóa hữu cơ, loại bỏ kim loại nặng và mầm bệnh thông qua các quá trình sinh học-hóa lý phức hợp trong khối bùn [12]. Mô hình thực nghiệm BLTC trồng Thủy trúc (*Cyperus alternifolius*) cho bùn hồ Bảy Mẫu (Hà Nội) có kết quả là độ ẩm giảm còn 36,2%, thể tích giảm còn 33,6% và chất rắn dễ bay hơi (VS) còn 6,5%. Sau khi làm khô và ổn định như trên, bùn hồ Bảy Mẫu dễ dàng chuyên chở hơn cho các mục đích TSD tiếp theo [13].

Tuy nhiên, để TSD được bùn HĐT sau xử lý bằng BLTC, các nghiên cứu trên vẫn tồn tại một số hạn chế. Thứ nhất, bùn sau xử lý bằng BLTC chưa được đánh giá toàn diện các tính chất cơ lý, hóa học và vi sinh vật theo hệ thống tiêu chuẩn cho nguyên liệu sản xuất VLXD. Thứ hai, chưa đề cập đến sự khác biệt giữa các nhóm HĐT (hồ đã tách nước thải và hồ còn tiếp nhận nước thải). Đặc điểm tiếp nhận nước thải và nạo vét bùn nêu trên có thể dẫn đến sự khác nhau trong tính chất từng loại bùn hồ và ảnh hưởng đến khả năng TSD bùn. Vì thế, nghiên cứu này hướng đến các mục tiêu là đánh giá toàn diện các đặc tính cơ lý, hóa học và vi sinh vật (VSV) của bùn HĐT sau xử lý bằng BLTC, so sánh

tính chất của từng loại bùn HDT với các yêu cầu kỹ thuật về vật liệu san lấp và nguyên liệu sản xuất VLXD cũng như đề xuất giải pháp TSD phù hợp theo từng nhóm bùn HDT.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Nghiên cứu được tiến hành với hai mẫu bùn đại diện cho các nhóm hồ theo đặc điểm tách nước thải và nạo vét bùn [4]. Hồ 1 (Hồ Bảy Mẫu) đại diện cho hồ đã được cải tạo, tách nước thải. Bùn chủ yếu hình thành do sự lắng đọng các chất lơ lửng, cặn bẩn cuốn trôi theo dòng nước chảy tràn bề mặt khi có mưa và xác thủy sinh vật. Bùn hồ Bảy Mẫu được nạo vét định kỳ 5 năm/lần. Bùn Hồ 2 (Hồ Kim Liên) đại diện cho hồ chưa tách nước thải hoàn toàn, tiếp nhận hỗn hợp nước mưa và nước thải sinh hoạt. Bùn chưa được nạo vét hoặc chỉ nạo vét thủ công.

2.2. Mô hình thí nghiệm

Hai loại bùn hồ được làm khô và tách nước trên hệ thống mô hình với lớp vật liệu đỡ (sỏi) và lọc (cát) và trồng cây Cỏ voi (*Pennisetum purpureum*) và Thủy trúc (*Cyperus alternifolius*). Các thí nghiệm được vận hành theo mẻ trong 166–175 ngày với các thông số cụ thể được nêu trong Bảng 1. Chi tiết về cấu hình và vận hành BLTC đã được công bố trong các nghiên cứu trước [13].

Bảng 1. Thông số vận hành các mô hình bãi lọc trồng cây xử lý bùn hoạt động theo mẻ

Thông số	Đơn vị	Bùn Hồ 1	Bùn Hồ 2
Thời gian tải bùn	Ngày	1	1
Thể tích bùn	L	175	175
Tải trọng bùn	kgTS/m ²	180	100
Tải trọng thủy lực	m ³ /m ²	0,7	0,7
Thời gian vận hành	Ngày	166	175

Ghi chú: TS: tổng chất rắn khô.

2.3. Phương pháp phân tích

Mẫu bùn sau xử lý được thu gom và phân tích các chỉ tiêu môi trường (pH_{KCl}), chỉ tiêu cơ lý (độ ẩm của bùn, tổng chất rắn, tổng chất rắn dễ bay hơi, thành phần hạt), chỉ tiêu hóa học (hàm lượng chất hữu cơ, thành phần oxit, KLN) và chỉ tiêu vi sinh vật (tổng Coliform, *E. coli*) theo các phương pháp tiêu chuẩn hiện hành.

2.4. Phương pháp ước lượng nồng độ ngậm chiết kim loại nặng

Trong nghiên cứu này, nồng độ ngậm chiết của các kim loại nặng được ước lượng lý thuyết dựa trên hàm lượng tổng số (ppm). Dựa theo quy định của phương pháp thử nghiệm ngậm chiết tiêu chuẩn US EPA Method 1311 [14] và TCVN 9239:2012 [15] với tỷ lệ dung dịch chiết : chất rắn = 20:1, nghiên cứu đặt giả thiết kịch bản xấu nhất là 100% kim loại nặng bị hòa tan hoàn toàn. Khi đó, nồng độ ngậm chiết tối đa lý thuyết (mg/L) được tính bằng cách chia hàm lượng tổng số (mg/kg) cho 20.

2.5. Phương pháp so sánh và đánh giá

Kết quả chất lượng bùn được so sánh với các văn bản QCVN, TCVN liên quan đến yêu cầu kỹ thuật của nguyên liệu, cốt liệu sản xuất VLXD (Bảng 2).

Bảng 2. Tổng hợp các tiêu chuẩn và chỉ tiêu phân tích và so sánh chính liên quan đến sản xuất vật liệu xây dựng

Mục đích đánh giá	Tiêu chuẩn áp dụng	Các chỉ tiêu so sánh chính
Xác định chất thải nguy hại	QCVN 07:2025/BNNMT [16]	pH; KLN (As, Cd, Pb, Hg, Zn)
Vật liệu san lấp	QCVN 03:2023/BTNMT [17]; TCVN 4447:2012 [18]	KLN (As, Cu, Zn, Cr); chất hữu cơ (OM)
Nguyên liệu sản xuất gạch đất sét nung, gốm xây dựng	TCVN 6300:1997 [19]; Phụ lục F QCVN 16:2023/BXD [20]	Oxit (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃); OM
Sản xuất gạch không nung và cốt liệu	TCVN 7570:2006 [21]; TCVN 9205:2012 [22]	Thành phần hạt; OM

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá tính chất nguy hại của bùn hồ sau xử lý

Các kết quả phân tích thực nghiệm được tiến hành trong giai đoạn 2021–2022, thời điểm QCVN 50:2013/BTNMT đang có hiệu lực. Tuy nhiên, để đảm bảo quy chuẩn mới nhất là QCVN 07:2025/BNNMT ở thời điểm hiện tại, các kết quả về hàm lượng KLN được ước tính từ hàm lượng ppm sang nồng độ ngậm chiết (Bảng 3). Theo quy định của các phương pháp thử nghiệm ngậm chiết tiêu chuẩn (như US EPA Method 1311 và TCVN 9239:2012), phần rắn của mẫu chất thải được chiết với một lượng dung dịch chiết bằng 20 lần khối lượng pha rắn hay tỷ lệ dung dịch chiết : chất rắn = 20:1 [14, 15].

Kết quả thu được thể hiện trong Bảng 3 có sự tương đồng với các nghiên cứu trên trầm tích cảng biển [5]. Qua đó, khẳng định được bùn HĐT sau xử lý bằng BLTC đủ điều kiện an toàn để TSD tại chỗ hoặc làm VLXD. Tuy nhiên, một số kim loại như Kẽm (Zn) có thể ảnh hưởng đến quá trình thủy hóa xi măng. Mặc dù vậy, nếu các KLN trên được cố định tốt vào cấu trúc vật liệu thì sẽ không gây nguy hại tới môi trường [23].

Bảng 3. So sánh tính chất bùn sau xử lý với ngưỡng chất thải nguy hại

Thông số	Đơn vị	Bùn Hồ 1	Bùn Hồ 2	Ngưỡng CTNH (mg/L)	Ghi chú
pH	-	7,29±0,11	7,05±0,05	≤ 2 hoặc ≥ 12,5	An toàn
As	ppm	28,5±5,2	27,0±5,4	≥ 5,0*	An toàn
Cd	ppm	1,9±0,2	0,4±0,0	≥ 1,0*	An toàn
Pb	ppm	9,8±0,9	30,5±0,6	≥ 5,0*	An toàn
Cr	ppm	72,9±12,8	66,1±3,3	≥ 5,0*	An toàn
Hg	ppm	0,5±0,1	-	≥ 0,2*	An toàn
Co	ppm	-	-	≥ 80*	An toàn

(-) Không phát hiện; * Ngưỡng quy định theo nồng độ ngậm chiết (mg/L) theo QCVN 07:2025/BNNMT. Dựa trên tỷ lệ dung dịch chiết : chất rắn = 20:1 của phương pháp ngậm chiết USEPA Method 1311 [14] và TCVN 9239:2012 [15], với hàm lượng tổng số (ppm) được chia cho 20 để ước tính nồng độ ngậm chiết (mg/L).

3.2. Đánh giá khả năng tái sử dụng bùn hồ sau xử lý làm vật liệu san lấp

Để có thể được TSD làm vật liệu san lấp (đất tôn nền), bùn HĐT phải đáp ứng đồng thời hai điều kiện là: (i) An toàn, không gây ô nhiễm thứ cấp, theo quy định về chất lượng môi trường đất (QCVN 03:2023/BTNMT) [17] và (ii) Đạt yêu cầu về đầm nén, ổn định nền móng (TCVN 4447:2012) [18].

Bảng 4. So sánh hàm lượng kim loại nặng của bùn hồ với chất lượng môi trường đất

Thông số (mg/kg khô)	Chất lượng bùn hồ		Yêu cầu về chất lượng môi trường đất QCVN 03:2023/BTNMT [17]		
	Bùn Hồ 1	Bùn Hồ 2	Đất loại 1	Đất loại 2	Đất loại 3
Cd	1,9±0,1	0,4±0,0	4	10	60
Cu	154,0±20,9	25,1±8,4	150	500	2000
As	28,5±5,2	27,0±5,4	25	50	200
Hg	0,5±0,1	-	12	30	60
Pb	9,8±0,9	30,5±0,6	200	400	700
Tổng Cr	72,9±12,8	66,1±3,3	150	200	250
Zn	801,1±132,0	542,7±52,6	300	600	2000
Ni	35,6±5,0	24,7±2,9	100	200	500

Ghi chú: Theo QCVN 03:2023/BTNMT [17]:

- Đất loại 1: đất nông nghiệp; nuôi trồng thủy sản; làm muối; đất ở tại nông thôn, đô thị; sản xuất VLXD, làm đồ gốm; đất có di tích lịch sử, văn hóa, danh lam thắng cảnh, sinh hoạt cộng đồng, chợ, công trình công cộng khác.

- Đất loại 2: đất rừng; đất xây dựng trụ sở cơ quan, công trình sự nghiệp; thương mại, dịch vụ; công trình năng lượng, bưu chính, viễn thông; đất cơ sở tôn giáo, tín ngưỡng, đình, đền, . . . ; đất sông, ngòi, kênh, rạch và mặt nước chuyên dùng; nghĩa trang, nghĩa địa, nhà tang lễ, hỏa táng; đất phi nông nghiệp khác.

- Đất loại 3: đất sử dụng cho mục đích quốc phòng an ninh; khu công nghiệp, cụm công nghiệp, khu chế xuất; cơ sở sản xuất phi nông nghiệp; hoạt động khoáng sản; các công trình giao thông; bãi thải, xử lý chất thải; đất chưa đưa vào sử dụng theo quy định của pháp luật về đất đai.

Mặc dù BLTC rất hiệu quả trong giảm độ ẩm và khoáng hóa chất hữu cơ, các nguyên tố KLN vẫn còn tích tụ lại trong bùn sau xử lý. Kết quả đối chiếu với QCVN 03:2023/BTNMT (Bảng 4) cho thấy hai nhóm hồ có định hướng làm vật liệu san lấp khác nhau.

Với bùn Hồ 1 (hồ Bảy Mẫu), hàm lượng Kẽm (Zn) đạt 801,1 mg/kg, vượt quá giới hạn cho phép đối với đất loại 1 (300 mg/kg) và đất loại 2 (600 mg/kg). Hàm lượng Đồng (Cu) đạt 154,0 mg/kg và Asen (As) đạt 28,5 mg/kg, đều vượt nhẹ so với ngưỡng quy định của Đất loại 1 nhưng vẫn nằm trong giới hạn an toàn của đất loại 2 và 3. Các kim loại còn lại (Cd, Hg, Pb, Cr, Ni) đều ở mức thấp, đạt chuẩn đất loại 1. Đặc điểm tích lũy KLN trên hoàn toàn tương đồng với 60 mẫu bùn thải thoát nước tại Đà Nẵng [11]. Như vậy, chỉ nên TSD bùn Hồ 1 trực tiếp làm đất san nền, vật liệu san lấp cho mục đích quốc phòng an ninh, khu công nghiệp, cơ sở sản xuất phi nông nghiệp và các bãi thải, xử lý chất thải với giới hạn Zn cho phép lên tới 2000 mg/kg. Để đảm bảo an toàn, cố định KLN, vật liệu san nền này cần trải qua quá trình ổn định, hóa rắn bằng xi măng như đề xuất với bùn chưa qua xử lý từ hồ Tây và hồ Hoàn Kiếm [9] hoặc trầm tích làm lớp nền đường [24]. Một cách khác là phối trộn làm gạch lát nền để tối ưu hóa hiệu quả kinh tế [5].

Với bùn Hồ 2 (hồ Kim Liên nhỏ) còn tiếp nhận nước thải chưa qua xử lý, hàm lượng KLN thấp hơn so với bùn Hồ 1. Hầu hết các chỉ tiêu KLN (bao gồm Cd, Cu, Hg, Pb, Tổng Cr và Ni) đều có nồng độ thấp và đáp ứng hoàn toàn giới hạn nghiêm ngặt nhất của đất loại 1 (đất nông nghiệp, đất ở). Tuy nhiên, hàm lượng Asen (27,0±5,4 mg/kg) vượt nhẹ so với ngưỡng đất loại 1 (25 mg/kg). Đồng thời, kẽm tích lũy ở mức 542,7±52,6 mg/kg, vượt ngưỡng đất loại 1 (300 mg/kg) nhưng vẫn thấp hơn giới hạn của đất loại 2 (600 mg/kg). Hàm lượng KLN trong bùn hồ Kim Liên nhỏ thấp hơn trong bùn hồ

Bảy Mẫu. Hồ Kim Liên nhỏ chưa từng được nạo vét trong nhiều thập kỷ nên bùn phân bố phân tán trong lòng và bờ hồ. Do tích tụ trong thời gian dài, bùn bị phân hủy yếm khí. Đồng thời, hồ chủ yếu tiếp nhận nước thải sinh hoạt quy mô hộ gia đình nên bùn có hàm lượng hữu cơ cao và ít chứa KLN từ hoạt động sản xuất công nghiệp. Nhìn chung, bùn Hồ 2 (hồ Kim Liên nhỏ) có tiềm năng TSD cho đất loại 2, cụ thể là làm vật liệu san nền cho các công trình xây dựng trụ sở cơ quan, khu thương mại, dịch vụ, công trình năng lượng hoặc đất phi nông nghiệp khác.

Mật độ VSV chỉ thị trong bùn Hồ 1 đều giảm với tổng Coliform còn trên 10 MPN/g bùn khô, *E. coli* đạt dưới 10 MPN/g bùn khô. Với bùn Hồ 2, tổng Coliform giảm còn khoảng 10 MPN/g bùn khô và không phát hiện được *E. coli*. Kết quả trên cho thấy xét về mặt VSV, hai loại bùn Hồ 1 và Hồ 2 đều đảm bảo an toàn cho quá trình TSD sau này.

Hiện nay, chưa có tiêu chuẩn cụ thể nào về yêu cầu kỹ thuật chất lượng của bùn thải cho mục đích làm vật liệu san lấp, tôn nền. Tuy nhiên, khi làm vật liệu san lấp, bùn thải cần đáp ứng thành phần hạt, độ ẩm, độ chặt và các chỉ tiêu khác theo TCVN 4447:2012 về công tác đất-thi công và nghiệm thu. Theo Bảng 33 của TCVN 4447:2012, độ ẩm khống chế của các loại đất san nền nằm trong khoảng 8–25% [18]. Trong khi đó, bùn Hồ 1 có độ ẩm $36,5\% \pm 0,8\%$ nên không thích hợp thi công đầm nén ngay mà cần phơi khô thêm hoặc trộn cùng các cốt liệu khác (cát, đất sạch) để giảm độ ẩm [5]. Bùn Hồ 2 có độ ẩm $17,2\% \pm 1,6\%$, phù hợp với đa số loại vật liệu san nền. Vì thế, bùn Hồ 2 có thể được đưa vào thi công ngay mà không cần phơi sấy thêm, giảm bớt chi phí về năng lượng. Tuy nhiên, rào cản chung của cả hai loại bùn trên là hàm lượng chất hữu cơ còn khá cao (6,2–8,3%), dễ bị phân hủy sinh học và gây sụt lún nền móng.

Để tăng cường khả năng của bùn hồ sau xử lý bằng BLTC cho mục đích san lấp, tôn nền, có thể áp dụng một số giải pháp sau:

- San lấp trực tiếp: Giới hạn ứng dụng làm đất tạo cảnh quan, trồng cây xanh, hoặc cần phối trộn thêm cát, đất sạch, xỉ để giảm tỷ lệ hữu cơ trước khi lu lèn đất nền.
- Ổn định, hóa rắn: Đối với bùn Hồ 1, để giảm độ ẩm, khóa chặt KLN và cải thiện sức chịu tải, bùn cần được trộn với xi măng, tro bay [9, 24].

3.3. Đánh giá khả năng tái sử dụng bùn hồ trong sản xuất gạch nung và không nung

a. Sản xuất gạch nung

Rủi ro môi trường do rò rỉ KLN từ bùn HDT có thể được kiểm soát nếu sử dụng bùn làm nguyên liệu sản xuất gạch nung. Quá trình nung kết ở nhiệt độ cao (trên 900 °C) sẽ làm nóng chảy các khoáng chất silicat, khóa chặt các ion KLN như Kẽm vào ma trận tinh thể gốm bền vững [5, 11, 25, 26]. Kết quả phân tích thành phần oxit và chất hữu cơ (OM) của hai bùn hồ và so sánh với yêu cầu làm gạch đất sét nung, gốm xây dựng được thể hiện trong Bảng 5.

Kết quả từ Bảng 5 cho thấy cả hai loại bùn đều sở hữu hàm lượng SiO_2 rất cao, đạt 64,8% ở bùn Hồ 1 và 65,8% ở bùn Hồ 2, đáp ứng yêu cầu đối với đất sét làm nguyên liệu gốm xây dựng theo TCVN 6300:1997 [19]. Hàm lượng SiO_2 cao là bộ khung, giúp gạch giữ được hình dáng cấu trúc và hạn chế tối đa độ co ngót khi sấy nung. Mặt khác, bùn Hồ 1 và Hồ 2 có chứa Fe_2O_3 tương ứng là 2,06% và 3,18%, giúp tạo màu gạch đỏ đẹp, bền, đặc trưng và làm chất trợ chảy, giúp hạ nhiệt độ nung. Tuy nhiên, hàm lượng Al_2O_3 của hai mẫu bùn khá thấp, lần lượt là 2,83% và 3,69% nên không đạt ngưỡng trên 19% để làm nguyên liệu gốm sứ. Do đó, giống như bùn từ sông, mương, kênh thoát nước đô thị, cả hai loại bùn trên, đều là nguồn nguyên liệu phối trộn tốt, có thể thay thế một phần đất sét trong sản xuất gạch [27].

Theo số liệu phân tích từ Bảng 5, bùn Hồ 1 có hàm lượng chất hữu cơ (OM) là 8,33% và bùn Hồ 2 là 6,20%. Lượng chất hữu cơ nội tại này vừa hoạt động như chất tạo lỗ xốp, có tác dụng cách nhiệt trong quá trình nung kết, vừa đóng vai trò nhiên liệu cấp nhiệt phụ trợ. Đặc tính trên được sử dụng

khí làm gạch nung từ bùn Hồ 1 (Bãi Mấu) sau xử lý bằng BLTC [26]. Nhóm tác giả đã phối trộn 27% bùn hồ và 18% vỏ trấu để thay thế 45% đất sét, nung ở nhiệt độ 950 °C. Tỷ lệ phối trộn trên giúp tiết kiệm tới 41% năng lượng tiêu thụ và giảm 2,3 lần lượng phát thải CO₂. Chất hữu cơ trong bùn và vỏ trấu bị thiêu cháy, tạo ra các lỗ rỗng vi mô, giúp giảm khối lượng riêng biểu kiến và tăng cường khả năng cách nhiệt của gạch [27, 28]. Lượng sắt oxit và chất hữu cơ có sẵn trong bùn là yếu tố quan trọng giúp đảm bảo các chỉ tiêu cơ lý (cường độ nén, độ hút nước) theo yêu cầu của gạch thành phẩm [20].

Bảng 5. So sánh thành phần oxit và chất hữu cơ của bùn hồ với yêu cầu của đất sét trong gốm xây dựng

Thông số	Bùn Hồ 1	Bùn Hồ 2	Giá trị theo TCVN 6300:1997 [19]	Ghi chú
SiO ₂	64,8%	65,8%	50–70%	Đạt
Al ₂ O ₃	2,83%	3,69%	≥ 19%	Không đạt
Fe ₂ O ₃	2,06%	3,18%	≤ 5% (đối với gạch ốp xương trắng) ≤ 2% (đối với sứ vệ sinh)	Đạt yêu cầu với gạch ốp xương trắng
Chất hữu cơ	8,33%	6,20%	Không quy định	

Cần lưu ý là tỷ lệ bùn thay thế không nên vượt quá 40% vì có thể làm tăng độ hút nước và giảm cường độ chịu nén của gạch. Với phương pháp ép dẻo sản xuất gạch gốm tại Việt Nam, tỷ lệ thay thế tối ưu của bùn sông, kênh mương thoát nước đô thị nên nằm trong khoảng 10–30% [28]. Tỷ lệ trên giúp sản phẩm gạch đáp ứng yêu cầu Mác 75 và kiểm soát độ hút nước an toàn ở mức 11–16% [27]. Tỷ lệ phối trộn trong thử nghiệm làm gạch nung từ bùn Hồ 1 (hồ Bãi Mấu) là 27% [26] và hoàn toàn phù hợp với tỷ lệ đề xuất trên [27].

b. Sản xuất gạch không nung

Bùn hồ có thể được TSD làm gạch đất nén không nung bằng cách ép cơ học kết hợp với các chất kết dính như xi măng. Đây là giải pháp vật liệu thân thiện với môi trường, giúp tiết giảm đáng kể lượng năng lượng tiêu thụ và khí thải so với công nghệ sản xuất gạch nung truyền thống [8]. So sánh giữa hai bùn HĐT cho thấy, bùn Hồ 2 có độ ẩm phù hợp cho sản xuất gạch (thường yêu cầu 15–22%), hàm lượng chất hữu cơ và KLN thấp hơn bùn Hồ 1. Biện pháp xi măng hóa rắn sẽ khóa KLN từ bùn Hồ 2 vào kết cấu gạch, hạn chế rò rỉ ra bên ngoài. Vì thế, hướng TSD làm gạch đất nén không nung sẽ phù hợp hơn với bùn Hồ 2. Với bùn Hồ 1, nên ưu tiên làm gạch nung để tận dụng tối đa hàm lượng chất hữu cơ cao và quá trình khóa KLN nhờ nung kết ở nhiệt độ cao.

3.4. Khả năng sản xuất cốt liệu và phụ gia khoáng

Quá trình thẩm lọc trong BLTC với bùn HĐT đã rửa trôi phần lớn các hạt sét mịn, giữ lại các hạt cát thô trong khối bùn cuối. Kết quả phân tích (Bảng 6) cho thấy cả hai nhóm bùn đều có lượng sót tích lũy trên sàng với kích thước mắt sàng > 0,1 mm vượt mức 81% và hàm lượng hạt mịn 0,075 mm dưới 16%, đáp ứng tiêu chí cát nghiền thô dành cho bê tông và vữa theo TCVN 7570:2006 và TCVN 9205:2012 [21, 22]. Hàm lượng hữu cơ (OM) của bùn hồ Bãi Mấu (8,3%) và bùn hồ Kim Liên nhỏ (6,2%) sau khi làm khô và ổn định nhờ BLTC vẫn ở mức cao so với cốt liệu dành cho bê tông và vữa. Vì thế, để không ảnh hưởng xấu đến chất lượng bê tông và vữa, hàm lượng hữu cơ trong bùn cần tiếp tục được loại bỏ, đáp ứng theo TCVN 7570:2006 [21]. Nếu dùng bùn HĐT làm cốt liệu cho bê tông và vữa, cần tiến hành xử lý bổ sung (nung, oxy hóa, geopolimer, rửa) hoặc chỉ thay thế một phần nhỏ cốt liệu mịn, kết hợp với cát, đá dăm đạt chuẩn [8, 23].

Bảng 6. So sánh đặc tính của bùn hồ với tiêu chuẩn cốt liệu

Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn áp dụng	Yêu cầu kỹ thuật	Bùn Hồ 1	Bùn Hồ 2
Thành phần hạt	TCVN 9205:2012	Lượng sót tích lũy trên rây 0,14mm từ 80–95% (cát thô) hoặc 65–85% (cát mịn) Hàm lượng hạt mịn qua sàng 0,075mm ≤ 16% (cát thô) hoặc ≤ 25% (cát mịn).	Lượng sót rây 0,10mm đạt 81,8–99,4%.	Lượng sót rây 0,10mm đạt 94,9–99,4%.
Chất hữu cơ (OM)	TCVN 7570:2006	Thử nghiệm bằng phương pháp so màu, không được thâm hơn màu chuẩn	8,33%	6,20%

Sản xuất cốt liệu nhẹ: Bùn hồ có hàm lượng SiO_2 cao (64,8–65,8%) và hàm lượng chất bay hơi (VS) phù hợp (7,5–10,1%). Thành phần trên tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình nung ở nhiệt độ 1100–1200 °C, tạo ra cốt liệu nhẹ có cấu trúc xốp và chế tạo thành lớp vật liệu nền trong hệ thống mái nhà xanh [29, 30]. Cốt liệu nhẹ được tái sử dụng từ bùn hồ chứa đã giúp cải thiện khả năng thấm, giữ nước, giảm dòng chảy tràn bề mặt và hỗ trợ cách nhiệt hiệu quả [8, 31]. Nhờ vậy, vật liệu tái sử dụng từ bùn hồ có thể nâng cao hiệu quả hoạt động của hệ thống công trình xanh. Bùn hai HDT sau tách nước bằng BLTC trong bài báo này có độ ẩm thấp hơn so với các loại bùn được đề cập từ các nghiên cứu trên. Vì thế, khi được ứng dụng tương tự sẽ giảm bớt được yêu cầu phơi sấy hơn, đảm bảo yêu cầu tiết kiệm năng lượng trong hệ thống công trình xanh.

Phụ gia khoáng cho xi măng và bê tông: Với thành phần SiO_2 và Al_2O_3 (2,8–3,7%), bùn hồ thể hiện tiềm năng hoạt tính hóa học pozzolan sau khi được hoạt hóa nhiệt [23]. Trầm tích được xử lý nhiệt bằng cách nung ở 850 °C trong 1 giờ và phát sinh hoạt tính hóa học (pozzolanic). Khi thay thế 8% và 15% lượng xi măng, cường độ chịu nén của vữa vẫn được bảo đảm. Với tỷ lệ thay thế là 8%, vữa còn cho cường độ cao hơn mẫu đối chứng nhờ cơ chế hiệu ứng lấp đầy vi hạt và hoạt tính hóa học nêu trên. Vì thế, có thể thay thế từ 10–20% khối lượng xi măng trong cấp phối mà vẫn duy trì hoặc gia tăng cường độ cơ học của sản phẩm [23]. Trong nghiên cứu này, khi nung bùn hồ sau xử lý bằng BLTC, các khoáng sét tinh thể bị vô định hình hóa, hình thành silica hoạt tính. Silica và alumin ở trạng thái vô định hình trong phụ gia khoáng sẽ tham gia phản ứng thứ cấp với $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng, tạo thành chất kết dính C-S-H và một phần C-A-H. Trong đó, C-S-H là pha chủ yếu đóng góp vào cường độ nén của vật liệu. Với hàm lượng Al_2O_3 thấp (<4%), các pha aluminat vẫn có thể tham gia tạo một lượng nhỏ các pha giàu Al (C-A-H hoặc C-S-H chứa alumin) và đóng vai trò hỗ trợ trong tạo cường độ nén. Ngoài ra, phần hạt bùn nung ít hoặc không phản ứng đóng vai trò vi hạt lấp đầy, làm đặc vi cấu trúc và hỗ trợ gia tăng cường độ.

3.5. Đề xuất giải pháp tái sử dụng cho từng nhóm bùn hồ đô thị

Dựa trên các đặc tính cơ lý, hóa học và VSV, nghiên cứu đề xuất các hướng TSD cho từng nhóm bùn HDT sau khi xử lý bằng BLTC cụ thể như sau (Bảng 7):

Bảng 7. Đề xuất định hướng tái sử dụng cho từng nhóm bùn hồ đô thị Hà Nội sau xử lý bằng bãi lọc trồng cây

Nhóm bùn hồ	Đặc điểm bùn	Định hướng tái sử dụng	Giải pháp kỹ thuật khắc phục
Nhóm 1: Bùn hồ đã tách nước thải, nạo vét định kỳ (Đại diện: Hồ Bảy Mẫu)	- Không phải chất thải nguy hại; - Độ ẩm: Khá cao (36,5%). - KLN: Tích tụ vượt ngưỡng đất loại 1,2 - Chất hữu cơ (OM): Cao hơn nhóm 2 (8,33%). - Thành phần: Hàm lượng SiO ₂ cao (64,8%) và tỷ lệ hạt thô lớn.	Vật liệu san lấp cho đất loại 3 (khu công nghiệp, bãi thải, công trình giao thông, quốc phòng...).	- Phơi khô thêm hoặc trộn cát, đất sạch để giảm ẩm. - Ổn định, hóa rắn bằng xi măng, tro bay để tăng sức chịu tải và cố định KLN.
		Vật liệu nung: gạch đất sét nung, cốt liệu nhẹ. Phụ gia khoáng cho xi măng và bê tông.	- Với gạch nung: Nung ở nhiệt độ > 900°C để khóa chặt ion KLN vào tinh thể gốm. Tận dụng chất hữu cơ làm chất tạo lỗ xốp và nhiên liệu phụ trợ. Tỷ lệ phối trộn thay thế đất sét: 10–30%. - Với cốt liệu nhẹ: Nung ở 1100–1200°C để tạo cấu trúc xốp. Độ ẩm thấp của bùn giúp giảm nhu cầu năng lượng sấy sơ bộ. - Hoạt hóa nhiệt (nung ở 850°C) và thay thế 10–20% xi măng
Nhóm 2: Bùn hồ tiếp nhận nước thải, ít nạo vét (Đại diện: Hồ Kim Liên nhỏ)	- Không phải chất thải nguy hại; - Độ ẩm: Thấp (17,2%), phù hợp thi công đầm nén ngay, sản xuất gạch - KLN: Nồng độ thấp, đáp ứng yêu cầu đất loại 2. - Chất hữu cơ (OM): Thấp hơn bùn nhóm 1 (6,20%). - Thành phần: Hàm lượng SiO ₂ cao (65,8%), tỷ lệ hạt cát thô lớn (lượng sót rây > 0,1mm đạt 94,9–99,4%).	Vật liệu san nền trực tiếp cho đất loại 2 (công trình thương mại, dịch vụ, đất rừng, công viên)	- Có thể không cần phơi sấy thêm. - Ổn định, hóa rắn bằng xi măng, tro bay để tăng sức chịu tải và cố định KLN.
		Nguyên liệu sản xuất gạch đất nén không nung (CEB) Sản xuất gạch nung, cốt liệu nhẹ và phụ gia khoáng cho xi măng và bê tông	Ép cơ học kết hợp với chất kết dính như xi măng. Tương tự như với bùn Hồ 1.

Với nhóm Hồ 1 (Hồ đã tách nước thải, nạo vét định kỳ, đại diện là hồ Bảy Mẫu): Đặc trưng lớn nhất của bùn nhóm hồ này là sự tích tụ KLN, đặc biệt là Kẽm (Zn) vượt ngưỡng đất loại 1 và 2, cùng với độ ẩm còn khá lớn (36,5%). Hướng TSD an toàn và mang lại giá trị cao nhất là làm nguyên liệu sản xuất vật liệu nung, điển hình là gạch đất sét nung và cốt liệu nhẹ. Quá trình nung kết ở nhiệt độ cao (trên 900 °C) sẽ làm nóng chảy các khoáng chất silicat, khóa chặt các ion KLN vào ma trận tinh thể gốm bền vững, loại bỏ rủi ro rửa trôi ra môi trường. Đồng thời, hàm lượng chất hữu cơ lớn (8,33%) sẽ là chất tạo xốp và nhiên liệu phụ trợ, giúp tiết kiệm năng lượng. Nếu TSD làm vật liệu san lấp, bùn nhóm 1 chỉ được ứng dụng cho đất loại 3 theo QCVN 03:2023/BTNMT (khu công nghiệp, bãi thải, công trình giao thông, quốc phòng an ninh, ...) hoặc bắt buộc phải ổn định, hóa rắn bằng xi măng để

cải thiện sức chịu tải và cố định KLN.

Với nhóm Hồ 2 (Hồ tiếp nhận nước thải, ít nạo vét, đại diện là hồ Kim Liên nhỏ): Bùn từ nhóm hồ này có độ ẩm thấp (17,2%) và hàm lượng KLN (Cd, Cu, Hg, Pb, Cr, Ni) ở mức thấp. Nhóm này đáp ứng tiêu chuẩn đất loại 2, phù hợp làm vật liệu san nền trực tiếp cho các công trình thương mại, dịch vụ, công trình năng lượng hoặc làm đất rừng, công viên. Bùn hồ nhóm 2 cũng thích hợp cho sản xuất cốt liệu nhẹ hoặc làm gạch đất nén không nung bằng cách ép cơ học với xi măng. Tuy nhiên, cần lưu ý tỷ lệ phối trộn khi sử dụng làm cốt liệu cho bê tông do hàm lượng hữu cơ có thể cản trở quá trình thủy hóa xi măng [8, 23].

4. Kết luận

Nghiên cứu đã khẳng định BLTC là giải pháp xử lý hiệu quả theo hướng sinh thái, giúp làm khô và ổn định đặc tính của bùn HĐT tại Hà Nội. Đánh giá chất lượng bùn sau xử lý cho thấy:

- Bùn hồ từ cả hai nhóm (đã tách và chưa tách nước thải) đều có nồng độ thấp các CTNH, không thuộc nhóm chất thải nguy hại và có thể được TSD theo định hướng sản xuất VLXD. Tuy nhiên, hàm lượng KLN tích lũy trong bùn HĐT đã tách nước thải (bùn nhóm 1) có xu hướng cao hơn, kết cấu hạt mịn hơn so với bùn HĐT chưa tách nước thải và ít/không nạo vét (bùn nhóm 2).

- Đối với định hướng làm vật liệu san lấp, bùn HĐT nhóm 1 phù hợp với đất loại 3 theo QCVN 03:2023/BTNMT, cụ thể là cho mục đích quốc phòng an ninh; khu công nghiệp, cụm công nghiệp, khu chế xuất; cơ sở sản xuất phi nông nghiệp; hoạt động khoáng sản; các công trình giao thông; bãi thải, xử lý chất thải; đất chưa đưa vào sử dụng theo quy định của pháp luật về đất đai. Để đảm bảo tính cơ lý của đất san nền và hạn chế rửa trôi KLN từ bùn nhóm 1, cần có biện pháp ổn định, hóa rắn bùn bằng xi măng. Trong khi đó, bùn HĐT nhóm 2 có thể san lấp trực tiếp cho đất loại 2, áp dụng cho đất rừng; đất xây dựng trụ sở cơ quan, công trình sự nghiệp; thương mại, dịch vụ; công trình năng lượng, bưu chính, viễn thông; đất cơ sở tôn giáo, tín ngưỡng, đình, đền, . . . ; đất sông, ngòi, kênh, rạch và mặt nước chuyên dùng; nghĩa trang, nghĩa địa, nhà tang lễ, hỏa táng; đất phi nông nghiệp khác.

- Với hàm lượng SiO_2 cao (64,8–65,8%), thành phần hạt thô lớn và lượng hữu cơ phù hợp, bùn HĐT có thể thay thế một phần đất sét trong phương pháp dẻo (có thể lên đến 30%), sản xuất cốt liệu nhẹ xốp và phụ gia khoáng pozzolan cho bê tông, xi măng.

Trong nền kinh tế tuần hoàn hiện nay, cần chuyển dịch hướng tiếp cận, coi bùn HĐT là nguồn tài nguyên. Tuy nhiên, để triển khai TSD bùn HĐT trên thực tế, cần tiến hành thêm các nghiên cứu đánh giá vòng đời và phân tích hiệu quả kinh tế ở quy mô bán công nghiệp. Đồng thời, kiến nghị các cơ quan quản lý cần sớm ban hành hướng dẫn kỹ thuật và khung pháp lý cụ thể cho việc phân loại, phối trộn và TSD bùn HĐT làm nguyên liệu sản xuất VLXD.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ kỹ thuật từ Phòng thí nghiệm Công nghệ Môi trường xanh và tái chế chất thải (GreenLab), trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội. Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài khoa học cấp Trường trọng điểm, mã số 06-2025/KHXD-TĐ.

Tài liệu tham khảo

- [1] Hạ, T. (2016). *Hồ đô thị: Quản lý kỹ thuật và kiểm soát ô nhiễm*. Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
- [2] Ban Duy tu các công trình hạ tầng kỹ thuật đô thị (2019). *Công tác quản lý các hồ khu vực nội thành Hà Nội*. Hà Nội, Việt Nam.
- [3] Phát, N. (2024). *Nghiên cứu thực trạng phát sinh bùn thải từ hoạt động nạo vét sông, hồ nội đô tại một số thành phố ở Việt Nam và đề xuất giải pháp tái sử dụng*. Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

- [4] Anh, T., Huyền, Đ., Khải, N. (2024). Cơ sở khoa học và thực tiễn để ứng dụng bãi lọc trồng cây xử lý bùn hồ đô thị Hà Nội. *Tạp chí Xây dựng*, (06/2024):161–165.
- [5] Wang, L., Chen, L., Tsang, D., Li, J., Baek, K., Hou, D., Ding, S., Poon, C. (2018). [Recycling dredged sediment into fill materials, partition blocks, and paving blocks: Technical and economic assessment](#). *Journal of Cleaner Production*, 199:69–76.
- [6] Svensson, N., Andersson-Sköld, Y., Fedje, K., Fröling, M., Grönhild, R., Helgesson, S., Strippl, H. (2022). [Integrated cost and environmental impact assessment of management options for dredged sediment](#). *Waste Management*, 138:30–40.
- [7] Solanki, P., Jain, B., Hu, X., Sancheti, G. (2023). [A review of beneficial use and management of dredged material](#). *Waste*, 2(4):815–840.
- [8] Fořt, J., Šál, J., Šál, J., Žižková, N., Podolka, L., Černý, R. (2025). [Potential of water sediments in construction materials: Current approaches and critical consideration of future challenges](#). *Heliyon*, 11(1):e41121.
- [9] Thuc, P., Dong, P. (2020). Reusability of muds dredged from lakes in Hanoi City from its geotechnical engineering characteristics. *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, Springer Singapore, 805–810.
- [10] Anh, T., Hạ, T., Huyền, Đ., Khải, N. (2022). Nghiên cứu thành phần hoá học chủ yếu của bùn trầm tích hồ đô thị Hà Nội. *Tạp chí Cấp thoát nước Việt Nam*, 139(3):66–71.
- [11] Huan, N., Phat, N., Hang, T., Trang, H., Mau, T., Khai, N. (2024). [Properties and Potential Application of Urban Sewage Sludge as Construction Material in Da Nang City](#). *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 40(1):24–33.
- [12] Gholipour, A., Fragoso, R., Duarte, E., Galvão, A. (2022). [Sludge Treatment Reed Bed under different climates: A review using meta-analysis](#). *Science of The Total Environment*, 843:156953.
- [13] Anh, T., Huyen, D., Ha, T., Khai, N. (2022). [Dewatering of urban lake sediments using constructed wetlands: A case study in Hanoi](#). *International Journal of GEOMATE*, 23(99):100–107.
- [14] United States Environmental Protection Agency, EPA Method 1311 (2012). *Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)*. Washington, DC.
- [15] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 9239:2012 (2012). *Chất thải rắn-Phương pháp xác định khả năng hòa tan*. Hà Nội.
- [16] Bộ Tài nguyên và Môi trường, QCVN 07:2025/BNNMT (2025). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về ngưỡng chất thải nguy hại*. Hà Nội.
- [17] Bộ Tài nguyên và Môi trường, QCVN 03:2023/BTNMT (2023). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng đất*. Hà Nội.
- [18] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 4447:2012 (2012). *Công tác đất-Thi công và nghiệm thu*. Hà Nội.
- [19] Bộ Xây dựng, TCVN 6300:1997 (1997). *Nguyên liệu để sản xuất sản phẩm gốm xây dựng-Đất sét-Yêu cầu kỹ thuật*. Hà Nội.
- [20] Bộ Xây dựng, QCVN 16:2023/BXD (2023). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về sản phẩm, hàng hóa vật liệu xây dựng*. Hà Nội.
- [21] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 7570:2006 (2006). *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Hà Nội.
- [22] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 9205:2012 (2012). *Cát nghiền cho bê tông và vữa*. Hà Nội.
- [23] Benzerzour, M., Amar, M., Abriak, N. (2017). [New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment](#). *Construction and Building Materials*, 140: 432–444.
- [24] Nontananandh, S., Khumsuprom, N., Thongdetsri, T., Jotisankasa, A., Chairaprakaeow, S., Inazumi, S. (2025). [Sustainable Utilization of Dredged Sediments and Water Treatment Sludges as Construction Materials Through Combined Dewatering and Cement Stabilization Techniques](#). *Recycling*, 10(1):22.
- [25] Zhang, Y., Jia, L., Mei, H., Cui, Q., Zhang, P., Sun, Z. (2016). [Fabrication, microstructure and properties of bricks fired from lake sediment, cinder and sewage sludge](#). *Construction and Building Materials*, 121: 154–160.
- [26] Tong, K., Dang, H., Tran, T., Tran, H., Cai, A., Nguyen, K. (2026). [Green brick production from rice](#)

- husk and lake sediment: Energy consumption and optimization. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1–15.
- [27] Hòa, N., Linh, N., Tiệp, T. (2021). Nghiên cứu sử dụng bùn thải đô thị đã xử lý chế tạo gốm tường theo phương pháp dẻo. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE) - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội*, 15(6V):23–32.
- [28] Hòa, N., Huân, N., Quân, T., Hoàn, V. (2021). Nghiên cứu sử dụng bùn thải nạo vét sông Nhuệ chế tạo gốm tường theo phương pháp tạo hình bán khô. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE) - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội*, 15(6V):12–22.
- [29] Chiou, I., Wang, K., Chen, C., Lin, Y. (2006). Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. *Waste Management*, 26(12):1453–1461.
- [30] Liu, R., Coffman, R. (2016). Lightweight Aggregate Made from Dredged Material in Green Roof Construction for Stormwater Management. *Materials*, 9(8):611.
- [31] Bhairappanavar, S., Liu, R., Coffman, R. (2018). Beneficial Uses of Dredged Material in Green Infrastructure and Living Architecture to Improve Resilience of Lake Erie. *Infrastructures*, 3(4):42.