Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (6V): 42–53

NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT YÊU CẦU KỸ THUẬT VÀ MÔI TRƯỜNG CHO NGUYÊN LIỆU TÁI CHẾ TỪ CHẤT THẢI XÂY DỰNG

Ngô Kim Tuân[a], Nguyễn Hoàng Giang[b], Hoàng Minh Giang[c], Trần Thị Việt Nga[c], Nguyễn Tiến Dũng[a], Nghiêm Hà Tân[b*], Trần Viết Cường[b]

[a]*Khoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*
[b]*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*
[c]*Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 30/10/2026, Sửa xong 16/11/2026, Chấp nhận đăng 25/11/2026

Tóm tắt

Việc tái chế, xử lý chất thải rắn xây dựng (CTRXD) đòi hỏi kiểm soát tính phù hợp kỹ thuật và an toàn môi trường. Nghiên cứu này kết hợp dữ liệu 9 mẫu lớn với đối chiếu tiêu chuẩn, quy chuẩn trong nước và quốc tế để đề xuất khung kiểm soát phục vụ xây dựng quy chuẩn kỹ thuật quốc gia (QCVN). Khối lượng thể tích tự nhiên của các mẫu đạt 1.116,1 ± 142,6 kg/m^3; độ ẩm đạt 13,34 ± 2,50%. Tỷ lệ phần có kích thước ≥ 70 mm dao động 0,00–73,20%, độ ẩm CTRXD từ khối xây luôn cao hơn từ bê tông, cho thấy yêu cầu phân loại, xử lý khác nhau với mỗi nguồn. Kết quả ngâm chiết cho thấy cần kiểm soát ô nhiễm theo nguồn, kết quả chưa đủ kết luận an toàn cho mọi mục đích tái sử dụng. Ba thời điểm kiểm soát đề xuất gồm: tiếp nhận CTRXD (P_0), nguyên liệu sau xử lý (P_1) và sản phẩm tái chế (P_2), gắn với quan hệ giữa chất lượng đầu vào, mức độ xử lý và chất lượng đầu ra. Các mức kỹ thuật và môi trường phụ thuộc mục đích sử dụng CTRXD và phương pháp thử. Kết quả nghiên cứu và các giá trị tham khảo là cơ sở để đề xuất các mức tham chiếu, tuy nhiên, cần kiểm chứng và thí nghiệm theo mục đích sử dụng trước khi xem xét đưa vào QCVN.

Từ khoá: chất thải rắn xây dựng; nguyên liệu tái chế; cốt liệu tái chế; ngâm chiết; ngưỡng an toàn; quy chuẩn kỹ thuật.

PROPOSED TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS FOR RECYCLING FEEDSTOCK DERIVED FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

Abstract

The recycling and treatment of construction and demolition waste (CDW) require control of both technical suitability and environmental safety. This study combines data from nine bulk samples with a comparative review of domestic and international standards and technical regulations to propose a control framework for developing a Vietnamese national technical regulation (QCVN). The samples exhibited an as-received bulk density of 1,116.1 ± 142.6 kg/m^3 and a moisture content of 13.34 ± 2.50%. The fraction of particles ≥ 70 mm ranged from 0.00% to 73.20%, while masonry-derived CDW consistently exhibited higher moisture contents than concrete-derived CDW, indicating source-specific sorting and treatment requirements. Leaching results highlight the need for source-specific contamination control but are insufficient to establish safety for all reuse applications. Three control points are proposed: CDW intake (P_0), processed feedstock (P_1), and recycled products (P_2), reflecting the relationships among input quality, the extent of processing, and output quality. Technical and environmental limit values depend on the intended use of CDW and the test methods applied. The study findings, together with values from reference sources, provide a basis for proposing reference levels; however, validation and application-specific testing are required before these levels can be considered for inclusion in a QCVN.

Keywords: construction and demolition waste; recycling feedstock; recycled aggregate; leaching; safety thresholds; technical regulations.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(6V)-04 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Chất thải rắn xây dựng (CTRXD) có thể cung cấp nguồn nguyên liệu thứ cấp cho sản xuất vật liệu xây dựng, khả năng sử dụng phụ thuộc vào thành phần, mức độ lẫn tạp chất và quá trình xử lý cũng

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* tannh@huce.edu.vn (Tân, N. H.)

như khả năng tạo ra dòng vật liệu có chất lượng ổn định. Theo báo cáo của Sở Nông nghiệp và Môi trường tại buổi làm việc của Thành ủy Hà Nội ngày 19/8/2026, lượng CTRXD phát sinh trên địa bàn khoảng 3.000–3.400 tấn/ngày [1]. Quy mô này cho thấy nhu cầu cấp thiết về tổ chức thu gom, phân loại và kiểm soát chất lượng dòng vật liệu tái chế. Các nghiên cứu về quản lý CTRXD tại Việt Nam và đặc trưng thành phần tại các bãi thải ở Hà Nội đã cung cấp cơ sở nhận diện nguồn vật liệu và khó khăn trong phân loại, thu gom, tái chế [2, 3]. Tuy nhiên, mô tả thành phần CTRXD chưa đủ để quyết định việc xem vật liệu sau tái chế là nguyên liệu thứ cấp để sản xuất vật liệu xây dựng hoặc sử dụng trực tiếp cho các ứng dụng. Quyết định này phụ thuộc vào tạp chất, tính chất, khả năng giải phóng chất ô nhiễm và điều kiện sử dụng.

Các nghiên cứu tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã kết hợp khảo sát dòng vật liệu với đánh giá tính chất vật lý và môi trường của CTRXD [4]. Nghiên cứu chế tạo cốt liệu từ phần hạt mịn của bê tông phế thải cũng cho thấy một hướng phát triển sản phẩm nguyên liệu thứ cấp khác với cốt liệu thu được bằng nghiền, sàng đơn thuần [5]. Từ các công trình này, bài báo đặt vấn đề xây dựng quan hệ giữa nguồn CTRXD, chất lượng nguyên liệu sau xử lý và yêu cầu của sản phẩm dự kiến. Đây là cơ sở mang tính bắt buộc cho quá trình tiếp nhận và sử dụng nguyên liệu tái chế.

Trên thế giới, hướng dẫn của Liên minh châu Âu ở góc độ quản lý đã nhấn mạnh vai trò của khảo sát trước khi phá dỡ, phân loại và truy xuất dòng vật liệu [6]. Quy định của Đức về vật liệu khoáng thay thế có nêu rõ yêu cầu kiểm soát từ tiếp nhận, sản xuất, phân loại đến điều kiện sử dụng [7]. Tuy nhiên, việc lựa chọn giới hạn và ngưỡng an toàn đối với các vật liệu tái chế nói chung ở Việt Nam cần phải xem xét đến phương pháp thử, khả năng tiếp xúc với môi trường, năng lực phòng thí nghiệm và dữ liệu, yêu cầu trong hệ thống các tiêu chuẩn, quy chuẩn hiện hành.

Hệ thống tiêu chuẩn Việt Nam đã có TCVN 11969:2018 cho cốt liệu lớn tái chế dùng cho bê tông; TCVN 13694:2023 cho cấp phối tái chế làm móng đường đô thị và TCVN 13946:2024 cho vật liệu san lấp từ phế thải phá dỡ, không áp dụng cho công trình giao thông [8–10]. Tuy nhiên, vấn đề kiểm soát nguyên vật liệu đầu vào cần có hệ thống kiểm soát và quy định trong QCVN với các yêu cầu theo mục đích sử dụng, cần phân biệt rõ hai nhóm đối tượng đánh giá là CTRXD chưa xử lý và vật liệu đã tái chế. Vì vậy, việc phân định chất thải nguy hại theo QCVN 07:2025/BNNMT là một yêu cầu pháp lý riêng, không thay thế hoặc đánh giá tính phù hợp của các loại nguyên vật liệu sau tái chế [11]. QCVN 16:2023/BXD [12] và văn bản quản lý chất lượng hiện hành [13] cần được xem xét theo đúng nhóm sản phẩm thuộc phạm vi điều chỉnh.

Bài báo đề xuất khung yêu cầu kỹ thuật và môi trường đối với CTRXD làm nguyên liệu tái chế, gắn với nguồn phát sinh, trạng thái nguyên liệu và khả năng ứng dụng của sản phẩm. Dữ liệu 9 mẫu lớn được sử dụng để nhận diện biến động và vấn đề cần kiểm soát; các trị số giới hạn được tổng hợp từ các tài liệu tham chiếu. Nghiên cứu mang tính khảo sát ban đầu, chưa xác lập ngưỡng có tính đại diện cho QCVN.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Phạm vi nguyên liệu và điểm kiểm soát

Lựa chọn ba nhóm nguồn nghiên cứu: bê tông phế thải; khối xây và hỗn hợp đã được phân loại. Thành phần đất, thạch cao, thủy tinh, nhựa đường, gỗ, kim loại và nhựa được nhận diện riêng. Đất đào dùng trực tiếp để san lấp, tái chế kim loại hoặc nhựa và xử lý chất thải nguy hại không thuộc phạm vi nghiên cứu của bài báo. Bảng 1 xác định đối tượng, thời điểm của từng phép kiểm tra. Các nhóm đặc tính nghiên cứu bao gồm: khối lượng thể tích và độ ẩm hỗn hợp, thành phần hạt, độ ẩm các thành phần, và các thông số kim loại trong nước chiết.

Bảng 1. Các điểm kiểm soát trong phạm vi nghiên cứu

Điểm kiểm soát	Đối tượng	Phạm vi
P_0 – Tiếp nhận	CTRXD từ công trình hoặc nguồn đã xác định	Tiếp nhận; phân loại; chuyển sang tuyến xử lý phù hợp
P_1 – Sau tái chế	Nguyên liệu đã phân loại, nghiền, sàng hoặc xử lý bổ sung	Nguyên liệu thứ cấp; hoặc tiếp tục xử lý
P_2 – Sản phẩm	Cốt liệu tái chế thương phẩm và sản phẩm thứ cấp	Xác định yêu cầu sản phẩm

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng bộ dữ liệu khảo sát sẵn có gồm chín mã mẫu: HV1.1, HV1.2, HV2.1, HV2.2, NT1, NT2, LD1.1, LD1.2 và LD2.1. Các mẫu được lấy theo nguyên tắc đảm bảo tính đại diện (lấy nhiều điểm, trộn đều theo phương pháp chia tư), không làm thay đổi tính chất mẫu, khối lượng mẫu lớn không dưới 200 kg. Độ ẩm các thành phần được xác định theo TCVN 7572-7:2006; thành phần hạt: TCVN 7572-2:2006 [14, 15]. Dữ liệu sàng gồm tám nhóm từ ≤ 1,25 mm đến ≥ 70 mm.

Khối lượng thể tích và độ ẩm được xác định ở trạng thái tự nhiên tại điểm thu gom, tập kết hoặc bãi xử lý. Các tiêu chuẩn TCVN 7572-4:2006 xác định độ hút nước, TCVN 7572-6:2006 xác định khối lượng thể tích xốp và độ hổng [16, 17]. Quá trình lấy mẫu để đảm bảo dữ liệu tại nguồn thu gom.

Dịch chiết được chuẩn bị theo EPA 1311 (TCLP), đối với pha rắn, lượng dung dịch chiết bằng 20 lần khối lượng pha rắn [18]. Các kim loại nặng và thành phần được xem xét bao gồm As, Cd, Pb, Hg, Cr, Ni, Cu, Zn cùng pH, clorua và sunfat. Tuy nhiên bài báo sử dụng các kết quả As, Pb, Cr và Cd trong dịch chiết, với đơn vị mg/L, đại diện nhóm có nguy cơ cao trong phạm vi nghiên cứu. Việc lựa chọn TCLP phù hợp với mục tiêu đối chiếu ngưỡng chất thải nguy hại do EPA 1311 theo Phụ lục 1 QCVN 07:2025/BNNMT [11]. Tuy nhiên, TCLP sử dụng dung dịch chiết axetat có tính axit (pH 2,88 hoặc 4,93 tùy lựa chọn dịch chiết), gắn với kịch bản chất thải trong điều kiện chôn lấp. EPA 1312 (SPLP) dùng dung dịch axit sulfuric–nitric, pH 4,2 đối với chất thải, với tỷ lệ lỏng/rắn 20 L/kg, nhằm đánh giá giải phóng dưới tác động của nước mưa axit [19]. EN 12457-2 sử dụng nước, tỷ lệ lỏng/rắn 10 L/kg và mẫu có cỡ hạt dưới 4 mm [20]. Khác biệt về dịch chiết, pH, tỷ lệ lỏng/rắn và chuẩn bị mẫu có thể làm thay đổi kết quả; TCLP chỉ là một phương pháp thử lựa chọn phục vụ nghiên cứu.

2.3. Phương pháp xử lý số liệu và lựa chọn mức đề xuất

Các kết quả phân tích dựa trên dữ liệu của 9 bộ số liệu từ 9 mẫu phân tích lấy từ 9 điểm có các điều kiện tự nhiên khác nhau. Trung bình, trung vị, khoảng biến thiên và độ lệch chuẩn mẫu (mẫu số $n-1$; $n=9$) được tính với trọng số các mẫu bằng nhau. Quan hệ giữa khối lượng thể tích và độ ẩm được mô tả bằng hệ số Pearson, kiểm định hai phía $H_0 : \rho = 0$ ở mức ý nghĩa 0,05 và phân tích độ nhạy bằng cách lần lượt bỏ một mẫu. Kết quả mang tính thăm dò, giả định các số liệu độc lập và phân phối chuẩn hai biến. Các mức tham chiếu được lựa chọn theo nguồn quy định tham khảo, đối tượng vật liệu, định hướng sử dụng và phương pháp thử.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Biến động khối lượng thể tích và độ ẩm hỗn hợp

Bảng 2 trình bày số liệu theo mẫu và ba nhóm kích thước đặc trưng. Khối lượng thể tích trung bình là 1.116,1 ± 142,6 kg/m^3, trung vị 1.105 kg/m^3, hệ số biến thiên 12,77%. Độ ẩm trung bình đạt 13,34 ± 2,50%, trung vị 12,25%, hệ số biến thiên 18,76%.

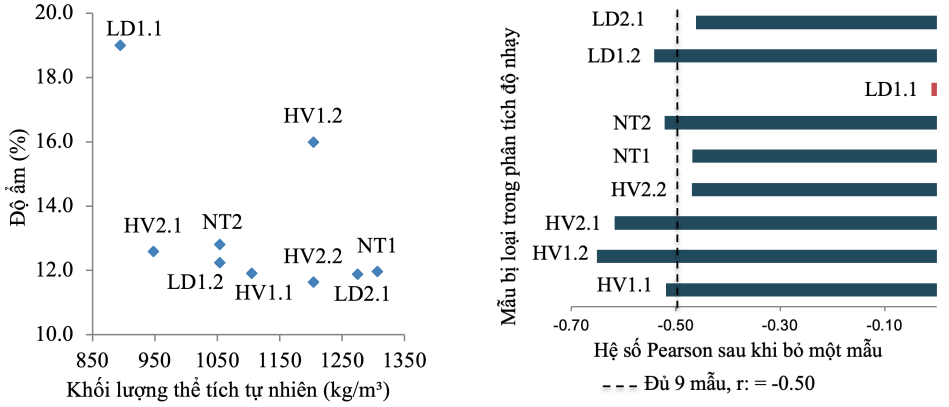
Hình 1 cho thấy mẫu LD1.1 đồng thời có khối lượng thể tích nhỏ nhất và độ ẩm lớn nhất. Bộ dữ liệu thể hiện xu hướng nghịch ($r = -0{,}500$; $t = -1{,}528$; bậc tự do 7; $p = 0{,}170$; $n = 9$), nhưng chưa

có đủ khẳng định về tương quan tuyến tính ở mức ý nghĩa 0,05. Khi lần lượt bỏ một mẫu, hệ số thay đổi từ −0,664 đến −0,010, riêng khi bỏ LD1.1, r còn −0,010, mối liên hệ tuyến tính gần như mất đi. Kết quả này không đủ cơ sở để sử dụng khối lượng thể tích làm dự báo thay thế độ ẩm hoặc kết luận vật liệu nhẹ hút nước nhiều hơn hoặc có độ ẩm lớn hơn. Đặc điểm nguồn phát thải, loại vật liệu, cấp phối và điều kiện lưu trữ tự nhiên tác động nhiều đến đặc tính của CTRXD tại nguồn.

Bảng 2. Đặc trưng hỗn hợp và phân bố kích thước của 9 mẫu

Mã mẫu	KLTT[1] (kg/m^3)	Độ ẩm (%)	< 2,5 mm (%)	2,5–70 mm (%)	≥ 70 mm (%)
HV1.1	1.105	11,92	7,30	41,00	51,70
HV1.2	1.204	16,00	3,50	56,60	39,90
HV2.1	948	12,59	11,30	52,40	36,30
HV2.2	1.204	11,63	0,00	26,80	73,20
NT1	1.307	11,96	21,90	60,50	17,60
NT2	1.054	12,82	3,40	27,18	69,42
LD1.1	894	19,00	40,50	44,50	15,00
LD1.2	1.054	12,25	37,00	63,00	0,00
LD2.1	1.275	11,88	10,70	54,00	35,30
Trung bình	1.116,1	13,34	15,07	47,33	37,60
Độ lệch chuẩn	142,6	2,50	14,85	13,47	24,53

[1] KLTT: khối lượng thể tích trạng thái tự nhiên. Các tỷ lệ kích thước được cộng từ nhóm sàng; mỗi hàng có tổng bằng 100%.



(a) Chín mẫu quan sát

(b) Độ nhạy theo từng mẫu

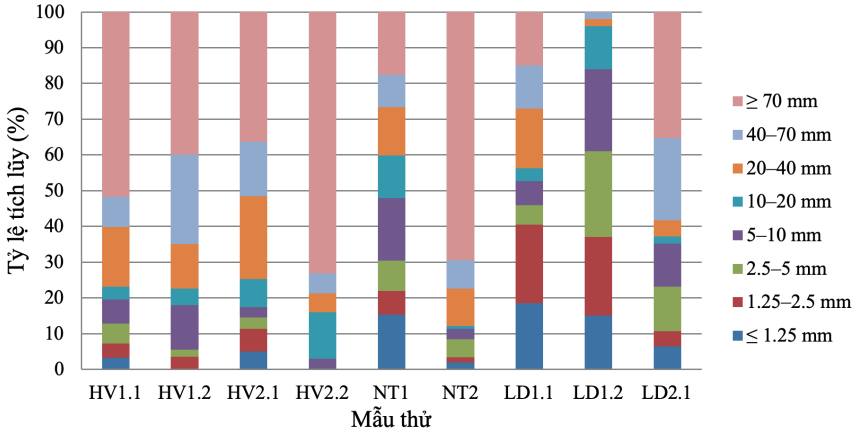
Hình 1. Quan hệ khối lượng thể tích và độ ẩm cùng phân tích độ nhạy theo từng mẫu

Souza và cs. công bố khối lượng thể tích của CTRXD từ 940–1.170 kg/m^3 và độ ẩm 7,98–10,31% tại Rio Branco, Brazil [21]. Kết quả này tương đồng với dữ liệu nghiên cứu, nhưng trạng thái vật liệu khác nhau, chất lượng vật liệu có thể khác nhau. Đối với cốt liệu đã xử lý, Saiz Martínez và cs. thu được kết quả trung bình 1.238,2–1.300,8 kg/m^3, với hệ số biến thiên khoảng 2,7–3,5% trong ba nhóm cốt liệu [22]. Mức phân tán thấp hơn nhiều so với dữ liệu đầu vào trong nghiên cứu là phù hợp do vật liệu sau tái chế có độ đồng nhất cao hơn. Kết quả này cho thấy cần phải kiểm soát độ ẩm theo lô, đặc biệt khi định lượng phối liệu, nguyên liệu, CTRXD theo khối lượng. Độ ẩm ảnh hưởng đến công nghệ tái chế và cần được xem xét cùng khả năng sàng, rửa, thoát nước và yêu cầu của công đoạn tiếp theo.

Khối lượng thể tích ở trạng thái tự nhiên cần thiết cho công tác lưu chứa và vận chuyển, chưa đủ căn cứ để xếp loại chất lượng CTRXD và vật liệu sau tái chế.

3.2. Phân bố kích thước và yêu cầu phân luồng xử lý

Phân bố các nhóm kích thước của 9 mẫu tại 09 địa điểm khác nhau được thể hiện tại Hình 2. Kết quả cho thấy, tỷ lệ phần có kích thước từ 70 mm trở lên chiếm trung bình 37,60 ± 24,53%, trung vị 36,30%, dao động từ 0 đến 73,20%. Phần dưới 2,5 mm đạt 15,07 ± 14,85%, trong khi phần dưới 5 mm đạt 22,42 ± 20,15%. Hệ số biến thiên của hai nhóm đầu lần lượt là 65,25% và 98,59%, lớn hơn nhiều so với khối lượng thể tích. Như vậy, biến động kích thước là thông tin phân luồng công nghệ xử lý rõ hơn việc chỉ so sánh khối lượng thể tích trung bình.



Hình 2. Phân bố 08 nhóm kích thước được tính từ số liệu sàng gỗ

Hai mẫu HV2.2 và NT2 có phần ≥ 70 mm lần lượt 73,20% và 69,42%; ngược lại, LD1.2 không có nhóm này và chứa 61,00% dưới 5 mm. Một tuyến xử lý hoặc một quy trình có cùng chế độ nghiền sẽ không đạt hiệu quả cao nhất với hai nhóm này. Trong nhóm ≥ 70 mm còn có gỗ, thạch cao, nhựa và kim loại thuộc nhóm không phù hợp để nghiền, vì vậy cần tách và có quy trình xử lý riêng. Tương tự, nhóm hạt mịn cần được thể hiện theo đặc trưng riêng về thành phần, tính dẻo, muối hòa tan và phân tích nước chiết trước khi xác định hướng sử dụng. Do đó, đề xuất QCVN nên yêu cầu công bố cấp phối bao gồm hạt mịn phù hợp hoặc nhóm hạt mịn có nguy cơ nhiễm chất ô nhiễm.

Trong ứng dụng thực tế tại nền bãi cảng Huelva, tác giả Agrela sử dụng cốt liệu tái chế đã xử lý với tỷ lệ lọt sàng 20 mm là 76–80% và hệ số Los Angeles 35,2–38,0 [23]. Các mẫu đầu vào nghiên cứu này có tỷ lệ dưới 20 mm từ 12,08% đến 96,00%, trung bình 38,72%; tuy nhiên, để sử dụng thì cần phối trộn theo công năng để kết luận hỗn hợp có đạt yêu cầu hay không. Việc đánh giá hỗn hợp sau nghiền và xử lý lại (phối trộn theo tỷ lệ) là một yêu cầu để sử dụng vật liệu tái chế đảm bảo yêu cầu kỹ thuật.

3.3. Độ ẩm thành phần và giới hạn diễn giải về thành phần

Bảng 3 và Hình 3 cho thấy độ ẩm khác nhau khá lớn giữa các cấu tử. Bê tông có giá trị trung bình 5,30 ± 0,81%, thấp hơn khối xây 9,22 ± 2,45%. Ở cả 9 lô lấy mẫu, độ ẩm khối xây đều lớn hơn bê tông; chênh lệch trung bình là 3,92 ± 2,59 điểm phần trăm, dao động 0,34–8,65 điểm phần trăm.

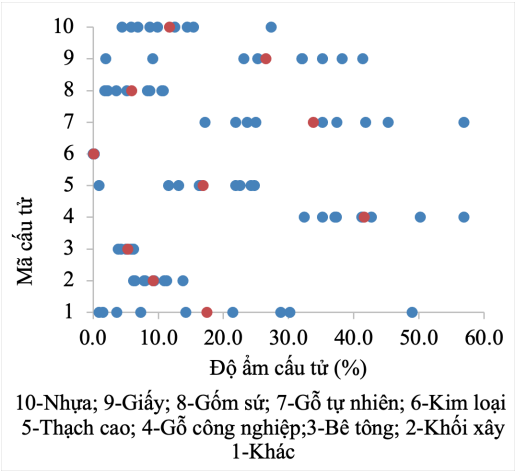
Việc so sánh theo cặp bê tông – khối xây để khẳng định chỉ đối chiếu các cấu tử trong cùng lô lấy mẫu (cùng điều kiện tự nhiên lúc lấy mẫu). Gỗ tự nhiên và gỗ công nghiệp có độ ẩm trung bình lần lượt 33,81% và 41,63%, cao hơn nhiều bê tông và khối xây. Các giá trị trên phản ánh trạng thái ẩm tại thời điểm ở trạng thái tự nhiên, không phải độ hút nước. Tác giả Abramović xác định độ hút nước 24

giờ trung bình 3,81–4,87% theo cỡ hạt cho cốt liệu đã nghiền tại Belgrade [24]. Khoảng giá trị này gần với một số số liệu độ ẩm bê tông của nghiên cứu, tuy nhiên chưa đủ cơ sở để đánh giá giới hạn độ hút nước. Để ứng dụng làm cốt liệu cho bê tông, nguyên liệu sau tái chế cần được xác định độ hút nước, trạng thái bão hòa khô bề mặt và khối lượng thể tích hạt theo phương pháp tương ứng.

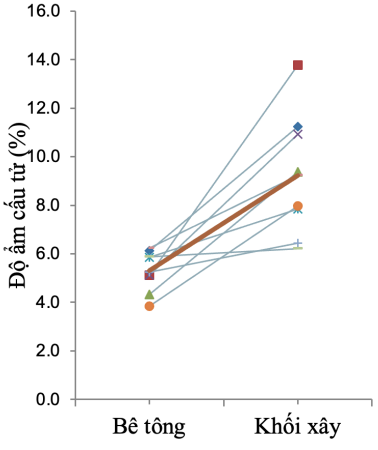
Bảng 3. Thống kê độ ẩm cấu tử theo chín mẫu

Cấu tử	Trung bình ± SD (%)	Khoảng biến thiên (%)	CV (%)
Nhựa	11,70 ± 6,97	4,43–27,31	59,6
Giấy	26,50 ± 13,30	1,94–41,40	50,2
Gốm sứ	5,92 ± 3,71	1,78–10,80	62,7
Gỗ tự nhiên	33,81 ± 12,96	17,20–56,91	38,3
Kim loại	0,07 ± 0,07	0,01–0,20	98,5
Thạch cao	16,86 ± 7,67	0,92–24,78	45,5
Gỗ công nghiệp	41,63 ± 7,70	32,40–56,95	18,5
Bê tông	5,30 ± 0,81	3,85–6,23	15,3
Khối xây	9,22 ± 2,45	6,21–13,78	26,6
Khác	17,44 ± 16,32	0,89–48,98	93,6

SD: độ lệch chuẩn mẫu; CV: hệ số biến thiên.



(a) Phân bổ từng cấu tử



(b) So sánh theo cặp mẫu

Hình 3. Độ ẩm cấu tử và so sánh theo cặp điển hình: Bê tông – khối xây

3.4. Kết quả ngâm chiết một số kim loại và đối chiếu ngưỡng chất thải nguy hại

Bảng 4 trình bày kết quả As, Pb, Cr và Cd trong dịch chiết cùng ngưỡng nồng độ ngâm chiết tại Bảng 2 QCVN 07:2025/BNNMT [11]. Đây là các giá trị pháp quy dùng để đối chiếu phục vụ phân định chất thải nguy hại (CTNH).

Đối chiếu số liệu tại Bảng 4 với ngưỡng nồng độ ngâm chiết của QCVN 07:2025/BNNMT [11] cho thấy As, Cr và Cd của cả 9 mẫu đều thấp hơn ngưỡng tương ứng; Pb có 8 mẫu thấp hơn ngưỡng và một mẫu vượt ngưỡng. Các giá trị ngưỡng sử dụng để đối chiếu lần lượt là 5,0 mg/L đối với As, Pb và Cr, và 1,0 mg/L đối với Cd. Như vậy, xét riêng bốn kim loại được phân tích, 8/9 mẫu có toàn bộ chỉ tiêu thấp hơn ngưỡng.

Bảng 4. Kết quả 04 kim loại chọn lọc trong nước chiết và ngưỡng CTNH

Mã mẫu	As (mg/L)	Pb (mg/L)	Cr (mg/L)	Cd (mg/L)
Ngưỡng CTNH [11]	≥ 5,0	≥ 5,0	≥ 5,0	≥ 1,0
HV1.1	3,34	0,2575	< 0,01	< 0,001
HV1.2	4,78	1,6157	< 0,01	< 0,001
HV2.1	3,21	0,0802	< 0,01	< 0,001
HV2.2	3,05	6,6255	0,0107	< 0,001
NT1	1,35	0,2990	< 0,01	0,0053
NT2	0,56	0,1972	< 0,01	< 0,001
LD1.1	1,43	0,7895	< 0,01	< 0,001
LD1.2	1,56	1,9364	< 0,01	< 0,001
LD2.1	3,87	0,7895	< 0,01	< 0,001

Nồng độ As dao động từ 0,56 đến 4,78 mg/L, với giá trị trung bình 2,572 ± 1,399 mg/L và trung vị 3,05 mg/L. Hệ số biến thiên đạt 54,4%, phản ánh sự phân tán đáng kể giữa các mẫu. Mẫu HV1.2 có nồng độ As cao nhất, bằng 95,6% ngưỡng đối chiếu, do khoảng cách an toàn này tương đối nhỏ, cần xem xét đánh giá thí nghiệm lặp với mẫu này hoặc đánh giá sự phù hợp khi ứng dụng vật liệu tái chế từ nguồn này. Nồng độ Pb biến động từ 0,0802 đến 6,6255 mg/L, trung bình 1,399 ± 2,064 mg/L và trung vị 0,7895 mg/L và hệ số biến thiên đạt 147,6%, cao hơn so với As, cho thấy mức phân tán của Pb giữa các mẫu lớn hơn. Đáng chú ý, mẫu HV2.2 có Pb bằng 1,325 lần ngưỡng đối chiếu, tương ứng mức vượt 32,51%; 8 mẫu còn lại nằm trong khoảng 0,0802–1,9364 mg/L. Nồng độ Pb cao tại mẫu HV2.2 có thể liên quan đến sự có mặt của thành phần chứa chì như lớp sơn, vật liệu phủ hoặc chi tiết kim loại chứa chì, gốm sứ có lớp men chứa chì. Kết quả này cho thấy sự cần thiết của kiểm soát nguồn đầu vào và đánh giá theo lô nguyên liệu.

Đối với Cr và Cd, mỗi chỉ tiêu có 8/9 kết quả thấp hơn giới hạn báo cáo, lần lượt là < 0,01 và < 0,001 mg/L. Giá trị Cr định lượng được tại HV2.2 là 0,0107 mg/L, tương đương 0,214% ngưỡng; Cd tại NT1 là 0,0053 mg/L, tương đương 0,530% ngưỡng. Các kết quả này cho thấy nồng độ Cr và Cd trong dịch chiết thấp so với ngưỡng đối chiếu.

Trường hợp HV2.2 cho thấy cần kiểm soát theo nguồn và lô tại P_0: nhận diện thành phần nghi ngờ; đánh dấu, cách ly lô chưa rõ nguồn hoặc có dấu hiệu bất thường; lấy mẫu đại diện thử xác nhận để quyết định tiếp nhận, xử lý riêng hoặc chuyển đơn vị có chức năng phù hợp. Ngoài bốn kim loại trên, pH, sunfat, clorua và các chất ô nhiễm liên quan đến nguồn phát sinh cần được xem xét trong đánh giá mở rộng. Hernández ghi nhận sự khác biệt đáng kể về giải phóng sunfat giữa các nhóm cốt liệu bê tông (26,391 mg/kg), khối xây và hỗn hợp (3.722,100–8.195,460 mg/kg) [25]. Cần phân biệt sunfat giải phóng trong dịch chiết với hàm lượng sunfat tan trong axit dùng đánh giá chất lượng cốt liệu, điều này liên quan đến nguy cơ ăn mòn sunfat trong một số trường hợp sử dụng cốt liệu tái chế trong bê tông xi măng.

4. Khung yêu cầu tham chiếu phục vụ nghiên cứu xây dựng QCVN

4.1. Xác định đối tượng kiểm soát

Kết quả tại Mục 3 cho thấy có ba giai đoạn cần kiểm soát. P_0 là CTRXD khi tiếp nhận, cần hồ sơ nguồn, pháp lý, xác định thành phần phải tách riêng và trạng thái vật liệu. P_1 là nguyên liệu sau phân loại, nghiền và sàng, cần đáp ứng yêu cầu kỹ thuật và chỉ tiêu môi trường theo hướng sử dụng. P_2 là cốt liệu hoặc sản phẩm thứ cấp, cần thỏa mãn tiêu chuẩn sản phẩm. Nếu nguyên liệu P_1 được bán trực

tiếp làm cốt liệu thì các yêu cầu P_2 tương ứng phải được kiểm tra trước khi xuất xưởng, không hình thành một khoảng trống trách nhiệm giữa hai công đoạn.

Ở P_0, nội dung cần kiểm soát là truy xuất nguồn gốc, khả năng phân loại và nguy cơ lẫn các tạp chất nguy hại như amiăng, vật liệu có lớp sơn phủ hóa chất, chứa chất nguy hại hoặc các dòng thải khác phải quản lý riêng. Dòng vật liệu không đủ thông tin được cách ly để xác minh. Việc trộn nguồn để hạ nồng độ không được coi là xử lý đạt yêu cầu. Kích thước tiếp nhận phụ thuộc thiết bị và tuyến công nghệ xử lý, còn sản phẩm giao nhận phải được quy định ở P_1/P_2 theo loại sản phẩm.

4.2. Đánh giá các mức kỹ thuật cho nguyên liệu sau xử lý

Bảng 5 tổng hợp các mức kỹ thuật tham chiếu cho cốt liệu lớn tái chế dùng trong bê tông từ CEDD (Hồng Kông) [26] và Código Estructural (Tây Ban Nha) [27]; EN 933-11 phân loại thành phần cốt liệu [28]. Các chỉ tiêu được chọn để kiểm soát tạp chất, tính chất hạt, độ bền cơ học và nguy cơ ảnh hưởng độ bền lâu của bê tông. Mỗi trị số phải gắn với phạm vi vật liệu và điều kiện áp dụng của nguồn gốc; không áp dụng cho vật liệu san lấp; các tỷ lệ là phần trăm theo khối lượng.

Bảng 5. Các mức kỹ thuật tham chiếu cần kiểm chứng trên nguyên liệu sau xử lý

Chỉ tiêu và phạm vi	Mức đề xuất	Căn cứ và phép thử tham chiếu
Vật liệu bitum trong cốt liệu lớn cho bê tông	≤ 1,0%	[28] EN 933-11
Nhóm vật liệu khác và thủy tinh	≤ 0,50%	[28] EN 933-11
Khối lượng thể tích hạt khô	≥ 2.000 kg/m^3	[29] BS 812 Part 2
Độ hút nước cốt liệu lớn	≤ 7,0%	[27] EN 1097-6
	≤ 10,0%	[29] BS 812 Part 2
Hệ số Los Angeles	≤ 40%	[30] EN 1097-2
Hạt lọt sàng 0,063 mm	≤ 1,5%	[28] EN 933-1
Clorua tan trong nước, tính theo Cl^-	≤ 0,05%	[31] EN 1744-1
Sunfat tan trong axit, tính theo SO_3	≤ 0,80%	[31] EN 1744-1

Bảng 6. Yêu cầu của cốt liệu lớn theo BS 8500-2:2006

Tiêu chí	Yêu cầu[A)]					
	Tỷ lệ gạch xây	Tỷ lệ cốt liệu nhỏ lớn nhất	Tỷ lệ vật liệu nhẹ lớn nhất[B)]	Tỷ lệ nhựa đường lớn nhất	Tỷ lệ vật liệu khác lớn nhất, VD: kính, nhựa, kim loại...	Tỷ lệ sunfat hòa tan trong axit lớn nhất (SO_3)
Cốt liệu lớn tái chế từ BT vỡ (RCA)[A), C)]	5	5	0,5	5	1	1
Cốt liệu lớn tái chế (RA)	100	3	1,0	10	1	—[D)]

A) Khi cốt liệu tái chế (CLTC) được nghiền từ BT có thành phần biết trước chưa qua sử dụng, B) Vật liệu có khối lượng riêng nhỏ hơn 1000 kg/m^3. C) Tiêu chí của RCA có thể dùng cho cả hỗn hợp với cốt liệu lớn tự nhiên gần giống với các thành phần được xác định. D) Giới hạn và phương pháp thử cần phải được xác định trong từng trường hợp.

Bảng 6 đưa ra các yêu cầu của cốt liệu lớn tái chế từ CTRXD theo BS 8500-2:2006, trong đó tập trung đánh giá tỷ lệ cho phép của các thành phần như gạch xây, cốt liệu mịn, cốt liệu nhẹ, tỷ lệ nhựa

đường, các tỷ lệ tạp chất và có quy định nồng độ sunfat hòa tan [32].

Đối với các tiêu chuẩn của Nhật Bản, Bảng 7 thể hiện yêu cầu phân loại cốt liệu tái chế từ CTRXD, trong đó một trong những chỉ tiêu chính làm căn cứ phân loại chất lượng là độ hút nước của cốt liệu lớn (CLL) và cốt liệu nhỏ (CLN) [33].

Bảng 7. Yêu cầu của cốt liệu tái chế theo mục đích sử dụng theo tiêu chuẩn Nhật Bản

Tiêu chí		CLTC từ PTXD		
		Loại H	Loại M	Loại L
Tiêu chuẩn		JIS A 5021:2018	JIS A 5022:2018	JIS A 5023:2018
Đặc điểm		CLTC sử dụng cho BT thường, được xử lý sau nghiền	CLTC có thể được sử dụng cho BT không yêu cầu cụ thể về co ngót, bền băng giá	CLTC nghiền từ bê tông, có thể sử dụng cho BT có cường độ tương đối thấp
Độ hút nước	CLL	< 3%	< 5%	< 7%
	CLN	< 3,6%	< 7%	< 13%
Ứng dụng		Không có giới hạn về phạm vi sử dụng	BT cấu kiện cọc, dầm, móng	BT san nền, mác thấp

Một số nghiên cứu trên thế giới phân loại CLTC theo chất lượng dựa trên các chỉ tiêu khối lượng thể tích hạt, độ hút nước và độ mài mòn Los Angeles được thể hiện trong Bảng 8 [34]. Đây là căn cứ phân loại, không phải quy chuẩn bắt buộc.

Bảng 8. Phân loại chất lượng cốt liệu theo kinh nghiệm quốc tế

Chất lượng	A			B			C			D
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Khối lượng thể tích hạt ρ_d (kg/m^3)	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	Không giới hạn
Độ hút nước (%)	1,5	2,5	3,5	5	6,5	8,5	10,5	13	15	
Độ mài mòn Los Angeles (%)		40			45			50		

Đối với các tiêu chuẩn TCVN, TCVN 11969:2018 [8] quy định yêu cầu kỹ thuật đối với cốt liệu lớn sử dụng cho bê tông. Các yêu cầu kỹ thuật được dùng để phân loại thành Loại I và Loại II dựa trên các chỉ tiêu cơ lý, độ hút nước, tạp chất. Trong khi đó, các ngưỡng cho phép tập trung vào hàm lượng ion Cl^- hòa tan trong axit, hàm lượng SO_3 và khả năng phản ứng kiềm – silic cốt liệu.

Đối với vật liệu san lấp và móng đường cần phân loại theo TCVN 13946:2024 [10] hoặc TCVN 13694:2023 [9], kiểm tra cấp phối, tính dẻo, khả năng đầm chặt, sức chịu tải và ổn định thể tích theo phạm vi ứng dụng.

4.3. Mức môi trường đề xuất và điều kiện đối sánh

Yêu cầu môi trường được đề xuất theo hai lớp quản lý. Lớp thứ nhất theo quy định chất thải theo QCVN 07:2025/BNNMT [11] và các quy định liên quan. Lớp thứ hai là sự phù hợp cho hướng tái sử dụng cụ thể, trong đó đánh giá chỉ tiêu trong chất rắn, khả năng giải phóng qua ngâm chiết và điều kiện tiếp xúc. Việc đạt yêu cầu lớp thứ nhất không đồng nghĩa sẽ đáp ứng lớp thứ hai. Tuy nhiên, đối với CTRXD, việc đánh giá chỉ tiêu trong chất rắn không phản ánh đúng toàn diện rủi ro môi trường

thực tế (rủi ro rò rỉ), có thể gây lãng phí tài nguyên và cản trở quá trình thúc đẩy vật liệu tái chế. Vì vậy đối với CTRXD nên ưu tiên đánh giá theo dịch nước chiết. Bảng 9 thể hiện cách phân cấp vật liệu theo hệ thống Đức [7].

Bảng 9. Một số giá trị tham chiếu theo cấp vật liệu tái chế của Đức [7]

Chỉ tiêu	Đơn vị	RC-1[1]	RC-2	RC-3
Sunfat, SO_4^{2-}	mg/L	600	1.000	3.500
Cr tổng	µg/L	150	440	900
Cu	µg/L	110	250	500
V	µg/L	120	700	1.350
PAH_{15} trong dịch chiết	µg/L	4	8	25
PAH_{16} trong chất rắn	mg/kg	10	15	20
pH	—	6–13	6–13	6–13
Độ dẫn điện	µS/cm	2.500	3.200	10.000

[1] RC-1, RC-2, RC-3 là cấp chất lượng của vật liệu xây dựng tái chế theo quy định tiêu chuẩn kỹ thuật môi trường và xây dựng của Đức, xếp theo thứ tự giảm dần.

4.4. Tổ chức đánh giá

Các chỉ tiêu ngưỡng an toàn cần xác định theo nguồn và quá trình xử lý, bao gồm quy định cách lấy mẫu đại diện. Với sản xuất liên tục, một nghiên cứu tham khảo đã sử dụng 20 mẫu tổ hợp từ các lô khác nhau đánh giá phân loại nguồn CTRXD, sau đó đánh giá định kỳ 5 mẫu tổ hợp cho mỗi 4.000 tấn hoặc tần suất ba tháng một lần với các nguồn ổn định [35]. Tuy nhiên, cần đánh giá chi phí và mức không đồng nhất và khả năng thực hiện tại Việt Nam trong quá trình áp dụng.

Cần lấy mẫu ghép cặp P_0–P_1–P_2 trên các lô được truy xuất để đánh giá cân bằng vật chất, hiệu quả tách tạp chất và khả năng ổn định chất lượng. Với đầu ra là cốt liệu, cần bổ sung đánh giá thành phần khối lượng, độ hút nước, khối lượng thể tích hạt, Los Angeles, clorua, sunfat và thử nghiệm sản phẩm thứ cấp. Về môi trường, thực hiện phép thử phục vụ phân định CTNH theo QCVN 07:2025/BNNMT. Đồng thời lựa chọn phép ngâm chiết theo kịch bản tiếp xúc của ứng dụng dự kiến và lựa chọn ngưỡng phù hợp. Tại châu Âu áp dụng Tiêu chuẩn EN 12457 [20], tổng lượng kim loại trong gạch/bê tông không quyết định ngưỡng an toàn mà mức độ phát tán các chất nguy hại vào đất và nước ngầm hoặc môi trường khi vật liệu đó đưa vào công trình mới là cơ sở để quyết định ngưỡng an toàn.

5. Kết luận

Kết quả phân tích 9 mẫu CTRXD cho thấy khối lượng thể tích trạng thái tự nhiên đạt 1.116,1 ± 142,6 kg/m^3 và độ ẩm đạt 13,34 ± 2,50%. Tương quan giữa hai đại lượng có độ nhạy cao, không đủ cơ sở để phân cấp nguyên liệu P_0 dựa trên hai chỉ tiêu này. Biến động phần CTRXD kích thước ≥ 70 mm từ 0 đến 73,20% và phần dưới 2,5 mm từ 0 đến 40,50% là căn cứ để tổ chức phân luồng xử lý CTRXD và quy trình xử lý phù hợp, tối ưu, tiết kiệm chi phí. Các kết quả của bài báo tạo bộ mẫu khảo sát, chưa đại diện cho toàn bộ CTRXD.

Dữ liệu bốn kim loại trong dịch chiết ghi nhận Pb cao tại mẫu HV2.2 so với ngưỡng đối chiếu CTNH, qua đó nhấn mạnh yêu cầu truy xuất nguồn, sàng lọc và cách ly lô nghi ngờ tại P_0, sau đó thử xác nhận trước khi quyết định xử lý.

Nghiên cứu đề xuất kiểm soát theo P_0–P_1–P_2, và các mức tham chiếu tại Bảng 5–9, gắn với trạng thái vật liệu, ứng dụng và phương pháp thử. Tùy theo định hướng sử dụng, luồng sản phẩm đầu ra có thể được đánh giá, phân cấp và áp dụng ngưỡng an toàn phù hợp. Các nội dung này là cơ sở tham

khảo cho nghiên cứu xây dựng QCVN. Cần tiếp tục khảo sát với cỡ mẫu lớn hơn, phân tầng theo vùng miền, loại công trình, thành phần và thời điểm phát sinh. Đồng thời cần kiểm chứng chuỗi P_0–P_1–P_2, mở rộng thông số môi trường và phép thử theo kịch bản tiếp xúc, đánh giá tính khả thi trước khi chính thức hóa các ngưỡng trong QCVN.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Bộ Xây dựng cho Nhiệm vụ khoa học và công nghệ: "Nghiên cứu xây dựng cơ sở khoa học và thực tiễn phục vụ xây dựng Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về tái chế và sử dụng chất thải rắn xây dựng", theo Quyết định số 1378/QĐ-BXD của Bộ Xây dựng ngày 19/8/2025.

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 ChatGPT (OpenAI) nhằm rà soát chính tả. Các 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] Thành ủy Hà Nội (2026). *Đẩy nhanh tiến độ các dự án xử lý rác, chấm dứt tình trạng đổ trộm chất thải*. Cổng thông tin điện tử Đảng bộ thành phố Hà Nội, ngày 19/8/2026.

[2] Tuân, N. K., Sơn, T. H., Phương, L. V., Hiển, N. X., Kiên, N. T., Huy, V. V., Cường, T. V. (2018). Nghiên cứu hiện trạng quản lý phế thải xây dựng và phá dỡ ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 12(7):107–116.

[3] Nguyen, H. G., Nguyen, D. T., Nghiem, H. T., Tran, V. C., Kato, A., Matsuno, A., Isobe, Y., Kawasaki, M., Kawamoto, K. (2021). Current management condition and waste composition characteristics of construction and demolition waste landfills in Hanoi of Vietnam. *Sustainability*, 13(18):10148.

[4] Nguyen, L. H., Tran, T. V. N., Hoang, M. G., Nguyen, H. G., Tong, T. K., Isobe, Y., Kawasaki, M., Ishigaki, T., Kawamoto, K. (2023). Material and monetary flows of construction and demolition waste and assessment on physical and environmental properties of illegally dumped construction and demolition waste in Hanoi. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(60):125965–125976.

[5] Cuong, T. V., Kawamoto, K., Nga, T. T. V., Giang, N. H. (2023). Mechanical properties of synthetic aggregate pelletized by waste concrete fines in Vietnam. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 17(2):1–8.

[6] European Commission (2024). *EU construction & demolition waste management protocol including guidelines for pre-demolition and pre-renovation audits of construction works*. Publications Office of the European Union.

[7] Bundesregierung (2021). *Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV)*.

[8] TCVN 11969:2018. *Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông*. Bộ Khoa học và Công nghệ.

[9] TCVN 13694:2023. *Cấp phối tái chế từ chất thải rắn xây dựng làm lớp móng đường giao thông đô thị – Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử*. Bộ Khoa học và Công nghệ.

[10] TCVN 13946:2024. *Vật liệu san lấp tái chế từ phế thải phá dỡ công trình*. Bộ Khoa học và Công nghệ.

[11] QCVN 07:2025/BNNMT. *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về ngưỡng chất thải nguy hại*. Bộ Nông nghiệp và Môi trường. Ban hành kèm theo Thông tư số 44/2025/TT-BNNMT ngày 06/08/2025.

[12] QCVN 16:2023/BXD. *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về sản phẩm, hàng hóa vật liệu xây dựng*. Bộ Xây dựng. Ban hành kèm theo Thông tư số 04/2023/TT-BXD ngày 30/06/2023.

[13] Bộ Xây dựng (2026). *Thông tư quản lý chất lượng sản phẩm, hàng hóa vật liệu xây dựng*. Số 41/2026/TT-BXD, ngày 26/06/2026.

[14] TCVN 7572-7:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa – Phương pháp thử – Phần 7: Xác định độ ẩm*. Bộ Khoa học và Công nghệ.

[15] TCVN 7572-2:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa – Phương pháp thử – Phần 2: Xác định thành phần hạt*. Bộ Khoa học và Công nghệ.

[16] TCVN 7572-4:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa – Phương pháp thử – Phần 4: Xác định khối lượng riêng, khối lượng thể tích và độ hút nước*. Bộ Khoa học và Công nghệ.

[17] TCVN 7572-6:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa – Phương pháp thử – Phần 6: Xác định khối lượng thể tích xốp và độ hổng*. Bộ Khoa học và Công nghệ.

[18] US Environmental Protection Agency (1992). *Method 1311: Toxicity characteristic leaching procedure*. SW-846, Revision 0.

[19] US Environmental Protection Agency (1994). *Method 1312: Synthetic precipitation leaching procedure*. SW-846, Revision 0.

[20] EN 12457-2:2002. *Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction)*. European Committee for Standardization, Brussels.

[21] Souza, F. S., de Carvalho, J. M. F., Silveira, G. G., Araújo, V. C., Peixoto, R. A. F. (2021). Application of construction and demolition waste in civil construction in the Brazilian Amazon—Case study of the city of Rio Branco. *Materials*, 14(9):2247.

[22] Saiz Martínez, P., Ferrández, D., Melane-Lavado, A., Zaragoza-Benzal, A. (2023). Characterization of three types of recycled aggregates from different construction and demolition waste: An experimental study for waste management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4): 3709.

[23] Agrela, F., González-Gallardo, F., Rosales, J., Tavira, J., Ayuso, J., Cabrera, M. (2020). Complete real-scale application of recycled aggregates in a port loading platform in Huelva, Spain. *Materials*, 13(11): 2651.

[24] Abramović, F., Popović, M., Simić, V., Matović, V., Šerović, R. (2024). Characterization and environmental evaluation of recycled aggregates from construction and demolition waste in Belgrade city area (Serbia). *Materials*, 17(4):820.

[25] Hernández, M., Sánchez, I., Navarro, R., Sánchez, M., Rodríguez, C. (2024). Influence of the properties of different types of recycled aggregate on the service properties and leaching of paving blocks manufactured at industrial scale. *Materials*, 17(12):2898.

[26] Civil Engineering and Development Department (2024). *Project administration handbook for civil engineering works – Chapter 5: Contract documents*. Revision 4(A), cập nhật ngày 22/12/2025, Appendix 5.30: Particular Specification for Designed Mix Concrete with 20% Recycled Coarse Aggregate, tr. 236–238. Hong Kong.

[27] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática (2021). *Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural*. Boletín Oficial del Estado.

[28] EN 933-11:2009. *Tests for geometrical properties of aggregates – Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate*. European Committee for Standardization, Brussels.

[29] BS 812-2:1995. *Testing aggregates. Methods for determination of density*. British Standards Institution, London, United Kingdom.

[30] EN 1097-2:2020. *Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation*. European Committee for Standardization, Brussels.

[31] EN 1744-1:2009. *Tests for chemical properties of aggregates – Part 1: Chemical analysis*. European Committee for Standardization, Brussels.

[32] BS 8500-2:2006. *Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 2: Specification for constituent materials and concrete*. British Standards Institution, London.

[33] JIS A 5021, 5022, 5023:2018. *Recycled aggregate for concrete – Class H, M, L*. Japanese Standards Association, Tokyo.

[34] Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65:201–217.

[35] NSW Environment Protection Authority (2014). *The recovered aggregate order 2014*. Sydney, Australia.