VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Quản lý chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh trên môi trường dữ liệu chung theo mô hình kinh tế tuần hoàn tại Việt Nam

Lê Minh Thoa[1*]

[1] Đại học Thủy lợi

TỪ KHOÁ

Chuỗi cung ứng xanh
Vật liệu xây dựng
Môi trường dữ liệu chung
Kinh tế tuần hoàn

TÓM TẮT

Quản lý vật liệu theo kinh tế tuần hoàn đòi hỏi liên kết thông tin giữa lựa chọn, cung ứng, sử dụng và thu hồi. Bài báo sử dụng tổng hợp tài liệu có định hướng và đối chiếu yêu cầu quản lý thông tin BIM/CDE để đề xuất khung quản lý chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh. Kết quả gồm cấu trúc dữ liệu tối thiểu, quy trình kiểm soát theo vòng đời, phân định trách nhiệm và chỉ tiêu đánh giá từ chứng từ. Nghiên cứu đồng thời xây dựng tám giả thuyết và thiết kế kiểm chứng định lượng về chất lượng dữ liệu, phối hợp, truy xuất, mua sắm xanh và năng lực thu hồi. Đóng góp của bài báo là liên kết dữ liệu với quyết định và bằng chứng thực hiện tuần hoàn.

KEYWORDS

Green supply chain
Construction materials
Common Data Environment
Circular economy

ABSTRACT

Circular economy-based material management requires information integration across selection, supply, usage, and recovery phases. This paper employs a targeted literature review and benchmarks against BIM/CDE information management requirements to propose a management framework for green construction material supply chains. The findings encompass a minimum data structure, a lifecycle-based control process, a definition of responsibilities, and assessment metrics derived from documentation. Additionally, the study formulates eight hypotheses and designs a quantitative validation approach addressing data quality, collaboration, traceability, green procurement, and recovery capabilities. The paper's contribution lies in linking data to decision-making and evidence of circularity implementation.

1. Đặt vấn đề

Chuyển đổi từ chuỗi cung ứng tuyến tính sang chuỗi cung ứng tuần hoàn đặt ra yêu cầu quản lý vật liệu xây dựng xuyên suốt vòng đời công trình. Theo cách tiếp cận này, vật liệu cần được xem xét từ khâu lựa chọn, mua sắm, vận chuyển và sử dụng đến bảo trì, tháo dỡ, thu hồi và tái sử dụng. Việc lựa chọn vật liệu xanh vì vậy cần gắn với khả năng duy trì giá trị sử dụng, giảm hao hụt và tổ chức các dòng vật liệu quay trở lại quá trình sản xuất. Để thực hiện những yêu cầu đó, các chủ thể tham gia dự án cần có thông tin đáng tin cậy về nguồn gốc, đặc tính kỹ thuật, khối lượng, vị trí và khả năng thu hồi của vật liệu.

Trong chuỗi cung ứng xây dựng, thông tin vật liệu được hình thành tại nhiều chủ thể và thời điểm khác nhau. Đơn vị thiết kế xác định yêu cầu kỹ thuật; nhà cung cấp cung cấp hồ sơ sản phẩm; nhà thầu ghi nhận khối lượng giao nhận, sử dụng và tồn kho; đơn vị vận hành tiếp nhận thông tin phục vụ bảo trì, thay thế. Khi các hồ sơ thiếu mã nhận diện thống nhất hoặc không được cập nhật liên tục, việc đối chiếu giữa yêu cầu thiết kế, vật liệu mua sắm và vật liệu thực tế sử dụng có thể gặp khó khăn. Sự gián đoạn thông tin cũng làm hạn chế khả năng xác định vật liệu có thể thu hồi và lựa chọn phương án tái sử dụng phù hợp. Do đó, quản lý chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh đòi hỏi một cơ chế phối hợp dữ liệu gắn với trách nhiệm và quyết định của từng chủ thể.

Môi trường dữ liệu chung (Common Data Environment - CDE) cung cấp nền tảng để tổ chức cơ chế phối hợp này. Hướng dẫn triển khai bộ tiêu chuẩn ISO 19650 xem CDE trong mối liên hệ giữa quy trình quản lý thông tin và giải pháp công nghệ, hỗ trợ kiểm soát trạng thái, phiên bản và quá trình trao đổi thông tin. Trên cơ sở đó, bài báo xem xét khả năng liên kết hồ sơ kỹ thuật, dữ liệu khối lượng, chứng từ giao nhận và thông tin thu hồi thông qua mã nhận diện vật liệu. Cơ chế liên kết được kỳ vọng hỗ trợ truy xuất nguồn gốc, kiểm soát thay đổi và cung cấp dữ liệu cho quyết định mua sắm, sử dụng, tái phân phối hoặc thu hồi vật liệu [1-3].

Tại Việt Nam, Kế hoạch hành động quốc gia thực hiện kinh tế tuần hoàn đến năm 2035, được ban hành theo Quyết định số 222/QĐ-TTg ngày 23/01/2025, tạo cơ sở chính sách cho việc phát triển các mô hình sử dụng tài nguyên và chuỗi giá trị tuần hoàn. Trong bối cảnh này, vấn đề cần làm rõ ở cấp độ dự án là cách chuyển hóa dữ liệu vật liệu thành các quyết định quản lý cụ thể. Việc triển khai CDE cần đi kèm quy định về dữ liệu phải thu thập, trách nhiệm cập nhật, điều kiện chấp thuận và phương thức sử dụng thông tin. Đây là cơ sở để kết nối mục tiêu lựa chọn vật liệu xanh với yêu cầu giảm phát sinh chất thải và duy trì giá trị vật liệu [4].

Xuất phát từ những vấn đề trên, bài báo đề xuất khung quản lý

*Liên hệ tác giả: thoalm@tlu.edu.vn
Nhận ngày 02/10/2026, sửa xong ngày 12/10/2026, chấp nhận đăng ngày 13/10/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1525

chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh trên môi trường dữ liệu chung theo mô hình kinh tế tuần hoàn. Nghiên cứu xác định yêu cầu dữ liệu, cơ chế phối hợp và mối liên hệ giữa thông tin với quyết định vật liệu; đồng thời xây dựng giả thuyết, thang đo và chỉ tiêu phục vụ kiểm chứng trong nghiên cứu tiếp theo.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng cách tiếp cận định tính, tổng hợp tài liệu có định hướng và xây dựng khung khái niệm. Kết quả của bài báo là cấu trúc quản lý và thiết kế kiểm chứng đề xuất; chưa bao gồm kết quả ước lượng từ dữ liệu khảo sát. Các phương pháp cụ thể gồm:

(i) Thu thập tài liệu: Nghiên cứu sử dụng tổng hợp tài liệu có định hướng, không phải tổng quan hệ thống. Tập tài liệu gồm các nguồn viện dẫn trong bài, phân thành tiêu chuẩn và hướng dẫn BIM/CDE; nghiên cứu về hộ chiếu vật liệu, truy xuất và tuần hoàn; chính sách và nghiên cứu trong bối cảnh Việt Nam. Tài liệu được giữ lại khi có tác giả hoặc cơ quan ban hành xác định, liên quan trực tiếp đến dữ liệu hoặc quyết định vật liệu và có nội dung làm căn cứ xây dựng khung. Các tuyên bố quảng bá không có bằng chứng và nội dung không liên quan đến quản lý vật liệu không được dùng làm căn cứ. Nghiên cứu không báo cáo số lượng kết quả tìm kiếm, tỷ lệ sàng lọc hoặc quy trình PRISMA vì chưa có nhật ký truy vấn đầy đủ để kiểm chứng các thông tin đó.

(ii) Phương pháp phân tích, tổng hợp: Tác giả phân tích yêu cầu thông tin và cơ chế phối hợp giữa chủ đầu tư, đơn vị thiết kế, nhà cung cấp, nhà thầu và đơn vị vận hành. Nội dung phân tích tập trung vào mã nhận diện vật liệu, thuộc tính kỹ thuật và môi trường, khối lượng, trạng thái sử dụng, kiểm soát phiên bản, trách nhiệm cập nhật và quyền truy cập dữ liệu. Các kết quả nghiên cứu trước được tổng hợp cùng bộ tiêu chuẩn ISO 19650 và hướng dẫn BIM của Việt Nam để xác định những thành phần hỗ trợ quản lý chuỗi cung ứng tuần hoàn [1-3, 15, 16].

(iii) Phương pháp đối chiếu và xây dựng khung: Các yêu cầu quản lý thông tin được đối chiếu với nhu cầu lựa chọn, giao nhận, sử dụng và thu hồi vật liệu. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xác định cấu trúc dữ liệu, trách nhiệm phối hợp và điều kiện chấp thuận thông tin phục vụ quyết định; đồng thời đề xuất mô hình nghiên cứu, giả thuyết, thang đo và chỉ tiêu đối chiếu bằng chứng. Khung được thiết kế để kiểm chứng trong nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo.

Quy trình tổng hợp gồm bốn bước: (1) xác định câu hỏi về dữ liệu cần có, chủ thể chịu trách nhiệm và quyết định tuần hoàn cần hỗ trợ; (2) đọc, trích xuất luận điểm theo biểu mẫu nguồn – yêu cầu thông tin – hoạt động vòng đời – bằng chứng – giới hạn; (3) mã hóa nội dung thành các nhóm nhận diện, chất lượng, phối hợp, truy xuất, mua sắm và thu hồi; (4) đối chiếu các nhóm với quy trình CDE và điều kiện gói thầu tại Việt Nam để hình thành dữ liệu tối thiểu, điểm kiểm soát, giả thuyết và chỉ báo. Đây là quy trình phân tích của khung đề xuất; đánh giá độc lập giữa nhiều người mã hóa và kiểm chứng chuyên gia chưa được thực hiện.

Căn cứ hình thành các thành phần: nhận diện, nguồn gốc và liên kết hồ sơ được xây dựng từ nghiên cứu hộ chiếu vật liệu và truy xuất [6, 8, 13]; thuộc tính kỹ thuật và môi trường dựa trên đánh giá sản phẩm theo vòng đời [6, 14]; khối lượng và giao nhận là phần tác giả cụ thể hóa để kiểm soát dòng vật liệu tại gói thầu; vị trí, tình trạng và lịch sử sử dụng được nối với yêu cầu quản lý thông tin trong vận hành [20]; khả năng tháo rời, thu hồi và đơn vị tiếp nhận dựa trên nguyên tắc tuần hoàn và hộ chiếu vật liệu [5, 6, 13]. Kiểm soát trạng thái, phiên bản và trách nhiệm thông tin dựa trên [1–3, 15, 16]. DQ, COL và TR thể hiện các điều kiện thông tin; GP và RC thể hiện quyết định, nguồn lực triển khai; CE thể hiện hoạt động tuần hoàn đã thực hiện. Những đường tác động H1–H8 là suy luận lý thuyết của tác giả, chưa phải quan hệ đã được các nguồn này kiểm định trong mô hình hiện tại.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Cơ sở lý thuyết về vật liệu xanh, môi trường dữ liệu chung và kinh tế tuần hoàn

a) Vật liệu xây dựng xanh

Vật liệu xây dựng xanh được hiểu trong nghiên cứu này là vật liệu đáp ứng yêu cầu về công năng, chất lượng và an toàn, đồng thời có đặc tính giúp giảm tác động bất lợi đến môi trường và sức khỏe con người trong vòng đời sử dụng. Việc đánh giá cần xem xét các giai đoạn khai thác nguyên liệu, sản xuất, vận chuyển, thi công, vận hành và xử lý sau sử dụng. Cách tiếp cận vòng đời giúp hạn chế việc lựa chọn vật liệu chỉ dựa trên một đặc tính môi trường riêng lẻ mà bỏ qua tác động tại các giai đoạn khác [14].

Các tiêu chí đánh giá vật liệu xây dựng xanh gồm: (i) Tiết kiệm tài nguyên: giảm sử dụng nguyên liệu nguyên sinh, tận dụng vật liệu thu hồi hoặc nguyên liệu tái chế; (ii) Giảm tác động môi trường: tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải và hạn chế các chất có hại; (iii) Duy trì giá trị sử dụng: có độ bền phù hợp, thuận tiện cho bảo trì, sửa chữa, tháo dỡ, tái sử dụng hoặc tái chế. Các tiêu chí cần được xem xét cùng với yêu cầu kỹ thuật và điều kiện sử dụng cụ thể [5, 14].

b) Quản lý chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh

Chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh là mạng lưới các chủ thể và hoạt động liên quan đến cung cấp, sử dụng và xử lý vật liệu đáp ứng các yêu cầu môi trường của dự án. Mạng lưới này bao gồm nhà sản xuất, nhà cung cấp, đơn vị vận chuyển, chủ đầu tư, đơn vị thiết kế, nhà thầu, đơn vị vận hành và các tổ chức thu hồi, tái sử dụng hoặc tái chế.

Quản lý chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh là quá trình lập kế hoạch, tổ chức, phối hợp và kiểm soát dòng vật liệu, thông tin và tài chính giữa các chủ thể, từ lựa chọn nguồn cung, mua sắm, vận chuyển, lưu kho đến sử dụng và thu hồi vật liệu, nhằm đáp ứng yêu cầu về chất lượng, chi phí, tiến độ, đồng thời tiết kiệm tài nguyên và giảm tác động môi trường trong vòng đời công trình.

Các hoạt động chủ yếu gồm xác lập tiêu chí lựa chọn vật liệu, đánh giá nhà cung cấp, kiểm chứng thông tin sản phẩm, kiểm soát khối lượng và chất lượng giao nhận, hạn chế hao hụt và tổ chức thu hồi sau sử dụng.

c) Môi trường dữ liệu chung

Môi trường dữ liệu chung (Common Data Environment - CDE) là môi trường được thống nhất để thu thập, quản lý và phân phối thông tin phục vụ các chủ thể tham gia dự án hoặc quản lý tài sản. Theo hướng dẫn triển khai bộ tiêu chuẩn ISO 19650, CDE bao gồm quy trình quản lý thông tin và các giải pháp công nghệ hỗ trợ quy trình đó. Thông tin được kiểm soát thông qua các trạng thái như đang thực hiện, chia sẻ, phát hành và lưu trữ, cùng với quy định về phiên bản, xem xét và chấp thuận [1-3].

Đối với quản lý vật liệu, nghiên cứu đề xuất sử dụng CDE để liên kết yêu cầu thiết kế, thông tin sản phẩm, khối lượng, chứng từ giao nhận, kết quả nghiệm thu và hồ sơ phục vụ thu hồi. Mã nhận diện thống nhất giúp đối chiếu thông tin của cùng một vật liệu hoặc cấu kiện giữa các giai đoạn. Khả năng hỗ trợ quyết định phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu, trách nhiệm cập nhật, quyền truy cập và quy trình kiểm soát thông tin được thiết lập giữa các bên.

d) Kinh tế tuần hoàn trong quản lý vật liệu xây dựng

Kinh tế tuần hoàn là mô hình kinh tế hướng tới loại bỏ chất thải và ô nhiễm ngay từ thiết kế, duy trì sản phẩm và vật liệu trong các vòng tuần hoàn ở giá trị cao nhất có thể, đồng thời tái tạo tự nhiên. Trong mô hình này, các hoạt động bảo trì, sửa chữa, tái sử dụng, tái sản xuất và tái chế giúp kéo dài vòng đời sản phẩm, giảm nhu cầu khai thác tài nguyên mới và hạn chế chất thải phát sinh [5].

Trong quản lý vật liệu xây dựng, cách tiếp cận này đưa yêu cầu tiết kiệm tài nguyên và duy trì giá trị vào các quyết định thiết kế, cung ứng, thi công, vận hành và tháo dỡ. Các phương án bảo trì, sửa chữa và tái sử dụng được ưu tiên xem xét khi đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, an toàn và tính khả thi kinh tế, trước khi chuyển sang tái chế [5-7].

e) Khái niệm tổng hợp và phạm vi vận dụng trong nghiên cứu

Trên cơ sở các khái niệm thành phần, bài báo đề xuất định nghĩa: Quản lý chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh trên môi trường dữ liệu chung theo mô hình kinh tế tuần hoàn là quá trình phối hợp và kiểm soát các hoạt động lựa chọn, cung ứng, sử dụng và thu hồi vật liệu đáp ứng yêu cầu kỹ thuật và môi trường, thông qua hệ thống thông tin được chuẩn hóa, chia sẻ và kiểm soát trên CDE, nhằm giảm hao hụt, kéo dài thời gian sử dụng và duy trì giá trị vật liệu qua các vòng tuần hoàn.

Khái niệm này thể hiện sự gắn kết giữa ba nội dung: vật liệu xanh xác lập yêu cầu đối với sản phẩm; kinh tế tuần hoàn định hướng cách tổ chức dòng vật liệu; CDE hỗ trợ quản lý thông tin phục vụ quyết định. Vật liệu có đặc tính môi trường tốt vẫn cần phương án sử dụng và thu hồi phù hợp để tham gia các vòng tuần hoàn. Tương tự, thông tin được lưu trữ trên CDE chỉ hỗ trợ quản lý khi có thể truy xuất, kiểm chứng và sử dụng đúng thời điểm.

3.2. Kinh tế tuần hoàn trong quản lý vật liệu xây dựng xanh

Vận dụng các nguyên tắc tại mục 3.1, nghiên cứu xác định năm nội dung quản lý để kết nối yêu cầu đối với vật liệu xanh với các hoạt động tuần hoàn trong vòng đời công trình:

Thứ nhất, giảm nhu cầu vật liệu và phòng ngừa hao hụt. Yêu cầu tuần hoàn cần được đưa vào giai đoạn thiết kế thông qua tối ưu giải pháp kết cấu, kích thước và khối lượng vật liệu nhưng vẫn bảo đảm công năng, chất lượng công trình. Trong mua sắm và thi công, việc đối chiếu khối lượng thiết kế, đặt mua, giao nhận, tồn kho và sử dụng giúp nhận diện chênh lệch, kiểm soát mua thừa và hạn chế tổn thất. Vật liệu dư còn đáp ứng yêu cầu cần được xem xét điều chuyển hoặc sử dụng cho hạng mục phù hợp.

Thứ hai, lựa chọn vật liệu theo vòng đời. Quyết định lựa chọn cần kết hợp các tiêu chí kỹ thuật, chi phí và môi trường, có xét đến độ bền, nhu cầu bảo trì, khả năng sửa chữa, tháo rời và xử lý sau sử dụng. Việc đánh giá tác động qua các giai đoạn của vòng đời giúp tránh chuyển gánh nặng môi trường từ sản xuất sang vận hành hoặc xử lý cuối vòng đời. Trong phạm vi nghiên cứu, hàm lượng tái chế và khả năng tái sử dụng là các tiêu chí cần xem xét cùng với chất lượng, nguồn gốc và sự phù hợp với điều kiện sử dụng cụ thể [14].

Thứ ba, kéo dài thời gian sử dụng và bảo toàn giá trị. Quản lý vật liệu cần gắn với theo dõi tình trạng, bảo trì và sửa chữa công trình để duy trì công năng của vật liệu, cấu kiện. Khi cải tạo hoặc thay đổi nhu cầu sử dụng, cần đánh giá khả năng giữ lại, sửa chữa hay sử dụng tiếp các bộ phận còn phù hợp. Đối với thiết kế mới, khả năng tiếp cận để bảo trì và tháo rời cần được xem xét từ đầu nhằm tạo điều kiện cho những chu kỳ sử dụng tiếp theo.

Thứ tư, tổ chức thu hồi, tái sử dụng và tái chế. Dòng thu hồi cần được kết nối với dòng cung ứng thông qua xác định vật liệu có thể thu hồi, phương thức phân loại, điều kiện lưu giữ, vận chuyển và đơn vị tiếp nhận. Sau tháo dỡ, vật liệu hoặc cấu kiện phải được đánh giá tình trạng và mức độ đáp ứng yêu cầu của mục đích sử dụng tiếp theo. Phương án tái sử dụng hoặc tái chế cần có đầu ra phù hợp, trách nhiệm thực hiện rõ ràng và hồ sơ xác nhận khối lượng thực tế.

Thứ năm, quản lý thông tin phục vụ các vòng tuần hoàn. Bài báo đề xuất liên kết dữ liệu nhận diện, nguồn gốc, thành phần, khối lượng, vị trí lắp đặt và lịch sử bảo trì trên môi trường dữ liệu chung. Thông tin về phương thức liên kết, khả năng tháo rời và tình trạng vật liệu được bổ sung để hỗ trợ lập phương án thu hồi. Mỗi nhóm dữ liệu cần xác định chủ thể cung cấp, thời điểm cập nhật và trách nhiệm kiểm tra nhằm bảo đảm thông tin có thể sử dụng khi ra quyết định [8, 13].

Theo khung đề xuất, mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn cần được đánh giá bằng các chỉ tiêu có phạm vi và cách tính rõ ràng, như tỷ lệ hao hụt, khối lượng vật liệu dư được sử dụng tiếp, tỷ lệ thu hồi,

tái sử dụng và tái chế. Khả năng thu hồi dự kiến cần được phân biệt với kết quả thu hồi thực tế; các chỉ tiêu cũng cần tránh tính trùng khối lượng. Cách tiếp cận này tạo cơ sở liên kết mục tiêu tuần hoàn với dữ liệu, trách nhiệm và quyết định quản lý trong chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh.

3.3. Mô hình nghiên cứu và thiết kế kiểm chứng định lượng

a) Mô hình nghiên cứu

Đơn vị phân tích của thiết kế kiểm chứng là gói thầu có hoạt động mua sắm và sử dụng vật liệu trong dự án có CDE. Mỗi phiếu gắn với một gói thầu và kỳ đánh giá xác định. Người trả lời phải hiểu quy trình của gói thầu; hồ sơ được dùng để đối chiếu. Nhiều người trả lời cùng gói thầu chỉ là nhiều nguồn thông tin cho một đơn vị phân tích. Mã dự án được lưu để xử lý phụ thuộc giữa các gói thầu thuộc cùng dự án.

Hệ phương trình cấu trúc đề xuất:

$$TR_j = \alpha_0 + \alpha_1 DQ_j + \alpha_2 COL_j + \delta_1 Z_j + \varepsilon_{1j} \quad (1)$$

$$GP_j = \beta_0 + \beta_1 TR_j + \delta_2 Z_j + \varepsilon_{2j} \quad (2)$$

$$CE_j = \theta_0 + \theta_1 TR_j + \theta_2 GP_j + \theta_3 RC_j + \theta_4 DQ_j + \theta_5 COL_j + \delta_3 Z_j + \varepsilon_{3j} \quad (3)$$

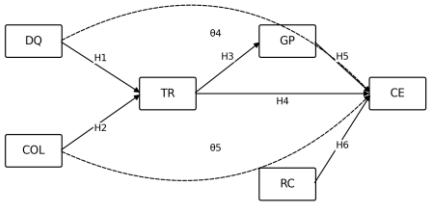
Trong đó: DQ là chất lượng thông tin trên CDE; COL là phối hợp và chia sẻ thông tin; TR là khả năng truy xuất; GP là thực hiện mua sắm xanh; RC là năng lực tổ chức thu hồi; CE là thực hiện kinh tế tuần hoàn; Z là nhóm biến kiểm soát; j là gói thầu; ε là sai số; các hệ số α, β, θ và δ biểu thị quan hệ cần ước lượng.

H1-H6 lần lượt tương ứng với α_1, α_2, β_1, θ_1, θ_2 và θ_3.

H7 và H8 kiểm định tác động gián tiếp cụ thể DQ → TR → CE và COL → TR → CE; các hệ số θ_4, θ_5 cho phép đánh giá tác động trực tiếp còn lại.

Đường truyền nối tiếp DQ/COL → TR → GP → CE được phân tích bổ sung và báo cáo riêng để phân biệt với tác động gián tiếp chỉ qua TR.

Được thể hiện chi tiết ở sơ đồ sau:



Sơ đồ 1. Mô hình nghiên cứu đề xuất về quản lý chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh trên CDE theo mô hình kinh tế tuần hoàn.

Từ mô hình ta thấy : H1–H6 là đường trực tiếp; H7: DQ → TR → CE; H8: COL → TR → CE. Đường đứt nét θ4, θ5 là tác động trực tiếp còn lại; Z được đưa vào các phương trình (1) - (3).

Khả năng truy xuất giúp kiểm tra nguồn gốc vật liệu, liên kết hồ sơ sản phẩm với chứng từ giao nhận và đối chiếu bằng chứng về đặc tính môi trường. Thông tin này cung cấp căn cứ để lựa chọn nhà cung cấp, chấp thuận sản phẩm và kiểm tra sự phù hợp với tiêu chí mua sắm xanh. Trong mô hình, TR phản ánh khả năng truy tìm và liên kết thông tin; GP phản ánh việc sử dụng thông tin để thực hiện lựa chọn vật liệu xanh. Vì vậy, H3 giả định TR tác động tích cực đến GP; quan hệ này cần được kiểm chứng bằng dữ liệu thực nghiệm.

TR → GP là cơ chế sử dụng thông tin đã truy xuất để kiểm tra tiêu chí môi trường, không phải việc gắn mã tự động tạo ra mua sắm xanh. Ví dụ, mã lô giúp đối chiếu hồ sơ sản phẩm với vật liệu giao nhận; bộ phận mua sắm chỉ chấp thuận khi bằng chứng phù hợp tiêu chí kỹ thuật và môi trường đã quy định. Hồ sơ không đầy đủ dẫn đến yêu cầu bổ sung hoặc tạm hoãn quyết định. Khả năng truy xuất không tự chứng minh mức phát thải thấp và không thay thế kiểm tra chứng nhận, phạm vi công bố hoặc thử nghiệm sản phẩm. Để giảm nguy cơ đảo chiều quan hệ, thiết kế theo thời gian cần đo DQ/COL/TR trước quyết định mua sắm, GP tại kỳ mua sắm và CE ở kỳ phát sinh hoạt động tuần hoàn.

Mức độ sử dụng CDE được xác định là điều kiện lựa chọn mẫu và có thể đưa vào Z để kiểm soát khác biệt cường độ áp dụng; không sử dụng như một biến tiềm ẩn riêng khi chưa có giả thuyết và thang đo tương ứng. Các biến kiểm soát được lựa chọn theo cơ sở lý thuyết và khả năng thu thập, gồm quy mô gói thầu, nhóm vật liệu, loại công trình, giai đoạn dự án và thời gian sử dụng CDE.

b) Các giả thuyết nghiên cứu

Các nghiên cứu về khả năng truy xuất dữ liệu, hộ chiếu vật liệu và chuyển đổi số cung cấp cơ sở lý thuyết cho quan hệ giữa quản lý thông tin và tuần hoàn vật liệu [6-9, 13]. Từ đó, bài báo đề xuất tám giả thuyết dưới đây; chiều và mức độ tác động cần được kiểm chứng bằng dữ liệu thực nghiệm.

H1: Chất lượng thông tin vật liệu trên CDE có tác động tích cực đến khả năng truy xuất nguồn gốc vật liệu xây dựng xanh.

Thông tin đầy đủ, chính xác, nhất quán và được cập nhật kịp thời tạo cơ sở liên kết vật liệu với hồ sơ sản phẩm, giao nhận, nghiệm thu và vị trí sử dụng [8, 13].

H2: Mức độ phối hợp và chia sẻ thông tin giữa các chủ thể trên CDE có tác động tích cực đến khả năng truy xuất nguồn gốc vật liệu xây dựng xanh.

Việc thống nhất trách nhiệm cập nhật và quy trình trao đổi thông tin được kỳ vọng giúp duy trì tính liên tục của hồ sơ vật liệu giữa các giai đoạn [1-3].

H3: Khả năng truy xuất nguồn gốc có tác động tích cực đến mức độ thực hiện mua sắm vật liệu xây dựng xanh.

Khả năng kiểm tra nguồn gốc, đặc tính kỹ thuật và bằng chứng môi trường được kỳ vọng hỗ trợ lựa chọn vật liệu, đánh giá nhà cung cấp và kiểm soát sự phù hợp của sản phẩm giao nhận.

H4: Khả năng truy xuất nguồn gốc có tác động tích cực đến mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn trong quản lý vật liệu xây dựng xanh.

Thông tin về thành phần, vị trí và lịch sử sử dụng được kỳ vọng hỗ trợ các quyết định bảo trì, thu hồi, tái sử dụng và tái chế [6, 8, 13].

H5: Mức độ thực hiện mua sắm vật liệu xây dựng xanh có tác động tích cực đến mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn trong quản lý vật liệu.

Việc đưa yêu cầu về độ bền, khả năng sửa chữa, tháo rời và thu hồi vào tiêu chí mua sắm được kỳ vọng tạo điều kiện duy trì giá trị vật liệu trong các chu kỳ sử dụng tiếp theo.

H6: Năng lực tổ chức thu hồi vật liệu có tác động tích cực đến mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn trong quản lý vật liệu xây dựng xanh.

Năng lực lập kế hoạch, phân loại, lưu giữ, vận chuyển và kết nối đơn vị tiếp nhận được kỳ vọng thúc đẩy việc chuyển vật liệu sau sử dụng sang các vòng tuần hoàn.

H7: Khả năng truy xuất nguồn gốc đóng vai trò trung gian trong mối quan hệ giữa chất lượng thông tin trên CDE và mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn trong quản lý vật liệu xây dựng xanh.

H8: Khả năng truy xuất nguồn gốc đóng vai trò trung gian trong mối quan hệ giữa mức độ phối hợp, chia sẻ thông tin trên CDE và mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn trong quản lý vật liệu xây dựng xanh.

Thiết kế kiểm định cần phân biệt các nhân tố tác động với biến kết quả. DQ phản ánh chất lượng dữ liệu; COL phản ánh cơ chế phối hợp; TR phản ánh khả năng liên kết và truy tìm hồ sơ; GP phản ánh thực hành mua sắm; RC phản ánh năng lực tổ chức thu hồi; CE phản ánh hoạt động duy trì và đưa vật liệu vào sử dụng tiếp. Không sử dụng cùng một chỉ báo cho cả nhân tố tác động và biến kết quả.

c) Thang đo và thiết kế kiểm chứng định lượng

Bảng 1 gồm 24 chỉ báo đề xuất cho sáu biến. Thang trả lời chính thức dự kiến là Likert 5 mức: 1 - hoàn toàn không đồng ý; 2 - không đồng ý; 3 - trung lập; 4 - đồng ý; 5 - hoàn toàn đồng ý. Mỗi câu hỏi gắn với gói thầu, nhóm vật liệu và kỳ đánh giá cụ thể. “Không biết/thiếu thông tin” và “chưa phát sinh/không áp dụng” là hai lựa chọn riêng ngoài năm mức, không dùng mức 3 để thay thế.

Bảng 1. Thang đo đề xuất cho mô hình kiểm chứng.

Biến	Mã	Nội dung chỉ báo đề xuất
Chất lượng thông tin trên CDE	DQ1	Thông tin vật liệu trên CDE đầy đủ theo yêu cầu quản lý của dự án.
	DQ2	Thông tin vật liệu trên CDE phù hợp với hồ sơ và thực tế được kiểm tra.
	DQ3	Mã nhận diện, thuộc tính và đơn vị đo vật liệu được sử dụng nhất quán.
	DQ4	Thông tin được cập nhật kịp thời khi có thay đổi về vật liệu.
Phối hợp và chia sẻ thông tin	COL1	Trách nhiệm cung cấp, kiểm tra và chấp thuận thông tin được quy định rõ.
	COL2	Các bên cung cấp thông tin theo quy trình và thời hạn đã thống nhất.
	COL3	Các bên liên quan có thể tiếp cận thông tin cần thiết theo quyền được phân công.
	COL4	Sai lệch thông tin được các bên phối hợp xử lý kịp thời.
Khả năng truy xuất nguồn gốc	TR1	Có thể xác định nhà sản xuất và nguồn cung của vật liệu được sử dụng.
	TR2	Có thể liên kết vật liệu với hồ sơ sản phẩm, giao nhận và nghiệm thu.
	TR3	Có thể xác định vị trí sử dụng vật liệu hoặc cấu kiện trong công trình.
	TR4	Có thể truy xuất lịch sử thay đổi hoặc thay thế vật liệu khi cần.
Mua sắm vật liệu xây dựng xanh	GP1	Tiêu chí môi trường được đưa vào yêu cầu lựa chọn vật liệu.
	GP2	Bằng chứng về đặc tính môi trường được xem xét trước khi chấp thuận sản phẩm.
	GP3	Độ bền và nhu cầu bảo trì được xem xét trong quyết định mua sắm.
	GP4	Khả năng tháo rời, thu hồi hoặc tái sử dụng được xem xét trong quyết định mua sắm.
Năng lực tổ chức thu hồi	RC1	Có kế hoạch và phân công trách nhiệm thu hồi vật liệu sau sử dụng.
	RC2	Có nhân sự và quy trình đánh giá, phân loại vật liệu thu hồi.
	RC3	Có phương án lưu giữ và vận chuyển vật liệu thu hồi phù hợp.
	RC4	Có khả năng kết nối với đơn vị tiếp nhận để tái sử dụng hoặc tái chế.
Thực hiện kinh tế tuần hoàn	CE1	Vật liệu dư còn phù hợp được điều chuyển hoặc sử dụng tiếp.
	CE2	Vật liệu, cấu kiện còn đáp ứng yêu cầu được duy trì sử dụng thông qua bảo trì và sửa chữa.
	CE3	Vật liệu, cấu kiện thu hồi đáp ứng yêu cầu được đưa vào tái sử dụng.
	CE4	Vật liệu không thể tái sử dụng nhưng phù hợp được chuyển đến đơn vị tái chế.

Các chỉ báo do tác giả đề xuất từ khung lý thuyết, cần được tham vấn chuyên gia về quản lý vật liệu, BIM/CDE và kinh tế tuần hoàn, sau đó khảo sát thử. Phỏng vấn nhận thức giúp kiểm tra cách hiểu và khả năng trả lời; đối chiếu nội dung giúp điều chỉnh chỉ báo trước khảo sát chính thức.

Thiết kế mẫu và thu thập dữ liệu: Đơn vị phân tích là gói thầu như quy định tại mục 3.3a. Người trả lời thuộc bộ phận quản lý thông tin,

mua sắm, thi công hoặc thu hồi vật liệu. Các câu hỏi về bảo trì và sử dụng tiếp chỉ áp dụng khi có hồ sơ tương ứng trong phạm vi gói thầu được đánh giá. Phiếu không đủ thông tin được bổ sung bằng nguồn trả lời hoặc chứng từ phù hợp, không ghép tùy ý thành quan sát mới.

Mẫu dự kiến được lựa chọn có chủ đích theo các nhóm vật liệu, loại công trình và giai đoạn thực hiện. Cỡ mẫu được xác định bằng phân tích công suất thống kê, có xét đến cấu trúc cụm dự án. Trường hợp chưa phát sinh thu hồi hoặc chưa đủ điều kiện đánh giá có lựa chọn "chưa phát sinh/không áp dụng", không quy đổi thành mức không đồng ý. Phân tích CE cần xác định mẫu đủ điều kiện và xử lý dữ liệu thiếu phù hợp, tránh so sánh trực tiếp gói thầu ở các giai đoạn không tương đương.

Bản chất đo lường: trong thiết kế hiện tại, DQ, COL, TR, GP, RC và CE đều được đặc tả là cấu thành. DQ được hình thành bởi đầy đủ, chính xác, nhất quán và kịp thời; COL bởi phân công, tuân thủ trao đổi, tiếp cận và xử lý sai lệch; TR bởi truy xuất nguồn cung, chứng từ, vị trí và lịch sử; GP bởi các thực hành lựa chọn; RC bởi kế hoạch, nhân sự, logistics và đầu ra; CE bởi những hoạt động tuần hoàn khác nhau. Các chỉ báo trong từng nhóm không hoàn toàn thay thế nhau; loại bỏ một chỉ báo có thể làm thay đổi nội hàm biến. Đây là lựa chọn lý thuyết cần đánh giá nội dung với chuyên gia và khảo sát thử, không lựa chọn phản xạ hay cấu thành chỉ theo kết quả thống kê [10].

Kiểm định dự kiến sử dụng PLS-SEM với mô hình đo lường cấu thành. Trước ước lượng cần kiểm tra độ bao phủ nội dung và đa cộng tuyến giữa chỉ báo; đánh giá trọng số, khoảng tin cậy bootstrap và tải ngoài để xem xét đóng góp tuyệt đối. Giá trị hội tụ có thể kiểm tra bằng phân tích dư thừa với một đánh giá tổng quát độc lập cho từng biến, bổ sung ngoài 24 chỉ báo. Không dùng Cronbach's alpha, độ tin cậy tổng hợp hoặc AVE làm tiêu chí chấp nhận cho các biến cấu thành. Chỉ khi một biến được tái định nghĩa về lý thuyết thành phản xạ mới áp dụng các kiểm tra phản xạ tương ứng. Mô hình cấu trúc được đánh giá bằng hệ số đường dẫn, khoảng tin cậy, R^2 và khả năng dự báo ngoài mẫu [10]. H7 và H8 kiểm định lần lượt $\alpha_1\theta_1$ và $\alpha_2\theta_1$; các đường nối tiếp $\alpha_1\beta_1\theta_2$ và $\alpha_2\beta_1\theta_2$ được báo cáo riêng. Tái lấy mẫu theo cụm dự án khi nhiều gói thầu cùng một dự án.

Xử lý dữ liệu thiếu: tách ba tình huống ngay khi nhập dữ liệu: (a) đã có hoạt động nhưng người trả lời không biết hoặc thiếu hồ sơ; (b) chưa đến giai đoạn phát sinh; (c) hoạt động không thuộc phạm vi gói thầu. Trường hợp (a) được đối chiếu hoặc hỏi lại; nếu vẫn thiếu thì báo cáo tỷ lệ thiếu theo chỉ báo và gói thầu, xem xét cơ chế thiếu và sử dụng phân tích trường hợp đầy đủ hoặc bù đa lần khi giả định thiếu ngẫu nhiên có điều kiện phù hợp. Không bù bằng trung bình một cách mặc định; phân tích độ nhạy phải so sánh kết quả theo các cách xử lý hợp lý. Trường hợp (b), (c) là thiếu có cấu trúc, không bù, không gán điểm 0, 1 hay 3.

Đánh giá theo vòng đời: CE1 áp dụng khi có vật liệu dư đủ điều kiện; CE2 khi có hoạt động bảo trì/sửa chữa; CE3–CE4 khi có dòng thu hồi và cơ hội sử dụng tiếp hoặc tái chế. Không có hoạt động do chưa phát sinh cơ hội khác với có cơ hội nhưng không thực hiện. Mô hình CE gồm đủ bốn chỉ báo chỉ được ước lượng trên các gói thầu có phạm vi và hồ sơ đủ để đánh giá cả bốn hoạt động, chẳng hạn gói cải tạo có bảo trì, vật liệu dư và thu hồi. Với gói thi công mới hoặc chỉ bảo trì, dùng mô-đun CE theo giai đoạn, xác định lại nội hàm và mô hình riêng trước phân tích; không bỏ chỉ báo rồi xem điểm CE là tương đương với thang đầy đủ. Báo cáo số quan sát đủ điều kiện, số không áp dụng và tỷ lệ thiếu của từng mô-đun; không gộp hay so sánh điểm giữa các giai đoạn nếu chưa có căn cứ về tính tương đương đo lường.

Để bổ sung bằng chứng, kết quả khảo sát nên được đối chiếu với hồ sơ về hao hụt, điều chuyển, thu hồi, tái sử dụng và tái chế vật liệu khi có dữ liệu. Các chỉ tiêu này cần thống nhất phạm vi, đơn vị và kỳ đo lường. Với dữ liệu khảo sát tại một thời điểm, kết quả kiểm định phản ánh mối liên hệ thống kê; việc khẳng định quan hệ nhân quả cần thêm dữ liệu theo thời gian hoặc thiết kế so sánh phù hợp.

3.4. Khung quản lý thông tin và quyết định vật liệu theo vòng đời

a) Kết quả tổng hợp và cấu trúc dữ liệu tối thiểu

Tổng hợp tài liệu cho thấy hai yêu cầu cần được kết nối: kiểm soát thông tin đủ tin cậy để phối hợp dự án và duy trì thông tin vật liệu để sử dụng tiếp. Honic và cộng sự [6] sử dụng hộ chiếu vật liệu để mô tả vật liệu trong công trình, tiềm năng tái chế và tác động môi trường. Ranasinghe và cộng sự [8] xác định tính sẵn có và khả năng truy xuất dữ liệu là điều kiện quan trọng của tuần hoàn vật liệu. Từ các luận điểm này, nghiên cứu đề xuất hồ sơ vật liệu liên kết trên CDE, thay vì chỉ lưu mô hình hình học hoặc chứng từ riêng lẻ.

Hồ sơ đề xuất gồm năm nhóm dữ liệu: (i) nhận diện và nguồn gốc; (ii) kỹ thuật và môi trường; (iii) khối lượng và giao nhận; (iv) vị trí, tình trạng và lịch sử sử dụng; (v) khả năng tháo dỡ, thu hồi và đơn vị tiếp nhận. Mỗi trường dữ liệu đi kèm đơn vị đo, nguồn chứng minh, thời điểm cập nhật và chủ thể chịu trách nhiệm.

Bảng 2. Liên kết dữ liệu với quyết định trong chuỗi cung ứng.

Giai đoạn	Dữ liệu chủ yếu	Quyết định và bằng chứng
Thiết kế	Mã vật liệu; yêu cầu kỹ thuật; khối lượng; yêu cầu môi trường	Chọn phương án; danh mục vật liệu được chấp thuận.
Mua sắm	Hồ sơ sản phẩm; nguồn cung; lô hàng; điều kiện giao nhận	Chấp thuận sản phẩm và nhà cung cấp; đơn hàng.
Giao nhận, thi công	Khối lượng nhận, dùng, tồn; kết quả kiểm tra; vị trí lắp đặt	Nghiệm thu, điều chỉnh cung ứng, điều chuyển; biên bản.
Sử dụng, bảo trì	Tình trạng; lịch sử sửa chữa; bộ phận thay thế	Giữ lại, sửa chữa hoặc thay thế; hồ sơ bảo trì.
Thu hồi	Khả năng tháo rời; chất lượng; khối lượng; đơn vị tiếp nhận	Tái sử dụng, tái chế hoặc xử lý phù hợp; chứng từ tiếp nhận.

Nguồn: Tác giả đề xuất trên cơ sở [1-3, 6-9, 13].

b) Cơ chế liên kết BIM, CDE và hồ sơ vật liệu

Đối tượng BIM được liên kết với hồ sơ sản phẩm và giao dịch bằng mã nhận diện ổn định. Cần phân biệt mã chủng loại, mã cấu kiện và mã lô hàng để tránh gán thông tin của một lô cho toàn bộ chủng loại vật liệu. Quan hệ liên kết có thể là một–nhiều: một chủng loại có nhiều nhà cung cấp hoặc lô hàng; một lô có thể được phân bổ cho nhiều vị trí. Khi thay đổi sản phẩm, phải lưu lịch sử phiên bản và phạm vi cấu kiện bị ảnh hưởng.

CDE quản lý trạng thái và quá trình trao đổi thông tin; dữ liệu không nhất thiết nằm toàn bộ trong tệp mô hình BIM. Mô hình lưu thuộc tính cần thiết và tham chiếu tới hồ sơ có kiểm soát. Quy trình chấp thuận phải ghi nhận người kiểm tra, căn cứ và thời điểm. Bằng chứng về đặc tính môi trường cần được xem xét theo phạm vi công bố; việc lựa chọn vật liệu phải dựa trên nhiều tiêu chí và tác động trong vòng đời, thay vì chỉ một tuyên bố môi trường riêng lẻ [14].

c) Trách nhiệm và các điểm kiểm soát

Chủ đầu tư xác định yêu cầu thông tin và tiêu chí chấp thuận; đơn vị thiết kế xác lập thông số và khối lượng; nhà cung cấp cung cấp hồ sơ sản phẩm; nhà thầu cập nhật giao nhận, sử dụng và vị trí; đơn vị vận hành lưu lịch sử thay thế; đơn vị thu hồi xác nhận khối lượng và đích đến. Người quản lý thông tin điều phối cấu trúc và quyền truy cập, trong khi quyết định kỹ thuật thuộc chủ thể có thẩm quyền. Cách phân công này cần được cụ thể hóa trong hợp đồng và kế hoạch thực hiện BIM [15, 16].

Nghiên cứu đề xuất ba điểm kiểm soát: trước đặt mua phải xác nhận sản phẩm và bằng chứng; trước nghiệm thu phải đối chiếu sản phẩm thực nhận với yêu cầu; trước chuyển vật liệu sang vòng sử dụng tiếp theo phải đánh giá tình trạng, an toàn và đơn vị tiếp nhận. Hồ sơ thiếu thông tin được ghi nhận là chưa đủ căn cứ quyết định, không mặc định không đạt tiêu chí xanh. Cách xử lý này giúp tách vấn đề chất lượng dữ liệu khỏi vấn đề chất lượng sản phẩm.

Sau bàn giao, chủ sở hữu hoặc đơn vị quản lý, vận hành được giao trách nhiệm là đầu mối duy trì hồ sơ vật liệu và bố trí kinh phí. Đơn vị bảo trì cập nhật thay thế, tình trạng và vật liệu phát sinh; đơn vị thu hồi cập nhật khối lượng và nơi tiếp nhận; bộ phận kỹ thuật có thẩm quyền kiểm tra, chấp thuận nội dung. Quản trị viên CDE kiểm soát quyền, phiên bản, sao lưu và nhật ký, không thay thế người kiểm chứng kỹ thuật. Hợp đồng bàn giao phải xác định người tiếp nhận, danh mục dữ liệu, quyền sử dụng, thời hạn lưu giữ và cơ chế xuất dữ liệu khi đổi nền tảng. Phân công này là đề xuất quản trị theo yêu cầu quản lý thông tin vận hành [20], cần cụ thể hóa cho từng dự án.

3.5. Chỉ tiêu đánh giá và đối chiếu bằng chứng thực hiện

a) Chỉ tiêu quản lý thông tin và dòng vật liệu

Bên cạnh thang đo cảm nhận tại mục 3.3, nghiên cứu đề xuất bộ chỉ tiêu từ chứng từ để phân biệt việc có quy trình với kết quả thực hiện. Chỉ tiêu được tính cho cùng nhóm vật liệu, đơn vị phân tích và kỳ đánh giá; không cộng trực tiếp khối lượng có đơn vị đo khác nhau. Khi tổng hợp theo khối lượng, chỉ quy đổi sang đơn vị chung nếu có cơ sở kỹ thuật được ghi nhận.

Bảng 3. Chỉ tiêu đối chiếu từ hồ sơ gói thầu.

Chỉ tiêu	Cách xác định	Bằng chứng
Đầy đủ dữ liệu (%)	100 × số trường bắt buộc hợp lệ / tổng trường bắt buộc được kiểm tra	Danh mục yêu cầu; nhật ký kiểm tra.
Truy xuất (%)	100 × khối lượng liên kết được nguồn cung, hồ sơ và vị trí / khối lượng thuộc phạm vi kiểm tra	Mã lô; biên bản; hồ sơ hoàn công.
Hao hụt (%)	100 × khối lượng hao hụt xác nhận / khối lượng đưa vào sử dụng trong kỳ	Cân đối nhận, tồn, dùng và điều chuyển.
Thu hồi (%)	100 × khối lượng thu hồi thực tế / khối lượng phát sinh thuộc phạm vi thu hồi	Biên bản tháo dỡ, phân loại, cân đo.
Tái sử dụng (%)	100 × khối lượng đã tái sử dụng / khối lượng phát sinh thuộc phạm vi thu hồi	Biên bản bàn giao và sử dụng tiếp.
Tái chế (%)	100 × khối lượng xác nhận được tái chế / khối lượng phát sinh thuộc phạm vi thu hồi	Xác nhận của cơ sở tái chế.

Nguồn: Tác giả nghiên cứu và đề xuất

Khối lượng phát sinh thuộc phạm vi thu hồi bao gồm vật liệu sau tháo dỡ hoặc thay thế trong kỳ, có phân loại phần cần xử lý riêng vì an toàn. Thu hồi và tái sử dụng không được cộng để tạo một tỷ lệ chung vì tái sử dụng là một đích đến của dòng thu hồi. Vật liệu đã chuyển đến cơ sở tái chế nhưng chưa có xác nhận xử lý phải ghi riêng là "chuyển giao để tái chế". Chỉ tiêu không có mẫu số hoặc chưa phát sinh được ghi "không áp dụng", không ghi bằng không.

b) Cân đối khối lượng và kiểm soát chất lượng bằng chứng

Trong kỳ thi công, cân đối đề xuất là: tồn đầu kỳ + nhận trong kỳ + điều chuyển vào = lắp đặt/sử dụng + tồn cuối kỳ + điều chuyển ra/hoàn trả + hao hụt xác nhận + chênh lệch chưa giải trình. Chênh lệch phải được kiểm tra do sai đơn vị, thời điểm ghi nhận, đo bóc hoặc thiếu chứng từ trước khi kết luận là hao hụt. Với vật liệu thu hồi, cân đối riêng khối lượng tái sử dụng, tái chế, lưu giữ, xử lý khác và phần chưa xác nhận đích đến.

Mỗi chỉ tiêu cần lưu nguồn chứng từ, người xác nhận và phương pháp đo. Kiểm tra chéo giữa nhật ký CDE, hồ sơ mua sắm và biên bản hiện trường giúp hạn chế sai lệch tự báo cáo. Chỉ số giảm phát thải chỉ bổ sung khi có dữ liệu vòng đời và kịch bản tham chiếu tương thích; tỷ lệ thu hồi cao chưa đủ để kết luận lợi ích môi trường ròng.

c) Minh họa tính toán trong điều kiện Việt Nam

Ví dụ : Một gói cải tạo công trình dân dụng nhà ở tại Hà Nội, có CDE và quản lý riêng một nhóm cấu kiện kim loại theo tấn. Toàn bộ số liệu dưới đây do tác giả đặt để minh họa quy trình, không phải số liệu khảo sát hoặc kết quả triển khai tại công trình có tên cụ thể. Chứng từ cần thu thập thực tế gồm đơn hàng, phiếu giao nhận, nhật ký vị trí, biên bản tháo dỡ, bàn giao sử dụng tiếp và xác nhận của cơ sở tái chế.

Kiểm tra dữ liệu: 180/200 trường bắt buộc hợp lệ cho tỷ lệ đầy đủ 90 %; 45/50 tấn vật liệu giao nhận được liên kết với nguồn cung, hồ sơ và vị trí cho tỷ lệ truy xuất 90 %. Trong kỳ: tồn đầu 5 tấn + nhận 50 tấn = sử dụng 48 tấn + tồn cuối 4 tấn + điều chuyển ra 2 tấn + hao hụt xác nhận 1 tấn; chênh lệch chưa giải trình bằng 0. Theo mẫu số quy định tại Bảng 3, tỷ lệ hao hụt = 100 × 1/48 = 2,08 %. Đây là tỷ số hao hụt trên khối lượng sử dụng, không dùng thay cho tỷ lệ tổn thất trên tổng khối lượng cung ứng.

Ở dòng tháo dỡ riêng, 10 tấn vật liệu phát sinh thuộc phạm vi thu hồi gồm 8 tấn đã thu hồi và 2 tấn xử lý khác có chứng từ. Trong 8 tấn thu hồi: 3 tấn đã tái sử dụng, 4 tấn được xác nhận tái chế và 1 tấn đang lưu giữ. Khi đó thu hồi = 8/10 × 100 = 80 %; tái sử dụng = 3/10 × 100 = 30 %; tái chế = 4/10 × 100 = 40 %. Phần đang lưu giữ là 10 % và chưa tính vào tái sử dụng/tái chế. Không cộng 80 % + 30 % + 40 %; không cộng dòng vật liệu mua mới với dòng tháo dỡ để tính một tỷ lệ không rõ mẫu số.

d) Chi phí thiết lập và vận hành CDE

Chi phí cần phân biệt thiết lập ban đầu C_0 (chuẩn hóa mã, cấu hình, số hóa dữ liệu nền, đào tạo, chuyển giao) với vận hành năm C_t (thuê bao/hạ tầng, dung lượng và sao lưu, nhân công cập nhật, kiểm chứng, hỗ trợ, bảo mật và xuất dữ liệu). Tổng chi phí cho T năm được xác định theo $TCO = C_0 + \Sigma C_t$; nếu so sánh phương án theo giá trị hiện tại thì chiết khấu C_t theo suất và thời điểm thống nhất. Nhân công kiêm nhiệm vẫn cần tính chi phí cơ hội. Chi phí dùng chung phải phân bổ theo tiêu thức công khai như giờ sử dụng, số hồ sơ hoặc tài khoản; tránh tính trùng thuê bao nền tảng đã có.

Ví dụ ngân sách giả định, không phải báo giá thị trường: thiết lập C_0 = 30 triệu đồng; mỗi năm thuê bao/hạ tầng 12 triệu, lưu trữ và sao lưu 3 triệu, cập nhật 120 giờ × 100.000 đồng = 12 triệu, kiểm chứng 60 giờ × 150.000 đồng = 9 triệu, hỗ trợ và đào tạo bổ sung 4 triệu. Chi phí vận hành là 40 triệu đồng/năm; TCO ba năm theo giá cố định, chưa chiết khấu, là 30 + 3 × 40 = 150 triệu đồng. Các khoản chi phải được thay bằng báo giá và thời gian lao động đo được khi thí điểm. Chưa có dữ liệu trước–sau nên ví dụ không chứng minh hoàn vốn, tiết kiệm chi phí hay giảm phát thải.

3.6. Thảo luận kết quả và điều kiện áp dụng

a) Đóng góp của khung đề xuất

Điểm mới được đề xuất ở cấp độ kết hợp và vận dụng. Honic và cộng sự [6] đã phát triển hộ chiếu vật liệu phục vụ kiểm kê, tối ưu thiết kế và đánh giá tiềm năng tái chế; các nghiên cứu truy xuất [8, 13] đã nhấn mạnh tính liên tục và khả năng liên kết thông tin. Vì vậy, bài báo không coi mã định danh, hồ sơ vòng đời hay quản lý trách nhiệm là ý tưởng xuất hiện lần đầu. Phần bổ sung của khung là gắn các nội dung này với đơn vị gói thầu tại Việt Nam, ba điểm chấp thuận, cân đối khối lượng và chứng từ xác nhận đích đến; đồng thời cụ thể hóa cơ chế DQ/COL → TR → GP/CE và phân biệt thu hồi dự kiến với kết quả đã thực hiện. Giá trị bổ sung này cần được kiểm chứng thực nghiệm, chưa đủ căn cứ để khẳng định vượt trội so với các khung trước.

Đóng góp thứ hai là phân biệt vật liệu xanh với dòng vật liệu tuần hoàn. Vật liệu có tác động môi trường thấp vẫn có thể không được thu hồi; vật liệu tái chế vẫn cần kiểm tra chất lượng và tác động theo vòng đời. Vì vậy, tiêu chí sản phẩm được quản lý ở khâu mua sắm, còn kết quả sử dụng tiếp được ghi nhận bằng hồ sơ phát sinh thực tế. Đóng góp thứ ba là tách năng lực tổ chức thu hồi khỏi kết quả CE, giúp hạn chế trùng lặp giữa biến giải thích và biến kết quả trong thiết kế kiểm định.

b) Điều kiện áp dụng trong doanh nghiệp và dự án

Việc triển khai cần có bộ mã dùng chung, danh mục dữ liệu tối thiểu, quy định chuyển giao thông tin và nguồn lực kiểm tra. Nhà cung cấp phải được hướng dẫn định dạng và mức bằng chứng cần cung cấp; doanh nghiệp không nên yêu cầu dữ liệu không phục vụ quyết định cụ thể. Trong bối cảnh Việt Nam, định hướng kinh tế tuần hoàn và lộ trình BIM tạo cơ sở chính sách để tổ chức thử nghiệm, nhưng không thay thế điều kiện nhân sự, hợp đồng và thị trường tiếp nhận vật liệu [4, 11, 12].

Nghiên cứu trong nước của Nguyễn Thái Tân và cộng sự [18] nhận diện hạn chế về kiến thức, tiếp cận thông tin và nguồn lực tài chính trong triển khai kinh tế tuần hoàn ngành xây dựng. Nguyễn Minh Quỳnh Nhung và cộng sự [19] phân tích tiềm năng sử dụng chất thải công nghiệp làm nguyên liệu, nhiên liệu thay thế trong sản xuất vật liệu xây dựng. Hai hướng nghiên cứu này bổ sung căn cứ để khung đề xuất xem xét đồng thời quản lý thông tin, năng lực triển khai và đầu ra vật liệu. Việc vận dụng cần gắn với định hướng phát triển vật liệu xây dựng tiết kiệm tài nguyên, năng lượng của Việt Nam [17].

Đề xuất thí điểm với nhóm vật liệu có mã nhận diện, khối lượng và hồ sơ giao nhận tương đối rõ. Phạm vi đầu tiên có thể tập trung kiểm soát mua thừa và điều chuyển vật liệu dư; thu hồi cuối vòng đời chỉ đánh giá khi có hoạt động tương ứng. Các quyền truy cập cần bảo vệ dữ liệu giá, bí mật thương mại và thông tin cá nhân. Quyền sử dụng hồ sơ sau bàn giao, thời hạn lưu giữ và cách chuyển hệ thống phải được thống nhất từ đầu để tránh mất khả năng truy xuất.

Điều kiện tối thiểu cho doanh nghiệp vừa và nhỏ gồm bộ mã vật liệu/lô/vị trí thống nhất; dữ liệu về nguồn gốc, yêu cầu kỹ thuật và môi trường, khối lượng, trạng thái và phương án thu hồi kèm chứng từ; nền tảng có phân quyền, phiên bản, nhật ký và sao lưu; một đầu mối quản lý thông tin cùng người kiểm chứng chuyên môn; kinh

phí cập nhật, kiểm tra và duy trì sau bàn giao; thỏa thuận cung cấp dữ liệu với nhà cung cấp và đơn vị tiếp nhận. Có thể thí điểm bằng biểu mẫu có cấu trúc và kho hồ sơ được kiểm soát, liên kết với BIM khi cần; không bắt buộc mua đồng thời nhiều công nghệ. Năng lực cập nhật và bằng chứng phải được kiểm tra trước khi mở rộng phạm vi.

Minh họa tại mục 3.5 cho thấy các bước cần thực hiện trong một tình huống Việt Nam: gán mã lô, kiểm tra hồ sơ trước mua, đối chiếu khi nhận hàng, ghi vị trí, xác nhận thu hồi và bàn giao dữ liệu cho vận hành. Tuy nhiên, nghiên cứu chưa tiếp cận hồ sơ một dự án thực tế để xác nhận khả năng triển khai. Các nghiên cứu trong nước [18, 19] được sử dụng làm căn cứ bối cảnh, không phải bằng chứng rằng khung CDE này đã được áp dụng. Nghiên cứu tiếp theo cần lựa chọn gói thầu thực, ghi nhật ký công việc và chi phí, đánh giá tỷ lệ dữ liệu hợp lệ và xác nhận các chỉ tiêu từ chứng từ.

c) Giới hạn và hướng kiểm chứng

Nghiên cứu sử dụng tổng hợp tài liệu có định hướng, chưa có dữ liệu khảo sát hoặc triển khai để đánh giá hiệu quả của khung. Các giả thuyết H1-H8 và chỉ báo đo lường vì vậy cần được kiểm định; khả năng khái quát hóa còn phụ thuộc vào phạm vi mẫu, giai đoạn dự án và nhóm vật liệu.

Nghiên cứu tiếp theo cần kiểm tra nội dung thang đo với chuyên gia, khảo sát gói thầu đủ điều kiện và đối chiếu chỉ tiêu chứng từ. Dữ liệu trước - sau hoặc nhóm so sánh có điều kiện tương đồng giúp đánh giá thay đổi tốt hơn khảo sát một thời điểm. Phân tích cần kiểm soát khác biệt giai đoạn, nhóm vật liệu, quy mô và cụm dự án. Kết quả ước lượng và kiểm tra độ nhạy phải được báo cáo cùng khoảng tin cậy và giới hạn khái quát hóa [10].

4. Kết luận

Bài báo đề xuất khung quản lý chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng xanh trên CDE theo mô hình kinh tế tuần hoàn, với ba kết quả chủ yếu: (i) Xác định năm nhóm dữ liệu tối thiểu để liên kết nguồn gốc, yêu cầu kỹ thuật và môi trường, khối lượng, tình trạng sử dụng và phương án thu hồi; (ii) Xây dựng cơ chế phối hợp theo vòng đời, gắn chủ thể chịu trách nhiệm với các điểm kiểm soát trước mua sắm, nghiệm thu và sử dụng tiếp; (iii) Đề xuất hệ giả thuyết, thang đo và chỉ tiêu chứng từ để kiểm chứng quan hệ giữa quản lý thông tin và thực hiện tuần hoàn.

Kết quả phân tích cho thấy cần tổ chức CDE như một quy trình quản trị thông tin gắn với quyết định vật liệu. Khả năng truy xuất chỉ chuyển thành hoạt động tuần hoàn khi dữ liệu đủ tin cậy, tiêu chí mua sắm phù hợp và có năng lực tiếp nhận vật liệu thu hồi. Các doanh nghiệp nên bắt đầu bằng phạm vi thí điểm rõ, chuẩn hóa mã nhận diện, đưa yêu cầu thông tin vào hợp đồng và đánh giá bằng chứng thực tế theo từng nhóm vật liệu.

Đóng góp của nghiên cứu nằm ở cấu trúc liên kết thông tin, trách nhiệm và dòng vật liệu, chưa phải bằng chứng về mức giảm chi phí, hao hụt hay phát thải. Cần tiếp tục kiểm định tại gói thầu và dự án, sử dụng dữ liệu chứng từ và thiết kế theo thời gian để đánh giá giá trị ứng dụng, điều chỉnh thang đo và xác định điều kiện nhân rộng khung quản lý.

Tài liệu tham khảo

[1]. ISO. (2018). ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 1: Concepts and principles. https://www.iso.org/standard/68078.html

[2]. ISO. (2018). ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 2: Delivery phase of the assets. https://www.iso.org/standard/68080.html

[3]. UK BIM Framework. (2020). Guidance Part C: Facilitating the common data environment (workflow and technical solutions), Edition 1, September 2020. https://www.ukbimframework.org/wp-content/uploads/2021/02/Guidance-Part-C_Facilitating-the-common-data-environment-workflow-and-technical-solutions_Edition-1.pdf

[4]. Thủ tướng Chính phủ. (2025). Quyết định số 222/QĐ-TTg ngày 23/01/2025 ban hành Kế hoạch hành động quốc gia thực hiện kinh tế tuần hoàn đến năm 2035. https://chinhphu.vn/?classid=2&docid=212582&pageid=27160

[5]. Ellen MacArthur Foundation. (2024). Circular economy principles. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-principles

[6]. Honic, M., Kovacic, I., & Rechberger, H. (2019). Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. Journal of Cleaner Production, 217, 787-797. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.212

[7]. Banihashemi, S., Meskin, S., Sheikhkhoshkar, M., Mohandes, S. R., Hajirasouli, A., & LeNguyen, K. (2024). Circular economy in construction: The digital transformation perspective. Cleaner Engineering and Technology, 18, 100715. https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100715

[8]. Ranasinghe, N., Domingo, N., & Kahandawa, R. (2024). Enhancing building material circularity: A systematic review on prerequisites, obstacles and the critical role of data traceability. Journal of Building Engineering, 98, 111136. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111136

[9]. Keles, C., Cruz Rios, F., & Hoque, S. (2025). Digital technologies and circular economy in the construction sector: A review of lifecycle applications, integrations, potential, and limitations. Buildings, 15(4), 553. https://doi.org/10.3390/buildings15040553

[10]. Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. European Business Review, 31(1), 2–24. https://doi.org/10.1108/EBR-11-2018-0203

[11]. Thủ tướng Chính phủ. (2022). Quyết định số 687/QĐ-TTg ngày 07/06/2022 phê duyệt Đề án Phát triển kinh tế tuần hoàn ở Việt Nam. https://vanban.chinhphu.vn/?classid=2&docid=205921&pageid=27160

[12]. Thủ tướng Chính phủ. (2023). Quyết định số 258/QĐ-TTg ngày 17/03/2023 phê duyệt Lộ trình áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM) trong hoạt động xây dựng. https://vanban.chinhphu.vn/?docid=207592&pageid=27160

[13]. KC, A., Senaratne, S., Perera, S., & Nanayakkara, S. (2025). Review of current digital technologies for material passports to enhance circularity

towards net zero. Built Environment Project and Asset Management, 15(5), 1055-1072. https://doi.org/10.1108/BEPAM-03-2024-0085

[14]. U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). What makes a product "greener"? https://www.epa.gov/greenerproducts/what-makes-product-greener (Truy cập ngày 02/10/2026).

[15]. Bộ Xây dựng. (2021). Hướng dẫn chung áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM). Công bố kèm theo Quyết định số 348/QĐ-BXD ngày 02/04/2021.

[16]. Bộ Xây dựng. (2021). Hướng dẫn chi tiết áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM) đối với công trình dân dụng và công trình hạ tầng kỹ thuật đô thị. Công bố kèm theo Quyết định số 347/QĐ-BXD ngày 02/04/2021.

[17]. Thủ tướng Chính phủ. (2020). Quyết định số 1266/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021-2030, định hướng đến năm 2050. https://chinhphu.vn/default.aspx?docid=200800&pageid=27160

[18]. Nguyễn Thái Tân, Đỗ Tiến Sỹ, & Nguyễn Thanh Việt. (2024). Rào cản trong việc triển khai kinh tế tuần hoàn vào ngành xây dựng tại Việt Nam. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, 14(6), 98-104. https://doi.org/10.54772/jomc.06.2024.799

[19]. Nguyễn Minh Quỳnh Nhung, Lê Thị Song, & Nguyễn Thị Tâm. (2026). Kinh tế tuần hoàn trong sản xuất vật liệu xây dựng: Hiện trạng, tiềm năng và giải pháp thực hiện. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, 16(1), 187-194. https://doi.org/10.54772/jomc.01.2026.1145

[20]. ISO. (2020). ISO 19650-3:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 3: Operational phase of the assets. https://www.iso.org/standard/75109.html