

Nghiên cứu điển hình về bê tông cốt liệu tái chế từ phế thải xây dựng tại Hà Nội

Phạm Tiến Tới¹, Vũ Chí Công¹, Lê Hồng Hà¹, Trần Ngọc Tuyền^{2*}

¹ Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

² Trường Đại học Hà Tĩnh

TỪ KHOÁ

Cốt liệu tái chế
Phế thải xây dựng
Bê tông cốt liệu tái chế
Bền vững
Cường độ nén
Tính công tác

TÓM TẮT

Ngành xây dựng đang đối mặt thách thức kép-cạn kiệt tài nguyên tự nhiên và gia tăng phế thải xây dựng (PTXD)- đặt ra nhu cầu cấp bách về vật liệu bền vững và sử dụng tài nguyên theo hướng tuần hoàn. Bài báo này triển khai một nghiên cứu điển hình về ứng dụng cốt liệu tái chế (CLTC) từ PTXD, xây dựng nhiều phương án cấp phối tương ứng với các cấp bền mục tiêu B20, B22.5, B25, B30 và B35, cùng các mức tỷ lệ thay thế CLTC 0%, 25%, 30%, 50%, 75% và 100%. Trước hết, chúng tôi phân tích tổng quan các nghiên cứu gần đây về chủ đề CLTC thông qua điểm mạnh và hạn chế của chúng theo sáu hướng tiếp cận: (i) hiệu suất cường độ nén; (ii) tính công tác của bê tông tươi; (iii) khả năng mở rộng và ứng dụng hiện trường; (iv) vật liệu và kỹ thuật bổ sung; (v) phương pháp luận và chất lượng dữ liệu; và (vi) các đánh đổi giữa cơ học và độ bền. Trên cơ sở đó, các trường hợp thiết kế cấp phối với tỷ lệ thay thế khác nhau và các cấp bền mục tiêu nêu trên được đánh giá cho điều kiện thực tiễn tại Hà Nội, nhằm cung cấp cái nhìn toàn diện về bê tông sử dụng CLTC từ PTXD. Kết quả cho thấy, CLTC là vật liệu chiến lược có khả năng thúc đẩy kinh tế tuần hoàn trong xây dựng, đồng thời làm rõ khoảng trống hiện hữu về dữ liệu vận hành ngoài hiện trường dài hạn và nhu cầu hơn nữa về nghiên cứu thực nghiệm chuyên sâu.

KEYWORDS

Recycled aggregate
Construction and demolition waste
Recycled aggregate concrete
Sustainable
Compressive strength
Workability

ABSTRACT

The construction sector faces a dual challenge-depletion of natural resources and the escalating burden of construction and demolition waste (CDW)-which creates an urgent need for sustainable materials and circular resource utilization. This paper presents a case study on the application of recycled aggregates (RA) sourced from CDW, developing multiple mix designs aligned with target compressive strength classes B20, B22.5, B25, B30, and B35, at RA replacement levels of 0%, 25%, 30%, 50%, 75%, and 100%. We first provide a critical synthesis of recent RA research, mapping strengths and limitations across six dimensions: (i) compressive strength performance; (ii) fresh concrete workability; (iii) scalability and field application; (iv) supplementary materials and techniques; (v) methodology and data quality; and (vi) mechanical-durability trade-offs. Building on this foundation, the mix-design scenarios covering the above replacement levels and target strength classes are evaluated under practical conditions in Hanoi to furnish a comprehensive perspective on concrete incorporating RA derived from CDW. The results indicate that RA is a strategic material capable of advancing the circular economy in construction, while also highlighting persistent gaps in long-term, in situ field performance data and the need for further, in-depth experimental investigation.

1. Giới thiệu

Ngành xây dựng, với vai trò là một trong những trụ cột của nền kinh tế toàn cầu, đang đối mặt với những thách thức nghiêm trọng về tính bền vững. Theo một thống kê của Tam và cộng sự [1], lĩnh vực này chịu trách nhiệm cho việc tiêu thụ khoảng 40 % tổng lượng tài nguyên thô và đồng thời phát sinh khoảng 35 % tổng lượng chất thải rắn trên toàn thế giới. Trong đó, ở Hà Nội, chất thải xây dựng và phá dỡ (CDW) đạt hơn 4.186 tấn mỗi ngày vào năm 2021, với dự báo tăng lên 9.431 tấn mỗi ngày năm 2025 [2]. Những con số này phản ánh một áp lực vô cùng lớn lên môi trường, đòi hỏi một sự chuyển dịch cấp thiết sang các giải pháp công nghệ và vật liệu mang tính tuần hoàn. Trong bối cảnh

đó, việc tận dụng cốt liệu bê tông tái chế (CLBTTC), một sản phẩm chính thu được từ quá trình xử lý phế thải xây dựng (PTXD), nổi lên như một hướng đi chiến lược. Giải pháp này không chỉ góp phần giải quyết bài toán chất thải rắn mà còn có tiềm năng giảm thiểu sự phụ thuộc vào nguồn cốt liệu tự nhiên, vốn là tài nguyên không thể tái tạo [3].

Theo định nghĩa trong TCVN 13694:2023, CLBTTC là cốt liệu được hình thành từ hoạt động tái chế chất thải bê tông [4]. Về mặt kỹ thuật, quy trình sản xuất CLBTTC bao gồm các công đoạn nghiền, sàng lọc và xử lý chất thải bê tông có nguồn gốc từ việc phá dỡ các kết cấu hiện hữu hoặc từ bê tông dư thừa tại các công trình [5]. Mặc dù được công nhận là một phương án thay thế bền vững cho cốt liệu tự nhiên (CLTN), việc ứng dụng CLTC vào thực tiễn đòi hỏi phải xem xét kỹ

*Liên hệ tác giả: tuyen.tranngoc@htu.edu.vn

Nhận ngày 10/09/2025, sửa xong ngày 14/10/2025, chấp nhận đăng ngày 15/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2025.1148>

lưỡng các đặc tính có hữu của nó. Sự tồn tại của lớp vữa xi măng cũ còn dính bám trên bề mặt cốt liệu tái chế là nguyên nhân chính dẫn đến các thuộc tính bất lợi như cường độ bản thân thấp hơn và khả năng hút nước cao hơn đáng kể so với cốt liệu tự nhiên. Những đặc tính này có ảnh hưởng trực tiếp đến các tính chất cơ học và độ bền của bê tông sử dụng CLTC [5]. Chất lượng của CLTC, do đó, phụ thuộc rất lớn vào các yếu tố đầu vào như chất lượng của bê tông gốc, phương pháp phá dỡ và công nghệ xử lý được áp dụng.

Song song đó, việc nghiên cứu về bê tông sử dụng cốt liệu tái chế từ chất thải xây dựng đã nổi lên như một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng do tiềm năng giải quyết các mối quan tâm về môi trường và sự cạn kiệt tài nguyên trong ngành xây dựng [6], [7]. Trong những thập kỷ gần đây, lĩnh vực này đã phát triển từ việc khám phá ban đầu về bê tông cốt liệu tái chế sang các ứng dụng tiên tiến trong cơ sở hạ tầng quy mô lớn, với sự nhấn mạnh ngày càng tăng vào tính bền vững và tối ưu hóa hiệu suất [8], [9]. Ý nghĩa thực tế được nhấn mạnh bởi thực tế là chất thải xây dựng và phá dỡ chiếm một phần đáng kể trong việc tạo ra chất thải toàn cầu, với cốt liệu tái chế cung cấp một giải pháp thay thế khả thi cho cốt liệu tự nhiên, do đó giảm sử dụng bãi rác và bảo tồn tài nguyên thiên nhiên [6], [10]. Hơn nữa, các ứng dụng bê tông hàng loạt đòi hỏi phải kiểm soát cẩn thận khả năng gia công và cường độ nén để đảm bảo tính toàn vẹn của cấu trúc, làm cho việc nghiên cứu cốt liệu tái chế trong bối cảnh này trở nên quan trọng về mặt xã hội và kỹ thuật [7], [11].

Mặc dù sự quan tâm ngày càng tăng, những thách thức vẫn còn trong việc tìm hiểu tác động cụ thể của cốt liệu tái chế đối với khả năng gia công và cường độ nén của bê tông, đặc biệt là trong các dự án quy mô lớn [12], [13]. Sự không nhất quán giữa các nghiên cứu cũng được thể hiện rõ ràng trong những phát hiện liên quan đến ảnh hưởng của cốt liệu mịn tái chế đến tính chất bê tông, với một số nghiên cứu báo cáo khả năng làm việc và độ bền giảm, trong khi những nghiên cứu khác lưu ý những cải tiến do hoạt hóa kiềm hoặc vật liệu xi măng bổ sung [8], [14]. Các tranh cãi cũng tồn tại liên quan đến tỷ lệ thay thế tối ưu và vai trò của độ ẩm trong cốt liệu tái chế, ảnh hưởng đến cả tính chất bê tông tươi và bê tông cứng [15]. Những không chắc chắn này cản trở việc áp dụng rộng rãi cốt liệu tái chế trong bê tông khối kết cấu, có khả năng hạn chế lợi ích môi trường và thực hành xây dựng bền vững [9].

Khung khái niệm cho đánh giá này tích hợp các khái niệm chính về cốt liệu bê tông tái chế (CLBTTC), tính công tác (độ sụt) và cường độ nén, nhấn mạnh mối quan hệ lẫn nhau của chúng trong các ứng dụng bê tông [16], [17]. CLBTTC được định nghĩa là cốt liệu có nguồn gốc từ bê tông cũ, thành phần chính của phế thải xây dựng đã qua xử lý, thường đặc trưng bởi sự hấp thụ nước và có lượng vữa dính cao [14].

Mục đích của đánh giá có hệ thống này là kiểm tra nghiêm túc tác động của cốt liệu tái chế từ chất thải xây dựng đối với khả năng làm việc và cường độ nén của bê tông, tổng hợp những hiểu biết từ cả các dự án xây dựng quy mô lớn và nghiên cứu học thuật [9], [11]. Đánh giá này nhằm mục đích làm rõ các tranh cãi hiện có, xác định các thông số thiết kế hỗn hợp tối ưu và làm nổi bật các thực hành bền vững giúp

nâng cao hiệu suất bê tông. Bằng cách giải quyết các lỗ hổng kiến thức đã xác định, nghiên cứu góp phần thúc đẩy các phương pháp xây dựng bền vững và thúc đẩy việc sử dụng thực tế cốt liệu tái chế trong bê tông [18], [19].

Việc phân tích tổng quan này sử dụng các công cụ phân tích, đánh giá tài liệu toàn diện, lựa chọn các nghiên cứu gần đây có tập trung vào bê tông CLTC chú ý đến khả năng làm việc và kết quả cường độ nén. Phương pháp luận bao gồm đánh giá so sánh kết quả thực nghiệm, nghiên cứu các case-studies và mô hình lý thuyết. Các phát hiện được tổng hợp để phản ánh các tiêu chí / cách tiếp cận khác nhau tạo điều kiện cho sự hiểu biết một cách mạch lạc và tổng quát hơn.

2. Tổng hợp các kết quả nghiên cứu đã có về bê tông CLTC

Một số nghiên cứu chứng minh những cải tiến hiệu suất cơ học đầy hứa hẹn thông qua việc sử dụng vật liệu xi măng bổ sung và các kỹ thuật trộn sáng tạo, trong khi những nghiên cứu khác xác nhận khả năng mở rộng của bê tông cốt liệu tái chế trong các dự án thực tế. Tuy nhiên, sự không nhất quán trong phương pháp luận, sự thay đổi về chất lượng cốt liệu tái chế và những thách thức trong việc duy trì khả năng làm việc và độ bền đã không làm nổi bật rõ nét những ưu điểm của vật liệu này. Bảng 1 sau tổng hợp về các điểm mạnh, điểm yếu của một số cách tiếp cận (khía cạnh) từ một số nghiên cứu trong những năm gần đây.

Nhóm tác giả Lin và cộng sự [43] đã sử dụng phần mềm CiteSpace để phân tích định lượng 2011 bài báo được chọn lọc từ cơ sở dữ liệu Web of Science, xác định các điểm nóng nghiên cứu và sự hợp tác giữa các quốc gia và tổ chức. Từ khóa bùng nổ là những từ khóa có số lần trích dẫn tăng đột biến trong một khoảng thời gian nhất định, phản ánh các chủ đề nóng trong lĩnh vực nghiên cứu từ năm 2004 đến 2023 (Hình 1). Từ đó cho thấy một quỹ đạo phát triển rõ ràng trong lĩnh vực nghiên cứu bê tông cốt liệu tái chế: từ việc tìm hiểu các đặc tính cơ bản của vật liệu, đến việc cải tiến hiệu suất và ứng dụng trong kết cấu, và cuối cùng là đi sâu vào các cơ chế vi mô và mô hình hóa tiên tiến [43].

3. Vật liệu và phương pháp

3.1. Vật liệu

Các mẫu tiến hành thí nghiệm trong phòng gồm các tổ mẫu lập phương kích thước chuẩn 150*150*150 mm đảm bảo tuân thủ theo các tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành. Cốt liệu sử dụng trong nghiên cứu cho CLTC và CLTN đều có thành phần hạt thỏa mãn yêu cầu của TCVN 11969:2018 [44].

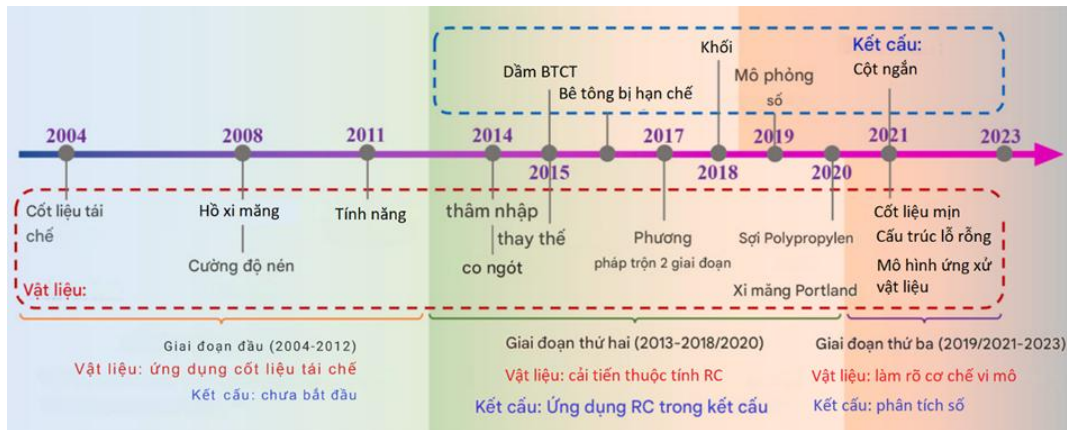
Cốt liệu tái chế: Được thu gom từ các công trình xây dựng bị phá dỡ tại Hà Nội, sau đó được nghiền, sàng lọc để loại bỏ tạp chất và phân loại theo kích thước yêu cầu.

Cốt liệu tự nhiên: Sỏi và cát tự nhiên được sử dụng làm cốt liệu đối chứng và trong các cấp phối trộn.

Xi măng: Xi măng Portland thường (PC 40) được sử dụng làm chất kết dính chính.

Bảng 1. Phân tích tổng hợp điểm mạnh và yếu của một số khía cạnh.

Khía cạnh	Điểm mạnh	Điểm yếu
Hiệu suất cường độ nén	Nhiều nghiên cứu báo cáo rằng CLTC có thể duy trì hoặc thậm chí tăng cường độ nén trong một số điều kiện nhất định, chẳng hạn như kích hoạt kiềm hoặc sử dụng các vật liệu xi măng bổ sung như tro bay và GGBFS, với mức tăng lên 33,7 % sau 7 ngày và 16,3 % sau 28 ngày trong một số trường hợp [8], [20], [21]. Các dự án quy mô lớn cũng xác nhận rằng bê tông sử dụng CLTC có thể đáp ứng các yêu cầu về cường độ mục tiêu, hỗ trợ khả năng ứng dụng thực tế [6], [11], [22]. Các mô hình dự đoán liên kết các đặc tính mới với cường độ nén tăng cường hơn nữa khả năng kiểm soát chất lượng [23].	Sự thay đổi về chất lượng CLTC, bao gồm độ xốp và vữa bám dính, dẫn đến kết quả cường độ không nhất quán trong các nghiên cứu [13], [16], [24]. Một số nghiên cứu chỉ ra việc giảm sức mạnh vượt quá ngưỡng thay thế nhất định (ví dụ: > 25-30 %), hạn chế mức độ sử dụng cốt liệu tái chế [13], [17], [25]. Sự khác biệt trong chế độ đóng rắn và thiết kế hỗn hợp làm phức tạp việc so sánh trực tiếp và một số nghiên cứu thiếu dữ liệu cường độ dài hạn [26], [27].
Tính công tác của bê tông	Tài liệu nêu bật các chiến lược hiệu quả để giảm thiểu tổn thất khả năng làm việc, chẳng hạn như sử dụng phụ gia, cốt liệu ngâm trước và phủ cốt liệu tái chế bằng SCM, giúp cải thiện đặc tính chìm và dòng chảy [6], [28]. Các công thức bê tông tự nén với cốt liệu tái chế thể hiện các đặc tính tươi được duy trì hoặc nâng cao khi được tối ưu hóa [22], [29], [30]. Xác nhận tại hiện trường xác nhận kết quả khả năng làm việc trong phòng thí nghiệm, hỗ trợ khả năng mở rộng [6], [11].	Khả năng làm việc liên tục giảm khi hàm lượng cốt liệu tái chế tăng lên do độ hấp thụ nước và độ nhám bề mặt cao hơn [8], [14], [25]. Một số nghiên cứu báo cáo giảm sụt giảm đáng kể (lên tới 31,3 %) và những thách thức trong việc duy trì tính nhất quán mà không có phụ gia [8], [13]. Ảnh hưởng của điều kiện độ ẩm của cốt liệu tái chế đến khả năng làm việc là phức tạp và không được giải quyết đồng nhất, dẫn đến các khuyến nghị thay đổi [12].
Khả năng mở rộng và ứng dụng hiện trường	Một số dự án xây dựng quy mô lớn kết hợp thành công tỷ lệ cốt liệu tái chế cao, thể hiện tính khả thi trong các ứng dụng bê tông khối lượng trong thế giới thực [11], [22], [31]. Các phát hiện trong phòng thí nghiệm về các đặc tính cơ học và tươi thường được xác nhận tại chỗ, củng cố độ tin cậy của kết quả thí nghiệm [6]. Việc sử dụng trộn rung động và các quy trình sáng tạo khác nâng cao chất lượng và sự ổn định của bê tông trong bối cảnh công nghiệp [32].	Mặc dù các nghiên cứu điển hình thành công, việc áp dụng rộng rãi vẫn còn hạn chế do các hạn chế về quy định, sự thay đổi trong các nguồn cốt liệu tái chế và lo ngại về độ bền lâu dài [9], [12]. Một số nghiên cứu thực địa thiếu đánh giá độ bền toàn diện hoặc phân tích tác động môi trường, hạn chế đánh giá toàn diện [9], [11]. Việc chuyển đổi từ điều kiện phòng thí nghiệm sang điều kiện hiện trường đôi khi cho thấy sự khác biệt về hiệu suất, cho thấy sự cần thiết của các giao thức tiêu chuẩn hóa [9].
Vật liệu và Kỹ thuật bổ sung	Việc tích hợp các SCM như tro bay, khối silica, metakaolin và GGBFS liên tục cải thiện độ bền cơ học, độ bền và khả năng gia công của bê tông cốt liệu tái chế [8], [18]. Lớp phủ cốt liệu tái chế và gia cố sợi tăng cường hơn nữa hiệu suất, bao gồm khả năng chống axit và độ dẻo dai [29], [33]. Các phương pháp tiếp cận học máy cung cấp khả năng dự đoán đầy hứa hẹn để tối ưu hóa các thiết kế hỗn hợp [34]	Tỷ lệ và sự kết hợp tối ưu của SCM và sợi rất khác nhau, và một số nghiên cứu báo cáo sự đánh đổi giữa độ bền và tác động môi trường [18], [35]. Sự phức tạp của các hệ thống đa thành phần có thể làm phức tạp thiết kế hỗn hợp và kiểm soát chất lượng, với sự đồng thuận hạn chế về các phương pháp hay nhất [18], [36]. Một số nghiên cứu tập trung vào các ứng dụng phi cấu trúc, hạn chế khả năng khái quát hóa đối với việc sử dụng kết cấu bê tông khối [35].
Phương pháp luận và chất lượng dữ liệu	Nhiều nghiên cứu sử dụng các thiết kế thử nghiệm nghiêm ngặt, bao gồm bảo dưỡng tiêu chuẩn hóa, nhiều cấp độ thay thế và kiểm tra cơ học và độ bền toàn diện [37], [38]. Các phân tích cấu trúc vi mô tiên tiến (XRD, SEM, EDAX) cung cấp những hiểu biết rõ hơn về đặc tính cơ học [37]. Việc sử dụng mô hình thống kê và dự đoán giúp tăng cường giải thích dữ liệu [23], [34].	Tính không đồng nhất trong các nguồn tổng hợp tái chế, tỷ lệ hỗn hợp và các giao thức thử nghiệm hạn chế khả năng so sánh giữa các nghiên cứu [13], [16]. Một số nghiên cứu dựa nhiều vào dữ liệu ngắn hạn (7-28 ngày), với việc đánh giá hiệu suất dài hạn không đủ [26], [39], [40]. Sự thay đổi trong báo cáo và thiếu các số liệu tiêu chuẩn hóa làm giảm khả năng tổng hợp các phát hiện một cách thuyết phục [9], [41].
Đánh đổi cơ học và độ bền	Một số cuộc điều tra cho thấy việc thay thế cốt liệu tái chế vừa phải (lên đến 25-30 %) có thể cải thiện hoặc duy trì các tính chất cơ học và độ bền, bao gồm khả năng chống thấm và co ngót clorua [17], [37]. Gia cố sợi và SCM giảm thiểu tổn thất sức mạnh và nâng cao độ bền [29], [42].	Mức độ thay thế cao hơn thường dẫn đến giảm độ bền và hiệu suất cơ học, với độ xốp và hấp thụ nước tăng lên gây lo ngại [27]. Bê tông hoạt hóa kiềm với cốt liệu tái chế cho thấy kết quả độ bền hỗn hợp, hạn chế các ứng dụng kết cấu [35]. Sự cân bằng giữa hiệu suất cơ học và lợi ích môi trường đòi hỏi phải tối ưu hóa hơn nữa [18].

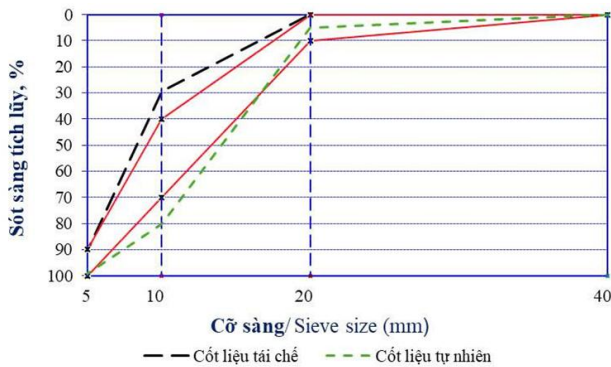


Hình 1. Phân loại từ khóa bùng nổ với chủ đề “Bê tông cốt liệu tái chế” [43].



a. Cốt liệu bê tông tái chế ngay sau khi được phá từ công trình xây dựng b. Cốt liệu được sàng phân thành các loại đường kính cỡ hạt

Hình 2. Cốt liệu tái chế đầu vào cho thí nghiệm.

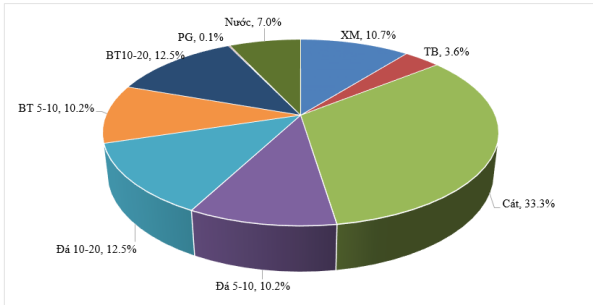


Hình 3. Biểu đồ thành phần hạt của CLTC và CLTN.

3.2. Thiết kế cấp phối

Bảng 2. Thành phần các cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu.

STT	Kí hiệu CP	Cấp phối hỗn hợp bê tông sau điều chỉnh, kg								
		XM	TB	Cát	Đá 0,5x1	Đá 1x2	BT 0,5x1	BT 1x2	PGSD	Nước
1	B30	260	87	810	495	605	0	0	3,123	170
2	B30R25	260	87	810	371	454	124	151	3,470	170
3	B30R30	260	87	810	347	424	149	182	3,470	170
4	B30R50	260	87	810	248	303	248	303	3,470	170
5	B30R75	260	87	810	124	151	371	454	3,817	170
6	B30R100	260	87	810	0	0	495	605	3,817	170
7	B20R30	225	75	820	378	462	162	198	2,700	175
8	B22,5R30	240	80	815	369	450	158	193	2,880	173
9	B25R30	240	80	820	362	443	155	158	2,880	170
10	B30R30	260	87	810	347	424	149	182	3,470	170
11	B35R30	310	104	805	347	424	149	182	4,140	160
12	B40R30	350	117	800	324	397	139	170	4,670	155
13	B40	360	120	760	473	578	0	0	4,320	155
14	B40R25	360	120	760	348	425	116	142	4,800	155
15	B40R30	360	120	760	324	397	139	170	4,800	155
16	B40R50	360	120	760	232	283	232	283	4,800	155
17	B40R75	360	120	760	116	142	348	425	4,800	155
18	B40R100	360	120	760	0	0	464	567	5,280	155



Hình 4. Thành phần cấp phối Bê tông tái chế (50% CLTC).

3.3. Chương trình thí nghiệm

Các mẫu vật được chia thành ba nhóm, xét ở các tuổi 7–14–28 ngày; độ sụt khổng chế $SN = 12 \pm 2$ cm; số mẫu thí nghiệm/mỗi tổ là 03.

Nhóm 1 (Hỗn hợp 1-6): Đánh giá tác động của việc tăng tỷ lệ thay thế CLTC (0 %, 25 %, 30 %, 50 %, 75 % và 100 %) đối với cường độ nén của bê tông có cấp độ mục tiêu là B30. Trong đó 0 % ứng với mẫu bê tông cốt liệu tự nhiên (hay còn gọi là mẫu đối chứng).

Nhóm 2 (Hỗn hợp 7-11 là vùng xám trong Bảng 1): Duy trì tỷ lệ thay thế CLTC không đổi là 30 % trong khi thay đổi cấp bê tông mục tiêu (B20, B22.5, B25, B30 và B35) để đánh giá tác động đến cường độ nén.

Nhóm 3 (Hỗn hợp 12-17): Tương tự Nhóm 1 nhưng nhắm mục tiêu vào bê tông có cấp B40 để đánh giá tác động của việc tăng tỷ lệ thay thế CLTC đối với bê tông có cường độ cao hơn.

Các thí nghiệm cơ học quan trọng đã được thực hiện, trong đó trọng tâm là thí nghiệm nén để xác định cường độ chịu nén của các mẫu bê tông ở các tuổi 7, 14 và 28 ngày. Đây là chỉ tiêu cơ bản nhất để đánh giá chất lượng và khả năng ứng dụng của bê tông.



a. Các mẫu bê tông của một đợt thí nghiệm



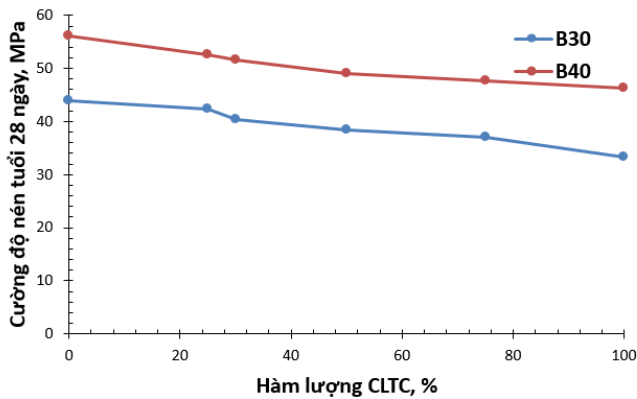
b. Cốt liệu tự nhiên (đá dăm)



c. Cốt liệu bê tông tái chế

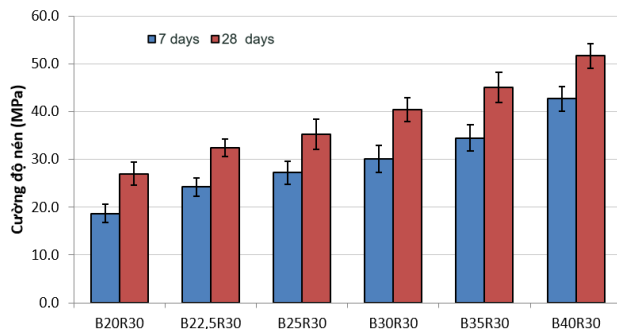
Hình 5. Vật liệu chính và hình ảnh thí nghiệm trong phòng.

4. Kết quả



Hình 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế CLTC đến cường độ nén 28 ngày.

Kết quả 28 ngày (Hình 6) cho thấy xu hướng nhất quán: cường độ nén giảm khi tăng tỷ lệ thay thế CLTC. So với mẫu đối chứng dùng 100 % cốt liệu tự nhiên, mức thay thế 30 % CLTC làm giảm khoảng 10–15 % cường độ nén; thay thế 100 % CLTC làm giảm khoảng 25–30 %. Cơ chế chính quy về vi cấu trúc là do CLTC có độ rỗng/hút nước cao và tồn dư lớp vữa cũ, tạo vùng tiếp giáp (Interfacial Transition Zone - ITZ) yếu hơn giữa cốt liệu và vữa xi măng mới.



Hình 7. Ảnh hưởng của hỗn hợp bê tông đến cường độ nén.

Hình 7 cho thấy cho thấy xu hướng đồng biến về thời gian của cả ở hai mức độ tuổi (7 và 28 ngày). So với bê tông sử dụng 100 % cốt liệu tự nhiên (mẫu CLTN, tức mẫu đối chứng), cường độ chịu nén giảm khoảng 10-15 % khi thay thế 30 % CLTC, và giảm khoảng 25-30 % khi thay thế 100 % CLTC.

5. Thảo luận

5.1. Ý nghĩa kỹ thuật và bền vững

+ Phân tích cho thấy mặc dù có sự suy giảm về cường độ, nghiên cứu nhấn mạnh rằng ngay cả với tỷ lệ thay thế CLTC đáng kể (ví dụ 30–50 %), bê tông vẫn có thể đạt được cường độ thiết kế yêu cầu cho nhiều ứng dụng kết cấu thông thường.

+ Kết quả củng cố luận điểm rằng CLTC là giải pháp “chiến lược” để thúc đẩy kinh tế tuần hoàn trong điều kiện đô thị như Hà Nội: vừa giảm áp lực khai thác cốt liệu tự nhiên, vừa hấp thụ phế thải xây dựng.

Mức suy giảm 10–15 % tại 30 % CLTC là có thể dự đoán và quản lý được trong thiết kế, đặc biệt khi đã khống chế được độ sụt nhờ phụ gia. Điều này mở đường cho các ứng dụng kết cấu thông dụng và tiền chế với các biện pháp hiệu chỉnh hợp lý.

Dù có suy giảm, các kết quả khẳng định tính khả thi: với mức thay thế vừa phải (khoảng 30 % và thậm chí đến 50 % tùy thiết kế), bê tông vẫn đạt được cấp bền mục tiêu cho nhiều ứng dụng kết cấu thông thường nếu kiểm soát tốt cấp phối và tính công tác.

5.2. Cơ chế vật liệu và hàm ý thiết kế:

Suy giảm chủ yếu bắt nguồn từ ITZ yếu do lớp vữa cũ và tính hút nước cao của CLTC. Hai hệ quả thực hành:

- + (i) cần hiệu chỉnh nước trộn/hàm lượng phụ gia để đảm bảo độ sụt và giảm mất nước sớm;
- + (ii) cần kiểm soát chặt độ ẩm CLTC trước khi trộn (tiền bão hòa ở trạng thái bề mặt khô bão hòa - SSD) để hạn chế “đói nước” trong ma trận.

5.3. Hạn chế:

+ Sự không đồng nhất của CLTC theo nguồn/phương pháp phá dỡ có thể gây phân tán kết quả.

+ Nhiều tiêu chí khác chưa được quan tâm thỏa đáng: ví như độ thấm ion Clo, carbonat hóa, hiện tượng biến dạng co ngót của bê tông, bền sunfat...

5.4. Kiến nghị:

+ Thực tế với bê tông có cấp bền cao (có thể xét từ B40 trở lên), độ nhạy với ITZ và lỗ rỗng lớn hơn; do đó, tỷ lệ thay thế nên thận trọng hơn và cần các giải pháp đồng bộ như sử dụng vật liệu xi măng bổ sung phù hợp, phủ bề mặt CLTC hoặc điều chỉnh cấp phối hạt nhằm nén chặt vi cấu trúc.

+ Tính khả thi của CLTC từ PTXD phụ thuộc vào chất lượng CLTC theo lô: cần quy trình phân loại nguồn thải, sàng lọc/tách tạp chất, chỉ tiêu nghiệm thu đầu vào (hàm lượng vữa bám, độ hút nước, tạp chất hữu cơ...).

+ Cần chú trọng công tác báo cáo các dữ liệu thống kê (hệ số biến thiên, khoảng tin cậy) và các đặc trưng đầu vào của CLTC theo từng lô để nâng cao khả năng sử dụng rộng rãi loại vật liệu này.

6. Kết luận

Nghiên cứu cung cấp bằng chứng thực nghiệm có ý nghĩa cho thấy bê tông sử dụng cốt liệu bê tông tái chế tại Hà Nội có thể đáp ứng yêu cầu kỹ thuật nếu được kiểm soát hợp lý về cấp phối và tính công

tác. Ở mức thay thế 30 % RCA, cường độ nén 28 ngày giảm khoảng 10-15 % so với đối chứng; thay thế 100% RCA làm giảm khoảng 25-30 % kháng định tính khả thi đối với các cấp bền thông dụng nếu kiểm soát cấp phối.

Nghiên cứu đã chứng minh một cách thuyết phục rằng việc sử dụng cốt liệu bê tông tái chế là hoàn toàn khả thi và đặc biệt cho các kết cấu hạ tầng kỹ thuật hoặc dân dụng công nghiệp (cấu kiện phi kết cấu tức không chịu lực chính).

Những kết luận chính được rút ra bao gồm:

Bài báo (i) xây dựng một khung tổng hợp tổng quan 6 khía cạnh để đánh giá RAC trong đó có làm rõ điểm mạnh-hạn chế, (ii) cung cấp bộ dữ liệu thực nghiệm có kiểm soát cường độ BTCLTC có nguồn PTXD ở Hà Nội qua các cấp bền B20-B40, và (iii) đưa ra ngưỡng khuyến nghị thay thế khoảng 25-30 % cho ứng dụng kết cấu thông dụng trong điều kiện kiểm soát QA/QC – góp phần tạo nền tảng kỹ thuật cho triển khai RAC tại các đô thị.

Việc áp dụng RAC trong xây dựng không chỉ mang lại lợi ích về môi trường (giảm khai thác tài nguyên, giảm rác thải) mà còn có tiềm năng kinh tế khi tận dụng được nguồn vật liệu phế thải tại chỗ.

BTCLTC có thể trở thành lựa chọn ưu tiên trong các dự án hướng tới kinh tế tuần hoàn ở Hà Nội và các đô thị lớn, giúp giảm khai thác cốt liệu tự nhiên và giảm tải bãi chôn lấp phế thải xây dựng, củng cố kháng định tiềm năng to lớn của bê tông cốt liệu tái chế trong ngành xây dựng nước nhà.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2024.XDA-10.

Tài liệu tham khảo

- [1]. V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 272–292, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.
- [2]. H. C. Nguyen, "The Influence of Recycled Coarse Aggregate Content on the Properties of High-Fly-Ash Self-Compacting Concrete," *Civ. Eng. J.*, vol. 10, no. Special Issue, pp. 51–61, 2024, doi: 10.28991/CEJ-SP2024-010-04.
- [3]. M. Behera, S. K. Bhattacharyya, A. K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti, "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 501–516, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003.
- [4]. TCVN 13694, "Recycled graded aggregate from construction and demolition waste for base and subbase of urban roads-Specifications and test methods," 2023.
- [5]. D. Kryeziu, F. Selmani, A. Mujaj, and I. Kondi, "Recycled Concrete Aggregates: A Promising and Sustainable Option for the Construction Industry," *J. Human, Earth, Futur.*, vol. 4, no. 2, pp. 166–180, 2023, doi: 10.28991/HEF-2023-04-02-03.
- [6]. M. Etxeberria, M. Konoiko, C. Garcia, and M. Á. Perez, "Water-Washed Fine and Coarse Recycled Aggregates for Real Scale Concretes Production in Barcelona," *Sustain.*, vol. 14, no. 2, 2022, doi: 10.3390/su14020708.
- [7]. D. Kvočka, J. Šušteršič, A. Mauko Pranjić, and A. Mladenović, "Mass Concrete with EAF Steel Slag Aggregate: Workability, Strength, Temperature Rise, and Environmental Performance," *Sustain.*, vol. 14, no. 23, 2022, doi: 10.3390/su142315502.
- [8]. Y. Huo *et al.*, "Mass GGBFS Concrete Mixed with Recycled Aggregates as Alkali-Active Substances: Workability, Temperature History and Strength," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 5032, p. 15, 2023, doi: 10.3390/ma16165632.
- [9]. R. P. Neupane, T. Imjai, N. Makul, R. Garcia, B. Kim, and S. Chaudhary, "Use of recycled aggregate concrete in structural members: a review focused on Southeast Asia," *J. Asian Archit. Build. Eng.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–24, 2023, doi: 10.1080/13467581.2023.2270029.
- [10]. C. A. Issa and G. Hilal, "Sustainable Construction Materials: Recycled Aggregate Concrete from Known Concrete Strength Debris," *Open Constr. Build. Technol. J.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–8, 2023, doi: 10.2174/18748368-v17-e230221-2022-8.
- [11]. G. M. Geary, S. M. Palotta, M. Boyle, and D. Jared, "Construction of Interstate Concrete Shoulders using 100% Recycled Concrete Aggregate," *Proc. Int. Conf. Concr. Pavements*, pp. 815–827, 2025, doi: 10.33593/iccp.v11i1.327.
- [12]. S. Kashkash, O. Czoboly, and Z. Orban, "Effect of Moisture Condition and the Composition of Aggregate from Demolition Waste on Strength and Workability Properties of Recycled Concrete," *Buildings*, vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/buildings13071870.
- [13]. M. T. Gumede and S. O. Franklin, "Studies on Strength, Density & Workability of Recycled Aggregates Concrete (RAC)," *Res. Dev. Eng. Res. Vol. 8*, pp. 103–117, 2023, doi: 10.9734/bpi/rader/v8/6235C.
- [14]. O. A. Qasim, N. Hilal, M. I. Al Biajawi, N. H. Sor, and T. A. Tawfik, "Studying the usability of recycled aggregate to produce new concrete," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 71, no. 1, pp. 1–24, 2024, doi: 10.1186/s44147-024-00463-1.
- [15]. I. Ali, "Workability and Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete with Different Water-Cement Ratios," *Quaid-e-Awam Univ. Res. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 125–133, 2023, doi: 10.52584/qjrj.2101.15.
- [16]. S. Yehia, S. Farrag, A. Abu-Sharkh, A. Zaher, H. Istaitiyeh, and K. Helal, "Concrete with Recycled Aggregate: Evaluation of Mechanical Properties," *GSTF J. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 3, 2015.
- [17]. H. Panghal and A. Kumar, "Sustainable Concrete: Exploring Fresh, Mechanical, Durability, and Microstructural Properties with Recycled Fine Aggregates," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 68, no. 2, pp. 543–558, 2024, doi: 10.3311/PPci.22711.
- [18]. M. Danish and V. Ajay, "Assessment Of Sustainability Aspects Of Recycled Aggregate With Supplementary Cementitious Materials," *Int. J. Multidiscip. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 2025, doi: 10.36948/ijfmr.2025.v07i01.34675.
- [19]. A. Younes, E. Elbeltagi, A. Diab, G. Tarsi, F. Saeed, and C. Sangiorgi, "Incorporating coarse and fine recycled aggregates into concrete mixes: mechanical characterization and environmental impact," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 26, no. 1, pp. 654–668, 2024, doi: 10.1007/s10163-023-01834-1.
- [20]. W. T. Lin, "Performance evaluation of concrete manufactured with pre-coated recycled fine aggregates using supplementary cementitious materials," *Sensors Mater.*, vol. 30, no. 3, pp. 479–488, 2018, doi: 10.18494/SAM.2018.1747.
- [21]. B. Neupane, K. Sahani, and S. S. Khadka, "Experimental Testing and Numerical Simulation of Recycled Concrete Aggregate in a Concrete Mix," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 19, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s40069-024-00733-5.

- [22]. J. E. Castano and A. Abdel-Mohti, "Assessing the Impact of Recycled Concrete Aggregates on the Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Concrete for Structural Precast Applications," *Infrastructures*, vol. 9, no. 10, 2024, doi: 10.3390/infrastructures9100177.
- [23]. S. Al Martini, R. Sabouni, A. Khartabil, T. G. Wakjira, and M. S. Alam, "Use of fresh properties to predict mechanical properties of sustainable concrete incorporating recycled concrete aggregate," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 13, no. 9, pp. 1277–1288, 2024, doi: 10.1080/21650373.2024.2374830.
- [24]. R. Zaharieva and G. Dimitrov, "Impact of recycled aggregate properties on concrete performance," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1276, no. 1, p. 012003, 2023, doi: 10.1088/1757-899x/1276/1/012003.
- [25]. B. Ahmed Memon, M. Oad, and A. H. Buller, "Effect of Fine Aggregate Type on Workability and Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete," *Int. J. Res. Rev.*, vol. 10, no. 4, pp. 152–162, 2023, doi: 10.52403/ijrr.20230420.
- [26]. Aves, Federico A Jr., "Assessment of Concrete Compressive Strength with the Incorporation of Recycled Coarse Aggregates Across Varied Curing Periods," *Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol.*, pp. 948–956, 2023, doi: 10.48175/ijarsct-12335.
- [27]. J. Tang *et al.*, "The Effect of Demolition Concrete Waste on the Physical, Mechanical, and Durability Characteristics of Concrete," *Buildings*, vol. 14, no. 4, 2024, doi: 10.3390/buildings14041148.
- [28]. D. Wang *et al.*, "Mechanical performance of recycled aggregate concrete in green civil engineering: Review," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, no. July, p. e02384, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02384.
- [29]. M. Hichem, A. Kada, K. Belmokretar, M. Ezziane, and N. Leklou, "Performance of Self-Compacting Concrete Containing Recycled Aggregates and Recycled Steel Fibers," *Int. J. Eng. Res. Africa*, 2024, doi: 10.4028/p-gama0s.
- [30]. N. Kim and J. Kim, "Effect of Maximum Aggregate Size and Powder Content on the Properties of Self-compacting Recycled Aggregate Concrete," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 67, no. 4, pp. 1038–1047, 2023, doi: 10.3311/PPci.20407.
- [31]. F. Fiol, V. Revilla-Cuesta, M. Skaf, C. Thomas, and J. M. Manso, "Scaled concrete beams containing maximum levels of coarse recycled aggregate: Structural verifications for precast-concrete building applications," *Struct. Concr.*, vol. 24, no. 3, pp. 3476–3497, 2023, doi: 10.1002/suco.202200963.
- [32]. F. Yang, Y. Yao, X. Wang, J. Wei, and Z. Feng, "Preparation of Recycled and Multi-Recycled Coarse Aggregates Concrete with the Vibration Mixing Process," *Buildings*, vol. 12, no. 9, 2022, doi: 10.3390/buildings12091369.
- [33]. F. Ahmed, M. F. Ali, B. A. Memon, and A. A. Bhangwar, "Impact of recycled aggregates, fly ash and nylon fibre on mechanical properties of concrete," *NED Univ. J. Res.*, vol. XXI, no. 3, pp. 71–90, 2024, doi: 10.35453/nedjr-stmech-2024-0009.r1.
- [34]. A. A. Khan, I. Ahmed, T. Aqsa, and H. Javed, "Experimental and Machine learning investigation of Potential strength of recycled aggregate concrete," *Asian Bull. Big Data Manag.*, vol. 4, no. 1, 2024, doi: 10.62019/abbdm.v4i1.120.
- [35]. B. Patel, S. Thakkar, and U. Dave, "Mechanical and Durability Properties of Alkali Activated Concrete Incorporating Recycled Aggregates," in *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2022*, R. Gupta, M. Sun, S. Brzev, M. S. Alam, K. T. W. Ng, J. Li, A. El Damatty, and C. Lim, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1235–1250.
- [36]. M. Alamri *et al.*, "Enhancing the engineering characteristics of sustainable recycled aggregate concrete using fly ash, metakaolin and silica fume," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, p. e29014, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29014.
- [37]. H. Panghal and A. Kumar, "Structural aspects of concrete incorporating recycled coarse aggregates from construction and demolished waste," *Mater. Constr.*, vol. 74, no. 353, p. e337, 2024, doi: 10.3989/mc.2024.360023.
- [38]. S. Tamboli *et al.*, "A Research on Fresh and Hardened Concrete Residences with Partial Replacement of Recycled Coarse Aggregates Obtained from Demolition and Construction Waste," *Int. J. Exp. Res. Rev.*, vol. 42, pp. 343–350, 2024, doi: 10.52756/ijerr.2024.v42.030.
- [39]. N. H. Giang *et al.*, "Xây dựng hệ thống quản lý và tái chế chất thải rắn xây dựng thân thiện với môi trường cho thành phố Đà Nẵng," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - ĐHXDHN*, vol. 18, no. 2V, pp. 1–12, May 2024, doi: 10.31814/stce.huice2024-18(2V)-01.
- [40]. N. H. Cường, "Nghiên cứu thực nghiệm sử dụng cốt liệu nhỏ tái chế từ khối xây gạch đỏ cho bê tông tự lèn có hàm lượng tro bay cao," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN*, vol. 18, no. 2V, pp. 30–41, May 2024, doi: 10.31814/stce.huice2024-18(2V)-03.
- [41]. T. V. Cuong, K. Kawamoto, T. T. V. Nga, and N. H. Giang, "Mechanical properties of synthetic aggregate pelletized by waste concrete fines in Vietnam," *J. Sci. Technol. Civ. Eng. - HUCE*, vol. 17, no. 2, pp. 1–8, 2023, doi: 10.31814/stce.huice2023-17(2)-01.
- [42]. M. Atasham ul haq *et al.*, "Optimal utilization of low-quality construction waste and industrial byproducts in sustainable recycled concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 428, p. 136362, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136362>.
- [43]. L. Lin-Bin, Y. Guang-Ji, W. Xiao-Dong, M. Ling, Z. Xiao-Bao, and G. Xiao-Jian, "A bibliometric review on research progress, interest evolution and future trend in the field of recycled concrete by using CiteSpace (2004–2023)," *J. CO2 Util.*, vol. 83, no. April, p. 102826, 2024, doi: 10.1016/j.jcou.2024.102826.
- [44]. TCVN 11969:2018, *Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông*.