

Đánh giá dấu chân carbon và tính chất cơ lý của gạch tự chèn sử dụng đá thải mỏ than và tro xỉ nhiệt điện

Nguyễn Văn Minh^{1*}, Phan Văn Thoại¹

¹ Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

TỪ KHOÁ

Gạch tự chèn
Đá thải mỏ than
Tro xỉ nhiệt điện
Hạ tầng xanh
Đánh giá vòng đời (LCA)
Dấu chân carbon

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá khả năng tái sử dụng đá thải mỏ than Quảng Ninh và tro xỉ nhiệt điện trong sản xuất gạch bê tông tự chèn, nhằm giảm sử dụng cốt liệu truyền thống và giảm phát thải trong lĩnh vực xây dựng hạ tầng. Đá thải mỏ được đập nghiền đến kích thước nhỏ hơn 5 mm và phối hợp với tro xỉ nhiệt điện để thay thế cốt liệu mịn thông thường trong toàn bộ cấp phối viên gạch. Cấp phối được thiết kế dựa trên hàm lượng xi măng, đá thải mỏ than và tro xỉ nhiệt điện. Các tính chất cơ lý của sản phẩm được đánh giá thông qua cường độ nén, độ bền uốn, độ mài mòn bề mặt và độ hút nước. Phương pháp đánh giá vòng đời với ranh giới từ nguyên liệu đầu vào đến cổng nhà máy được áp dụng để lượng hóa phát thải CO₂ tương đương của sản phẩm. Kết quả thực nghiệm cho thấy cấp phối phù hợp nhất trong phạm vi khảo sát gồm 13,8% xi măng, 38,8% đá thải mỏ than và 47,4% tro xỉ nhiệt điện đạt cường độ nén 12,9 MPa ở tuổi 28 ngày. Sản phẩm gạch tự chèn chế tạo từ cấp phối này đạt độ bền uốn 5,92 MPa, độ mài mòn bề mặt 0,31 g/cm² và độ hút nước 9,9%. Các kết quả này cho thấy vật liệu có tiềm năng sử dụng cho các khu vực chịu tải thấp như sân vườn, lối dạo cảnh quan và khu vực đi bộ nhẹ. Phân tích chi phí và phát thải trong ranh giới từ nguyên liệu đầu vào đến cổng nhà máy cho thấy cấp phối đề xuất giúp giảm 20,82% chi phí vật liệu và giảm 2,6% phát thải CO₂ tương đương trên mỗi đơn vị sản phẩm. Nghiên cứu góp phần mở rộng hướng tái sử dụng đá thải mỏ than và tro xỉ nhiệt điện trong sản xuất vật liệu xây dựng tại Việt Nam.

KEYWORDS

interlocking pavers
Coal mine waste rock
Thermal power ash
Green infrastructure
Life cycle assessment (LCA)
Carbon footprint

ABSTRACT

This study evaluates the reuse of coal mine waste rock from Quang Ninh and thermal power plant ash and slag in the production of interlocking concrete paving blocks, with the aim of reducing the use of conventional fine aggregates and lowering emissions in infrastructure construction. The coal mine waste rock was crushed to a particle size smaller than 5 mm and combined with ash and slag to replace conventional fine aggregate in the entire block mixture. The mixture was designed based on the proportions of cement, coal mine waste rock, and slag. The mechanical and physical properties of the products were assessed through compressive strength, flexural strength, surface abrasion resistance, and water absorption. A cradle-to-gate life cycle assessment was also conducted to quantify the carbon footprint of the proposed product. The experimental results showed that the optimized mixture, consisting of 13.8% cement, 38.8% coal mine waste rock, and 47.4% thermal power plant ash and slag, achieved a 28-day compressive strength of 12.9 MPa. The interlocking paving blocks produced from this mixture exhibited a flexural strength of 5.92 MPa, a surface abrasion loss of 0.31 g/cm², and a water absorption of 9.9%. These results indicate that the proposed material has potential for low-load applications such as garden pavements, landscape walkways, and light pedestrian areas. The cost and emission analysis within the cradle-to-gate boundary showed that the proposed mixture reduced material cost by 20.82% and CO₂-equivalent emissions by 2.6% per product unit. The study provides a practical basis for expanding the reuse of coal mine waste rock and thermal power plant ash and slag in construction materials in Vietnam.

1. Tổng quan chung

Trong quá trình phát triển hạ tầng đô thị, khu dân cư, công viên, sân vườn và các không gian công cộng tại Việt Nam, nhu cầu sử dụng vật liệu lát nền bê tông ngày càng tăng. Trong nhóm vật liệu này, gạch

bê tông tự chèn như gạch con sâu, gạch chữ I và gạch lục giác được sử dụng khá phổ biến nhờ thi công thuận tiện, dễ tháo lắp, dễ thay thế cục bộ và phù hợp với các khu vực đi bộ hoặc chịu tải nhẹ. Cấp phối gạch tự chèn thông thường thường sử dụng xi măng kết hợp với cát, đá mặt hoặc các loại cốt liệu mịn nghiền từ đá tự nhiên. Khi nhu cầu xây dựng

*Liên hệ tác giả: minhnhv@utt.edu.vn

Nhận ngày 01/06/2026, sửa xong ngày 25/06/2026, chấp nhận đăng ngày 26/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1383>

tăng, việc sử dụng lượng lớn cốt liệu mịn truyền thống có thể tạo thêm áp lực lên nguồn cung vật liệu, làm tăng chi phí xây dựng và gây tác động đến tài nguyên khoáng sản. Vấn đề quản lý, bình ổn giá vật liệu xây dựng cũng đã được đề cập trong Công điện 85/CD-TTg của Thủ tướng Chính phủ [1]. Trong bối cảnh Việt Nam đặt mục tiêu đạt phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050, việc tìm kiếm nguồn vật liệu thay thế cho cốt liệu tự nhiên trong sản xuất vật liệu xây dựng là hướng nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn.

Trong nghiên cứu này, Quảng Ninh được lựa chọn làm khu vực nghiên cứu điển hình vì địa phương này vừa có nhu cầu lớn về vật liệu xây dựng, vừa có nguồn vật liệu thứ cấp đáng kể từ khai thác than và sản xuất nhiệt điện. Theo báo cáo rà soát của cơ quan quản lý địa phương, tổng nhu cầu đá xây dựng giai đoạn 2025–2030 đạt 45.705 nghìn m³, tương đương 45,705 triệu m³. Nhu cầu cát xây dựng đạt 32.082 nghìn m³, tương đương 32,082 triệu m³. Tổng nhu cầu của hai nhóm vật liệu này khoảng 77,787 triệu m³ [2]. Trong khi đó, nguồn cung tại chỗ còn hạn chế. Báo cáo cho thấy địa phương chỉ còn 03 mỏ đá đang khai thác với tổng công suất khoảng 0,6 triệu m³/năm, còn cát xây dựng phải mua thương mại từ các địa phương khác [2]. Sự chênh lệch giữa nhu cầu và nguồn cung tại chỗ cho thấy cần có các giải pháp thay thế một phần vật liệu tự nhiên bằng nguồn vật liệu sẵn có tại địa phương.

Ở chiều ngược lại, Quảng Ninh có nguồn vật liệu thứ cấp lớn từ hoạt động khai thác than và nhiệt điện. Quy hoạch tỉnh xác định có 32 khu vực bãi thải mỏ than với trữ lượng khoảng 965,8 triệu m³ [2]. Đây là nguồn vật liệu có khối lượng lớn, cần được nghiên cứu theo hướng tái sử dụng thay vì chỉ lưu chứa tại bãi thải. Đối với tro xỉ nhiệt điện, trên địa bàn tỉnh có 07 nhà máy nhiệt điện với tổng công suất 5.640 MW. Tổng lượng tro xỉ có thể sử dụng làm vật liệu san lấp được quy đổi khoảng 37 triệu m³ [2]. Một phần tro xỉ đã được đánh giá, công nhận phù hợp cho sử dụng làm phụ gia xi măng, vật liệu san lấp hoặc vật liệu xây dựng theo quy định hiện hành [2]. Trên nền điều kiện này, các chủ trương về kinh tế tuần hoàn và các quyết định của Thủ tướng Chính phủ về thúc đẩy sử dụng tro, xỉ làm nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng tạo cơ sở cho việc nghiên cứu thay thế cốt liệu tự nhiên bằng vật liệu thứ cấp [3], [4].

Về mặt khoa học, việc tái sử dụng xỉ đáy, tro bay và đá thải mỏ trong vật liệu xây dựng không nung đã được đề cập trong nhiều nghiên cứu. Một số công bố cho thấy xỉ đáy có thể được dùng trong chế tạo gạch, còn đá thải mỏ có thể được vật liệu hóa khi được nghiền, phân loại cỡ hạt và phối hợp với chất kết dính phù hợp [5], [6]. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu hiện nay vẫn tập trung vào gạch xây hoặc các sản phẩm không nung thông thường. Các chỉ tiêu được đánh giá chủ yếu là cường độ nén và một số tính chất cơ bản. Đối với gạch bê tông tự chèn, yêu cầu kỹ thuật không chỉ liên quan đến cường độ nén, mà còn cần xem xét độ bền uốn, độ hút nước và khả năng chống mài mòn bề mặt. Các chỉ tiêu này có liên quan trực tiếp đến khả năng làm việc của viên gạch trong môi trường ngoài trời, nơi sản phẩm thường chịu tác động của nước mưa, ma sát bề mặt và thay đổi điều kiện ẩm khô trong quá trình sử dụng.

Ngoài các chỉ tiêu kỹ thuật, hiệu quả môi trường của vật liệu thay thế cũng cần được đánh giá định lượng. Việc sử dụng đá thải mỏ và tro xỉ nhiệt điện có thể giúp giảm nhu cầu khai thác cốt liệu tự nhiên, nhưng mức giảm phát thải thực tế còn phụ thuộc vào quá trình thu gom, vận chuyển, nghiền sàng, phối trộn và tạo hình sản phẩm. Vì vậy, đánh giá vòng đời với ranh giới từ nguyên liệu đầu vào đến công nhà máy là cách tiếp cận phù hợp để lượng hóa phát thải CO₂ tương đương của phương án vật liệu. Cách tiếp cận này cũng giúp so sánh rõ hơn giữa lợi ích môi trường và chi phí sản xuất của cấp phối sử dụng vật liệu thứ cấp [7].

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung khảo sát và thiết kế cấp phối gạch bê tông tự chèn sử dụng đá thải mỏ than Quảng Ninh kết hợp tro xỉ nhiệt điện để thay thế cốt liệu mịn thông thường trong toàn bộ viên gạch. Đá thải mỏ được lấy từ các bãi thải mỏ than tại Quảng Ninh, sau đó đập nghiền, loại bỏ tạp chất và sàng đến cỡ hạt nhỏ hơn 5 mm. Tro xỉ nhiệt điện, chủ yếu là xỉ đáy kết hợp một phần tro bay, được thu gom từ Nhà máy nhiệt điện Đông Triều và gia công cơ học đến kích thước nhỏ hơn 5 mm để sử dụng như thành phần cốt liệu mịn. Trên nền quy trình tạo hình rung ép, nghiên cứu đánh giá cường độ nén, độ bền uốn, độ mài mòn bề mặt và độ hút nước của sản phẩm. Phân tích chi phí và phát thải CO₂ tương đương trong ranh giới từ nguyên liệu đầu vào đến công nhà máy được thực hiện nhằm làm rõ hiệu quả kinh tế và môi trường của phương án thay thế cốt liệu mịn thông thường bằng đá thải mỏ than và tro xỉ nhiệt điện.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguồn gốc và đặc tính vật liệu sử dụng

2.1.1. Cốt liệu đá thải mỏ than

Nguồn đá thải được thu thập trực tiếp tại các công trường mỏ than vùng Quảng Ninh. Về mặt thạch học, đây chủ yếu là các đá trầm tích (cát kết, sạn kết và cuội kết). Phân tích nhiễu xạ tia X cho thấy thành phần khoáng vật chủ đạo là thạch anh (SiO₂), chiếm tỷ lệ từ 50 % đến 82 %, kèm theo một lượng nhỏ các khoáng vật phiến sét như Illit, Kaolinit và Clorit (Hình 1). Ngoài ra, đá thải mỏ có độ cứng cơ học cao và khả năng chống phong hóa tốt. Cụ thể, hệ số mềm của đá gốc (K_m) đạt từ 0,92 đến 0,97, phản ánh độ ổn định cấu trúc ngay cả khi ngâm bão hòa trong nước.

Đá thải mỏ nguyên khai được đưa qua hệ thống gia công cơ học gồm máy đập hàm và đập nón, sau đó qua hệ thống sàng phân loại để thu hồi phần cốt liệu có kích thước hạt $D_{max} \leq 5$ mm. Mốc kích thước này được lựa chọn dựa trên ranh giới phân loại cốt liệu mịn theo tiêu chuẩn hiện hành, nhằm mục đích thay thế hoàn toàn vai trò của cốt liệu mịn tự nhiên. Bên cạnh đó, việc khống chế hạt lớn nhất ở mức 5 mm giúp cải thiện hiệu ứng chèn lấp hạt khi kết hợp với cốt liệu tro xỉ, đồng thời đảm bảo khả năng điền đầy khuôn dưới tác dụng của lực ép rung, từ đó cải thiện độ đặc chắc và giảm thiểu rỗ bề mặt cho viên gạch tự chèn. Đây là dải hạt phù hợp để thay thế hoàn toàn cốt liệu tự nhiên trong cấp phối thông thường. Thành phần hạt của đá mỏ than được thể hiện ở Hình 2.

Bảng 3. Tỷ lệ thành phần các cấp phối.

Ký hiệu	Xi măng PCB30	Cốt liệu đá thải	Tro xi nhiệt điện	Cốt liệu mịn	Tỷ lệ nước/rắn
CP1 (Thử nghiệm)	12,3 %	26,3 %	61,4 %	0	10 %
CP2 (Thử nghiệm)	13,8 %	38,8 %	47,4 %	0	10 %
CPĐC1 (Đối chứng)	12,3 %	0	61,4 %	26,3 %	10 %
CPĐC2 (Đối chứng)	13,8 %	0	47,4 %	38,8 %	10 %

2.3. Quy trình chế tạo

Quy trình chế tạo mẫu thử được xây dựng theo nguyên lý công nghệ ép rung đang áp dụng trong sản xuất gạch tự chèn, nhằm bảo đảm tính đại diện của cấu trúc vật liệu và khả năng chuyển giao kết quả thí nghiệm sang điều kiện nhà máy. Toàn bộ quá trình được tổ chức theo ba công đoạn phối trộn, tạo hình và bảo dưỡng, với các thông số vận hành được giữ ổn định giữa các mẻ để giảm sai khác do thao tác và điều kiện chế tạo.

Ở công đoạn phối trộn, các thành phần cốt liệu (bao gồm đá thải và tro xi đã gia công) và xi măng được cân định lượng theo cấp phối thiết kế. Hỗn hợp được trộn khô trong máy trộn cưỡng bức 30 s nhằm phân tán đều pha hạt mịn của tro xi trong ma trận đá thải thô, đồng thời hạn chế hiện tượng vón cục của vật liệu mịn khi tiếp xúc nước. Sau đó, nước được cấp theo dạng phun sương để tăng tính đồng nhất độ ẩm trong phối liệu và giảm nguy cơ tạo vùng ẩm cục bộ; quá trình trộn ẩm được duy trì thêm 60 s để đảm bảo hồ xi măng bao phủ hạt cốt liệu và đạt trạng thái phối liệu phù hợp cho tạo hình ép rung.

Ở công đoạn tạo hình, phối liệu được nạp vào khuôn thép định hình gạch bê tông tự chèn. Quá trình định hình sử dụng cơ cấu rung ép thủy lực kép, trong đó lực ép được duy trì ổn định và kết hợp rung tần số cao trong 5 s. Tác động đồng thời của lực ép và rung làm giảm ma sát trong, thúc đẩy tái sắp xếp hạt theo trạng thái đóng gói chặt hơn và hỗ trợ thoát khí, nhờ đó giảm rỗng hở sau tạo hình và tăng độ đặc chắc ban đầu của viên gạch. Cấu trúc đặc chắc ở giai đoạn đầu là điều kiện quan trọng để phát triển cường độ và cải thiện các chỉ tiêu liên quan đến hút nước, thấm nước trong giai đoạn dưỡng hộ.



Hình 3. Sản phẩm mẫu gạch tự chèn sử dụng đá thải mỏ và tro xi nhiệt điện.

Sau tạo hình, gạch được tháo khuôn ngay để mô phỏng công đoạn tạo hình liên tục của dây chuyền sản xuất gạch bê tông tự chèn. Việc tháo khuôn ngay là phù hợp với đặc điểm của công nghệ bê tông bán khô, trong đó hỗn hợp có hàm lượng nước thấp. Dưới tác dụng đồng thời của lực rung và lực ép, hỗn hợp đạt được cường độ đủ để duy trì hình dạng sau khi tháo khuôn. Sau đó, các mẫu được đặt dưới mái che trong 24 giờ đầu nhằm hạn chế tác động trực tiếp của ánh nắng và gió. Sau giai đoạn này, mẫu được chuyển ra bãi bảo dưỡng và phun ẩm định kỳ đến 28 ngày tuổi trước khi tiến hành các thí nghiệm theo kế hoạch (Hình 3).

2.4. Phương pháp thử nghiệm và đánh giá

2.4.1. Đánh giá tính chất cơ lý và khả năng làm việc

Sau 28 ngày đóng rắn, gạch bê tông tự chèn được thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý và độ hút nước nhằm đánh giá khả năng làm việc trong điều kiện sử dụng ngoài trời. Các chỉ tiêu được lựa chọn gồm cường độ nén, khối lượng thể tích, độ bền uốn, độ hút nước và độ mài mòn bề mặt. Nhóm chỉ tiêu này phản ánh khả năng chịu tải, mức độ đặc chắc của cấu trúc, lượng lỗ rỗng hở và khả năng duy trì chất lượng bề mặt khi chịu tác động ma sát trong quá trình khai thác.

Cường độ nén được xác định theo TCVN 6476:1999 nhằm đánh giá khả năng chịu tải của viên gạch bê tông tự chèn. Trước khi thí nghiệm, mẫu được kiểm tra kích thước hình học, khối lượng và tình trạng bề mặt. Khối lượng thể tích được xác định từ khối lượng và thể tích hình học của viên gạch, qua đó hỗ trợ đánh giá mức độ đặc chắc của vật liệu. Thí nghiệm nén được thực hiện trên máy nén với điều kiện đặt mẫu và chế độ gia tải phù hợp, hạn chế sai số do lệch tâm hoặc do bề mặt tiếp xúc không phẳng. Kết quả cường độ nén được sử dụng để so sánh giữa các cấp phối và đánh giá khả năng sử dụng của sản phẩm trong các khu vực chịu tải thấp.

Độ bền uốn được xác định nhằm đánh giá khả năng chống nứt của viên gạch khi chịu tác động uốn cục bộ. Chỉ tiêu này có ý nghĩa bổ sung cho cường độ nén, vì trong thực tế gạch lát có thể làm việc trên lớp nền hoặc lớp đệm không hoàn toàn đồng đều. Khi đó, viên gạch không chỉ chịu nén trực tiếp mà còn có thể xuất hiện ứng suất uốn tại một số vị trí tiếp xúc không đều.

Độ hút nước được xác định nhằm đánh giá mức độ rỗng hở và khả năng tích nước của hệ mao quản trong viên gạch. Giá trị độ hút nước thấp thường cho thấy cấu trúc vật liệu đặc chắc hơn, lượng lỗ rỗng hở ít hơn và khả năng hạn chế xâm nhập nước tốt hơn. Chỉ tiêu này có liên quan đến khả năng làm việc của gạch trong điều kiện mưa,

ẩm ướt và chu kỳ ướt khô ngoài trời.

Độ thấm nước được xác định như một chỉ tiêu bổ sung nhằm đánh giá mức độ liên thông của hệ lỗ rỗng và khả năng cản trở dòng nước đi qua viên gạch trong điều kiện ẩm ướt. Do gạch bê tông tự chèn chủ yếu chịu tác động của nước mưa và dòng chảy bề mặt, nghiên cứu đánh giá khả năng thấm nước thông qua tốc độ thấm bề mặt dưới áp lực thủy tĩnh thấp thay vì áp dụng phương pháp chống thấm áp lực theo TCVN 3116:1993. Phương pháp thử nghiệm tham khảo nguyên lý RILEM II.4, dựa trên sự suy giảm cột nước trong ống thử gắn kín trên bề mặt mẫu để xác định lưu lượng thấm ($L/m^2 \cdot h$).

Độ mài mòn bề mặt được xác định theo phương pháp thử mài mòn quy định trong TCVN 6065:1995. Phép thử phản ánh mức hao hụt vật liệu bề mặt dưới tác động ma sát lặp. Kết quả độ mài mòn được sử dụng để đánh giá khả năng duy trì chất lượng bề mặt của gạch khi dùng cho sân vườn, lối dạo, vỉa hè đi bộ và các khu vực chịu tải thấp.

2.4.2. Đánh giá hiệu quả môi trường và năng lượng

Nghiên cứu ứng dụng phương pháp đánh giá vòng đời sản phẩm (Life Cycle Assessment - LCA) theo chuẩn ISO 14040. Ranh giới hệ thống được thiết lập ở giới hạn “Từ nôi đến cổng nhà máy” (Cradle-to-Gate, tương đương module A1-A3), bao gồm: khai thác/chế tạo nguyên liệu đầu vào, vận chuyển đến nhà máy và năng lượng phục vụ chế tạo cấu kiện (đập nghiền, rung ép). Việc giới hạn ranh giới đến khâu xuất xưởng được lựa chọn nhằm tập trung làm nổi bật sự khác biệt về dấu chân carbon giữa việc sử dụng cốt liệu tự nhiên và chất thải công nghiệp, loại trừ các biến số nhiễu ở khâu thi công và thải bỏ cuối vòng đời. Mức tiêu hao năng lượng (MJ) và dấu chân carbon tương đương ($kgCO_2e$) của 1 viên gạch tự chèn hợp quy tiêu chuẩn được lượng hóa dựa trên bộ hệ số phát thải mặc định từ hướng dẫn kiểm kê quốc gia về khí nhà kính của IPCC (2006).

3. Kết quả và thảo luận

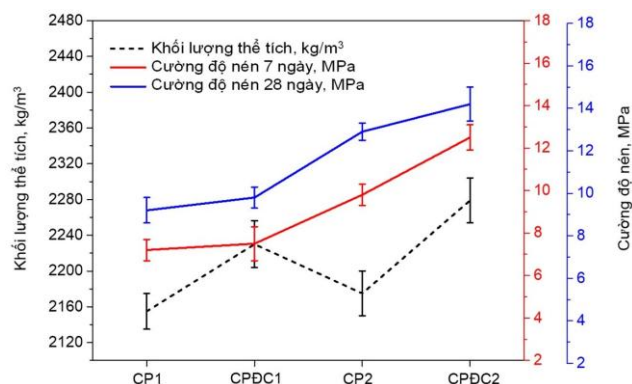
3.1. Đặc tính vật lý và sự phát triển cường độ chịu nén

Trong thiết kế gạch tự chèn, khối lượng thể tích và cường độ chịu nén là hai thông số nền tảng, lần lượt chi phối trọng lượng của cấu kiện và khả năng chịu tải tĩnh trong khai thác. Hình 4 thể hiện kết quả thí nghiệm ở tuổi 7 ngày và 28 ngày.

Về đặc tính vật lý, việc sử dụng cốt liệu thải (đá thải mỏ kết hợp tro xỉ) làm giảm khối lượng thể tích của gạch tự chèn so với đối chứng dùng đá hạt tự nhiên. Cụ thể, CP1 thấp hơn CPĐC1 khoảng 3,6 %, và CP2 thấp hơn CPĐC2 khoảng 4,4 %. Xu thế này phù hợp với đặc trưng khối lượng thể tích xốp của cốt liệu thải thấp hơn so với đá hạt tự nhiên, phản ánh mức độ rỗng nội tại và hiệu ứng đóng gói hạt sau rung ép.

Về cường độ chịu nén, các cấp phối dùng cốt liệu phế thải vẫn đạt mức cường độ phù hợp với mức thiết kế tại 28 ngày, nhưng thấp hơn so với đối chứng ở cùng mức. Ở mức M10, CP2 đạt 12,9 MPa tại

28 ngày, thấp hơn khoảng 9,2 % so với CPĐC2. Chênh lệch này có thể liên quan đến độ đặc chắc và cường độ gốc của cốt liệu tự nhiên cao hơn. Ngoài ra, theo lý thuyết về vi cấu trúc bê tông [8], chất lượng của vùng chuyển tiếp hồ xi măng–cốt liệu có thể ảnh hưởng đến sự phát triển cường độ chịu nén của vật liệu. Tuy nhiên, nhận định này mới dừng ở mức giả thuyết do chưa có bằng chứng vi cấu trúc trực tiếp từ nghiên cứu hiện tại. Bên cạnh đó, mẫu được dưỡng hộ trong điều kiện phòng thí nghiệm và chưa tái hiện đầy đủ điều kiện kiểm soát độ ẩm của dây chuyền sản xuất công nghiệp. Sự thất thoát ẩm trong giai đoạn đầu, nếu xảy ra, có thể ảnh hưởng đến quá trình thủy hóa của xi măng và góp phần làm hạn chế sự phát triển cường độ chịu nén. Đây là những yếu tố chưa được lượng hóa trong nghiên cứu và cần được xem xét khi diễn giải kết quả cường độ của các cấp phối sử dụng cốt liệu phế thải.



Hình 4. Kết quả thực nghiệm khối lượng thể tích và cường độ nén.

Điểm đáng chú ý là sự phát triển cường độ của cấp phối dùng đá thải mỏ ở mức M10. CP2 tăng từ 9,8 MPa (7 ngày) lên 12,9 MPa (28 ngày), tương đương tăng 31,6 %, trong khi đối chứng CPĐC2 tăng từ 12,5 lên 14,2 MPa, tương đương tăng 13,6 %. Mức tăng muộn cao hơn của CP2 nhất quán với cơ chế hoạt tính puzolan của phần pha mịn giàu SiO_2 và Al_2O_3 trong tro bay và một phần xỉ đáy. Theo kết quả thành phần hóa học vật liệu của nghiên cứu, tổng ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) của tro xỉ đạt khoảng 81,5 %, là nền thành phần thuận lợi cho phản ứng thứ cấp với $Ca(OH)_2$ sinh ra trong thủy hóa xi măng để hình thành thêm gel C–S–H ở tuổi muộn, góp phần làm đặc chắc vùng chuyển tiếp và giảm rỗng mao quản hiệu dụng [8], [9].

3.2. Khả năng chống thấm và độ bền môi trường ngoài trời

Gạch tự chèn làm việc ngoài trời thường chịu tác động của mưa, nắng và sự thay đổi trạng thái ẩm khô. Vì vậy, độ hút nước và độ thấm nước được sử dụng như hai chỉ tiêu bổ sung để đánh giá ban đầu khả năng làm việc của vật liệu trong môi trường ẩm ướt. Độ hút nước phản ánh khả năng tích nước của hệ mao quản hở, còn độ thấm nước phản ánh mức độ liên thông của các đường dẫn nước theo phương thấm. Kết quả thí nghiệm ở tuổi 28 ngày được trình bày tại Bảng 4.

Bảng 4. Đặc tính chống thấm của vật liệu ở tuổi 28 ngày.

Ký hiệu	Tỷ lệ xi măng (%)	Độ hút nước (%)	Độ thấm nước (L/m ² h)
CP1	12,3	10,8 ± 0,3	15,3 ± 0,5
CPĐC1	12,3	9,2 ± 0,4	14,2 ± 0,4
CP2	13,8	9,9 ± 0,3	14,8 ± 0,3
CPĐC2	13,8	8,6 ± 0,3	13,5 ± 0,4

Kết quả cho thấy độ hút nước của các cấp phối dao động từ 8,6 đến 10,8 %, trong khi độ thấm nước dao động từ 13,5 đến 15,3 L/m²h. Các giá trị này nằm trong cùng một khoảng biến thiên tương đối gần, nhưng vẫn thể hiện rõ ảnh hưởng của nguồn cốt liệu và hàm lượng xi măng. Khi so sánh theo cùng hàm lượng xi măng, các cấp phối sử dụng đá thải mỏ kết hợp tro xỉ có độ hút nước và độ thấm nước cao hơn so với cấp phối đối chứng dùng đá hạt mịn. Ở hàm lượng xi măng 12,3 %, độ hút nước của CP1 cao hơn CPĐC1 khoảng 17,4 %, còn độ thấm nước cao hơn khoảng 7,7 %. Ở hàm lượng xi măng 13,8 %, độ hút nước của CP2 cao hơn CPĐC2 khoảng 15,1 %, còn độ thấm nước cao hơn khoảng 9,6 %. Xu hướng trên cho thấy việc sử dụng đá thải mỏ kết hợp tro xỉ làm cốt liệu mịn có thể làm tăng một phần lỗ rỗng hở và mức độ liên thông của hệ lỗ rỗng trong viên gạch. Nguyên nhân có thể liên quan đến cấu trúc rỗng nội tại của xi đáy, hình dạng hạt không đều và khả năng hút nước cao hơn của một số thành phần tro xỉ so với cốt liệu thông thường. Khi mức độ đầm chặt, phân bố hạt và khả năng bọc hạt của hồ xi măng chưa đủ tốt, nước dễ tích tụ và dịch chuyển qua các lỗ rỗng liên thông hơn. Nhận định này phù hợp với đặc trưng của tro xỉ khi được sử dụng trong vai trò cốt liệu mịn [10].

Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng thể hiện theo hướng cải thiện khả năng cản trở dòng thấm trong cùng nhóm vật liệu. Khi tăng xi măng từ 12,3 % ở CP1 lên 13,8 % ở CP2, độ hút nước giảm từ 10,8 xuống 9,9 %, tương ứng giảm khoảng 8,3 %. Độ thấm nước giảm từ 15,3 xuống 14,8 L/m²h, tương ứng giảm khoảng 3,3 %. Với nhóm đối chứng, độ hút nước giảm từ 9,2 xuống 8,6 %, còn độ thấm nước giảm từ 14,2 xuống 13,5 L/m²h. Kết quả này cho thấy tăng hàm lượng xi măng giúp cải thiện độ đặc chắc của cấu trúc, nhưng mức cải thiện về độ thấm nước chưa lớn. Cơ chế hợp lý là lượng chất kết dính tăng làm tăng sản phẩm thủy hóa, cải thiện pha hồ xi măng và vùng tiếp giáp giữa hồ xi măng với hạt cốt liệu, qua đó làm giảm một phần độ rỗng mao quản và tính liên thông của hệ lỗ rỗng [11].

Về cơ chế vi cấu trúc, tro xỉ trong nghiên cứu có lượng hạt lọt sàng 0,14 mm đạt 17,14 %, đóng góp đáng kể vào hiệu ứng vi cốt liệu thông qua lấp đầy các khoảng rỗng giữa các hạt cốt liệu lớn hơn. Khi kết hợp với sản phẩm thủy hóa của xi măng, pha hạt mịn này vừa hỗ trợ đóng gói hạt theo hướng giảm rỗng hở, vừa có thể tham gia phản ứng pozolanic ở tuổi muộn, góp phần tinh chỉnh hệ lỗ rỗng và giảm tính liên thông mao quản, từ đó cải thiện khả năng cản trở dòng thấm [9].

3.3. Đặc tính chịu tải trọng và kháng mòn bề mặt

Để đánh giá khả năng làm việc của gạch tự chèn trong điều kiện sử dụng thực tế, cấp phối CP2 được lựa chọn để chế tạo viên gạch hoàn chỉnh và thí nghiệm hai chỉ tiêu bổ sung gồm độ bền uốn và độ mài mòn bề mặt. Trong quá trình khai thác, gạch lát không chỉ chịu nén trực tiếp từ tải trọng sử dụng, mà còn có thể chịu uốn cục bộ khi lớp nền hoặc lớp đệm phía dưới không đồng đều. Bề mặt viên gạch cũng chịu tác động ma sát lặp do bước chân, cát bụi và quá trình sử dụng ngoài trời. Vì vậy, hai chỉ tiêu này có ý nghĩa trong đánh giá khả năng chống nứt và duy trì chất lượng bề mặt của sản phẩm.

Kết quả thí nghiệm cho thấy gạch CP2 đạt độ mài mòn 0,31 g/cm², thấp hơn giới hạn 0,40 g/cm² được sử dụng làm cơ sở đánh giá trong nghiên cứu. Giá trị này cho thấy bề mặt viên gạch có khả năng kháng mòn phù hợp với các khu vực chịu tải thấp như sân vườn, lối dạo và khu vực đi bộ. Khả năng kháng mòn có thể liên quan đến mức độ đặc chắc của nền xi măng và đặc điểm bề mặt của cốt liệu đá thải sau nghiền. Các hạt cốt liệu có bề mặt thô nhám và góc cạnh thường tạo liên kết cơ học tốt hơn với hồ xi măng, từ đó hạn chế sự tách rời hạt trên bề mặt khi chịu ma sát lặp [8].

Về độ bền uốn, gạch CP2 đạt cường độ 5,92 MPa, cao hơn mức yêu cầu tối thiểu 5,0 MPa khoảng 18,4 %. Kết quả này cho thấy viên gạch có khả năng chống nứt do uốn cục bộ trong phạm vi điều kiện thí nghiệm. Cơ chế hợp lý là cốt liệu đá thải sau đập nghiền có hình thái góc cạnh, giúp tăng hiệu ứng khóa cài trong khung hạt và hỗ trợ truyền lực qua cấu trúc vật liệu. Nhờ đó, sự phát triển vết nứt trong vùng chịu kéo uốn có thể bị hạn chế ở một mức độ nhất định [12].

4. Đánh giá hiệu quả kinh tế và môi trường

Trong các dự án hạ tầng đô thị, khối lượng sử dụng gạch tự chèn là rất lớn, nên việc lựa chọn và phát triển vật liệu cần được nhìn như một bài toán chuỗi cung ứng, không chỉ là bài toán cơ lý. Báo cáo rà soát vật liệu xây dựng của tỉnh Quảng Ninh ghi nhận giá một số vật liệu (cát, đá, gạch) biến động tăng khoảng 10–30 % và có hiện tượng thiếu hụt cục bộ ở các dự án cần tiến độ nhanh, tạo áp lực trực tiếp lên chi phí và quản trị rủi ro trượt giá của nhà thầu.

4.1. Hiệu quả kinh tế chuỗi cung ứng vật liệu

Để lượng hóa hiệu quả kinh tế, nghiên cứu bóc tách chi phí nguyên vật liệu trực tiếp cấu thành 1 m³ gạch (Bảng 5). Đơn giá sử dụng là đơn giá thực tế tại khu vực Quảng Ninh được thu thập tại thời điểm thực hiện nghiên cứu (xi măng PCB30: 1.120.000 đ/tấn; cốt liệu tự nhiên: 100.000 đ/tấn; đá thải mỏ: 60.000 đ/tấn; tro xỉ: 40.000 đ/tấn). Phạm vi chi phí chỉ xét cấu phần vật liệu, chưa bao gồm nhân công, khấu hao thiết bị, chi phí quản lý và các chi phí gián tiếp khác.

Bảng 5. So sánh chi phí vật liệu trực tiếp cho 1 m³ gạch.

Ký hiệu	Mác thiết kế	Chi phí vật liệu (VNĐ/m ³)	Tỷ lệ giảm giá thành (%)
CPĐC1	M7,5	450.700	-
CP1	M7,5	344.100	23,65
CPĐC2	M10	496.200	-
CP2	M10	392.900	20,82

Kết quả đối sánh trong phạm vi chi phí vật liệu trực tiếp cho thấy phương án sử dụng 100 % hệ cốt liệu phế thải giúp giảm 20,82 % đến 23,65 % chi phí vật liệu đầu vào so với phương án dùng cốt liệu tự nhiên. Mức chênh lệch này phản ánh khác biệt cấu trúc chi phí của chuỗi cung ứng. Cốt liệu tự nhiên thường gắn với chi phí khai thác và chế biến tại mỏ, cùng các nghĩa vụ tài chính liên quan đến tài nguyên và môi trường. Ngược lại, đá thải mỏ và tro xỉ nhiệt điện là vật liệu thứ cấp, nên chi phí tập trung chủ yếu vào xúc bốc, vận chuyển cự ly ngắn và gia công cơ học đến cỡ hạt yêu cầu.

Trong bối cảnh thị trường vật liệu xây dựng có biến động giá và xuất hiện thiếu hụt cục bộ ở một số nhóm vật liệu, việc tổ chức nguồn cốt liệu thứ cấp tại chỗ có thể cải thiện mức độ chủ động về cung ứng cho nhà thầu, qua đó giảm rủi ro trượt giá và rủi ro gián đoạn tiến độ do đứt gãy nguồn vật liệu. Luận điểm này phù hợp với ghi nhận về biến động giá vật liệu và thiếu hụt cục bộ được nêu trong báo cáo triển khai thực hiện Công điện 85/CD-TTg.

4.2. Lượng hóa dấu chân carbon

Tính bền vững của cấu kiện được đánh giá thông qua phương pháp LCA. Căn cứ theo ranh giới hệ thống “Từ nôi đến cổng nhà máy” (Cradle-to-Gate, tương đương module A1-A3 theo chuẩn ISO 14040) đã thiết lập, nghiên cứu bỏ qua các biến số thi công và tập trung lượng hóa sự khác biệt năng lượng ở chuỗi cung ứng. Hệ số phát thải được áp dụng theo Hướng dẫn kiểm kê quốc gia về Khí nhà kính của IPCC (2006). Bảng 6 thể hiện kết quả lượng hóa năng lượng tiêu hao và phát thải nhà kính.

Bảng 6. Lượng hóa năng lượng tiêu hao và phát thải khí nhà kính.

Cấp phối	Năng lượng tiêu hao (MJ/viên)	Mức giảm năng lượng (%)	CO ₂ phát thải (kgCO ₂ e/viên)	Mức giảm phát thải (%)
CPĐC1	1,134	-	0,264	-
CP1	1,098	3,2	0,258	2,3
CPĐC2	1,330	-	0,308	-
CP2	1,286	3,3	0,300	2,6

Kết quả trong Bảng 6 cho thấy tổng năng lượng tiêu hao của cấp phối CP1 và CP2 thấp hơn từ 3,2 % đến 3,3 % so với các cấp phối đối chứng tương ứng. Tương tự, lượng phát thải khí nhà kính giảm từ 2,3 % đến 2,6 % CO₂e trên mỗi viên gạch. Trong phạm vi đánh giá

của nghiên cứu, việc thay thế cốt liệu tự nhiên bằng đá thải mỏ cho thấy tiềm năng giảm năng lượng tiêu hao và phát thải khí nhà kính. Tuy nhiên, một hạn chế của nghiên cứu là chưa lượng hóa riêng năng lượng tiêu hao và phát thải phát sinh từ các công đoạn đập nghiền, sàng và gia công đá thải trước khi sử dụng làm cốt liệu. Do đó, các kết quả trong Bảng 6 phản ánh phạm vi đánh giá được xem xét trong nghiên cứu và chưa bao quát toàn bộ chuỗi xử lý của vật liệu phế thải. Việc mở rộng ranh giới đánh giá để tích hợp các công đoạn này là cần thiết nhằm đánh giá đầy đủ hơn hiệu quả năng lượng và tác động môi trường của giải pháp sử dụng đá thải mỏ trong sản xuất gạch bê tông tự chèn.

Nếu chiếu theo quy mô của một trạm trộn/nhà máy sản xuất cấu kiện đúc sẵn công suất trung bình 60 triệu viên/năm, việc áp dụng cấp phối đá thải CP2 sẽ giúp cắt giảm trực tiếp khoảng 480.000 kg CO₂e mỗi năm (tương đương gần 500 tấn CO₂). Lợi ích môi trường này mang lại tác động kép: (1) Trực tiếp tiêu thụ hàng triệu khối đá thải mỏ và tro xỉ, góp phần hạ thấp độ cao các bãi thải, giảm rủi ro sạt lở và ô nhiễm nguồn nước ngầm tại khu vực khai khoáng; (2) Đóng góp thiết thực vào hạn ngạch tín chỉ carbon, hỗ trợ ngành xây dựng hiện thực hóa chương trình hành động chuyển đổi năng lượng xanh và net-zero 2050.

Việc thay thế hoàn toàn cốt liệu tự nhiên bằng hệ cốt liệu phế thải giúp nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và góp phần giảm áp lực xử lý chất thải. Tuy nhiên, mức giảm phát thải khí nhà kính của sản phẩm chỉ đạt 2,6 %. Kết quả phân tích LCA cho thấy sản xuất xi măng là nguồn phát thải chi phối, đóng góp hơn 85 % tổng lượng phát thải CO₂e của viên gạch, trong khi hàm lượng xi măng được giữ nguyên trong tất cả các cấp phối. Do đó, việc thay thế cốt liệu chủ yếu làm giảm phát thải từ các công đoạn khai thác, chế biến và vận chuyển cốt liệu, nhưng chưa đủ để tạo ra sự thay đổi đáng kể đối với tổng dấu chân carbon của sản phẩm.

Các hệ chất kết dính hoạt hóa kiềm hoặc geopolimer đã được chứng minh là có tiềm năng giảm phát thải CO₂e cao hơn nhờ giảm hoặc thay thế hoàn toàn xi măng Portland. Tuy nhiên, nghiên cứu này vẫn sử dụng xi măng PCB30 nhằm đảm bảo tính khả thi trong điều kiện sản xuất gạch bê tông tự chèn hiện nay và duy trì khả năng áp dụng trên dây chuyền ép rung sẵn có. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc đánh giá khả năng thay thế một phần hoặc toàn bộ xi măng bằng các hệ chất kết dính phát thải carbon thấp để tiếp tục giảm dấu chân carbon và hướng tới phát triển vật liệu xây dựng phát thải thấp.

5. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và đánh giá vòng đời về việc sử dụng đá thải mỏ than kết hợp tro xỉ nhiệt điện trong sản xuất gạch bê tông tự chèn, nghiên cứu rút ra một số kết luận chính như sau:

(1) Đá thải mỏ than Quảng Ninh sau đập nghiền và sàng đến kích thước nhỏ hơn 5 mm có thể được phối hợp với tro xỉ nhiệt điện để thay thế cốt liệu mịn thông thường trong toàn bộ cấp phối viên

gạch. Hướng sử dụng này giúp mở rộng khả năng tái chế vật liệu thứ cấp tại địa phương, giảm nhu cầu sử dụng cốt liệu tự nhiên và tạo cơ sở cho sản xuất vật liệu xây dựng theo hướng kinh tế tuần hoàn.

(2) Cấp phối CP2 gồm 13,8 % xi măng PCB30, 38,8 % đá thải mỏ than và 47,4 % tro xỉ nhiệt điện cho kết quả tốt nhất trong phạm vi các cấp phối khảo sát. Ở tuổi 28 ngày, mẫu đạt cường độ nén 12,9 MPa, độ hút nước 9,9 % và độ thấm nước 14,8 L/m²·h. So với cấp phối có hàm lượng xi măng thấp hơn, việc tăng hàm lượng xi măng giúp cải thiện độ đặc chắc của cấu trúc và làm giảm các chỉ tiêu liên quan đến hút nước và thấm nước.

(3) Gạch tự chèn chế tạo từ cấp phối CP2 đạt độ bền uốn 5,92 MPa và độ mài mòn bề mặt 0,31 g/cm². Các kết quả này cho thấy sản phẩm có khả năng chống nứt do uốn cục bộ và kháng mòn bề mặt trong phạm vi điều kiện thí nghiệm. Tuy nhiên, do cường độ nén 28 ngày còn thấp hơn ngưỡng mức thấp nhất theo TCVN 6476:1999, sản phẩm nên được định hướng trước mắt cho các khu vực chịu tải thấp như sân vườn, lối dạo cảnh quan và khu vực đi bộ nhẹ. Cần tiếp tục cải thiện cường độ nén nếu sản phẩm hướng tới ứng dụng theo đầy đủ yêu cầu kỹ thuật của gạch bê tông tự chèn.

(4) Phân tích kinh tế và môi trường cho thấy cấp phối đề xuất giúp giảm 20,82 % chi phí vật liệu đầu vào, giảm 3,3 % năng lượng tiêu hao và giảm 2,6 % phát thải CO₂ tương đương trên mỗi đơn vị sản phẩm so với phương án sử dụng cốt liệu thông thường. Mức giảm phát thải chưa lớn, nhưng có ý nghĩa thực tiễn trong bối cảnh tận dụng nguồn đá thải mỏ và tro xỉ nhiệt điện sẵn có tại Quảng Ninh.

(5) Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở ban đầu cho việc tái sử dụng đá thải mỏ than và tro xỉ nhiệt điện trong sản xuất gạch bê tông tự chèn. Để mở rộng phạm vi ứng dụng, cần tiếp tục nghiên cứu tối ưu thành phần hạt, kiểm soát độ ẩm và độ rỗng của tro xỉ, nâng cao mức độ đầm chặt khi tạo hình, đồng thời bổ sung các thí nghiệm dài hạn như chu kỳ ướt khô, lão hóa ngoài trời, suy giảm cường độ sau ngâm nước và thử nghiệm hiện trường.

Tài liệu tham khảo

- [1]. VietnamPlus, "PM Pham Minh Chinh's remarks at COP26," VietnamPlus. Accessed: Mar. 12, 2026. [Online]. Available: <https://en.vietnamplus.vn/pm-pham-minh-chinh-s-remarks-at-cop26-post211755.vnp>
- [2]. Sở Xây dựng tỉnh Quảng Ninh, "Báo cáo về việc rà soát, đánh giá và đề xuất giải pháp đáp ứng nhu cầu sử dụng một số loại vật liệu xây dựng và tình hình triển khai thực hiện Công điện số 85/CD-TTg ngày 10/6/2025 của Thủ tướng Chính phủ," Sở Xây dựng tỉnh Quảng Ninh, 4000/BC-SXD, 2025.
- [3]. Quyết định số 687/QĐ-TTg phê duyệt Đề án phát triển kinh tế tuần hoàn ở Việt Nam. 2022.
- [4]. Quyết định số 452/QĐ-TTg phê duyệt Đề án đẩy mạnh xử lý, sử dụng tro, xỉ, thạch cao của các nhà máy nhiệt điện, nhà máy hóa chất, phân bón làm nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng và trong các công trình xây dựng. 2017.
- [5]. D. T. Pham, V. M. Nguyen, H. M. Le, and M. H. Nguyen, "Development and multi-objective optimization of unfired bricks using coal waste and power plant slag as sand replacements," *Construction and Building Materials*, vol. 492, p. 142831, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142831.

- [6]. H. H. Thang and V. T. Hung, "From Waste Dump to Unburned Bricks: Production Process of Unburned Bricks Using Coal Mine Waste," *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, p. 867, 2025.
- [7]. I. O. for Standardization, *Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework*. ISO, 2006.
- [8]. P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing, 2006.
- [9]. ACI Committee 232, "Report on the Use of Fly Ash in Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, ACI 232R-03, 2003.
- [10]. M. Singh and R. Siddique, "Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate," *Journal of Cleaner Production*, vol. 91, pp. 269–278, 2015.
- [11]. P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste," *Cement and concrete composites*, vol. 27, no. 4, pp. 425–428, 2005.
- [12]. ASTM C936/C936M-24, *Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units* - Google Search, West Conshohocken, PA.