

Nghiên cứu sử dụng bùn đỏ đuôi quặng Tân Rai làm cốt liệu nhỏ để chế tạo gạch bê tông tự chèn cho hạ tầng đô thị

Nguyễn Thị Thu Thủy^{1*}, Nguyễn Công Hậu¹

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

TỪ KHOẢ

Bùn đỏ đuôi quặng
Gạch bê tông tự chèn
Cốt liệu nhỏ
Tính công tác
Tính chất cơ học

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu sử dụng bùn đỏ đuôi quặng (bùn đỏ) Tân Rai (Lâm Đồng) làm cốt liệu nhỏ thay thế một phần cát tự nhiên và sử dụng hàm lượng lớn các nguyên vật liệu phía Nam để chế tạo gạch bê tông tự chèn trong xây dựng cơ sở hạ tầng, loại bê tông này có thể đạt cường độ chịu nén 28 ngày cao hơn 40MPa. Bốn cấp phối bê tông với hàm lượng bùn đỏ lần lượt là 0%, 10%, 20%, 30% theo khối lượng được thiết kế và đánh giá tính công tác, tính cơ lý của bê tông. Kết quả cho thấy khi hàm lượng bùn đỏ tăng từ 0% đến 30%, cường độ chịu nén tại 28 ngày giảm từ 52 MPa xuống 17 MPa; cường độ chịu kéo khi uốn giảm từ 4,53 MPa xuống 2,38 MPa; trong khi độ hút nước và độ mài mòn tăng tương ứng từ 3,52% lên 13,57% và từ 0,35 lên 1,10 g/cm². Trong số các cấp phối khảo sát, bê tông sử dụng 10% bùn đỏ đáp ứng tốt các yêu cầu về độ linh động và tính chất cơ lý theo TCVN 6476:1999 của gạch bê tông tự chèn, trong khi các cấp phối chứa 20% và 30% bùn đỏ không thỏa mãn các chỉ tiêu kỹ thuật. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất hàm lượng bùn đỏ thay thế cát tự nhiên ở mức 10% là tối ưu, đảm bảo đồng thời các yêu cầu về tính công tác, cường độ, độ hút nước, độ mài mòn và hiệu quả kinh tế.

KEYWORDS

Red mud tailings
Interlocking concrete bricks
Fine aggregate
Workability
Mechanical properties

ABSTRACT

The paper presents the results of an investigation on the use of Tân Rai (Lam Dong) bauxite residue tailings (red mud) as a fine aggregate to partially replace natural sand, together with the utilization of a high proportion of locally available materials from southern Vietnam, for the production of interlocking concrete paving blocks for infrastructure construction, in which the concrete can achieve a 28 day compressive strength exceeding 40 MPa. Four concrete mixtures with red mud contents of 0%, 10%, 20%, and 30% by mass were designed and evaluated in terms of workability and physico mechanical properties. The results show that as the red mud content increases from 0% to 30%, the 28 day compressive strength decreases from 52 MPa to 17 MPa, the flexural tensile strength decreases from 4.53 MPa to 2.38 MPa, while water absorption and abrasion loss increase correspondingly from 3.52% to 13.57% and from 0.35 to 1.10 g/cm². Among the investigated mixtures, the concrete containing 10% red mud satisfactorily meets the requirements for workability and physico mechanical properties in accordance with TCVN 6476:1999 for interlocking concrete bricks, whereas the mixtures with 20% and 30% red mud fail to satisfy the technical criteria. On this basis, the study proposes an optimal red mud replacement level of 10% for natural sand, ensuring a balanced performance in terms of workability, strength, water absorption, abrasion resistance, and economic efficiency.

1. Đặt vấn đề

Trong ngành công nghiệp sản xuất nhôm toàn cầu, bùn đỏ là chất thải rắn phát sinh từ quá trình hòa tách quặng bô xít. Thống kê cho thấy, để sản xuất được 1 tấn nhôm, quá trình này thải ra từ 0,8 đến 1,5 tấn bùn đỏ. Với sản lượng nhôm ngày càng tăng, lượng bùn đỏ phát sinh hàng năm trên thế giới ước tính khoảng 150 triệu tấn, đưa tổng trữ lượng tích lũy tính đến nay lên hơn 4,6 tỷ tấn. Việt Nam là nước có nguồn tài nguyên quặng bô xít được xếp thứ ba trên thế giới chỉ sau Guinea và Australia (tập trung chủ yếu tại khu vực Tây Nguyên), do đó áp lực về quản lý chất thải công nghiệp đang trở nên cấp thiết.

Hiện nay, hai nhà máy nhôm Nhân Cơ và Tân Rai thuộc tỉnh Lâm Đồng phát thải khoảng 1,2 triệu tấn bùn đỏ khô mỗi năm. Riêng tại dự án Tân Rai, khối lượng bùn thải và bã thải phát sinh hàng năm lên tới trên 650 nghìn tấn, gây áp lực lớn lên dung tích các hồ chứa và tiềm ẩn rủi ro mất an toàn đập thải [1,2].

Trong khai thác quặng bô xít và sản xuất nhôm tồn tại hai loại bùn màu đỏ thường chưa được phân biệt rõ. Loại thứ nhất phát sinh trong quá trình tuyển rửa quặng bô xít nguyên khai bằng nước để thu quặng tinh; loại bùn này có màu đỏ do giàu oxit sắt và được gọi là bùn đỏ đuôi quặng. Đây là loại chất thải có sản lượng lớn nhất trong toàn bộ quy trình, chiếm khoảng 40% - 50% khối lượng quặng nguyên khai;

*Liên hệ tác giả: thuyntt_ph@utc.edu.vn

Nhận ngày 09/01/2026, sửa xong ngày 26/01/2026, chấp nhận đăng ngày 27/01/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1218>

tại các tổ hợp bô xít Tây Nguyên, lượng bùn này phát sinh ước tính khoảng 1,5 đến 2 triệu m³/năm cho mỗi nhà máy [3]. Nghiên cứu này sử dụng bùn đỏ đuôi quặng, loại này không được coi là chất độc hại cao nhưng do kích thước mịn nên là nguồn phát tán bụi. Loại thứ hai là bùn đỏ (red mud) sinh ra trong quá trình sản xuất alumin theo công nghệ Bayer. Loại bùn này có sản lượng ít hơn so với bùn đỏ đuôi quặng nhưng vẫn rất đáng kể, với định mức phát sinh khoảng 1,2 đến 1,5 tấn bùn khô trên mỗi tấn alumin thành phẩm, tương đương tổng khối lượng khoảng 1,6 đến 2 triệu tấn mỗi năm trên toàn hệ thống [4]. Do quy trình Bayer sử dụng xút (NaOH), nên bùn đỏ có tính kiềm rất cao và được xếp vào nhóm chất thải công nghiệp nguy hại; điển hình bùn đỏ tại Nhà máy Ajka Timföldgyár (Hungary) có độ pH lên tới 13 và chứa hàm lượng các oxit kim loại, nguyên tố phóng xạ dạng vết có khả năng gây ô nhiễm nghiêm trọng nguồn nước mặt, nước ngầm và thoái hóa đất. Các thảm họa môi trường do vỡ đập hồ chứa bùn đỏ tại Hungary (2010) hay các sự cố liên quan đến đập thải bô xít trong giai đoạn 2021-2022 đã minh chứng cho những hệ lụy khôn lường đối với hệ sinh thái và sức khỏe con người. Ngoài ra, việc lưu trữ bùn đỏ trong các hồ chứa không chỉ tiêu tốn diện tích đất lớn mà còn đòi hỏi chi phí quản lý, vận hành đắt đỏ, chiếm khoảng 2 % giá thành sản xuất nhôm (Hình 1). Do đó, việc nghiên cứu các giải pháp chuyển hóa bùn đỏ thành nguồn tài nguyên thứ cấp, đặc biệt là trong lĩnh vực vật liệu xây dựng là chìa khóa để thúc đẩy mô hình kinh tế tuần hoàn và giảm thiểu ô nhiễm môi trường [7,9].



Hình 1. Bùn đỏ thải ra hồ gây ô nhiễm [8].

Bên cạnh việc thách thức về phế thải công nghiệp, ngành xây dựng đang đối mặt với tình trạng khan hiếm tài nguyên cát tự nhiên nghiêm trọng. Nhu cầu cát xây dựng tại Việt Nam đạt khoảng 120-130 triệu m³/năm, tuy nhiên nguồn cung hợp pháp hiện nay chỉ đáp ứng được 40-50 % nhu cầu thực tế. Sự thiếu hụt này thúc đẩy xu hướng sử dụng cát nhân tạo từ phế thải khai thác khoáng sản như một giải pháp thay thế tất yếu. Bùn đỏ đuôi quặng Tân Rai sau khi được xử lý có đặc điểm của cát mịn với mô đun độ lớn dao động từ 0,7 đến 2,0. Nghiên cứu thực nghiệm cho thấy việc thay thế một phần cát tự nhiên bằng bùn đỏ có thể tăng cường độ nhờ hiệu ứng "nêm chặt" các lỗ rỗng gel và sự tham gia của các thành phần hoạt tính như SiO₂ trong bùn đỏ vào quá trình hình thành khoáng kết dính [3,5].

Mặt khác, các vỉa hè đường phố của khu đô thị lát bằng các loại gạch bê tông tự chèn đã được sử dụng nhiều ở châu Âu, châu Mỹ, mang

lại những thuận lợi đáng kể trong xây dựng. Ở Việt Nam, gạch bê tông có nhu cầu nhiều, đặc biệt là đối với các thành phố lớn [5]. Về mặt thẩm mỹ, bùn đỏ chứa hàm lượng oxit sắt rất cao, chiếm từ 30-60 % khối lượng, đóng vai trò như một loại bột màu vô cơ tự nhiên giúp gạch có màu sắc đặc trưng, bền màu và giảm chi phí sử dụng màu công nghiệp. Vì vậy, nghiên cứu thực nghiệm này không chỉ mang ý nghĩa khoa học trong việc tìm hiểu ảnh hưởng của bùn đỏ trong hệ bê tông xi măng mà còn cung cấp giải pháp thực tiễn cho việc phát triển vật liệu xanh và quản lý chất thải bền vững (Hình 2) [6].



Hình 2. Một số hướng xử lý bùn đỏ [8].

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên vật liệu

Nguyên vật liệu đầu vào được sử dụng để nghiên cứu được tóm tắt trong Bảng 1 [11].

2.2. Nguyên liệu bùn đỏ đuôi quặng

Hiện nay ở Việt Nam chưa có tiêu chuẩn riêng cho bùn đỏ, các tính chất của bùn đỏ như khối lượng riêng, độ mịn, độ ẩm, độ pH, Mô đun độ lớn, ... được xác định theo các tiêu chuẩn TCVN tương ứng đang áp dụng cho các vật liệu vô cơ.

- Kích thước hạt: bùn đỏ đuôi quặng thường có kích thước rất mịn, kích thước hạt trong khoảng 3,41 – 51,47 μm.
- Bùn đỏ đuôi quặng thử nghiệm có thành phần hóa như sau: Fe₂O₃: 43,10 %, Al₂O₃: 31,63 %, SiO₂: 14,69 %, Na₂O: 0,09 %, MgO: 0,15 %, Mn₂O₃: 0,08 %, P₂O₅: 0,10 %, K₂O: 0,05 %, SO₃: 0,18 % và TiO₂: 6,81 %; giá trị mất khi nung (MKN): 2,28 %.
- Thành phần khoáng có các khoáng chính sau: gibbsite Al₂O₃.3H₂O, Geothite FeO(OH), hematite Fe₂O₃, quartz SiO₂. Đặc biệt, bùn đỏ đuôi quặng chứa opal vô định hình SiO₂.nH₂O (với n từ 10 – 300).
- Độ hút vôi: độ hoạt tính của bùn đỏ thông qua độ hút vôi, độ hút vôi của bùn đỏ khoảng 89,60 mg CaO/1g bùn đỏ, cho thấy bùn đỏ có hoạt tính trung bình (theo phương pháp đo độ hút vôi TCVN 3735-1982) [12].

Bùn đỏ có thể được sử dụng làm cốt liệu mịn thay thế một phần cát tự nhiên nhờ các cơ sở sau. Về sự tương đồng đặc tính vật lý: bùn đỏ có các hạt nhám, góc cạnh và giàu oxit sắt (Fe₂O₃) với tỷ trọng cao khoảng 2,95 g/cm³ giúp tăng liên kết cơ học và độ đặc chắc của bê tông

hơn so với cát tự nhiên có tỷ trọng khoảng 2,6 g/cm³ với có bề mặt trơn nhẵn. Về hiệu ứng lấp đầy vi mô của bùn đỏ: nhờ kích thước hạt mịn hơn cát, đóng vai trò chất lấp đầy; bùn đỏ và cát giúp tạo ra dải cấp phối hạt liên tục, tối ưu hóa thành phần hạt, giúp giảm độ rỗng, tăng cường độ nén và giảm thấm nước cho bê tông. Về khả năng hoạt tính hóa học: thể hiện ở thành phần oxit SiO₂, Al₂O₃ và Fe₂O₃, có thể tham gia phản ứng pozzolanic nhẹ với Ca(OH)₂ sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng, cải thiện gel C-S-H và C-A-H; do bề mặt hạt bùn đỏ nhám và có tính kiềm nhẹ, vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu và hồ xi măng thường đặc chắc và ít nứt vỡ hơn so với cát thông thường. Về độ bền lâu dài: nhờ cấu trúc đặc chắc hơn do hiệu ứng lấp đầy, cấp phối tối ưu (10–30 % thay thế cát bởi bùn đỏ) giúp nâng cao khả năng chống xâm thực ion Clo và ion Sunfat, giúp kiểm soát độ co ngót khô của bê tông [8,9,10].



Hình 3. Quặng bô xít dạng rời và mẫu bùn đỏ đuôi quặng thí nghiệm.

2.3. Tỷ lệ phối trộn

Nghiên cứu này thiết kế thành phần bê tông xi măng với bùn đỏ làm Gạch bê tông tự chèn theo Tiêu chuẩn ACI211.1-91. Bê tông có cường độ chịu nén yêu cầu mục tiêu ở 28 ngày tuổi là $f_c = 40$ MPa; cường độ nén của gạch bê tông tự chèn trong nghiên cứu được thiết kế ở mức 40 MPa nhằm đáp ứng các tiêu chuẩn TCVN 6476:1999, vốn yêu cầu cường độ nén từ 20 đến 60 MPa tùy mục đích sử dụng. Mức cường độ nén này đảm bảo sản phẩm có khả năng chịu tải trọng giao thông trung bình và chống lại các tác động cơ học tại khu vực công cộng như vỉa hè, bãi đỗ xe hay đường giao thông... Đây là cơ sở then chốt để đánh giá tính khả thi khi dùng bùn đỏ thay thế cát mà vẫn duy trì chất lượng và tuổi thọ công trình.

Bê tông được thiết kế các cấp phối với tỷ lệ thay thế cốt liệu nhỏ bởi bùn đỏ đuôi quặng lần lượt là 0 %, 10 %, 20 %, 30 % theo khối lượng. Các yêu cầu kỹ thuật của Gạch bê tông tự chèn theo TCVN 6476:1999 được đánh giá bao gồm độ linh động hỗn hợp bê tông (độ sụt phù hợp cho cấu kiện gạch bê tông dao động 4-6 cm), cường độ chịu nén (không nhỏ hơn 40 MPa), cường độ chịu kéo khi uốn, độ hút nước (không được lớn hơn 8 % cho M400), độ mài mòn (không được lớn hơn 0,5 g/cm² cho M400). Thiết kế cấp phối có tỷ lệ N/CKD = 0,30 cố định; ký hiệu các mẫu với tỷ lệ phối trộn và mục đích chọn các tỷ lệ cấp phối như sau:

- M0: 0 % Bùn đỏ + 100 % Cát_mẫu đối chứng không dùng bùn đỏ
- M10: 10 % Bùn đỏ + 90 % Cát_mẫu nghiên cứu ảnh hưởng của bùn đỏ với tỷ lệ thay thế cát thấp (10 %)
- M20: 20 % Bùn đỏ + 80 % Cát_mẫu nghiên cứu ảnh hưởng của bùn đỏ với tỷ lệ thay thế cát trung bình (20 %)
- M30: 30 % Bùn đỏ + 70 % Cát_mẫu nghiên cứu ảnh hưởng của bùn đỏ với tỷ lệ thay thế cát cao (30 %), không tăng hàm lượng bùn đỏ thay thế cát quá cao (> 30 %) sẽ làm cho hỗn hợp bê tông có hàm lượng hạt mịn lớn, khó đảm bảo độ linh động và cường độ nén yêu cầu.

2.4. Phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu đã áp dụng các tiêu chuẩn thí nghiệm: TCVN 6260:2020; TCVN 7570:2006; TCVN 8826:2024; TCVN 4506:2012; ACI211.1-91; TCVN 3106:2022; TCVN 3115:2022; TCVN 3118:2022; TCVN 3119:2022; TCVN 3113:2022; TCVN 3114:1993; TCVN 6476-1999.

Công tác chế tạo và thí nghiệm mẫu hỗn hợp bê tông và bê tông tuân thủ các yêu cầu của các tiêu chuẩn Việt Nam và được tiến hành nghiên cứu tại phòng thí nghiệm LAS-XD225 thuộc Phân hiệu trường Đại học Giao Thông Vận Tải tại TP. Hồ Chí Minh.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Tính công tác của hỗn hợp bê tông

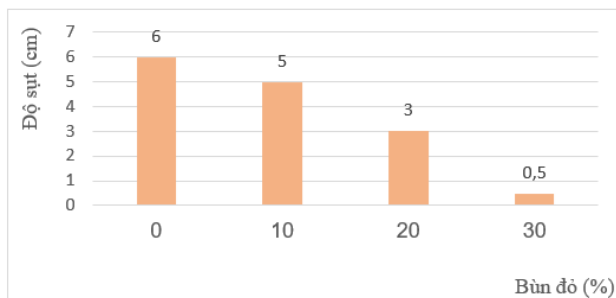
Quy trình xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông nặng được tiến hành theo TCVN 3106:2022 [13]. Để đảm bảo thi công và tạo hình cho gạch bê tông tự chèn, độ sụt được thiết kế khoảng 4 - 6cm, kết quả xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông được thể hiện ở Hình 4 và Hình 5.

Dựa trên đồ thị có thể thấy độ sụt của hỗn hợp bê tông giảm rõ rệt khi hàm lượng bùn đỏ tăng. Điều này có thể được giải thích do kích thước hạt bùn đỏ nhỏ mịn hơn nhiều so với hạt cốt liệu nhỏ nên tồn một lượng nước lớn để bao bọc quanh bề mặt, khi giữ nguyên nước nên độ sụt giảm đáng kể. Mẫu đối chứng không sử dụng bùn đỏ đạt độ sụt 6 cm, cho thấy hỗn hợp đồng nhất và có tính công tác phù hợp cho chế tạo gạch bê tông tự chèn. Khi thay thế 10 % bùn đỏ, độ sụt giảm nhẹ xuống 5 cm, hỗn hợp vẫn có thể trộn và tạo hình chấp nhận được. Ở mức 20 % bùn đỏ, độ sụt chỉ còn 3 cm, phản ánh sự suy giảm đáng kể tính linh động, hỗn hợp trở nên khó trộn và kém đồng nhất. Khi hàm lượng bùn đỏ tăng lên 30 %, độ sụt giảm mạnh xuống 0,5 cm; hỗn hợp gần như không sụt, dẻo quánh và nhanh khô, không phù hợp cho quá

trình trộn và ép rung gạch bê tông tự chèn. Nhìn chung, kết quả cho thấy bùn đỏ ảnh hưởng bất lợi đến tính công tác của hỗn hợp bê tông, và tỷ lệ thay thế khoảng 10 % bùn đỏ được đánh giá là hợp lý để đảm bảo khả năng thi công và tạo hình sản phẩm [3,9,10].

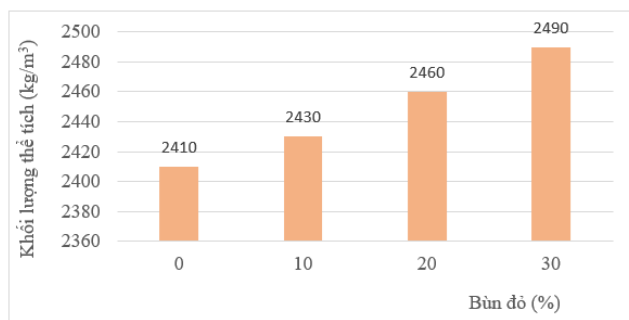


Hình 4. Thử độ sụt của hỗn hợp bê tông bằng côn Abram.



Hình 5. Độ sụt của hỗn hợp bê tông ứng với các hàm lượng bùn đỏ khác nhau.

3.2. Khối lượng thể tích hỗn hợp bê tông



Hình 6. KLTT thay đổi theo hàm lượng bùn đỏ.

Xác định khối lượng thể tích (KLTT) của hỗn hợp bê tông theo TCVN 3115:2022 [14]. Hình 6 thể hiện KLTT trung bình của 2 đợt đo cho từng cấp phối thử nghiệm với hàm lượng bùn đỏ khác nhau.

Hình 6 cho thấy KLTT của hỗn hợp bê tông tăng dần khi hàm lượng bùn đỏ thay thế cát tăng. Ở mẫu đối chứng không sử dụng bùn đỏ, KLTT đạt khoảng 2410 kg/m³, trong khi giá trị này tăng lần lượt

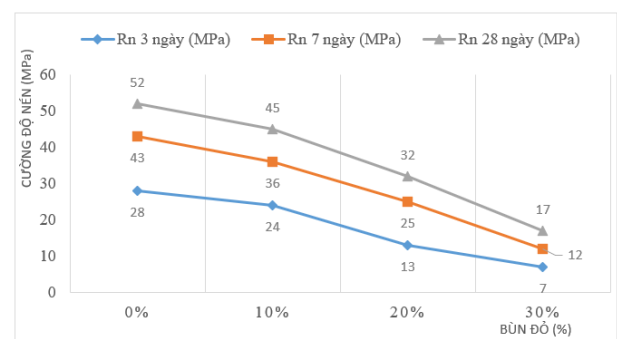
lên 2430, 2460 và 2490 kg/m³ tương ứng với 10 %, 20 % và 30 % bùn đỏ. Xu hướng này chủ yếu xuất phát từ đặc điểm kích thước hạt rất mịn và khối lượng riêng cao của bùn đỏ so với cát tự nhiên. Khi hàm lượng bùn đỏ tăng, các hạt mịn đóng vai trò chèn lấp lỗ rỗng giữa các hạt cốt liệu, làm giảm thể tích rỗng hở và tăng mức độ đặc chắc của cấu trúc bê tông sau khi đầm rung. Do đó, dù tính công tác của hỗn hợp bị suy giảm, mức độ đặc chắc tăng lên đã dẫn đến sự gia tăng KLTT của hỗn hợp bê tông chế tạo gạch tự chèn.

3.3. Cường độ chịu nén của bê tông

Quy trình xác định cường độ chịu nén (Rn) của bê tông được tiến hành theo tiêu chuẩn TCVN 3118:2022 [15], đúc mẫu trụ chuẩn dxh = 15x30 (cm). Hình 7 và Hình 8 thể hiện cường độ nén trung bình của các tổ mẫu (3 viên) được thí nghiệm tại các ngày tuổi 3, 7 và 28 ngày tương ứng với bốn cấp phối bê tông có hàm lượng bùn đỏ khác nhau.



Hình 7. Chuẩn bị làm phẳng bề mặt mẫu và thử nén mẫu trụ chuẩn bê tông bùn đỏ.



Hình 8. Biểu đồ quan hệ cường độ Rn ở 3,7 và 28 ngày tuổi với các tỷ lệ bùn đỏ.

Đồ thị cho thấy cường độ chịu nén của bê tông giảm dần khi hàm lượng bùn đỏ thay thế cốt liệu nhỏ tăng, và xu hướng này xuất hiện ở cả các tuổi 3, 7 và 28 ngày. Mẫu đối chứng không sử dụng bùn đỏ đạt cường độ cao nhất, với Rn tại 28 ngày khoảng 52 MPa, trong khi khi thay thế 10 %, 20 % và 30 % bùn đỏ, Rn nén tại 28 ngày giảm lần lượt

xuống 45, 32 và 17 MPa. Điều này cho thấy ảnh hưởng của bùn đỏ không chỉ thể hiện ở cường độ sớm mà còn tác động lâu dài đến quá trình phát triển cường độ của bê tông. Nguyên nhân chính của sự suy giảm cường độ là do hàm lượng hạt mịn tăng cao khi sử dụng bùn đỏ, khi vẫn giữ nguyên lượng nước trộn thì tính công tác giảm đáng kể làm ảnh hưởng đến chất lượng liên kết giữa hồ xi măng và cốt liệu. Bên cạnh đó, bùn đỏ khi thay thế cát làm suy giảm vai trò của khung cốt liệu chịu lực, trong khi bản thân bùn đỏ có hoạt tính thấp trong hệ xi măng. Ở các cấp phối có hàm lượng bùn đỏ cao 20 % đến 30 % bùn đỏ, việc đầm nén kém hiệu quả cũng góp phần làm tăng độ rỗng và cường độ chịu nén giảm nhanh [1,2,6,9].

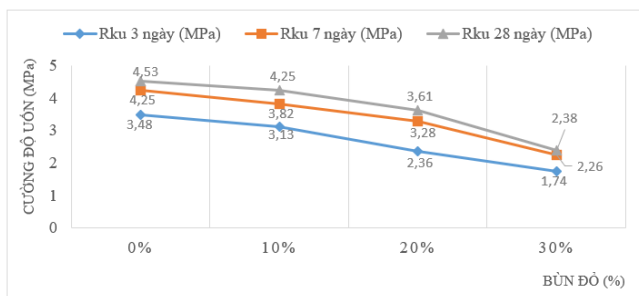
Mặc dù vậy, ở mức thay thế 10 %, bê tông vẫn đạt cường độ tương đối cao R_n tại 28 ngày là 45MPa thỏa mãn yêu cầu cường độ nén mục tiêu ban đầu là 40MPa. Khi hàm lượng bùn đỏ tăng lên 20 % và 30 %, cường độ suy giảm mạnh (R_n tại 28 ngày lần lượt 32 MPa, 17MPa) không còn phù hợp với yêu cầu chịu lực của sản phẩm. Như vậy, tỷ lệ thay thế 10 % bùn đỏ được coi là tối ưu cho chỉ tiêu cường độ chịu nén của bê tông trong nghiên cứu này.

3.4. Cường độ kéo khi uốn

Việc xác định cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông theo TCVN 3119:2022 [16] cho mẫu hình hộp chữ nhật có kích thước chuẩn 150 mm x 150 mm x 60 mm. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi uốn được thể hiện ở Hình 9 và Hình 10.



Hình 9. Thí nghiệm xác định cường độ kéo khi uốn.



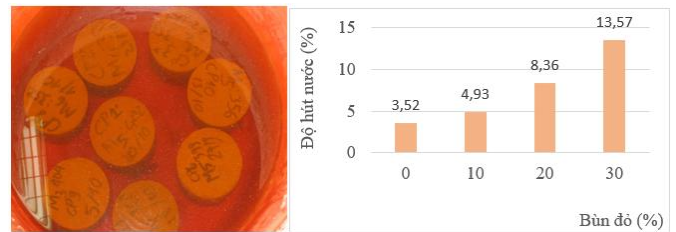
Hình 10. Quan hệ giữa cường độ kéo khi uốn ở 3,7 và 28 ngày tuổi với các tỷ lệ bùn đỏ.

Kết quả dự đoán cho thấy cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông giảm khi hàm lượng bùn đỏ tăng, với xu hướng tương tự cường độ chịu nén. Ở các cấp phối chứa 10–20 % bùn đỏ, cường độ uốn vẫn duy trì ở

mức chấp nhận được cho gạch bê tông tự chèn. Đặc biệt, tại hàm lượng 10 %, cường độ chịu kéo khi uốn suy giảm không đáng kể so với mẫu đối chứng (R_{ku} tại 28 ngày giảm 6,2 %), cho thấy đây là tỷ lệ thay thế hợp lý để đảm bảo khả năng chịu uốn của vật liệu. Ngược lại, khi hàm lượng bùn đỏ đạt 30 % (R_{ku} tại 28 ngày giảm 47,5 %), cường độ kéo khi uốn giảm mạnh, phản ánh sự suy yếu rõ rệt của cấu trúc bê tông.

3.5. Độ hút nước của bê tông

Thử nghiệm độ hút nước của bê tông được tiến hành theo tiêu chuẩn TCVN 3113:2022 [17]. Kết quả độ hút nước của bê tông được thể hiện trong Hình 11.



Hình 11. Mẫu thử ngâm nước và đồ thị độ hút nước của mẫu bê tông với các tỷ lệ bùn đỏ.

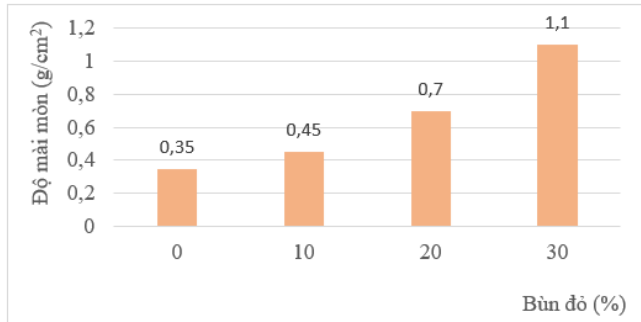
Từ đồ thị cho thấy sự gia tăng hàm lượng bùn đỏ tỉ lệ thuận với độ hút nước của bê tông. Khi tỷ lệ thay thế tăng từ 0 % lên 30 %, độ hút nước của mẫu có sự biến thiên mạnh, tăng từ 3,52 % lên đến 13,57 %. Dựa trên yêu cầu kỹ thuật của gạch bê tông tự chèn theo TCVN 6476:1999 [19] với Mác M400 thì độ hút nước không vượt quá 8 %, nhóm nghiên cứu xác định tỷ lệ thay thế 10 % bùn đỏ là phương án tối ưu nhất với độ hút nước chỉ 4,93 % thỏa mãn nhỏ hơn 8 % theo yêu cầu. Các tỷ lệ 20 % và 30 % đều không đạt khi chỉ số đo được lần lượt là 8,36 % và 13,57 %, vượt ngưỡng quy định. Điều này có thể được giải thích về mặt cấu trúc, việc gia tăng độ hút nước khi tăng tỷ lệ bùn đỏ có thể do kích thước hạt của bùn đỏ nhỏ hơn nhiều so với cát tự nhiên, dẫn đến diện tích bề mặt riêng lớn hơn và nhu cầu nước tăng cao trong quá trình thủy hóa. Ở tỷ lệ 10 %, các hạt bùn đỏ mịn đóng vai trò là chất điền đầy, lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt cốt liệu lớn, giúp cấu trúc bê tông duy trì được độ đặc chắc với độ hút nước thấp (4,93 %). Tuy nhiên, khi hàm lượng này vượt quá 20 %, sự dư thừa các hạt mịn và bản chất rỗng xốp tự nhiên của bùn đỏ đã hình thành hệ thống mao quản thông nhau, làm tăng khả năng thẩm thấu nước vào bên trong bê tông, dẫn đến giá trị độ hút nước vượt ngưỡng cho phép [3,9,10].

3.6. Độ mài mòn của bê tông

Đúc mẫu bê tông khối lập phương cạnh là 7,07 cm ở các tỷ lệ bùn đỏ và bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn thời gian 28 ngày. Kết quả thí nghiệm xác định độ mài mòn được tiến hành theo tiêu chuẩn TCVN 3114:1993 [18] và được thể hiện trong Hình 12 và Hình 13.



Hình 12. Xác định độ mài mòn của mẫu đối chứng và mẫu bùn đỏ.



Hình 13. Độ mài mòn của các mẫu bê tông với tỷ lệ phối trộn bùn đỏ khác nhau.

Kết quả cho thấy độ mài mòn của bê tông tăng khi tỷ lệ bùn đỏ tăng, phù hợp với xu hướng suy giảm cường độ chịu nén. Ở tỷ lệ 10 %, bê tông có độ mài mòn 0,45 g/cm² nhỏ hơn 0,5 g/cm² đáp ứng yêu cầu của gạch bê tông tự chèn theo TCVN 6476-1999. Khi tỷ lệ bùn đỏ thay thế tăng lên 20 % và 30 %, cường độ chịu nén giảm đáng kể, làm cấu trúc bê tông kém đặc chắc và dẫn đến độ mài mòn vượt giới hạn cho phép (lần lượt 0,7 và 1,1 g/cm²). Điều này cho thấy tỷ lệ thay thế bùn đỏ cao không phù hợp cho các sản phẩm như gạch bê tông tự chèn yêu cầu khả năng chịu mài mòn cao.

3.7. Tính toán giá thành cho cấp phối bê tông đối chứng và tối ưu 10 % bùn đỏ

Chi phí vật liệu được tính sau khi bao gồm thuế và vận chuyển, tham khảo giá vật liệu xây dựng thực tế tại TP. Hồ Chí Minh tháng 01 năm 2026. Bảng 3 trình bày chi phí cho 1m³ bê tông đối chứng và 1 m³ bê tông tối ưu chứa 10 % bùn đỏ như bảng 3.

Tổng giá thành 1 m³ bê tông được xác định bằng tổng chi phí của tất cả các thành phần theo từng cấp phối. Kết quả cho thấy việc thay thế 10 % cát bằng bùn đỏ giảm khoảng 21900 VNĐ/m³ so với mẫu đối chứng. Kết quả này chứng minh rằng bùn đỏ không chỉ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật mà còn mang lại hiệu quả kinh tế giúp giảm giá thành khi sử dụng làm cốt liệu thay thế trong gạch bê tông tự chèn.

Bảng 1. Đặc tính của nguyên vật liệu đầu vào.

STT	Loại nguyên liệu	Tên nguyên liệu	Nơi sản xuất	Tiêu chuẩn	Đặc tính thử nghiệm
1	Xi măng	PCB40	Xi măng Nghi Sơn	TCVN 6260:2020	Khối lượng riêng 3,15 g/cm ³ ; độ mịn (lượng sót trên sàng 90µm) 2,0 %; Cường độ chịu nén, uốn tuổi 28 ngày 58 MPa; 6,9 MPa.
2	Cốt liệu mịn	Cát sông	Sông Đồng Nai	TCVN 7570:2006	Mô đun độ lớn 2,4; khối lượng riêng 2,60 g/cm ³ ; khối lượng thể tích 1350 kg/m ³ ; độ rỗng 41,5%
3	Cốt liệu thô	Đá dăm	Thành phố Hồ Chí Minh	TCVN 7570:2006	D _{max} = 20mm; Khối lượng riêng 2,65 g/cm ³ ; khối lượng thể tích xốp 1430 kg/m ³ , độ hút nước: 0,6 %
4	Bùn đỏ	Bùn đỏ đuôi quặng	Nhà máy Alumin Tân Rai, Lâm Đồng		Khối lượng riêng 2,95 g/cm ³ ; kích thước hạt mịn (≈ 5–15 µm); độ ẩm 25–35 %; pH ≈ 6,2
5	Phụ gia	Sika ViscoCrete-8168	Sika	TCVN 8826:2024	Phụ gia siêu dẻo gốc Polycarboxylate loại F
6	Nước	Nước máy		TCVN 4506:2012	

Bảng 2. Thành phần bê tông xi măng với các cấp phối khác nhau cho 1 m³.

TT	Vật liệu thành phần	M0	M10	M20	M30
1	XM PCB40, kg/m ³	450	450	450	450
2	Cát, kg/m ³	730	657	584	511
3	Bùn đỏ, kg/m ³	0	73	146	219
4	Đá dăm, kg/m ³	1112	1112	1112	1112
5	Nước, lít	135	135	135	135

TT	Vật liệu thành phần	M0	M10	M20	M30
6	Phụ gia siêu dẻo, lít	4,5	4,5	4,5	4,5
7	Nước/CKD	0,30	0,30	0,30	0,30

Bảng 3. So sánh giá thành vật liệu cho 1 m³ bê tông đối chứng và bê tông sử dụng 10 % bùn đỏ.

Nguyên liệu	Mẫu đối chứng (kg/m ³)	Mẫu 10 % bùn đỏ (kg/m ³)	Đơn giá tham khảo theo đơn vị	Đơn giá thực tế (VNĐ/kg)	Giá 1 m ³ bê tông đối chứng (VNĐ)	Giá 1 m ³ bê tông 10 % bùn đỏ (VNĐ)
Xi măng	450	450	105 000 VNĐ/bao 50 kg	2 100	945 000	945 000
Cát	730	657	540 000 VNĐ/m ³	400	292 000	262 800
Bùn đỏ	0	73	0	100	0	7 300
Đá	1 112	1 112	449 500 VNĐ/m ³	310	344 720	344 720
Phụ gia (Sika VC-8168)	4,5	4,5	60 000 VNĐ/lít	60 000	270 000	270 000
Nước	135	135	18 000 VNĐ/m ³	18	2 430	2 430
Tổng giá thành (VNĐ)	—	—	—	—	1 854 150	1 832 250

4. Kết luận

Với nguồn nguyên vật liệu chủ yếu phía Nam, sử dụng bùn đỏ đuôi quặng Tân Rai (Lâm Đồng) thay thế một phần cát tự nhiên, có thể chế tạo bê tông có cường độ chịu nén 40 MPa để làm gạch bê tông tự chèn cho các công trình xây dựng hạ tầng đô thị.

Khi lượng bùn đỏ thay thế cát tự nhiên ở mức 10 %, 20 %, 30 % thì bê tông có độ linh động, cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn, độ hút nước và độ mài mòn đều không tốt bằng mẫu bê tông đối chứng.

Nghiên cứu đề xuất tỷ lệ phối trộn hợp lý của cấp phối bê tông là 10 % cát tự nhiên được thay thế bằng bùn đỏ có thể ứng dụng vật liệu cho sản xuất gạch bê tông tự chèn theo Mác M400. Đây là một hàm lượng thay thế không quá cao nhưng cũng giúp giảm giá thành cấp phối bê tông, góp phần giải quyết vấn đề môi trường do phế thải công nghiệp, mà còn đáp ứng tốt các tiêu chí về độ linh động và tính chất cơ lý cho loại gạch bê tông tự chèn theo TCVN 6476:1999.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Nguyễn Hữu Tài, Nguyễn Văn Trung, Ngô Hùng Cường, Nguyễn Thị Lệ Quyên (2021). *Nghiên cứu sử dụng bùn đỏ làm nguyên liệu thay thế đất sét trong sản xuất gạch lát nền và ngói lợp*. Tạp chí Vật liệu & Xây dựng, Tập 11, Số 6, tr. 87-94.
- [2]. Shirodkar, V.; Patel, R.; Verma, M. *Utilization of red mud in cementitious concrete – A review*. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET) 2020; 11(2); pp. 426–430.
- [3]. Nguyễn Hữu Tân, Võ Nhật Luân, Tăng Văn Lâm (2024). *Nghiên cứu sử dụng bùn thải của nhà máy nhôm Tân Rai thay thế cốt liệu nhỏ tự nhiên trong chế tạo bê tông xanh không sử dụng xi măng định hướng xây dựng công trình nhà cao tầng khu vực Hồ Chí Minh*. Tạp chí Vật liệu & Xây dựng 2024; 14(05); tr. 10-19.
- [4]. Lê Văn Quang (2019). *Nghiên cứu chế tạo gạch xây không nung hệ geopolymer từ bùn đỏ Tân Rai Lâm Đồng*. Luận án tiến sĩ; Hà Nội; 151 trang.
- [5]. Nguyễn Thanh Sang, Trần Lê Thắng (2011). *Bê tông cát sử dụng cát duyên hải miền Trung để chế tạo gạch bê tông và tấm đan trong xây dựng đường ô tô*. Tạp chí Giao thông Vận tải 2011; (11); tr.16-18.
- [6]. Bhardwaj, P. S.; Gupta, S. *Utilization of Red Mud as a Partial Replacement of Cement in Concrete*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2019; 06(06); pp. 2759–2764.
- [7]. Fang, Y.; Qiao, L.; Hu, T.; Zhang, L.; Yu, F.; Yang, Z. *Characteristics of iron ore tailings sand and properties of iron ore tailings sand concrete: A review*. International Journal of Concrete Structures and Materials 2025; 19; Art. no. 41.
- [8]. Kong, L.; Xie, S.; Wang, C.; Wang, L. *Effect of iron tailings as fine aggregate and mineral admixture on strength and microstructure of cement mortar*. International Journal of Concrete Structures and Materials 2023; 17; Art. no. 24.
- [9]. Arbili, M. M.; Alqurashi, M.; Majdi, A.; Ahmad, J.; Deifalla, A. F. *Concrete made with iron ore tailings as a fine aggregate: A step towards sustainable concrete*. Materials 2022; 15(18); Art. no. 6236.
- [10]. Murali, Y.; Dhevasenaa, R. P.; Kumar, S.; et al. *Effect of iron ore tailings as partial replacement to fine aggregate on the performance of concrete*. Innovative Infrastructure Solutions 2023; 9; Art. no. 318.
- [11]. Phạm Duy Hữu (2011). *Giáo trình vật liệu xây dựng*. Nhà xuất bản Giao thông Vận tải.
- [12]. Kiều Đỗ Trung Kiên. *Nghiên cứu chế tạo gạch không nung từ bùn đỏ*. Luận văn thạc sĩ năm 2010; Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh.
- [13]. TCVN 3106:2022. *Hỗn hợp bê tông - phương pháp thử độ sụt*.
- [14]. TCVN 3115:2022. *Hỗn hợp bê tông - Phương pháp xác định khối lượng thể tích*.
- [15]. TCVN 3118:2022. *Bê tông nặng - phương pháp xác định cường độ nén*.
- [16]. TCVN 3119:2022. *Bê tông nặng - phương pháp xác định cường độ chịu kéo khi uốn*.
- [17]. TCVN 3113:2022. *Bê tông nặng - Phương pháp xác định độ hút nước*.
- [18]. TCVN 3114:2022. *Bê tông nặng - Phương pháp xác định độ mài mòn*.
- [19]. TCVN 6479:1999. *Gạch bê tông tự chèn*.