

Khả năng chịu tải sau cháy của dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu xỉ

Đoàn Văn Đệ¹, Cao Văn Vui^{2,3*}

¹ Trung tâm Thí nghiệm Xây dựng và Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

² Khoa Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh

³ Đại học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Bê tông cốt thép
Xi than
Sau cháy
Khả năng chịu uốn

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu uốn của dầm bê tông cốt thép sau khi bị cháy sử dụng xi than thay thế cát. Thực nghiệm được thực hiện trên tám dầm bê tông cốt thép, được chia thành 2 nhóm N và S. Nhóm N gồm bốn dầm sử dụng cốt liệu mịn là cát sông, Nhóm S gồm bốn dầm sử dụng xi than thay thế cát. Trong mỗi nhóm, một dầm không thí nghiệm cháy, ba dầm còn lại được thí nghiệm cháy với thời gian lần lượt là 20 phút, 40 phút và 60 phút. Sau thí nghiệm cháy, các dầm được để nguội đến nhiệt độ phòng và được tiến hành thí nghiệm uốn ba điểm bởi lực tập trung đặt ở giữa nhịp đến tải trọng phá hoại. Kết quả cho thấy phá hoại uốn là cơ chế phá hoại chủ đạo của các dầm kể cả trong điều kiện thường và sau cháy. Ở điều kiện nhiệt độ thường, dầm bê tông cốt liệu xi có khả năng chịu uốn cao hơn 4,7% so với dầm bê tông thường. Khi bị cháy trong thời gian từ 20 phút đến 60 phút, khả năng chịu uốn của dầm bê tông thường suy giảm trung bình 10%, trong khi dầm bê tông cốt liệu xi giảm trung bình 15,6%. Ngoài ra, với cùng thời gian bị cháy thì khả năng chịu uốn của dầm bê tông cốt liệu thường và dầm bê tông cốt liệu xi có giá trị gần bằng nhau.

KEYWORDS

Reinforced concrete.
Bottom ash.
Post-Fire.
Flexural capacity

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the flexural load-carrying capacity of reinforced concrete (RC) beams exposed to fire. Bottom ash was used as a replacement for river sand in the concrete mix. Experiments were conducted on eight RC beams, which were divided into two groups. Group N consisted of four beams using river sand as fine aggregate, whereas group S was similar to group N, but river sand was replaced by bottom ash. In each group, one beam was tested at ambient temperature and considered as a control beam. The remaining three beams were exposed to fire for 20, 40, and 60 minutes. After fire exposure, these beams were naturally cooled down to room temperature and tested under three-point bending until failure. The findings indicated that these beams failed in flexure regardless of the fire conditions. At ambient temperature, the bending moment capacity of bottom ash RC beams was 4.7% higher than that of normal RC beams. When exposed to fire for 20 to 60 minutes, the moment capacity of normal RC beams and bottom ash RC beams decreased by 10% and 15.6% (on average) compared with their control beams, respectively. In addition, with a similar duration of fire exposure, the load-carrying capacity of bottom ash and normal RC beams was approximately equal.

1. Giới thiệu

Trong thành phần bê tông, cốt liệu cát giữ vai trò quan trọng bên cạnh xi măng, cốt liệu đá và nước. Trong những năm gần đây, sự phát triển nhanh chóng của ngành công nghiệp xây dựng đã làm tăng nhu cầu sử dụng cát, gây ra tình trạng khan hiếm nghiêm trọng và làm chi phí xây dựng tăng cao. Bên cạnh đó, hoạt động khai thác cát quá mức đã và đang gây ra nhiều tác động tiêu cực, điển hình là biến đổi dòng chảy, sạt lở bờ sông và những thiệt hại đáng kể về người và tài sản. Trong bối cảnh đó, việc tìm kiếm nguồn vật liệu thay thế cát đã trở nên cấp bách. Một trong những nỗ lực đáng chú ý là tận dụng cốt liệu đá lọt sàng 5 mm, sản phẩm phụ trong quá trình khai thác đá (còn gọi

là cát nghiền, hay cát nhân tạo), để sử dụng như vật liệu thay thế một phần hoặc toàn bộ cát sông [1], [2]. Ở Việt Nam, việc sử dụng cát nghiền thay thế cát sông đã được hệ thống hóa, hướng dẫn tính toán trong tiêu chuẩn TCVN 9205:2012 [3]. Tuy vậy, việc sử dụng cát nghiền thay thế cát sông chỉ là giải pháp tạm thời, vì nguồn gốc của cát nghiền là loại vật liệu được tạo thành từ quá trình sản xuất đá, trong khi đó nguồn vật liệu đá cung cấp cho xây dựng cũng đang ngày càng trở nên khan hiếm. Bên cạnh cát nghiền, nhiều nghiên cứu cho thấy cát biển cũng là loại vật liệu tiềm năng để thay thế một phần hoặc toàn bộ cát sông sử dụng cho hỗn hợp bê tông sau khi qua các công đoạn xử lý nhằm loại bỏ các ion gây ăn mòn và các tạp chất khác có trong cát biển [4], [5], [6], [7], [8]. Tuy nhiên, chi phí cho các công đoạn xử lý này

*Liên hệ tác giả: cvvui@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 09/03/2026, sửa xong ngày 25/06/2026, chấp nhận đăng ngày 26/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1270>

khá cao và chỉ đáp ứng được một lượng nhỏ, trong khi nguồn cung không thể thỏa mãn nhu cầu sử dụng cát với khối lượng lớn.

Trong nhiều thập kỷ qua, cùng với các dự án thủy điện, nhà máy nhiệt điện là sự lựa chọn hàng đầu cho những khu vực địa lý không thể phát triển thủy điện. Quá trình phát triển các nhà máy nhiệt điện đã góp phần lớn vào việc cung cấp điện năng để phát triển kinh tế. Tuy nhiên, các phế thải (gồm tro bay và xỉ-hay còn gọi là xỉ than) được tạo thành từ quá trình đốt than là vấn đề nan giải cần giải quyết nhằm tránh tác động tiêu cực đến môi trường xung quanh. Mặc dù đã có nhiều giải pháp xử lý nhằm giảm thiểu tác động của lượng phế thải này đến môi trường, song việc nghiên cứu và ứng dụng chúng như một loại vật liệu hữu ích trong lĩnh vực xây dựng đã trở thành hướng đi thu hút sự quan tâm rộng rãi của giới khoa học trong nước và thế giới. Bakoshi và cộng sự [9] nghiên cứu đánh giá hiệu quả sử dụng xỉ than từ nhà máy nhiệt điện tại Nhật Bản làm cốt liệu mịn trong bê tông với tỷ lệ thay thế từ 0–40 %. Kết quả cho thấy cường độ nén và kéo tăng theo tỷ lệ xỉ và thời gian bảo dưỡng. Chaisakulkiet và cộng sự [10] nghiên cứu sử dụng xỉ than dạng mịn để thay thế cốt liệu cát và xỉ than hạt thô để thay thế đá sản xuất bê tông. Tỷ lệ thay thế gồm: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % và 100 % theo khối lượng. Kết quả cho thấy cường độ nén của bê tông tăng lên khi sử dụng cốt liệu mịn và thô ở mức thay thế 25 % và 50 %. Yang và cộng sự [11] nghiên cứu ứng dụng xỉ than thay thế cát để sản xuất bê tông có cường độ chịu nén 60 MPa. Các tỷ lệ thay thế cát bởi xỉ gồm: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, và 100 %. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng tỷ lệ thay thế thì độ linh động của bê tông giảm. Đặc biệt, ngay cả khi thay thế hoàn toàn cốt liệu mịn bằng cốt liệu xỉ hạt thô, (CBA-Coarse Bottom Ash), bê tông vẫn đạt cường độ nén trên 60 MPa. Điều này cho thấy bê tông CBA có thể đạt mức của bê tông cường độ cao, do đó CBA có thể được sử dụng để chế tạo bê tông cường độ cao với vai trò thay thế một phần hoặc toàn bộ cốt liệu mịn. Ojha và cộng sự [12] nghiên cứu sử dụng xỉ than từ nhà máy nhiệt điện ở Ấn Độ thay thế cát nghiền và cát sông với các tỷ lệ khác nhau gồm 0 %, 25 %, 50 %, 75 % và 100 %, tỷ lệ nước/xỉ măng là 0,65 và 0,40. Kết quả cho thấy việc thay thế đến 50 % cốt liệu mịn bằng xỉ là khả thi về mặt kỹ thuật, dựa trên các chỉ tiêu như độ linh động, giữa độ sụt và phát triển cường độ. Maliki và cộng sự [13] nghiên cứu đánh giá tỷ lệ thay thế tối ưu của xỉ than khi thay thế cát tự nhiên. Các mẫu bê tông hình lập phương (100×100×100 mm) và hình trụ (150×300 mm) được chế tạo với tỷ lệ thay thế từ 0 % đến 100 %. Kết quả cho thấy tỷ lệ xỉ tối ưu để thay thế cốt liệu mịn là 60 % với cường độ nén đạt 36,4 MPa (7 ngày) và 46,2 MPa (28 ngày). Trong khi đó, cường độ kéo tối ưu đạt được ở tỷ lệ thay thế là 70 %, với giá trị lần lượt là 3,03 MPa và 3,63 MPa ở thời điểm 7 và 28 ngày. Cadarsa và Auckburally [14] nghiên cứu sử dụng xỉ than chưa qua xử lý để thay thế cát chế tạo bê tông. Các tỷ lệ thay thế gồm 0 %, 20 %, 30 %, 40 %, 60 %, và 80 %. Kết quả cho thấy khi hàm lượng xỉ tăng, độ linh động và khối lượng thể tích của bê tông giảm, trong khi hiện tượng tách nước tăng. Tuy nhiên, khi tỷ lệ thay thế vượt quá 40 %, cường độ nén, cường độ uốn và mô đun đàn hồi giảm đáng kể. Mặt khác, việc tăng tỷ lệ xỉ giúp cải thiện khả năng co ngót khi khô của bê tông. Tỷ lệ thay thế 20 % được xác định là tối ưu. Kim và cộng sự [15]

nghiên cứu đánh giá tính công tác và các đặc tính cơ học của bê tông sử dụng xỉ than làm cốt liệu. Mười hai cấp phối được chia thành ba nhóm theo tỷ lệ nước/xỉ măng (0,45; 0,375; 0,3), mỗi nhóm gồm bốn cấp phối với tỷ lệ thay thế cốt liệu tự nhiên bằng xỉ khác nhau. Kết quả thí nghiệm cho thấy xỉ làm giảm khối lượng thể tích và cường độ chịu nén, do đó cần giảm tỷ lệ nước/xỉ măng để bù lại. Devanath và cộng sự [16] nghiên cứu thực nghiệm đặc tính của bê tông khi sử dụng xỉ than thay thế cát sông với các tỷ lệ 0 %, 20 %, 30 %, và 50 % ở 7 ngày và 28 ngày tuổi. Kết quả cho thấy khi tăng tỷ lệ thay thế 20 % đến 50 %, độ bền nén tăng từ 1,49 % đến 6,71 % (7 ngày tuổi) và từ 13,82 % đến 45,57 % (28 ngày tuổi) so với mẫu đối chứng. Cùng tỷ lệ này, độ bền kéo ép chệch tăng từ 12,43 % đến 54,91 % sau 7 ngày và tăng 14,98 % đến 38,86 % so với mẫu đối chứng ở 28 ngày tuổi. Souza và cộng sự [17] nghiên cứu thay thế cát sông bằng 100 % xỉ để chế tạo bê tông mác 20 MPa, 25 MPa và 30 MPa. Kết quả cho thấy bê tông xỉ đạt cường độ nén cao hơn bê tông đối chứng ở mọi ngày tuổi, ngay cả khi thay thế hoàn toàn cốt liệu mịn. Soman và cộng sự [18] nghiên cứu thực nghiệm đánh giá đặc tính cường độ của bê tông khi thay thế 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, và 50 % cát nghiền bằng xỉ. Các mẫu được kiểm tra về cường độ nén, cường độ kéo tách và cường độ uốn. Kết quả cho thấy khi thay thế tối đa 30 % cát bằng xỉ, các chỉ tiêu cường độ chỉ giảm nhẹ, không đáng kể. Bai và cộng sự [19] nghiên cứu về cường độ và độ co ngót khi khô của bê tông sử dụng xỉ lò làm cốt liệu mịn. Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của việc thay thế cát tự nhiên bằng xỉ với các tỷ lệ 0 %, 30 %, 50 %, 70 % và 100 % theo khối lượng, trong điều kiện tỷ lệ nước/xỉ măng cố định và độ sụt được kiểm soát. Cường độ nén giảm khi tăng tỷ lệ xỉ, đặc biệt ở mức thay thế cao. Tuy nhiên, nếu giữ độ linh động ổn định, cường độ nén của bê tông chứa xỉ có thể tương đương với bê tông đối chứng. Tỷ lệ thay thế 30 % được xác định là tối ưu, giúp bê tông đạt cường độ từ 40–60 MPa mà không ảnh hưởng tiêu cực đến độ co ngót. Andrade và cộng sự [20] nghiên cứu ảnh hưởng của việc sử dụng xỉ than thay thế cốt liệu mịn tự nhiên đến tính chất của bê tông ở trạng chưa ninh kết, từ đó rút ra những hệ quả kỹ thuật quan trọng khi sử dụng xỉ làm vật liệu thay thế cốt liệu mịn. Tỷ lệ thay thế xỉ than gồm: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, và 100 %. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng tỷ lệ xỉ than ảnh hưởng rõ rệt đến tính chất cơ học và độ ổn định của bê tông tươi. Việc lựa chọn phương pháp thay thế và điều chỉnh cấp phối là rất quan trọng để đảm bảo chất lượng công trình khi sử dụng vật liệu tái chế như xỉ. Kim và Lee [21] nghiên cứu đánh giá việc sử dụng xỉ làm cốt liệu mịn và thô trong bê tông cường độ cao (60–80 MPa). Các đặc tính hóa học và vật lý của xỉ như thành phần hóa học, khối lượng riêng và hình ảnh SEM (Scanning Electron Microscope) cũng được phân tích. Sau đó các thí nghiệm tiếp theo được thực hiện bằng cách thay thế cát và đá tự nhiên bằng xỉ ở các tỷ lệ 0 %, 25 %, 50 %, 75 % và 100 %. Kết quả cho thấy khi thay thế hoàn toàn cốt liệu thô bằng xỉ, độ sụt của bê tông giảm từ 530 mm xuống còn 420 mm, cho thấy sự suy giảm tính lưu động đáng kể. Ngược lại, việc sử dụng xỉ mịn không gây ảnh hưởng rõ rệt đến độ sụt của hỗn hợp. Đáng chú ý, cả hai loại cốt liệu xỉ, mịn và thô, đều tác động mạnh hơn đến cường độ uốn của bê tông so với cường độ nén. Singh và Siddique [22] nghiên

cửu thực nghiệm các đặc tính cơ học và vi cấu trúc của bê tông chứa xỉ than khi thay thế một phần cốt liệu mịn. Các thí nghiệm đánh giá tính chất của bê tông ở trạng thái chưa ninh kết và sau ninh kết như: khối lượng thể tích, độ linh động, mất nước do tách nước, cường độ nén, cường độ kéo khi chia, mô đun đàn hồi và vi cấu trúc. Các tỷ lệ thay thế gồm: 0 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 75 %, và 100 %. Kết quả cho thấy việc sử dụng xỉ giúp tăng độ linh động và giảm hiện tượng tách nước của bê tông tươi. Sau 28 ngày bảo dưỡng, cường độ chịu nén không biến đổi đáng kể, nhưng tăng rõ rệt sau 90 ngày. Cường độ chịu kéo được cải thiện ở tất cả các giai đoạn, trong khi mô đun đàn hồi có xu hướng giảm. Singh và Siddique [23] nghiên cứu ảnh hưởng của xỉ than khi thay thế một phần cát đến tính công tác và các đặc tính cường độ của bê tông. Hai loại bê tông đối chứng được thiết kế để đạt cường độ nén 28 ngày lần lượt là 38 MPa (bê tông A) và 34 MPa (bê tông B), sử dụng cát sông có mô đun độ mịn khác nhau. Trong cả hai loại bê tông, cát được thay thế bằng xỉ với các tỷ lệ 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 75 %, và 100 %. Việc sử dụng xỉ làm cốt liệu mịn làm giảm độ công tác và hiện tượng tách nước của bê tông. Kết quả cho thấy, với bê tông A (cát có mô đun độ lớn 1,97), việc thay thế bằng xỉ không ảnh hưởng đáng kể đến cường độ nén và kéo. Tuy nhiên, với bê tông B (cát có mô đun độ lớn 2,58), cường độ nén và kéo của bê tông chứa xỉ giảm ở giai đoạn đầu. Sau 90 ngày bảo dưỡng, các giá trị này gần tương đương với bê tông đối chứng. Bê tông chứa xỉ có mô đun đàn hồi và khả năng chống mài mòn thấp hơn so với bê tông thường, nhưng khả năng chống mài mòn cải thiện rõ rệt theo thời gian. Kylasnath và Abraham [24] nghiên cứu đánh giá tính phù hợp của việc sử dụng xỉ trong bê tông cường độ cao (60 MPa). Các thí nghiệm được tiến hành với các tỷ lệ thay thế cốt liệu mịn bằng xỉ lần lượt là 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % và 30 %. Các đặc tính cơ học như cường độ nén, cường độ kéo tách và cường độ uốn đã được đánh giá. Nghiên cứu cho thấy việc thay thế một phần cốt liệu mịn bằng xỉ trong bê tông mác 60 MPa giúp cải thiện đáng kể các tính chất cơ học, đặc biệt ở mức thay thế 20 %. Tuy nhiên, tính công tác của bê tông giảm do độ mịn cao của xỉ làm tăng nhu cầu nước, buộc phải sử dụng thêm phụ gia siêu dẻo. Cường độ nén, kéo tách và uốn đều tăng so với mẫu đối chứng, với hiệu quả rõ rệt nhất ở tuổi 28 ngày. Ngoài ra, hỗn hợp chứa 20 % xỉ còn đạt cường độ nén vượt trội ở tuổi dài ngày, chứng tỏ tiềm năng của xỉ như một vật liệu thay thế bền vững trong xây dựng.

Bên cạnh các nghiên cứu ở cấp độ vật liệu, việc nghiên cứu ở cấp độ cấu kiện cũng được một số tác giả thực hiện. Năm 2022, Nasrudin và cộng sự [25] nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng xỉ than để thay thế hoàn toàn cốt liệu mịn và cốt liệu thô trong đầm bê tông cốt thép. Các tổ hợp tỷ lệ nghiên cứu bao gồm: nhóm A: đầm đối chứng (sử dụng đá và cát truyền thống); nhóm B: thay thế hoàn toàn đá và cát sông bằng xỉ than; nhóm C: thay thế 100 % đá bằng xỉ thô và 50 % cát sông bằng xỉ mịn; nhóm D: thay thế 50 % đá bằng xỉ thô và 100 % cát sông bằng xỉ mịn. Kết quả nghiên cứu cho thấy đầm sử dụng 100 % xỉ thô và 100 % xỉ mịn đạt được cường độ uốn cực đại cao hơn 14,3 % so với mẫu đối chứng (sử dụng cốt liệu tự nhiên). Kết quả mô phỏng của Nasrudin và cộng sự [26] bằng phần mềm ABAQUS cho thấy mô hình

mô phỏng đã dự đoán chính xác ứng xử của đầm bê tông sử dụng xỉ than thay thế cát, với sai số về khả năng chịu uốn < 5 %. Nithya và cộng sự [27] nghiên cứu thực nghiệm so sánh độ dính bám của bê tông sử dụng xỉ than từ nhà máy nhiệt điện thay thế cát và bê tông thường bằng thí nghiệm kéo tuột. Có 6 mẫu được sử dụng trong nghiên cứu này, trong đó có 3 mẫu sử dụng xỉ than và 3 mẫu bê tông thường. Kết quả nghiên cứu cho thấy bê tông xỉ có cường độ chịu nén thấp hơn khoảng 2,64 % so với bê tông thường. Ngoài ra bê tông xỉ có cường độ bám dính gần như tương đương với bê tông đối chứng. Karalar và cộng sự [28] nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng ứng xử của đầm bê tông cốt thép khi sử dụng các tỷ lệ xỉ than khác nhau làm cốt liệu mịn thay thế cát. Các tỷ lệ thay thế gồm: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % và 100 %. Kết quả nghiên cứu cho thấy 75 % là tỷ lệ thay thế tối ưu.

Ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến sự thay đổi các đặc trưng cơ học của bê tông xỉ than thay thế cát tự nhiên cũng được một số tác giả nghiên cứu. Deepak và Yogesh [29] nghiên cứu thực nghiệm các tính chất nhiệt-cơ của bê tông khi sử dụng xỉ than thay thế 30 % cát tự nhiên. Các mẫu được thí nghiệm cháy ở các mức nhiệt độ 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C và 800 °C trong thời gian 1 giờ. Kết quả nghiên cứu cho thấy mức độ suy giảm khối lượng mẫu tăng theo thời gian bị cháy. Mức độ suy giảm này tăng từ 1,08 % ở 100 °C lên 2,34 % ở 800 °C đối với bê tông thường. Trong khi đó, đối với bê tông xỉ, tỷ lệ mất khối lượng tăng từ 1,54 % ở 100 °C lên 2,85 % ở 800 °C. Việc thay thế một phần cốt liệu mịn bằng xỉ không làm suy giảm đáng kể cường độ chịu lực của bê tông, cho thấy khả năng duy trì độ bền tương đương với mẫu bê tông đối chứng. Ahn và cộng sự [30] nghiên cứu đánh giá khả năng chịu nhiệt của bê tông nhẹ có sử dụng xỉ than tái chế và tro bay. Các mẫu bê tông được thí nghiệm cháy ở nhiệt độ lên đến 800 °C, sau đó làm nguội về nhiệt độ phòng trước khi tiến hành các thí nghiệm. Kết quả cho thấy cường độ còn lại sau khi bị cháy của bê tông xỉ cao hơn đáng kể so với bê tông thường. Do vậy việc bổ sung tro than vào cấp phối bê tông nhẹ giúp cải thiện khả năng chịu nhiệt, mở ra tiềm năng ứng dụng trong các công trình yêu cầu vật liệu bền nhiệt. Trong khi đó Zhang và Poon [31] sử dụng xỉ than để thay thế cát nghiên chế tạo bê tông nhẹ. Kết quả thử nghiệm hệ số dẫn nhiệt cho thấy việc sử dụng cốt liệu nhẹ có cấu trúc rỗng giúp giảm hệ số dẫn nhiệt xuống khoảng 70 % so với mẫu đối chứng. Yang và Park [32] nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của việc thay thế cốt liệu mịn bằng xỉ than và tác động của thời gian bảo dưỡng đến các đặc tính nhiệt của bê tông cường độ cao. Các tỷ lệ thay thế cốt liệu xỉ được nghiên cứu gồm 25 %, 50 %, 75 % và 100 %, với thời gian bảo dưỡng là 28 và 56 ngày. Các đặc tính nhiệt và cơ học như khối lượng riêng, độ dẫn nhiệt, cường độ nén và tốc độ truyền sóng siêu âm đã được đo lường. Kết quả nghiên cứu cho thấy khối lượng riêng của bê tông xỉ giảm khi tỷ lệ thay thế cốt liệu mịn bằng xỉ tăng lên. Sự giảm này là do xỉ có khối lượng riêng thấp hơn và độ rỗng cao hơn so với cốt liệu mịn thông thường. Ngoài ra, độ dẫn nhiệt của bê tông xỉ phụ thuộc chủ yếu vào hàm lượng xỉ. Bên cạnh đó, độ dẫn nhiệt của bê tông xỉ tăng theo thời gian bảo dưỡng. Khi thời gian bảo dưỡng tăng từ 28 lên 56 ngày, độ dẫn nhiệt của bê tông tăng từ 3,1 % đến 6,5 %.

Ở Việt Nam xi than từ các nhà máy nhiệt điện thường được nghiền cứu thay thế cát ứng dụng cho mặt đường bê tông xi măng [33] sản xuất bê tông nhựa nóng [34], san lấp [35], hay sử dụng xi than thay thế cát kết hợp với geopolimer chế tạo hỗn hợp bê tông [36]. Nhìn chung các nghiên cứu này đều cho thấy hiệu quả của việc sử dụng xi than thay thế một phần hay toàn bộ cát tự nhiên, góp phần làm giảm chất thải rắn, tiết kiệm tài nguyên và thúc đẩy xây dựng bền vững.

Các tài liệu tổng quan cho thấy xi than là vật liệu tiềm năng có thể thay thế cốt liệu mịn trong bê tông. Tuy nhiên, phần lớn nghiên cứu mới dừng ở cấp độ vật liệu, rất ít các nghiên cứu mở rộng sang ứng dụng thực tế cho cấu kiện chịu lực, đặc biệt chưa có nghiên cứu về ứng xử của đầm BTCT dùng xi than dưới tác dụng nhiệt độ cao. Bài báo này nghiên cứu thực nghiệm đánh giá khả năng chịu tải còn lại sau cháy của đầm BTCT dùng xi thay thế cát tự nhiên. Thí nghiệm được thực hiện trên tám đầm, chia thành hai nhóm: nhóm 1 gồm bốn đầm dùng cát sông, nhóm 2 gồm bốn đầm tương tự nhưng dùng xi than. Mỗi nhóm có một đầm đối chứng không thí nghiệm cháy, ba đầm còn lại được thí nghiệm cháy ở các khoảng thời gian 20 phút, 40 phút và 60 phút. Sau khi thí nghiệm cháy, các đầm được để nguội đến nhiệt độ môi trường và sau đó được thí nghiệm uốn 3 điểm bởi lực tập trung đặt ở giữa nhịp. Ứng xử của các đầm thí nghiệm sau đó được phân tích.

2. Vật liệu và cấu tạo đầm thí nghiệm

2.1. Vật liệu

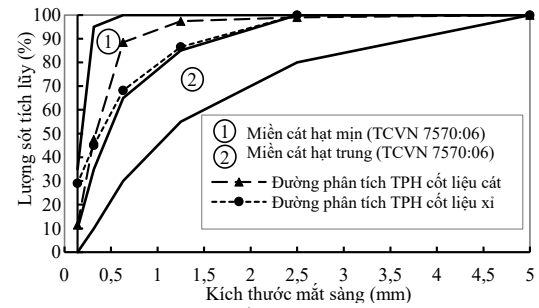
Cát được sử dụng trong nghiên cứu này được khai thác từ sông Hậu, có mô đun độ lớn là 1,86. Cốt liệu đá được sử dụng là đá Biên Hòa, có $D_{max} = 20$ mm. Nguồn xi được lấy từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải-Trà Vinh. Một số tính chất vật lý của xi được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Đặc trưng vật lý của xi than.

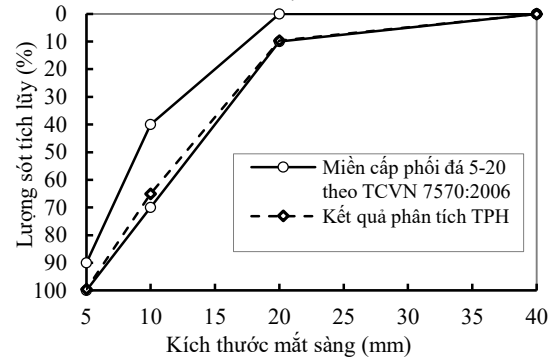
Chỉ tiêu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng riêng	1,96	g/cm^3
Mô đun độ lớn	2,33	

Hình 1a thể hiện kết quả phân tích thành phần hạt (TPH) của cốt liệu cát sông và xi. Hình 1b thể hiện kết quả phân tích thành phần hạt của đá. Các cốt liệu được so sánh với tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 [37].

Thành phần cấp phối cho $1m^3$ bê tông thường được thể hiện trong Bảng 2. Trong trường hợp cát được thay thế bởi xi than, khối lượng này được xác định dựa trên nguyên lý: thể tích thay thế của xi bằng thể tích của cát. Cường độ chịu nén trung bình của bê tông thường được thí nghiệm trên 3 viên mẫu lập phương tiêu chuẩn $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ở 28 ngày tuổi là 30,0 MPa, thấp hơn cường độ chịu nén của bê tông xi (37,2 MPa). Kết quả này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Souza [17] và Kim [38].



a) TPH cốt liệu cát và xi



b) TPH cốt liệu đá

Hình 1. Kết quả phân tích thành phần hạt của cát, xi, và đá.

Bảng 2. Thành phần bê tông.

Loại bê tông	Xi măng (kg)	Đá (kg)	Cát sông (kg)	Xi than (kg)	Nước (lít)
Đối chứng	486	1281	459	-	204
100 % xi	486	1281	-	341	204



a) Cốt thép



b) Cốt thép $\phi 6$



c) Cốt thép $\phi 8$



d) Cốt thép $\phi 14$

Hình 2. Các loại đường kính cốt thép và thí nghiệm kéo.

Cốt thép được sử dụng trong nghiên cứu là thép Miền Nam. Cốt thép dọc ở miền chịu kéo có đường kính 14 mm. Cốt thép dọc ở miền chịu nén có đường kính 8 mm, Thép đai có đường kính 6 mm. Hình 2 thể hiện các cốt thép được sử dụng trong nghiên cứu và thí nghiệm kéo cốt thép.

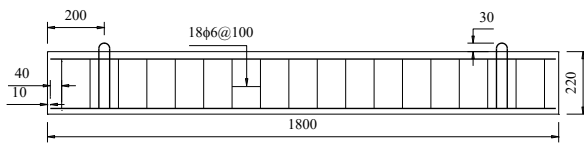
Bảng 3 thể hiện kết quả thí nghiệm cường độ chịu kéo của cốt thép và so sánh với tiêu chuẩn TCVN 1651-1:2018 [39] và TCVN 1651-2:2018 [40].

Bảng 3. Cường độ chịu kéo của cốt thép.

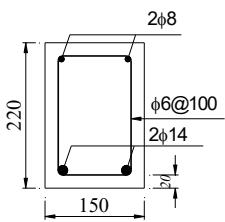
STT	Đường kính (mm)	Giới hạn chảy (MPa)		Giới hạn bền (MPa)	
		Thí nghiệm TCVN 1651:2018	≥ 300	Thí nghiệm TCVN 1651:2018	≥ 440
1	6	336,1	≥ 300	475,8	≥ 440
2	8	326,5	≥ 300	470,4	≥ 440
3	14	383,2	≥ 300	566,0	≥ 450

2.2. Cấu tạo dầm thí nghiệm và chế tạo mẫu

Dầm thí nghiệm có tiết diện chữ nhật $b \times h = 150 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$, chiều dài 1800 mm. Ở miền chịu kéo cốt thép được bố trí 2φ14, miền chịu nén gồm 2φ8. Cốt thép đai có đường kính 6 mm, khoảng cách cốt đai 100 mm. Bề dày lớp bê tông bảo vệ (tính từ mặt ngoài bê tông đến mép cốt đai) là 20 mm. Hình 3 thể hiện mặt cắt dọc, mặt cắt ngang của dầm thí nghiệm.



a) Mặt cắt dọc



b) Mặt cắt ngang



c) Hình ảnh cốt thép dầm sau khi lắp đặt

Hình 3. Cấu hình dầm thí nghiệm.

3. Chương trình thí nghiệm

3.1. Thí nghiệm cháy

Tổng cộng có tám dầm được chế tạo trong chương trình thực nghiệm này. Các dầm này được chia thành hai nhóm B và S. Mỗi nhóm gồm bốn dầm, trong đó một dầm trong mỗi nhóm không thí nghiệm cháy, được dùng làm mẫu đối chứng. Ba dầm còn lại được thí nghiệm cháy tương ứng với thời gian 20 phút, 40 phút và 60 phút. Nhóm N có

bốn dầm BTCT sử dụng cốt liệu mịn là cát sông, có các ký hiệu BN-0, BN-1, BN-2 và BN-3. Nhóm S gồm bốn dầm BTCT có cấu hình giống nhóm N, nhưng sử dụng xỉ thay thế cát, được ký hiệu BS-0, BS-1, BS-2 và BS-3. Tên các nhóm và thời gian thí nghiệm cháy được tổng hợp như Bảng 4.

Bảng 4. Phân nhóm mẫu thí nghiệm.

STT	Nhóm	Ký hiệu/tên mẫu	Thời gian cháy (phút)
1	N	BN-0	0
2		BN-1	20
3		BN-2	40
4		BN-3	60
1	S	BS-0	0
2		BS-1	20
3		BS-2	40
4		BS-3	60

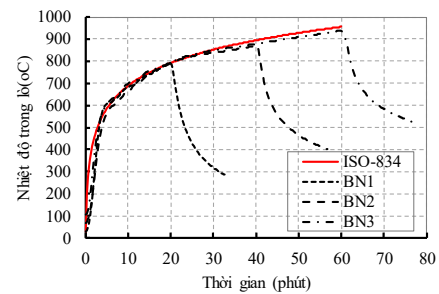


a) Trước khi đặt nắp lò

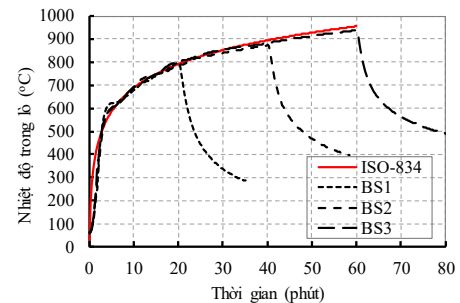


b) Sau khi đặt nắp lò

Hình 4. Dầm được lắp đặt trong lò đốt.



a) Nhóm dầm bê tông thường



b) Nhóm dầm bê tông xỉ

Hình 5. Nhiệt độ trong lò đốt theo thời gian cháy của 2 nhóm dầm thí nghiệm.

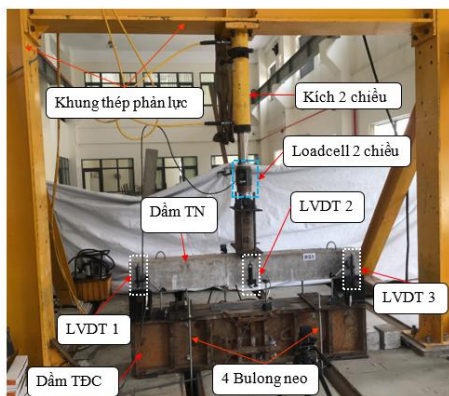
Các dầm sau khi được chế tạo và bảo dưỡng, sẽ tiếp tục để khô trong điều kiện tự nhiên trước khi tiến hành thí nghiệm cháy. Hình 3 thể hiện một dầm được lắp đặt trong lò đốt, chuẩn bị thí nghiệm cháy. Dầm được thí nghiệm cháy 4 mặt. Trong quá trình thí nghiệm cháy dầm chỉ chịu tải trọng bản thân. Nguyên liệu đốt là dầu. Nhiệt độ trong lò được thu thập thông qua bộ cảm biến nhiệt độ. Nhiệt độ trong lò được thu thập sau mỗi 15 giây và được điều chỉnh sao cho nhiệt độ bám sát theo đường cong cháy tiêu chuẩn ISO 834. Sau khi thí nghiệm cháy kết thúc, dầm được để nguội trong lò đến nhiệt độ phòng, rồi sau đó cẩu ra khỏi lò thí nghiệm cháy.

Hình 5 thể hiện nhiệt độ trong lò đốt của 2 nhóm dầm thí nghiệm ứng với các thời gian cháy 20 phút, 40 phút, và 60 phút và so sánh với đường cong cháy theo tiêu chuẩn ISO 834. Trên biểu đồ cho thấy, nhiệt độ trong lò đốt bám sát với nhiệt độ theo đường cong cháy tiêu chuẩn.

3.2. Thí nghiệm gia tải

Sơ đồ bố trí, lắp đặt các thiết bị thí nghiệm uốn dầm được minh họa trên Hình 6. Dầm được thí nghiệm uốn 3 điểm bởi lực tập trung đặt ở giữa nhịp. Chiều dài nhịp tính toán là 1660 mm. Lực tác dụng lên dầm được tạo ra bởi kích thủy lực. Giá trị lực được ghi nhận thông qua cảm biến lực (Load cell). Chuyển vị của dầm được đo ở 3 vị trí thông qua chuyển vị kế LVDT. Trong đó 1 chuyển vị kế được đặt ở giữa nhịp, hai chuyển vị kế còn lại được lắp đặt ở vị trí gối nhằm đo chuyển vị gối (nếu có) trong quá trình gia tải. Chuyển vị của dầm ở giữa nhịp là giá trị chuyển vị ở giữa nhịp trừ đi giá trị trung bình của hai chuyển vị tại gối.

Sau khi các thiết bị được lắp đặt, dầm được gia tải với tốc độ 0,1 mm/s cho đến khi dầm bị phá hoại. Các giá trị lực và chuyển vị được thu thập đồng thời và liên tục thông qua bộ thu thập dữ liệu (Datalogger) trong suốt quá trình gia tải.



Hình 6. Sơ đồ bố trí thiết bị thí nghiệm uốn dầm.

4. Thảo luận và phân tích kết quả

4.1. Cơ chế phá hoại

Hình 7 minh họa dạng phá hoại điển hình của các dầm trong thí nghiệm sau cháy 40 phút. Trên hình ta thấy phá hoại xảy ra tập trung chủ yếu ở vị trí giữa nhịp. Khi giá trị tải trọng nhỏ, quan hệ ứng

suất–biến dạng là tuyến tính. Khi lực tác dụng vượt quá giá trị cường độ chịu kéo của bê tông thì các vết nứt của bê tông ở miền chịu kéo phát triển theo hướng vuông góc với trục dầm, và phát triển dần lên vùng chịu nén. Khi tải trọng tiếp tục tăng, cốt thép trải qua giai đoạn biến dạng dẻo nhưng dầm vẫn còn khả năng chịu lực nhờ vào khả năng chịu lực của bê tông vùng chịu nén. Khi chuyển vị lớn, ứng suất nén vượt quá cường độ chịu nén của bê tông dẫn đến hiện tượng phá hoại bê tông xảy ra trên vùng chịu nén, lúc này dầm bị phá hoại cục bộ, tập trung ở vị trí giữa nhịp dầm. Dầm BTCT sử dụng cát tự nhiên và dầm BTCT sử dụng xi thay thế cát có cơ chế phá hoại tương tự nhau.



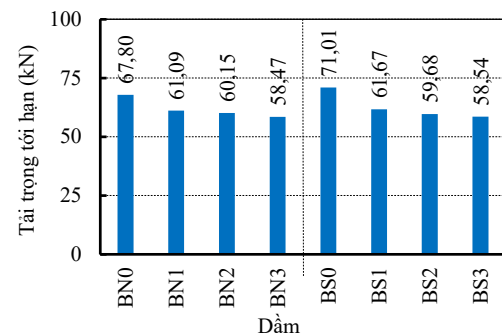
a) Dầm BN2



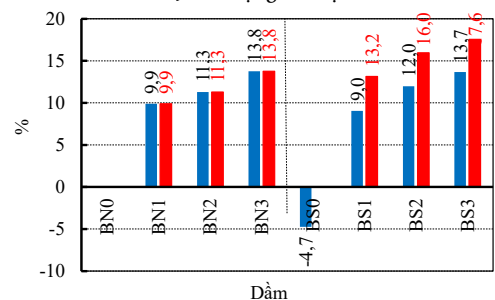
b) Dầm BS2

Hình 7. Dạng phá hoại các dầm thí nghiệm sau cháy 40 phút.

4.2. Tải trọng tới hạn



a) Tải trọng tới hạn



b) So sánh

Hình 8. Tải trọng tới hạn.

Hình 8 trình bày tải trọng tới hạn của các dầm thí nghiệm. Các dầm này được chia thành hai nhóm: nhóm B và nhóm S. Dầm BN0 có tải trọng tới hạn là 67,8 kN. Khi bị cháy 20, 40, và 60 phút, tải trọng tới

hạn của các dầm BN1, BN2, và BN3 lần lượt giảm xuống còn 61,09 kN, 60,15 kN, và 58,47 kN. Do đó, so với tải trọng của dầm đối chứng BN0, tải trọng tới hạn của dầm BN1, BN2, và BN3 giảm lần lượt là 9,9 %, 11,3 %, và 13,8 %. Sự khác biệt nhau về thời gian cháy từ 20, 40 và 60 phút, nhưng mức độ giảm tải trọng tới hạn có độ dao động không đáng kể (từ 9,9 % đến 13,8 %). Như vậy, độ giảm trung bình của các dầm là khoảng 10 %. Điều này được giải thích là do các dầm được thí nghiệm sau cháy và để nguội đến nhiệt độ thường. Quá trình làm nguội đã làm các đặc trưng cơ học của cốt thép được phục hồi. Lửa có tác dụng làm suy giảm cường độ chịu nén của bê tông. Tuy nhiên, cường độ chịu nén của bê tông không được phục hồi khi nhiệt độ nguội về nhiệt độ thường. Đây là lý do chính làm cho suy giảm khả năng chịu tải của dầm. Một vấn đề nữa là mức độ suy giảm không đáng kể. Điều này được giải thích là khi bị cháy, đi từ ngoài vào trong trọng tâm tiết diện, nhiệt độ giảm dần. Nhiệt độ cao nhất là ở bề mặt dầm. Điều này dẫn đến chỉ có một lớp bê tông có bề dày nào đó bị suy giảm đáng kể cường độ. Phần còn lại của bê tông không bị suy giảm cường độ. Đây chính là lý do các dầm có mức độ giảm khả năng chịu uốn khá gần nhau và xấp xỉ khoảng 10 %.

Đối với dầm nhóm dầm bê tông cốt liệu xi, dầm đối chứng BS0 có tải trọng tới hạn là 71,01 kN, cao hơn 4,7 % so với dầm bê tông cốt liệu thường BN0. Điều này được giải thích là do cường độ bê tông cốt liệu xi cao hơn so với bê tông cốt liệu thường như đã trình bày trong phần 2.1. Tuy nhiên, mức độ cao hơn chỉ 4,7 % do tải trọng tới hạn không những phụ thuộc vào bê tông mà còn phụ thuộc vào cốt thép chịu kéo. Cụ thể, cốt thép chịu kéo của các dầm này giống nhau. Do đó, sự khác nhau về tải trọng tới hạn của hai dầm này là do cường độ chịu nén của bê tông của chúng khác nhau.

Khi bị cháy 20, 40, và 60 phút, tải trọng tới hạn của các dầm BS1, BS2, và BS3 lần lượt giảm còn 61,67 kN, 59,68 kN, và 58,54 kN. Như vậy, tải trọng tới hạn của các dầm BS1, BS2, và BS3 lần lượt giảm 13,2 %, 16,0 %, và 17,6 % (trung bình 15,6 %) so với tải trọng tới hạn của dầm BS0. Do đó, mức độ suy giảm tải trọng tới hạn của dầm cốt liệu xi có phần cao hơn so với dầm bê tông cốt liệu thường khoảng 5 %.

Mặc dù có sự khác nhau về các mức độ suy giảm, Hình 6 còn cho thấy một điểm đặc biệt sau: tải trọng tới hạn của các dầm có cùng thời gian cháy là gần bằng nhau. Cụ thể, dầm BN1 và BS1 có tải trọng tới hạn là 61,09 kN và 61,67 kN (khá gần nhau). Dầm BN2 và BS2 có tải trọng tới hạn là 60,15 kN và 59,68 kN. Dầm BN3 và BS3 có tải trọng tới hạn là 58,47 kN và 58,54 kN.

5. Kết luận

Bài báo nghiên cứu khả năng chịu uốn sau cháy của dầm bê tông cốt liệu xi và so sánh với dầm bê tông sử dụng cát tự nhiên. Các dầm được thí nghiệm cháy trong 0, 20, 40 và 60 phút, sau đó để nguội tự nhiên. Thí nghiệm uốn ba điểm được tiến hành, khả năng chịu uốn của các dầm sau cháy được phân tích. Một số kết luận có thể được rút ra như sau:

- Với độ sụt thấp, cường độ chịu nén của bê tông cốt liệu xi có

thể cao hơn so với bê tông cốt liệu thường. Nguyên nhân có thể là do trong xi có chứa thành phần tro bay. Với một lượng nước vừa đủ, tro bay tham gia vào quá trình phản ứng hóa học (với Canxi Hydro Xít) trong quá trình thủy hóa xi măng, tạo ra các Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). Đây là sản phẩm chính tạo nên cường độ của bê tông.

- Phá hoại uốn là cơ chế phá hoại chính của các dầm thí nghiệm. Các dầm bê tông cốt liệu xi và bê tông cốt liệu cát có dạng phá hoại giống nhau, kể cả ở điều kiện thường và khi bị cháy.

- Với cấu hình dầm như nhau, dầm bê tông cốt xi có tải trọng tới hạn cao hơn 4,7 % so với dầm bê tông cốt liệu thường. Khi bị cháy từ 20 đến 60 phút, tải trọng tới hạn của dầm bê tông cốt liệu thường giảm khoảng từ 9,9 % đến 13,8 % (trung bình 10 %) và tải trọng tới hạn của dầm bê tông cốt liệu xi giảm khoảng từ 13,2 % đến 17,6 % (trung bình 15,6 %) so với dầm đối chứng của chúng.

- Với cùng một thời gian cháy, dầm bê tông cốt liệu thường và bê tông cốt liệu xi có tải trọng tới hạn xấp xỉ nhau. Điều này được giải thích là do tải trọng tới hạn phụ thuộc vào không những cường độ của bê tông mà còn phụ thuộc vào cường độ chịu kéo của cốt thép. Cường độ bê tông suy giảm nhưng không phục hồi đã làm khả năng chịu tải của dầm giảm. Tuy nhiên, cường độ chịu kéo của cốt thép có thể được phục hồi hoàn toàn sau khi nguội. Yếu tố này là giống nhau với các dầm có thời gian cháy giống nhau.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Xây dựng Miền Tây và Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG TP. HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. P. Imbrish, "Replacement of river sand by manufactured sand soncrete," Int. J. Eng. Res. Technol., vol. 7, no. 11, pp. 1–5, 2019.
- [2]. G. L. O. Bal, E. N. Gin, T. N. O. L. O. Gis, and T. S. Review, "Partial replacement of natural river sand with crushed rock sand in concrete production," Glob. Eng. & Technologists Rev., vol. 3, no. 4, pp. 7–14, 2013.
- [3]. Tiêu chuẩn Quốc gia, "Tiêu chuẩn Quốc gia, TCVN 9205-2012: Cát nghiền cho bê tông và vữa." pp. 1–7, 2012.
- [4]. P. V. Q. Lê Việt Hùng, "Nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng cát biển làm cốt liệu cho bê tông," Vật liệu và Xây dựng, vol. 01, no. 11, pp. 18–24, 2021, doi: doi.org/10.54772/jomc.1.2021.44.
- [5]. V. N. T.-N. T. Đ.-V. N. L.-T. V. L.-N. N. Dũng, "Nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng cát biển chế tạo bê tông đầm lăn làm lớp mặt đường giao thông nông thôn," Vật liệu xây dựng-Môi trường, no. 2, pp. 40–49, 2024, doi: https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol2-.
- [6]. S. C. K. Ashwini Manjunath B T, Lakshmi K, Kiran M S, "Use of sea sand in partial replacement of river sand in concrete for construction," Int. J. Innov. Sci. Res. Technol., vol. 3, no. 6, pp. 653–655, 2018.
- [7]. B. M. S. Gopinatha, N. N. D. Adesh, V. Rao, and S. Parasnath, Incorporating sea sand into self - compacting concrete: a systematic review. Springer International Publishing, 2024.
- [8]. S. A. Yaseen, D. Pan, C. K. Y. Leung, Z. Li, C. Bay, and H. Kong, "The impact of using seawater and sea sand for the production of concrete," in International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference (IIBCC), 2011, pp. 1–11.

- [9]. T. Bakoshi, K. Kohno, S. Kawasaki, and N. Yamaji, "Strength and durability of concrete using bottom ash as replacement for fine aggregate," *Spec. Publ.*, vol. 179, pp. 159–172, 1998.
- [10]. U. Chaisakulkiet, N. Makaratat, and S. Rukzon, "Development of aggregate from bottom ash in environmentally friendly concrete," *J. Met. Mater. Miner.*, vol. 32, no. 2, pp. 101–108, 2022, doi: 10.55713/jmmm.v32i2.1258.
- [11]. I. H. Yang, J. Park, N. Dinh Le, and S. Jung, "Strength Properties of High-Strength Concrete Containing Coal Bottom Ash as a Replacement of Aggregates," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/4246396.
- [12]. P. N. Ojha, A. Trivedi, B. Singh, and A. Singh, "Evaluation of mechanical and durability properties of concrete made with Indian bottom ash as replacement of fine aggregate," *J. Asian Concr. Fed.*, vol. 6, no. 2, pp. 50–65, 2020, doi: 10.18702/acf.2020.12.6.2.50.
- [13]. A. I. F. Ahmad Maliki et al., "Compressive and tensile strength for concrete containing coal bottom ash," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 271, no. 1, pp. 0–7, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/271/1/012055.
- [14]. A. S. Cadessa and I. Auckburally, "Use of unprocessed coal bottom ash as partial fine aggregate replacement in concrete," *Univ. Mauritius Res. J.*, vol. 20, pp. 62–84, 2014.
- [15]. Y. H. Kim, H. Y. Kim, K. H. Yang, and J. S. Ha, "Evaluation of workability and mechanical properties of bottom ash aggregate concrete," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 22, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/app10228016.
- [16]. R. Devanathan, V. Karthikeyan, S. Sujatha, and J. Anto, "Experimental investigation on partial replacement of fine aggregate by the effect of Coal bottom ash in concrete," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 983, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/983/1/012010.
- [17]. R. G. D'Souza, "Replacement of fine aggregate with bottom ash in concrete and investigation on compressive strength," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 6, no. 8, pp. 172–175, 2017.
- [18]. K. Soman, D. Sasi, and K. A. Abubaker, "Strength properties of concrete with partial replacement of sand by bottom ash," *Int. J. Innov. Res. Adv. Eng.*, vol. 1, no. 7, pp. 2349–2163, 2014.
- [19]. Y. Bai, F. Darcy, and P. A. M. Basheer, "Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, no. 9, pp. 691–697, 2005, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.021.
- [20]. L. B. Andrade, J. C. Rocha, and M. Cheriaf, "Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 609–614, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.003.
- [21]. H. K. Kim and H. K. Lee, "Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 1115–1122, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065.
- [22]. M. Singh and R. Siddique, "Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 246–256, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.026.
- [23]. M. Singh and R. Siddique, "Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 620–630, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.001.
- [24]. P. N. Prashanth and N. S. S. Reddy, "Performance of High Strength Concrete - Partially Replacing Fine Aggregate with Manufactured Sand," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 11, pp. 2079–2087, 2017, [Online]. Available: www.irjet.net.
- [25]. N. Nasrudin, N. F. Ariffin, A. Alias, A. M. Hasim, M. N. S. Zaimi, and M. R. Ashaari, "Structural performance of beam using high volume bottom ash as fine and coarse aggregate replacement," *Mater. Today Proc.*, vol. 48, pp. 1810–1815, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.130.
- [26]. N. N. Nasrudin, N. F. Ariffin, A. Alias, A. M. Hasim, and M. N. S. Zaimi, "Experimental Validation of Reinforced Concrete Beam Incorporating Coal Fly Ash and Coal Bottom Ash Using Numerical Analysis," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 228–236, 2023, doi: 10.30880/IJIE.2023.15.02.022.
- [27]. B. Nithya, P. Srinivasan, M. Suji, P. Lokesh Kumar, and M. E. Student, "A Comparative Study on Bond Strength of Reinforcing Steel in Bottom Ash Concrete and Controlled Concrete," *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. (An ISO)*, vol. 3297, no. 6, pp. 1770–1776, 2007, [Online]. Available: www.ijirset.com.
- [28]. M. Karalar, T. Bilir, M. Çavuşlu, Y. O. Özkiliç, and M. M. Sabri Sabri, "Use of recycled coal bottom ash in reinforced concrete beams as replacement for aggregate," *Front. Mater.*, vol. 9, no. November, pp. 1–19, 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.1064604.
- [29]. D. N. Nathe and Y. D. Patil, "Performance of coal bottom ash concrete at elevated temperatures," *Mater. Today Proc.*, vol. 65, pp. 883–888, 2022.
- [30]. Y. B. Ahn, J. G. Jang, and H. K. Lee, "Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 72, pp. 27–38, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.028.
- [31]. B. Zhang and C. S. Poon, "Use of Furnace Bottom Ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties," *J. Clean. Prod.*, vol. 99, pp. 94–100, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.03.007.
- [32]. I. H. Yang and J. Park, "A study on the thermal properties of high-strength concrete containing CBA fine aggregates," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 7, 2020, doi: 10.3390/ma13071493.
- [33]. P. V. D. Vũ Bá Thao, Phạm Văn Minh, "Nghiên cứu sử dụng xỉ đáy nhà máy nhiệt điện thuộc nhà máy Alumin Nhân Cơ Đắk Nông làm đường bê tông xi măng," pp. 39–46, 2019.
- [34]. H. N. T. Nguyễn Mạnh Tuấn, Lê Thị Thu Thủy, "Ảnh hưởng hàm lượng xỉ than thay thế cốt liệu mịn đến mô-đun đàn hồi tĩnh và lún trôi của hỗn hợp bê tông nhựa," *Khoa học Công nghệ*, no. 06, pp. 67–70, 2020.
- [35]. "Thí điểm dùng tro xỉ làm vật liệu thay thế cát dùng trong san lấp." 2024, [Online]. Available: <https://vatliexaydung.org.vn/tin-tuc/su-kien/thi-diem-dung-tro-xi-lam-vat-lieu-thay-the-cat-dung-trong-san-lap-19959.htm>.
- [36]. Đ. Đ. T. Võ Minh Nhật, "Nghiên cứu sử dụng xỉ than của công nghiệp nhiệt điện dùng chế tạo bê tông geopolymers," *Tạp chí Kinh tế - Công nghiệp*, no. 6, pp. 67–71, 2022.
- [37]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 7570 :2006. Cốt liệu cho bê tông và vữa-Yêu cầu kỹ thuật. 2006.
- [38]. Y.-H. Kim, H.-Y. Kim, K.-H. Yang, and J.-S. Ha, "Evaluation of workability and mechanical properties of bottom ash aggregate concrete," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 22, p. 8016, 2020.
- [39]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 1651-1: 2018. Thép cốt bê tông - Phần 1: Thép thanh tròn trơn. 2018.
- [40]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 1651-2:2018. Thép cốt bê tông-Phần 2: Thép thanh vằn. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.