

Nghiên cứu sử dụng phế thải kính, tro bay và sợi xơ dừa để chế tạo bê tông thân thiện với môi trường phục vụ xây dựng nhà ở trên địa bàn các tỉnh Tây Nam Bộ

Lê Nguyễn Thiện Huy^{1,*}, Võ Nhật Luân²

¹Công ty TNHH Xây dựng và thương mại Bình Trang

²Trường Đại học Văn Hiến

TỪ KHOÁ

Kính phế thải
Tro bay nhiệt điện
Sợi xơ dừa
Bê tông thân thiện môi trường
Cường độ nén
Tính công tác

TÓM TẮT

Trong bối cảnh các tỉnh Tây Nam Bộ đang đẩy mạnh phát triển các khu công nghiệp theo hướng hiện đại, bền vững và tiết kiệm chi phí, nhu cầu sử dụng vật liệu xây dựng có giá thành hợp lý, thân thiện với môi trường và tận dụng nguồn tài nguyên tái chế tại chỗ là vô cùng cấp thiết. Với các tỉnh khu vực Tây Nam Bộ, xơ dừa là một loại phế thải nông nghiệp rất phổ biến, tương tự như rơm rạ ở khu vực Bắc Bộ. Việc tận dụng xơ dừa làm vật liệu gia cường trong bê tông không chỉ góp phần nâng cao khả năng chống nứt và cải thiện một số đặc tính cơ học của vật liệu, mà còn giúp giảm giá thành sản phẩm do nguồn nguyên liệu rẻ và sẵn có. Nghiên cứu tập trung đánh giá khả năng chế tạo sản phẩm bê tông sử dụng các loại vật liệu tái chế gồm: hạt kính phế thải kính thay thế hoàn toàn đá dăm, tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1 thay thế 25 % hàm lượng xi măng Portland và sợi xơ dừa tự nhiên phân tán để tăng khả năng chống nứt cho bê tông. Các thí nghiệm được thực hiện trên hai cấp cường độ M300 và M400, với ba tỷ lệ thay thế kính là 0 %, 50 % và 100 %. Kết quả cho thấy, hỗn hợp bê tông có tính công tác phù hợp (độ sụt từ 17,5 ÷ 22,0 cm), cường độ nén ở 28 ngày dao động từ 34,5 MPa đến 50,5 MPa, mô đun đàn hồi từ 28,9 ÷ 35 GPa và cường độ kéo khi uốn đạt đến 8,2 MPa nhờ vào sự có mặt của sợi xơ dừa phân tán. Đặc biệt, độ hút nước thấp (nhỏ hơn 7,5 %) và khả năng chống thấm rất tốt đã chứng minh hiệu quả của hệ vật liệu trong cải thiện vi cấu trúc và độ đặc chắc của bê tông. Sản phẩm bê tông này phù hợp sử dụng trong các sàn nhà xưởng, móng máy, đường nội bộ khu công nghiệp với yêu cầu cơ học và môi trường khắt khe. Việc ứng dụng giải pháp này góp phần giảm chi phí vật liệu, rút ngắn thời gian thi công, từ đó nâng cao hiệu quả quản lý dự án và phát triển bền vững tại các khu công nghiệp Tây Nam Bộ.

KEYWORDS

Waste glass
Thermal power fly ash
Coir fiber
Environmentally friendly concrete
Compressive strength
Workability

ABSTRACT

In the context of the Mekong River Delta accelerating the development of modern, sustainable, and cost-efficient industrial zones, there is a crucial need for construction materials that are reasonably priced, environmentally friendly, and utilize local recycled resources. In the Mekong River Delta region, coir fiber is a very common agricultural waste product, similar to rice straw in the Northern region. Utilizing coir fiber as a reinforcing material in concrete not only helps to enhance crack resistance and improve certain mechanical properties of the material but also contributes to reducing product costs due to the cheap and readily available raw material source. This study focuses on evaluating the feasibility of producing concrete using various recycled materials: waste glass aggregates completely replacing crushed stone, Duyen Hai 1 thermal power plant fly ash replacing 25% of Portland cement content, and natural dispersed coir fibers to increase the concrete's crack resistance. Experiments were conducted on two strength grades, M300 and M400, with three glass replacement ratios: 0%, 50%, and 100%. The results show that the concrete mixture exhibited suitable workability (slump ranging from 17,5 ÷ 22,0 cm), compressive strength at 28 days varying from 34,5 MPa to 50,5 MPa, elastic modulus from 28,9 ÷ 35 GPa, and flexural tensile strength reaching up to 8,2 MPa due to the presence of dispersed coir fibers. Notably, low water absorption (less than 7,5%) and excellent impermeability demonstrated the effectiveness of the material system in improving the microstructure and compactness of the concrete. This concrete product is suitable for use in factory floors, machine foundations, and internal roads within industrial zones, meeting stringent mechanical and environmental requirements. Applying this solution helps reduce material costs and shorten construction time, thereby enhancing project management efficiency and promoting sustainable development in industrial zones of the Mekong River Delta.

*Liên hệ tác giả: huylelongan@gmail.com

Nhận ngày 21/07/2025, sửa xong ngày 24/07/2025, chấp nhận đăng ngày 26/07/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2025.1065>

1. Phần mở đầu

Trong giai đoạn phát triển công nghiệp và đô thị hóa nhanh tại khu vực Tây Nam Bộ, nhu cầu xây dựng cơ sở hạ tầng kỹ thuật, đặc biệt là tại các khu công nghiệp, ngày càng gia tăng [1, 2]. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc phát triển các loại vật liệu xây dựng bền vững, thân thiện với môi trường và có giá thành hợp lý nhằm đảm bảo hiệu quả kinh tế cho các dự án đầu tư hạ tầng, đồng thời đáp ứng định hướng phát triển xanh và mục tiêu NetZero đến năm 2050 của Chính phủ.

Trong khi đó, ngành xây dựng đang đối mặt với nhiều thách thức như giá vật liệu tăng cao, khai thác tài nguyên tự nhiên quá mức gây suy thoái môi trường và khối lượng lớn chất thải rắn công nghiệp – nông nghiệp chưa được tái chế hiệu quả. Các loại vật liệu như kính phế thải từ các nhà máy sản xuất kính tại khu công nghiệp Tây Nam Bộ và lân cận, tro bay từ các nhà máy nhiệt điện phía Nam, hay sợi xơ dừa từ các tỉnh đồng bằng sông Cửu Long hiện vẫn chưa được tận dụng triệt để trong lĩnh vực xây dựng.



Hình 1. Sợi xơ dừa – Nguồn nguyên liệu dồi dào khu vực Tây Nam Bộ.

Những năm gần đây, xu hướng phát triển công nghiệp đô thị tại Việt Nam, đặc biệt tại khu vực Tây Nam Bộ và các tỉnh lân cận, đã kéo theo nhu cầu rất lớn về vật liệu xây dựng có cường độ cao, tuổi thọ dài và thân thiện với môi trường [3]. Tuy nhiên, việc sử dụng bê tông truyền thống vẫn đang phụ thuộc nhiều vào nguồn tài nguyên không tái tạo như xi măng Portland và cốt liệu tự nhiên (đá dăm, cát), vốn không chỉ tiêu tốn năng lượng lớn trong quá trình sản xuất mà còn phát thải đáng kể khí CO₂ – một trong những tác nhân chính gây biến đổi khí hậu [4]. Trước yêu cầu cấp bách về bảo vệ môi trường và hướng đến nền kinh tế tuần hoàn, việc phát triển các loại bê tông xanh, tận dụng phế thải công nghiệp và nông nghiệp, đang trở thành một xu thế tất yếu trong nghiên cứu vật liệu xây dựng hiện đại [5, 6, 7].

Trong bối cảnh đó, kính phế thải là một loại vật liệu có tính tro hóa học, độ bền cơ học cao và khả năng tái sử dụng lớn, đang nổi lên như một nguồn cốt liệu thay thế đầy tiềm năng cho đá dăm trong thành phần bê tông. Khi được nghiền nhỏ và phối trộn hợp lý với các chất kết dính, kính tái chế có thể tham gia tích cực vào quá trình đóng rắn và cải thiện đặc tính bền lâu của vật liệu [8]. Cùng với đó, tro bay – phế

thải từ nhà máy nhiệt điện – đã được nhiều nghiên cứu chứng minh có khả năng thay thế một phần xi măng Portland nhờ vào hoạt tính pozzolanic và hiệu ứng điền đầy tốt, giúp giảm tiêu hao xi măng và nâng cao độ đặc chắc cho bê tông [9, 10]. Mặt khác, các loại sợi tự nhiên như sợi xơ dừa cũng cho thấy hiệu quả nhất định trong việc tăng khả năng chịu kéo, hạn chế vết nứt vi mô và cải thiện độ bền uốn của bê tông trong dài hạn.

Việc tích hợp đồng thời ba thành phần kính phế thải, tro bay siêu mịn và sợi xơ dừa, trong một hệ bê tông có sử dụng phụ gia siêu dẻo để tăng cường tính công tác, mở ra một hướng nghiên cứu có giá trị ứng dụng cao [11, 12]. Không chỉ giảm thiểu phát thải CO₂, tận dụng chất thải rắn, mà loại bê tông này còn hướng tới việc tối ưu hóa hiệu suất sử dụng vật liệu và thích ứng với yêu cầu kỹ thuật khắt khe trong xây dựng công nghiệp hiện đại [13, 4].

Bài báo này trình bày một số tính chất của sản phẩm bê tông thân thiện với môi trường với thành phần chính bao gồm: kính phế thải thay thế hoàn toàn đá dăm, tro bay thay thế một phần xi măng Portland, và sợi xơ dừa nhằm cải thiện khả năng chống nứt và tăng độ bền dẻo của bê tông, không chỉ góp phần giảm chi phí vật liệu xây dựng, mà còn hỗ trợ tái sử dụng chất thải, tiết kiệm tài nguyên, giảm phát thải khí nhà kính, phù hợp với điều kiện thực tiễn tại các khu công nghiệp khu vực Tây Nam Bộ. Đồng thời, nghiên cứu cho thấy tiềm năng phát triển vật liệu xanh từ vật liệu tại chỗ phù hợp với yêu cầu thực tiễn và định hướng phát triển của Chính phủ, góp phần quan trọng vào việc xây dựng nền công nghiệp bền vững và nền kinh tế tuần hoàn của Việt Nam.

2. Vật liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Các nguyên vật liệu sử dụng

a) Chất kết dính (CKD), gồm có:

- Xi măng Portland hỗn hợp PCB30 Vicem Holcim (XM) (Hình 2a);
- Tro bay nhận từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải 1 - Trà Vinh (TB)

(Hình 2b). Lượng tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1 sẽ thay thế từ 20 ÷ 30 % hàm lượng xi măng.

b) Cốt liệu (CL), gồm có:

- Cốt liệu nhỏ là cát đen hạt mịn của sông Vàm Cỏ Tây (CD) (Hình 3c). Cát đen hạt mịn sẽ thay thế hoàn toàn cát vàng hạt thô trong thành phần bê tông. Mục đích là giảm giá thành sản phẩm bê tông.

- Cốt liệu lớn sử dụng trong nghiên cứu này gồm hai loại:

- + Đá dăm (ĐD) từ đá vôi kích thước 5,0 ÷ 10 mm (Hình 3a);
- + Hạt kính và thủy tinh phế thải (KPT) với kích thước 5 ÷ 10 mm sẽ thay thế hoàn toàn đá dăm từ đá vôi tự nhiên (Hình 3b).

c) Sợi xơ dừa phân tán

Sợi xơ dừa (SXD) được gia công từ vỏ quả dừa, phơi sấy và cắt ngắn sợi xơ dừa để thuận tiện trong quá trình nhào trộn (Hình 4a). Đồng thời, sợi xơ dừa được sử dụng để tăng cường khả năng chống nứt cho hỗn hợp bê tông trong quá trình đông kết và rắn chắc.

d) Phụ gia siêu dẻo

Phụ gia siêu dẻo (PGSD) trong nghiên cứu này sử dụng sản phẩm SikaPlast®-298 của công ty Sika Việt Nam (Hình 4b). Đây là loại phụ

gia siêu dẻo gốc polycarboxylate ether thế hệ thứ 3, giúp giảm nước trộn, duy trì độ sụt lâu và phát triển cường độ sớm của sản phẩm bê tông sau khi tạo hình.

e) Nước nhào trộn và bảo dưỡng mẫu thí nghiệm

Nước sử dụng trộn mẫu trong nghiên cứu này là nước sạch sinh hoạt (N). Tính chất của nước nhào trộn phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 - “Nước trộn cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật”.



a) Xi măng PCB30 Vicem Holcim b) Tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1

Hình 2. Thành phần chất kết dính được sử dụng.



a) Đá dăm từ đá vôi với kích thước 5,0 ÷ 10 mm



b) Hạt kính phế thải với kích thước 5,0 ÷ 10 mm



c) Cát đen hạt mịn của sông Vàm Cỏ Tây

Hình 3. Thành phần cốt liệu sử dụng trong nghiên cứu.



a) Sợi xơ dừa phân tán



b) Phụ gia siêu dẻo

Hình 4. Sợi xơ dừa và phụ gia siêu dẻo.

2.2. Phương pháp sử dụng trong nghiên cứu

a. Thiết kế cấp phối bê tông M300 và M400 theo hướng dẫn thiết kế theo “Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại” theo quyết định số 778/1998/QĐ-BXD ngày 05/9/1998;

+ Lấy mẫu, đúc mẫu và bảo dưỡng mẫu bê tông được thực hiện theo TCVN 3105:2022;

+ Xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông được thực hiện theo TCVN 3106:2022;

+ Cường độ chịu nén của bê tông ở các tuổi khác nhau được xác định trên mẫu hình lập phương kích thước 150x150x150 mm theo TCVN 3118:2022;

+ Cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông ở các tuổi khác nhau được xác định trên mẫu hình lăng trụ kích thước 100x100x400 mm theo TCVN 3119:1993;

+ Độ thấm nước của mẫu bê tông cốt sợi phân tán cường độ cao được xác định trên mẫu hình trụ với kích thước $D \times H = 150 \times 150$ mm theo TCVN 3116:2002;

- So sánh với bê tông truyền thống (100 % xi măng, cát vàng, đá dăm tiêu chuẩn);

- Phân tích hiệu quả kinh tế và hiệu quả về môi trường.

b. Xác định cấp phối bê tông với thành phần chứa kính phế thải, sợi xơ dừa

- Hàm lượng kính thay thế bằng 0 %, 50 % và 100 % cốt liệu đá đầm tự nhiên;
- Hàm lượng tro bay trong nghiên cứu này sẽ thay đổi từ 25 % theo khối lượng xi măng;
- Hàm lượng sợi xơ dừa phân tán được sử dụng là 2,0 % theo khối lượng xi măng.

Tính toán cấp phối theo hướng dẫn của Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD ngày 05/9/1998, nghiên cứu đã xác định được thành phần cấp phối của các mẫu bê tông thí nghiệm như trong Bảng 1.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Các tính chất của hỗn hợp bê tông ở trạng thái dẻo

Tính công tác (độ sụt SN, tổn thất tính công tác sau 30 phút, 60 phút và khả năng phân tầng tách lớp) của hỗn hợp bê tông được thí nghiệm theo các tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành và trình bày trong Bảng 2.

Từ bảng kết quả thí nghiệm có thể thấy: Việc sử dụng thêm 1,0 % phụ gia siêu dẻo trong tất cả các mẫu bê tông là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến tính công tác (độ dẻo, độ chảy, giữ nước) của hỗn hợp, đặc biệt khi kết hợp với cốt liệu tái chế như hạt kính (hàm lượng 0 %, 50 %, 100 %) và sợi xơ dừa với hàm lượng 2,0 %.

a. Tác động của hạt kính phế thải đến tính công tác

Trong quá trình thực nghiệm cho thấy, hạt kính có bề mặt nhẵn, hình dạng tròn hơn, độ hút nước thấp nên hỗn hợp bê tông chứa kính có xu hướng giữ nước tự do nhiều hơn, giảm ma sát giữa các hạt. Vì vậy, hạt kính phế thải có hiệu ứng tăng độ sụt, cải thiện tính công tác [14].

Càng tăng tỷ lệ kính (từ M300-01 đến M300-03 và M400-01 đến M400-03), độ sụt ban đầu và duy trì sau 60 phút đều tăng rõ rệt, độ giảm sụt ít đi, cho thấy hỗn hợp dẻo hơn, ít mất nước hơn hỗn hợp bê tông sử dụng đá vôi.

b. Ảnh hưởng của sợi xơ dừa (2 %) đến tính công tác

Xơ dừa là vật liệu có tính hút nước, cản dòng chảy của hỗn hợp bê tông nên thành phần này có xu hướng làm giảm độ sụt, giảm tính công tác do hấp thụ nước trộn, đồng thời cản trở sự chảy của hỗn hợp bê tông [1].

Tuy nhiên, trong các giới hạn nghiên cứu, sợi xơ dừa không làm suy giảm quá nhiều tính công tác của hỗn hợp bê tông nhờ tác động của tổ hợp phụ gia: kính phế thải với khả năng hút nước thấp, tro bay nhiệt điện làm tăng cường thành phần hạt mịn và phụ gia siêu dẻo giúp cải thiện khả năng chảy của hỗn hợp.

c. Vai trò của phụ gia siêu dẻo trong thành phần của bê tông

Theo nhiều công bố nghiên cứu đã [15, 16, 17] cho thấy, phụ gia siêu dẻo có khả năng: giảm nước trộn mà vẫn đảm bảo độ sụt cao và phân tán hạt xi măng tốt hơn, giảm ma sát nội bộ. Do đó, phụ gia siêu dẻo là thành phần quan trọng tăng độ chảy và độ linh động của hỗn hợp, đặc biệt khi có sợi hoặc cốt liệu hình học không chuẩn. Từ kết quả thí nghiệm trong Bảng 2 cho thấy rõ ràng: ngay cả khi chứa 2 % xơ dừa, tất cả các mẫu đều đạt độ sụt từ 17 ÷ 22 cm, cao và ổn định theo

thời gian, đặc biệt là với mẫu M300-03 có độ sụt SN = 20,5 cm đến 19,0 cm và với mẫu M400-03 có độ sụt SN = 22,0 cm đến 18,5 cm.

Điều đó chứng minh rằng phụ gia siêu dẻo kết hợp kính phế thải giúp duy trì tính công tác cực kỳ tốt, ngay cả trong điều kiện có xơ dừa.



a) Xác định khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông

b) Xác định tính công tác của hỗn hợp bê tông



c) Bảo dưỡng các mẫu bê tông thí nghiệm

Hình 5. Xác định các tính chất của hỗn hợp bê tông.

Việc phối hợp sử dụng hạt kính phế thải với sợi xơ dừa và phụ gia siêu dẻo đã chứng minh hiệu quả cao trong việc cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông. Mặc dù xơ dừa có xu hướng hút nước, nhưng sự hiện diện của kính với bề mặt trơn nhẵn và phụ gia siêu dẻo đã giúp duy trì độ sụt ở mức cao, ổn định trong 60 phút sau khi trộn. Đây là cơ sở để mở rộng ứng dụng tổ hợp vật liệu này vào sản xuất cấu kiện bê tông xanh thân thiện môi trường.

3.2. Kết quả tính chất của bê tông ở trạng thái cứng rắn

Các kết quả thí nghiệm về tính chất của bê tông ở trạng thái cứng rắn được trình bày trong Bảng 3.

a. Ảnh hưởng của hàm lượng hạt kính phế thải đến cường độ nén và sự phát triển cường độ theo thời gian

Kết quả tại Bảng 3 cho thấy cường độ nén của bê tông tăng đều khi hàm lượng hạt kính phế thải thay thế cốt liệu đá đầm tự nhiên tăng từ 0 % đến 100 %. Với bê tông mác M300, cường độ nén trung bình tại 28 ngày của mẫu M300-03 (100 % kính) đạt 39,8 MPa, cao hơn 15,4 % so với mẫu đối chứng M300-01 (34,5 MPa). Tương tự, với bê tông mác M400, mẫu M400-03 đạt tới 50,5 MPa sau 28 ngày, cao hơn 14,3 % so với mẫu không chứa kính (M400-01, 44,2 MPa).

Hiệu ứng này có thể được lý giải bởi đặc điểm hình dạng tròn nhẵn, kích thước đồng đều và khả năng hút nước rất thấp của hạt kính, giúp tăng độ đặc chắc của bê tông, giảm khoảng rỗng giữa các hạt cốt liệu. Ngoài ra, kính có thành phần chính là SiO_2 dạng vô định hình, có khả năng tham gia phản ứng pozzolanic với Ca(OH)_2 sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng, góp phần hình thành các sản phẩm C-S-H bổ sung, cải thiện cấu trúc vi mô và tăng cường độ [18, 19].

Tốc độ phát triển cường độ của tất cả các mẫu bê tông đều rất nhanh trong 14 ngày đầu. Các mẫu bê tông đạt từ 86,9 % đến 91,9 % cường độ 28 ngày tại tuổi 14 ngày, cho thấy sự phát triển sớm tốt, phù hợp với các yêu cầu về thi công nhanh hoặc chế tạo cấu kiện đúc sẵn [17, 20]. Đặc biệt, cường độ 3 ngày chiếm trung bình từ 47 % đến 50 % của cường độ 28 ngày, cho thấy ảnh hưởng tích cực từ việc bổ sung 1,0 % phụ gia siêu dẻo, giúp tăng khả năng phân tán hạt xi măng, tăng độ đặc chắc của bê tông ở giai đoạn sớm.

b. Mô đun đàn hồi tĩnh của bê tông

Mô đun đàn hồi tĩnh của bê tông trong thí nghiệm dao động từ 28,9 đến 35,0 GPa, tăng dần theo mức bê tông và tỷ lệ kính thay thế. Với bê tông M300, mô đun đàn hồi tăng từ 28,9 GPa (0 % kính) lên 31,5 GPa (100 % kính). Với bê tông M400, giá trị này tăng từ 32,8 GPa lên đến 35,0 GPa. Sự gia tăng này có liên quan trực tiếp đến cường độ nén cũng như độ đặc chắc và khả năng phân bố ứng suất nội bộ tốt hơn khi sử dụng cốt liệu kính có kích thước đồng đều và bề mặt ít nhám.

Ngoài ra, việc bổ sung 2 % sợi xơ dừa trong tất cả các hỗn hợp bê tông cũng góp phần cải thiện mô đun đàn hồi theo cơ chế gia cường, giảm ứng suất tập trung tại các vi khe nứt nhỏ, tuy nhiên không ảnh hưởng tiêu cực đến độ đặc chắc nhờ hiệu ứng kết hợp với phụ gia siêu dẻo.

c. Ảnh hưởng của sợi xơ dừa đến cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông

Bảng kết quả thí nghiệm cho thấy, cường độ chịu kéo khi uốn của các mẫu bê tông tăng đáng kể theo hàm lượng kính phế thải thay thế và có tỷ lệ cao so với cường độ nén. Cụ thể, các mẫu M300-01, M300-02 và M300-03 có cường độ kéo khi uốn lần lượt là 5,8 MPa, 6,4 MPa và 6,8 MPa; tương ứng với 16,8 %, 17,3 % và 17,1 % so với cường độ nén cùng tuổi. Các mẫu M400 có giá trị tương tự tăng dần, với M400-03 đạt mức cao nhất là 8,2 MPa, chiếm tới 16,2 % cường độ nén 28 ngày. Tỷ lệ này cao hơn đáng kể so với bê tông không sử dụng sợi gia cường, vốn thường chỉ đạt khoảng $10 \div 12$ % theo các nghiên cứu truyền thống.

Kết quả này khẳng định rằng sợi xơ dừa có vai trò rõ rệt trong việc nâng cao khả năng chịu kéo của bê tông, đặc biệt là khả năng chịu uốn và chống nứt. Khi chịu tải uốn, bê tông xuất hiện các vi khe nứt ở vùng chịu kéo. Trong hệ bê tông có sợi, các sợi xơ dừa được phân tán đều trong hỗn hợp đã đóng vai trò liên kết khe nứt, hấp thụ năng lượng phá hủy và chuyển tải ứng suất qua vùng hư hỏng cục bộ, từ đó làm chậm sự lan truyền nứt và tăng cường độ uốn cuối cùng. Ngoài ra, đặc tính dẻo, dai, khả năng kéo đứt tốt và độ bám dính cơ học tương đối của sợi xơ dừa với nền xi măng đã góp phần tích cực vào hiệu ứng gia cường này.

Hiệu quả gia cường của sợi còn được phát huy nhờ tính công tác tốt của hỗn hợp bê tông do sử dụng phụ gia siêu dẻo (1%), giúp phân tán sợi đồng đều và hạn chế hiện tượng vón cục, "bó sợi" thường gặp trong bê tông cốt sợi tự nhiên. Sự phối hợp giữa tính công tác cải thiện, hình học cốt liệu kính phế thải tròn nhẵn, và sợi xơ dừa phân tán đã tạo nên hệ vật liệu bê tông có mật độ phân bố vi khe nứt thấp, dẫn đến khả năng chịu uốn tốt và phá hoại chậm [21].

Kết quả cho thấy hiệu quả rõ ràng hơn ở mẫu M400-03, với cả cường độ nén và uốn đạt giá trị cao nhất, trong đó cường độ chịu kéo khi uốn đạt tới 8,2 MPa. Điều này chứng minh rằng sợi xơ dừa không chỉ hỗ trợ tăng cường độ uốn mà còn góp phần nâng cao độ bền tổng thể của vật liệu khi kết hợp với cốt liệu tái chế.

Các kết quả thí nghiệm về khối lượng thể tích, độ hút nước và tính chống thấm nước của bê tông ở trạng thái cứng rắn được trình bày trong Bảng 4.

d. Ảnh hưởng của phụ gia siêu dẻo và tro bay siêu mịn đến khả năng hút nước và tính chống thấm của bê tông

Các kết quả thí nghiệm được trình bày trong Bảng 4 cho thấy rằng tất cả các mẫu bê tông đều có độ hút nước tương đối thấp, dao động trong khoảng 4,5 % đến 7,5 %, trong đó nhiều mẫu đạt ngưỡng nhỏ hơn 6 %, tương ứng với phân loại "khó thấm" đến "rất khó thấm" theo TCVN 3116:1993. Điều này phản ánh rõ rệt hiệu quả cải thiện cấu trúc lỗ rỗng và khả năng chống thấm của hệ bê tông khi sử dụng kết hợp 1 % phụ gia siêu dẻo và 25 % tro bay siêu mịn hoạt tính thay thế xi măng [11, 12].

Phụ gia siêu dẻo sử dụng trong nghiên cứu này (loại polycarboxylate thế hệ mới) đã góp phần cải thiện đáng kể tính công tác của hỗn hợp bê tông, cho phép giảm tỉ lệ N/X mà không ảnh hưởng đến độ dẻo, đồng thời giúp tăng độ đặc chắc và giảm lỗ rỗng mao dẫn trong bê tông sau khi đông cứng. Hiệu quả này đóng vai trò nền tảng trong việc cải thiện khả năng chống thấm của bê tông.

Bên cạnh đó, việc thay thế 25 % xi măng bằng tro bay siêu mịn hoạt tính đã phát huy đồng thời cả hai vai trò: (i) độn mịn (filler effect), và (ii) hoạt tính pozzolanic. Các hạt tro bay siêu mịn có kích thước nhỏ hơn nhiều lần so với xi măng đã chèn lấp các khoảng trống giữa các hạt lớn hơn trong ma trận vữa xi măng, góp phần tạo ra hệ vi cấu trúc bền chặt, ít liên kết mao rỗng thông suốt. Đồng thời, phản ứng giữa tro bay và Ca(OH)_2 sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng đã tạo ra các sản phẩm C-S-H thứ cấp, giúp tăng cường thêm độ đặc chắc, hạn chế thẩm thấu của nước vào trong vật liệu [8, 9].

Kết hợp với cốt liệu kính phế thải – có bề mặt trơn nhẵn, không hút nước và có khả năng phản xạ nhiệt – đã tạo nên một hệ bê tông có tỷ lệ hút nước thấp và cấu trúc kín nước tốt. Các mẫu bê tông chứa 100 % kính phế thải như M300-03 và M400-03 đều có độ hút nước nhỏ hơn 6,5 %, được đánh giá là rất khó thấm, vượt trội hơn so với các mẫu truyền thống. Đây là một minh chứng cho khả năng tương thích và hiệu quả tổng hợp của hệ vật liệu sử dụng tro bay – phụ gia siêu dẻo – kính tái chế trong việc phát triển bê tông xanh chất lượng cao.

Tóm lại, ảnh hưởng đồng thời của tro bay siêu mịn và phụ gia siêu dẻo đã thể hiện rõ qua sự giảm dần của độ hút nước theo hướng

tăng hàm lượng kính phế thải, đồng thời phản ánh hiệu quả tương hỗ trong việc cải thiện vi cấu trúc, giảm độ rỗng và nâng cao khả năng chống thấm của vật liệu. Đây là cơ sở để khẳng định tiềm năng ứng dụng của hệ bê tông này trong các kết cấu chịu tác động môi trường, yêu cầu chống thấm cao, đặc biệt là trong xây dựng hạ tầng bền vững và bê tông sử dụng vật liệu tái chế.

3.3. Khả năng ứng dụng của loại bê tông nghiên cứu trong xây dựng hạ tầng công nghiệp tại khu vực Tây Nam Bộ

Với các đặc tính cơ học và bền thể hiện qua kết quả thí nghiệm, loại bê tông không xi măng sử dụng tro bay siêu mịn, cốt liệu kính phế thải và sợi xơ dừa trong nghiên cứu này cho thấy tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong xây dựng công nghiệp, đặc biệt tại các khu công nghiệp, khu chế xuất tại khu vực Tây Nam Bộ và vùng phụ cận – nơi có điều kiện khí hậu, tải trọng sử dụng và yêu cầu môi trường khắc khe.

Thứ nhất, các mẫu bê tông M300 và M400 đạt cường độ chịu nén từ 34,5 MPa đến 50,5 MPa và mô đun đàn hồi từ 28,9 đến 35,0 GPa, hoàn toàn đáp ứng yêu cầu của các kết cấu chịu lực thông thường và sản công nghiệp chịu tải trọng trung bình đến nặng. Đặc biệt, khả năng chịu kéo khi uốn cao (lên tới 8,2 MPa) nhờ có mặt sợi xơ dừa giúp gia tăng khả năng chống nứt và độ bền uốn, phù hợp với các kết cấu có độ mảnh lớn như tấm sàn, tấm tường đúc sẵn.

Thứ hai, loại bê tông này có độ hút nước thấp ($4,5 \div 7,5 \%$) và tính chống thấm cao, nhờ hiệu ứng phối hợp giữa tro bay siêu mịn, phụ gia siêu dẻo và cốt liệu kính trơ nước, giúp hạn chế quá trình thấm và xâm thực. Đặc điểm này rất phù hợp với điều kiện thời tiết nóng ẩm, mưa nhiều, nền đất yếu tại Tây Nam Bộ – vốn dễ xảy ra hiện tượng thấm ngược, xói mòn hóa học hoặc ăn mòn ion sulfate/chloride trong nước ngầm và nước thải.

Thứ ba, hệ vật liệu nghiên cứu sử dụng nguồn nguyên liệu tái chế và tro bay, giúp giảm phát thải CO₂, giảm sử dụng tài nguyên thiên nhiên (như đá dăm, cát tự nhiên), góp phần hướng đến xây dựng bền vững [14, 15]. Điều này phù hợp với định hướng phát triển kinh tế tuần hoàn, sử dụng vật liệu thân thiện môi trường trong Quy hoạch xây dựng vùng đô thị công nghiệp phía Nam và các chương trình hành động vì mục tiêu phát triển bền vững của thành phố.

Từ các đặc tính này, loại bê tông nghiên cứu hoàn toàn có thể được ứng dụng cho các hạng mục xây dựng phổ biến trong khu công nghiệp như:

- Nền nhà xưởng, sàn kho, đường nội bộ có yêu cầu chịu tải cao và chống thấm;
- Tường bao, kênh mương, bể thu gom nước thải, nơi chịu tác động hóa học;
- Tấm bê tông đúc sẵn, cấu kiện trang trí hoặc gạch lát sân xưởng có yêu cầu tính công tác cao và hiệu ứng bề mặt tốt.

Kết quả thực nghiệm trên Bảng 3 cho thấy, loại bê tông không xi măng trong nghiên cứu, với sự phối hợp giữa tro bay siêu mịn, phụ gia siêu dẻo, kính phế thải và sợi xơ dừa, không chỉ đạt các chỉ tiêu cơ lý

và độ bền cao, mà còn phù hợp với yêu cầu môi trường và điều kiện khai thác tại các khu công nghiệp khu vực Tây Nam Bộ. Đây là hướng đi đầy tiềm năng để mở rộng ứng dụng vật liệu xanh trong thực tế sản xuất công nghiệp, đóng góp vào chiến lược xây dựng bền vững đô thị miền Nam Việt Nam.

Kết quả so sánh trong Bảng 5 cho thấy loại bê tông sử dụng kính phế thải, tro bay và sợi xơ dừa có nhiều ưu điểm đáng kể không chỉ về mặt kỹ thuật mà còn về mặt kinh tế và môi trường so với bê tông truyền thống. Trước hết, xét về chi phí nguyên liệu, loại bê tông nghiên cứu có thể giảm $15 \div 25 \%$ tổng chi phí nhờ tận dụng nguồn phế thải công nghiệp sẵn có tại địa phương, đặc biệt là tro bay và kính phế thải – những vật liệu có giá thành thấp hoặc không đáng kể. Điều này phù hợp với điều kiện vùng công nghiệp phía Nam, nơi có nguồn vật liệu thay thế phong phú và nhu cầu cắt giảm chi phí sản xuất vật liệu xây dựng.

Về mặt kỹ thuật, cường độ chịu nén và khả năng thi công của hỗn hợp bê tông đều đạt yêu cầu, tương đương hoặc vượt bê tông truyền thống. Điểm nổi bật là khả năng chống nứt và chống thấm được cải thiện rõ rệt nhờ có thêm sợi xơ dừa phân tán, vốn có vai trò chống chế vơ nứt và tăng cường độ kéo khi uốn. Đây là yếu tố then chốt trong các công trình công nghiệp có yêu cầu về độ bền lâu, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nóng ẩm và tải trọng dao động.

Xét ở khía cạnh môi trường, việc giảm sử dụng xi măng, tận dụng phế thải và giảm khai thác cốt liệu tự nhiên góp phần giảm phát thải CO₂ và bảo vệ tài nguyên thiên nhiên, phù hợp với chủ trương phát triển kinh tế tuần hoàn và công nghiệp xanh của Tây Nam Bộ.



a) Bảo dưỡng mẫu bê tông thí nghiệm



b) Các mẫu bê tông thí nghiệm



c) Nén mẫu bê tông thí nghiệm

Hình 6. Xác định cường độ nén của các mẫu bê tông thí nghiệm.

Bảng 1. Các cấp phối bê tông thí nghiệm.

STT	Ký hiệu mẫu	XM	CD	TB	ĐD	KPT	SXD	PGSD	N
1	M300-01	325	758	81	1084	0	6,5	3,25	168
2	M300-02	325	758	81	542	542	6,5	3,25	168
3	M300-03	325	758	81	0	1084	6,5	3,25	168
4	M400-01	408	669	102	1080	0	8,16	4,08	167
5	M400-02	408	669	102	540	540	8,16	4,08	167
6	M400-03	408	669	102	0	1080	8,16	4,08	167

Bảng 2. Tính chất của hỗn hợp bê tông thí nghiệm.

STT	Ký hiệu mẫu	Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông (kg/m^3)	Độ sụt SN (cm) của hỗn hợp bê tông được xác định tại:			Hiện tượng phân tầng tách lớp của hỗn hợp bê tông
			Ngay sau khi nhào trộn	Sau 30 phút sau khi nhào trộn	Sau 60 phút sau khi nhào trộn	
1	M300-01	2375	18,5	16,5	14,0	Hỗn hợp bê tông có tính dẻo tốt
2	M300-02	2377	19,0	18,0	17,5	Hỗn hợp bê tông có tính dẻo rất tốt
3	M300-03	2379	20,5	20,0	19,0	Hỗn hợp bê tông có tính dẻo rất tốt
4	M400-01	2411	17,5	16,0	14,0	Hỗn hợp bê tông có tính dẻo tốt
5	M400-02	2415	21,0	20,0	18,0	Hỗn hợp bê tông có tính dẻo rất tốt
6	M400-03	2430	22,0	20,5	18,5	Hỗn hợp bê tông có tính dẻo rất tốt

Bảng 3. Tính chất của bê tông thí nghiệm.

STT	Ký hiệu mẫu	Cường độ kéo khi uốn (MPa) tại tuổi 28 ngày	Cường độ nén trung bình (MPa) tại các tuổi:			Mô đun đàn hồi của bê tông (GPa)
			3 ngày	14 ngày	28 ngày	
1	M300-01	5,8	17,2	31,0	34,5	28,9
2	M300-02	6,4	18,4	34,0	37,0	30,0
3	M300-03	6,8	20,0	35,2	39,8	31,5
4	M400-01	7,1	21,5	39,8	44,2	32,8
5	M400-02	7,5	22,8	42,6	48,0	34,3
6	M400-03	8,2	23,7	43,9	50,5	35,0

Bảng 4. Tính chất của bê tông thí nghiệm.

STT	Ký hiệu mẫu	Khối lượng thể tích của bê tông (kg/m^3) tại tuổi 28 ngày	Độ hút nước theo khối lượng (%)	Tính thấm nước
1	M300-01	2345	7,5	Không thấm
2	M300-02	2350	6,8	Khó thấm
3	M300-03	2365	6,2	Khó thấm
4	M400-01	2380	5,9	Khó thấm
5	M400-02	2400	5,2	Rất khó thấm
6	M400-03	2410	4,5	Rất khó thấm

3.4. So sánh hiệu quả kinh tế của sản phẩm bê tông nghiên cứu với sản phẩm bê tông xi măng truyền thống

Bảng 5. So sánh một số tính chất của bê tông truyền thống với bê tông xi măng sử dụng kính phế thải, tro bay và sợi xơ dừa.

Tiêu chí	Bê tông truyền thống (100 % xi măng, cát vàng, đá dăm từ đá vôi)	Bê tông thân thiện với môi trường, sử dụng kính phế thải, tro bay và sợi xơ dừa
Nguyên liệu chính	Xi măng Portland, cát vàng tiêu chuẩn, đá dăm từ đá vôi tiêu chuẩn.	Thay thế 20 ÷ 30 % xi măng bằng tro bay; Thay thế toàn bộ cát vàng bằng cát đen nội đồng địa phương; Thay thế toàn bộ đá dăm bằng phế thải thủy tinh, phế thải kính.
Chi phí nguyên liệu	Cao hơn.	Thấp hơn 15 ÷ 25 % nhờ tận dụng phế thải tro bay, cát đen hạt mịn rẻ tiền, phế thải kính có sẵn ở địa phương.
Cường độ nén	100% đạt chuẩn ổn định.	Cường độ nén tương đương hoặc cao hơn.
Tính thi công	Dễ thi công, tính công tác tốt.	Có thể cần điều chỉnh nước và phụ gia siêu dẻo để đảm bảo tính công tác của hỗn hợp bê tông.
Khả năng chống thấm, chống nứt	Chống thấm tốt; Chống nứt không tốt.	Chống thấm tốt; Chống nứt tốt vì sử dụng thêm cốt sợi xơ dừa phân tán.
Tác động môi trường	Phát thải nhiều CO ₂ cao do sản xuất xi măng. Sử dụng nhiều vật liệu địa phương.	Giảm phát thải CO ₂ đáng kể nhờ giảm xi măng và tái sử dụng phế thải công nghiệp. Tích kiệm nguồn tài nguyên thiên nhiên, thân thiện với môi trường.
Ứng dụng phù hợp	Công trình dân dụng phổ thông, nhà ở, đường giao thông cơ bản.	Hạ tầng kỹ thuật trong khu công nghiệp: sàn nhà xưởng, đường nội bộ...

4. Kết luận và kiến nghị

4.1. Kết luận

Từ những kết quả thực nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm đã rút ra một số kết luận như sau:

Nghiên cứu đã thực hiện thành công chế tạo và đánh giá đặc tính của bê tông xanh sử dụng phế thải kính thay thế cốt liệu thô tự nhiên, tro bay siêu mịn thay thế một phần xi măng, kết hợp với sợi xơ dừa tự nhiên và phụ gia siêu dẻo. Các kết quả thí nghiệm và phân tích khoa học cho thấy các kết luận sau:

Hỗn hợp bê tông có tính công tác tốt với độ sụt dao động từ 17,5 ÷ 22,0 cm, đáp ứng yêu cầu thi công hỗn hợp bê tông bơm. Giá trị độ sụt tăng dần theo tỷ lệ kính phế thải nhờ tính trơn nhẵn, ít hút nước và hiệu quả phân tán của phụ gia siêu dẻo.

Khối lượng thể tích bê tông cứng đạt từ 2345 ÷ 2410 kg/m³, tăng nhẹ theo tỷ lệ thay thế kính, phản ánh mật độ đặc chắc của bê tông và hiệu quả của việc sử dụng tro bay siêu mịn và phụ gia hóa học trong giảm rỗng mao dẫn.

Cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày đạt từ 34,5 MPa đến 50,5 MPa; cường độ kéo khi uốn đạt đến 8,2 MPa, đặc biệt với các mẫu có 2 % sợi xơ dừa đã cho thấy khả năng chống nứt và độ dẻo dai cao của bê tông.

Mô đun đàn hồi dao động trong khoảng 28,9 ÷ 35,0 GPa, phù hợp với các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu chịu lực cho công trình công nghiệp.

Độ hút nước thấp (4,5 ÷ 7,5 %) và các mẫu đều đạt phân loại “khó thấm” đến “rất khó thấm” theo TCVN 3116:2022. Đây là kết quả của cấu trúc bê tông đặc chắc, hàm lượng mao rỗng thấp nhờ hiệu ứng điền đầy của tro bay siêu mịn và hiệu quả phân tán nước của phụ gia siêu dẻo.

Hệ vật liệu sử dụng nguồn nguyên liệu tái chế (kính phế thải), phế thải công nghiệp (tro bay) và xơ sợi tự nhiên mang lại giá trị môi trường cao, góp phần giảm phát thải CO₂, hướng đến xây dựng công nghiệp bền vững theo định hướng phát triển kinh tế xanh.

4.2. Kiến nghị

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm xin đưa ra một số đề xuất như sau:

Ứng dụng loại bê tông nghiên cứu vào xây dựng các khu công nghiệp, khu chế xuất tại Tây Nam Bộ và các vùng công nghiệp trọng điểm phía Nam. Đặc biệt thích hợp với các hạng mục như:

- Nền nhà xưởng, sàn kho, đường nội bộ;
- Tường chắn, mương thoát nước, bể xử lý nước thải;
- Cầu kiện bê tông đúc sẵn, gạch lát sân, tấm tường kỹ thuật.

Khuyến khích các đơn vị sản xuất vật liệu xây dựng địa phương phối hợp triển khai sản xuất thử nghiệm ở quy mô pilot, nhằm đánh giá hiệu quả thi công và khả năng hạ giá thành sản phẩm.

Cơ quan quản lý xây dựng – môi trường tại Tây Nam Bộ cần xem xét đưa loại vật liệu này vào danh mục vật liệu xanh được ưu tiên sử dụng trong công trình công cộng, nhà xưởng tiết kiệm năng lượng và công trình phát triển bền vững.

4.3. Định hướng nghiên cứu tiếp theo

Mở rộng nghiên cứu theo hướng kiểm tra khả năng làm việc trong môi trường xâm thực: nước thải công nghiệp, nước ngầm chứa ion Cl⁻, SO₄²⁻ trong điều kiện khí hậu Tây Nam Bộ.

Tối ưu tỷ lệ phối trộn để phù hợp với sản xuất cấu kiện bê tông đúc sẵn, sản phẩm bê tông trang trí, hoặc ứng dụng cho vỉa hè đô thị – khu công nghiệp sinh thái.

Xây dựng mô hình tính toán phát thải CO₂ và hiệu quả môi trường, làm cơ sở khoa học cho việc thương mại hóa vật liệu và tích hợp vào tiêu chí lựa chọn trong các dự án xanh.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Lê Nguyễn Thiện Huy, Tăng Văn Lâm, Võ Nhật Luân, Hồ Anh Cường. Sử dụng sợi xơ dừa trong chế tạo bê tông nâng cao chất lượng nhà ở xã hội khu vực Tây Nam Bộ thích ứng với biến đổi khí hậu. Tạp chí Xây dựng – Bộ Xây dựng, 19 Feb. 2025.
- [2]. Lê Hoàng Sơn, Tăng Văn Lâm, Võ Nhật Luân, Hồ Thanh Phong. Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao từ nguồn vật liệu địa phương phục vụ xây dựng công trình hạ tầng ven biển khu vực Kiên Giang. Tạp chí Xây dựng - Bộ Xây dựng. Tháng 12 năm 2024. Trang 72-77.
- [3]. Lê Văn Tuấn, Nguyễn Quốc Toàn, (2021). Giải pháp thúc đẩy sử dụng tro, xỉ nhà máy nhà máy điện đốt rác than làm vật liệu xây dựng trong xu thế nền kinh tế tuần hoàn tại Việt Nam. Tạp chí Xây dựng, số 10/2021. Trang 176-182.
- [4]. Hoàng Minh Đức, Nguyễn Kim Thịnh. Nghiên cứu sử dụng cát đụn tại chỗ làm đường bê tông xi măng trên đảo Phú Quốc. Khoa học Công nghệ Xây dựng 3 (2017). 37-43.
- [5]. Đinh Hoàng Quân, Nguyễn Thanh Bằng, Nguyễn Tiến Trung. Phương pháp tính toán thành phần, công thức cấp phối bê tông chất kết dính kiềm hoạt hóa sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện, xỉ lò cao phù hợp với các nguồn vật liệu. Đề tài NCKH cấp Quốc gia mã số KC.08.21/16-20 thuộc chương trình nghiên cứu KH&CN phục vụ bảo vệ môi trường và phòng tránh thiên tai, mã số: KC08/16-20, năm 2021.
- [6]. Nguyễn Thanh Bằng, Đinh Hoàng Quân, Nguyễn Tiến Trung, 2021. Nghiên cứu sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện và xỉ lò cao để chế tạo bê tông chất kết dính kiềm hoạt hóa (không sử dụng xi măng) dùng cho các công trình thủy lợi làm việc trong môi trường biển góp phần bảo vệ môi trường. Đề tài NCKH cấp Quốc gia mã số KC.08.21/16-20 thuộc chương trình nghiên cứu KH&CN phục vụ bảo vệ môi trường và phòng tránh thiên tai, mã số: KC08/16-20.
- [7]. Trần Việt Hưng, (2017). “Nghiên cứu thành phần, đặc tính cơ lý của bê tông Geopolymer tro bay và ứng dụng cho kết cấu cầu hầm”, Luận án tiến sỹ kỹ thuật năm 2017, 149 trang.
- [8]. Hoàng Minh Đức, Trần Quốc Toàn, Lee Sang Hyun, and Do Kwang Soo. Nghiên cứu ảnh hưởng của xỉ hạt lò cao nghiền mịn và tro bay đến tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông. Tạp chí KHCN Xây dựng số 3 (2020): 33-40.
- [9]. Lâm N.T., Kiên T.T., Đại B.D., (2021). Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng lớn tro bay của nhà máy nhiệt điện Quảng Ninh. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng – Trường ĐH Xây dựng Hà Nội, 15(6V), Trang 1-11.
- [10]. Đoàn Công Chánh, Nguyễn Phú Nhuận, Trần Văn Khánh, and Huỳnh Trọng Phước. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay thay thế một phần xi măng đến các tính chất của bê tông cường độ cao. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng số 11, no. 05 (2021): 6 trang.
- [11]. Nguyễn Trọng Lâm, Nguyễn Ngọc Linh, Trần Văn Nam, Vũ Duy Kiên, Trần Văn Khải, and Phùng Đức Hiếu. Ảnh hưởng của tro bay thay thế một phần xi măng đến tính chất của bê tông thương phẩm. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng – Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Vol. 14, No. 4V (2020): 96-105.
- [12]. Lê Hùng Anh, Cao Văn Chơn, (2012). Nghiên cứu tái chế tro - xỉ từ lò đốt làm bê tông nặng. Hội nghị khoa học trẻ lần 4. Đại học Công nghiệp Tây Nam Bộ. Năm 2022.
- [13]. Barbhuiya S., Das B.B., Adak D. (2024). Roadmap to a net-zero carbon cement sector: Strategies, innovations and policy imperatives. Journal of Environmental Management, 359, 121052.
- [14]. Andrew R.M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. Earth System Science Data, 10(1), 195-217. Doi: 10.5194/essd-10-195-2018, 2018.
- [15]. Du H., Tan K.H. (2014). Waste glass powder as cement replacement in concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 12(11), 468–477. DOI: 10.3151/jact.12.468
- [16]. Ngô Văn Toàn. Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng cát mịn và phụ gia khoáng hỗn hợp từ xỉ lò cao hoạt hóa và tro trấu. Tạp chí Khoa học Công nghệ xây dựng 4 (2014): 36-45.
- [17]. Nguyễn Như Quý, Mai Quế Anh, (2020). Lý thuyết bê tông. Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội, 2020, 210 Tr.
- [18]. Bùi Danh Đại (2010), Phụ gia khoáng hoạt tính cao cho bê tông chất lượng cao, Bài giảng dành cho Cao học Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây Dựng, Hà Nội.
- [19]. Lê Văn Quang (2019). Tình hình phát thải, nghiên cứu và sử dụng tro xỉ nhiệt điện tại Việt Nam. Hội thảo: Xu hướng ứng dụng tro, xỉ nhiệt điện làm phụ gia trong sản xuất Vật liệu ngành xây dựng. Viện Vật liệu Xây dựng năm 2019.
- [20]. Lê Việt Hùng (2021). Nghiên cứu sử dụng xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GGBFS) cho sản xuất bê tông. Hội thảo: Sử dụng tro, xỉ trong sản xuất vật liệu xây dựng – cơ hội và thách thức. Viện Vật liệu Xây dựng năm 2021.
- [21]. Ali M., Liu A., Sou H., Chouh N. (2012). Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. Construction and Building Materials, 30, 814–825. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.068>