

Đánh giá ảnh hưởng của bột vỏ hàu đến một số đặc tính cơ học của bê tông xi măng

Nguyễn Lê Tài¹, Lê Hoài Bảo², Ngô Văn Thức^{2,*}

¹ Công ty CP Tư vấn Xây dựng Minh Long

² Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

TỪ KHOÁ

Bột vỏ hàu
Phụ gia khoáng
Bê tông
Đặc tính cơ học

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của việc thay thế một phần xi măng bằng bột vỏ hàu nghiền mịn đến tính chất cơ học của bê tông. Vỏ hàu được xử lý qua các bước làm sạch, phơi khô, nghiền, nung và sàng mịn. Thí nghiệm được thực hiện với các tỷ lệ thay thế là 2%, 4% và 6% theo khối lượng xi măng. Kết quả cho thấy tỷ lệ 2% là tối ưu, giúp cải thiện cường độ nén sớm, tăng cường độ chịu kéo khi uốn lên đến 58% so với mẫu đối chứng, trong khi mô đun đàn hồi gần như không thay đổi. Kết quả cho thấy bột vỏ hàu có tiềm năng ứng dụng làm phụ gia khoáng thay thế xi măng, góp phần giảm phát thải và tái sử dụng chất thải trong xây dựng bền vững.

KEYWORDS

Oyster shell powder
Mineral admixture
Concrete
Mechanical properties

ABSTRACT

This study evaluates the effects of partially replacing cement with finely ground oyster shell powder on the mechanical properties of cement concrete. The oyster shells were processed through cleaning, sun-drying, grinding, calcination, and sieving. Experimental mixtures were prepared with replacement ratios of 2%, 4%, and 6% by weight of cement. The results indicate that a 2% replacement ratio is optimal, improving early compressive strength and enhancing flexural tensile strength by up to 58% compared to the control, while the elastic modulus remained nearly unchanged. The findings suggest that oyster shell powder has potential as a supplementary cementitious material, contributing to emissions reduction and waste reuse in sustainable construction.

1. Giới thiệu

Ngành xây dựng hiện nay đang đối mặt với thách thức lớn trong việc giảm phát thải khí nhà kính và thúc đẩy phát triển vật liệu bền vững. Trong đó, xi măng – thành phần chính của bê tông – là một trong những nguồn phát thải CO₂ lớn nhất, chiếm khoảng 7–8 % tổng lượng phát thải toàn cầu [1][2]. Do đó, việc nghiên cứu các giải pháp thay thế một phần xi măng bằng các vật liệu tái chế hoặc phụ gia khoáng có nguồn gốc tự nhiên đang là hướng đi nhận được nhiều sự quan tâm trong những năm gần đây, trong đó có việc thay thế xi măng bằng đá vôi [3].

Trong số các vật liệu thay thế tiềm năng, vỏ hàu – một loại chất thải rắn từ ngành nuôi trồng thủy sản đang thu hút sự chú ý như một phụ gia khoáng thân thiện với môi trường. Thành phần chính của vỏ hàu là canxi cacbonat (CaCO₃), có thể chuyển hóa thành canxi oxit (CaO) khi nung ở nhiệt độ cao, từ đó tham gia vào quá trình thủy hóa của xi măng [4][5].

Vỏ hàu thường bị bỏ bỏ ở các khu vực trồng hoặc bãi chôn lấp do không có giá trị kinh tế, gây ra nhiều hệ lụy môi trường như: vôi hóa đất, sinh sôi vi khuẩn có hại và phát sinh khí độc [6]. Việc tận dụng vỏ hàu làm phụ gia trong bê tông vừa góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi

trường, vừa có thể giảm phát thải carbon trong ngành xây dựng thông qua việc thay thế một phần xi măng hoặc cốt liệu [7][4].

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng, vỏ hàu có hàm lượng CaCO₃ > 95 %, cùng loại pha tinh thể (canxit) như đá vôi – một nguyên liệu truyền thống trong sản xuất xi măng – cho thấy khả năng thay thế tiềm năng của vỏ hàu trong các ứng dụng vật liệu xây dựng [8]. Các nghiên cứu quốc tế cho thấy bột vỏ hàu có thể thay thế một phần xi măng, giúp cải thiện cường độ sớm của bê tông nhờ hiệu ứng lấp đầy và khả năng phản ứng pozzolanic [4][6].

Ở Việt Nam, phế thải vỏ hàu từ nuôi trồng thủy sản được thải ra môi trường với khối lượng lớn, nhưng đến nay chưa có nhiều công trình nghiên cứu ứng dụng trong vật liệu bê tông, đặc biệt là việc đánh giá một cách hệ thống các tính chất cơ học (cường độ nén, kéo khi uốn, mô đun đàn hồi) khi thay thế một phần xi măng. Đây chính là khoảng trống nghiên cứu mà bài báo này hướng tới. Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của vỏ hàu nghiền mịn đến một số đặc tính cơ học quan trọng của bê tông xi măng, từ đó góp phần định hướng cho việc ứng dụng loại phụ gia khoáng tự nhiên này trong phát triển vật liệu xây dựng bền vững.

*Liên hệ tác giả: nvthuc34@gmail.com

Nhận ngày 09/11/2025, sửa xong ngày 14/11/2025, chấp nhận đăng ngày 16/11/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2026.1175>

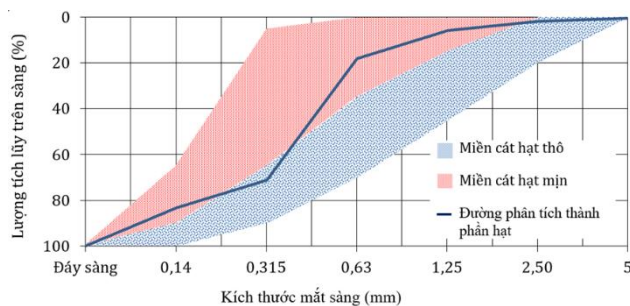
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

Vật liệu đầu vào chế tạo bê tông trong nghiên cứu này bao gồm xi măng, cốt liệu, vôi hào nghiền mịn. Trong đó, xi măng được sử dụng là loại Hà Tiên PCB40, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 2682:2020 [9]. Một số đặc tính cơ lý của xi măng được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Một số tính chất cơ lý của xi măng Hà Tiên PCB40.

Tên chỉ tiêu	Kết quả thử
1. Khối lượng riêng (g/cm^3)	3,11
2. Độ dẻo tiêu chuẩn (%)	28,7
3. Thời gian đông kết Bắt đầu đông kết (phút) Kết thúc đông kết (giờ)	137' 3h50'
4. Độ ổn định thể tích (mm)	0,72
5. Độ nghiền mịn, trên sàng 0,09mm (%)	6,48
6. Cường độ chịu nén (MPa) Ở 3 ngày tuổi Ở 28 ngày tuổi	22,18 43,7

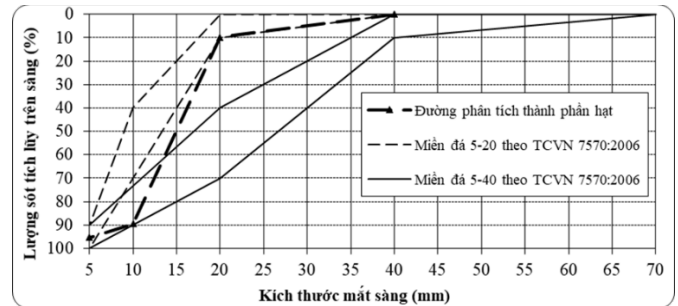


Hình 1. Biểu đồ thành phần hạt của cát sông.

Cốt liệu mịn trong nghiên cứu này là cát sông với thành phần hạt được xác định thông qua thí nghiệm sàng theo TCVN 7570:2006 [10] và thể hiện trên Hình 1. Đường phân bố hạt phần lớn nằm trong giới hạn của miền cát hạt mịn với mô đun độ lớn 1,8.

Cốt liệu thô là đá dăm, thành phần hạt của đá được thể hiện ở Hình 2. Trong biểu đồ, miền có cỡ hạt 5–20 mm được giới hạn bởi hai đường nét đứt, trong khi miền cỡ hạt 5–40 mm được giới hạn bởi hai đường nét liền. Theo TCVN 7570:2006 [10], đá sử dụng trong nghiên cứu này có kích thước $D_{\max}$ là 20 mm (lượng sót tích lũy trên sàng 20 mm dưới 10 %), đảm bảo đáp ứng các yêu cầu về cấp phối cốt liệu thô theo TCVN 7570:2006. Cụ thể, phân tích chỉ ra rằng 9,74 % khối lượng vật liệu được giữ lại trên sàng 20 mm, 79,80 % khối lượng vật liệu được giữ lại trên sàng 10 mm, trong khi chỉ 4,60 % lọt qua rây 5 mm. Vôi hào được thu thập từ loài vôi sữa phổ biến tại Việt Nam, thuộc họ Ostreidae. Sau khi được làm sạch bùn đất và các sinh vật ký sinh, vôi hào được phơi khô tự nhiên, sau đó nghiền sơ bộ bằng máy thử độ mài mòn Los Angeles và đem nung ở nhiệt độ khoảng 850 °C trong thời gian

3 ngày. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng nhiệt độ và thời gian nung càng cao thì hàm lượng CaO trong vôi hào càng tăng [11]. Sau quá trình làm nguội tự nhiên, vật liệu được nghiền mịn và sàng qua sàng 75 μm để loại bỏ các hạt thô, thu được dạng bột mịn phục vụ thí nghiệm. Quy trình xử lý vôi hào được minh họa trong Hình 3.



Hình 2. Biểu đồ thành phần hạt của đá.

2.2. Thành phần cấp phối và phương pháp thí nghiệm trên vữa

Khối lượng vật liệu cho mỗi tổ vữa được tính toán dựa trên tiêu chuẩn TCVN 6016:2011 [12]. Để đảm bảo tính đồng nhất về đặc tính vật liệu giữa các thí nghiệm trên bê tông và vữa, cát sông tự nhiên (cùng loại với cát sử dụng trong bê tông) được lựa chọn làm cốt liệu mịn trong nghiên cứu này. Do đặc điểm cát tự nhiên có độ hút nước cao hơn so với cát chuẩn theo quy định, lượng nước trộn được điều chỉnh lên 260 g thay vì 225 g như trong tiêu chuẩn.

Nhằm xác định tỷ lệ thay thế tối ưu của vôi hào nghiền mịn, nghiên cứu tiến hành khảo sát các mức thay thế 2 %, 4 % và 6 % theo khối lượng xi măng ở 3, 7, 14 và 28 ngày tuổi. Các mức thay thế này dựa trên cơ sở tổng hợp các nghiên cứu trước: Chen et al. [6] cho thấy ở mức thay thế 5 % bằng bột vôi sò, cường độ nén tăng nhẹ, nhưng giảm khi vượt 8 %; Han et al. [4] khẳng định hiệu ứng tích cực chỉ duy trì ở mức thay thế thấp. Tuy nhiên, các mức dưới 2 % thường khó thể hiện sự khác biệt rõ rệt so với mẫu đối chứng. Thành phần của các mẫu vữa được ký hiệu như trong Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần cấp phối cho 1 tổ mẫu vữa (g).

Ký hiệu	Nước	Xi măng	Cát	Vôi hào
V0	260	450	1350	0
V2	260	441	1350	9
V4	260	432	1350	18
V6	260	423	1350	27

Sau khi trộn, hỗn hợp vữa được đúc vào khuôn chuẩn kích thước 40 × 40 × 160 mm. Vữa được đổ thành hai lớp, mỗi lớp được lèn bằng cách dằn 60 lần bằng thiết bị dằn, sau đó làm phẳng bề mặt và tiến hành bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn cho đến thời điểm thí nghiệm xác định cường độ chịu nén tại các mốc ngày tuổi. Quy trình thí nghiệm được minh họa trong Hình 4.



Trước khi nghiền



Nghiền vỏ hàu



Sau khi nghiền, nung và sàng

Hình 3. Quy trình xử lý vỏ hàu.



a)



b)



c)



d)

Hình 4. Trình tự thí nghiệm cường độ chịu nén của vữa.

(a) Trộn vật liệu, (b) Dàn mẫu, (c) Mẫu sau khi đúc, (d) Nén mẫu.

2.3. Kết quả thí nghiệm trên vữa

Cường độ chịu nén của vữa được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 3121-11:2022 [13], trong đó giá trị báo cáo là trung bình cộng của 6 nửa viên mẫu. Kết quả cường độ nén ở các mốc 3, 7, 14 và 28 ngày tuổi với các mức thay thế xi măng bằng vỏ hàu nghiền mịn (0 %, 2 %, 4 % và 6 %) được thể hiện trong Hình 5.

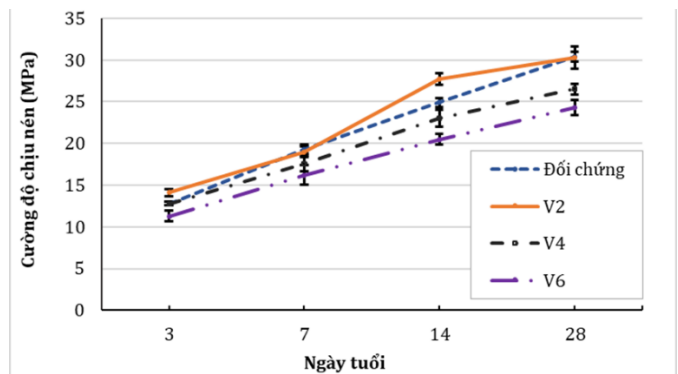
Kết quả cho thấy, ở mức thay thế 2 %, cường độ nén của vữa đạt giá trị cao hơn mẫu đối chứng tại ngày thứ 3 (14,1 MPa so với 12,8 MPa) và ngày thứ 14 (27,7 MPa so với 24,9 MPa), đồng thời duy trì tương đương với mẫu đối chứng tại 28 ngày tuổi (30,3 MPa so với 30,4 MPa).

Ngược lại, khi tỷ lệ thay thế tăng lên 4 % và 6 %, cường độ nén của vữa giảm dần so với mẫu đối chứng ở tất cả các mốc thời gian. Nguyên nhân có thể do hàm lượng xi măng bị thay thế vượt quá ngưỡng tối ưu, làm giảm sự hình thành các sản phẩm thủy hóa và ảnh hưởng đến cấu trúc bền chắc của vữa.

Ở tuổi 3 ngày, cường độ nén của mẫu V0 gần tương đương với V4. Hiện tượng này có thể được lý giải bởi sự cân bằng giữa hai cơ chế đối lập: (i) hiệu ứng pha loãng do giảm hàm lượng clinker hoạt tính, và (ii) hiệu ứng hạt độn kết hợp với cơ chế tạo mầm kết tinh từ bột vỏ hàu mịn, giúp thúc đẩy thủy hóa sớm.

Tại 7 ngày, mẫu V0 có cường độ cao hơn V2, tuy nhiên đến 28 ngày kết quả lại đảo chiều khi V2 vượt V0. Nguyên nhân là ở giai đoạn đầu, tác động pha loãng chiếm ưu thế làm giảm cường độ của V2; trong khi đó, ở tuổi muộn, hiệu ứng lấp đầy lỗ rỗng và sự hình thành carboaluminate trên bề mặt hạt CaCO_3 đã cải thiện đáng kể vi cấu trúc, dẫn đến cường độ của V2 cao hơn V0. Xu hướng này phù hợp với kết quả quan sát của Chen et al. [6].

Đáng chú ý, mẫu V2 thể hiện tốc độ gia tăng cường độ cao bất thường trong khoảng 7–14 ngày. Điều này có thể được giải thích bởi hàm lượng thay thế thấp (2%) vừa đủ để kích hoạt hiệu ứng tạo mầm kết tinh và phản ứng phụ giữa CaCO_3 và pha aluminat, từ đó thúc đẩy quá trình thủy hóa kéo dài. Hiện tượng tương tự cũng được Han et al. [4] ghi nhận khi dùng bột vỏ hàu ở mức thấp.



Hình 5. Cường độ chịu nén của vữa với tỷ lệ thay thế vỏ hàu khác nhau.

2.4. Thành phần cấp phối bê tông sử dụng vỏ hàu

Dựa trên kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của vữa, tỷ lệ thay thế 2 % xi măng bằng bột vỏ hàu nghiền mịn (ký hiệu là BT-H2) được xác định là tối ưu và được lựa chọn để tiến hành các thí nghiệm tiếp theo trên bê tông, bao gồm thử nén, kéo khi uốn và xác định mô đun đàn hồi. Thành phần cấp phối bê tông được thiết kế theo phương pháp ACI 211.1-

91 [14], với mục tiêu đạt cấp độ bền B27,5. Bảng 3 trình bày chi tiết thành phần cấp phối của bê tông có sử dụng bột vỏ hào nghiền mịn.

Bảng 3. Thành phần cấp phối cho 1m³ bê tông (kg).

Ký hiệu	Xi măng	Đá	Cát	Nước	Vỏ hào
Đối chứng	468	1130	692	213	0
BT-H2	458,64	1130	692	213	9,36

2.5. Thí nghiệm xác định đặc tính cơ học

Cường độ chịu nén của bê tông được xác định tại các mốc tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày theo tiêu chuẩn TCVN 3118:2022 [15]. Tổng cộng có 8 tổ mẫu bê tông được chế tạo tương ứng với 24 mẫu lập phương có kích thước 100×100×100 mm. Do mẫu có kích thước khác so với mẫu chuẩn (150×150×150 mm), kết quả cường độ chịu nén được điều chỉnh thông qua hệ số quy đổi là 0,95 nhằm đảm bảo tính tương thích và so sánh với các tiêu chuẩn thiết kế và thực nghiệm hiện hành.

Cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông được đánh giá bằng thí nghiệm uốn 4 điểm trên mẫu đầm có kích thước 100×100×400 mm tại 28 ngày tuổi theo tiêu chuẩn TCVN 3119:2022 [16]. Đặt mẫu lên gối như Hình 6, uốn mẫu bằng cách tăng tải liên tục với tốc độ không đổi cho tới khi mẫu bị phá hủy. Thời gian gia tải mẫu cho đến khi phá hủy không nhỏ hơn 30s. Kết quả thí nghiệm là giá trị trung bình của 3 mẫu thí nghiệm. Cường độ chịu kéo khi uốn của từng mẫu đầm bê tông được tính bằng MPa theo công thức:

$$R = \delta \times \frac{P \times l}{a \times b^2}$$

trong đó:

P : Tải trọng phá hủy viên mẫu, tính bằng N;

l : Khoảng cách giữa hai gối tựa, tính bằng mm;

a : Chiều rộng viên mẫu, tính bằng mm;

b : Chiều cao viên mẫu, tính bằng mm;

δ : 0,92 - Hệ số chuyển đổi kết quả khác mẫu chuẩn 150×150×600 mm.

Thí nghiệm môđun đàn hồi của bê tông được thực hiện trên mẫu đầm có kích thước 100×100×400 mm (như Hình 7) tại 28 ngày tuổi theo tiêu chuẩn TCVN 5726:2022 [17]. Giá trị tải trọng phá hủy dự kiến (P_e) được lấy bằng 80–90 % cường độ chịu nén của tổ mẫu lập phương, mỗi tổ mẫu có 3 mẫu. Đặt lực nén ban đầu lên mẫu sao cho không lớn hơn 2 % tải phá hủy dự kiến để điều chỉnh đồng hồ đo biến dạng về giá trị 0 quy ước, sau đó tiến hành định tâm mẫu. Gia tải theo từng cấp đến mức tải trọng đạt 35–45 % tải phá hủy dự kiến, tốc độ gia tải mỗi cấp bằng 0,4–0,8 MPa/s. Khi tải trọng đạt mức 35–45 % tải phá hủy dự kiến, dỡ bỏ thiết bị đo khỏi mẫu. Môđun đàn hồi (E), của từng viên mẫu ở mức tải trọng $P_1 = 0,3 \times P_e$, được tính theo công thức:

$$E = \frac{\sigma_1}{\epsilon_{1y}}$$

trong đó:

$\sigma_1 = P_1/A$: là gia tăng ứng suất khi tải trọng tăng từ giá trị 0 quy ước đến 30% tải trọng phá hủy, tính bằng MPa, với A là diện tích tiết diện chịu nén (mm²);

P_1 : Tải trọng gia tăng tương ứng, tính bằng N;

P_e : Tải trọng phá hủy dự kiến, tính bằng N;

ϵ_{1y} : Biến dạng tương đối đàn hồi tức thời gia tăng dọc trục của mẫu, ứng với mức tải trọng $P_1 = 0,3 \times P_e$ đo ở đầu mỗi cấp tải.



a)



b)

Hình 6. Bố trí thí nghiệm uốn 4 điểm. (a) Trước thí nghiệm, (b) Mẫu bị phá hoại.



Hình 7. Thí nghiệm môđun đàn hồi.

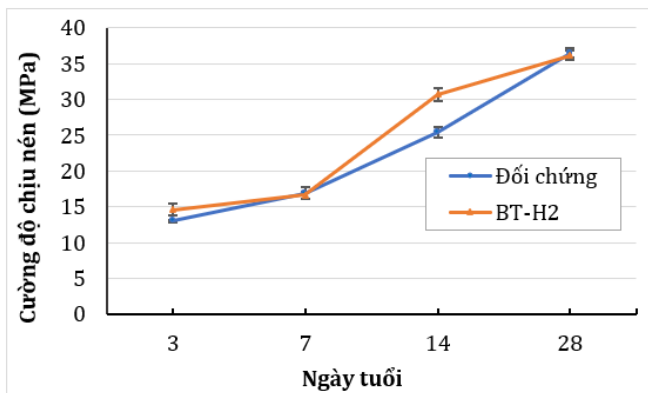
3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận trên bê tông

3.1. Cường độ chịu nén

Kết quả thí nghiệm thể hiện trên Hình 8 cho thấy sự phát triển cường độ chịu nén của bê tông theo tuổi ngày ở hai nhóm mẫu: bê tông đối chứng và bê tông có sử dụng 2 % vỏ hào nghiền mịn thay thế xi măng (BT-H2). Cả hai loại bê tông đều có xu hướng tăng cường độ theo thời gian, phản ánh quá trình thủy hóa diễn ra bình thường và liên tục.

Đáng chú ý, tại tất cả các mốc tuổi khảo sát (3, 7, 14 và 28 ngày), mẫu BT-H2 đều cho giá trị cường độ cao hơn mẫu đối chứng. Ở 3 ngày tuổi, BT-H2 đạt khoảng 14,3 MPa, cao hơn mẫu đối chứng (khoảng 13,1 MPa), cho thấy sự cải thiện cường độ sớm. Xu hướng này tiếp tục duy trì ở 7 và 14 ngày tuổi, trong đó tại 14 ngày tuổi, sự chênh lệch đạt mức rõ rệt nhất, với BT-H2 đạt xấp xỉ 30 MPa, vượt trội so với mẫu đối chứng (~27 MPa). Ở 28 ngày tuổi, sự khác biệt giữa hai mẫu giảm nhưng BT-H2 vẫn duy trì cường độ cao hơn một cách ổn định.

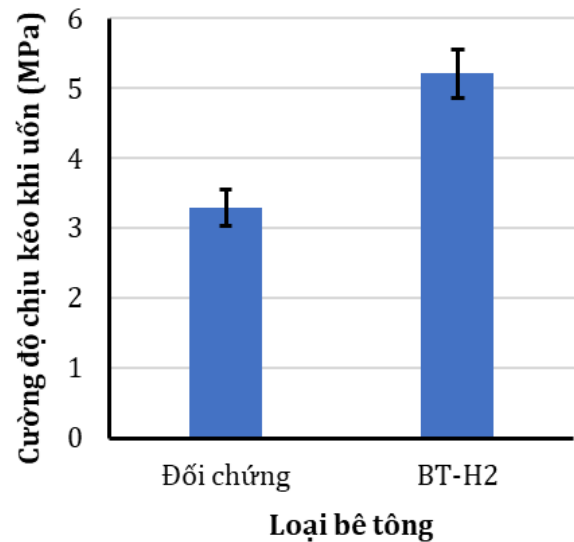
Bột vỏ hào sau khi được nghiền mịn đến kích thước hạt dưới 75 μm có thể đóng vai trò như một chất độn khoáng hoạt tính thấp, góp phần lấp đầy các lỗ rỗng mao quản trong hồ xi măng, đồng thời cung cấp các bề mặt di thể thuận lợi cho sự khởi tạo và phát triển của sản phẩm thủy hóa, hay còn gọi là hiệu ứng tạo mầm kết tinh. Sự kết hợp của hai cơ chế này giúp làm tăng quá trình thủy hóa ở giai đoạn đầu, từ đó cải thiện cường độ sớm của vật liệu. Hiện tượng này tương đồng với cơ chế đã được Lothenbach et al. [3] ghi nhận khi nghiên cứu ảnh hưởng của bột đá vôi mịn đến sự thủy hóa của xi măng Portland.



Hình 8. Cường độ chịu nén của bê tông.

3.2. Cường độ chịu kéo khi uốn

Hình 9 thể hiện so sánh cường độ chịu kéo khi uốn giữa bê tông đối chứng và bê tông có sử dụng 2 % vỏ hào nghiền mịn. Kết quả cho thấy mẫu BT-H2 đạt cường độ kéo khi uốn trung bình khoảng 5,21 MPa, cao hơn đáng kể so với mẫu đối chứng chỉ đạt khoảng 3,29 MPa. Mức tăng này tương ứng với khoảng 58 %, cho thấy sự cải thiện rõ rệt về khả năng kháng nứt của bê tông khi bổ sung một lượng nhỏ phụ gia vỏ hào nghiền mịn.



Hình 9. Cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông.

Sự gia tăng cường độ chịu kéo khi uốn có thể được lý giải bởi hai yếu tố chính: (i) Hiệu ứng lấp đầy vi mô do vỏ hào nghiền mịn mang lại, giúp giảm lỗ rỗng và cải thiện khả năng phân phối ứng suất tại các vùng chịu kéo; và (ii) Tăng mật độ liên kết vi cấu trúc nhờ phản ứng pozzolanic tiềm năng giữa CaO từ vỏ hào và các sản phẩm hydrat hóa, tạo ra các sản phẩm C-S-H bền hơn, góp phần nâng cao khả năng kháng nứt và dẻo dai cục bộ. Trong khi đó, đối với cường độ chịu nén, ảnh hưởng của phụ gia ở tỷ lệ thấp (2 %) thường ít rõ rệt hơn, vì tỷ lệ thay thế xi măng tương đối nhỏ, không đủ để tạo ra sự khác biệt lớn trong tổng lượng sản phẩm hydrat hóa. Đồng thời đặc tính cơ học theo phương nén chịu ảnh hưởng nhiều hơn bởi độ đặc chắc và độ dính kết tổng thể trong ma trận xi măng.

3.3. Mô đun đàn hồi

Bảng 4 thể hiện kết quả thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi (E) của bê tông đối chứng và bê tông có sử dụng 2 % vỏ hào nghiền mịn (BT-H2). Kết quả cho thấy giá trị trung bình mô đun đàn hồi của mẫu BT-H2 đạt 33,086 GPa, tương đương so với mẫu đối chứng (32,540 GPa). Do hàm lượng thay thế xi măng chỉ chiếm 2 %, chưa đủ để tạo ra sự cải thiện đáng kể về mặt cơ học tổng thể. Điều này cũng cho thấy phụ gia vỏ hào ở tỷ lệ này không gây suy giảm mô đun đàn hồi, và thậm chí có thể mang lại sự cải thiện nhẹ, đặc biệt trong các ứng dụng cần kiểm soát độ biến dạng và ổn định cấu trúc dưới tải trọng dài hạn. Những kết quả này phù hợp với xu hướng tổng quát được trình bày trong bài review của Ruslan H.N. [18], nghiên cứu này cho rằng sử dụng vỏ hào ở tỷ lệ phù hợp có thể nâng cao cường độ bê tông bằng cách cải thiện cấu trúc vật liệu và giảm tiêu thụ tài nguyên thiên nhiên.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi của bê tông.

Ký hiệu mẫu	ε	P_1 (N)	σ_1 (MPa)	E (GPa)	E_{th} (GPa)
Đối chứng	0,00032	98039	9,8039	30,637	32,540
	0,00031			31,969	
	0,00028			35,014	
BT-H2	0,00027	97231,5	9,7232	36,462	33,086
	0,00030			32,411	
	0,00032			30,358	

4. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của việc sử dụng bột vỏ hàu nghiền mịn thay thế một phần xi măng trong bê tông xi măng ở tỷ lệ 2 %. Kết quả thí nghiệm cho thấy:

- Cường độ chịu nén của vữa và bê tông tại tỷ lệ thay thế 2 % tương đương hoặc cao hơn mẫu đối chứng, đặc biệt ở giai đoạn đầu (3 và 14 ngày tuổi).
- Cường độ chịu kéo khi uốn tăng đáng kể (~58 %) so với mẫu đối chứng, cho thấy hiệu ứng lấp đầy vi mô và phản ứng pozzolanic tiềm năng của vật liệu.
- Mô đun đàn hồi của bê tông có sử dụng bột vỏ hàu đạt giá trị tương đương mẫu đối chứng, cho thấy không ảnh hưởng tiêu cực đến khả năng biến dạng đàn hồi của vật liệu.

Nên tiếp tục mở rộng nghiên cứu về ảnh hưởng lâu dài của bột vỏ hàu đến các tính chất bền vững của bê tông như: co ngót, thẩm ion clo, độ bền sunfat. Các nghiên cứu tiếp theo cần đánh giá khả năng ứng dụng bột vỏ hàu trong bê tông cường độ cao, bê tông nhẹ và các loại bê tông chuyên dụng khác.

Tài liệu tham khảo

- [1]. R. Kajaste and M. Hurme, "Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 4041–4052, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.055.
- [2]. J. Seo, S. Kim, S. Park, H. N. Yoon, and H. K. Lee, "Carbonation of calcium sulfoaluminate cement blended with blast furnace slag," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 118, p. 103918, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103918.
- [3]. B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gallucci, and K. Scrivener, "Influence of limestone on the hydration of Portland cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 6, pp. 848–860, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.01.002.
- [4]. Y. Han, R. Lin, and X.-Y. Wang, "Performance of sustainable concrete made from waste oyster shell powder and blast furnace slag," *J. Build. Eng.*, vol. 47, p. 103918, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.job.2021.103918.
- [5]. T. Matschei, B. Lothenbach, and F. P. Glasser, "The role of calcium carbonate in cement hydration," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 4, pp. 551–558, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.10.013.
- [6]. D. Chen, P. Zhang, T. Pan, Y. Liao, and H. Zhao, "Evaluation of the eco-friendly crushed waste oyster shell mortars containing supplementary cementitious materials," *J. Clean. Prod.*, vol. 237, p. 117811, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117811.
- [7]. E.-I. Yang, S.-T. Yi, and Y.-M. Leem, "Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 11, pp. 2175–2182, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.03.016.
- [8]. S. Her, T. Park, E. Zalnezhad, and S. Bae, "Synthesis and characterization of cement clinker using recycled pulverized oyster and scallop shell as limestone substitutes," *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 123987, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123987.
- [9]. TCVN 2682:2020, "Xi măng poóc lăng," 2020, *Tiêu chuẩn quốc gia*.
- [10]. TCVN 7570:2006, "Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật," 2006, *Tiêu chuẩn Việt Nam*.
- [11]. I. J. Chiou, C. H. Chen, and Y. H. Li, "Using oyster-shell foamed bricks to neutralize the acidity of recycled rainwater," *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 480–487, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.101.
- [12]. TCVN 6016:2011, "Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ," 2011, *Tiêu chuẩn quốc gia*.
- [13]. TCVN 3121-11:2022, "Xác định cường độ uốn và nén của vữa đã đóng rắn," 2022, *Tiêu chuẩn Việt Nam*.
- [14]. ACI 211.1-91, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete," 1997, *American Concrete Institute*.
- [15]. TCVN 3118:2022, "Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén," 2022, *Tiêu chuẩn quốc gia*.
- [16]. TCVN 3119:2022, "Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu kéo khi uốn," 2022, *Tiêu chuẩn quốc gia*.
- [17]. TCVN 5726:2022, "Bê tông - Phương pháp xác định cường độ lăng trụ, mô đun đàn hồi và hệ số Poisson," 2022, *Tiêu chuẩn quốc gia*.
- [18]. H. N. Ruslan, K. Muthusamy, S. M. Syed Mohsin, R. Jose, and R. Omar, "Oyster shell waste as a concrete ingredient: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 48, pp. 713–719, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.208.