

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Ảnh hưởng của tải trọng nén trước đến tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép sử dụng vỏ hào nghiền thay thế cốt liệu mịn

Effect of pre-compression loading on the service life of reinforced concrete structures containing crushed oyster shell as fine aggregate replacement

➤ Mai Hoàng Anh¹, Phạm Văn Hùng^{1,2}, Hồ Xuân Ba^{1*}, Nguyễn Thị Thanh Tâm³, Trần Thế Truyền¹

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

²Mekong Group Ltd., London, UK

³Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

Email: bahx_ph@utc.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 25/3/2026

Ngày sửa bài: 04/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 21/5/2026

Ngày xuất bản Online: 31/5/2026

Tác giả liên hệ email: bahx_ph@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các kết quả thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của vỏ hào nghiền sử dụng làm cốt liệu mịn thay thế cát đến khả năng thấm ion clorua của bê tông, làm cơ sở cho việc dự báo tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép theo tiêu chí ăn mòn cốt thép. Các mẫu bê tông được chế tạo với các tỷ lệ thay thế cát bằng vỏ hào nghiền khác nhau và được thí nghiệm bằng phương pháp đo thấm nhanh ion clorua.

Từ kết quả thí nghiệm, hệ số khuếch tán clorua của bê tông được xác định và sử dụng trong tính toán dự báo tuổi thọ kết cấu. Kết quả nghiên cứu cho thấy tỷ lệ thay thế cát bằng vỏ hào nghiền có ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng thấm clorua của bê tông, qua đó tác động trực tiếp đến tuổi thọ dự báo của các kết cấu bê tông cốt thép sử dụng loại bê tông này.

Từ khóa: Bê tông, thấm clorua, ứng suất, ăn mòn, tuổi thọ, thực nghiệm, vỏ hào nghiền.

ABSTRACT

The paper presents experimental results evaluating the effect of crushed oyster shells used as a partial replacement for fine aggregate on the chloride ion permeability of concrete. The study aims to provide a basis for predicting the service life of reinforced concrete structures according to the criterion of steel corrosion in chloride environments. Concrete specimens were prepared with different replacement ratios of sand by crushed oyster shells and tested using the rapid chloride permeability test. Based on the experimental results, the chloride diffusion coefficient of the concrete was determined and

used as an input parameter for service life prediction. The results indicate that the replacement ratio of sand with crushed oyster shells significantly affects the chloride permeability of concrete, thereby influencing the predicted service life of reinforced concrete structures made with this type of concrete.

Key words: Concrete, chloride permeability, stress, corrosion, service life, experiment, crushed oyster shells.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các kết cấu bê tông cốt thép làm việc trong môi trường chứa hàm lượng clorua cao như vùng biển và ven biển luôn đối mặt với nguy cơ xâm nhập ion clorua, dẫn đến ăn mòn cốt thép và suy giảm tuổi thọ công trình. Quá trình xâm nhập clorua diễn ra thông qua hệ lỗ rỗng và vi khe nứt trong bê tông; khi nồng độ clorua tại vị trí cốt thép đạt ngưỡng tới hạn, lớp màng thụ động bị phá hủy và quá trình ăn mòn bắt đầu, gây nứt, bong tróc lớp bê tông bảo vệ và làm suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu. Do đó, khả năng chống thấm clorua của bê tông được xem là yếu tố quyết định đến độ bền lâu và tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường xâm thực [1-4,10].

Trong các nghiên cứu về độ bền lâu, sự xâm nhập clorua thường được mô tả thông qua các mô hình khuếch tán (điển hình là định luật Fick), trong đó hệ số khuếch tán clorua đóng vai trò là tham số then chốt để dự báo tuổi thọ kết cấu [1-3]. Ngoài ra, thành phần cấp phối bê tông và điều kiện môi trường cũng ảnh hưởng mạnh đến quá trình xâm nhập clorua trong dài hạn [4].

Bên cạnh yếu tố vật liệu, khả năng thấm clorua của bê tông còn chịu ảnh hưởng đáng kể của trạng thái chịu tải trong quá trình khai thác. Các tải trọng tác dụng, đặc biệt là tải trọng lặp hoặc tải trọng nén trước, có thể gây ra các vi khe nứt trong cấu trúc bê tông, làm gia tăng độ thấm và tạo điều kiện thuận lợi cho ion clorua xâm nhập sâu vào bên trong. Hiệu ứng dư của tải trọng sau khi dỡ tải có thể duy trì hệ vi nứt này, từ đó làm tăng hệ số khuếch tán clorua và rút ngắn thời gian khởi phát ăn mòn cốt thép [11-13].

Trong bối cảnh phát triển vật liệu bền vững, việc sử dụng vỏ hàu nghiền thay thế một phần cát tự nhiên đang được quan tâm rộng rãi. Các nghiên cứu cho thấy việc sử dụng vỏ hàu có thể làm thay đổi cấu trúc vi mô, độ rỗng và tính chất vận chuyển trong bê tông, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng thấm nước và khuếch tán ion clorua [5-9]. Một số kết quả cho thấy ở tỷ lệ thay thế hợp lý, vật liệu vỏ hàu có thể cải thiện độ đặc chắc và giảm hệ số khuếch tán clorua, trong khi ở tỷ lệ cao có thể làm tăng độ rỗng và ảnh hưởng bất lợi đến độ bền lâu [6,9].

Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu xem xét riêng lẻ ảnh hưởng của vật liệu hoặc môi trường, trong khi ảnh hưởng đồng thời của vỏ hàu nghiền và trạng thái chịu tải (đặc biệt là hiệu ứng dư của tải trọng nén trước) đến khả năng thấm clorua và tuổi thọ kết cấu vẫn chưa được làm rõ đầy đủ.

Vì vậy, nghiên cứu này tập trung đánh giá khả năng thấm ion clorua của bê tông sử dụng vỏ hàu nghiền thay thế cát với các tỷ lệ khác nhau, đồng thời xem xét ảnh hưởng của hiệu ứng dư do tải trọng nén trước. Trên cơ sở các kết quả thí nghiệm xác định hệ số khuếch tán clorua, nghiên cứu tiến hành dự báo tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép dựa trên các mô hình khuếch tán clorua theo thời gian [1-3]. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ vai trò của vật liệu vỏ hàu nghiền và ảnh hưởng của tải trọng đến độ bền lâu, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và đánh giá tuổi thọ công trình trong môi trường xâm thực clorua.

2. THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH ẢNH HƯỞNG CỦA TRỌNG TRỌNG NÉN TRƯỚC ĐẾN ĐỘ THẤM CLORUA CỦA BÊ TÔNG SỬ DỤNG VỎ HÀU NGHIÊN

Các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu đã được kiểm tra và xác nhận đáp ứng các tiêu chuẩn của Hoa Kỳ. Cụ thể, cốt liệu tuân thủ ASTM C33/C33M, trong khi cấp phối bê

tông được thiết kế theo ACI 211.1-91 [14-15]. Khả năng thấm ion clorua của bê tông được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C1202 (tương đương TCVN 9337:2012) [16]. Toàn bộ chương trình thí nghiệm được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học GTVT.

Hệ cốt liệu bao gồm cát tự nhiên, vỏ hào nghiền và cốt liệu thô có kích thước danh định 5 - 10 mm. Trước khi sử dụng, toàn bộ cốt liệu được rửa sạch và sấy khô nhằm loại bỏ tạp chất và độ ẩm dư. Cát mịn sử dụng trong nghiên cứu là cát sông Đà, có mô đun độ lớn $M_k = 2,5$ và khối lượng riêng $2,67\text{g/cm}^3$. Sau khi đúc, các mẫu bê tông được bảo dưỡng ban đầu trong điều kiện phòng thí nghiệm trong 24 giờ, sau đó tháo khuôn và tiếp tục bảo dưỡng thêm 24 giờ. Tiếp theo, các mẫu được ngâm trong nước trong 28 ngày nhằm đảm bảo quá trình thủy hóa của xi măng diễn ra đầy đủ và bê tông đạt trạng thái bão hòa.

Kết thúc giai đoạn dưỡng hộ, các mẫu được phân thành ba nhóm, mỗi nhóm gồm ba mẫu thí nghiệm. Các mẫu sau đó được gia tải nén trước với các mức ứng suất tương đối so với cường độ nén cực đại, lần lượt là $\sigma/\sigma_{\max} = 0\%$, 20% , 40% , 60% , 80% và được dỡ tải hoàn toàn sau khi đạt mức tải tương ứng. Trước khi tiến hành thí nghiệm thấm clorua, bề mặt mẫu được xử lý cẩn thận nhằm đảm bảo phân bố ứng suất đồng đều trong quá trình gia tải, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho công tác chuẩn bị mẫu phục vụ thí nghiệm sau khi dỡ tải.



Hình 1: Các mẫu thí nghiệm thấm clorua và sơn xung quanh mẫu bằng keo Silicon.

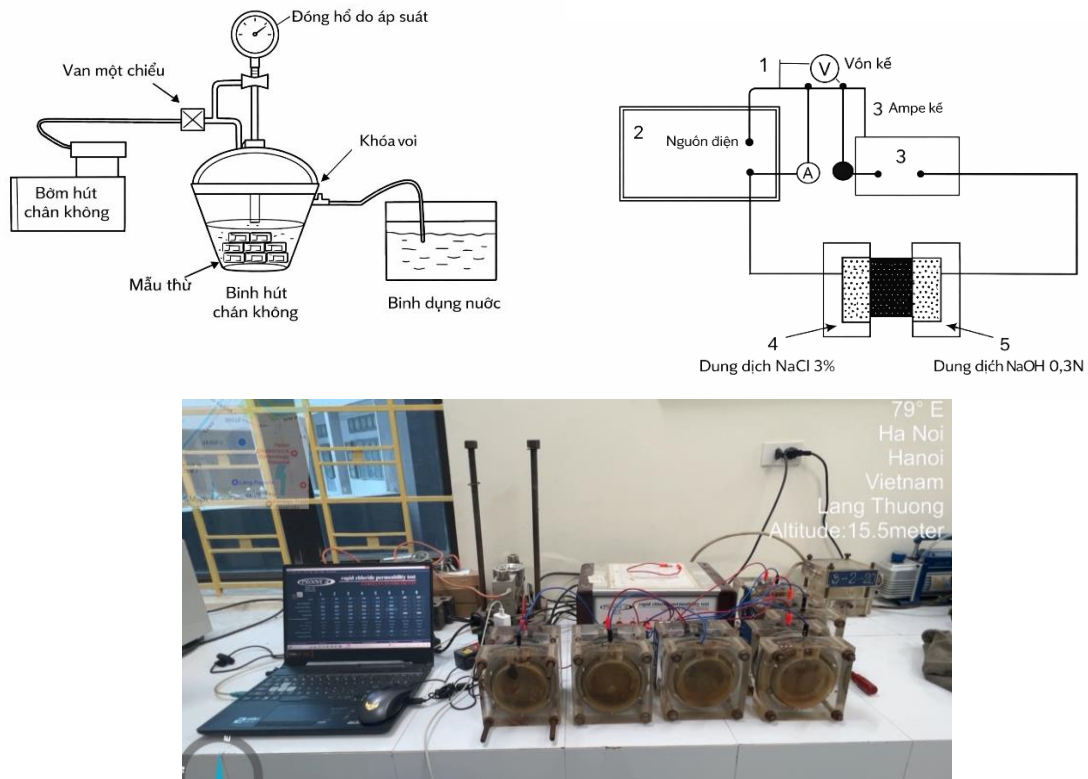
Mẫu thử được đặt trong bình hút chân không, trong khi hệ thống bơm chân không được bố trí theo sơ đồ ở Hình 2. Nước cất được thêm vào bình chứa riêng biệt và van kết nối giữa hai bình được giữ ở trạng thái đóng. Quá trình hút chân không được tiến hành nhằm duy trì áp suất trong bình nhỏ hơn 1 mmHg liên tục trong vòng 24 giờ.

Sau giai đoạn này, van nối được mở để cho phép nước cất thâm nhập vào bình hút chân không đến khi toàn bộ mẫu được ngập hoàn toàn. Khi đạt trạng thái này, van được đóng lại và tiếp tục duy trì điều kiện chân không trong ít nhất 3 giờ nhằm đảm bảo mẫu được bão hòa hoàn toàn. Kết thúc quá trình, hệ thống bơm được ngừng hoạt động và mẫu được lấy ra khỏi bình.

Tiếp đó, các mẫu được ngâm trong nước trong khoảng thời gian (18 ± 2) giờ để ổn định trạng thái bão hòa. Sau khi ngâm, mẫu được lấy ra, lau khô phần nước dư trên bề mặt và lắp vào khoang chứa của thiết bị thí nghiệm. Vùng tiếp xúc giữa mẫu và thành khoang được bịt kín bằng keo silicone nhằm hạn chế tối đa hiện tượng rò rỉ dung dịch trong quá trình thử nghiệm.

Hai dung dịch thí nghiệm được cấp vào hai phía của khoang chứa: Dung dịch NaOH 0,3N ở một đầu và dung dịch NaCl 3% ở đầu còn lại. Các đầu khoang được bịt kín bằng nút cao su để giảm thiểu sự bay hơi. Hệ thống điện gồm nguồn điện một chiều, vôn kế và ampe kế được lắp đặt và kết nối theo sơ đồ ở Hình 2. Trong đó, điện cực âm được nối với ngăn chứa dung dịch NaCl, còn điện cực dương nối với ngăn chứa dung dịch NaOH.

Thí nghiệm được thực hiện dưới điện áp một chiều 60 V trong thời gian 6 giờ. Trong suốt quá trình, cường độ dòng điện cũng như nhiệt độ của dung dịch NaCl được theo dõi liên tục. Tổng điện lượng đi qua mẫu được xác định bằng thiết bị đo tự động, với dữ liệu được ghi nhận liên tục Hình 2.



Hình 2: Sơ đồ bơm hút chân không mẫu thử và sơ đồ bố trí thiết bị đo thấm clorua.

Kết quả thí nghiệm đo thấm clorua của bê tông sử dụng vỏ hào nghiền được mô tả như trong Bảng 1 dưới đây:

Bảng 1: Kết quả đo độ thấm ion clorua của bê tông sử dụng vỏ hào nghiền.

Cấp gia tải σ/σ_{max}	Điện lượng Q trung bình (Columb)			
	25 % vỏ nghiền	50% vỏ nghiền	70% vỏ nghiền	90% vỏ nghiền
0%	447.37	760.08	316.58	150.50
20%	451.87	1443.75	2079.90	1730.07
40%	456.36	2127.42	2573.22	3310.14
60%	946.58	2836.82	3300.50	3627.62
80%	1467	3548	3895	3819

Mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông với điện lượng, được tính theo công thức sau [9]:

$$D = 1.03 \times 10^{-2} \times Q^{0.84} \quad (x10^{-12}(m^2/s)) \quad (1)$$

Sử dụng công thức (1) có thể tính được hệ số khuếch tán D từ kết quả đo điện lượng trên Bảng 1 của các mẫu bê tông thí nghiệm. Kết quả được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2: Hệ số khuếch tán ion clo của các loại bê tông dưới các cấp tải khác nhau.

Cấp gia tải	Hệ số khuếch tán $D-10^{-12}(m^2/s)$
-------------	--------------------------------------

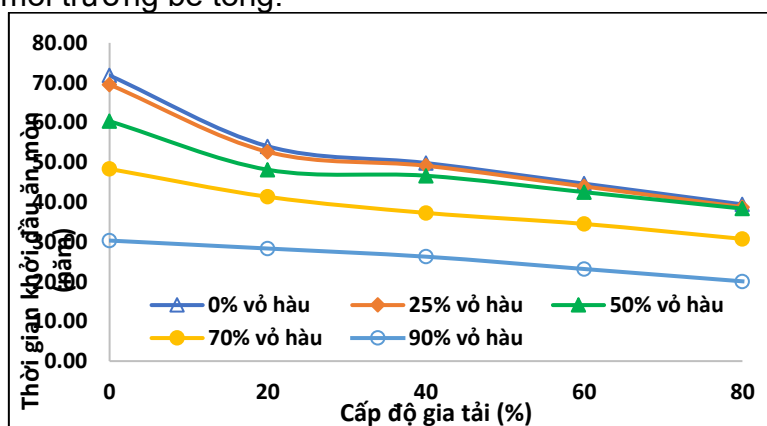
σ/σ_{max}	25 % vỏ nghỉen	50% vỏ hàu nghỉen	70% vỏ nghỉen	90% vỏ hàu nghỉen
0%	1.735	2.709	1.298	0.695
20%	1.750	4.643	6.309	5.405
40%	1.765	6.430	7.545	9.322
60%	3.257	8.189	9.299	10.067
80%	4.706	9.882	10.687	10.512

3. TÍNH TOÁN DỰ BÁO TUỔI THỌ KẾT CẤU BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG VỎ HÀU NGHIÊN CÓ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG DỰ CỦA TẢI TRỌNG NÉN TRƯỚC

Độ bền lâu của kết cấu bê tông cốt thép thường được xem xét thông qua quá trình xâm nhập của ion clorua vào bên trong vật liệu, đây là nguyên nhân chính dẫn đến sự khởi phát ăn mòn cốt thép. Theo quan điểm này, tuổi thọ khai thác của kết cấu được xác định là khoảng thời gian tính từ khi bề mặt bê tông bắt đầu tiếp xúc với môi trường chứa clorua cho đến khi hàm lượng clorua tại vị trí cốt thép đạt đến ngưỡng tới hạn, làm suy giảm lớp màng thụ động và kích hoạt quá trình ăn mòn. Trong nghiên cứu hiện tại, thời điểm khởi phát ăn mòn được dự báo dựa trên mô hình khuếch tán tuân theo định luật Fick bậc hai [10].

Tuổi thọ của kết cấu chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố chi phối quá trình vận chuyển clorua trong bê tông, trong đó các tham số quan trọng bao gồm: Nồng độ clorua tại bề mặt (C_0), thời gian tiếp xúc (t), chiều dày lớp bê tông bảo vệ (x) và hệ số khuếch tán hiệu dụng (D). Để đánh giá tuổi thọ, nghiên cứu sử dụng phần mềm Life-365 như một công cụ mô phỏng [11]. Phần mềm này cho phép dự báo quá trình xâm nhập clorua dựa trên các mô hình toán học về khuếch tán và ăn mòn, đồng thời đã được kiểm chứng qua nhiều nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn, đặc biệt trong điều kiện môi trường xâm thực như vùng biển.

Dựa trên dữ liệu thực nghiệm và các điều kiện biên tương ứng, các mô phỏng số được thực hiện nhằm đối chiếu và nâng cao độ tin cậy của kết quả nghiên cứu. Bài toán khuếch tán một chiều được thiết lập và giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn Crank-Nicolson. Đây là phương pháp kết hợp giữa sơ đồ tường minh (FTCS) và sơ đồ ẩn (BTCS), do đó vừa đảm bảo tính ổn định số, vừa duy trì độ chính xác cao. Nhờ đặc điểm này, phương pháp Crank-Nicolson đặc biệt phù hợp để mô phỏng quá trình khuếch tán ion clorua trong môi trường bê tông.



Hình 3: Thời gian khởi đầu ăn mòn của các loại bê tông với các mức phối trộn vỏ hàu khác nhau khi chịu ứng suất nén trước.

Kết quả từ Hình 3 cho thấy tải trọng nén trước làm suy giảm đáng kể thời gian khởi đầu ăn mòn của tất cả các cấp phối bê tông. Cụ thể, đối với bê tông đối chứng (0% vỏ hào), thời gian khởi đầu ăn mòn giảm từ khoảng 72 năm (0% tải) xuống còn khoảng 39 năm (80% tải), tương ứng mức suy giảm khoảng 46%. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận ở các cấp phối có sử dụng vỏ hào, cho thấy ứng suất nén trước đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy sự xâm nhập của ion clorua thông qua sự phát triển vi nứt và gia tăng tính liên thông của hệ lỗ rỗng.

Xét theo tỷ lệ thay thế, kết quả cho thấy tồn tại một ngưỡng sử dụng hợp lý của vỏ hào. Ở mức thay thế 25%, thời gian khởi đầu ăn mòn gần tương đương với bê tông thường trong toàn bộ dải gia tải. Ví dụ, tại mức tải 40%, bê tông đối chứng đạt khoảng 50 năm, trong khi cấp phối 25% vỏ hào đạt khoảng 49 năm, sai lệch không đáng kể ($\approx 2\%$). Điều này cho thấy ở tỷ lệ thấp, vỏ hào có thể được sử dụng mà không làm suy giảm đáng kể khả năng kháng xâm thực clorua.

Ngược lại, khi tỷ lệ thay thế tăng, sự suy giảm trở nên rõ rệt. Tại mức tải 40%, thời gian khởi đầu ăn mòn giảm xuống còn khoảng 46 năm (50%), 37 năm (70%) và 26 năm (90%), tương ứng mức suy giảm lần lượt khoảng 8%, 26% và 48% so với bê tông đối chứng. Xu hướng này càng rõ ràng hơn ở mức tải cao. Cụ thể, tại 80% gia tải, bê tông 90% vỏ hào chỉ còn khoảng 20 năm, thấp hơn gần 49% so với bê tông thường (~ 39 năm). Điều này cho thấy việc thay thế ở tỷ lệ cao làm gia tăng đáng kể khả năng xâm nhập của ion clorua.

Về cơ chế, mặc dù vỏ hào chứa hàm lượng canxi cao (chủ yếu dưới dạng CaCO_3), có thể đóng góp một phần vào quá trình liên kết clorua và giảm nồng độ clorua tự do, song hiệu quả này là hạn chế. Nguyên nhân là do CaCO_3 có tính trơ, không tham gia mạnh vào các phản ứng thủy hóa tạo sản phẩm bền như C-S-H. Trong khi đó, cấu trúc rỗng đặc trưng của vỏ hào và chất lượng vùng tiếp xúc (ITZ) kém hơn so với cốt liệu tự nhiên lại làm gia tăng độ rỗng và tính liên thông của hệ lỗ rỗng. Dưới tác động của tải trọng, các vi nứt phát triển mạnh hơn, tạo điều kiện thuận lợi cho ion Cl^- xâm nhập nhanh hơn. Do đó, ảnh hưởng bất lợi của độ rỗng và vi nứt chiếm ưu thế so với hiệu quả liên kết clorua từ thành phần canxi.

Tổng hợp các kết quả cho thấy khả năng kháng xâm thực clorua của bê tông chứa vỏ hào chịu chi phối đồng thời bởi ba yếu tố chính: Thành phần vật liệu (vai trò của canxi), cấu trúc lỗ rỗng và trạng thái ứng suất. Trong đó, ở các tỷ lệ thay thế cao ($\geq 50\%$) và trong điều kiện chịu tải, ảnh hưởng của độ rỗng và vi nứt chiếm ưu thế, dẫn đến sự suy giảm đáng kể thời gian khởi đầu ăn mòn.

Về mặt ứng dụng, nghiên cứu này khẳng định rằng vỏ hào có thể được sử dụng hiệu quả trong bê tông ở tỷ lệ khoảng $\leq 25\%$, khi vẫn duy trì được độ bền xâm thực tương đương bê tông truyền thống, đồng thời tận dụng được nguồn vật liệu tái chế thân thiện môi trường. Quan trọng hơn, nghiên cứu đã bước đầu lượng hóa được ảnh hưởng đồng thời của vật liệu và tải trọng đến quá trình xâm nhập clorua, qua đó tạo tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm làm rõ cơ chế vi mô, xác định hệ số khuếch tán hiệu dụng và phát triển các mô hình dự báo tuổi thọ bê tông có xét đến ảnh hưởng của vật liệu tái chế trong điều kiện làm việc thực tế.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc thay thế cát tự nhiên bằng vỏ hào ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng thấm ion clorua của bê tông. Dưới tác động của tải trọng nén trước, hệ số khuếch tán clorua tăng lên, dẫn đến suy giảm tuổi thọ kết cấu; mức độ ảnh hưởng phụ thuộc vào tỷ lệ thay thế và mức ứng suất tác dụng. Sự phù hợp giữa kết quả thí nghiệm và mô hình dự báo khẳng định độ tin cậy của phương pháp nghiên cứu. Điều này nhấn mạnh sự cần thiết phải đánh giá xâm nhập clorua đối với bê tông sử dụng vỏ hào, đặc biệt trong môi trường xâm thực như vùng biển.

Về ứng dụng, việc sử dụng vỏ hàu cần được cân nhắc trong thiết kế bê tông bền lâu, với các tham số như tỷ lệ thay thế, lớp bảo vệ và điều kiện môi trường cần được tối ưu hóa. Tuy nhiên, nghiên cứu còn hạn chế về phạm vi điều kiện thí nghiệm và chưa xét đầy đủ các cơ chế suy giảm kết hợp. Trong tương lai, cần mở rộng nghiên cứu dưới các điều kiện môi trường phức tạp hơn, kết hợp mô hình đa cơ chế và phân tích vi cấu trúc để làm rõ ảnh hưởng của vỏ hàu đến độ bền lâu của bê tông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Surana, S.. Chloride penetration in concrete: evaluation of rapid conductivity methods and development of a service life prediction model for marine conditions. University of Cape Town, 2025.
- [2] Yang, C., Li, L., & Li, J. Service life of reinforced concrete seawalls suffering from chloride attack: Theoretical modelling and analysis. Construction and Building Materials, 2020.
- [3] Taotao Feng & al. Prediction Methodology for the Service Life of Concrete Structures in Marine Environment: From Materials to Performance. Engineering, 2025.
- [4] Heiyantuduwa-Beushausen, R.H. The influence of concrete mix composition and environmental exposure on long-term chloride ingress in concrete, University of Cape Town, 2022.
- [5] Guimarães, A.C.P.D, 2022. Use of oyster shell as aggregate replacement for producing environmentally-friendly concrete. <https://hal.science/tel-03703837/>
- [6] Liao, Y., Fan, J., Li, R., et al. Influence of waste oyster shell powder on durability of mortar. Advanced Powder Technology, 2022.
- [7] Kwon, S.J., & Wang, X.Y. A Hydration-Based Integrated Model to Evaluate Properties Development and Sustainability of Oyster Shell Powder-Cement Binary Composites. Buildings, 2024.
- [8] Ez-zaki, H., & Diouri, A. Chloride penetration through cement material based on dredged sediment and shell powder. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018.
- [9] Poliana Bellei & al. Potential Use of Oyster Shell Waste in the Composition of Construction Composites: A Review, Buildings, 2023.
- [10] Sanjeev Kumar Verma & al. Durability and Service Life of Concrete Structures. Buildings, 2021.
- [11] Hồ Xuân Ba, Hồ Việt Long, Mai Hoàng Anh, Phạm Văn Hùng, Trần Thế Truyền, Tính toán dự báo tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép sử dụng vỏ nghêu Bến Tre có xét đến ảnh hưởng dư của tải trọng nén trước. Tạp chí Cầu đường số 12, 2024.
- [12] Thái Khắc Chiến, Trần Thế Truyền, Lê Quang Vũ, Hồ Xuân Ba, Ảnh hưởng của lịch sử chịu tải nén trước đến độ thấm clorua của một số loại bê tông, ứng dụng trong dự báo tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép. Tạp chí Khoa Học GTVT số 57, 2017.
- [13] Trần Thế Truyền, Thái Khắc Chiến, Lê Quang Vũ, Thực nghiệm ảnh hưởng của tải trọng nén trước đến độ thấm clorua của bê tông sử dụng cốt liệu nhẹ. Tạp chí Khoa Học GTVT số 61, 2017.
- [14] ACI 211.1-91, Lựa chọn thành phần cấp phối bê tông thông thường, bê tông nặng, bê tông khối lớn. 1997.
- [15] ASTM, C33/C33M Standard Specification for Concrete Aggregates, 2023.
- [16] TCVN 9337:2012, “Bê tông nặng – Xác định độ thấm ion clorua bằng phương pháp đo điện lượng”, 2012.