

Nghiên cứu khả năng chế tạo bê tông xanh bền xâm thực sử dụng cốt liệu nhiễm mặn ứng dụng trong xây dựng hạ tầng ven sông – biển khu vực Tây Nam Bộ

Nguyễn Chí Nhân^{1*}, Phạm Hữu Hanh²

¹ Sở Xây dựng Đồng Tháp

² Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Bê tông xanh
Cốt liệu nhiễm mặn
Vỏ sò
Chất kết dính không xi măng
Tro bay
Xi lò cao
Silica fume

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày kết quả nghiên cứu khả năng chế tạo bê tông xanh bền xâm thực sử dụng cốt liệu nhiễm mặn tại chỗ và chất kết dính không xi măng nhằm phục vụ xây dựng hạ tầng ven sông – biển khu vực Tây Nam Bộ. Vật liệu kết dính được tạo từ tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1, xi lò cao nghiền mịn và silica fume; dung dịch NaOH và Na₂SiO₃, kết hợp phụ gia siêu dẻo thế hệ mới. Cốt liệu nhiễm mặn tại chỗ được sử dụng là cát biển và vỏ sò khu vực biển Trà Vinh. Thành phần cấp phối được thiết kế đảm bảo các chỉ tiêu: tính công tác (độ sụt 12–20 cm), cường độ nén 50–60 MPa sau 28 ngày, khả năng chống thấm ion Cl⁻, chống ăn mòn sunfat và thời gian phá hoại trong môi trường nước biển nhân tạo trên 60 ngày. Kết quả cho thấy việc tận dụng cốt liệu nhiễm mặn và phế thải công nghiệp giúp giảm phụ thuộc vào vật liệu truyền thống, tiết kiệm chi phí, hạn chế phát thải CO₂ và nâng cao tính bền vững của công trình. Loại bê tông này có tiềm năng ứng dụng cho đê kè ven sông – cửa biển, bến cảng, đường ven biển, khối phá sóng và các công trình quốc phòng – an ninh tại khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của xâm nhập mặn và biến đổi khí hậu khu vực Tây Nam Bộ.

KEYWORDS

Green concrete
Saline aggregates
Seashells
Cementless binder
Fly ash
Ground granulated blast furnace slag
Silica fume

ABSTRACT

This study presents the results of research on the feasibility of producing durable green concrete against aggressive environments, using locally available saline-contaminated aggregates and non-cement binders for infrastructure construction in riverine and coastal areas of the Southwest region of Viet Nam. The binder material was synthesized from fly ash, finely ground blast furnace slag, and silica fume, alkali-activated with NaOH and Na₂SiO₃ solutions, combined with a new-generation superplasticizer. The mix design was developed to meet the following criteria: workability (slump of 12–20 cm), compressive strength of 50–60 MPa after 28 days, resistance to chloride ion penetration, sulfate attack resistance, and failure time in artificial seawater exceeding 60 days. The results demonstrate that utilizing saline-contaminated aggregates and industrial by-products helps reduce dependence on traditional materials, lower costs, limit CO₂ emissions, and enhance the sustainability of structures. This type of concrete has potential applications for river and coastal embankments, seaports, coastal roads, breakwaters, and defense–security structures in areas severely affected by salinity intrusion and climate change in the Southwest region of Viet Nam.

1. Phần mở đầu

Bê tông xanh là thuật ngữ chỉ các chủng loại bê tông được nghiên cứu chế tạo nhằm giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường và tăng tính bền vững của đối tượng xây dựng. Bê tông xanh đã sử dụng một lượng lớn phế thải rắn công nghiệp để thay thế thành phần xi măng Portland truyền thống. Việc tiêu thụ một lượng phế thải rắn lớn, góp phần tạo ra môi trường sống “xanh” hơn, vừa giảm gây ô nhiễm ngày càng trầm trọng cho môi trường vừa tiết kiệm được nguồn tài nguyên thiên nhiên, đặc biệt là đá vôi và đất sét.

Bê tông xanh bền xâm thực sử dụng cốt liệu nhiễm mặn đang nổi lên như một hướng nghiên cứu đầy tiềm năng, đặc biệt phù hợp với yêu cầu xây dựng hạ tầng vùng ven biển Tây Nam Bộ – khu vực đang chịu ảnh hưởng nghiêm trọng bởi tình trạng xâm nhập mặn, biến đổi khí hậu và nước biển dâng [1]. Việc nghiên cứu, chế tạo và đánh giá đặc tính của loại bê tông này không chỉ mang ý nghĩa khoa học mà còn có giá trị thực tiễn to lớn trong bối cảnh nhu cầu phát triển vật liệu xây dựng bền vững, thân thiện với môi trường ngày càng cấp thiết.

Việt Nam sở hữu hơn 3.260 km bờ biển cùng hơn 3.000 đảo và quần đảo, trong đó có hai quần đảo Trường Sa, Hoàng Sa và các đảo

*Liên hệ tác giả: nguyenchinhhan26397@gmail.com

Nhận ngày 17/08/2025, sửa xong ngày 21/08/2025, chấp nhận đăng ngày 22/08/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2025.1080>

lớn nhỏ như Phú Quốc, Côn Đảo,... đóng vai trò chiến lược đặc biệt quan trọng [2]. Trước các tác động ngày càng rõ rệt của biến đổi khí hậu, nước biển dâng và yêu cầu tăng cường hạ tầng bảo vệ chủ quyền trên biển, việc phát triển các loại vật liệu xây dựng có khả năng ứng dụng trực tiếp tại các vùng đảo xa, bãi đá ngầm là một nhiệm vụ cấp bách, mang tính chiến lược lâu dài.

Chính phủ và Bộ Xây dựng đã xác định rõ định hướng phát triển các loại vật liệu xây dựng mới, thân thiện với môi trường và bền vững, nhất là môi trường xâm nhập mặn trên cơ sở tận dụng hiệu quả nguồn tài nguyên sẵn có như cát biển, sỏi biển, cốt liệu từ san hô..., đồng thời đẩy mạnh tái chế và sử dụng chất thải công nghiệp làm nguyên liệu đầu vào. Việc phát triển các vật liệu này không chỉ giải quyết bài toán thi công tại các khu vực đặc thù như ven biển, đảo xa, cửa sông – nơi điều kiện cung ứng vật tư truyền thống còn nhiều hạn chế – mà còn đáp ứng yêu cầu chống ăn mòn, xâm thực và nâng cao độ bền lâu cho công trình trong môi trường khắc nghiệt.

Nghị quyết số 13-NQ/TW năm 2022 về phát triển vùng Đồng bằng sông Cửu Long đã nhấn mạnh yêu cầu xây dựng hệ thống hạ tầng thích ứng với biến đổi khí hậu và phát triển vật liệu bền vững [3]. Nội dung này cũng phù hợp với định hướng Chiến lược tăng trưởng xanh quốc gia và Chương trình phát triển vật liệu xây dựng bền vững đến năm 2030 theo Quyết định số 886/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ [4].

Trên thế giới, các nghiên cứu về bê tông xanh bền xâm thực trong môi trường xâm nhập mặn đã được triển khai từ những thập niên cuối thế kỷ XX, đặc biệt trong các lĩnh vực xây dựng công trình ven biển, hải đảo, cửa sông và an ninh quốc phòng. Các nghiên cứu hiện đại tập trung vào việc sử dụng phụ gia khoáng hoạt tính nghiền mịn như tro bay, xỉ hạt lò cao, tro trấu, silica fume... kết hợp với xi măng Poóc lăng bền sun phát và phụ gia siêu dẻo, nhằm nâng cao khả năng chống lại sự xâm thực của ion Cl^- và SO_4^{2-} trong môi trường nước mặn. Kết quả cho thấy, việc sử dụng hợp lý các loại phụ gia này giúp giảm đáng kể độ thấm nước, cải thiện cấu trúc vi mô, giảm liên kết và kích thước lỗ rỗng trong bê tông, từ đó nâng cao cường độ nén và tuổi thọ công trình [5], [6]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu vẫn phụ thuộc vào xi măng Poóc lăng truyền thống, trong khi lượng chất thải rắn công nghiệp được tái sử dụng còn hạn chế. Những năm gần đây, một số nghiên cứu đã chuyển sang phát triển chất kết dính không xi măng hoàn toàn từ phế thải như tro bay, xỉ lò cao, bùn thải... Dù vậy, các công trình này vẫn chủ yếu dừng ở quy mô cơ bản, chưa nghiên cứu chuyên sâu về tính bền xâm thực và chưa được ứng dụng rộng rãi trong các loại bê tông chất lượng cao [7]. Đặc biệt, nguồn cốt liệu tại chỗ như cát, sỏi hoặc san hô ven biển chưa được khai thác hiệu quả trong các nghiên cứu bê tông xanh.

Tại Việt Nam, một số đề tài nghiên cứu đã tập trung vào chế tạo và đánh giá các loại bê tông bền xâm thực ứng dụng cho các công trình dân dụng và hạ tầng ven biển. Các nghiên cứu này chủ yếu làm rõ cơ chế ăn mòn trong bê tông và bê tông cốt thép dưới tác động của ion Cl^- , SO_4^{2-} , từ đó đề xuất các giải pháp công nghệ phù hợp. Một số nghiên cứu đã ứng dụng xi măng bền sun phát kết hợp với phụ gia hóa học (siêu dẻo) và phụ gia khoáng hoạt tính như silica fume, tro bay, xỉ lò

cao... để chế tạo bê tông có cường độ từ 30 MPa đến 50 MPa, cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc giảm thấm ion Cl^- , tăng khả năng chống ăn mòn cốt thép và kéo dài tuổi thọ kết cấu. Ngoài ra, công nghệ bê tông geopolymer sử dụng chất kết dính không xi măng cũng đang được nghiên cứu tại một số viện, trường đại học và trung tâm xây dựng. Tuy nhiên, các nghiên cứu này phần lớn còn mang tính kiểm chứng, thiếu các đánh giá chuyên sâu và chưa mở rộng ứng dụng thực tế. Đặc biệt, việc sử dụng cốt liệu tại chỗ như cát biển, sỏi biển, san hô vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ, dù đây là hướng đi quan trọng để tận dụng tài nguyên địa phương và giảm chi phí vật liệu.

Tại vùng ven biển Tây Nam Bộ, nguồn cốt liệu truyền thống như cát sông, đá dăm đang dần khan hiếm, trong khi cát biển, cát mặn và sỏi nhiễm mặn tại chỗ lại chưa được khai thác hiệu quả do các rào cản về kỹ thuật và độ bền vật liệu. Do đó, việc nghiên cứu phát triển bê tông xanh bền xâm thực sử dụng cốt liệu nhiễm mặn, đáp ứng được các yêu cầu về cường độ, độ bền lâu và khả năng chống xâm thực là một giải pháp khả thi nhằm xây dựng hạ tầng bền vững, giảm phụ thuộc vào vật liệu truyền thống và tận dụng hiệu quả nguồn tài nguyên địa phương.

Bên cạnh đó, bê tông truyền thống sử dụng xi măng Poóc lăng được biết đến là loại vật liệu có lượng phát thải CO_2 cao và tiêu hao nhiều tài nguyên thiên nhiên trong quá trình sản xuất. Theo các nghiên cứu [4], [5], để chế tạo được 1,0 tấn xi măng các loại thì đã phải thải ra môi trường khoảng 0,8-1,0 tấn CO_2 . Trước thực trạng đó, loại bê tông sử dụng chất kết dính không xi măng, tận dụng phế thải công nghiệp kết hợp với cốt liệu địa phương là hướng đi phù hợp với chiến lược tăng trưởng xanh và phát triển kinh tế tuần hoàn của Việt Nam.

Khu vực Tây Nam Bộ, với địa hình thấp, nền đất yếu, nhiều cửa sông đổ ra biển, ảnh hưởng trực tiếp của xâm nhập mặn, đang có nhu cầu cấp thiết trong việc phát triển hạ tầng giao thông, thủy lợi, phòng chống thiên tai và đảm bảo quốc phòng – an ninh. Việc nghiên cứu chế tạo loại bê tông xanh bền xâm thực từ cốt liệu nhiễm mặn không chỉ giúp chủ động xây dựng hạ tầng tại chỗ, giảm chi phí và rủi ro cung ứng vật tư, mà còn góp phần xử lý, tái sử dụng chất thải công nghiệp.

Trong bài viết này trình bày một số kết quả bước đầu của nghiên cứu đánh giá đặc tính của bê tông xanh bền xâm thực sử dụng cốt liệu nhiễm mặn định hướng ứng dụng trong xây dựng hạ tầng khu vực cửa sông - ven biển Tây Nam Bộ.

2. Vật liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

Để chế tạo bê tông không xi măng cường độ, trong nghiên cứu này sử dụng các loại vật liệu sau:

2.1. Vật liệu sử dụng

a) Chất kết dính không xi măng, gồm có:

- Tro bay (BT) sử dụng trong nghiên cứu là tro bay loại F – một loại phụ gia khoáng hoạt tính được thu hồi từ quá trình đốt than trong nhà máy nhiệt điện Duyên Hải 1 (Trà Vinh). Vật liệu này có thành phần

chính là oxit silic (SiO_2), oxit nhôm (Al_2O_3) và oxit sắt (Fe_2O_3) hoạt tính. Chúng có khả năng tham gia phản ứng pozzolanic nhằm tăng cường độ và tính bền lâu của bê tông (Hình 1a).

- Xi lò cao nghiền mịn (Xi) được sử dụng trong nghiền cừ là sản phẩm phụ của quá trình luyện gang thép của Tập đoàn Hòa Phát. Sản phẩm xi sau quá trình sản xuất được làm nguội nhanh bằng nước và nghiền mịn đến mức độ mịn đạt cấp S75 hoặc S95 (Hình 1b).

- Silica fume SF90 được sử dụng trong nghiền cừ để tạo bê tông xanh bền xâm thực là loại có hàm lượng SiO_2 trên 90 %, ở dạng vô định hình, thu được từ khói lò hồ quang trong quá trình luyện silic hoặc ferrosilic (Hình 1c).

Các tính chất vật lý cơ bản của tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1, xi lò cao nghiền mịn Hòa Phát và silica fume SF90 được thể hiện trong Bảng 1.

b) Dung dịch siêu dẻo hoạt hóa

- Natri hydroxit (NaOH) có tên khoa học là Sodium Hydroxide, có công thức hóa học là NaOH , đáp ứng yêu cầu kỹ thuật qui định trong tiêu chuẩn TCVN 3793:1983 - Natri hydroxit kỹ thuật - yêu cầu kỹ thuật (Hình 2a). Trong nghiền cừ này, NaOH được sử dụng dưới dạng dung dịch với nồng độ mol là 10 mol/lít.

- Natri silicat (Na_2SiO_3) dạng lỏng có tên khoa học là Sodium Silicate, với công thức hóa học là Na_2SiO_3 hay $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$. Trong giới hạn của nghiền cừ này, dung dịch Natri silicat có tỷ lệ theo khối lượng $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,5$ và hàm lượng tạp chất không tan trong nước không quá 0,5 %. Dung dịch Natri silicat đáp ứng yêu cầu kỹ thuật trong tiêu chuẩn 64TCN 38:1986 - Natri silicat (Hình 2b).



(a)- Tro bay nhiệt điện



(b)- Xi lò cao



(c)- Silica fume SF 90

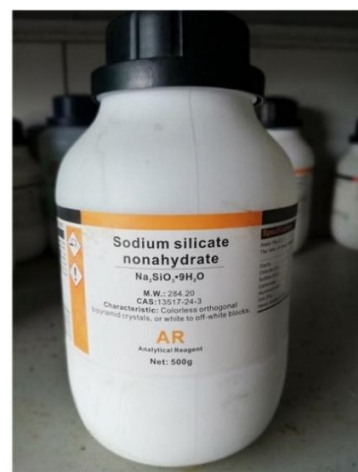
Hình 1. Chất kết dính sử dụng trong nghiền cừ.

Bảng 1 . Tính chất vật lý của tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1, xi lò cao nghiền mịn Hòa Phát và silica fume SF90.

Loại vật liệu	Tro bay	Xi luyện kim	Silica Fume SF-90
Tỷ diện bề mặt riêng (m^2/g)	0,82	0,35	12,15
Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,35	2,92	2,15
Khối lượng thể tích khô (kg/m^3)	1350	1450	760
Đường kính trung bình (μm)	20,47	12,55	2,45



(a) – Natri hydroxit dạng khan



(b) – Dung dịch Natri silicat

Hình 2. Dung dịch siêu dẻo hoạt hóa.

c) Phụ gia siêu dẻo

Phụ gia siêu dẻo được dùng để mục đích tăng tính công tác của hỗn hợp bê tông không xi măng. Trong nghiên cứu này đã sử dụng các loại phụ gia siêu dẻo thế hệ mới của nhà sản xuất Sika, SilkRoad SR5000F đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật qui định trong tiêu chuẩn TCVN 8826: 2011 - Phụ gia hoá học cho bê tông và vữa (Hình 3).



Hình 3. Phụ gia siêu dẻo hoạt hoá.

d) Cốt liệu

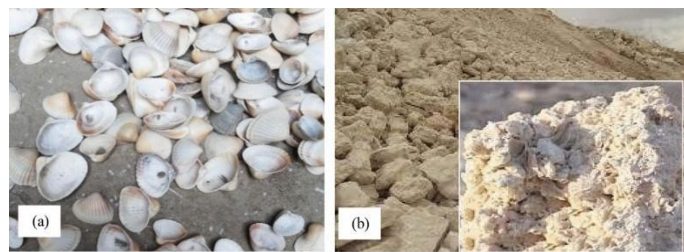
- Cốt liệu nhỏ là cát biển lấy từ khu vực ven bãi biển Trà Vinh, sau khi đã qua xử lý rửa mặn và sàng lọc tạp chất để đảm bảo các chỉ tiêu về độ sạch, hàm lượng ion clo và kích thước hạt phù hợp theo tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 – Cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật. Việc sử dụng cát biển góp phần giảm khai thác cát sông, đồng thời tận dụng hiệu quả nguồn tài nguyên tại chỗ.

- Cốt liệu lớn nghiền từ vỏ sò biển khu vực ven bãi biển Trà Vinh, vỏ sò được thu gom từ các vùng nuôi trồng thủy sản ven biển, sau đó được nghiền cơ học đến kích thước từ 5–10 mm và sàng lọc loại bỏ thành phần hạt mịn, tạp chất hữu cơ (Hình 4, Hình 5). Vỏ sò có thành phần cốt liệu thô, thay thế đá vôi trong nghiên cứu này. Việc thay thế đá dăm truyền thống bằng hạt vỏ sò nghiền mịn không chỉ giúp tiết kiệm nguồn tài nguyên thiên nhiên, mà còn mang lại hướng đi mới cho các vật liệu xây dựng xanh, tuần hoàn và bền vững ở khu vực ven biển.

e) Nước

Nước nhào trộn dùng để pha trộn NaOH dạng khan thành dạng dung dịch với nồng độ mol/lít hợp lý. Mặt khác, một phần nước trộn được sử dụng để thấm ướt bề mặt của cốt liệu và tạo ra độ chảy dẻo thích hợp cho hỗn hợp bê tông. Nước nhào trộn đáp ứng các yêu cầu

kỹ thuật qui định trong tiêu chuẩn TCVN 4506: 2012 - Nước trộn bê tông và vữa. Yêu cầu kỹ thuật.



Hình 4. Vỏ sò loại thô (a) và các dạng hạt vỏ sò sau nghiền làm cốt liệu trong bê tông (b).



Hình 5. Vỏ sò tự nhiên tại khu vực ven biển.

2.2. Thiết kế thành phần cấp phối bê tông xanh sử dụng cốt liệu nhiễm mặn

Thành phần cấp phối của bê tông xanh sử dụng cốt liệu nhiễm mặn tại chỗ (như cát biển, vỏ sò nghiền...) được thiết kế trên cơ sở đảm bảo cả yêu cầu về cơ lý và khả năng chống xâm thực trong môi trường biển. Việc thiết kế cấp phối tuân theo các hướng dẫn và tiêu chuẩn đã được kiểm chứng thực tiễn, cụ thể như sau:

- Cấp phối hỗn hợp bê tông được tính toán theo phương pháp thể tích tuyệt đối, có hiệu chỉnh phù hợp với đặc điểm hút nước và độ rỗng của cốt liệu nhiễm mặn có nguồn gốc từ ven biển Tây Nam Bộ [8], [9].

- Chất kết dính không xi măng sử dụng trong nghiên cứu là tổ hợp tro bay nhiệt điện và xi hạt lò cao nghiền mịn, được hoạt hóa bằng dung dịch kiềm (NaOH và Na_2SiO_3) theo tỷ lệ tối ưu. Tỷ lệ này được xác định dựa trên kết quả của các nghiên cứu trước, như trong đề tài NCKH cấp Quốc gia mã số KC.08.21/16-20 (năm 2021) [10].

- Tỷ lệ thành phần và hàm lượng dung dịch kiềm được lựa chọn theo hướng dẫn kỹ thuật tại Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD của Bộ Xây dựng [11], đồng thời được điều chỉnh phù hợp với điều kiện xâm thực của khu vực ven biển Tây Nam Bộ và đặc điểm của cốt liệu nhiễm mặn. Cấp phối thí nghiệm của bê tông xanh sử dụng cốt liệu nhiễm mặn được xác định và trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Cấp phối thí nghiệm của bê tông xanh sử dụng cốt liệu nhiễm mặn.

Ký hiệu mẫu bê tông	Cấp phối thí nghiệm của bê tông xanh sử dụng cốt liệu nhiễm mặn (kg/m ³)								
	Tro bay nhiệt điện	Xi lò cao	Silica fume SF-90	Dung dịch NaOH 10 mol/lít	Dung dịch Na ₂ SiO ₃	Phụ gia siêu dẻo	Đá dăm từ vỏ sò kích thước 5-10 mm	Cát biển	Nước bổ sung
BTX-01	403	323	80,7	77,8	249	4,03	678	532	120
BTX-02	406	324	81,1	76,3	244	4,06	681	535	125
BTX-03	408	326	81,5	74,7	239	4,08	685	538	128

2.3. Các tính chất của sản phẩm bê tông xanh bền xâm thực

Các hỗn hợp bê tông xanh không xi măng được chế tạo và đánh giá trong điều kiện phòng thí nghiệm với các tính chất cơ lý của sản phẩm sau khi thí nghiệm như sau:

- Tính công tác của hỗn hợp bê tông đảm bảo thi công tốt, với độ sụt dao động từ 12–20 cm, phù hợp cho thi công các kết cấu hạ tầng chịu ảnh hưởng trực tiếp của nước biển.
- Cường độ chịu nén ở 28 ngày đạt từ 50–60 MPa, đảm bảo yêu cầu về độ bền cơ học của kết cấu chịu tải trong môi trường biển.
- Thời gian phá hoại trong dung dịch nước biển nhân tạo đạt trên 60 ngày, chứng minh khả năng chống xâm thực kéo dài của sản phẩm.
- Khả năng chống thấm ion Cl⁻ được đánh giá thông qua phương pháp ăn mòn nhanh, với lượng điện tích truyền qua không vượt quá 250 culông, hạn chế nguy cơ ăn mòn cốt thép bên trong kết cấu.

3. Công nghệ chế tạo bê tông xanh từ cốt liệu nhiễm mặn tại vùng ven biển Tây Nam Bộ

Để phù hợp với điều kiện đặc thù của khu vực ven biển Tây Nam Bộ – nơi có nguồn tài nguyên cốt liệu phong phú nhưng phần lớn bị nhiễm mặn – công nghệ chế tạo bê tông cần hướng đến mục tiêu bền vững, tiết kiệm tài nguyên và chống xâm thực tốt trong môi trường biển. Công nghệ được đề xuất tập trung vào việc tận dụng các loại cốt liệu sẵn có tại chỗ, đồng thời sử dụng chất kết dính không xi măng hoặc hàm lượng xi măng thấp nhằm giảm phát thải CO₂, hướng tới mục tiêu phát triển công trình xanh.

- Cốt liệu: Cốt liệu thô được chế tạo từ vỏ sò biển nghiền, cốt liệu nhỏ là cát biển được sàng lọc và sử dụng trực tiếp sau khi loại bỏ tạp chất thô. Các vật liệu này phần lớn mang tính nhiễm mặn nhưng có thể được sử dụng hiệu quả trong hệ chất kết dính phù hợp.

- Chất kết dính: Hệ chất kết dính không xi măng bao gồm tro bay, xi lò cao, xi đáy lò... kết hợp với dung dịch kiềm hoạt hóa như NaOH và Na₂SiO₃ [5], [12], [13]. Trong một số trường hợp, có thể sử dụng một lượng nhỏ xi măng để tăng cường khả năng đóng rắn ban đầu hoặc điều chỉnh tính công tác. Hệ chất kết dính được phối trộn theo tỷ lệ tối ưu để đảm bảo độ bền cơ học, khả năng kháng xâm thực và thích ứng với môi trường nhiễm mặn.

- Phụ gia và cốt sợi: Bê tông có thể được gia cường bằng các loại sợi như sợi thủy tinh kháng kiềm, sợi polypropylen, sợi carbon hoặc xơ

dừa biển. Các loại sợi này giúp tăng khả năng chống nứt, cải thiện độ dẻo dai và kéo dài tuổi thọ công trình trong điều kiện ẩm ướt và ăn mòn cao.

3.1. Thi công bê tông xanh tại chỗ ở khu vực ven biển Tây Nam Bộ

Với các tuyến ven biển, công nghệ thi công tại chỗ là giải pháp hợp lý giúp tiết kiệm chi phí vận chuyển và tận dụng tối đa vật liệu sẵn có. Các bước cơ bản như sau:

- + Thu gom và sơ chế cốt liệu tại chỗ: Vỏ sò và cát biển được khai thác và xử lý cơ bản tại các bãi ven biển. Vỏ sò sau khi phơi khô tự nhiên được nghiền thô và mịn, phân loại theo kích thước để sử dụng làm cốt liệu thô và mịn.
- + Phối trộn bê tông: Các cốt liệu nhiễm mặn sau xử lý được phối trộn với chất kết dính kiềm hoạt hóa và phụ gia. Thiết bị trộn có thể bố trí di động hoặc bán cố định tại các điểm thi công, tận dụng năng lượng mặt trời hoặc nguồn điện địa phương.
- + Thi công cấu kiện: Hỗn hợp bê tông được sử dụng để thi công trực tiếp các hạng mục hạ tầng như đường giao thông nông thôn ven biển, nền móng nhà, kè chắn sóng hoặc gạch không nung [14]. Quá trình thi công ưu tiên sử dụng máy móc năng lượng thấp, phù hợp với điều kiện giao thông khó khăn vùng ngập mặn.

3.2. Chế tạo cấu kiện bê tông đúc sẵn từ cốt liệu nhiễm mặn tại vùng ven biển Tây Nam Bộ

Ngoài thi công tại chỗ, công nghệ còn có thể áp dụng trong sản xuất cấu kiện bê tông đúc sẵn tại các nhà máy gần khu vực ven biển:

- Các sản phẩm ưu tiên như khối phá sóng (Tetrapod, Dolos), block đê kè, tấm lát bờ, cọc ly tâm, ống cống hoặc cấu kiện lắp ghép cho nhà ở ven biển, trạm kiểm soát, cầu tàu nhỏ.
- Bê tông sử dụng cốt liệu nhiễm mặn địa phương (cát biển, vỏ sò) kết hợp với chất kết dính không xi măng hoặc hàm lượng xi măng thấp giúp giảm chi phí, đồng thời đạt độ bền cao trong môi trường xâm thực.
- Quá trình sản xuất có thể chủ động kiểm soát chất lượng, từ đó đảm bảo tính ổn định cho các cấu kiện đúc sẵn trước khi vận chuyển và lắp đặt tại hiện trường.

4. Kết luận và kiến nghị

4.1. Kết luận

Từ các nghiên cứu tổng quan và kết quả thí nghiệm ban đầu trong điều kiện phòng thí nghiệm, đề tài bước đầu đưa ra một số kết luận như sau:

- Những vật liệu tại chỗ ở khu vực ven biển Tây Nam Bộ là cát biển, vỏ sò nghiền có tiềm năng làm cốt liệu cho bê tông xanh, giúp tiết giảm chi phí vận chuyển và tận dụng nguồn tài nguyên sẵn có.

- Khi kết hợp các loại cốt liệu nhiễm mặn với hệ chất kết dính không xi măng (tro bay, xi lò cao, dung dịch kiềm hoạt hóa), hỗn hợp bê tông đạt được tính công tác tốt (độ sụt 12–20 cm), cường độ nén cao (từ 50–60 MPa tại 28 ngày), đồng thời thể hiện khả năng chống xâm thực tốt trong môi trường nước biển nhân tạo.

- Việc sử dụng loại bê tông này góp phần giảm phát thải CO₂, hướng đến giải pháp xây dựng hạ tầng xanh, bền vững tại khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của mặn hóa và biến đổi khí hậu như Tây Nam Bộ.

- Việc nghiên cứu và ứng dụng bê tông xanh sử dụng cốt liệu nhiễm mặn góp phần quan trọng trong việc nâng cao tính tự chủ về vật liệu xây dựng tại các vùng cửa sông, ven biển Tây Nam Bộ – nơi gặp nhiều khó khăn về vận chuyển và cung ứng vật tư truyền thống.

- Bê tông xanh bền xâm thực có thể ứng dụng vào các kết cấu như đê kè, bờ bao, khối phá sóng, đường bộ ven biển, cũng như các công trình phục vụ an ninh – quốc phòng tại khu vực cửa sông, biển đảo phía Nam.

- Đề tài là cơ sở khoa học và thực tiễn để đề xuất các giải pháp tích hợp giữa phát triển vật liệu xây dựng xanh và chiến lược quản lý xây dựng bền vững, phục vụ cho các chương trình trọng điểm về hạ tầng ứng phó với biến đổi khí hậu, nước biển dâng và phát triển kinh tế biển theo định hướng của Chính phủ.

4.2. Kiến nghị

- Kiến nghị các cơ quan chuyên ngành như Bộ Xây dựng, Bộ Giao thông Vận tải và chính quyền các tỉnh ven biển Tây Nam Bộ xem xét hỗ trợ thí điểm ứng dụng loại bê tông này vào các công trình phòng chống thiên tai, đê kè, đường giao thông ven biển và công trình phục vụ quốc phòng.

- Kiến nghị Bộ Xây dựng sớm ban hành tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật chuyên biệt cho bê tông xanh sử dụng cốt liệu nhiễm mặn, đồng thời tích hợp vào hệ thống văn bản quản lý chất lượng công trình xây dựng. Việc này nhằm đảm bảo tính pháp lý, kiểm soát chất lượng từ khâu thiết kế, thi công đến nghiệm thu, đặc biệt đối với các công trình ven biển có điều kiện khắc nghiệt.

- Xem xét tích hợp vào các chương trình phát triển vật liệu xây dựng xanh, thân thiện môi trường, hướng đến chiến lược phát triển bền vững cho khu vực đồng bằng sông Cửu Long thích ứng với biến đổi khí hậu và nước biển dâng.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Chính phủ. (2017). Nghị quyết số 120/NQ-CP ngày 17/11/2017 về phát triển bền vững đồng bằng sông Cửu Long thích ứng với biến đổi khí hậu. Hà Nội.
- [2]. Tạp chí Quốc phòng toàn dân. (n.d.). *Khái lược về các khu vực biển và hải đảo của Việt Nam*. <https://tapchiquoiphong.vn/vi/bien-dao-viet-nam/khai-luoc-ve-cac-khu-vuc-bien-va-hai-dao-cua-viet-nam/7961.html>
- [3]. Ban Chấp hành Trung ương Đảng Cộng sản Việt Nam. (2022). Nghị quyết số 13-NQ/TW về phương hướng phát triển kinh tế – xã hội và bảo đảm quốc phòng, an ninh vùng Đồng bằng sông Cửu Long đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045. Hà Nội.
- [4]. Thủ tướng Chính phủ. (2023). Quyết định số 886/QĐ-TTg ngày 24/7/2023 về việc phê duyệt chương trình phát triển vật liệu xây dựng bền vững đến năm 2030. Hà Nội.
- [5]. Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw, D. M., Rangan B.V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472.
- [6]. Jadambaa, T., Rickard, W. D. A., & Van Riessen, A. (2013). Characterization of various fly ashes for preparation of geopolymers with advanced applications. *Advanced Powder Technology*, 24(4), 659–665.
- [7]. Tăng Văn Lâm, Bulgakov, B. I. (2022). Khả năng chế tạo bê tông cường độ cao hạt mịn sử dụng chất kết dính không xi măng. *Tạp chí Vật liệu & Xây dựng*.
- [8]. Nguyễn An Niên, Nguyễn Văn Lân. (1999). Nghiên cứu xâm nhập mặn ở vùng ven biển Tây Nam Bộ. Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam
- [9]. Nguyễn Như Khuê. (1994). Đặc điểm xâm nhập mặn ở Đồng bằng sông Cửu Long. Viện Quy hoạch Thủy lợi Miền Nam.
- [10]. Đặng Việt Dũng, Nguyễn Văn Tuấn. (2021). Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp Quốc gia KC.08.21/16-20: Nghiên cứu vật liệu xanh không xi măng chịu môi trường xâm thực biển. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [11]. Bộ Xây dựng. (1998). Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại theo Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD ngày 05/9/1998. Hà Nội.
- [12]. Nguyễn Tiến Dũng, Nguyễn Mạnh Tuấn. (2016). Nghiên cứu về vữa Geopolymer sử dụng tro bay–xi lò cao. Hội nghị ACF lần thứ 7: Bê tông bền vững cho hiện tại và tương lai, Hà Nội.
- [13]. Nath, P., & Sarker, P. K. (2011). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171.
- [14]. Bộ Xây dựng. (2020). Định hướng phát triển vật liệu xây dựng bền vững vùng Đồng bằng sông Cửu Long. Hà Nội.