

Tổng quan về vật liệu kỹ thuật composite gốc xi măng (ECC) sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng: Tính chất và tiềm năng ứng dụng trong xây dựng hạ tầng giao thông

Lâm Trí Khang¹, Phạm Ngọc Phương¹, Huỳnh Trọng Phước^{2,*}

¹ Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

² Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Bách Khoa – Đại học Cần Thơ

TỪ KHOÁ

Cát nhiễm mặn
Phụ gia khoáng
Tro bay
Xi lò cao nghiền mịn
ECC
Cấu kiện hạ tầng giao thông

TÓM TẮT

Bài báo này tổng hợp và phân tích các nghiên cứu liên quan đến cát nhiễm mặn, phụ gia khoáng (tro bay [FA] và xi lò cao nghiền mịn [GGBFS]) và khả năng kết hợp của chúng trong chế tạo vật liệu kỹ thuật composite gốc xi măng (ECC) cho các cấu kiện hạ tầng giao thông. Cát nhiễm mặn tại Việt Nam có trữ lượng lớn, thành phần SO₃ thấp và kích thước hạt mịn, đồng thời chứa ion Cl⁻ có thể ảnh hưởng bất lợi nếu không được kiểm soát hợp lý. Các phụ gia khoáng (FA và GGBFS) giàu Al₂O₃, có khả năng thúc đẩy phản ứng pozzolan, hình thành các sản phẩm bền vững như muối Friedel và gel C-S-H, từ đó cải thiện đáng kể cường độ và độ bền lâu dài của ECC. Sự kết hợp cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng được ghi nhận có thể nâng cao cường độ chịu nén, kéo và uốn; giảm co khô; tăng khả năng kháng môi; tăng cường tự phục hồi và chống xâm thực trong môi trường chứa clorua và sulfate. Các kết quả tổng hợp cho thấy hệ vật liệu ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp với phụ gia khoáng là giải pháp nhiều tiềm năng cho vật liệu xây dựng hạ tầng giao thông trong bối cảnh thiếu hụt nguồn cát tự nhiên và yêu cầu phát triển bền vững.

KEYWORDS

Salt-contaminated sand
Mineral additives
Fly ash
Ground granulated blast-furnace slag
ECC
Transport infrastructure components

ABSTRACT

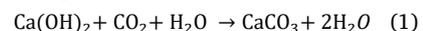
This paper summarizes and analyzes previous studies related to salt-contaminated sand, mineral additives (fly ash [FA] and ground granulated blast-furnace slag [GGBFS]), and their potential combinations in the production of engineered cementitious composites (ECC) for transport infrastructure components. Salt-contaminated sand in Vietnam has large reserves, low SO₃ content, and relatively fine particle size, and contains Cl⁻ ions that can have adverse effects if not properly controlled. Mineral additives (FA and GGBFS) are rich in Al₂O₃, which can promote pozzolanic reactions, forming stable products such as Friedel's salt and C-S-H gel, thereby significantly improving both the mechanical strength and durability of ECC. The combination of salt-contaminated sand and mineral additives is noted to be able to improve compressive, tensile and flexural strengths; reduce drying shrinkage; increase fatigue resistance; and enhance self-healing and anti-erosion in chloride and sulfate-containing environments. The results show that the ECC system using salt-contaminated sand combined with mineral additives is a potential solution for construction materials for transport infrastructure in the context of shortage of natural sand resources and requirements for sustainable development.

1. Giới thiệu

Trong lĩnh vực xây dựng hạ tầng giao thông, nhiều cấu kiện đặc thù đòi hỏi cường độ chịu kéo cao, độ dẻo lớn, và khả năng duy trì hiệu suất ổn định trong suốt vòng đời làm việc. Các cấu kiện như dầm, bản mặt cầu, lan can phòng hộ và các chi tiết chịu uốn – kéo thường phải chịu tải trọng động, tải trọng lặp, rung động, cũng như biến thiên nhiệt độ lớn trong điều kiện khí hậu nhiệt đới. Tại Việt Nam, sự thay đổi thời tiết liên tục (mưa – nắng – ẩm – khô) kết hợp với môi trường ven biển làm các cấu kiện này dễ bị suy giảm chất lượng do nhiều cơ chế xâm thực khác nhau. Các cấu kiện giao thông thường nằm ở vùng khí quyển

gần bờ hoặc tiếp giáp mặt nước, nơi nồng độ CO₂, ion Cl⁻ và SO₄²⁻ cao hơn bình thường. Những tác nhân này gây ra các cơ chế suy thoái điển hình như cacbonat hóa, tấn công sulfate, xâm thực ion Cl⁻, rửa trôi và ăn mòn vi sinh. Các cơ chế kể trên hoạt động độc lập hoặc kết hợp, làm giảm độ kiềm, phá hủy màng thụ động của cốt thép và gây nứt – phá hoại kết cấu theo thời gian [1], [2].

Trong đó, cacbonat hóa là cơ chế quan trọng, xảy ra khi CO₂ trong không khí xâm nhập vào bê tông và phản ứng với Ca(OH)₂, làm giảm pH và phá hủy lớp màng thụ động bảo vệ cốt thép. Phản ứng này được mô tả trong phương trình (1) [2], [3].



*Liên hệ tác giả: htphuoc@ctu.edu.vn

Nhận ngày 03/12/2025, sửa xong ngày 19/12/2025, chấp nhận đăng ngày 22/12/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2026.1194>

Sự giảm độ kiềm khiến thép dễ bị oxy hóa, dẫn đến hình thành vết gỉ, làm tăng thể tích và tạo ứng suất cục bộ trên bề mặt tiếp xúc giữa thép và bê tông. Theo thời gian, các vết nứt lan rộng và làm suy yếu khả năng chịu lực của cấu kiện, đồng thời làm tăng co ngót và giảm độ bền của kết cấu BTCT [3]. Cùng với cacbonat hóa, tấn công sulfate xảy ra khi ion SO_4^{2-} xâm nhập vào bê tông, phản ứng với các sản phẩm hydrat để tạo thành ettringite gây trương nở và phá hủy kết cấu theo phương trình (2) [1], [2].



Ngoài ra, xâm thực ion Cl^- xuất hiện khi nồng độ ion Cl^- bên ngoài cao hơn bên trong bê tông. Các ion này di chuyển theo cơ chế khuếch tán hoặc thẩm thấu, xâm nhập vào vùng bảo vệ của thép và gây ăn mòn cục bộ mà không cần giảm pH, khác với cơ chế cacbonat hóa [2], [3], [4]. Hiện tượng co ngót – giãn nở trong chu kỳ khô – ướt cũng tạo ra các vết nứt vi mô, qua thời gian hình thành hệ thống nứt liên tục, làm giảm độ bền của kết cấu. Ngoài tác động của môi trường xâm thực, các tải trọng va đập và tải trọng lặp từ phương tiện giao thông cũng góp phần làm suy giảm độ cứng và tạo thêm vết nứt trong các cấu kiện này [5], từ đó đòi hỏi vật liệu có độ dẻo và khả năng kiểm soát nứt vượt trội như ECC.

Để đảm bảo chất lượng công trình, Việt Nam đã ban hành các yêu cầu kỹ thuật đối với từng loại cấu kiện hạ tầng giao thông [6], [7], [8]. Một số yêu cầu tiêu biểu được tổng hợp trong Bảng 1, minh họa rằng vật liệu sử dụng không chỉ cần đạt cường độ cao mà còn phải bảo đảm độ bền lâu, khả năng chống va đập và xâm thực.

Các yêu cầu trong Bảng 1 cho thấy cần có loại vật liệu đáp ứng các độ bền cơ học như cường độ chịu nén cao và cường độ kéo uốn lớn. Đối chiếu với các kết quả tổng hợp từ tài liệu, ECC và đặc biệt là ECC sử dụng cát nhiễm mặn cho thấy cường độ chịu nén thường nằm trong khoảng 50–160 MPa, trong khi cường độ kéo uốn đạt từ 5–8 MPa, đáp ứng hoặc vượt các yêu cầu kỹ thuật đối với mặt đường, mặt cầu và lan can phòng hộ theo các tiêu chuẩn hiện hành. Vật liệu kỹ thuật gốc xi măng (ECC) đáp ứng tốt các tiêu chí này nhờ đặc tính dẻo, biến dạng kéo lớn và khả năng kiểm soát nứt ưu việt. ECC – còn gọi là bê tông dẻo, bê tông biến dạng cứng hay composite xi măng kỹ thuật – là vật liệu gốc xi măng gia cường sợi, có khả năng chịu kéo vượt trội so với bê tông thường [9], [10]. Tính chất này đạt được nhờ thiết kế dựa trên cơ học vi mô, tối ưu hóa tương tác giữa đá xi măng – sợi – bề mặt tiếp xúc [11], [12], [13]. Thể tích sợi đóng vai trò quyết định giúp ECC phát triển cơ chế nứt đa điểm, duy trì trạng thái ổn định và tránh phá hoại cục bộ [14]. Mặc dù đã có các nghiên cứu tổng quan gần đây tập trung vào đặc tính vật liệu, mô tả và kiểm soát chất lượng của ECC nói chung, các nghiên cứu này chủ yếu xem xét ECC trong điều kiện sử dụng cốt liệu và môi trường truyền thống, trong khi các vấn đề liên quan đến ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp phụ gia khoáng và đối chiếu với yêu cầu hạ tầng giao thông vẫn chưa được tổng hợp một cách hệ thống. Do đó, bài báo này nhằm lấp đầy khoảng trống trên bằng cách tổng hợp và phân tích các nghiên cứu theo chuỗi logic từ vật liệu – cơ chế vi mô – tính chất cơ học và độ bền – đến mức độ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, qua đó làm rõ điểm mới và giá trị ứng dụng của ECC sử dụng

cát nhiễm mặn và FA/GGBFS. Đặc tính của ECC được so sánh chi tiết với bê tông sợi (FRC) và bê tông siêu tính năng (UHPC) trong Bảng 2. Trong nghiên cứu này, việc tổng hợp tài liệu được thực hiện theo hướng tổng quan có cấu trúc, tập trung thu thập và phân tích các công trình liên quan đến ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng từ các cơ sở dữ liệu khoa học uy tín, với trọng tâm là các kết quả thực nghiệm về cơ chế vi mô, tính chất cơ học và độ bền lâu trong điều kiện môi trường xâm thực.

Do sử dụng hoàn toàn cốt liệu mịn, ECC kiểm soát sự tương tác ở bề mặt tiếp xúc giữa sợi và đá xi măng tốt hơn, tạo nên cơ chế phá hoại dẻo và tăng khả năng chịu kéo lên 2–10 %, cao hơn nhiều lần so với FRC (~0,1 %) [12], [15], [16]. Ngược lại, FRC và UHPC sử dụng cốt liệu thô nên khó kiểm soát bề mặt tiếp xúc của đá xi măng, và thường không đạt được hành vi hóa cứng biến dạng [17]. Tuy nhiên, việc chế tạo ECC đang gặp thách thức do nguồn cát sông ngày càng khan hiếm, khai thác quá mức và sụt giảm phù sa tại ĐBSCL [18], [19]. Nhu cầu cát xây dựng cả nước (~130 triệu m^3 /năm) vượt xa khả năng cung cấp pháp (~62 triệu m^3 /năm), chỉ đáp ứng 40–50 % nhu cầu. Vì vậy, nhiều giải pháp thay thế đã được đề xuất như sử dụng cát nhân tạo [20], phụ gia khoáng làm cốt liệu mịn [21], và cát nhiễm mặn để thay thế cát sông [22].

Tại Việt Nam, cát nhiễm mặn có trữ lượng khoảng 196 tỷ m^3 , trong đó ĐBSCL có hai mỏ lớn tại Sóc Trăng (13,9 tỷ m^3) và Trà Vinh (2,1 triệu m^3) [23]. Nguồn vật liệu này dễ khai thác bằng tàu công suất lớn, chi phí bồi hoàn thấp và giá thành rẻ hơn cát sông [24]. Đã có nghiên cứu chứng minh tính khả thi của việc sử dụng cát nhiễm mặn để chế tạo bê tông trong nước [25], trong khi các nghiên cứu quốc tế đã ứng dụng cát nhiễm mặn và ECC trong vật liệu sửa chữa cầu đường, bản mặt cầu liên hợp và lớp phủ nền đường [11], [26], [27]. Một số nghiên cứu khác cũng đã chế tạo ECC thành công từ cát nhiễm mặn [28], [29], [30].

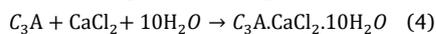
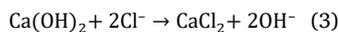
Song song với việc tìm nguồn cát thay thế, các nghiên cứu hiện nay cũng tập trung giảm lượng xi măng trong ECC bằng cách sử dụng phụ gia khoáng như FA, GGBFS, muội silic, bùn đỏ, bột thủy tinh, bột ceramic [31]. Những phụ gia này có nguồn gốc công nghiệp, chi phí thấp và phát thải CO_2 ít hơn xi măng truyền thống [32]. FA giúp duy trì độ sụt, giảm thẩm và giảm tác động môi trường, trong khi GGBFS tăng cường độ nén, cải thiện độ bền và làm đặc chắc vi cấu trúc [33], [34]. Do đó, việc kết hợp cát nhiễm mặn với phụ gia khoáng trong ECC được xem là giải pháp vật liệu đầy tiềm năng, vừa nâng cao tính bền vững, vừa tối ưu hóa hiệu suất cơ học và giảm chi phí nhờ cải thiện vi cấu trúc và khả năng kháng xâm thực. Trong phạm vi bài báo này, ECC được sử dụng như một khái niệm chung cho vật liệu kỹ thuật composite gốc xi măng có gia cường sợi, trong khi trọng tâm phân tích tập trung vào nhóm ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp với FA và/hoặc GGBFS, nhằm làm rõ đặc điểm và tiềm năng ứng dụng của hệ vật liệu này trong điều kiện môi trường ven biển. Tuy nhiên, tại Việt Nam, các nghiên cứu về ECC sử dụng đồng thời cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng còn hạn chế. Nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng sử dụng hai loại vật liệu này trong chế tạo ECC cho cấu kiện hạ tầng giao thông. Trên cơ sở đó,

bài báo này đóng góp các nội dung chính sau: (i) tổng hợp có hệ thống các nghiên cứu về ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp phụ gia khoáng, với trọng tâm là mối tương tác giữa thành phần vật liệu, cơ chế vi mô và tính chất cơ học – độ bền; (ii) đối chiếu định lượng các đặc trưng cơ học điển hình của ECC với yêu cầu kỹ thuật của một số cấu kiện hạ tầng giao thông, qua đó làm rõ mức độ phù hợp của vật liệu đối với ứng dụng thực tế; và (iii) xác định các khoảng trống nghiên cứu liên quan đến ứng xử lâu dài, độ bền trong môi trường xâm thực và khả năng triển khai ngoài hiện trường của ECC sử dụng cát nhiễm mặn, làm cơ sở định hướng cho các nghiên cứu tiếp theo, đặc biệt trong bối cảnh điều kiện tài nguyên và môi trường ven biển Việt Nam.

2. Đặc điểm vật liệu sử dụng

2.1. Cát nhiễm mặn

Cát nhiễm mặn là loại cát có chứa các muối hòa tan như CaSO_4 , NaCl và CaCl_2 . Các muối này có thể rút ngắn thời gian đông kết và làm tăng nhiệt độ thủy hóa của bê tông trong quá trình đóng rắn [35]. So với cát sông, cát nhiễm mặn thường có kích thước hạt mịn hơn và khối lượng riêng lớn hơn do chứa một lượng đáng kể vỏ sò có thành phần chính là CaCO_3 . Thành phần này có thể góp phần cải thiện độ đặc chắc và cường độ của hỗn hợp, mặc dù ảnh hưởng này nhìn chung không lớn do hàm lượng vỏ sò thường chỉ chiếm tỉ lệ nhỏ trong cát nhiễm mặn [36], [37]. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của cát nhiễm mặn là hàm lượng ion Cl^- và SO_4^{2-} cao, có thể gây ra các cơ chế ăn mòn cốt thép và phá hoại cấu trúc bên trong ECC. Do đó, việc sử dụng cát nhiễm mặn trong ECC cần được kết hợp với các giải pháp vật liệu nhằm giảm thiểu tác động của các ion xâm thực. Nghiên cứu của Yao và cộng sự [38] cho thấy ion Cl^- trong cát nhiễm mặn có thể phản ứng với C_3A trong xi măng để tạo thành muối Friedel theo các phản ứng ở phương trình (3) và phương trình (4) dưới đây:



Sự hình thành muối Friedel giúp cố định ion Cl^- trong đá xi măng, từ đó giảm khả năng khuếch tán và giảm tốc độ thấm của ion Cl^- vào trong ECC [3]. Hiệu quả tạo muối Friedel phụ thuộc nhiều vào hàm lượng Al_2O_3 , do Al_2O_3 thúc đẩy sự hình thành pha C_3A . Các vật liệu giàu Al_2O_3 như FA (26–42 %) và GGBFS (10–15 %) có hàm lượng Al_2O_3 cao hơn xi măng Portland (3–9 %) (Bảng 3). Do đó, việc sử dụng phụ gia khoáng kết hợp với cát nhiễm mặn không chỉ làm tăng lượng C_3A trong đá xi măng mà còn cải thiện đáng kể khả năng kháng ăn mòn ion Cl^- của ECC.

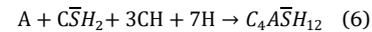
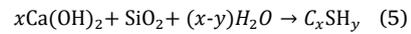
2.2. Phụ gia khoáng

Phụ gia khoáng là các vật liệu vô cơ dạng bột mịn được sử dụng để cải thiện tính chất của xi măng và bê tông. Chúng thường được phân thành ba nhóm chính: chất kết dính pozzolan, chất hoạt hóa pozzolan và chất độn [46]. Trong chế tạo ECC, hai loại phụ gia khoáng được sử dụng phổ biến nhất là tro bay (FA) và xi lò cao nghiền mịn (GGBFS)

nhờ trữ lượng lớn, chi phí hợp lý và khả năng cải thiện đa dạng các tính chất của vật liệu.

2.2.1. Tro bay

Tro bay là phụ phẩm công nghiệp có trữ lượng dồi dào, chứa các oxit chủ yếu là SiO_2 , Al_2O_3 và CaO . Các oxit này tham gia phản ứng pozzolan để tạo gel C–S–H – thành phần chính đóng góp vào cường độ và độ bền của vật liệu xi măng. Phản ứng pozzolan của FA diễn ra theo phương trình (5) và phương trình (6) [47], [48].



Thành phần hóa học chính của FA được liệt kê trong Bảng 3. Hàm lượng Al_2O_3 cao trong FA không chỉ hỗ trợ phản ứng pozzolan mà còn góp phần tăng lượng pha aluminat trong đá xi măng, từ đó thúc đẩy quá trình tạo muối Friedel khi kết hợp với cát nhiễm mặn.

2.2.2. Xi lò cao nghiền mịn

GGBFS là phụ phẩm sinh ra từ quá trình luyện gang trong lò cao. Các thành phần chính của GGBFS, bao gồm CaO , SiO_2 và Al_2O_3 , tương tự như xi măng Portland (Bảng 3). Độ mịn của GGBFS cũng tương đương với xi măng, tuy nhiên do cấu trúc thủy tinh nên tốc độ phản ứng thủy hóa của GGBFS chậm hơn. Để phản ứng pozzolan diễn ra hiệu quả, GGBFS cần được kích hoạt kiềm bởi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng [46]. Nhờ có hàm lượng oxit tương đồng với xi măng, việc sử dụng GGBFS trong ECC giúp tăng cường độ nén, cải thiện độ đặc chắc của vi cấu trúc và nâng cao độ bền lâu dài của vật liệu. Ngoài ra, kết hợp GGBFS với cát nhiễm mặn còn giúp tăng khả năng tạo muối Friedel, từ đó nâng cao khả năng chống ăn mòn ion Cl^- .

3. Khả năng ứng dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng trong chế tạo ECC

Cát nhiễm mặn tại Việt Nam có thành phần chính là SiO_2 , với hàm lượng SO_3 rất thấp (<0,1 %) (Bảng 4) nên hoàn toàn có thể sử dụng trong chế tạo bê tông theo tiêu chuẩn BS 8500-2. Mặc dù hàm lượng ion Cl^- trong cát nhiễm mặn thường cao hơn giới hạn 0,05 % theo TCVN 7570:2006, nhưng như đã trình bày ở mục 2.1, việc sử dụng các phụ gia khoáng giàu Al_2O_3 giúp giảm đáng kể lượng ion Cl^- tự do. Nhờ khả năng tạo các sản phẩm gắn kết clorua, đá xi măng trở nên đặc chắc hơn, làm giảm tốc độ thấm ion Cl^- và tăng tuổi thọ của cấu kiện ECC.

Cát nhiễm mặn có kích thước hạt tương đối nhỏ và mô đun độ lớn chỉ trong khoảng 1,6–2,6 (Hình 1), phù hợp với đặc điểm không sử dụng cốt liệu thô của ECC. Ngoài ra, hàm lượng vỏ sò thường nhỏ hơn 10 % nên tác động đến cường độ nén của ECC là không đáng kể. Một lợi ích quan trọng khác là việc sử dụng cát nhiễm mặn giúp giảm đáng kể nhu cầu khai thác cát sông – một hoạt động gây sạt lở và mất cân bằng trầm tích. Theo các chỉ số đánh giá vòng đời (LCA) được báo cáo mức giảm tác động môi trường lên tới 48 % khi thay thế hoàn toàn cát

sông bằng cát biển [49].

Ngoài cát nhiễm mặn, các loại phụ gia khoáng như FA và GGBFS được sử dụng rộng rãi để cải thiện tính chất của các vật liệu xi măng nói chung và ECC nói riêng. FA có hình dạng hạt cầu (Hình 2a), giúp giảm ma sát giữa các hạt, cải thiện tính công tác, giảm nhu cầu nước và lượng phụ gia siêu dẻo. Bên cạnh đó, phản ứng pozzolan xảy ra chậm ở giai đoạn đầu giúp giảm sinh nhiệt, làm giảm nguy cơ nứt do nhiệt

và hạn chế lượng CO₂ phát thải trong quá trình sản xuất [46], [50]. Ngược lại, GGBFS có hình dạng góc cạnh (Hình 2b), tạo hiệu quả liên kết cơ học lớn hơn ở vùng tiếp giáp đá xi măng – sợi, giảm trượt sợi và góp phần tăng cường độ chịu nén của ECC. Do thành phần hóa học gần giống xi măng, GGBFS cũng cải thiện đáng kể độ bền và mức độ đặc chắc của vi cấu trúc.

Bảng 1. Yêu cầu kỹ thuật của một số cấu kiện hạ tầng giao thông.

STT	Cấu kiện	Yêu cầu kỹ thuật	Tham khảo
1	Mặt đường bê tông	Cường độ kéo uốn > 5 MPa (mặt đường cao tốc, đường cấp I, cấp II và các đường có cấp quy mô giao thông nặng, rất nặng, cực nặng). Cường độ kéo uốn > 4,5 MPa (đường có quy mô giao thông cấp trung bình và các đường có quy mô giao thông cấp nhẹ nhưng có xe nặng với trục đơn > 100 kN). Cường độ kéo uốn > 4,0 MPa (đường có quy mô giao thông cấp nhẹ không có xe nặng với trục đơn > 100kN)	[6]
2	Mặt cầu	Cường độ chịu nén > 28 MPa	[7]
3	Lan can phòng hộ cứng	Cường độ chịu nén > 16 MPa	[8]

Bảng 2. So sánh giữa ECC, FRC và UHPC.

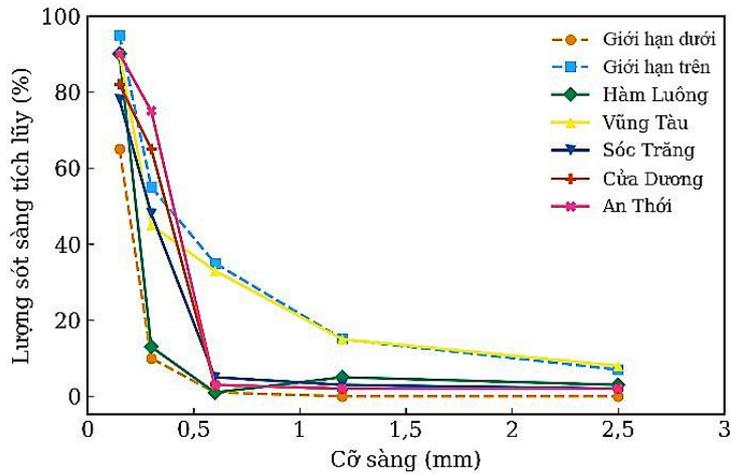
Tính chất	FRC	ECC	UHPC
Phương pháp thiết kế	-	Dựa trên phương pháp cơ học vi mô	-
Cấu trúc	Cốt liệu thô thông thường	Sử dụng cát/bột thạch anh siêu mịn	Hỗn hợp đá - xi măng được lên chặt
Sợi	Bất kì loại sợi nào, tỷ lệ thể tích sợi thường ở khoảng 2 %, đường kính sợi khoảng 500 µm	Thông thường, sợi polymer được sử dụng, tỷ lệ thể tích sợi thấp hơn hoặc bằng 2 %, đường kính của sợi < 50 µm	Sợi thép ngắn
Bề mặt tiếp xúc	Không khống chế	Các liên kết hóa học và liên kết ma sát thường được kiểm soát	-
Tính chất chịu kéo	Biến dạng mềm	Biến dạng cứng	Biến dạng cứng khó đảm bảo hoặc không đạt được
Biến dạng kéo	0,1 %	> 2 %	< 1 %
Bề rộng vết nứt	Không giới hạn	Thường ≤ 100–150 µm trong toàn bộ quá trình biến dạng cứng	-

Bảng 3. Thành phần chính của xi măng, FA và GGBFS.

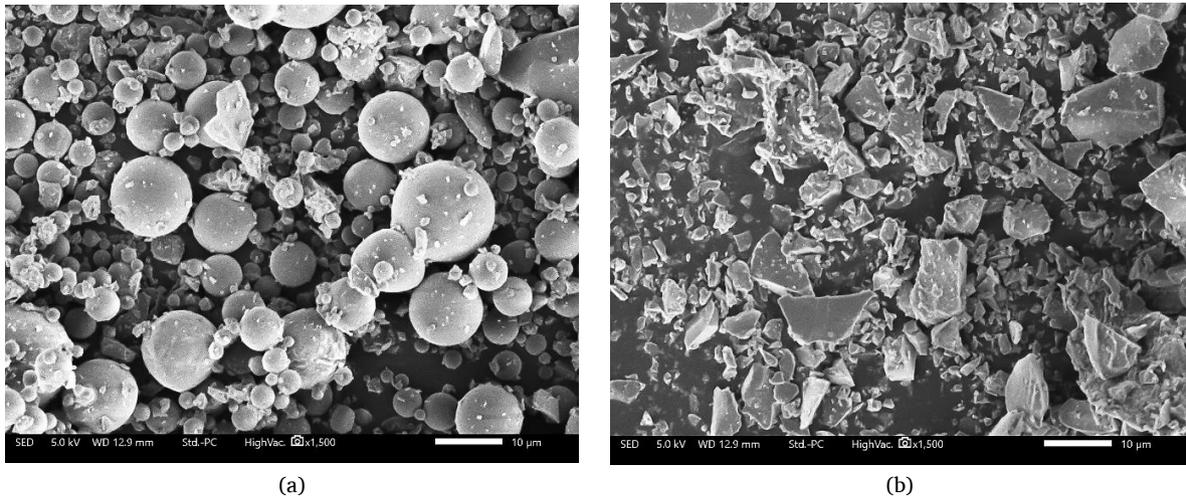
Thành phần hóa học chính	Vật liệu (%) [16], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45]		
	Xi măng	FA	GGBFS
CaO	60,08 – 68,98	0,2 – 11,84	35,38 – 43,51
SiO ₂	14,54 – 20,32	45,1 – 62	32,84 – 36,5
Al ₂ O ₃	3,25 – 9,53	26 – 40,2	10,65 – 16,32
Fe ₂ O ₃	3,04 – 6,31	2 – 7,23	0,33 – 3,2
MgO	1,69 – 3,83	0,29 – 2,08	7,02 – 11,32
SO ₃	2,05 – 4,14	0,67 – 2,1	2,21 – 2,92
Na ₂ O	0,17 – 0,25	0,52 – 1,73	0,3 – 0,38
K ₂ O	0,53 – 1,42	0,54 – 1,54	0,34 – 0,76
TiO ₂	0,19 – 0,95	1,22 – 2,48	0,82
P ₂ O ₅	0,16 – 5,26	0,41 – 0,47	-

Bảng 4. Thành phần chính của cát nhiễm mặn ở một số khu vực của Việt Nam [22].

Khu vực	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻
Quảng Trị	91,24	4,15	1,21	1,62	0,21	0,07	0,06
Đà Nẵng	90,63	3,26	1,02	1,15	0,32	0,07	0,04
Phú Yên	90,62	3,43	1,16	1,35	0,21	0,08	0,07
Bình Định	92,26	1,12	0,56	1,40	0,51	0,08	0,07
Cam Ranh	93,41	0,92	0,42	1,31	0,33	0,04	0,05
An Thới	91,62	1,58	0,62	1,36	0,32	-	0,07



Hình 1. Kích thước hạt cát nhiễm mặn ở một số khu vực ở Việt Nam [22].



Hình 2. Hình chụp vi cấu trúc của (a) FA và (b) GGBFS.

Sự kết hợp giữa phụ gia khoáng và cát nhiễm mặn đem lại nhiều hiệu quả tích cực. Ví dụ, dùng FA với cát nhiễm mặn giúp hỗn hợp duy trì độ sụt sau 1 giờ tương đương bê tông thường, đồng thời tăng khả năng chống thấm theo thời gian. Bê tông dùng cát nhiễm mặn và FA có độ co khô thấp hơn, từ đó giảm nguy cơ hình thành vết nứt [51]. Nhờ khả năng giảm nhiệt thủy hóa, FA còn làm giảm nhiệt độ tối đa trong ECC ở độ tuổi sớm, hạn chế nứt nhiệt. Với hàm lượng Al₂O₃ cao và thành phần phản ứng tương tự xi măng, FA và GGBFS có khả năng giảm tác

động tiêu cực của ion trong cát nhiễm mặn, tăng độ bền và hạn chế ăn mòn do ion Cl⁻. Nhờ tính chịu kéo cao và khả năng biến dạng lớn, ECC cũng có thể giảm ứng suất nội sinh phát sinh khi ettringite hình thành [52]. Như vậy, việc kết hợp cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng để chế tạo ECC là hoàn toàn khả thi. Các tính chất của ECC khi sử dụng hai nguồn vật liệu này sẽ được phân tích chi tiết trong mục 4 nhằm đánh giá mức độ phù hợp của ECC đối với các cấu kiện hạ tầng giao thông.

4. Đặc điểm cường độ của ECC khi sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp phụ gia khoáng

4.1. Cường độ chịu nén

Cường độ chịu nén của ECC có thể dao động trong phạm vi rất rộng, từ 20 MPa đến 160 MPa, và trong một số nghiên cứu đạt tới 210 MPa [15]. Giá trị này chịu ảnh hưởng mạnh bởi kích thước hạt cốt liệu, loại và hàm lượng phụ gia khoáng, cùng điều kiện bảo dưỡng.

Xét các yếu tố ảnh hưởng, kích thước hạt cốt liệu là thông số quan trọng đầu tiên, ECC sử dụng cát hạt thô thường đạt cường độ nén cao hơn so với ECC dùng cát trung hoặc mịn. Do cát mịn có diện tích bề mặt lớn nên cần nhiều nước hơn để bao phủ hạt, điều này bất lợi cho quá trình thủy hóa ban đầu. Ngược lại, cát thô có diện tích bề mặt nhỏ hơn, khả năng hút nước thấp nên giúp duy trì tỷ lệ nước hiệu quả hơn cho phản ứng thủy hóa, thúc đẩy sự phát triển sản phẩm C-S-H và tăng cường độ chịu nén [39]. Tuy nhiên, trong cát nhiễm mặn thường tồn tại một lượng nhỏ hạt vỏ sò có độ bền cơ học thấp hơn cát silic. Nếu hàm lượng vỏ sò vượt quá mức cho phép, cường độ chịu nén của ECC có thể bị suy giảm. Khi hàm lượng vỏ sò tăng, cấu trúc hạt kém bền hơn làm giảm khả năng chịu nén của ECC [9], [40]. Tuy nhiên, khi hàm lượng vỏ sò nhỏ hơn 10 % – mức thường gặp trong các mỏ cát nhiễm mặn – ảnh hưởng này không đáng kể (như đã thảo luận ở mục 3).

Xét về phụ gia khoáng, việc thay thế xi măng bằng FA ở mức cao có thể làm giảm cường độ nén do FA thủy hóa chậm, hạt mịn và cấu trúc không gian của FA không thuận lợi cho phát triển cường độ ở tuổi sớm [16], [53]. Tuy nhiên, khi sử dụng FA cùng cát nhiễm mặn, ion Cl⁻ từ NaCl trong cát có thể thúc đẩy phản ứng pozzolan, làm tăng lượng sản phẩm hydrat, làm đặc chắc vi cấu trúc và cải thiện cường độ nén [15], [40], [54]. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng ion Cl⁻ không trực tiếp tham gia phản ứng pozzolan mà chỉ làm tăng hoạt tính kiềm và tốc độ thủy hóa ban đầu, qua đó gián tiếp thúc đẩy phản ứng của FA/GGBFS. Cơ chế này khiến đá xi măng phát triển nhanh hơn trong môi trường có ion Cl⁻, đặc biệt ở tuổi sớm. Tương tự FA, GGBFS cũng là phụ gia khoáng giúp nâng cao cường độ nén nhờ phản ứng pozzolan diễn ra mạnh mẽ theo thời gian và tạo thêm sản phẩm C-S-H thứ cấp [45].

Điều kiện môi trường cũng ảnh hưởng đáng kể đến cường độ nén ECC. Trong một số điều kiện nhất định, ECC có xu hướng tăng cường độ nhờ hiện tượng co khô cũng như tốc độ tạo muối Friedel và ettringite nhanh hơn, giúp lấp đầy lỗ rỗng và làm đặc đá xi măng [41]. Khi bảo dưỡng ngập nước, mức độ thủy hóa tăng thêm giúp ECC phát triển cường độ nén tốt hơn.

4.2. Cường độ chịu kéo

Cường độ chịu kéo là đặc trưng quan trọng nhất của ECC, thể hiện rõ sự khác biệt của vật liệu này so với các loại bê tông sợi và UHPC truyền thống. Cường độ kéo bị ảnh hưởng mạnh bởi loại phụ gia khoáng, mức độ phân tán sợi và điều kiện bảo dưỡng.

Về phụ gia khoáng, GGBFS thường làm tăng liên kết giữa sợi và đá xi măng do phản ứng pozzolan mạnh, nhưng điều này có thể làm cường

độ chịu kéo giảm nhẹ vì liên kết ma sát tại vùng chuyển tiếp giữa sợi và đá xi măng tăng lên [45]. Tuy nhiên, nghiên cứu của Bang và cộng sự [55] chỉ ra rằng GGBFS giúp hỗ trợ phân tán sợi tốt hơn nhờ cải thiện tính công tác của hỗn hợp ECC, từ đó nâng cao cả cường độ và khả năng chịu kéo. Cần lưu ý rằng GGBFS không trực tiếp làm tăng cường độ kéo, nhưng cải thiện đáng kể vi cấu trúc đá xi măng và độ ổn định bề mặt tiếp xúc giữa sợi và đá xi măng. Nhờ đó, ECC có khả năng duy trì liên kết sợi tốt hơn khi chịu kéo, góp phần nâng cường độ kéo và biến dạng cực hạn.

FA kết hợp với GGBFS có thể làm tăng cường độ chịu kéo khoảng 3 % [56]. Ngược lại, khi sử dụng FA đơn lẻ, cường độ kéo có xu hướng giảm do FA làm tăng ma sát bề mặt sợi, giảm liên kết hóa học và làm mềm đá xi măng [55]. Tuy nhiên, FA lại làm tăng độ dẻo và biến dạng kéo, giúp ECC phân tán vết nứt vi mô tốt hơn, qua đó cải thiện khả năng chịu kéo về mặt biến dạng. Cát nhiễm mặn ảnh hưởng nhẹ đến cường độ kéo. Một số nghiên cứu cho thấy ECC dùng cát nhiễm mặn và nước biển giảm khoảng 6 % cường độ chịu kéo và giảm 18 % khả năng chịu biến dạng kéo [15], [54].

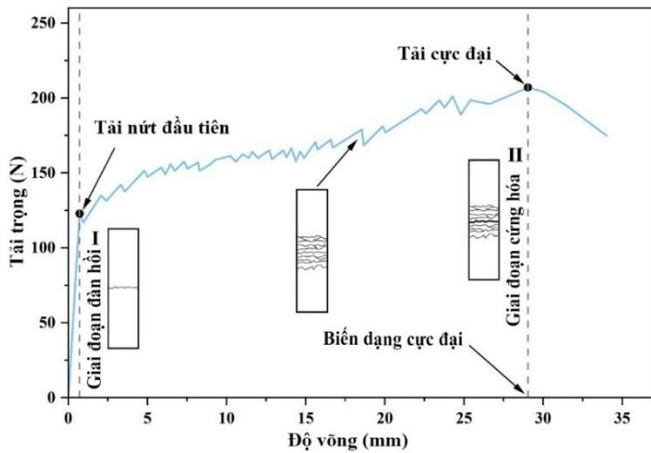
Điều kiện bảo dưỡng cũng quyết định cơ chế chịu kéo. ECC ngâm nước cho biến dạng kéo cực hạn cao hơn ECC trong chu kỳ khô-ướt do trong môi trường khô-ướt, dòng hơi nước hạn chế quá trình lấp đầy vết nứt vi mô bởi sản phẩm thủy hóa. Ngược lại, trong môi trường ngập nước chứa ion Cl⁻, cường độ nứt ban đầu và ứng suất kéo tối đa cao hơn nhờ sự hình thành muối Friedel và ettringite lấp đầy vết nứt vi mô [41], [45]. Tuy nhiên, trong môi trường chu kỳ khô-ướt có ion Cl⁻, cường độ chịu kéo giảm hơn 10 % so với môi trường ngập nước do cơ chế thấm-hấp phụ-khuếch tán của ion Cl⁻ diễn ra mạnh hơn, làm tăng tốc độ ăn mòn tại bề mặt tiếp xúc giữa sợi và đá xi măng và giảm độ dẻo tổng thể của vật liệu ECC [41].

4.3. Cường độ chịu uốn

Cường độ chịu uốn phản ánh khả năng chống cong và biến dạng của vật liệu dưới tác dụng mô men uốn. ECC vượt trội hơn bê tông thường nhờ thể hiện hóa cứng biến dạng (deflection hardening). Phụ gia FA giúp cải thiện độ dai sau nứt, nhưng nếu sử dụng ở hàm lượng cao sẽ pha loãng xi măng và làm giảm cường độ uốn [57]. GGBFS có vai trò tăng cường độ uốn và khi kết hợp với FA có thể bù đắp giảm sút do FA gây ra, như quan sát trong nghiên cứu của Yao [58] với mức cải thiện khoảng 10 %.

Bên cạnh phụ gia khoáng, kích thước hạt của cát nhiễm mặn cũng gây ảnh hưởng đáng kể đến cường độ chịu uốn của ECC. Theo như quan sát của Zhu và cộng sự [40] lượng vỏ sò trong cát nhiễm mặn có xu hướng tăng dần theo kích thước hạt làm cho cường độ chịu uốn có xu hướng suy giảm. Kích thước hạt cát nhiễm mặn tăng dần từ 0.3mm đến 1 mm làm cho cường độ chịu uốn giảm khoảng 3MPa.

Ứng xử chịu uốn của ECC gồm hai giai đoạn: (1) giai đoạn đàn hồi, tại đây quan hệ tải-độ võng gần tuyến tính cho đến khi xuất hiện vết nứt đầu tiên; và (2) giai đoạn hóa cứng biến dạng, khi các sợi bắt đầu bắc cầu qua các vết nứt vi mô và nhiều vết nứt nhỏ phân tán hình thành, tăng khả năng chịu uốn của vật liệu (Hình 3) [58].



Hình 3. Ứng xử khi uốn của ECC [58].

5. Đặc điểm độ bền của ECC khi sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp phụ gia khoáng

5.1. Độ dẻo của ECC

Độ dẻo là chỉ tiêu quan trọng phản ánh khả năng biến dạng sau nứt của ECC dưới tác dụng tải trọng uốn. Độ dẻo được xác định từ đường cong tải trọng–độ võng, tính bằng khoảng biến dạng từ khi xuất hiện vết nứt đầu tiên đến khi vật liệu mất hoàn toàn khả năng chịu tải [57]. Chỉ số đánh giá phổ biến nhất là chỉ số độ dai (toughness index) – đại diện cho khả năng không bị đứt gãy đột ngột và mức độ hóa cứng do biến dạng. Chỉ số độ dai càng cao thì vật liệu càng bền bỉ và chống phá hoại tốt hơn [58].

Trong ECC, khi đá xi măng bắt đầu nứt, hệ sợi đóng vai trò bắc cầu, truyền ứng suất qua các vết nứt vi mô, tạo sức kháng kéo-trượt tại bề mặt tiếp xúc, cho phép cấu kiện chịu được biến dạng lớn. Đồng thời, bản chất ECC là vật liệu có khả năng phân bố vết nứt vi mô đa điểm, giúp hạn chế tập trung biến dạng tại một điểm, nhờ đó khả năng chịu uốn và biến dạng cực hạn của ECC cao hơn bê tông thường tương ứng 46 % và 56 % [13]. Việc sử dụng phụ gia FA và GGBFS tiếp tục cải thiện độ dẻo do FA làm giảm liên kết hóa học giữa sợi và đá xi măng và tăng tương tác ma sát, qua đó hỗ trợ ECC đạt biến dạng kéo lớn hơn [57], [58], [59].

Mặt khác, độ dẻo của ECC chịu ảnh hưởng rõ rệt bởi điều kiện môi trường. Trong chu kỳ khô–ướt, ECC dễ bị co khô, tạo các vết nứt vi mô trong đá xi măng và làm suy giảm cường độ kéo theo thời gian [41]. Ngược lại, trong môi trường ngập nước, quá trình thủy hóa của xi măng và phản ứng thứ cấp của FA diễn ra thuận lợi hơn, làm tăng liên kết hóa học tại bề mặt tiếp xúc giữa sợi và nền và tăng độ dai của đá xi măng. Tuy nhiên, sự phát triển các sản phẩm thủy hóa tại các vết nứt vi mô có thể làm giảm khả năng hình thành nhiều vết nứt phân tán, khiến độ dẻo suy giảm.

Các nghiên cứu sử dụng nước biển và cát nhiễm mặn trong ECC (SS-ECC) cho thấy môi trường cát và nước biển làm thay đổi đáng kể cơ chế biến dạng kéo của ECC. Huang và cộng sự [60] đã phát triển các cấp phối SS-ECC cường độ thường và cường độ cao với giá trị cường

độ chịu nén lần lượt là 58 và 137 MPa, trong khi cường độ chịu kéo đạt 5–8 MPa và biến dạng kéo cực hạn khoảng 4–5 %. Khi thay thế hoàn toàn cát sông và nước ngọt bằng cát nhiễm mặn và nước biển, cường độ chịu nén tăng khoảng 10–15 %, nhưng cường độ chịu kéo giảm nhẹ (~6 %) và biến dạng kéo cực hạn giảm khoảng 10–20 %, dù vẫn duy trì trong vùng biến dạng cứng điển hình của ECC.

Các nghiên cứu gần đây về tương tác sợi và đá xi măng trong SS-ECC cho thấy hàm lượng muối hòa tan từ cát nhiễm mặn và nước biển làm tăng đáng kể lực bám dính sợi (~25 %) và năng lượng gỡ bám (~80 %). Sự tăng cường liên kết này đồng thời gia tốc thủy hóa, làm vi cấu trúc đặc chắc hơn; tuy nhiên, điều này cũng khiến cơ chế phá hoại dịch chuyển từ trượt sợi sang đứt sợi, làm giảm biến dạng kéo cực hạn của ECC sử dụng cát nhiễm mặn. Hệ quả là ứng suất kéo cực hạn hầu như không suy giảm, nhưng biến dạng kéo cực hạn có thể giảm 10–20 % do cơ chế phá hoại dịch chuyển sang đứt sợi trong môi trường giàu ion muối [61].

Nhìn chung, đối với các cấp phối ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp FA và GGBFS, sự suy giảm độ dẻo thường nhỏ hơn nhờ hai cơ chế: (i) FA làm giảm ma sát hoá học trên bề mặt sợi, hỗ trợ phát triển cơ chế kéo-trượt nhiều vết nứt; (ii) hàm lượng Al_2O_3 cao trong FA/GGBFS thúc đẩy tạo muối Friedel, giảm nồng độ Cl^- tự do trong lỗ rỗng, hạn chế tốc độ hoá bền đá xi măng quá mức. Nhờ đó, khi kết hợp với tỉ lệ FA/GGBFS tối ưu, ECC sử dụng cát nhiễm mặn vẫn duy trì được biến dạng kéo cực hạn $\geq 2-3 \%$, đáp ứng yêu cầu về tính dẻo cho các cấu kiện mặt đường, bản mặt cầu và lớp phủ chịu uốn lặp.

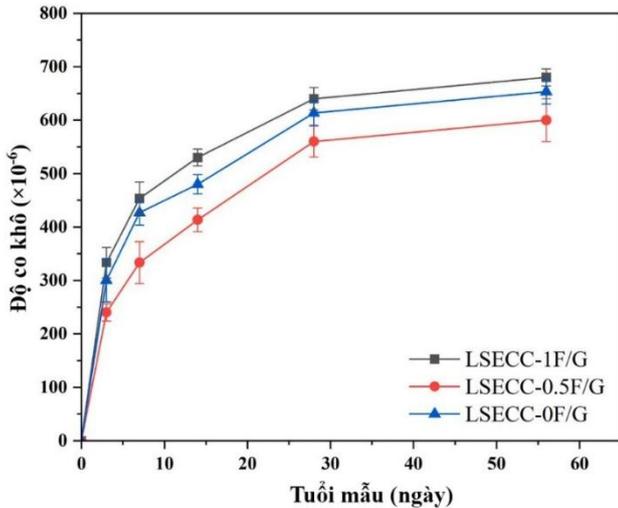
5.2. Độ co khô

ECC thường có độ co khô cao hơn bê tông thường do hàm lượng chất kết dính và mật độ sợi lớn. Trong khi đó, bê tông thường thường chỉ có biến dạng co khô khoảng 0,04–0,08 % tại 28 ngày [11]. Khi thay thế cát sông bằng cát nhiễm mặn và kết hợp FA/GGBFS, độ co khô có xu hướng giảm nhờ cải thiện cấu trúc lỗ rỗng và giảm lượng nước bay hơi. Nghiên cứu của Yao [58] ghi nhận ECC chứa cát nhiễm mặn và hỗn hợp GGBFS/FA có độ co khô $< 0,07 \%$ sau 56 ngày (Hình 4), thấp hơn so với nhiều loại ECC truyền thống. Cơ chế giảm co ngót chủ yếu liên quan đến phản ứng thứ cấp của FA và GGBFS. FA lấp đầy các lỗ rỗng siêu mịn và tạo sản phẩm C–S–H bổ sung, giảm hàm lượng lỗ mao quản – yếu tố chi phối co ngót. GGBFS, với mức độ mịn và hoạt tính cao hơn FA, cho khả năng lấp đầy lỗ rỗng hiệu quả hơn, từ đó giảm lượng nước bay hơi và hạn chế thay đổi chiều dài. Theo Yao [58], các hỗn hợp ECC có tỉ lệ FA/GGBFS ≤ 1 cho thấy mức độ co khô ở 56 ngày tương đương hoặc thấp hơn so với bê tông thường.

Ngoài ra, tỉ lệ nước/chất kết dính cũng ảnh hưởng mạnh đến co khô. ECC có w/c thấp thường có ít lỗ mao quản, giảm sự kết nối của hệ mao quản, từ đó giảm lượng nước thất thoát và hạn chế biến dạng co khô [41]. Hạn chế co khô là yếu tố quan trọng giúp giảm nguy cơ nứt, nâng cao tuổi thọ kết cấu.

Khi thay thế cát sông bằng cát nhiễm mặn, sự hiện diện của ion Cl^- và các muối hòa tan trong lỗ rỗng làm thay đổi đáng kể cơ chế co

khô. Nghiên cứu của Zhang và cộng sự [62] trên vữa/bê tông kiềm hoạt hóa sử dụng nước biển và cát nhiễm mặn cho thấy vật liệu có xu hướng giảm co khô dài hạn so với hệ dùng nước ngọt, nhờ ion Cl⁻ thúc đẩy thủy hóa, làm giảm lượng nước bốc hơi và tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng. Đồng thời, cát biển chưa rửa (chứa tạp chất vô sò giàu CaCO₃) có thể làm giảm co khô nhờ thay đổi động học thủy hóa và giảm gradient ẩm nội bộ.



Hình 4. Độ co khô của ECC trong nghiên cứu của Yao [58].

Kết quả nghiên cứu của Saleh và cộng sự [63] cũng cho thấy rằng nước biển làm gia tốc thủy hóa sớm và tăng co ngót sớm, nhưng với hàm lượng GGBFS và silica fume tối ưu, độ co khô dài hạn vẫn nằm trong giới hạn chấp nhận được, đồng thời cường độ nén ở 90 ngày vẫn duy trì cao. Điều này cho thấy nếu vi cấu trúc được tinh chỉnh bằng FA/GGBFS và tỉ lệ w/b thấp, việc sử dụng cát nhiễm mặn không làm gia tăng co khô, thậm chí còn giúp giảm co ngót dài hạn. Mặt khác, nhờ cơ chế khổng chế vết nứt mịn bởi sợi PVA, biến dạng co khô được phân tán đều trên nhiều vết nứt vi mô nhỏ thay vì tập trung thành vết nứt lớn. Tổng hợp các kết quả nghiên cứu về vật liệu sử dụng cát biển cho thấy ECC dùng cát nhiễm mặn, khi kết hợp FA/GGBFS, có thể duy trì mức co khô trong vùng kiểm soát nhờ cấu trúc lỗ rỗng tinh chỉnh và cơ chế phân bố vết nứt vi mô đặc trưng của ECC.

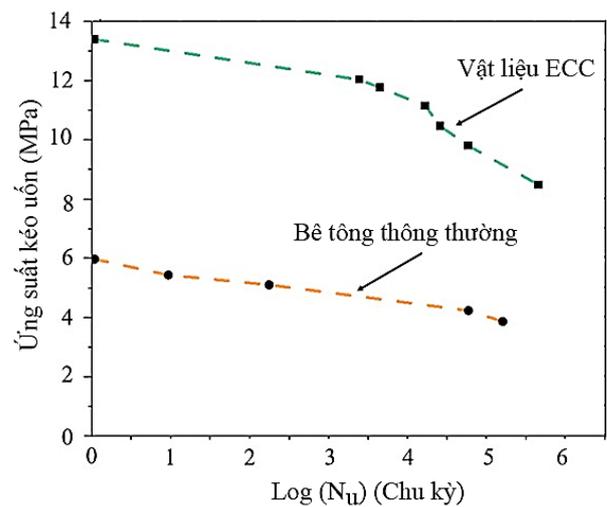
5.3. Độ kháng môi

Độ môi biểu thị sự suy giảm tính cơ học của vật liệu khi chịu tải trọng trùng phục – một trong những nguyên nhân gây hư hỏng ở các công trình giao thông như mặt cầu, mặt đường và các kết cấu chịu dao động. Đối với ECC, đánh giá độ kháng môi đặc biệt quan trọng do đặc tính vết nứt vi mô đa điểm và khả năng phân tán ứng suất. ECC thể hiện khả năng kháng môi cao hơn bê tông thường nhờ cơ chế nứt đa điểm (multi-cracking) và khả năng duy trì bề rộng vi nứt nhỏ (Hình 5). Cơ chế tự phục hồi chỉ đóng vai trò hỗ trợ trong giai đoạn sau [11]. Dưới tác dụng tải lặp, ECC hình thành nhiều vết nứt vi mô nhỏ phân

bổ đều trong vùng kéo trước khi xuất hiện vết nứt chính. Việc hình thành nhiều vết nứt vi mô có bề rộng nhỏ giúp ngăn chặn hiện tượng tập trung ứng suất và trì hoãn quá trình chuyển sang nứt cục bộ, từ đó nâng cao độ kháng môi [64].

Ở mức ứng suất môi cao, phá hoại chủ yếu xảy ra do tuột sợi khỏi đá xi măng; khi bổ sung FA và GGBFS, liên kết ma sát tại bề mặt tiếp xúc giữa sợi và đá xi măng tăng lên, cải thiện độ kháng môi rõ rệt (cơ chế đã phân tích tại mục 4.2). Ngược lại, ở mức ứng suất thấp, phá hoại do đứt sợi, phụ thuộc vào cường độ vật liệu sợi [65].

Độ kháng môi của ECC vốn vượt trội so với bê tông thường nhờ cơ chế nứt đa điểm và khả năng phân bố lại ứng suất sau khi nứt. Các nghiên cứu môi uốn và môi kéo-nén trên ECC cho thấy số chu kỳ phá hoại có thể cao hơn bê tông thường từ một đến hai bậc lớn tại cùng mức ứng suất tương đối, trong khi độ cứng giảm chậm và bề rộng vết nứt duy trì nhỏ hơn 100–150 μm trong suốt quá trình tải trọng lặp [66].



Hình 5. Độ kháng môi của ECC so với bê tông thông thường [11].

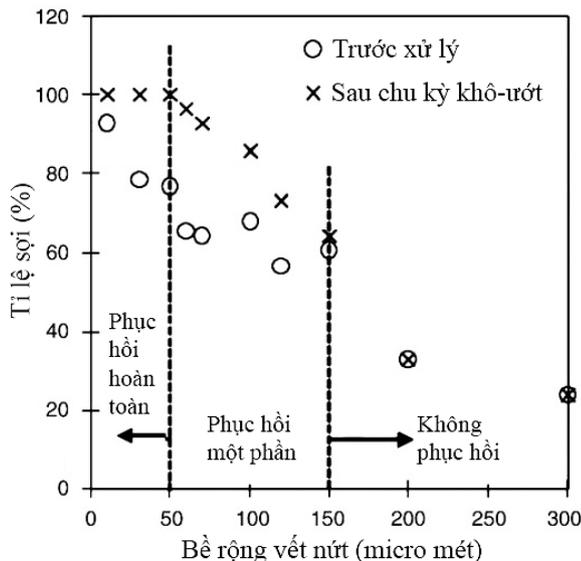
Các thí nghiệm trên ECC chịu tải lặp trong môi trường muối và chu kỳ đóng băng-tan băng cho thấy độ kháng môi hầu như không suy giảm khi bề rộng vết nứt được khống chế nhỏ. Li và cộng sự [67] báo cáo rằng ECC vẫn duy trì hành vi hóa cứng biến dạng và số chu kỳ tới phá hoại chỉ giảm nhẹ so với môi trường không xâm thực. Các kết quả này gợi ý rằng ECC dùng cát nhiễm mặn – vốn có xu hướng tạo đá xi măng đặc chắc nhờ ion Cl⁻ – có thể duy trì độ kháng môi tốt nếu hệ sợi được thiết kế phù hợp.

Thứ nhất, cát nhiễm mặn và nước biển làm tăng tốc độ thủy hóa và độ đặc chắc của đá xi măng, đồng thời tăng cường bám dính sợi-đá xi măng; tuy nhiên sự gia tăng bám dính này cũng khiến biến dạng kéo giảm nhẹ. Điều này cải thiện cường độ nén và kéo, nhưng làm giảm nhẹ khả năng biến dạng kéo – một yếu tố có thể ảnh hưởng đến độ bền môi trong các cấp phối không tối ưu (mục 5.1). Thứ hai, ECC vốn kiểm soát rất tốt bề rộng vết nứt nên trong điều kiện tải lặp và xâm thực ion Cl⁻, các vết nứt vẫn duy trì ở mức nhỏ, hạn chế sự tập trung ứng suất và giảm tốc độ phát triển vết nứt môi. Khi kết hợp cát nhiễm mặn với FA/GGBFS, khả

năng tạo muối Friedel giúp cố định ion Cl⁻ và lấp đầy vết nứt vi mô, đồng thời làm đặc chắc đá xi măng. Những cơ chế này cho thấy ECC dùng cát nhiễm mặn, khi được thiết kế phù hợp, có thể duy trì độ kháng môi cao hơn đáng kể so với bê tông xi măng truyền thống.

5.4. Khả năng tự phục hồi vết nứt

Khả năng tự phục hồi là ưu điểm nổi bật giúp ECC duy trì tuổi thọ công trình bằng cách phục hồi vết nứt vi mô, giảm thấm nước và hạn chế ion xâm nhập. ECC có thể kiểm soát vết nứt ở mức ≤ 150 μm, cho phép phục hồi hoàn toàn hoặc một phần các vết nứt nhờ sự kết hợp của cơ chế vết nứt vi mô đa điểm và hoạt động của sợi [16], [68]. Cơ chế tự phục hồi của ECC được thể hiện ở Hình 6, gồm sự hình thành lại sản phẩm C-S-H, CaCO₃ và các tinh thể hydrat khác trong vết nứt. Việc bổ sung FA và GGBFS thúc đẩy phản ứng pozzolan, hình thành thêm sản phẩm tự phục hồi, rút ngắn thời gian phục hồi và tăng mức độ kín khí của vết nứt [45].

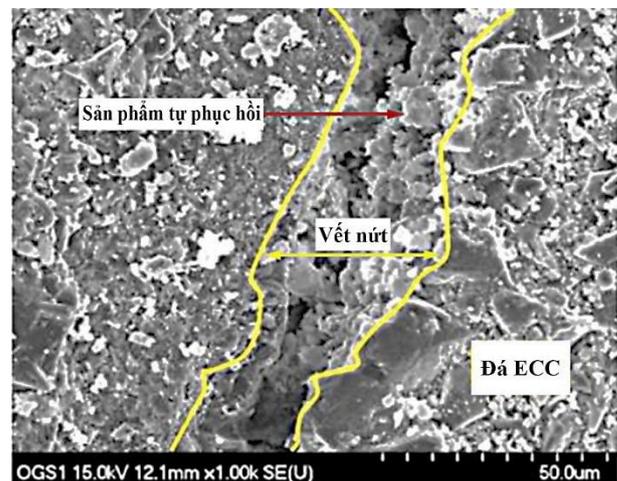


Hình 6. Khả năng tự phục hồi vết nứt của ECC [68].

Đối với ECC sử dụng cát nhiễm mặn hoặc nước biển, môi trường ion biển (Cl⁻, Mg²⁺, Ca²⁺) có thể tăng cường quá trình tự phục hồi nhờ thúc đẩy kết tinh các sản phẩm lấp đầy vết nứt. Kết quả nghiên cứu của Yu và Hu [69] cho thấy, dưới chu kỳ ngâm – phơi trong nước biển, các vết nứt vi mô được lấp đầy bởi portlandite, brucite, aragonite và calcite; đồng thời, độ cứng đàn hồi và khả năng chịu tải được phục hồi đáng kể ở cả mức vết nứt đơn lẻ và mẫu cấu kiện. Điều này cho thấy môi trường clorua không làm suy giảm mà còn có thể thúc đẩy khả năng tự phục hồi khi vết nứt được khống chế đủ nhỏ như trong ECC.

Trong môi trường nhiễm mặn, ion Cl⁻ và sulfate có tác dụng kích hoạt phản ứng pozzolan mạnh hơn, làm gia tăng lượng sản phẩm tự phục hồi (Hình 7). Bên cạnh đó, cơ chế phân tán vết nứt vi mô đa điểm nhờ sợi giúp duy trì chiều rộng vết nứt nhỏ, tạo điều kiện thuận lợi cho tự phục hồi [45].

Các nghiên cứu tự phục hồi vết nứt vi mô của ECC trong môi trường sulfate hay môi trường clorua và sulfate cho thấy vết nứt ECC có thể tự bít kín đáng kể, dẫn đến phục hồi mô đun đàn hồi, cường độ kéo và đặc biệt là suy giảm mạnh hệ số thấm ion xâm thực [70]. Những kết quả này cho thấy ECC vẫn duy trì được khả năng tự phục hồi ổn định trong môi trường chứa ion Cl⁻, là nền tảng quan trọng để suy rộng sang trường hợp ECC dùng cát nhiễm mặn. Song song đó, Ma và cộng sự [71] đã chỉ ra mối liên hệ định lượng giữa bề rộng vết nứt, tốc độ tự phục hồi và phục hồi độ cứng trong ECC, nhấn mạnh vai trò quan trọng của việc duy trì vết nứt nhỏ dưới ~100 μm – đặc trưng của ECC ngay cả khi sử dụng cát nhiễm mặn và nước biển.



Hình 7. Khả năng tự phục hồi vết nứt của ECC khi quan sát bằng SEM [9].

Như vậy, khi ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp với các phụ gia khoáng giàu Al₂O₃ (FA/GGBFS), ion Cl⁻ không chỉ tham gia các phản ứng tạo sản phẩm lấp đầy vết nứt mà còn có thể bị cố định thành muối Friedel trong đá xi măng. Điều này làm đặc vùng nứt, hạn chế nguy cơ ăn mòn cốt thép và giúp duy trì khả năng tự phục hồi lâu dài. Điều này gợi mở tiềm năng sử dụng ECC dùng cát nhiễm mặn cho các kết cấu hạ tầng giao thông ven biển, nơi vật liệu phải đồng thời chịu tác động cơ học lặp và môi trường xâm thực chứa Cl⁻.

5.5. Độ bền xâm thực

Các công trình trong môi trường chứa clorua và sulfate thường bị suy giảm tuổi thọ do ăn mòn hóa học, đặc biệt khi bê tông hình thành các vết nứt có độ mở > 100 μm [31]. Khi tiếp xúc với các tác nhân xâm thực, các ion Cl⁻ thâm nhập vào bê tông thông qua khuếch tán, mao dẫn và hấp phụ, gây ăn mòn cốt thép và suy giảm khả năng chịu lực [41], [72]. Bổ sung phụ gia khoáng trong ECC giúp tăng cường độ bền xâm thực. Ở giai đoạn đầu thủy hóa, C₃A trong xi măng phản ứng với Al₂O₃ hoạt tính trong FA/GGBFS và ion Cl⁻ để tạo muối Friedel theo phương trình (3) và (4). Muối Friedel làm giảm khả năng khuếch tán của ion Cl⁻, thúc đẩy thủy hóa, phát triển cường độ sớm và làm đặc đá xi măng

[3], [54]. ECC chứa GGBFS cũng thể hiện khả năng chống thấm ion Cl⁻ tốt hơn nhờ cơ chế thủy hóa kéo dài, hình thành C-S-H/C-A-S-H và giảm kích thước lỗ rỗng. Mặc dù ion Cl⁻ có thể thâm nhập mạnh đến 20–60 mm, mức độ thâm nhập giảm đáng kể khi GGBFS đạt mức thủy hóa hoàn chỉnh [45].

Đối với sulfate, sự hình thành ettringite và thạch cao gây giãn nở nội bộ và phá hoại bê tông thường. Tuy nhiên, cường độ chịu kéo cao của ECC và phân bố vết nứt vi mô kiểm soát giúp trì hoãn quá trình phá hoại. Nghiên cứu của Liu và cộng sự [52] cho thấy sau 200 ngày trong môi trường sulfate, mặc dù biến dạng kéo giảm, ECC vẫn đạt mức > 2 %, cao hơn nhiều so với bê tông thường.

Mặc dù các nghiên cứu hiện có cho thấy nhiều triển vọng, việc sử dụng cát nhiễm mặn trong ECC vẫn tồn tại một số thách thức. Hàm lượng ion Cl⁻ cao có thể gây rủi ro cho cốt thép truyền thống nếu không được kiểm soát bằng phụ gia thích hợp hoặc biện pháp bảo vệ. Bên cạnh đó, các dữ liệu về tuổi thọ lâu dài của ECC dùng cát nhiễm mặn trong điều kiện khí hậu ven biển Việt Nam vẫn còn hạn chế, đòi hỏi thêm các nghiên cứu thực nghiệm ngoài hiện trường và mô phỏng dài hạn.

Về bản chất, độ bền xâm thực của ECC chịu ảnh hưởng đồng thời bởi độ đặc chắc của đá xi măng, bề rộng – mật độ vết nứt và khả năng tự phục hồi. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng hệ số khuếch tán ion Cl⁻ của ECC thấp hơn bê tông thường rất đáng kể, ngay cả khi mẫu bị nứt, do vết nứt nhỏ và phân tán cùng sự hình thành các sản phẩm tự bít kín trong môi trường clorua và sulfate [73]. Các mẫu ECC sau 200–420 ngày ngâm dung dịch sulfate hay clorua và sulfate vẫn duy trì cường độ chịu nén và chịu kéo cao, chỉ giảm nhẹ biến dạng kéo, trong khi vữa/bê tông đối chứng suy giảm cường độ rõ rệt [74].

Khi sử dụng cát nhiễm mặn và nước biển để chế tạo SS-ECC, hàm lượng ion Cl⁻ ban đầu của vật liệu tăng lên, nhưng đồng thời đá xi măng trở nên đặc chắc hơn và cấu trúc lỗ rỗng tinh hơn nhờ sự gia tốc thủy hoá và sự có mặt của các ion Ca²⁺, Mg²⁺,... trong nước biển. Huang và cộng sự [60] cho thấy SS-ECC có cường độ nén cao hơn và hệ số thấm ion clo thấp hơn bê tông thông thường, đồng thời duy trì được hành vi nứt đa điểm với bề rộng vết nứt nhỏ, phù hợp cho các cấu kiện ven biển và vùng triều. Ngoài ra, các nghiên cứu về ECC tự phục hồi trong môi trường clorua cho thấy sau thời gian ngâm 1–2 tháng, độ cứng và biến dạng kéo có thể được phục hồi gần mức ban đầu, đồng thời dòng ăn mòn của cốt thép giảm mạnh nhờ sản phẩm lấp đầy vết nứt vi mô và tinh thể hoá muối trong vùng nứt [75].

Đối với ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp FA/GGBFS, khả năng kháng xâm thực càng được tăng cường. Hàm lượng Al₂O₃ cao trong FA/GGBFS giúp tăng lượng pha C₃A và thúc đẩy hình thành muối Friedel, cố định ion Cl⁻ trong ma trận và giảm nồng độ ion Cl⁻ tự do, từ đó giảm tốc độ khuếch tán tới cốt thép. Khi kết hợp với cơ chế kiểm soát vết nứt đặc trưng của ECC, hệ vật liệu này cho thấy tiềm năng lớn cho các cấu kiện hạ tầng giao thông trong môi trường clorua và sulfate (vùng triều, bờ biển, khu vực phun sương mặn), nơi bê tông xi măng truyền thống thường suy giảm nhanh do ăn mòn cốt thép và tấn công hoá học.

6. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp và phân tích toàn diện các nghiên cứu liên quan đến đặc điểm của cát nhiễm mặn, vai trò của phụ gia khoáng (FA, GGBFS) và tiềm năng ứng dụng của chúng trong chế tạo vật liệu ECC. Các kết luận chính rút ra gồm:

(1) FA và GGBFS là các phụ gia khoáng có hoạt tính pozzolan mạnh, giàu Al₂O₃, giúp thúc đẩy hình thành thêm các sản phẩm hydrat ổn định như C-S-H và các dạng hợp chất cố định clorua (Friedel's salt). Nhờ đó, việc kết hợp hai loại phụ gia khoáng này trong ECC làm tăng độ đặc chắc đá xi măng, cải thiện độ bền lâu và giảm đáng kể sự xâm nhập cũng như tác động ăn mòn của ion Cl⁻ và SO₄²⁻ trong môi trường biển.

(2) Cát nhiễm mặn tại Việt Nam có trữ lượng lớn, thành phần SO₃ thấp (< 0,1 %) nhưng chứa lượng ion Cl⁻ đáng kể. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu cho thấy việc sử dụng FA và GGBFS có thể giảm hàm lượng ion tự do trong cát nhiễm mặn, nhờ đó nâng cao tính khả thi trong chế tạo ECC, mở ra nguồn vật liệu thay thế có tính bền vững cao, vừa đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, vừa mang lại lợi ích về kinh tế và môi trường.

(3) Các tính chất cơ học của ECC chịu ảnh hưởng đáng kể bởi cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng. Môi trường ion hóa của cát nhiễm mặn có thể ảnh hưởng đến phản ứng pozzolan của FA và GGBFS thông qua thay đổi pH và động học thủy hóa, góp phần nâng cao cường độ chịu nén. GGBFS giúp cải thiện cường độ kéo và biến dạng kéo nhờ tăng liên kết ma sát tại bề mặt tiếp xúc giữa sợi và đá xi măng, trong khi FA giúp phân tán vết nứt tốt hơn. Việc kết hợp FA và GGBFS có thể nâng cao cường độ chịu kéo uốn và độ võng cực hạn của ECC. Môi trường bảo dưỡng cũng đóng vai trò quan trọng: ECC trong môi trường ngập nước thường đạt cường độ kéo cao hơn so với môi trường chu kỳ khô–ướt.

(4) Về độ bền, ECC kết hợp phụ gia khoáng thể hiện khả năng chống co ngót, độ dẻo và độ kháng môi vượt trội so với bê tông thường. FA và GGBFS làm giảm co ngót khô và tăng khả năng kháng môi nhờ cải thiện liên kết sợi và đá xi măng. Mặc dù ECC có độ co khô tương đối lớn, việc sử dụng FA và GGBFS có thể đưa giá trị này về mức tương đương bê tông thường.

(5) ECC có khả năng tự phục hồi vết nứt rất hiệu quả nhờ cơ chế vết nứt vi mô đa điểm và hoạt tính pozzolan của phụ gia khoáng. Cát nhiễm mặn chứa ion Cl⁻ có thể thúc đẩy phản ứng thứ cấp, tăng tốc độ hình thành sản phẩm tự phục hồi, cho phép khôi phục hoàn toàn hoặc một phần các vết nứt nhỏ có bề rộng ≤ 150 μm.

(6) Các kết quả tổng quan khẳng định rằng sự kết hợp giữa cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng tạo ra mối tương hỗ có lợi: cát nhiễm mặn kích hoạt phản ứng pozzolan, trong khi FA và GGBFS giúp kiểm soát ion có hại và nâng cao các tính chất cơ học – độ bền – khả năng tự phục hồi của ECC. Nhờ đó, vật liệu ECC chế tạo từ cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng có tiềm năng ứng dụng cao trong các công trình giao thông và hạ tầng ven biển chịu tác động môi trường xâm thực.

Tổng hợp các kết quả cho thấy ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp phụ gia khoáng là giải pháp vật liệu xanh, có tiềm năng ứng dụng cao trong hạ tầng giao thông ven biển Việt Nam, góp phần giảm khai thác cát sông và phù hợp với định hướng phát triển bền vững. Tuy

hiện, các nghiên cứu hiện có về ECC sử dụng cát nhiễm mặn tại Việt Nam mới dừng lại ở quy mô phòng thí nghiệm, số liệu về ứng xử lâu dài ngoài hiện trường và trong điều kiện khai thác thực tế còn hạn chế. Do đó, cần có thêm các nghiên cứu thử nghiệm hiện trường, đánh giá tuổi thọ và mô phỏng vòng đời công trình để hoàn thiện cơ sở khoa học cho việc áp dụng rộng rãi hệ vật liệu này trong hạ tầng giao thông ven biển. Ngoài ra, ảnh hưởng lâu dài của sự tích lũy muối và biến thiên độ ẩm-nhiệt độ theo mùa đối với tương tác sợi-đá xi măng trong SS-ECC vẫn chưa được làm rõ.

Tài liệu tham khảo

- [1]. K. H. Đồng, T. T. H. Dương, “Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép và giải pháp chống ăn mòn cho công trình bê tông cốt thép trong môi trường biển Việt Nam,” *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, tập 11, trang 44–49, 2011.
- [2]. T. Q. K. Lâm, “Nghiên cứu giải pháp chống ăn mòn cốt thép trong bê tông bằng vật liệu bê tông polymer,” *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, số 40, trang 28–31, 2015.
- [3]. M. Zhang, R. Xu, K. Liu, S. Sun, “Research progress on durability of marine concrete under the combined action of Cl⁻ erosion, carbonation, and dry-wet cycles,” *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 61, pp. 622–637, 2022.
- [4]. V. P. Đ. Trần, P. B. Nguyễn, “Ảnh hưởng của các thông số kỹ thuật của bê tông đến quá trình ăn mòn cốt thép,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, tập 67, trang 124–133, 2024.
- [5]. H. Y. Grisaro, A. N. Dancygier, “Representation of damage caused by fragmentation impact in design and analysis of reinforced concrete barriers,” *Engineering Structures*, vol. 197, p. 109387, 2019.
- [6]. TCCS 39:2022/TCĐBVN, “*Thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông*,” Tổng cục đường bộ Việt Nam, 2022.
- [7]. TCVN 11823-9:2017, “*Thiết kế cầu đường bộ - Phần 9: Mặt cầu và hệ mặt cầu*,” Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2017.
- [8]. TCVN 11823-13:2017, “*Thiết kế cầu đường bộ - Phần 13: Lan can*,” Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2017.
- [9]. J. X. Zhu, L. Y. Xu, B. T. Huang, K. F. Weng, J.-G. Dai, “Recent developments in Engineered/Strain-Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC) with high and ultra-high strength,” *Construction and Building Materials*, vol. 342, p. 127956, 2022.
- [10]. S. B. Singh, P. Munjal, “Engineered cementitious composite and its applications,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, pp. 797–802, 2020.
- [11]. F. M. Ghahsareh, P. Guo, Y. Wang, W. Meng, V. C. Li, Y. Bao, “Review on material specification, characterization, and quality control of engineered cementitious composite (ECC),” *Construction and Building Materials*, vol. 442, p. 137699, 2024.
- [12]. V. C. Li, “*Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure*,” Berlin, Heidelberg: Springer, 2019.
- [13]. V. C. Li, S. Wang, “Flexural Behaviors of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforced engineered cementitious composite beams,” *ACI Materials Journal*, vol. 99, pp. 11–21, 2002.
- [14]. V. C. Li, C. K. Y. Leung, “Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 118, pp. 2246–2264, 1992.
- [15]. B. T. Huang, J. Yu, J. Q. Wu, J. G. Dai, C. K. Y. Leung, “Seawater sea-sand Engineered Cementitious Composites (SS-ECC) for marine and coastal applications,” *Composites Communications*, vol. 20, p. 100353, 2020.
- [16]. C. Lin, D. Huang, Z. Liu, Y. Lu, “Mechanical properties, micro-mechanisms, and constitutive models of seawater sea-sand engineered cementitious composites,” *Journal of Building Engineering*, vol. 94, p. 109987, 2024.
- [17]. M. Singh, B. Saini, H. D. Chalak, “Performance and composition analysis of engineered cementitious composite (ECC) – A review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 26, p. 100851, 2019.
- [18]. Báo Thanh Niên, “Yếu kém hạ tầng và đe dọa môi trường ‘núi chôn’ ĐBSCL,” [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://thanhnien.vn/yeu-kem-ha-tang-va-de-doa-moi-truong-niu-chan-dbscl-1851483727.htm>
- [19]. Báo Xây dựng, “Thực trạng cát xây dựng: Khi cầu vượt xa cung,” [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://baoxaydung.vn/thuc-trang-cat-xay-dung-khi-cau-vuot-xa-cung-1926868343170.htm>
- [20]. P. N. Huỳnh, H. T. Vũ, “Xử lý đá phế phẩm thành cát nghiền và nghiên cứu tính công tác của hỗn hợp bê tông thương phẩm sử dụng cát nghiền,” *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, tập 11, trang 35–40, 2021.
- [21]. T. H. Lưu, C. A. Đào, L. T. Hoàng, H. L. Nguyễn, I. Nobuo, “Ảnh hưởng của cốt liệu được chế tạo từ tro bay thay thế cát tự nhiên tới một số tính chất của vữa xi măng,” *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, tập 6, trang 42–48, 2021.
- [22]. L. V. Hùng, P. V. Quỳnh, “Nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng cát biển làm cốt liệu cho bê tông,” *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, tập 1, trang 18–24, 2021.
- [23]. Hội Vật liệu xây dựng Việt Nam, “Chưa thể dùng cát biển xây cao tốc trước năm 2025.” [Trực tuyến]. Địa chỉ: <http://hoivlxvdn.org.vn/news/chua-the-dung-cat-bien-xay-cao-toc-truoc-nam-2025-477402.html>
- [24]. Tổng cục Địa chất và Khoáng sản, “Dùng cát biển thay thế cát sông là xu hướng tất yếu,” [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://vnexpress.net/tong-cuc-dia-chat-va-khoang-san-dung-cat-bien-thay-the-cat-song-la-xu-huong-tat-yeu-4532752.html>
- [25]. Q. G. Hoàng, K. K. Trịnh, “Thực trạng khai thác sử dụng cát tự nhiên tại Việt Nam và nghiên cứu tính chất cát biển tại một số vùng biển Việt Nam,” *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, tập 66, trang 151–156, 2019.
- [26]. S. Pranav, M. Lahoti, G. Muthukumar, E. H. Yang, “A comprehensive review on applications of engineered cementitious composites in pavements,” *Construction and Building Materials*, vol. 409, p. 134056, 2023.
- [27]. K. Rokugo, M. Kunieda, S. C. Lim, “Patching repair with ECC on cracked concrete surface,” *Engineering, Materials Science*, 2005. <https://www.semanticscholar.org/paper/Patching-repair-with-ECC-on-cracked-concrete-Rokugo-Kunieda/6634093e88a83b92a1e5ea78e1e2b9468c8d9006>.
- [28]. J. Yu, B. T. Huang, J. Q. Wu, J. G. Dai, C. K. Y. Leung, “Tensile and compressive performance of high-strength engineered cementitious composites (ECC) with seawater and sea-sand,” *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations*, vol. 30, pp. 1034–1041, 2020.
- [29]. B. T. Huang, J. Q. Wu, J. Yu, J. G. Dai, C. K. Y. Leung, V. C. Li, “Seawater sea-sand engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): Assessment and modeling of crack characteristics,” *Cement and Concrete Research*, vol. 140, p. 106292, 2021.
- [30]. B. T. Huang, J. Q. Wu, J. Yu, J. G. Dai, C. K. Y. Leung, “High-strength seawater sea-sand Engineered Cementitious Composites (SS-ECC): Mechanical performance and probabilistic modeling,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 114, p. 103740, 2020.
- [31]. E. D. Shumuye, W. Li, G. Fang, Z. Wang, J. Liu, K. Zerfu, “Review on the durability of eco-friendly engineering cementitious composite (ECC),” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02324, 2023.

- [32]. H. A. Le, F. C. Mihai, A. Belousova, R. Kucera, K. D. Oswald, W. Riedel, N. A. Sekar, P. Schneider, "Life cycle assessment of river sand and aggregates alternatives in concrete," *Materials*, vol. 16, p. 2064, 2023.
- [33]. V. Q. Phan, V. H. Việt, H. T. Phạm, "Độ bền lâu của bê tông sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn làm phụ gia khoáng," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, tập 6, trang 75–80, 2021.
- [34]. V. T. Ngô, "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*, tập 4, trang 36–45, 2014.
- [35]. T. P. Đông, H. Q. Long, N. T. Chức, Đ. Q. Trung, T. V. Cường, "Nghiên cứu chế tạo bê tông hạt mịn sử dụng cát biển trong xây dựng mặt đường bê tông xi măng ven biển," *Tạp chí Cầu đường Việt Nam*, tập 1, trang 52–56, 2022.
- [36]. T. C. Đặng, "Một số nghiên cứu thực nghiệm về cường độ bê tông geopolimer sử dụng cát biển," *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, tập 3, trang 277–287, 2022.
- [37]. V. T. Á. Văn, V. P. Nguyễn, P. D. Bùi, T. Hoàng, "Vật liệu đắp nền đường và khả năng sử dụng cát nhiễm mặn để đắp nền đường ô tô tại Việt Nam," *Tạp chí Khoa học Kiến trúc và Xây dựng*, tập 45, trang 29–33, 2022.
- [38]. Q. Yao, Z. Li, C. Lu, L. Peng, Y. Luo, X. Teng, "Development of engineered cementitious composites using sea sand and metakaolin," *Frontiers in Materials*, vol. 8, p. 711872, 2021.
- [39]. N. Shanmugasundaram, S. Praveenkumar, "Influence of manufactured sand gradation and water cement ratios on compressive strength of engineered cementitious composites," *Materials Today: Proceedings (Article In Press)*, 2023.
- [40]. M. Zhu, B. Chen, M. Wu, J. Han, "Preparation and mechanical characterization of cost-effective low-carbon engineered cementitious composites with seawater and sea-sand," *Cement and Concrete Composites*, vol. 136, p. 104883, 2023.
- [41]. Q. Yao, X. Teng, C. Lu, H. Sun, J. Mo, Z. Chen, "Influence of accelerated chloride corrosion on mechanical properties of sea sand ECC and damage evaluation method based on nondestructive testing," *Journal of Building Engineering*, vol. 63, p. 105520, 2023.
- [42]. T. T. Zhang, S. Gao, X. Jing, "Mechanical properties and microscopic analysis of water-castable engineered cementitious composites (WECC)," *Construction and Building Materials*, vol. 445, p. 137900, 2024.
- [43]. S. Gao, H. Meng, Y. Zhu, P. Xie, "Impact of low temperature and NaCl attack on the fracture properties of engineered cementitious composites (ECC)," *Journal of Cleaner Production*, vol. 76, p. 107114, 2023.
- [44]. S. Wen, M. Cao, "Reinforcement effects on the tensile properties of seawater sea-sand engineered cementitious composites reinforced with multi-scale hybrid fibers," *Structures*, vol. 64, p. 106579, 2024.
- [45]. E. D. Shumuye, W. Li, J. Liu, Z. Wang, J. Yu, H. Wu, "Self-healing recovery and micro-structural properties of slag/fly-ash based engineered cementitious composites under chloride environment and tidal exposure," *Cement and Concrete Composites*, vol. 134, pp. 104789, 2022.
- [46]. L. Y. Xu, J. Yu, B. T. Huang, J. C. Lao, H. L. Wu, X. Jiang, T. Y. Xie, J. G. Dai, "Green and low-carbon matrices for Engineered/Strain-Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC): Toward sustainable and resilient infrastructure," *Journal of Cleaner Production*, vol. 496, p. 144968, 2025.
- [47]. V. H. T. Le, N. K. Tran, T. K. Pham, Q. H. Nguyen, T. Q. Pham, T. K. Lam, T. P. Huynh, "The effect of recycled waste polystyrene plastic aggregate on the engineering properties of lightweight composites," *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, vol. 19, pp. 21–35, 2025.
- [48]. Q. Wang, M. H. Lai, J. Zhang, Z. Wang, J. C. M. Ho, "Greener engineered cementitious composite (ECC) – The use of pozzolanic fillers and uncoiled PVA fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 247, p. 118211, 2020.
- [49]. S. Dong, C. Li, G. Xian, "Environmental impacts of glass- and carbon-fiber-reinforced polymer bar-reinforced seawater and sea sand concrete beams used in marine environments: An LCA case study," *Polymers*, vol. 13, p. 154, 2021.
- [50]. D. Shoji, Z. He, D. Zhang, V. C. Li, "The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review," *Construction and Building Materials*, vol. 327, p. 126701, 2022.
- [51]. V. H. Lê, H. T. Phạm, V. Q. Phan, and V. H. Nguyễn, "Một số tính chất cơ học và độ bền lâu của bê tông sử dụng cát biển và tro bay," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, tập 03, trang 13–21, 2022.
- [52]. H. Liu, Q. Zhang, V. Li, H. Su, C. Gu, "Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment," *Construction and Building Materials*, vol. 133, pp. 171–181, 2017.
- [53]. W. Zhang, C. Zheng, Z. Li, H. Jin, J. Liu, J. Zhu, W. Liu, F. Xing, "Investigation on mechanical properties improvement of seawater engineered cementitious composites (ECC) using FA/LC²," *Construction and Building Materials*, vol. 345, p. 128271, 2022.
- [54]. J. Wei, L. Ke, P. Wang, W. Li, C. K. Y. Leung, "Microstructure, mechanical properties and interaction mechanism of seawater sea-sand engineered cementitious composite (SS-ECC) with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bar," *Composite Structures*, vol. 343, p. 118302, 2024.
- [55]. J. W. Bang, G. G. Prabhu, Y. L. Jang, Y. Y. Kim, "Development of ecoefficient engineered cementitious composites using supplementary cementitious materials as a binder and bottom ash aggregate as fine aggregate," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, p. 681051, 2015.
- [56]. K. Priyanka, O. Suganya, "A review on the influence of particle packing theory and materials on characteristics of ECC," *Journal of Building Engineering*, vol. 98, p. 111079, 2024.
- [57]. K. Türk, M. L. Nehdi, "Flexural toughness of sustainable ECC with high-volume substitution of cement and silica sand," *Construction and Building Materials*, vol. 270, p. 121438, 2021.
- [58]. Q. Yao, "Predicting the flexural behavior and experimental investigation of low carbon sea sand engineered cementitious composites (LSECCs)," *Construction and Building Materials*, vol. 471, p. 140820, 2025.
- [59]. M. Sahmaran, Z. Bilici, E. Ozbay, T. K. Erdem, H. E. Yucel, M. Lachemi, "Improving the workability and rheological properties of Engineered Cementitious Composites using factorial experimental design," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, pp. 356–368, 2013.
- [60]. B.-T. Huang, J. Yu, J.-Q. Wu, J.-G. Dai, C. KY. Leung, "Seawater sea-sand Engineered Cementitious Composites (SS-ECC) for marine and coastal applications," *Composites Communications*, vol. 20, p. 100353, 2020.
- [61]. X. Gao, W. Li, L. Ke, P. Wang, J. Wei, Y. Zhong, H. Wu, Y. Zhou, "Effects of saline contents on tensile behavior and fiber-matrix interaction in seawater sea-sand engineered cementitious composite (SS-ECC)," *Construction and Building Materials*, vol. 467, p. 140306, 2025.
- [62]. J. Zhang, S. Kang, Y. Shen, C. Song, H. Lei, W. Xie, X. Chen, J. Wang, W. Wu, X. Wang, "Effects of sand type and alkali equivalent on drying shrinkage and microstructure of seawater-sea sand alkali-activated slag concrete," *Materials*, vol. 18, no. 5, p. 1005, 2025.
- [63]. S. Saleh, Y.-L. Li, E. Hamed, A. H. Mahmood, X.-L. Zhao, "Workability, strength, and shrinkage of ultra-high-performance seawater, sea sand concrete with different OPC replacement ratios," *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 12, no. 3, pp. 271–291, 2023.
- [64]. P. Suthiwarapirak, T. Matsumoto, "Fiber bridging degradation based fatigue analysis of ECC under flexure," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 6, pp. 1179–1188, 2003.
- [65]. L. Sui, Q. Zhong, K. Yu, F. Xing, P. Li, Y. Zhou, "Flexural fatigue properties

- of ultra-high performance Engineered Cementitious Composites (UHP-ECC) reinforced by polymer fibers,” *Polymers*, vol. 10, p. 892, 2018.
- [66]. B. Alam, I. O. Yaman, “Stress-based fatigue performance and fatigue life prediction of engineered cementitious composites,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 33, no. 2, p. 04020470, 2021.
- [67]. Y. Li, N. Zhang, R. Sun, Y. Guan, L. Liu, C. Tian, Y. Ling, H. Zhang, B. Savija, “Behavior of engineered cementitious composites (ECCs) subjected to coupled sustained flexural load and salt frost,” *Materials*, vol. 16, no. 1, p. 165, 2022.
- [68]. Y. Yang, M. D. Lepech, E. H. Yang, C. V. Li, “Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles,” *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 382–390, 2009.
- [69]. J. Yu, F. Hu, “Self-healing properties of seawater sea-sand strain-hardening cementitious composites (SHCC).” 12th International Conference on Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures, 2025.
- [70]. H. Liu, Q. Zhang, C. Gu, H. Su, V. Li, “Self-healing of microcracks in Engineered Cementitious Composites under sulfate and chloride environment,” *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 948–956, 2017.
- [71]. H. Ma, E. Herbert, M. Ohno, V. C. Li, “Scale-linking model of self-healing and stiffness recovery in Engineered Cementitious Composites (ECC),” *Cement and Concrete Composites*, vol. 95, pp. 1–9, 2019.
- [72]. H. Ma, C. Yi, C. Wu, “Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC),” *Construction and Building Materials*, vol. 287, p. 122719, 2021.
- [73]. R. Sun, X. Hu, Y. Ling, Z. Zuo, P. Zhuang, F. Wang, “Chloride diffusion behavior of engineered cementitious composite under dry-wet cycles,” *Construction and Building Materials*, vol. 260, p. 119943, 2020.
- [74]. H. Liu, Q. Zhang, C. Gu, H. Su, V. Li, “Self-healing of microcracks in Engineered Cementitious Composites under sulfate and chloride environment,” *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 948–956, 2017.
- [75]. M. Li, V. C. Li, “Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment”, *Materials Journal*, vol. 108, no. 3, pp. 330–340, 2011.