

Tổng quan về cơ chế chi phối tính chất cơ học và độ bền của ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng

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

¹ Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

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

TỪ KHOÁ

ECC
Cát nhiễm mặn
Phụ gia khoáng
Liên kết clorua
Độ bền

TÓM TẮT

Bài báo tổng quan này phân tích các cơ chế chi phối tính chất cơ học và độ bền của vật liệu kỹ thuật composite gốc xi măng (ECC) sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng. Trọng tâm của bài báo nhằm làm rõ mối liên hệ giữa thiết kế vi cơ học, quá trình thủy hóa, cấu trúc lỗ rỗng, cơ chế liên kết clorua, tương tác sợi–nền chất kết dính và sự phát triển vi nứt trong ECC. Các phân tích cho thấy cát nhiễm mặn không chỉ là cốt liệu mịn thay thế mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến động học thủy hóa, thành phần dung dịch lỗ rỗng và sự hình thành vi cấu trúc của vật liệu. Trong khi đó, tro bay và xỉ lò cao nghiền mịn giữ vai trò quan trọng trong việc điều chỉnh độ đặc chắc của nền chất kết dính, độ dai phá hủy và khả năng liên kết ion clorua, từ đó góp phần nâng cao độ bền của ECC trong môi trường xâm thực. Độ bền của ECC được xác định không chỉ bởi cấu trúc lỗ rỗng mà còn bởi khả năng duy trì hệ vi nứt phân tán với bề rộng nhỏ nhờ cơ chế hóa cứng biến dạng và bắc cầu của sợi. Bài báo cũng cho thấy các chỉ tiêu đánh giá truyền thống như thí nghiệm thẩm thấu ion clorua cần được diễn giải thận trọng trong các hệ vật liệu có dung dịch lỗ rỗng chứa hàm lượng ion hòa tan cao. Ngoài ra, khả năng tự phục hồi vi nứt là một cơ chế quan trọng góp phần duy trì hiệu suất độ bền theo thời gian. Các kết quả tổng hợp cho thấy ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng có triển vọng ứng dụng trong môi trường biển và ven biển, với điều kiện cấp phối được thiết kế phù hợp nhằm bảo đảm sự cân bằng giữa độ đặc chắc của nền chất kết dính, khả năng kiểm soát vi nứt và cơ chế liên kết ion.

KEYWORDS

Engineered cementitious composites
Salt-contaminated sand
Mineral additives
Chloride binding
Durability

ABSTRACT

This paper reviews and analyzes the mechanisms governing the mechanical properties and durability of engineered cementitious composites (ECC) incorporating salt-contaminated sand and mineral additives. The main objective is to clarify the relationships among micromechanical design, hydration processes, pore structure development, chloride-binding mechanisms, fiber–binder interactions, and microcrack evolution in ECC. The analysis indicates that salt-contaminated sand acts not only as a replacement fine aggregate but also as an active factor influencing hydration kinetics, pore solution chemistry, and the development of material microstructure. Meanwhile, fly ash and ground granulated blast-furnace slag play important roles in regulating matrix densification, fracture toughness, and chloride-binding capacity, thereby enhancing the durability of ECC in aggressive environments. The durability of ECC is governed not only by pore structure but also by its ability to maintain a distributed microcrack network with tightly controlled crack widths through strain-hardening behavior and fiber bridging. The paper also shows that conventional durability indicators, such as the rapid chloride permeability test, should be interpreted with caution in material systems with pore solutions containing high concentrations of dissolved ions. In addition, microcrack self-healing is identified as an important mechanism contributing to the long-term durability performance of ECC. The reviewed results indicate that ECC incorporating salt-contaminated sand and mineral additives has strong potential for application in marine and coastal environments, provided the mixture is properly designed to balance matrix densification, microcrack control, and chloride-binding mechanisms.

*Liên hệ tác giả: htphuoc@ctu.edu.vn

Nhận ngày 26/03/2026, sửa xong ngày 14/04/2026, chấp nhận đăng ngày 11/05/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2026.1299>

1. Mở đầu

Trong những thập kỷ gần đây, nhu cầu phát triển hạ tầng giao thông ngày càng tăng, đặc biệt tại các khu vực ven biển và đồng bằng, đã đặt ra yêu cầu ngày càng khắt khe đối với vật liệu xây dựng về cả ứng xử cơ học lẫn độ bền lâu dài trong môi trường xâm thực. Các kết cấu như mặt đường bê tông xi măng, bản mặt cầu và lan can phòng hộ thường xuyên làm việc dưới tác động đồng thời của tải trọng lặp, tải trọng va đập và điều kiện môi trường khắc nghiệt với sự hiện diện của ion clorua (Cl^-), ion sunfat (SO_4^{2-}) và CO_2 . Trong các điều kiện này, quá trình suy giảm vật liệu không còn phụ thuộc đơn thuần vào cường độ ban đầu mà chịu chi phối bởi sự tương tác phức tạp giữa vi cấu trúc, hệ vết nứt và các cơ chế vận chuyển ion trong vật liệu [1], [2]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, trong bê tông truyền thống, sự hình thành và phát triển của các vết nứt vi mô do co ngót, tải trọng lặp hoặc biến thiên nhiệt độ đóng vai trò như các đường dẫn ưu tiên cho quá trình khuếch tán các tác nhân xâm thực, từ đó làm gia tăng tốc độ cacbonat hóa, xâm nhập clorua và ăn mòn cốt thép, dẫn đến suy giảm đáng kể tuổi thọ công trình [2], [3].

Trong bối cảnh đó, vật liệu kỹ thuật composite gốc xi măng (engineered cementitious composites – ECC) đã được phát triển như một hướng tiếp cận mới nhằm khắc phục các hạn chế cơ bản của bê tông truyền thống. Khác với triết lý thiết kế truyền thống vốn tập trung tối đa hóa cường độ nén, ECC được thiết kế dựa trên cơ học vi mô, trong đó các thông số của nền chất kết dính, sợi và vùng chuyển tiếp được điều chỉnh một cách có chủ đích nhằm đạt được trạng thái hóa cứng biến dạng (strain-hardening) và cơ chế nứt đa điểm [4], [5]. Nhờ cơ chế này, ECC có khả năng duy trì biến dạng kéo lớn (thường $> 2\%$) với hệ vết nứt phân bố dày đặc nhưng có bề rộng rất nhỏ, thường dưới $100\ \mu\text{m}$, từ đó hạn chế đáng kể quá trình vận chuyển chất xâm thực trong vật liệu [6], [7]. Sự liên hệ chặt chẽ giữa kiểm soát vết nứt ở cấp vi mô và ứng xử ở cấp kết cấu đã được chứng minh là yếu tố quyết định đến độ bền lâu dài của ECC trong các môi trường khắc nghiệt [1], [2].

Tuy nhiên, việc chế tạo ECC đặt ra một thách thức đáng kể liên quan đến nguồn cốt liệu mịn, do vật liệu này không sử dụng cốt liệu thô nhằm đảm bảo tính đồng nhất vi cấu trúc và kiểm soát tương tác sợi–nền chất kết dính. Trong khi đó, nguồn cát tự nhiên tại Việt Nam đang suy giảm nhanh chóng do khai thác quá mức và các tác động môi trường, đặc biệt tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long. Điều này thúc đẩy việc tìm kiếm các nguồn vật liệu thay thế bền vững, trong đó cát nhiễm mặn được xem là một lựa chọn vật liệu tiềm năng nhờ trữ lượng lớn và đặc trưng hạt mịn phù hợp với hệ ECC [8], [9]. Tuy nhiên, khác với cát sông, cát nhiễm mặn chứa một lượng đáng kể các muối hòa tan như NaCl , CaCl_2 và CaSO_4 , có thể làm thay đổi đáng kể động học thủy hóa, thành phần dung dịch lỗ rỗng và cấu trúc vi mô của vật liệu [9], [10]. Sự hiện diện của ion Cl^- trong hệ không chỉ đóng vai trò là tác nhân gây ăn mòn mà còn có thể tham gia vào các phản ứng liên kết hóa học với pha aluminat để hình thành các hợp chất ổn định như muối Friedel, từ đó ảnh hưởng đến khả năng kháng xâm thực của vật liệu [11].

Song song với việc sử dụng cát nhiễm mặn, xu hướng giảm hàm

lượng xi măng Portland nhằm hạn chế phát thải CO_2 đã thúc đẩy việc sử dụng các phụ gia khoáng như tro bay (FA) và xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS) trong hệ ECC. Các vật liệu này không chỉ đóng vai trò thay thế một phần chất kết dính mà còn tham gia vào các phản ứng pozzolan và thủy hóa thứ cấp, tạo ra các pha gel C–S–H và C–A–S–H có cấu trúc đặc chắc hơn, góp phần cải thiện độ bền và giảm tính thấm của vật liệu [12], [13]. Đặc biệt, hàm lượng Al_2O_3 trong GGBFS và FA có thể làm tăng khả năng liên kết ion Cl^- thông qua cơ chế tạo muối Friedel và các pha aluminat hydrat hóa, từ đó làm giảm hàm lượng ion tự do trong dung dịch lỗ rỗng và hạn chế quá trình xâm nhập sâu vào vật liệu [11]. Tuy nhiên, sự kết hợp giữa cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng không đơn thuần là tổng hợp các hiệu ứng riêng lẻ, mà tạo ra một hệ tương tác phức tạp, trong đó động học thủy hóa, cấu trúc lỗ rỗng, vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính và quá trình hình thành và phát triển vi nứt có mối liên hệ chặt chẽ và chi phối lẫn nhau.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về ECC, cũng như các nghiên cứu riêng lẻ về bê tông sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng, phần lớn các công trình hiện nay vẫn tập trung vào việc đánh giá các chỉ tiêu cơ học hoặc độ bền ở cấp độ vĩ mô, trong khi các mối liên hệ mang tính cơ chế giữa thành phần vật liệu, sự phát triển vi cấu trúc và ứng xử của ECC trong môi trường chứa ion vẫn chưa được làm rõ một cách hệ thống [1], [14]. Đặc biệt, việc diễn giải các chỉ tiêu độ bền dựa trên phép đo điện như thí nghiệm thấm nhanh ion clorua (RCPT) trong các hệ ECC có dung dịch lỗ rỗng chứa hàm lượng ion hòa tan cao cần được thực hiện một cách thận trọng, vì điện tích đo được không chỉ phản ánh khả năng vận chuyển ion qua hệ lỗ rỗng mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể của độ dẫn điện dung dịch lỗ rỗng, thành phần chất kết dính và hiệu ứng tăng nhiệt (Joule effect) trong quá trình thí nghiệm. Do đó, giá trị điện tích đo được không thể được xem là đại diện trực tiếp cho hệ số khuếch tán clorua, đặc biệt trong các hệ vật liệu chứa phụ gia khoáng hoặc có dung dịch lỗ rỗng chứa hàm lượng ion hòa tan cao, nơi mà các cơ chế dẫn điện và vận chuyển ion không còn đồng nhất [15], [16], [17], [18], [19]. Bên cạnh đó, mối quan hệ giữa kiểm soát bề rộng vết nứt và khả năng hạn chế vận chuyển ion, mặc dù đã được đề cập trong nhiều nghiên cứu, vẫn chưa được tích hợp đầy đủ vào các mô hình đánh giá độ bền của vật liệu [3], [20].

Trên cơ sở đó, bài báo này được xây dựng theo hướng tổng quan có cấu trúc, tập trung phân tích các cơ chế đa cấp chi phối tính chất cơ học và độ bền của ECC sử dụng cát nhiễm mặn kết hợp với phụ gia khoáng. Thay vì chỉ tổng hợp các kết quả thực nghiệm, nghiên cứu này nhấn mạnh việc làm rõ mối liên hệ giữa phản ứng thủy hóa, cơ chế liên kết ion, cấu trúc lỗ rỗng, tương tác sợi–nền chất kết dính và hành vi nứt của vật liệu, từ đó giải thích các đặc trưng cơ học và độ bền quan sát được ở cấp vĩ mô. Bài báo cũng xem xét lại ý nghĩa của các chỉ tiêu đánh giá độ bền truyền thống trong bối cảnh đặc thù của ECC, đồng thời làm rõ giới hạn của các phương pháp đang được sử dụng và những vấn đề còn chưa được giải thích thỏa đáng, đặc biệt đối với đánh giá dài hạn trong điều kiện môi trường thực tế và thiết kế vật liệu theo tính năng (performance-based design).

2. Cơ chế chi phối tính chất cơ học và độ bền của ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng

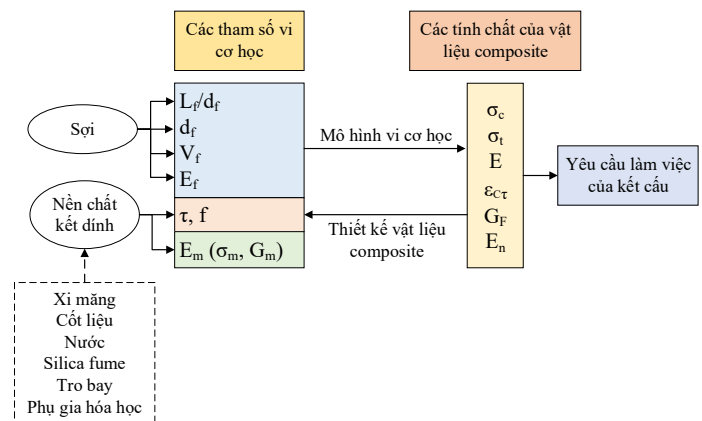
2.1. Cơ sở thiết kế vi cơ học của ECC

Khác với bê tông xi măng thông thường, ECC không được phát triển theo hướng tăng cường cường độ nén đơn thuần mà dựa trên nguyên lý thiết kế vi cơ học nhằm kiểm soát cơ chế phá hoại ngay từ cấp độ vật liệu. Bản chất của phương pháp này là thiết lập sự cân bằng phù hợp giữa độ dai phá hủy của nền chất kết dính, khả năng bắc cầu của sợi qua vết nứt và đặc trưng liên kết tại vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính, từ đó tạo điều kiện để vật liệu sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên vẫn tiếp tục chịu tải thông qua sự phát triển của nhiều vi nứt phân tán thay vì hình thành một vết nứt cục bộ như bê tông thông thường [4], [5], [6], [7], [14]. Chính cơ chế nứt đa điểm này làm cho ECC đạt được ứng xử hóa cứng biến dạng khi chịu kéo, với biến dạng kéo thường lớn hơn 2 % và trong nhiều trường hợp có thể đạt cao hơn đáng kể tùy thuộc vào thành phần nền chất kết dính, loại sợi và thiết kế vùng chuyển tiếp [5], [6], [14], [21].

Nguyên lý trên cho thấy hiệu suất cơ học và độ bền của ECC không thể được giải thích tách rời giữa các thành phần vật liệu riêng lẻ, mà phải được xem như kết quả của một hệ tương tác nhiều cấp giữa nền chất kết dính, cốt liệu mịn, sợi gia cường và vùng chuyển tiếp. Trong hệ này, nền chất kết dính cần có cường độ và độ dai phá hủy phù hợp; nếu nền chất kết dính quá cứng hoặc quá giòn, vết nứt sẽ có xu hướng tập trung và làm mất cơ chế nứt đa điểm [6], [22], [23]. Ngược lại, nếu nền chất kết dính quá yếu, ứng suất truyền qua vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính sẽ không đủ để phát triển khả năng bắc cầu hiệu quả, dẫn đến giảm cường độ chịu kéo và giảm độ ổn định của vật liệu sau nứt. Do đó, thiết kế ECC luôn đòi hỏi sự tối ưu đồng thời giữa cường độ của nền chất kết dính, năng lượng phá hủy, độ bền liên kết và đặc trưng kéo trượt của sợi, thay vì tối ưu riêng lẻ từng thành phần như trong bê tông truyền thống [4], [6], [22].

Trong cấu trúc của ECC, việc loại bỏ cốt liệu thô có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Sự vắng mặt của cốt liệu thô giúp hạn chế các vùng tập trung ứng suất lớn, làm tăng tính đồng nhất của nền chất kết dính và tạo điều kiện thuận lợi cho sự phân bố sợi cũng như quá trình hình thành nhiều vi nứt có bề rộng nhỏ [5], [7]. Tuy nhiên, điều này đồng thời làm cho cốt liệu mịn trở thành thành phần chi phối trực tiếp đến vi cấu trúc và hành vi của vật liệu. Kích thước hạt, dạng hạt, thành

phần khoáng và ion hòa tan của cốt liệu mịn đều có thể tác động đến độ chảy hỗn hợp, động học thủy hóa, cấu trúc lỗ rỗng, đặc trưng vùng chuyển tiếp và sau cùng là tính chất cơ học cũng như độ bền của ECC. Vì vậy, trong các hệ ECC sử dụng cát nhiễm mặn, cát không chỉ giữ vai trò cốt liệu mịn mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình hình thành cấu trúc và tính năng của ECC [9], [10], [24], [25]. Ở góc độ này, sơ đồ thiết kế vi cơ học của ECC trong tài liệu gốc vẫn có giá trị minh họa nền tảng và nên được giữ lại trong bài để làm rõ logic phát triển vật liệu. Nguyên lý thiết kế ECC dựa trên cơ học vi mô, trong đó các thông số của nền chất kết dính, sợi và vùng chuyển tiếp được điều chỉnh nhằm đạt được trạng thái hóa cứng biến dạng, được minh họa trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý thiết kế vi cơ học của ECC [4].

Để làm rõ khác biệt vật liệu đầu vào, đặc trưng thành phần và kích thước hạt của các loại cát sử dụng trong ECC được tổng hợp trong Bảng 1, cho thấy cát nhiễm mặn có kích thước hạt mịn tương đương cát thạch anh nhưng đồng thời chứa hàm lượng ion Cl^- và một tỷ lệ vò sò nhất định, là những yếu tố có thể chi phối trực tiếp đến quá trình thủy hóa và cấu trúc vi mô của hệ ECC [9], [24], [26]. Nhìn từ góc độ thiết kế vật liệu, cơ sở vi cơ học của ECC cũng là nền tảng để giải thích vì sao cùng một loại sợi nhưng chỉ cần thay đổi thành phần nền chất kết dính hoặc điều kiện vùng chuyển tiếp thì ứng xử cơ học của vật liệu có thể chuyển từ dẻo sang giòn. Chính vì vậy, mọi thay đổi về nguồn cốt liệu mịn hoặc hệ chất kết dính, bao gồm việc sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng, đều phải được phân tích trong khung cơ học vi mô thay vì đánh giá tách rời theo từng chỉ tiêu đơn lẻ.

Bảng 1. Đặc trưng của các loại cát thường được sử dụng trong ECC.

Loại cát	Hàm lượng Cl^- (%)	Mô đun độ lớn	Hàm lượng vò sò (%)	Kích thước hạt (mm)
Cát thạch anh [2], [24], [25]	0,00	-	-	0,105 – 0,21
Cát nhiễm mặn [24], [26]	0,21 – 1,5	2,43	4,4	0,21
Cát nhân tạo [11]	-	2,53	-	0,000349 – 4,75

2.2. Ảnh hưởng của cát nhiễm mặn đến thủy hóa và cấu trúc lỗ rỗng

Trong ECC sử dụng cát nhiễm mặn, vai trò của cát không chỉ dừng ở chức năng cốt liệu mịn, mà còn thể hiện rõ ở cấp độ hóa lý thông qua sự hiện diện của các muối hòa tan như NaCl, CaCl_2 và một phần sunfat. Các ion này làm thay đổi thành phần dung dịch lỗ rỗng ngay từ giai đoạn đầu, từ đó ảnh hưởng đến tốc độ hòa tan pha clinker, sự kết tinh sản phẩm thủy hóa và diễn biến phát triển vi cấu trúc của nền chất kết dính [9], [10], [25]. Nhiều nghiên cứu đã ghi nhận rằng môi trường có chứa muối có thể thúc đẩy phản ứng thủy hóa sớm, đặc biệt đối với các hệ xi măng có tỷ lệ nước/chất kết dính thấp, nhờ làm tăng tốc độ hòa tan của một số pha xi măng và thúc đẩy sự hình thành sớm của gel hydrat [9], [10]. Đây là cơ sở để giải thích vì sao một số hệ ECC sử dụng cát biển hoặc cát nhiễm mặn có thể đạt cường độ sớm tương đương hoặc nhanh hơn so với mẫu sử dụng cát thông thường.

Tuy nhiên, tác động này không nên được hiểu theo nghĩa đơn giản rằng cát nhiễm mặn luôn cải thiện quá trình thủy hóa. Trong một hệ composite có thiết kế nhạy với điều kiện vùng chuyển tiếp như ECC, bất kỳ sự thay đổi quá nhanh nào của phản ứng ban đầu cũng có thể kéo theo thay đổi độ nhớt hỗn hợp, thời gian đông kết và khả năng phân tán sợi trong quá trình trộn và tạo hình. Nếu nền chất kết dính phát triển quá nhanh theo hướng cứng hóa sớm, sự phân bố sợi có thể kém đồng đều hơn, làm giảm hiệu quả bắc cầu tại các vi nứt và từ đó ảnh hưởng bất lợi đến khả năng duy trì cơ chế hóa cứng biến dạng. Nói cách khác, hiệu ứng tăng tốc thủy hóa do muối chỉ thực sự có lợi khi nó đi kèm với một cấu trúc nền chất kết dính đủ ổn định và tương thích với yêu cầu phân tán sợi của ECC.

Ở cấp độ vi cấu trúc, cát nhiễm mặn có thể làm thay đổi đáng kể cấu trúc lỗ rỗng của nền vật liệu. Các nghiên cứu trên hệ ECC sử dụng nước biển và cát biển (SS-ECC) cho thấy sự có mặt của muối có thể làm giảm độ rỗng mao dẫn và độ hút nước, một phần do thúc đẩy sự hình thành sản phẩm thủy hóa sớm và một phần do các hạt mịn cùng hiệu ứng lấp đầy trong vi cấu trúc [9], [25]. Kết quả là nền chất kết dính ECC thông thường có xu hướng đặc hơn, hệ lỗ rỗng liên thông giảm và khả năng hấp thụ nước thấp hơn. Tuy nhiên, mức độ cải thiện này phụ thuộc mạnh vào trạng thái ban đầu của nền chất kết dính. Với các hệ ECC cường độ cao vốn đã rất đặc chắc, sử dụng tỷ lệ nước thấp và thường kết hợp thêm silica fume hoặc phụ gia siêu mịn, tác động bổ sung từ muối trong cát nhiễm mặn có thể không còn rõ rệt [9], [25]. Điều đó cho thấy ảnh hưởng của cát nhiễm mặn mang tính phụ thuộc hệ, không thể suy rộng đồng đều cho mọi cấp phối ECC.

Một vấn đề khác cần được xem xét là hàm lượng vò sò và các tạp chất khoáng đi kèm trong cát nhiễm mặn. Về bản chất, nếu vò sò tồn tại ở hàm lượng thấp và kích thước phù hợp, chúng có thể góp phần vào hiệu ứng lấp đầy và không ảnh hưởng đến các tính chất cơ học. Tuy nhiên, khi hàm lượng cao hoặc hình thái hạt bất lợi, vò sò lại trở thành các khuyết tật cục bộ do có cường độ thấp hơn cát thạch anh, dẫn đến giảm khả năng chịu nén và tạo ra các vùng yếu trong nền chất kết dính [10]. Trong ECC, nơi tính đồng nhất vi cấu trúc có ý nghĩa quyết định đến cơ chế nứt đa điểm, các khuyết tật cục bộ này đặc biệt

bất lợi vì chúng có thể trở thành vị trí khởi phát vết nứt lớn, làm rút ngắn giai đoạn hóa cứng biến dạng và thúc đẩy phá hoại cục bộ.

Xét trên phương diện tổng thể, ảnh hưởng của cát nhiễm mặn đến ECC nên được hiểu như một quá trình cạnh tranh giữa hai xu hướng. Một mặt, sự hiện diện của ion hòa tan và hạt mịn có thể thúc đẩy thủy hóa sớm, làm đặc cấu trúc lỗ rỗng và cải thiện một số chỉ tiêu cơ học ban đầu. Mặt khác, nếu thành phần muối, hàm lượng vò sò hoặc phân bố kích thước hạt không được kiểm soát, nền chất kết dính có thể trở nên kém đồng nhất hơn, khả năng phân tán sợi giảm và cơ chế nứt phân tán bị suy yếu. Vì vậy, giá trị thực sự của cát nhiễm mặn trong ECC không nằm ở việc thay thế đơn thuần cát tự nhiên, mà ở khả năng được lựa chọn và kiểm soát phù hợp để trở thành một thành phần tương thích với cơ chế làm việc đặc thù của vật liệu. Theo đó, ảnh hưởng của cát nhiễm mặn không nên được khái quát như một xu hướng cố định, mà cần được xem xét trong tương quan với thành phần muối hòa tan, hàm lượng vò sò, phân bố cỡ hạt và hệ chất kết dính cụ thể của từng cấp phối ECC.

2.3. Vai trò của phụ gia khoáng trong điều chỉnh vi cấu trúc và liên kết ion

Trong hệ ECC hiện đại, phụ gia khoáng không còn được xem là thành phần thay thế xi măng đơn thuần nhằm giảm phát thải CO_2 , mà là công cụ điều chỉnh vi cấu trúc và điều khiển cơ chế làm việc của vật liệu [12], [14], [27]. Đối với hệ ECC sử dụng cát nhiễm mặn, vai trò này càng trở nên quan trọng hơn, bởi phụ gia khoáng không chỉ ảnh hưởng đến cấu trúc lỗ rỗng, cường độ và độ dẻo, mà còn tham gia trực tiếp vào quá trình liên kết ion clorua, từ đó quyết định đáng kể đến độ bền lâu dài của vật liệu trong môi trường xâm thực [11], [13], [28].

Tro bay (FA) là phụ gia được sử dụng rộng rãi nhất trong ECC nhờ khả năng điều chỉnh nền chất kết dính theo hướng giảm độ dai phá hủy, cải thiện khả năng kiểm soát vết nứt và nâng cao tính bền vững của vật liệu [12], [29]. Về bản chất, FA có hoạt tính pozzolan tương đối chậm, nên ở giai đoạn đầu thường làm giảm tốc độ phát triển cường độ so với hệ xi măng thuần. Tuy nhiên, chính sự mềm hóa có kiểm soát của nền chất kết dính trong giai đoạn đầu này lại có lợi cho cơ chế nứt đa điểm, bởi nó giúp giảm cường độ nứt đầu tiên của nền chất kết dính, tạo điều kiện để sợi phát huy hiệu quả bắc cầu và duy trì ứng xử hóa cứng biến dạng [29]. Mặt khác, ở giai đoạn dài hạn, phản ứng pozzolan của FA tiêu thụ Ca(OH)_2 và tạo thêm gel C-S-H thứ cấp, nhờ đó cấu trúc vi mô trở nên đặc hơn, hệ lỗ rỗng được tinh chỉnh và tính thấm giảm xuống. Đây là lý do nhiều hệ ECC chứa hàm lượng tro bay cao vẫn duy trì được độ dẻo kéo tốt đồng thời đạt độ bền lâu dài khả quan [12], [29].

So với FA, GGBFS có tính thủy lực tiềm ẩn cao hơn và thường làm nền chất kết dính ECC phát triển cường độ nhanh hơn, đặc chắc hơn [13], [28]. Sự tham gia của GGBFS vào phản ứng thủy hóa làm tăng sự hình thành các pha gel C-A-S-H giàu alumin, từ đó không chỉ cải thiện cường độ nén mà còn làm giảm tính liên thông của hệ lỗ rỗng và nâng cao khả năng kháng xâm nhập của ion [11], [13]. Tuy nhiên, hiệu ứng này cũng có giới hạn. Khi hàm lượng GGBFS quá lớn, nền chất

kết dính có thể trở nên quá cứng và làm tăng độ bám dính tại vùng chuyển tiếp sợi-nền chất kết dính đến mức bất lợi cho cơ chế nứt đa điểm. Khi đó, ứng suất tại đầu vết nứt dễ tập trung hơn, khoảng cách giữa các vết nứt tăng lên và bề rộng từng vết nứt có thể lớn hơn, dù cường độ nén tổng thể được cải thiện [13]. Đối với ECC, đây là một đánh đổi quan trọng, bởi sự gia tăng cường độ nền chất kết dính không đồng nghĩa với sự cải thiện độ bền nếu khả năng kiểm soát vi nứt bị suy giảm.

Trong hệ có cát nhiễm mặn, vai trò nổi bật khác của FA và GGBFS là khả năng liên kết ion clorua. Các pha aluminat trong phụ gia khoáng, đặc biệt từ GGBFS và một phần từ FA, có thể phản ứng với Cl^- để hình thành các hợp chất ổn định như muối Friedel, nhờ đó làm giảm hàm lượng Cl^- tự do trong dung dịch lỗ rỗng [11]. Cơ chế này có ý nghĩa đặc

biệt đối với ECC sử dụng cát nhiễm mặn, vì nó làm tăng khả năng cố định một phần ion Cl^- trong nền chất kết dính, từ đó giảm hàm lượng clorua tự do trong dung dịch lỗ rỗng. Nói cách khác, với cùng một lượng Cl^- đưa vào từ cát, mức độ bất lợi đối với độ bền của vật liệu không chỉ phụ thuộc vào tổng hàm lượng ion mà còn phụ thuộc vào khả năng của hệ chất kết dính trong việc cố định và làm giảm phần clorua tự do. Điều đó giải thích vì sao trong nhiều nghiên cứu, hệ ECC có sử dụng GGBFS và/hoặc FA vẫn thể hiện độ bền kháng clorua tốt mặc dù môi trường ban đầu chứa hàm lượng ion khá cao [9], [11], [28]. Để minh họa sự đa dạng của các nguồn phụ gia khoáng dùng trong ECC, các loại phụ gia khoáng đã được sử dụng trong ECC, bao gồm tro bay, xỉ lò cao, silica fume và một số nguồn khoáng hoạt tính khác, được tổng hợp trong Hình 2.



Hình 2. Các loại phụ gia khoáng thường được sử dụng trong ECC [27].

Từ góc độ thiết kế vật liệu, vai trò của phụ gia khoáng trong ECC sử dụng cát nhiễm mặn có thể được xem như một quá trình điều chỉnh cân bằng giữa ba mục tiêu: duy trì khả năng nứt đa điểm, làm đặc cấu trúc nền chất kết dính và tăng cường khả năng liên kết ion. Nếu ưu tiên quá mức cho cường độ bằng cách làm nền chất kết dính quá đặc và quá cứng, vật liệu có thể mất đi đặc trưng dẻo vốn là bản chất của ECC. Ngược lại, nếu chỉ tập trung vào độ dẻo mà không đảm bảo đủ độ đặc chắc vi cấu trúc, khả năng kháng thấm và độ bền lâu dài sẽ bị hạn chế. Do đó, hiệu quả thực sự của FA và GGBFS không nằm ở từng tỷ lệ thay thế riêng lẻ mà ở khả năng phối hợp với nhau và với cát nhiễm mặn để

tạo ra nền chất kết dính đủ đặc chắc, ổn định về mặt hóa học và vẫn tương thích với cơ chế bắc cầu của sợi.

2.4. Quan hệ giữa vi cấu trúc, vận chuyển ion và độ bền

Độ bền của ECC trong môi trường chứa ion không thể được giải thích chỉ bằng một chỉ tiêu đơn lẻ như cường độ nén, độ hút nước hay điện tích RCPT, mà phải được hiểu như kết quả tổng hợp của ba yếu tố liên kết chặt chẽ với nhau: đặc trưng vi cấu trúc của nền chất kết dính, trạng thái và hình thái hệ vết nứt, cơ chế vận chuyển ion trong lỗ rỗng

[1], [2]. Trong vật liệu gốc xi măng nói chung, quá trình xâm nhập của nước, clorua hoặc sunfat phụ thuộc mạnh vào cấu trúc lỗ rỗng liên thông. Tuy nhiên, đối với ECC, hệ vết nứt vi mô phân tán với bề rộng rất nhỏ lại là yếu tố quyết định hơn, bởi vật liệu này được thiết kế để chấp nhận nứt nhưng kiểm soát nứt ở mức mà các đường dẫn vận chuyển không trở thành kênh xâm nhập ưu thế [3], [20], [30].

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng khi bề rộng vết nứt được duy trì ở mức rất nhỏ, thường dưới khoảng 60–100 μm , khả năng thấm nước, độ hút mao dẫn và tốc độ vận chuyển ion của ECC vẫn ở mức thấp hơn đáng kể so với bê tông hoặc vữa có vết nứt cục bộ lớn hơn [3], [20], [30]. Điều này có ý nghĩa rất quan trọng: trong ECC, sự xuất hiện vi nứt không đồng nghĩa với sự suy giảm đáng kể độ bền, nếu bề rộng vết nứt vẫn được duy trì trong khoảng kiểm soát. Chính cơ chế này làm cho vi cấu trúc của nền chất kết dính và cơ chế nứt không thể tách rời khi đánh giá độ bền. Một nền chất kết dính quá cứng có thể cho giá trị RCPT thấp ở trạng thái chưa nứt, nhưng nếu làm tăng bề rộng vết nứt khi chịu tải thì khả năng kháng xâm nhập thực tế của vật liệu có thể không còn tương ứng. Ngược lại, một nền chất kết dính có cường độ không quá lớn nhưng duy trì được mạng vi nứt rất nhỏ có thể cho độ bền lâu dài tốt hơn trong điều kiện khai thác thực tế.

Đối với hệ ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng, mối quan hệ này càng trở nên phức tạp hơn do đồng thời tồn tại các cơ chế liên quan đến cấu trúc lỗ rỗng và liên kết ion. Cát nhiễm mặn có thể thúc đẩy sự phát triển sớm của sản phẩm thủy hóa và góp phần tinh chỉnh lỗ rỗng trong một số hệ nền chất kết dính, trong khi FA và GGBFS làm tăng mức độ đặc chắc vi cấu trúc, giảm tính liên thông của mao quản và gia tăng khả năng liên kết ion Cl^- [9], [11], [25], [28]. Kết quả là quá trình vận chuyển ion trong ECC không còn chỉ phụ thuộc vào kích thước lỗ rỗng, mà còn chịu ảnh hưởng của thành phần hóa học dung dịch lỗ rỗng và khả năng giữ ion của hệ chất kết dính. Vì vậy, các chỉ tiêu độ bền dựa trên phép đo điện lượng như RCPT chỉ có thể được diễn giải đúng khi đặt trong mối liên hệ với cấu trúc lỗ rỗng, trạng thái vi nứt, thành phần dung dịch lỗ rỗng và khả năng liên kết ion của hệ chất kết dính.

Trong thực tế, điện tích đo được trong thí nghiệm RCPT nên được xem là một chỉ báo điện học tổng hợp của hệ vật liệu, thay vì được đồng nhất trực tiếp với hệ số khuếch tán clorua, bởi đại lượng này còn chịu ảnh hưởng đồng thời của độ dẫn điện dung dịch lỗ rỗng, thành phần ion, cấu trúc mao quản, mức độ bão hòa và hiệu ứng tăng nhiệt trong quá trình thử [17], [18], [19]. Vì vậy, đối với ECC chứa phụ gia khoáng hoặc dung dịch lỗ rỗng chứa hàm lượng ion hòa tan cao do sử dụng cát nhiễm mặn, giá trị RCPT thấp không nên được diễn giải đơn giản như bằng chứng duy nhất cho khả năng kháng clorua cao; ngược lại, cũng không thể kết luận RCPT cao là vật liệu kém bền nếu hệ có độ dẫn điện dung dịch lỗ rỗng lớn nhưng cấu trúc nứt và khả năng liên kết ion vẫn thuận lợi. Trong các hệ như vậy, RCPT nên được xem là một chỉ báo điện học tổng hợp hơn là thước đo trực tiếp của hệ số vận chuyển ion. Do đó, trong các hệ ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng, RCPT nên được sử dụng như một chỉ báo hỗ trợ trong đánh giá độ bền và cần được kết hợp với các thông tin về vi cấu trúc,

độ hút nước, độ rỗng, hình thái vết nứt cũng như các chỉ tiêu khuếch tán hoặc di chuyển ion phù hợp hơn với điều kiện làm việc thực tế.

Một khía cạnh khác rất đặc trưng của ECC là khả năng tự phục hồi vết nứt khi bề rộng nứt đủ nhỏ và có điều kiện ẩm thích hợp [2], [11], [20]. Khi đó, các sản phẩm như CaCO_3 , C–S–H thứ cấp hoặc các tinh thể hydrat mới có thể lấp một phần khe nứt, làm giảm tính liên thông của đường dẫn xâm nhập và cải thiện trở lại khả năng chống thấm của vật liệu. Trong hệ có phụ gia khoáng, đặc biệt khi tồn tại nguồn alumin và silica phản ứng chậm, hiệu ứng này có thể càng rõ hơn ở tuổi dài ngày [11], qua đó góp phần duy trì khả năng chống thấm và hiệu suất độ bền của ECC trong các điều kiện phơi nhiễm ẩm hoặc ven biển. Điều này cho thấy đánh giá độ bền của ECC không nên chỉ dựa trên trạng thái ngay sau nứt, mà cần xem xét cả khả năng hồi phục vi cấu trúc theo thời gian.

Về bản chất, độ bền của ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng là kết quả của nhiều cơ chế tương tác đồng thời: độ đặc chắc của nền chất kết dính làm giảm tính liên thông của lỗ rỗng; hệ chất kết dính giàu alumin làm giảm phần Cl^- tự do; và cơ chế nứt đa điểm giữ bề rộng vết nứt ở mức rất nhỏ, hạn chế hình thành các kênh vận chuyển ưu thế. Chỉ khi ba yếu tố này cùng được duy trì ở trạng thái thuận lợi thì vật liệu mới có thể đạt được độ bền thực sự trong điều kiện môi trường biển hoặc ven biển. Đây cũng là lý do vì sao mọi đánh giá về độ bền của ECC cần được thực hiện trong mối liên hệ giữa vi cấu trúc, cơ chế nứt và vận chuyển ion, thay vì tách rời từng chỉ tiêu như trong

2.5. Tương tác sợi–nền chất kết dính và cơ chế kiểm soát vết nứt

Tương tác sợi–nền chất kết dính là yếu tố trung tâm quyết định việc ECC có duy trì được cơ chế nứt đa điểm hay không, và do đó cũng là yếu tố chi phối trực tiếp đến tính chất cơ học cũng như độ bền của vật liệu [6], [22]. Trong ECC, sợi không chỉ có vai trò gia cường, mà còn tạo cơ chế bắc cầu qua các vi nứt, nhờ đó phân tán ứng suất và trì hoãn sự hình thành vết nứt cục bộ. Hiệu quả của cơ chế này phụ thuộc đồng thời vào tính chất cơ học của sợi, cường độ và đặc trưng ma sát của vùng chuyển tiếp, cũng như mức độ tương thích biến dạng giữa sợi và nền chất kết dính [5], [6]. Bất kỳ sự thay đổi nào trong thành phần nền chất kết dính, kể cả do sử dụng cát nhiễm mặn hoặc phụ gia khoáng, đều sẽ tác động đến vùng chuyển tiếp này và từ đó ảnh hưởng đến hành vi nứt của toàn hệ.

Khi nền chất kết dính ECC được điều chỉnh theo hướng đặc chắc hơn, ví dụ do sử dụng GGBFS hoặc do hiệu ứng thủy hóa sớm của cát nhiễm mặn, cường độ liên kết tại vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính thường tăng lên. Ở một mức độ hợp lý, điều này giúp nâng cao ứng suất truyền qua vết nứt và tăng cường cường độ nứt đầu tiên. Tuy nhiên, nếu liên kết tăng quá mạnh, sợi sẽ có xu hướng đứt thay vì kéo trượt, làm giảm khả năng tạo nhiều vết nứt liên tiếp và thúc đẩy sự hình thành vết nứt lớn [13], [31]. Ngược lại, khi nền chất kết dính mềm hơn hoặc vùng chuyển tiếp yếu hơn, ví dụ ở một số hệ có hàm lượng FA cao, sợi dễ trượt hơn, bề rộng vết nứt có thể được kiểm soát

tốt nhưng ứng suất bắc cầu cực đại lại có thể không đủ lớn để duy trì cường độ mong muốn [29]. Vì vậy, thiết kế ECC luôn là bài toán cân bằng giữa cường độ nền chất kết dính, độ dai phá hủy và đặc trưng vùng chuyển tiếp.

Đối với ECC sử dụng cát nhiễm mặn, cơ chế này trở nên nhạy cảm hơn do sự hiện diện của ion hòa tan có thể làm thay đổi trạng thái hóa học và vi cấu trúc của vùng chuyển tiếp. Các nghiên cứu trên hệ SS-ECC cho thấy trong điều kiện được thiết kế phù hợp, cát nhiễm mặn không làm mất đi cơ chế nứt đa điểm, mà trái lại còn có thể góp phần làm giảm bề rộng vết nứt nhờ độ đặc chắc của nền chất kết dính và phản ứng sớm hơn [9], [25], [31]. Tuy nhiên, hiệu ứng này chỉ đạt được khi kích thước hạt cốt liệu, hàm lượng sợi và thành phần nền chất kết dính được tối ưu đồng thời. Nếu cát thô hơn, hàm lượng vôi sò cao hơn hoặc nền chất kết dính bị cứng hóa quá mức, khoảng cách giữa các vết nứt sẽ tăng, bề rộng vết nứt lớn hơn và lợi thế về độ bền của ECC sẽ giảm đi rõ rệt [9], [31].

Từ góc nhìn độ bền, giá trị lớn nhất của cơ chế bắc cầu sợi không chỉ nằm ở khả năng tăng biến dạng kéo, mà ở việc duy trì trạng thái nứt phân tán với bề rộng nhỏ, nhờ đó hạn chế sự hình thành các đường dẫn vận chuyển ưu thế. ECC không loại trừ hoàn toàn sự xuất hiện vết nứt; thay vào đó, vật liệu kiểm soát quá trình nứt theo hướng hình thành nhiều vi nứt phân tán với bề rộng nhỏ. Chính đặc điểm này làm giảm đáng kể tốc độ xâm nhập của nước và ion, đồng thời tạo điều kiện cho quá trình tự phục hồi diễn ra hiệu quả hơn [2], [3], [20]. Do đó, kiểm soát vết nứt trong ECC không phải là vấn đề hậu quả của ứng xử cơ học, mà là một phần cốt lõi của chiến lược thiết kế độ bền.

Tương tác sợi–nền chất kết dính là yếu tố chi phối đồng thời các tác động của cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng đến ECC. Cát nhiễm mặn ảnh hưởng đến thủy hóa và độ đặc chắc của nền chất kết dính; phụ gia khoáng điều chỉnh độ dai phá hủy, cấu trúc lỗ rỗng và khả năng liên kết ion; còn sợi chỉ thực sự phát huy hiệu quả khi vùng chuyển tiếp với nền chất kết dính được duy trì ở trạng thái tối ưu. Vì vậy, mọi kết luận về tính chất cơ học và độ bền của ECC sử dụng cát nhiễm mặn đều cần được quy chiếu về chất lượng của tương tác sợi–nền chất kết dính và khả năng duy trì cơ chế nứt đa điểm của hệ vật liệu.

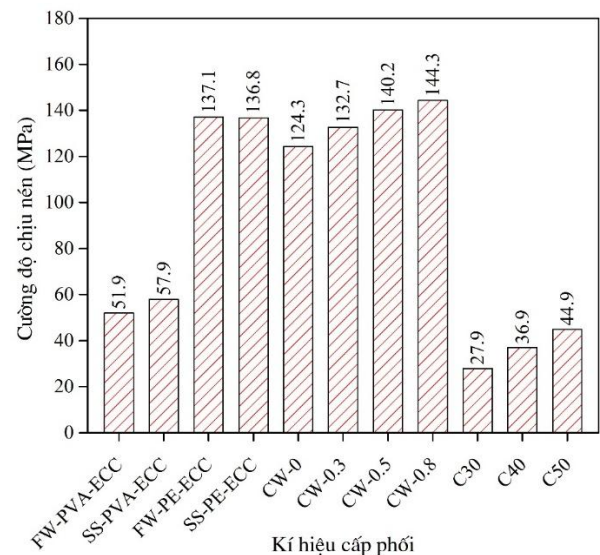
3. Đặc tính cơ học của ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng

3.1. Cường độ chịu nén và cơ chế phát triển cường độ

Trong ECC, cường độ chịu nén không phải là chỉ tiêu chi phối thiết kế như trong bê tông truyền thống, nhưng vẫn giữ vai trò quan trọng trong việc phản ánh mức độ phát triển của nền chất kết dính và khả năng chịu tải tổng thể của vật liệu. Tuy nhiên, ý nghĩa của chỉ tiêu này trong ECC cần được đặt trong bối cảnh cơ chế làm việc đặc thù của toàn hệ vật liệu, nơi hiệu quả cơ học không chỉ phụ thuộc vào độ đặc chắc của nền chất kết dính mà còn gắn chặt với trạng thái phân tán sợi, chất lượng vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính và khả năng duy trì cơ chế nứt đa điểm sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên. Vì vậy, cơ chế phát triển cường độ của ECC mang tính đa yếu tố hơn so với bê tông thông thường và cần được xem xét trong mối quan hệ đồng thời giữa

vi cấu trúc nền, thành phần phụ gia khoáng, tương tác sợi–nền chất kết dính và các xu hướng cường độ thực nghiệm đã được ghi nhận trong các hệ ECC sử dụng cát nhiễm mặn.

Việc sử dụng cát nhiễm mặn trong ECC có thể làm thay đổi đáng kể quá trình phát triển cường độ thông qua tác động đến động học thủy hóa của hệ chất kết dính. Sự hiện diện của các muối hòa tan, đặc biệt là NaCl và CaCl₂, thường làm phản ứng ban đầu diễn ra nhanh hơn, từ đó thúc đẩy sự hình thành sớm của sản phẩm hydrat và có thể cải thiện cường độ ở tuổi đầu [9], [10]. Tuy nhiên, tác động này không nên được hiểu như một lợi thế ổn định cho mọi hệ ECC, bởi nếu sự tăng tốc thủy hóa không đi kèm với sự phát triển đồng đều của vi cấu trúc và sự điều chỉnh phù hợp của hệ chất kết dính, hiệu quả cải thiện ở tuổi sớm có thể không tiếp tục được duy trì ở giai đoạn sau. Ở góc độ này, ảnh hưởng của cát nhiễm mặn đến cường độ nền được xem là hiệu ứng phụ thuộc hệ, chịu chi phối đồng thời bởi thành phần muối hòa tan, mức độ phản ứng thứ cấp của phụ gia khoáng và khả năng duy trì trạng thái tương thích giữa nền chất kết dính với cơ chế bắc cầu của sợi. Do đó, sự gia tăng cường độ chịu nén trong ECC chỉ thực sự có ý nghĩa khi đi kèm với sự phát triển vi cấu trúc theo hướng đồng đều và không làm suy giảm điều kiện cần thiết cho cơ chế nứt đa điểm sau khi vật liệu chịu tải.



Hình 3. Tổng hợp cường độ chịu nén của một số nghiên cứu tiêu biểu về SS-ECC và ECC sử dụng cát nhiễm mặn [9], [31], [33].

FA và GGBFS đóng vai trò quyết định trong việc điều chỉnh quá trình này. FA, với đặc trưng phản ứng pozzolan chậm, thường làm giảm cường độ sớm nhưng góp phần cải thiện cường độ ở tuổi dài nhờ quá trình tiêu thụ Ca(OH)₂ và hình thành thêm C–S–H thứ cấp [29]. Ngược lại, GGBFS có khả năng tham gia phản ứng thủy hóa mạnh hơn trong môi trường kiềm, giúp gia tăng cường độ nén ở cả giai đoạn trung hạn và dài hạn thông qua việc hình thành hệ gel C–A–S–H đặc chắc [13], [28]. Sự kết hợp giữa FA và GGBFS trong ECC cho phép điều chỉnh linh hoạt giữa cường độ sớm và cường độ dài hạn, đồng thời duy trì được

đặc trưng vì cấu trúc phù hợp cho cơ chế nứt đa điểm. Xu hướng này cũng được phản ánh trong các kết quả thực nghiệm đã công bố đối với các hệ SS-ECC hoặc ECC sử dụng cát nhiễm mặn, khi cường độ chịu nén có thể biến thiên trong phạm vi khá rộng tùy thuộc vào mức độ thay đổi của hệ chất kết dính, điều kiện thủy hóa và định hướng thiết kế cấp phối. Để minh họa trực quan cho khoảng biến thiên này, cường độ chịu nén của một số nghiên cứu tiêu biểu về SS-ECC được tổng hợp trong Hình 3, qua đó cho thấy tác động của cát nhiễm mặn không nên được diễn giải như một xu hướng tăng hoặc giảm cường độ cố định, mà cần được xem xét trong tương quan với toàn bộ cấu trúc vật liệu và chiến lược thiết kế của từng hệ ECC. Có thể thấy từ Hình 3 rằng cường độ chịu nén của các hệ SS-ECC không tập trung vào một giá trị đặc trưng duy nhất mà phân bố trên một khoảng khá rộng, phản ánh sự khác biệt đáng kể về thành phần chất kết dính, mức độ sử dụng phụ gia khoáng, điều kiện thủy hóa và định hướng thiết kế vật liệu giữa các nghiên cứu. Điều này củng cố nhận định rằng vai trò của cát nhiễm mặn đối với cường độ chịu nén cần được diễn giải trong khung tương tác đa yếu tố, thay vì được quy trực tiếp cho bản thân nguồn cát.

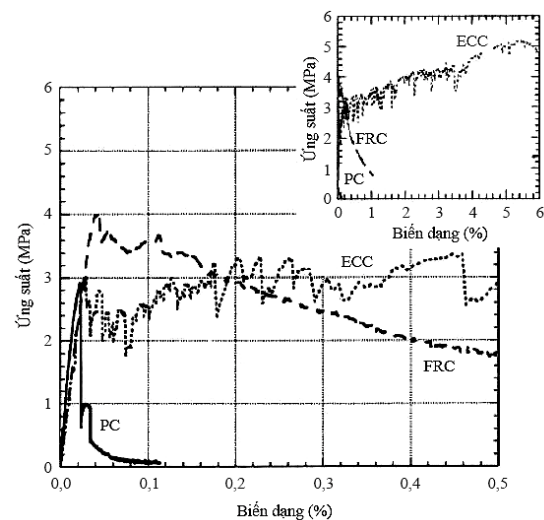
Ngoài ra, ảnh hưởng của sợi đến cường độ chịu nén trong ECC không rõ rệt như trong các hệ bê tông cốt sợi truyền thống, nhưng vẫn có vai trò nhất định thông qua việc hạn chế sự lan truyền của vi nứt và cải thiện tính toàn vẹn của mẫu dưới tải nén [24], [32]. Tuy nhiên, khi hàm lượng sợi hoặc tỷ lệ nước tăng quá cao, sự hình thành lỗ rỗng khí và khuyết tật trong quá trình trộn có thể làm giảm cường độ tổng thể của vật liệu. Do đó, thiết kế ECC luôn cần đảm bảo cân bằng giữa hàm lượng sợi, độ chảy và mật độ cấu trúc nền chất kết dính. Từ góc độ cơ chế, cường độ chịu nén của ECC không nên được xem là kết quả trực tiếp của một thành phần riêng lẻ, mà là hệ quả của sự tương tác giữa quá trình thủy hóa, cấu trúc lỗ rỗng và sự phân bố khuyết tật vi mô. Điều này đặc biệt rõ đối với các hệ ECC sử dụng cát nhiễm mặn, trong đó các yếu tố hóa học và vi cấu trúc đồng thời chi phối quá trình phát triển cường độ.

3.2. Ứng xử kéo và cơ chế nứt đa điểm

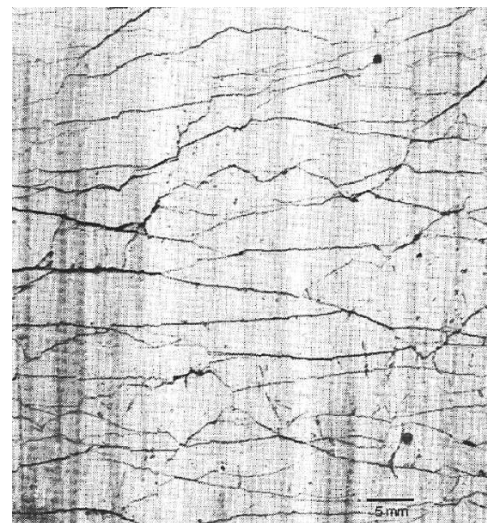
Ứng xử kéo là đặc trưng cơ học quan trọng nhất của ECC và là tiêu chí phân biệt rõ rệt vật liệu này với bê tông thông thường cũng như nhiều loại bê tông cốt sợi khác. Trong khi bê tông truyền thống thể hiện ứng xử giòn với một vết nứt chủ đạo phát triển nhanh chóng sau khi đạt cường độ kéo cực đại, ECC có khả năng duy trì ứng xử hóa cứng biến dạng với hàng loạt vi nứt phân tán, cho phép vật liệu đạt biến dạng kéo lớn mà không xảy ra phá hoại cục bộ [6], [7]. Cơ chế này phụ thuộc chặt chẽ vào sự cân bằng giữa lực bắc cầu của sợi và độ dai phá hủy của nền chất kết dính. Khi điều kiện này được thỏa mãn, mỗi vi nứt mới hình thành sẽ được ổn định bởi sợi, cho phép vật liệu tiếp tục mang tải và tạo thêm các vết nứt mới thay vì tập trung biến dạng tại một vị trí [22], [23]. Trong thực tế, ECC có thể đạt biến dạng kéo từ vài phần trăm đến trên 5 %, trong khi bề rộng vết nứt thường được duy trì dưới 100 μm , là yếu tố then chốt giúp cải thiện độ bền lâu dài của vật liệu [2], [7]. Ở góc độ này, các biến thiên về cường độ chịu kéo,

chịu uốn và khả năng duy trì độ dẻo đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước có thể được xem là biểu hiện ở cấp độ vi mô của sự thay đổi trong cân bằng giữa độ dai phá hủy của nền chất kết dính, ứng suất bắc cầu của sợi và chất lượng vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính.

Việc sử dụng cát nhiễm mặn ảnh hưởng đến cơ chế nứt này thông qua thay đổi đặc trưng nền chất kết dính và vùng chuyển tiếp. Trong một số nghiên cứu, ECC sử dụng cát biển hoặc cát nhiễm mặn cho thấy xu hướng giảm bề rộng vết nứt do độ đặc chắc của nền chất kết dính và phản ứng thủy hóa sớm hơn [9], [31]. Tuy nhiên, nếu cát có kích thước không phù hợp hoặc hàm lượng vò sò cao, sự không đồng nhất vi cấu trúc có thể làm giảm số lượng vết nứt và tăng khoảng cách giữa các vết nứt, từ đó làm giảm hiệu quả của cơ chế nứt đa điểm.



Hình 4. Đường cong ứng suất–biến dạng kéo một trục của ECC so sánh với bê tông thường (PC) và bê tông cốt sợi (FRC) [5].



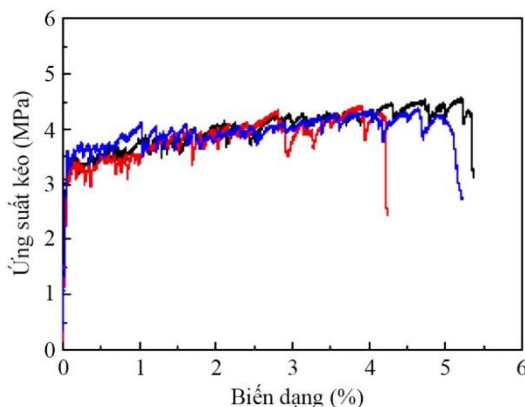
Hình 5. Hình thái nứt đa điểm trên mẫu kéo một trục của ECC [5].

FA và GGBFS có vai trò hỗ trợ quan trọng trong việc duy trì ứng xử kéo ổn định. FA giúp giảm độ dai phá hủy của nền chất kết dính, tạo

điều kiện thuận lợi cho sự hình thành nhiều vi nứt, trong khi GGBFS góp phần tăng cường cường độ và độ ổn định của nền chất kết dính nhưng cần được kiểm soát để không làm tăng quá mức độ cứng của hệ [13], [29]. Sự phối hợp hợp lý giữa hai loại phụ gia này cho phép ECC đạt được sự cân bằng giữa độ dẻo và cường độ, đồng thời duy trì khả năng kiểm soát vết nứt hiệu quả. Đặc trưng hóa cứng biến dạng của ECC được thể hiện qua đường cong ứng suất–biến dạng kéo một trục, trong khi cơ chế nứt đa điểm được quan sát rõ trên bề mặt mẫu kéo sau thí nghiệm, như trình bày trong Hình 4 và Hình 5.

3.3. Mô đun đàn hồi và khả năng biến dạng

Mô đun đàn hồi ban đầu của ECC thường thấp hơn hoặc tương đương so với bê tông thông thường có cùng cấp độ bền, phản ánh đặc trưng vi cấu trúc và cơ chế biến dạng khác biệt của vật liệu [14], [33]. Đặc trưng này được thể hiện rõ qua quan hệ ứng suất – biến dạng kéo một trục của ECC (Hình 6). Đường cong cho thấy mặc dù độ dốc đàn hồi ban đầu của ECC không phải là yếu tố quyết định duy nhất đối với hiệu quả làm việc của vật liệu, ECC vẫn duy trì được khả năng mang tải sau nứt và đạt biến dạng lớn nhờ cơ chế biến cứng và sự hình thành vi nứt phân tán. Điều này phản ánh vai trò chi phối của cơ chế bắc cầu của sợi và sự hình thành vi nứt phân tán trong việc duy trì khả năng mang tải của vật liệu. Trong khi bê tông truyền thống sử dụng cốt liệu thô có mô đun cao làm pha chịu lực chính, ECC không chứa cốt liệu thô và có hàm lượng sợi đáng kể, dẫn đến cấu trúc nền chất kết dính mềm hơn và khả năng biến dạng lớn hơn. Giá trị mô đun đàn hồi của ECC thường nằm trong khoảng 15–40 GPa, tùy thuộc vào cấp phối và loại vật liệu sử dụng [14], [26]. Mặc dù thấp hơn bê tông thường, điều này không phải là bất lợi mà là đặc trưng phù hợp với cơ chế làm việc của ECC, cho phép vật liệu phân tán ứng suất và hạn chế tập trung ứng suất tại các vị trí nứt. Trong nhiều trường hợp, mô đun đàn hồi thấp hơn còn giúp giảm nguy cơ phá hoại giòn và cải thiện khả năng chịu tải động.



Hình 6. Quan hệ ứng suất – biến dạng kéo một trục điển hình của ECC, thể hiện đặc trưng biến cứng và khả năng biến dạng lớn sau nứt [5].

Cát nhiễm mặn có thể làm tăng nhẹ mô đun đàn hồi trong một số hệ ECC thông qua việc thúc đẩy thủy hóa sớm và làm đặc cấu trúc nền

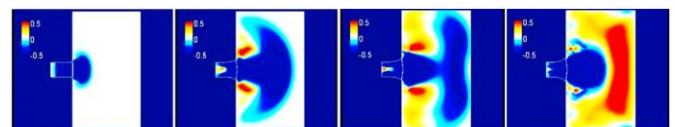
chất kết dính [25]. Tuy nhiên, sự gia tăng này thường đi kèm với sự suy giảm nhẹ về biến dạng kéo nếu nền chất kết dính trở nên cứng hơn. Do đó, việc sử dụng cát nhiễm mặn cần được cân nhắc trong mối quan hệ với yêu cầu về độ dẻo của vật liệu.

FA và GGBFS cũng ảnh hưởng đến mô đun đàn hồi theo các hướng khác nhau. FA có xu hướng làm giảm hoặc duy trì mô đun ở mức thấp do làm nền chất kết dính mềm hơn, trong khi GGBFS có thể làm tăng mô đun nhờ cải thiện độ đặc chắc và cường độ nền chất kết dính [28], [29]. Sự kết hợp hợp lý giữa hai loại phụ gia này cho phép điều chỉnh mô đun đàn hồi theo hướng phù hợp với yêu cầu ứng dụng cụ thể của ECC.

3.4. Khả năng hấp thụ và phân tán năng lượng

Một trong những ưu điểm nổi bật của ECC so với bê tông thông thường là khả năng hấp thụ và phân tán năng lượng vượt trội, đặc biệt dưới tác động của tải trọng động như va đập hoặc nổ. Khả năng này xuất phát từ sự kết hợp giữa biến dạng kéo lớn, cơ chế nứt đa điểm và sự tham gia của sợi trong việc tiêu tán năng lượng thông qua cơ chế kéo trượt và bắc cầu [34].

Khi chịu tải trọng va đập, ECC không phá hoại theo cơ chế giòn mà phân tán năng lượng thông qua sự hình thành và phát triển của nhiều vi nứt, đồng thời duy trì tính toàn vẹn của cấu trúc trong thời gian dài hơn so với bê tông thông thường [34], [35]. Điều này đặc biệt quan trọng trong các kết cấu chịu tải trọng động, nơi mà khả năng tiêu tán năng lượng có thể quyết định đến mức độ hư hại của công trình. Cơ chế lan truyền ứng suất và khả năng kháng va đập vượt trội của ECC so với bê tông thông thường được minh họa trong Hình 7 và Hình 8.



Hình 7. Sự lan truyền và phản xạ sóng ứng suất trong vật liệu dưới tải trọng va đập sau thời gian tác động (từ trái sang phải): 0,2 μ s; 0,42 μ s; 0,52 μ s và 0,65 μ s [34].



Hình 8. So sánh cơ chế phá hoại của bê tông thường (trái) và ECC (phải) dưới tác dụng của tải trọng va đập [34].

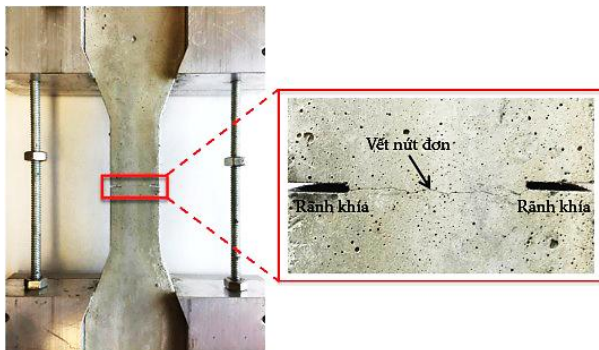
Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy mặc dù ECC có thể có cường độ nén thấp hơn bê tông cốt thép trong một số trường hợp, nhưng khả năng hấp thụ năng lượng và độ dẻo cao giúp vật liệu đạt

hiệu quả làm việc tốt hơn dưới tải trọng động [21], [35]. Điều này cho thấy đánh giá hiệu suất của ECC cần được thực hiện trên cơ sở tổng hợp giữa cường độ, độ dẻo và khả năng tiêu tán năng lượng, thay vì chỉ dựa vào cường độ nén.

4. Độ bền của ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng

4.1. Khả năng kháng thấm và hạn chế vận chuyển chất xâm thực

Độ bền của ECC trong môi trường biển hoặc ven biển trước hết phụ thuộc vào khả năng hạn chế sự xâm nhập của nước và các ion gây hại vào trong nền vật liệu [2]. Đối với vật liệu gốc xi măng thông thường, quá trình này chủ yếu bị chi phối bởi độ rỗng mao quản và sự hiện diện của các vết nứt mở [3], [20]. Tuy nhiên, đối với ECC, cơ chế chỉ phối không chỉ nằm ở cấu trúc lỗ rỗng của nền chất kết dính mà còn nằm ở khả năng duy trì hệ vi nứt phân tán với bề rộng rất nhỏ sau chịu tải [2], [3], [30]. Đây là khác biệt cơ bản giữa ECC và bê tông thông thường. Trong ECC, vật liệu có thể nứt nhưng vẫn duy trì được khả năng kháng thấm ở mức tương đối cao nếu bề rộng vết nứt được kiểm soát tốt [20], [30]. Ngược lại, ở bê tông thông thường, chỉ một số ít vết nứt cục bộ với độ mở lớn cũng đủ làm suy giảm mạnh khả năng chống xâm nhập của chất lỏng và ion [2], [3].



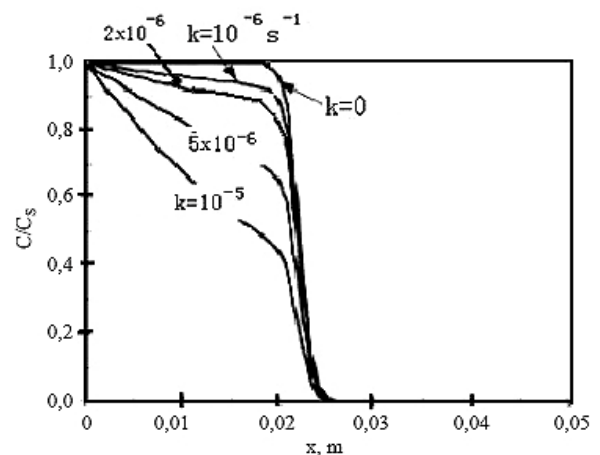
Hình 9. Ảnh hưởng của bề rộng vi nứt đến khả năng thấm của ECC [3].

Sự kết hợp giữa cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng làm cho cơ chế này trở nên phức tạp hơn nhưng cũng tạo ra cơ hội cải thiện độ bền nếu cấp phối được thiết kế hợp lý [9], [11]. Cát nhiễm mặn có thể thúc đẩy thủy hóa sớm và làm tăng mức độ đặc chắc của vi cấu trúc trong một số hệ nền chất kết dính [9], [25]. FA và GGBFS góp phần tinh chỉnh lỗ rỗng và tạo thêm các sản phẩm hydrat thứ cấp, nhờ đó giảm tính liên thông của hệ mao quản [11], [13], [28], [29]. Tuy nhiên, tác động tích cực này chỉ thực sự có ý nghĩa khi nền chất kết dính vẫn duy trì được sự tương thích với cơ chế nứt đa điểm của ECC [6], [22]. Nếu nền chất kết dính trở nên quá cứng, khoảng cách giữa các vết nứt có thể tăng lên và bề rộng từng vết nứt có thể lớn hơn [13], [31]. Khi đó, lợi ích đạt được từ việc giảm độ rỗng có thể bị bù trừ bởi sự gia tăng đường dẫn vận chuyển qua các vết nứt [3], [30]. Vì vậy, khi đánh giá khả năng kháng thấm của ECC, cần xem xét đồng thời độ đặc chắc của nền chất kết dính và đặc điểm của hệ vi nứt sau chịu tải [2], [3], [20]. Ảnh hưởng của vi nứt đến khả năng thấm của ECC được thể hiện trong

Hình 9, cho thấy tốc độ gia tăng tính thấm phụ thuộc mạnh vào bề rộng vết nứt thay vì chỉ phụ thuộc vào việc mẫu có nứt hay không [3].

4.2. Khả năng kháng xâm nhập clorua và vai trò của cơ chế liên kết ion

Trong hệ ECC sử dụng cát nhiễm mặn, clorua cần được xem xét theo cách tiếp cận chặt chẽ hơn so với bê tông thông thường, vì một phần ion Cl^- có thể hiện diện ngay từ vật liệu đầu vào [9], [25]. Do đó, đánh giá khả năng kháng xâm nhập clorua của ECC không thể chỉ dựa trên tổng hàm lượng clorua mà phải phân biệt giữa clorua tự do trong dung dịch lỗ rỗng và clorua đã được giữ lại trong nền chất kết dính dưới dạng hấp phụ vật lý hoặc liên kết hóa học [36], [37], [38], [39]. Chính phần clorua tự do mới là thành phần có ý nghĩa trực tiếp đối với vận chuyển ion và nguy cơ ăn mòn cốt thép [37], [39]. Theo đó, khả năng kháng xâm nhập clorua của ECC là kết quả tổng hợp của ba quá trình diễn ra đồng thời: hạn chế vận chuyển ion nhờ cấu trúc nền chất kết dính đặc chắc [11], [13], [40]; giảm phần ion tự do nhờ liên kết clorua [37], [39], [41]; và duy trì hệ vi nứt mịn để không hình thành các đường dẫn vận chuyển ưu thế [2], [3], [20].



Hình 10. Sơ đồ mô tả cơ chế xâm nhập và liên kết clorua trong vật liệu gốc xi măng [38].

Vai trò của phụ gia khoáng trong cơ chế này đặc biệt quan trọng [11], [13], [28]. FA và GGBFS không chỉ làm giảm tính liên thông của hệ mao quản [13], [29] mà còn cung cấp các pha giàu alumin, tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành các hợp chất liên kết clorua như muối Friedel [37], [41], [42]. Nhờ đó, một phần Cl^- được cố định trong cấu trúc hydrat và không còn tham gia trực tiếp vào quá trình vận chuyển hoặc phản ứng điện hóa [37], [39]. Đối với ECC dùng cát nhiễm mặn, đây là một ưu thế quan trọng về mặt hóa học, vì nó cho phép hệ chất kết dính có thể làm giảm phần ion Cl^- tự do trong vật liệu đầu vào [9], [11], [41]. Tuy nhiên, cơ chế liên kết clorua không phải là tuyệt đối và bất biến [17], [37]. Hiệu quả liên kết phụ thuộc vào hàm lượng alumin, thành phần dung dịch lỗ rỗng, độ kiềm của hệ và điều kiện phơi nhiễm lâu dài [17], [37], [42]. Vì vậy, việc sử dụng FA và GGBFS chỉ thực sự phát huy hiệu quả khi được tối ưu cùng với yêu cầu về kiểm soát vi nứt

và độ đặc chắc của nền chất kết dính [11], [13], [28]. Cơ chế xâm nhập và phân bố của ion clorua trong vật liệu gốc xi măng, bao gồm quá trình khuếch tán, hấp phụ và liên kết hóa học với các pha hydrat, được thể hiện trong Hình 10.

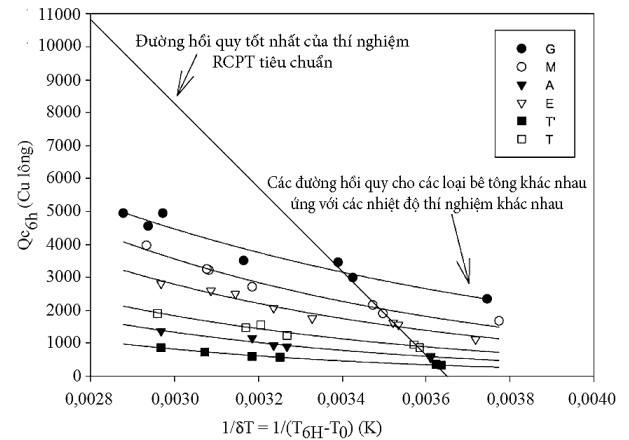
4.3. Đánh giá khả năng kháng clorua của ECC bằng RCPT

Trong các nghiên cứu về vật liệu xi măng, thí nghiệm RCPT thường được sử dụng như một công cụ so sánh nhanh khả năng kháng xâm nhập clorua giữa các cấp phối. Tuy nhiên, đối với ECC, đặc biệt là ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng, việc diễn giải kết quả RCPT cần đặt trong đúng bản chất của phép thử [43], [44], [45]. RCPT không đo trực tiếp hệ số khuếch tán clorua, mà xác định tổng điện tích đi qua mẫu trong một khoảng thời gian xác định dưới điện thế không đổi [45], [46]. Vì vậy, kết quả chịu ảnh hưởng đồng thời của độ dẫn điện dung dịch lỗ rỗng [43], [44], thành phần ion trong hệ [43], [45], cấu trúc mao quản [44], mức độ bão hòa của mẫu [45], [47] và diễn biến nhiệt trong quá trình thử [43]. Do đó, RCPT về bản chất là một chỉ tiêu điện học tổng hợp hơn là một chỉ tiêu khuếch tán thuần túy.

Điểm này đặc biệt đáng lưu ý đối với ECC sử dụng cát nhiễm mặn [9], [25]. Khi trong vật liệu đã tồn tại sẵn một lượng ion hòa tan đáng kể, đặc biệt là Cl^- và các ion kiềm trong dung dịch lỗ rỗng, độ dẫn điện của mẫu có thể tăng lên rõ rệt [43], [44]. Khi đó, điện tích đo được trong RCPT có thể lớn hơn không phải vì cấu trúc nền chất kết dính kém đặc chắc hay vì ion dễ xâm nhập hơn trong điều kiện phục vụ, mà trước hết do môi trường điện ly trong lỗ rỗng dẫn điện mạnh hơn [43], [44], [45]. Ngược lại, trong các hệ giàu phụ gia khoáng, đặc biệt khi có GGBFS hoặc FA với mức thay thế thích hợp, RCPT có thể giảm nhờ cấu trúc lỗ rỗng được tinh chỉnh và dung dịch lỗ rỗng có đặc tính dẫn điện khác đi [11], [13], [44]. Tuy nhiên, giá trị điện tích thấp đó vẫn cần được đối chiếu với trạng thái vi nứt và các dữ liệu vận chuyển ion khác trước khi đi đến kết luận về độ bền kháng clorua [3], [20], [47].

Một hạn chế quan trọng khác của RCPT là phép thử này thường được tiến hành trên mẫu ở trạng thái chưa nứt hoặc không phản ánh đầy đủ đặc điểm của mạng vi nứt sau chịu tải [2], [3], [20]. Trong khi đó, đối với ECC, khả năng kiểm soát bề rộng vết nứt và duy trì nứt phân tán mới là một trong những cơ chế trung tâm quyết định độ bền lâu dài [2], [3], [6]. Một hệ ECC có RCPT không thật thấp nhưng duy trì được mạng vi nứt rất mịn, phân tán và ổn định có thể cho hiệu suất thực tế tốt hơn một vật liệu nền rất đặc nhưng xuất hiện vết nứt cục bộ lớn sau chịu tải [3], [20], [30]. Do đó, nếu dùng RCPT để đánh giá ECC, cần xem kết quả như một chỉ báo so sánh trong cùng nhóm vật liệu [43], [45], [48] và luôn đặt nó trong mối liên hệ với điện trở suất, độ hút nước, cấu trúc lỗ rỗng, khả năng liên kết clorua và đặc biệt là hình thái vết nứt sau chịu tải [44], [46], [47]. Đối với các hệ ECC có dung dịch lỗ rỗng chứa hàm lượng ion hòa tan cao hoặc có sử dụng cát nhiễm mặn, việc kết hợp RCPT với các phép thử phản ánh trực tiếp hơn khả năng vận chuyển ion là cần thiết để tránh diễn giải sai bản chất độ bền kháng clorua của vật liệu. Mối quan hệ giữa điện lượng đo được trong thí nghiệm RCPT và sự gia tăng nhiệt độ do hiệu ứng Joule được thể

hiện rõ trong Hình 11, cho thấy điện lượng đo được không chỉ phụ thuộc vào cấu trúc lỗ rỗng mà còn bị chi phối đáng kể bởi nhiệt độ trong quá trình thử.



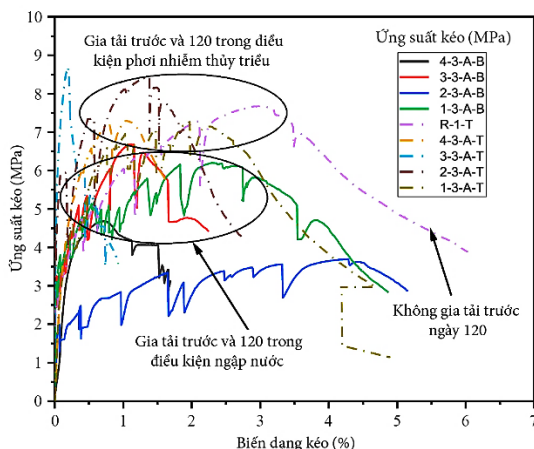
Hình 11. Quan hệ giữa điện lượng RCPT trong 6 giờ (Q_{c6h}) và tham số nhiệt độ tương đương ($1/\delta T$), thể hiện ảnh hưởng của hiệu ứng Joule đến kết quả thí nghiệm RCPT [42].

4.4. Khả năng tự phục hồi và độ bền lâu dài trong môi trường biển

Khả năng tự phục hồi là một đặc trưng có ý nghĩa đặc biệt đối với độ bền của ECC, vì nó gắn trực tiếp với bản chất vi nứt nhỏ và phân tán của vật liệu. Khi bề rộng vết nứt được duy trì ở mức thấp và tồn tại điều kiện ẩm thích hợp, các sản phẩm như CaCO_3 , C-S-H thứ cấp hoặc các hydrat mới có thể tiếp tục hình thành trong khe nứt [11], [49]. Quá trình này làm giảm độ mở hữu hiệu của vết nứt và từng bước phục hồi khả năng chống thấm của vật liệu [2], [20], [50]. Đối với ECC chứa FA và GGBFS, hiệu ứng này còn được tăng cường do trong hệ vẫn tồn tại các pha vật liệu phản ứng chậm, có khả năng tiếp tục tham gia vào các phản ứng thứ cấp ở tuổi muộn [11], [13], [29].

Đối với môi trường biển, độ bền của ECC không chỉ liên quan đến clorua mà còn bị chi phối bởi điều kiện ướt-khô luân phiên trong vùng thủy triều và vùng sóng vỗ, sự biến đổi nhiệt độ và trong nhiều trường hợp là sự hiện diện đồng thời của sunfat [50], [51], [52]. Ưu thế của ECC không nằm ở việc triệt tiêu hoàn toàn vết nứt, mà ở khả năng duy trì trạng thái vi nứt phân tán với bề rộng nhỏ, nhờ đó hạn chế vận chuyển tác nhân xâm thực [2], [3], [20]. Nền chất kết dính đủ đặc làm giảm tính liên thông của mao quản, ion được liên kết một phần nhờ các pha hydrat giàu nhôm [37], [41], và mạng vi nứt vẫn đủ mịn để hạn chế hình thành các đường vận chuyển ưu thế của tác nhân xâm thực [2], [3], [20]. Nếu sau đó quá trình tự phục hồi tiếp tục diễn ra, hệ vi nứt càng bị lấp đầy dần và nguy cơ suy giảm theo thời gian càng giảm [11], [49], [50]. Chính sự kết hợp giữa kiểm soát vi nứt, liên kết ion và tự phục hồi là cơ sở quan trọng giải thích vì sao ECC thể hiện triển vọng ứng dụng đối với các cấu kiện làm việc trong môi trường biển hoặc ven biển, mặc dù mức độ hiệu quả của vật liệu vẫn phụ thuộc vào khả năng duy trì đồng thời độ đặc chắc của nền chất kết dính, chất

lượng vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính và trạng thái vi nứt ở mức thuận lợi [1], [9], [11]. Ảnh hưởng của điều kiện phơi nhiễm và trạng thái gia tải trước đến ứng xử kéo của ECC sau 120 ngày được thể hiện trong Hình 12.



Hình 12. Ảnh hưởng của điều kiện phơi nhiễm thủy triều/ ngập nước và trạng thái gia tải trước đến ứng xử kéo của ECC sau 120 ngày phơi nhiễm [11].

5. Kết luận

Bài báo đã phân tích một cách có hệ thống các cơ chế chi phối tính chất cơ học và độ bền của ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng trên cơ sở tích hợp giữa vi cơ học, hóa học vật liệu và cơ chế vận chuyển ion. Các phân tích cho thấy tính chất cơ học và độ bền của ECC không thể được diễn giải theo từng thành phần riêng lẻ, mà phải được xem là kết quả của sự tương tác đồng thời giữa nền chất kết dính, hệ vi nứt, vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính và cơ chế liên kết ion.

Việc sử dụng cát nhiễm mặn làm thay đổi đáng kể động học thủy hóa và thành phần dung dịch lỏng, từ đó ảnh hưởng đến sự phát triển vi cấu trúc và vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính. Trong khi đó, các phụ gia khoáng như FA và GGBFS đóng vai trò then chốt trong việc điều chỉnh độ đặc chắc của nền chất kết dính, kiểm soát độ dai phá hủy và tăng cường khả năng liên kết clorua thông qua các pha hydrat giàu alumin. Sự phối hợp giữa các thành phần này cho phép hình thành hệ vật liệu có cấu trúc vi mô ổn định hơn và khả năng kháng xâm nhập ion tốt hơn.

Một kết luận quan trọng là độ bền của ECC không chỉ phụ thuộc vào độ rỗng mao quản mà còn phụ thuộc mạnh vào khả năng duy trì hệ vi nứt phân tán với bề rộng nhỏ. Cơ chế nứt đa điểm và khả năng bắc cầu của sợi giúp hạn chế sự hình thành các đường dẫn vận chuyển ưu thế, trong khi quá trình tự phục hồi góp phần làm giảm tính liên thông của hệ vết nứt theo thời gian. Do đó, việc đánh giá độ bền của ECC cần được thực hiện trên cơ sở tích hợp giữa vi cấu trúc, trạng thái vết nứt và đặc trưng vận chuyển ion, thay vì dựa vào một chỉ tiêu đơn lẻ như RCPT.

Trên cơ sở các cơ chế đã phân tích, ECC sử dụng cát nhiễm mặn và phụ gia khoáng có thể được xem là một hướng vật liệu có triển vọng

đối với các kết cấu làm việc trong môi trường biển và ven biển. Tuy nhiên, hiệu quả cơ học và độ bền của hệ vật liệu này không nên được quy về tác động của từng thành phần riêng lẻ, mà phải được hiểu như kết quả của sự phối hợp đồng thời giữa động học thủy hóa, độ đặc chắc của nền chất kết dính, chất lượng vùng chuyển tiếp sợi–nền chất kết dính, trạng thái vi nứt và cơ chế vận chuyển–liên kết ion. Vì vậy, mọi khẳng định về tính ưu việt của ECC sử dụng cát nhiễm mặn cần được đặt trong bối cảnh của cấp phối cụ thể và điều kiện phơi nhiễm tương ứng, thay vì được khái quát như một xu hướng bất biến cho mọi hệ vật liệu.

Bên cạnh những kết quả đã được tổng hợp, một số vấn đề vẫn cần tiếp tục được nghiên cứu nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học và mở rộng khả năng ứng dụng của vật liệu này. Trước hết, cần có các nghiên cứu dài hạn để đánh giá ảnh hưởng của môi trường biển đến sự phát triển vi cấu trúc và độ bền lâu của ECC sử dụng cát nhiễm mặn, đặc biệt trong điều kiện kết hợp giữa ion clorua, sunfat và chu kỳ ẩm–khô. Đồng thời, tương tác giữa thành phần muối trong cát biển hoặc cát nhiễm mặn và hệ chất kết dính đa thành phần (bao gồm xi măng, tro bay và xi lơ cao nghiền mịn) cần được làm rõ hơn trên cả phương diện động học thủy hóa và cấu trúc sản phẩm phản ứng. Ngoài ra, việc phát triển các mô hình dự báo mối quan hệ giữa thành phần vật liệu, cấu trúc vi mô và tính chất cơ học–biến dạng, cũng như xây dựng cơ sở dữ liệu thực nghiệm phục vụ tiêu chuẩn hóa phương pháp đánh giá đối với ECC sử dụng cát nhiễm mặn, là những hướng nghiên cứu cần thiết trong thời gian tới.

Tài liệu tham khảo

- [1]. E. D. Shumuye, W. Li, G. Fang, Z. Wang, J. Liu, and K. Zerfu, "Review on the durability of eco-friendly engineering cementitious composite (ECC)," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, p. e02324, 2023.
- [2]. H. Ma, C. Yi, and C. Wu, "Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 287, p. 122719, 2021.
- [3]. H. Liu, Q. Zhang, C. Gu, H. Su, and V. C. Li, "Influence of micro-cracking on the permeability of engineered cementitious composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 72, pp. 104–113, 2016.
- [4]. V. C. Li, "From micromechanics to structural engineering the design of cementitious composites for civil engineering applications," *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 1993, no. 471, pp. 1–12, 1993.
- [5]. V. C. Li, "On engineered cementitious composites (ECC)," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 215–230, 2003.
- [6]. J. Li, J. Qiu, J. Weng, and E.-H. Yang, "Micromechanics of engineered cementitious composites (ECC): A critical review and new insights," *Constr. Build. Mater.*, vol. 362, p. 129765, 2023.
- [7]. M. Singh, B. Saini, and H. D. Chahal, "Performance and composition analysis of engineered cementitious composite (ECC) – A review," *J. Build. Eng.*, vol. 26, p. 100851, 2019.
- [8]. Hùng L. V., Thiên P. H., Quỳnh P. V., and Hoan N. V., "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 12, số 03, 2022.
- [9]. B.-T. Huang, J. Yu, J.-Q. Wu, J.-G. Dai, and C. KY. Leung, "Seawater sea-sand Engineered Cementitious Composites (SS-ECC) for marine and coastal applications," *Compos. Commun.*, vol. 20, p. 100353, 2020.

- [10]. M. Zhu, B. Chen, M. Wu, and J. Han, "Preparation and mechanical characterization of cost-effective low-carbon engineered cementitious composites with seawater and sea-sand," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 136, p. 104883, 2023.
- [11]. E. D. Shumuye, W. Li, J. Liu, Z. Wang, J. Yu, and H. Wu, "Self-healing recovery and micro-structural properties of slag/fly-ash based engineered cementitious composites under chloride environment and tidal exposure," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 134, p. 104789, 2022.
- [12]. D. Shoji, Z. He, D. Zhang, and V. C. Li, "The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 327, p. 126701, 2022.
- [13]. Y. Zhu, Y. Yang, and Y. Yao, "Use of slag to improve mechanical properties of engineered cementitious composites (ECCs) with high volumes of fly ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 1076–1081, 2012.
- [14]. F. M. Ghahsareh, P. Guo, Y. Wang, W. Meng, V. C. Li, and Y. Bao, "Review on material specification, characterization, and quality control of engineered cementitious composite (ECC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 442, p. 137699, 2024.
- [15]. J. Xia and L. Li, "Numerical simulation of ionic transport in cement paste under the action of externally applied electric field," *Constr. Build. Mater.*, vol. 39, pp. 51–59, 2013.
- [16]. R. J. Thomas, E. Ariyachandra, D. Lezama, and S. Peethamparan, "Comparison of chloride permeability methods for Alkali-Activated concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 104–111, 2018.
- [17]. C. Shi, "Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or AASHTO T277) results," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 3, pp. 537–545, 2004.
- [18]. R. Feldman, L. R. Prudencio, and G. Chan, "Rapid chloride permeability test on blended cement and other concretes: correlations between charge, initial current and conductivity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 13, no. 3, pp. 149–154, 1999.
- [19]. G. A. Julio-Betancourt and R. D. Hooton, "Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 6, pp. 1007–1015, 2004.
- [20]. M. D. Lepech and V. C. Li, "Water permeability of engineered cementitious composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 10, pp. 744–753, 2009.
- [21]. J.-X. Zhu, L.-Y. Xu, B.-T. Huang, K.-F. Weng, and J.-G. Dai, "Recent developments in Engineered/Strain-Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC) with high and ultra-high strength," *Constr. Build. Mater.*, vol. 342, p. 127956, 2022.
- [22]. V. Li, C. Wu, S. Wang, A. Ogawa, and T. Saito, "Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC)," *ACI Mater. J.*, vol. 99, pp. 463–472, 2002.
- [23]. R. Prashanthi and K. Natarajan, "Engineered cementitious composites - A review," *Mater. Today Proc.*, 2023. (In Press).
- [24]. Q. Liao, J. Yu, T. Shi, and Y. Su, "Mechanical behaviors and failure criteria of seawater sea-sand engineered cementitious composites under combined tension and shear," *J. Build. Eng.*, vol. 54, p. 104552, 2022.
- [25]. J. Wei, L. Ke, P. Wang, W. Li, and 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," *Compos. Struct.*, vol. 343, p. 118302, 2024.
- [26]. L. Liang, X. Lu, Y. Ding, J. Yu, V. C. Li, and K. Yu, "High-modulus engineered cementitious composites: Design mechanism and performance characterization," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 154, p. 105782, 2024.
- [27]. L.-Y. Xu, J. Yu, B.-T. Huang, J.-C. Lao, H.-L. Wu, X. Jiang, T.-Y. Xie, and J.-G. Dai, "Green and low-carbon matrices for Engineered/Strain-Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC): Toward sustainable and resilient infrastructure," *J. Clean. Prod.*, vol. 496, p. 144968, 2025.
- [28]. E. Shumuye, J. Liu, W. Li, and Z. Wang, "Eco-friendly, high-ductility slag/fly-ash-based engineered cementitious composite (ECC) reinforced with PE fibers," *Polymers*, vol. 14, p. 1760, 2022.
- [29]. E.-H. Yang, Y. Yang, and V. C. Li, "Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness," *ACI Mater. J.*, vol. 104, no. 6, pp. 620–628, 2007.
- [30]. M. Şahmaran and V. Li, "Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 42, pp. 593–603, 2008.
- [31]. S. Wen, M. Cao, and G. Liu, "High-strength high-ductility seawater sea-sand Engineered Cementitious Composites: Mechanical properties, cracking behavior and micro-mechanics," *J. Build. Eng.*, vol. 90, p. 109404, 2024.
- [32]. A. N. Raheem and R. M. R. Pannem, "Synergistic effect of carbon fiber, fly ash, and M-sand on the performance of Engineered Cementitious Composites (ECC)," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 17, no. 3, p. 104023, 2026.
- [33]. C. Lin, D. Huang, Z. Liu, and Y. Lu, "Mechanical properties, micro-mechanisms, and constitutive models of seawater sea-sand engineered cementitious composites," *J. Build. Eng.*, vol. 94, p. 109987, 2024.
- [34]. E.-H. Yang and V. C. Li, "Tailoring engineered cementitious composites for impact resistance," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 8, pp. 1066–1071, 2012.
- [35]. H. Qian, Z. Li, J. Pei, L. Kang, and H. Li, "Seismic performance of self-centering beam-column joints reinforced with superelastic shape memory alloy bars and engineering cementitious composites materials," *Compos. Struct.*, vol. 294, p. 115782, 2022.
- [36]. J. Chen, J. Jia, and M. Zhu, "Role of supplementary cementitious materials on chloride binding behaviors and corrosion resistance in marine environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 458, p. 139724, 2025.
- [37]. J. Lv, D. Li, X. Yang, H. Rong, C. Xian, Z. Zhang, W. Huang, S. Li, "Chloride ion binding in cementitious materials: A review of influencing factors and control methods," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, p. e04201, 2025.
- [38]. Q. Yuan, C. Shi, G. De Schutter, K. Audenaert, and D. Deng, "Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–13, 2009.
- [39]. M. Liu and D. Li, "Chloride binding in low-carbon cementitious composites: mechanisms, characteristics and performance," *J. Build. Eng.*, vol. 108, p. 112924, 2025.
- [40]. J. Sun, Z. Jin, H. Chang, and W. Zhang, "A review of chloride transport in concrete exposed to the marine atmosphere zone environment: Experiments and numerical models," *J. Build. Eng.*, vol. 84, p. 108591, 2024.
- [41]. M. D. A. Thomas, R. D. Hooton, A. Scott, and H. Zibara, "The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 1, pp. 1–7, 2012.
- [42]. G. A. Julio-Betancourt and R. D. Hooton, "Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 6, pp. 1007–1015, 2004.
- [43]. A. Pilvar, A. A. Ramezani-pour, and H. Rajaie, "New method development for evaluation concrete chloride ion permeability," *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 790–797, 2015.
- [44]. J. Pontes, S. Real, and J. Alexandre Bogas, "The rapid chloride migration test as a method to determine the chloride penetration resistance of concrete in marine environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 404, p. 133281, 2023.
- [45]. C. M. Tibbetts, J. M. Paris, C. C. Ferraro, K. A. Riding, and T. G. Townsend, "Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 107, p. 103491, 2020.

- [46]. P. Ghosh and Q. Tran, "Influence of parameters on surface resistivity of concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 134–145, 2015.
- [47]. T. M. Hasan, S. Allena, and L. Gilbert, "Rapid chloride penetration test: An evaluation of corrosion resistance in ultra-high performance concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 82, p. 108317, 2024.
- [48]. R. J. Thomas, E. Ariyachandra, D. Lezama, and S. Peethamparan, "Comparison of chloride permeability methods for Alkali-Activated concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 104–111, 2018.
- [49]. A. S. Alemu, G. Liyew, B. Y. Lee, and H.-K. Kim, "Effect of self-healing of cracks in chloride ion diffusion and corrosion of engineered cementitious composites," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 35, pp. 1054–1071, 2025.
- [50]. J. Cao, H. Lei, F. Wu, W. Wang, L. He, and Z. Li, "Durability evaluation of engineered cementitious composite subjected to salt freeze-thaw cycles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 481, p. 141594, 2025.
- [51]. W. Ma, T. Chen, P. Deng, and S. Guo, "Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through cementitious matrix optimization and crack width controlling," *J. Build. Eng.*, vol. 94, p. 109732, 2024.
- [52]. N. Shabakhly, H. R. Karimi, and A. Y. Bakhtiary, "Cementitious composites in aquatic environments, evaluation of fracture and mechanical behavior in long-term submerging in fresh and saltwater, and simulated splash zone conditions," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 20, p. e03035, 2024.