SỬ DỤNG NƯỚC BIỂN VÀ CÁT BIỂN TRONG KẾT CẤU BÊ TÔNG, THỰC TRẠNG VÀ TRIỂN VỌNG PHÁT TRIỂN

UTILIZATION OF SEAWATER AND SEASAND IN CONCRETE STRUCTURES, CURRENT SITUATION, EXPERIMENTNL EVIDENCE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

ThS. Nguyễn Văn Khánh - *Chủ tịch HĐQT Công ty Đầu tư - Phát triển Công nghệ ĐHXD Hà Nội*
Email: khanhnv@frpvietnam.com
TS. Vũ Ngọc Sơn - *Bộ môn Cơ học Kết cấu - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội Email: sonnv@huce.edu.vn*

Tóm tắt: Bê tông là vật liệu xây dựng được sử dụng phổ biến nhất hiện nay nhờ tính linh hoạt, độ bền và hiệu quả kinh tế. Quá trình đô thị hóa và phát triển hạ tầng nhanh chóng, đặc biệt tại châu Á, đã làm gia tăng mạnh nhu cầu bê tông, qua đó tạo áp lực lớn lên tài nguyên thiên nhiên và môi trường. Trong bê tông truyền thống, cát sông và nước ngọt là các thành phần thiết yếu. Tuy nhiên, việc khai thác cát sông kéo dài và tình trạng khan hiếm nước ngọt do biến đổi khí hậu và xâm nhập mặn đang gây ra nhiều hệ lụy nghiêm trọng. Trước bối cảnh đó, việc tìm kiếm các vật liệu thay thế bền vững trở thành yêu cầu cấp thiết. Cát biển đã được sử dụng tại một số quốc gia như Vương quốc Anh, Nhật Bản và Trung Quốc với hệ thống tiêu chuẩn và quy trình kiểm soát chất lượng tương đối hoàn chỉnh [1–3].

Tại Việt Nam, đối mặt với sự suy giảm nghiêm trọng về nguồn cát sông và nước ngọt thì với đường bờ biển dài trên 3.260 km, nguồn cát biển và nước biển dồi dào sẽ trở thành tài nguyên phong phú cho việc phát triển bê tông sử dụng cát biển và nước biển, đặc biệt cho các công trình ven biển và hải đảo. Tuy nhiên, môi trường biển với hàm lượng ion clorua và sunfat cao có thể thúc đẩy ăn mòn cốt thép, làm suy giảm độ bền lâu dài của công trình. Mặc dù việc khử muối cát biển bằng nước ngọt có thể hạn chế rủi ro này, giải pháp đó làm tăng chi phí và tiêu thụ thêm nguồn tài nguyên khan hiếm. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã đánh giá khả năng sử dụng trực tiếp cát biển và nước biển trong bê tông, song các kết quả còn phân tán, chưa phản ánh đầy đủ điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm và môi trường xâm thực ven biển Việt Nam.

Vì vậy, bài báo này thực hiện một cách tổng quan có hệ thống các nghiên cứu về bê tông sử dụng cát biển và nước biển, tập trung vào tính chất cơ học, cường độ, độ bền lâu, ăn mòn cốt thép và khả năng ứng dụng cốt sợi polyme gia cường (FRP), nhằm xác định các khoảng trống nghiên cứu và đề xuất định hướng phát triển phục vụ xây dựng hạ tầng ven biển và hải đảo theo hướng bền vững tại Việt Nam.

Từ khóa: Bê tông sử dụng cát biển và nước biển, khả năng ứng dụng cốt sợi polyme gia cường (FRP), và đề xuất định hướng phát triển phục vụ xây dựng hạ tầng ven biển và hải đảo theo hướng bền vững tại Việt Nam.

Abstract: Concrete is the most widely used construction material today due to its versatility, durability, and cost-effectiveness. Rapid urbanization and infrastructure development—particularly in Asia-have significantly increased the demand for concrete, thereby placing substantial pressure on natural resources and the environment. In conventional concrete, river sand and freshwater are essential components. However, prolonged river sand mining and the growing scarcity of freshwater caused by climate change and saltwater intrusion have led to serious environmental and socio-economic consequences. In this context, the search for sustainable alternative materials has become an urgent necessity. Sea sand has been utilized in several countries, such as the United Kingdom, Japan, and China, where relatively comprehensive standards and quality control procedures have been established [1–3].

In Vietnam, facing a severe depletion of river sand and freshwater resources, the country's coastline-extending over 3,260km-offers abundant sea sand and seawater that could serve as promising resources for the development of seawater sea-sand concrete, particularly for coastal and island infrastructure projects. Nevertheless, the marine environment, characterized by high concentrations of chloride and sulfate ions, can accelerate reinforcement corrosion and compromise long-term structural durability. Although desalination of sea sand using freshwater can mitigate these risks, this solution increases construction costs and further consumes scarce freshwater resources. In recent years, numerous studies have evaluated the feasibility of directly using sea sand and seawater in concrete. However, the findings remain fragmented and do not fully reflect the tropical monsoon climate and aggressive coastal exposure conditions typical of Vietnam.

Therefore, this paper presents a systematic review of research on seawater and sea-sand concrete, focusing on mechanical properties, strength development, durability performance, reinforcement corrosion behavior, and the potential application of fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement systems. The objective is to identify existing research gaps and propose future development directions to support sustainable coastal and island infrastructure construction in Vietnam.

Keywords: Concrete using sea sand and seawater, the applicability of fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement, and proposed development directions for sustainable coastal and island infrastructure construction in Vietnam.

1. Nghiên cứu về bê tông sử dụng cát biển và nước biển

1.1. Thành phần và đặc tính của cát biển và nước biển

Một trong những nghiên cứu sớm về cát biển do Gutt và Collins [4] thực hiện cho thấy cát biển có nguồn gốc địa chất và thành phần khoáng vật tương tự cát sông và các loại cốt liệu mịn thông dụng trong bê tông, được xác nhận thông qua phân tích nhiễu xạ tia X và phân tích khoáng vật [5,6]. Tuy nhiên, sự khác biệt chủ yếu nằm ở đặc điểm bề mặt hạt, hàm lượng tạp chất sẽ ảnh hưởng đến khả năng dính kết giữa các hạt với nhau và do đó tác động đến cường độ bê tông, như đã được ghi nhận trong các nghiên cứu so sánh cát biển, cát sông và cốt liệu mịn từ phế thải mỏ đá [7,8]. Thành phần hóa học của cát biển phụ thuộc rất nhiều vào vị trí khai thác. So với cát sông, cát biển thường chứa hàm lượng muối cao hơn, kèm theo các mảnh vỏ sò và tạp chất. Newman [9] chỉ ra rằng các mảnh vỏ sinh vật biển, chủ yếu là $CaCO_3$, có khối lượng riêng và độ bền cao, có thể làm giảm độ rỗng của bê tông, từ đó ảnh hưởng đến các tính chất cơ học và độ bền lâu. Nước biển, do chứa hàm lượng cao ion Cl^- và SO_4^{2-}, có thể tác động cả tích cực lẫn tiêu cực đến tính công tác, cường độ và độ bền của bê tông khi sử dụng làm nước trộn. Một số nghiên cứu cho thấy sự hiện diện của muối ở hàm lượng thích hợp có thể cải thiện cường độ bê tông, đặc biệt ở tuổi sớm [10,11].

Các nghiên cứu tại Việt Nam cho thấy cường độ bê tông cát biển phụ thuộc đáng kể vào mô đun độ lớn của cát và việc sử dụng phụ gia. Cát biển Hà Tĩnh (mô đun 1,80) có thể chế tạo bê tông M20–M30, trong khi cát biển Nghệ An có mô đun thấp (0,93) chỉ phù hợp cho các kết cấu yêu cầu cường độ thấp [12]. Việc sử dụng phụ gia siêu dẻo và điều chỉnh lượng nước trộn có thể cải thiện đáng kể cường độ bê tông cát biển, thậm chí vượt yêu cầu thiết kế [13]. Ngoài ra, cát biển đã được nghiên cứu ứng dụng trong bê tông mặt đường chất lượng cao. Việc kết hợp cát nhiễm mặn với xỉ thép và xỉ lò cao nghiền mịn đã tạo ra bê tông có cường độ và độ bền vượt trội, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật khắt khe đối với bê tông mặt đường cấp cao tại Việt Nam [14].

1.2. Các tính chất cơ học của bê tông sử dụng cát biển và nước biển

Mặc dù đã có một số nghiên cứu xem xét đồng thời ảnh hưởng của cát biển và nước biển đến tính chất cơ học của bê tông, phần lớn các công trình nghiên cứu hiện nay vẫn chủ yếu tập trung vào việc sử dụng riêng lẻ từng thành phần. Các kết quả tổng hợp cho thấy cường độ chịu nén ở tuổi sớm của bê tông cát biển thường cao hơn một chút so với bê tông thông thường [15], mặc dù vẫn tồn tại các kết luận khác nhau về cường độ 28 ngày và cường độ dài hạn [16,17]. Một số nghiên cứu thực địa và gia tốc trong phòng thí nghiệm chỉ ra rằng cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi của bê tông sử dụng cát biển nhìn chung tương đương hoặc cao hơn so với bê tông thông thường [18]. Tương tự, bê tông trộn bằng nước biển thường đạt cường độ tuổi sớm cao hơn bê tông thông thường [19,20], trong khi cường độ dài hạn có xu hướng thấp hơn hoặc chỉ tương đương, tùy thuộc vào điều kiện bảo dưỡng và thành phần cấp phối [21]. Đối với bê tông sử dụng đồng thời cát biển và nước biển, các kết quả hiện có cho thấy cường độ chịu nén 7 ngày cao hơn đáng kể, trong khi tốc độ phát triển cường độ sau đó chậm hơn so với bê tông thông thường [15]. Các thí nghiệm gần đây cho thấy cường độ 28 ngày của bê tông cát biển và nước biển gần như tương đương bê tông đối chứng, còn ở tuổi dài hạn (khoảng 180 ngày), bê tông cát biển và nước biển có xu hướng đạt cường độ cao hơn một chút, bất kể cấp cường độ thiết kế khác nhau [22].

Các nghiên cứu tại nhiều vùng duyên hải Việt Nam (Khánh Hòa, Phú Yên, Nghệ An, Hà Tĩnh) khẳng định cát biển là nguồn vật liệu tiềm năng thay thế cát sông đang khan hiếm. Về tính chất cơ học, bê tông sử dụng cát biển thể hiện quy luật phát triển cường độ đặc thù: cường độ phát triển nhanh trong 3 đến 7 ngày đầu, nhưng tốc độ này chậm lại ở giai đoạn sau (28 đến 90 ngày) so với bê tông cát sông truyền thống [13, 23].

1.3. Hiện tượng ăn mòn cốt thép trong bê tông chế tạo từ cát biển và nước biển

Ảnh hưởng bất lợi nhất của bê tông dùng cát biển nước biển là hiện tượng ăn mòn cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép do các ion clorua nằm trong cát biển, nước biển. Do nước biển chứa hàm lượng Cl^- cao, nhiều nghiên cứu đã tập trung đánh giá nguy cơ ăn mòn cốt thép trong bê tông trộn bằng nước biển. Các thí nghiệm phơi nhiễm dài hạn cho thấy việc sử dụng nước biển làm nước trộn làm gia tăng mật độ và mức độ ăn mòn cục bộ của cốt thép [24]. Đối với bê tông sử dụng cát biển, các nghiên cứu gia tốc ăn mòn chỉ ra rằng ăn mòn cốt thép trở nên nghiêm trọng khi hàm lượng ion Cl^- tự do vượt ngưỡng khoảng 0,3%, và mức độ ăn mòn tăng theo hàm lượng cát biển cũng như tỷ lệ nước/xi măng [25]. Nhìn chung, các kết quả hiện có vẫn còn hạn chế, cho thấy cần thêm các nghiên cứu có hệ thống nhằm làm rõ cơ chế và điều kiện chi phối, tốc độ ăn mòn cốt thép trong bê tông sử dụng đồng thời cát biển và nước biển.

Để hạn chế ăn mòn cốt thép trong bê tông sử dụng cát biển và nước biển, nhiều giải pháp đã được đề xuất, trong đó phổ biến nhất là khử muối

cát biển và sử dụng chất ức chế ăn mòn, như các nghiên cứu tại Nhật Bản [26,27]. Tại Việt Nam, Duy và cộng sự [23] đề xuất rửa cát biển bằng nước nóng (90°C). Cát sau hai lần rửa cho hàm lượng clorua giảm xuống 0,04% và loại bỏ đáng kể tạp chất bám dính, giúp bê tông đạt cường độ chịu nén và kéo uốn cao hơn rõ rệt so với bê tông sử dụng cát sông tuy vậy chi phí sẽ tăng lên đáng kể. Cũng trong nghiên cứu này, áp dụng phương pháp ngâm cát biển trong dòng chảy sông tự nhiên tuy làm giảm độ mặn nhưng không loại bỏ triệt để bùn sét, dẫn đến hiệu quả cải thiện cường độ không đáng kể.

Bên cạnh đó, một số nghiên cứu đã đề xuất các giải pháp bảo vệ cốt thép chủ động. Thiên và cộng sự [28] cho thấy việc sử dụng cát biển đã rửa kết hợp với tro bay giúp cải thiện độ bền lâu, tăng khả năng chống thấm và kháng sunfat của bê tông. Thắng và cộng sự [29] đề xuất giải pháp kết hợp gồm sơn phủ epoxy cho cốt thép và bổ sung phụ gia ức chế ăn mòn vào bê tông. Kết quả quan trắc sau 24 tháng trên công trình thực tế cho thấy khả năng ăn mòn giảm đáng kể, khẳng định khả năng sử dụng cát nhiễm mặn cho kết cấu bê tông cốt thép khi áp dụng các biện pháp bảo vệ cốt thép chủ động là phù hợp, nhưng sẽ làm tăng chi phí xây dựng.

2. Bê tông cát biển nước biển và cốt sợi Polyme gia cường

2.1. Đặc tính của cốt sợi Polyme gia cường

Một hướng tiếp cận hiệu quả và mang tính đột phá để giải quyết triệt để vấn đề ăn mòn cốt thép trong bê tông cát biển và nước biển là thay thế cốt thép bằng vật liệu polyme cốt sợi (FRP – Fiber Reinforced Polyme), nhất là FRP cốt sợi thủy tinh (GFRP) nhờ chi phí hợp lý. Các nghiên cứu cho thấy hàm lượng ion clorua cao trong nước biển hoặc cát biển hầu như không ảnh hưởng đến tính năng của vật liệu FRP [30-32].

Cốt FRP thường được phân loại theo sợi gốc tạo thành, bao gồm sợi Aramid (AFRP), sợi Bazan (BFRP), sợi Carbon (CFRP), và sợi thủy tinh (GFRP), trong đó sợi thủy tinh GFRP được sử dụng rộng rãi nhất trong kết cấu bê tông do có giá thành hợp lý và có các tính năng cơ lý phù hợp làm cốt gia cường trong kết cấu bê tông. Thanh cốt GFRP có cường độ chịu kéo cao hơn cường độ thép đen thông thường từ 2,5 đến 3 lần, tỷ trọng nhẹ bằng ¼ tỷ trọng của thép, không dẫn điện, nhiễm từ và truyền nhiệt rất thấp. Thanh cốt FRP thường được chế tạo bằng công nghệ kéo đùn với các sợi liên tục được liên kết bởi nhựa nền là polyme với các phụ gia đóng rắn và gia nhiệt trong nhiệt độ cao. So với thép, thanh FRP có ưu thế vượt trội về khả năng chống ăn mòn, tỷ số cường độ/khối lượng cao và khả năng điều chỉnh tính chất thông qua bố trí sợi và chất đóng rắn. Tuy nhiên, Cốt GFRP có hạn chế là mô đun đàn hồi thấp và cơ chế phá hoại giòn, khiến kết cấu bê tông cốt GFRP kém dẻo hơn so với bê tông cốt thép truyền thống.

2.2. Các nghiên cứu về kết cấu bê tông sử dụng cát biển, nước biển và cốt FRP

Năm 2011, Teng và cộng sự đề xuất khái niệm kết cấu bê tông cát biển cốt FRP cho hạ tầng biển, qua đó mở ra và thúc đẩy mạnh mẽ hướng nghiên cứu này trên phạm vi quốc tế [33,34]. Hội thảo quốc tế đầu tiên về Bê tông cát biển – Cốt FRP tổ chức năm 2016 đã tổng hợp các kết quả nghiên cứu hiện có, đánh giá hiện trạng và xác định các định hướng phát triển [35]. Kể từ đó, Bê tông cát biển – Cốt FRP nhanh chóng thu hút sự quan tâm rộng rãi, với nhiều đề tài được tài trợ và các kết quả nghiên cứu bước đầu được công bố [36–38]. Cập nhật các nghiên cứu gần đây chủ yếu tập trung vào đặc tính cơ học và độ bền của kết cấu bê tông nước biển và cát biển được gia cường bằng cốt FRP, đặc biệt là sợi thủy GFRP và sợi bazan BFRP. Thông qua thí nghiệm và mô phỏng số, khả năng chịu uốn, chịu cắt và ứng xử động đất của dầm, cột và sàn trong môi trường biển đã được đánh giá chi tiết, cho thấy tiềm năng ứng dụng lớn của vật liệu composite phi kim loại trong việc giảm thiểu rủi ro ăn mòn cốt thép truyền thống. Đối với cấu kiện chịu nén, Zhe Xiong và cộng sự [39] chỉ ra rằng khả năng chịu lực của cột Bê tông cát biển – Cốt FRP chủ yếu phụ thuộc vào bê tông do cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi thấp của cốt FRP. Tuy nhiên, việc giảm khoảng cách cốt đai cũng giúp tăng hiệu ứng bó và cải thiện độ dẻo của cột. Đáng chú ý, giải pháp kết hợp cốt FRP với thép không gỉ có độ dẻo cao cho thấy hiệu quả vượt trội trong việc nâng cao khả năng chống động đất và tiêu tán năng lượng so với cột chỉ sử dụng FRP. Đối với cấu kiện chịu uốn, Yuntao Hua và cộng sự [40] cho thấy dầm Bê tông cát biển nước biển – Cốt FRP có khả năng chịu lực cao hơn dầm bê tông cốt thép truyền thống, song trạng thái phá hoại thường bị chi phối bởi các giới hạn về độ võng và bề rộng vết nứt ở trạng thái giới hạn sử dụng. Về khả năng chịu cắt, Zhiquan Xing và cộng sự [41] kết luận rằng dầm cao Bê tông cát biển nước biển – Cốt FRP có xu hướng phá hoại giòn. Trong đó, hàm lượng vỏ sò trong cát biển làm giảm cường độ chịu cắt, nhưng cốt đai GFRP đóng vai trò chủ đạo trong cơ chế truyền lực cắt sau khi vết nứt tới hạn hình thành. Xét về độ bền dài hạn, các nghiên cứu cho thấy phơi nhiễm ngắn hạn trong môi trường biển có thể làm tăng nhẹ cường độ bê tông do sản phẩm thủy hóa lấp đầy lỗ rỗng. Tuy nhiên, tác động lâu dài của chu kỳ triều cường và khô–ướt làm suy

giảm khả năng chịu lực và độ cứng của cấu kiện. Dù vậy, các thí nghiệm phơi nhiễm thực tế kéo dài 60 tháng do Zongping Chen và cộng sự [42] thực hiện đã khẳng định ưu thế rõ rệt của cốt GFRP khi vẫn giữ nguyên vẹn bề mặt, trong khi cốt thép truyền thống bị ăn mòn nghiêm trọng.

2.3. Đánh giá hiệu quả kinh tế khi sử dụng cát biển, nước biển và cốt FRP

Các nghiên cứu tổng hợp về ứng dụng polyme cốt sợi thủy tinh (GFRP) trong hạ tầng bền vững đều thống nhất rằng, mặc dù chi phí đầu tư ban đầu của GFRP cao hơn kết cấu thép truyền thống (khoảng 15% đối với nhà công nghiệp và cao hơn thép carbon trong nhiều ứng dụng khác [43–45]), hiệu quả kinh tế xét trên toàn bộ vòng đời công trình lại vượt trội rõ rệt. Nhờ khả năng chống ăn mòn gần như tuyệt đối, GFRP cho phép loại bỏ phần lớn chi phí bảo trì và sửa chữa vốn rất lớn đối với thép carbon, thép phủ epoxy hay thậm chí thép không gỉ trong môi trường biển và môi trường xâm thực hóa học. Các phân tích vòng đời cho thấy việc sử dụng GFRP có thể giúp giảm tổng chi phí toàn dự án từ khoảng 26% đến gần 50% trong chu kỳ phục vụ 100 năm, với thời gian thu hồi vốn cho khoản đầu tư ban đầu dao động từ khoảng 20 năm đối với nhà dân dụng sử dụng bê tông nước biển cát biển, đến 35 năm đối với các công trình đặc thù như bể chứa nước Clo hóa [44–46]. Bên cạnh hiệu quả kinh tế, GFRP còn mang lại lợi ích môi trường đáng kể khi cho phép sử dụng bê tông trộn nước biển và cốt liệu tái chế mà không lo ngại rủi ro ăn mòn, qua đó góp phần giảm áp lực lên nguồn nước ngọt và hạn chế chất thải xây dựng. Đồng thời, các mô hình phân tích độ tin cậy theo thời gian cho thấy mặc dù một số đặc tính cơ học của GFRP có thể suy giảm nhanh trong giai đoạn đầu phơi nhiễm môi trường biển, các đặc tính này sẽ ổn định sau khoảng 3 năm và duy trì mức độ an toàn trong suốt vòng đời 100 năm [47]. Nhờ khả năng tái sử dụng và mức suy giảm hiệu năng thấp, kết cấu GFRP duy trì giá trị còn lại cao, trái ngược với sự suy giảm giá trị nghiêm trọng của kết cấu bê tông cốt thép do hư hỏng lớp bảo vệ và ăn mòn cốt thép theo thời gian.

3. Dự án trên thế giới sử dụng cát biển nước biển và cốt FRP

3.1. Cống thoát nước tại thành phố Piacenza, Ý

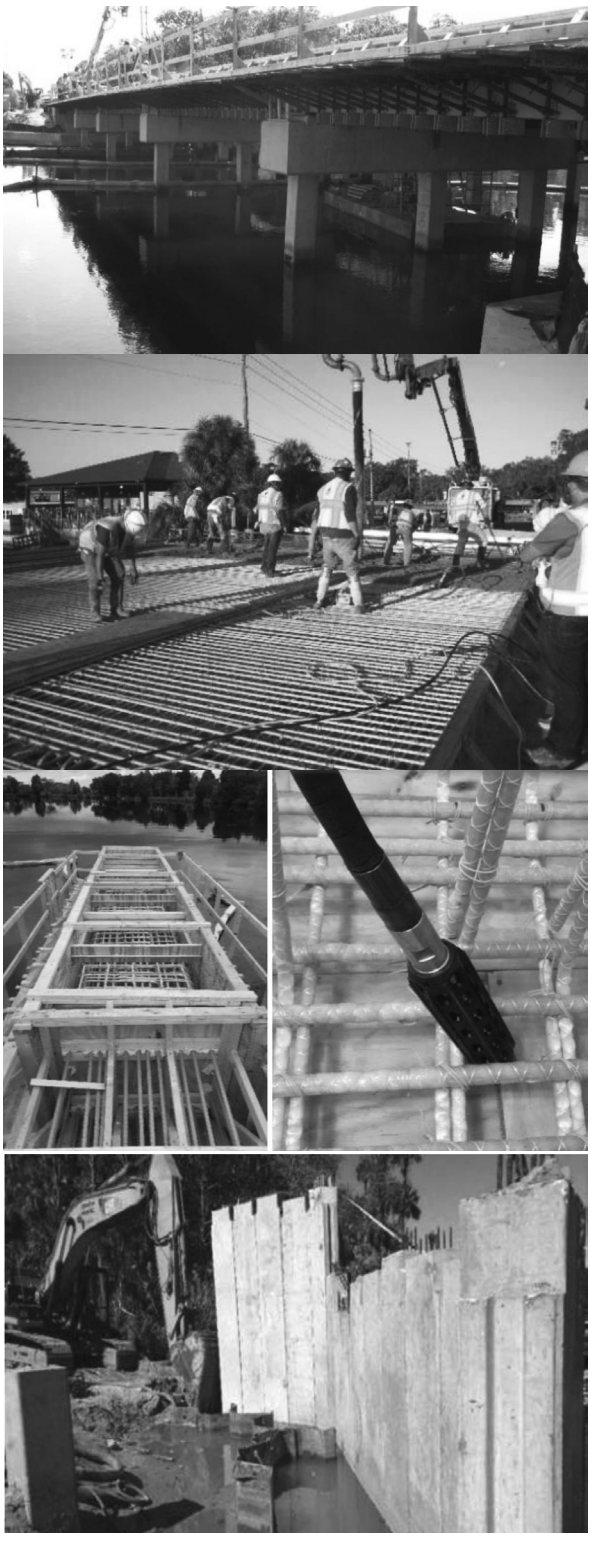
SEACON là dự án hợp tác được tài trợ bởi Liên minh Châu Âu EU và Hoa Kỳ, nhằm chứng minh tính khả thi và an toàn của việc sử dụng nước biển và cốt liệu nhiễm muối (tự nhiên hoặc tái chế) trong sản xuất bê tông bền vững, kết hợp với hệ cốt gia cường sợi Polyme không bị ăn mòn [48,49]. Dự án được triển khai bởi một liên danh gồm sáu đối tác chính và ba đơn vị cộng tác, thông qua hai công trình thí điểm quy mô thực tại Ý (cống thoát nước bê tông cốt gia cường) và bang Florida, Hoa Kỳ (cầu Halls River năm nhịp), đại diện cho các điều kiện vi khí hậu và loại hình hạ tầng khác nhau.

Dự án thí điểm xây dựng cống thoát nước tại thành phố Piacenza được triển khai nhằm đánh giá hiệu quả thực tế của bê tông trộn nước biển và bê tông sử dụng cốt liệu tái chế khi kết hợp với các hệ cốt gia cường khác nhau, bao gồm thép thường, thép không gỉ và cốt sợi thủy tinh GFRP. Công trình có chiều dài 30m, được chia thành sáu đoạn thí nghiệm đại diện cho các kịch bản vật liệu khác nhau, từ bê tông truyền thống với thép thường đến bê tông nước biển kết hợp cốt GFRP và bê tông sử dụng cốt liệu nhựa đường tái chế. Kết quả giám sát sau một năm cho thấy cốt thép thường bị ăn mòn nhanh trong môi trường bê tông nước biển, trong khi thép không gỉ và cốt GFRP hầu như không xuất hiện dấu hiệu ăn mòn. Phân tích vòng đời và chi phí chỉ ra rằng tổ hợp bê tông nước biển – cốt GFRP đạt hiệu quả môi trường và kinh tế cao nhất nhờ khối lượng nhẹ, chi phí thi công thấp và gần như không cần bảo trì. Ngược lại, phương án Bê tông nước biển – thép thường cho hiệu quả thấp nhất do tuổi thọ ngắn và nhu cầu sửa chữa sớm. Các kết quả này khẳng định việc sử dụng nước biển làm nước trộn bê tông là khả thi và bền vững khi kết hợp với hệ cốt gia cường không bị ăn mòn, đặc biệt là GFRP và thép không gỉ, góp phần giảm tiêu thụ nước ngọt và cốt liệu tự nhiên đang ngày càng khan hiếm.

3.2 Cầu Halls River tại bang Florida, Mỹ

Hình 1 minh họa công tác thi công Halls River Bridge, công trình thay thế cầu cũ xuống cấp và được thiết kế như một nguyên mẫu ứng dụng vật liệu FRP cho hạ tầng giao thông trong môi trường biển giàu clorua. Cầu gồm 5 nhịp ngắn, tổng chiều dài 57,69 m (bao gồm làn xe, lề và vỉa hè), được thiết kế không sử dụng cốt thép thường nhằm loại bỏ nguy cơ ăn mòn. Công trình áp dụng đồng bộ các giải pháp chống ăn mòn tiên tiến: 36 cọc bê tông ứng suất trước dùng cáp CFRP; hệ tường chắn biển sử dụng cọc ván bê tông ứng suất trước CFRP kết hợp cốt GFRP và mũ tường cừ bằng bê tông trộn nước biển – cốt GFRP. Tường trọng lực dùng bê tông với cốt liệu tái chế kết hợp cốt GFRP. Các cấu kiện còn lại như mặt cầu, rào chắn và bản quá độ đều sử dụng bê tông cốt GFRP. Để đánh giá độ bền lâu dài, dự án tích hợp các khối thử nghiệm chứa cốt GFRP, CFRP và BFRP trong mũ tường cừ, cho phép theo dõi ảnh hưởng của bê tông nước biển và môi trường clorua theo thời gian. Phân tích chi phí vòng đời cho thấy, dù chi phí đầu tư ban đầu cao hơn, giải pháp sử dụng toàn bộ cốt FRP

hiệu quả hơn về chi phí vòng đời và tác động môi trường thấp hơn so với cầu bê tông cốt thép truyền thống. Kết luận, cầu Halls River là minh chứng điển hình cho khả năng ứng dụng quy mô lớn bê tông bền vững (nước biển, cốt liệu tái chế) kết hợp cốt gia cường không ăn mòn trong hạ tầng giao thông ven biển.



Hình 1. Dự án thí điểm Cầu Halls River Bridge tại bang Florida, Mỹ [48, 49]

3.3. Dự án cải tạo và nâng cấp bờ biển tại Hồng Kông

Tập đoàn Dextra Group (Bangkok, Thái Lan) là một trong các tập đoàn hàng đầu trên thế giới về sản xuất và ứng dụng các sản phẩm thép kỹ thuật và vật liệu sợi composite gia cường trong kết cấu công trình. Hình 2 minh họa ứng dụng cốt sợi thủy tinh GFRP trong các công trình cải tạo bờ biển tại Hồng Kông thực hiện bởi tập đoàn Dextra Group [50]. Việc sử dụng cốt GFRP cho phép loại bỏ nguy cơ ăn mòn trong môi trường biển có hàm lượng ion clorua cao, đồng thời mở ra khả năng sử dụng bê tông cát biển và nước biển cho các cấu kiện ven biển, yêu cầu tuổi thọ dài và chi phí bảo trì thấp. Giải pháp này nhằm giảm sự phụ thuộc vào cát sông và nước ngọt, những tài nguyên ngày càng khan hiếm và gây nhiều hệ lụy môi trường khi khai thác quá mức. Điểm mấu chốt là cốt GFRP không bị ăn mòn trong môi trường giàu clorua, do đó hoàn toàn phù hợp với bê tông cát biển và nước biển, khắc phục nhược điểm ăn mòn nghiêm trọng của cốt thép truyền thống. Nhờ đó, kết cấu có thể đạt tuổi thọ cao hơn, chi phí bảo trì thấp hơn, đồng thời vẫn đảm bảo hiệu quả kinh tế trong suốt vòng đời công trình. Dự án này nhấn mạnh rằng việc kết hợp bê tông cát biển và nước biển với GFRP không chỉ khả thi về mặt kỹ thuật mà còn là một giải pháp quan trọng hướng tới xây dựng cơ sở hạ tầng bền vững và thân thiện môi trường, đặc biệt phù hợp cho các khu vực ven biển và hải đảo.

Hình 2. Dự án cải tạo bờ biển tại Hồng Kông [50]

5. Kết luận và Khuyến nghị

Bài báo này đã thực hiện tổng quan và phân tích có hệ thống các nghiên cứu trong nước và quốc tế về việc sử dụng cát biển và nước biển thay thế cát

sông và nước ngọt trong bê tông, đồng thời đánh giá tính khả thi của việc ứng dụng vật liệu polyme cốt sợi FRP trong bê tông cát biển – nước biển. Trên cơ sở đó, các kết luận chính và nhu cầu nghiên cứu cấp thiết được rút ra như sau:

- Tổng hợp kết quả từ đa số các nghiên cứu cho thấy cát biển và nước biển có xu hướng thúc đẩy sự phát triển cường độ bê tông ở tuổi sớm, chủ yếu do sự hiện diện của ion clorua. Bê tông sử dụng cát biển, nước biển thường đạt cường độ nén 7 ngày cao hơn rõ rệt so với bê tông đối chứng, trong khi cường độ 28 ngày là tương đương và cường độ dài hạn nhìn chung không có khác biệt đáng kể. Về mặt khoa học và kỹ thuật, việc sử dụng cát biển và nước biển trong bê tông là khả thi. Tuy nhiên, do cát biển và nước biển có sự biến thiên lớn về thành phần vật liệu và đặc tính hóa học theo từng vùng biển, việc ứng dụng thực tế đòi hỏi các nghiên cứu chuyên sâu mang tính đặc thù khu vực nhằm đảm bảo độ tin cậy và độ bền lâu dài của kết cấu.

- Cốt sợi FRP được đề xuất như một giải pháp thay thế cốt thép truyền thống trong bê tông cát biển và nước biển nhằm nâng cao độ bền lâu, nhờ khả năng kháng ăn mòn vượt trội trong môi trường giàu ion clorua. Các kết cấu bê tông cát biển nước biển – Cốt FRP vì vậy đặc biệt phù hợp cho hạ tầng ven biển, hải đảo và công trình ngoài khơi – những khu vực thiếu hụt cát sông và nước ngọt nhưng có nguồn cát biển và nước biển dồi dào. Tuy nhiên, trong điều kiện môi trường khắc nghiệt, đặc biệt dưới tác động kết hợp của nhiệt độ và độ ẩm, tính năng của FRP vẫn có thể suy giảm theo thời gian. Hiện nay, các nghiên cứu về độ bền lâu của FRP trong môi trường cát biển nước biển cũng như về cơ chế và đặc tính liên kết giữa FRP và bê tông cát biển nước biển còn nhiều hạn chế, cho thấy nhu cầu nghiên cứu chuyên sâu hơn trong lĩnh vực này.

- Do mô đun đàn hồi thấp của cốt FRP, độ võng và bề rộng vết nứt thường là các trạng thái giới hạn chi phối trong thiết kế kết cấu bê tông cát biển nước biển – Cốt FRP, vì vậy đòi hỏi kiểm soát nghiêm ngặt các yêu cầu về khả năng sử dụng. Mặc dù trong các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành, trong đó bộ tiêu chuẩn của Viện Bê tông Hoa Kỳ (ACI – American Concrete Institute) được áp dụng phổ biến nhất [51], các giới hạn về biến dạng và độ mở vết nứt đã được nới lỏng đáng kể so với kết cấu bê tông cốt thép truyền thống. Một trong những giải pháp giảm thiểu biến dạng và độ mở vết nứt là giải pháp tạo ứng lực trước trong kết cấu, đây là một trong những yêu cầu nghiên cứu cấp bách hiện nay. Bên cạnh đó, sự suy giảm độ bền liên kết giữa FRP và bê tông cát biển nước biển trong quá trình làm việc cần được xem xét đầy đủ để dự báo chính xác ứng xử biến dạng và nứt của kết cấu. Trên cơ sở đó, cần triển khai các nghiên cứu quy mô lớn, có hệ thống, kết hợp thực nghiệm và mô phỏng, nhằm phát triển các hệ kết cấu bê tông cát biển nước biển – Cốt FRP có tính năng vượt trội cả trong ngắn hạn và dài hạn, đồng thời xây dựng các cơ sở khoa học, tiêu chuẩn cho phân tích và thiết kế, hướng tới các giải pháp kết cấu an toàn, kinh tế và bền vững cho các kết cấu công trình ven biển và hải đảo.❑

Tài liệu tham khảo

[1] Aggregates for Concrete (BS EN 12620), UK. 2013.

[2] Japanese Architectural Standard Specification for Reinforced Concrete Work (JASS 5), Architectural Institute of Japan, 2015.

[3] JGJ206-2010, Technical Code for Application of Sea Sand Concrete, China, Architecture & Building Press, 2010.

[4] W. Gutt, R.J. Collins; Sea-dredged aggregates in concrete; Building Research Establishment Information Paper, UK (7) (1987).

[5] S. Hasdemir, A. Tugrul, M. Yilmaz; The effect of natural sand composition on concrete strength; Construction and Building Materials, 112 (2016) 940–948.

[6] T. Dhondy, A. Remennikov, S.M. Neaz; Properties and application of Sea Sand in sea sand–Seawater concrete; Journal of Materials in Civil Engineering, 32 (12) (2020) 04020392.

[7] A. Katz, H. Baum; Effect of high levels of fines content on concrete properties; ACI Material Journal, 103 (6) (2006) 474–482.

[8] M. Safiuddin, S.N. Raman, M.F.N. Zain; Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures; Journal of Applied Sciences Research, 3 (3) (2007) 202–208.

[9] K. Newman; Sea-dredged aggregates for concrete; Cement, Lime and Gravel, 1969.

[10] K.J. Kucche, S.S. Jamkar, P.A. Sadgir; Quality of water for making concrete: a review of literature; International Journal of Scientific and Research Publications, 5 (1) (2015) 1–10.

[11] D.F. Griffin, R.L. Henry; The effect of salt in concrete on compressive strength, water vapour transmission and corrosion of reinforcing steel; ASTM (1963) 1046–1078

[12] Nu Thi Nguyen, và Cộng sự; Potential using of marine sand in coastal areas of Vietnam to create concrete for rural roads; Journal of Mining and Earth Sciences, Vol. 65, Issue 6 (2024) 82 – 89.

[13] Trần Văn Châu, Trương Hoài Chính; Nghiên cứu sản xuất bê tông từ cát biển, nước biển khu vực Nha Trang – Khánh Hào; Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, Số 3(124).2018; ISSN 1859-1531.

[14] Nguyễn Thanh Sang, Thái Minh Quân, Lê Thu Trang; Nghiên cứu thực nghiệm bê tông hạt nhỏ sử dụng cát nhiễm mặn làm mặt đường ô tô ở Việt Nam; Khoa Học Công Nghệ, Số 08/2021.

[15] S.D. Ramaswamy, M.A. Aziz, C.K. Murthy; Sea dredged sand for concrete, extending aggregate resources; ASTM Int. 774 (1982) 167–177.

[16] S.R. de Chandrakeerthy; Suitability of sea sand as a fine aggregate for concrete production; Transactions of the Institution of Engineers, Sri Lanka; (1994) 93–114.

[17] C.G. Girish, D. Tensing, K.L. Priya; Dredged offshore sand as a replacement for fine aggregate in concrete; Int. J. Eng. Sci. Emerg. Technol. 8 (3) (2015) 88–95.

[18] J. Limeir, L. Agulló, M. Etxeberria, Dredged marine sand as construction material, Euro. J. Environ. Civ. Eng. 16 (8) (2012) 1–13

[19] D.F. Griffin, R.L. Henry, The effect of salt in concrete on compressive strength, water vapour transmission and corrosion of reinforcing steel, ASTM (1963) 1046–1078.
[20] S.K. Kaushik, S. Islam, Suitability of sea water for mixing structural concrete exposed to a marine environment, Cem. Concr. Comp. 17 (3) (1995) 177–185
[21] N. Otsuki, T. Saito, Y. Tadokoro, Possibility of seawater as mixing water in concrete, J. Civ. Eng, Arch. 6 (10) (2012) 1273–1279
[22] M. Cui, J. Z. Mao, D. G. Jia, B. Li, Experimental Study on Mechanical Properties of Marine Sand and Seawater Concrete, in: Proceedings of the International Conference on Mechanics and Civil Engineering, Zhuhai China, 2014.
[23] TS. Nguyễn Phan Duy, Ths. Lê Văn Đồng; Nghiên cứu thực nghiệm một số tính chất của bê tông sử dụng cát biển; Tạp chí KHCN Xây dựng – Số 1/2021.
[24] T.U. Mohammed, H. Hamada, T. Yamaji; Performance of seawater-mixed concrete in the tidal environment; Cement and Concrete Research; 34 (4) (2004) 593–601.
[25] W.P.S. Dias, G.A.P.S.N. Seneviratne, S.M.A. Nanayakkara; Offshore sand for reinforced concrete; Construction and Building Materials, 22 (7) (2008) 1377–1384.
[26] J.A. Gonzalez, E. Ramrez, A. Bautista; Protection of steel embedded in chloride-containing concrete by means of inhibitors; Cement and Concrete Research. 28 (4) (1998) 577–589.
[27] K. Soeda, T. Ichimura; Present state of corrosion inhibitors in Japan; Cement & Concrete Composites; 25 (1) (2003) 117–122.
[28] Phạm Hữu Thiên, Lê Việt Hùng, Phan Văn Quỳnh, Nguyễn Văn Hoan; 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 3 (06 – 2022)
[29] Nguyễn Nam Thắng, Phan Văn Chương; Nguyễn Tiến Bình, Phạm Trung Thành; Nghiên cứu ứng dụng thí điểm cát nhiễm mặn làm cốt liệu cho kết cấu bê tông cốt thép; Tạp chí KHCN Xây dựng, số 4/2024.
[30] F. Ceroni, E. Cosenza, M. Gaetano, M. Pecce; Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members; Cement & Concrete Composites, 28 (10) (2006) 857–868.
[31] M. Robert, B. Benmokrane; Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars; Construction and Building Materials, 38 (1) (2013) 274–284.
[32] P. Feng, J. Wang, Y. Wang, D. Loughery, D.T. Niu; Effects of corrosive environments on properties of pultruded GFRP plates; Composites Part B: Engineering, 67 (2014) 427–433.
[33] J.G. Teng, T. Yu, J.G. Dai, G.M. Chen, FRP composites in new construction: current status and opportunities, in: Proceedings of the 7th National Conference on FRP Composition. in Infrastructure (Supplementary Issue of Industrial Construction) (Abstract) Hangzhou, China, 2011.
[34] J.G. Teng; Performance enhancement of structures through the use of fibrereinforced polymer (FRP) composites, in: Proceedings of the 23rd Australian Conference on Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), Lismore, Australia (Abstract), 2014
[35] J.G. Teng, J.G. Dai and G.M. Chen; Proceedings of International Workshop on Seawater Sea-sand Concrete (SSC) Structures Reinforced with FRP Composites Hong Kong, China, 13 December 2016
[36] Z. Dong, G. Wu, Y. Xu, Experimental study on the bond durability between steel-FRP composite bars (SFCBs) and sea sand concrete in ocean environment, Construction and Building Materials, 115 (2016) 277–284.
[37] Y.L. Li, X.L. Zhao, R.K.R. Singh, S. Al-Saadi; Experimental study on seawater and sea sand concrete filled GFRP and stainless steel tubular stub columns; Thin-Walled Structures, 106 (2016) 390–406.
[38] Y.L. Li, X.L. Zhao, R.K.R. Singh, S. Al-Saadi; Tests on seawater and sea sand concrete-filled CFRP BFRP and stainless steel tubular stub columns; Thin-Walled Structures. 108 (2016) 163–184
[39] Zhe Xiong, Lianghao Lin, Sihua Qiao, Lijuan Li, Yinglei Li, Shaohua He, Zewei Li, Feng Liu, Yulong Chen; Axial performance of seawater sea-sand concrete columns reinforced with basalt fibre-reinforced polymer bars under concentric compressive load; Journal of Building Engineering 47 (2022) 103828.
[40] Yuntao Hua, Shiping Yin, Linli Feng; Bearing behavior and serviceability evaluation of seawater sea-sand concrete beams reinforced with BFRP bars; Construction and Building Materials, 243 (2020) 118294.
[41] Zhiquan Xing, Yao Zhu, Yongbo Shao, Enlin Ma, Kwok-Fai Chung, Yu Chen; Experimental and numerical research on shear performance of GFRP bar reinforced seawater sea-sand concrete deep beams without stirrups; Case Studies in Construction Materials, 20 (2024).
[42] Zongping Chen, Shengxin Li, Ji Zhou, Ruitian Xu, Shangqin Dai; Flexural behavior of GFRP bars reinforced seawater sea sand concrete beams exposed to marine environment: Experimental and numerical study; Construction and Building Materials, 349 (2022) 128784
[43] Francesco Ascione , Gabriella Maselli , Antonio Nesticò; Sustainable materials selection in industrial construction: A life-cycle based approach to compare the economic and structural performances of glass fibre reinforced polymer (GFRP) and steel; Journal of Cleaner Production 475 (2024) 143641
[44] Adel Younis, Usama Ebead, Prannoy Suraneni, Antonio Nanni; Cost effectiveness of reinforcement alternatives for a concrete water chlorination tank; Journal of Building Engineering 27 (2020) 100992.
[45] Adel Younis, Usama Ebead, Simon Judd; Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement; Construction and Building Materials 175 (2018) 152–160.
[46] Francesco Ascione , Gabriella Maselli , Antonio Nesticò; Sustainable materials selection in industrial construction: A life-cycle based approach to compare the economic and structural performances of glass fibre reinforced polymer (GFRP) and steel; Journal of Cleaner Production 475 (2024) 143641.
[47] Hongyuan Guo, Jafar Jafari-Asl, Jian-Guo Dai, You Dong, Jing Fang, Hongzhi Cui; Life-cycle performance evaluation framework for GFRP-reinforced concrete structures subject to marine environment; Engineering Structures 348 (2026) 121762.
[48] F. Bertola, F. Canonico, M. Bianchi, A. Nanni; The SEACON project, Intenational Cement. Review; (2016) 63–66.
[49] F. Khatibmasjedi, F. D. Caso, A. Nanni; SEACON: Redefining sustainable concrete, in: Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4), LV. USA.7 to 11 Aug. 2016.
[50] Https://www.dextragroup.com/gfrp-rebar-in-sea-sand-and-seawater-concrete/; Innovating Sustainable Construction: GFRP Rebar in Sea Sand and Seawater Concrete.
[51] ACI 440.1R-15; Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars; American Concrete Institute (2015)