

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THẠCH CAO NHÂN TẠO VÀ SILICA FUME ĐẾN TÍNH CHẤT CƠ HỌC VÀ ĐỘ BỀN LÂU CỦA BÊ TÔNG SỬ DỤNG CÁT BIỂN TRONG MÔI TRƯỜNG BIỂN ĐẢO

INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF ARTIFICIAL GYPSUM AND SILICA FUME ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF SEA SAND CONCRETE UNDER MARINE AND ISLAND EXPOSURE CONDITIONS

TẶNG VĂN LÂM^{a,*}, MAI PHƯƠNG HẠNH^a, NGUYỄN THẾ GIANG^b, NGUYỄN SÁNG^b, BÙI THỊ THUY DUNG^b

^aTrường Đại học Mở - Địa chất

^bCông ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng

*Tác giả đại diện: Email: tangvanlam@humg.edu.vn

Ngày nhận 02/3/2026, Ngày sửa 18/3/2026, Chấp nhận 20/3/2026

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2026.vi.vol1-8>

Tóm tắt: Trước thực trạng khan hiếm cát sông và yêu cầu nâng cao độ bền lâu của bê tông trong môi trường biển đảo, nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của thạch cao nhân tạo (50÷60%) và silica fume (0÷10%) đến tính chất cơ học và khả năng kháng xâm thực của bê tông sử dụng cát biển. Các cấp phối được thiết kế với N/CKD = 0,3 và 1% phụ gia siêu dẻo. Kết quả cho thấy bổ sung 10% silica fume làm tăng cường độ nén 28 ngày từ 8–17%. Cấp phối sử dụng 50% thạch cao nhân tạo kết hợp 10% silica fume đạt cường độ nén ≥ 40 MPa và cường độ kéo khi uốn 5,5 MPa (tăng khoảng 25% so với mẫu đối chứng). Thí nghiệm ăn mòn nhanh trong dung dịch NaCl 3% cho thấy cấp phối này có thời gian phá hoại dài nhất (27 ngày), chứng tỏ khả năng hạn chế khuếch tán ion Cl^- và bảo vệ cốt thép tốt hơn. Trong phạm vi nghiên cứu, cấp phối 50% thạch cao nhân tạo và 10% silica fume được đánh giá là tối ưu cho bê tông sử dụng cát biển trong điều kiện môi trường biển đảo.

Từ khoá: Thạch cao nhân tạo, Silica fume, Tính chất cơ học, Ăn mòn nhanh, Thời gian phá hoại mẫu.

Abstract: This study evaluates the effects of artificial gypsum (50÷60%) and silica fume (0÷10%) on the mechanical properties and corrosion resistance of sea sand concrete. The mixtures were designed with a water-to-binder ratio (w/b) of 0,3 and 1% superplasticizer. The results indicate that incorporating 10% silica fume increased the 28-day compressive strength by 8–17%. The mixture containing 50% artificial gypsum combined with 10% silica fume achieved a compressive strength of ≥ 40 MPa and a flexural strength of 5,5 MPa (approximately 25% higher than the control mixture). Rapid corrosion testing in 3% NaCl solution showed that this mixture exhibited the longest failure time (27 days), demonstrating enhanced resistance to chloride ion penetration and improved reinforcement

protection. Within the scope of this study, the mixture with 50% artificial gypsum and 10% silica fume was identified as the optimal composition for sea sand concrete under marine and island exposure conditions.

Keywords: Artificial gypsum, Silica fume, Mechanical properties, Accelerated corrosion, Failure time.

1. Mở đầu

Sự phát triển mạnh mẽ của hạ tầng ven biển và hải đảo trong những năm gần đây đặt ra hai thách thức lớn đối với ngành Xây dựng: thiếu hụt nguồn cốt liệu mịn truyền thống và yêu cầu nâng cao độ bền lâu của bê tông trong môi trường xâm thực mạnh. Trong khi cát sông ngày càng khan hiếm do khai thác quá mức thì các công trình bê tông và bê tông cốt thép tại khu vực biển đảo lại phải làm việc trong điều kiện chứa hàm lượng ion xâm thực cao, đặc biệt là ion Cl^- . Việt Nam là quốc gia có đường bờ biển dài nên công tác phát triển cơ sở hạ tầng phục vụ cho kinh tế biển cũng như các mục tiêu quốc phòng là rất cấp thiết. Tuy nhiên việc xây dựng và sử dụng các công trình ven biển hiện gặp nhiều khó khăn do công trình bằng bê tông (BT), bê tông cốt thép (BTCT) bị xâm thực nghiêm trọng trong môi trường biển gây phá hoại kết cấu dẫn đến tuổi thọ bị giảm đáng kể.

Qua nghiên cứu, đánh giá chất lượng BT và BTCT một số công trình ven biển có thể chỉ ra một số tác nhân chính dẫn đến sự xâm thực cho bê tông bao gồm: sự chênh lệch cột nước gây thấm cho bê tông, nước thấm qua bê tông sẽ hòa tan vôi trong thành phần của đá xi măng và cuốn theo dòng thấm ra ngoài dưới dạng $Ca(OH)_2$; bê tông tiếp xúc với dòng chảy có lưu tốc lớn gây mài mòn cơ học; môi trường làm việc của BT và BTCT có chứa các tác nhân gây xâm thực như các ion Cl^- , ion SO_4^{2-} ... hoặc các loại vi sinh vật gây hại cho bê tông [6]. Ngoài ra xét trên góc độ bản

thân kết cấu công trình xây dựng bằng BT và BTCT, có thể kể ra một số nguyên nhân khác làm đẩy nhanh quá trình xâm thực như: khả năng chống thấm của BT không đảm bảo; chất lượng thi công bê tông không tốt; trong thiết kế thành phần BT chưa quan tâm đến các giải pháp làm tăng khả năng chịu lực, chịu mài mòn và chống xâm thực đối với các hạng mục kết cấu cho phù hợp; không có các biện pháp bảo vệ bề mặt bê tông khu vực dễ bị xâm thực [7]...



Hình 1. Ăn mòn kết cấu bê tông trong môi trường biển ở khu vực biển Hải Phòng



Hình 2. Ăn mòn kết cấu bê tông cốt thép tại các cảng biển ở Việt Nam



Hình 3. Lượng cát sông thiếu hụt hụt khiến giá cát tăng cao

Trong nghiên cứu này, thạch cao nhân tạo được xem xét như một vật liệu thay thế một phần xi măng nhằm tận dụng phế thải công nghiệp và giảm phát

Theo hướng tiếp cận nâng cao chất lượng vật liệu nhằm kéo dài tuổi thọ công trình, một số nghiên cứu tại Việt Nam đã đề xuất các biện pháp tăng độ bền và tuổi thọ của công trình ven biển dựa trên việc sử dụng bê tông chất lượng cao với hệ số khuếch tán thấp, dùng phụ gia siêu dẻo để giảm tỷ lệ nước/xi măng, tăng độ đặc chắc; sử dụng chất ức chế ăn mòn canxi nitrít để tăng khả năng chống ăn mòn và tăng tuổi thọ của cấu kiện bê tông cốt thép [8, 9, 11]. Ngoài ra một số nghiên cứu khác cũng đề xuất sử dụng vật liệu bê tông có cốt sợi phân tán và sử dụng phụ gia khoáng như muối silic và tro bay để gia tăng độ bền, giảm tính thấm và giảm thiểu sự khuếch tán của các loại ion xâm thực [10]. Tuy nhiên, ngay cả các loại bê tông từ xi măng bền sulphate, bê tông cường độ cao khi thử nghiệm cũng bị ăn mòn và nứt vỡ [12]. Điều này cho thấy việc chỉ cải thiện cường độ chưa đủ để đảm bảo độ bền lâu trong môi trường biển đảo, đặc biệt khi nguồn cốt liệu sử dụng có thể chứa sẵn ion Clo.

Trước bối cảnh cát sông ngày càng suy giảm, việc sử dụng cát biển nhiễm mặn như một nguồn thay thế là xu hướng tất yếu, đặc biệt tại các khu vực ven biển và hải đảo - nơi vật liệu này sẵn có. Tuy nhiên, hàm lượng ion Cl^- trong cát biển có thể làm gia tăng nguy cơ ăn mòn cốt thép nếu không có giải pháp vật liệu phù hợp. Do đó, bài toán đặt ra không chỉ là thay thế cát sông bằng cát biển, mà còn phải đồng thời nâng cao độ đặc chắc và khả năng kháng xâm thực của bê tông.

thải CO_2 , trong khi silica fume được sử dụng để cải thiện cấu trúc vi mô và giảm tính thấm của bê tông. Sự kết hợp hai loại phụ gia này trong bê tông sử dụng

cát biển nhiễm mặn dưới điều kiện môi trường biển đảo là vấn đề chưa được nghiên cứu đầy đủ. Bài báo tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của thạch cao nhân tạo và silica fume đến tính chất cơ học và độ bền lâu của bê tông sử dụng cát biển nhiễm mặn. Đối tượng nghiên cứu là bê tông có cát biển làm cốt liệu mịn, trong đó xi măng được thay thế một phần bằng thạch cao nhân tạo và silica fume với các tỷ lệ khác nhau, nhằm đánh giá khả năng ứng dụng trong xây dựng công trình hạ tầng ven biển và hải đảo.

2. Vật liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

2.1 Vật liệu sử dụng

Vật liệu đã sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm các thành phần chính như sau: Thạch cao nhân tạo của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng; Silica fume SF-90 của Công ty Vina pacific;

Xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 Vicem Hoàng Thạch; Phụ gia siêu dẻo giảm nước tầm cao SR 5000F «SilkRoad»; Cát biển Hải Phòng và Đá dăm kích thước 5,0÷20 mm từ mỏ đá vôi Kiện Khê (Hà Nam).

* Thạch cao nhân tạo của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng

Thạch cao nhân tạo (TCNT) của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng sử dụng trong nghiên cứu được lấy từ bãi lưu chứa của Nhà máy sản xuất DAP – Đình Vũ và đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 10302:2014 “Phụ gia khoáng cho bê tông đầm lăn” [14] (Hình 4). Các tính chất vật lý cơ bản của thạch cao nhân tạo của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Tính chất vật lý của thạch cao nhân tạo của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng

STT	Chỉ tiêu kỹ thuật thí nghiệm	Kết quả thí nghiệm
1	Lượng hạt lọt qua sàng 0,075mm (%)	87,5
2	Khối lượng riêng (g/cm ³)	2,35
3	Khối lượng thể tích tự nhiên (ở trạng thái khô) (kg/m ³)	1650
4	Độ pH trung bình	6,8
5	Hàm lượng CaSO ₄ .2H ₂ O (%)	66,4
6	Độ ẩm trung bình (%)	17,2%



Hình 4. Thạch cao nhân tạo của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng



Hình 5. Phụ gia siêu mịn Silica fume SF-90 của Công ty Vina Pacific

* Phụ gia siêu mịn Silica fume SF-90 (SF-90) của Công ty Vina Pacific chứa khoảng 70% kích thước hạt nano, có chứa 91,4% oxit SiO₂ hoạt tính, tỷ diện bề mặt riêng là 14500 cm²/g và khối lượng riêng là 2,15 g/cm³. Silica fume SF-90 sử dụng trong nghiên cứu thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật trong TCVN 8827:2011 (Hình 5).

* Xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 Vicem Hoàng Thạch

Xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 của Vicem Hoàng Thạch (XM) sản xuất đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 6260:2020 “Xi măng Poóc lăng hỗn hợp”. Các tính chất cơ, lý và hóa của loại xi măng này được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Tính chất cơ lý của xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 Vicem Hoàng Thạch

Khối lượng riêng (g/cm ³)	Lượng sót trên sàng N0,09	Tỷ diện bề mặt (cm ² /g)	Thời gian đông kết (phút)		Cường độ nén (MPa) tại tuổi		Độ dẻo tiêu chuẩn (%)	Độ ổn định thể tích theo phương pháp Le Chatelier (mm)
			Bắt đầu đông kết	Kết thúc đông kết	3 ngày	28 ngày		
3,15	5,5	3640	120	360	27,4	45,8	29,5	3,7

VẬT LIỆU XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG

Thành phần hóa học của thạch cao nhân tạo của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng, silica fume SF-90 và xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 Vicem Hoàng Thạch được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Thạch cao nhân tạo của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng, silica fume SF-90 và xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 Vicem Hoàng Thạch

Vật liệu sử dụng	Thành phần hóa học (% theo khối lượng)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	Lượng mất khi nung
Thạch cao nhân tạo	11,48	4,72	3,35	43,5	0,56	0,35	0,47	31,5	0,32	3,75
Silica fume SF-90	91,4	2,4	2,5	-	-	0,5	-	0,7	0	2,5
Xi măng PCB 40 Hoàng Thạch	36,3	4,4	5,4	3,4	1,2	0,3	2,5	60,2	-	2,2

*** Phụ gia siêu dẻo giảm nước**

Phụ gia siêu dẻo giảm nước được sử dụng là SR 5000F của “Silkroad” (Hàn Quốc) có gốc Polycarboxylate Ether với khả năng giảm nước trong khoảng 20÷30%. Phụ gia siêu dẻo SR 5000F thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của TCVN 8826:2011.

Các thông số kỹ thuật của phụ gia siêu dẻo SR 5000F:

+ Trạng thái và màu sắc là chất lỏng có màu vàng đậm;

+ Tỷ trọng = 1,12 g/cm³ ở nhiệt độ 25±5°C;

+ pH = 06 ở nhiệt độ 25±5°C.

*** Cốt liệu nhỏ**

Cốt liệu nhỏ sử dụng là cát biển nhiễm mặn ở khu vực gần bờ của cảng Lạch Huyện (Hải Phòng). Cát biển (CB) đã được sàng qua sàng kích thước 5,0 mm để loại bỏ thành phần hạt thô. Cát biển khu vực bờ biển Lạch Huyện có chất lượng tốt và thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật của các tiêu chuẩn TCVN 7570 : 2006 [15] (Hình 6). Các tính chất vật lý của biển được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Tính chất vật lý của cát biển Hải Phòng

STT	Tên chỉ tiêu xác định	Đơn vị tính	Kết quả thí nghiệm	Theo yêu cầu TCVN 7570:2006
1	Nguồn gốc	-	Cát biển Hải Phòng	-
2	Kích thước hạt	mm	0,14 ÷ 5,0	-
3	Khối lượng riêng	kg/m ³	2650	-
4	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1450	-
5	Độ hồng giữa các hạt cốt liệu	%	45,28	-
6	Độ hút nước	%	1,25	-
7	Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	1,87	< 2,0
8	Hàm lượng tạp chất hữu cơ	So màu	Không sẫm hơn màu chuẩn	-
9	Hàm lượng vỏ sò	%	4,5	< 8,0
10	Hàm lượng ion Cl ⁻	%	0,25	< 0,15
11	Hàm lượng SO ₃	%	0,02	< 1,0

Bảng 5. Thành phần hạt của cát vàng sông Lô sử dụng cho nghiên cứu

STT	Đường kính mắt sàng	Lượng sót sàng tích lũy theo thí nghiệm (%)	Lượng sót sàng tích lũy theo TCVN 7570:2006 (%)
1	5,0 mm	0	0
2	2,5 mm	2,9	0÷20
3	1,25 mm	16,7	15÷45
4	630 μm	38,5	35÷70
5	315 μm	70,5	65÷90
6	140 μm	92,9	90÷100
7	< 140 μm	7,1	< 10
8	Mô đun độ lớn M _{đl}	2,215	2,0÷3,3

Từ kết quả thí nghiệm trên Bảng 4 và Bảng 5 cho thấy, mẫu cát biển khu vực gần bờ cảng Lạch Huyện (Hải Phòng) có các tính chất vật lý như thành phần hạt, mô đun độ lớn, khối lượng riêng, khối lượng thể

tích đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật trong tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 “Cốt liệu cho bê tông và vữa” và được xếp vào loại cát mịn. Tuy nhiên, vì là cát biển nhiễm mặn nên hàm lượng ion Clo trong cát 0,25%,

VẬT LIỆU XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG

lớn hơn giá trị 0,15% được giới hạn trong tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 [15].

* Cốt liệu thô

Cốt liệu lớn sử dụng trong chế tạo bê tông cho công trình biển là loại đá dăm có kích thước hạt

5,0÷20 mm (Hình 7). Đá dăm (ĐD) sử dụng có nguồn gốc từ mỏ đá vôi Kiện Khê-Hà Nam và thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 “Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật” [15].



Hình 6. Cát biển khu vực Hải Phòng



Hình 7. Đá dăm từ mỏ đá Kiện Khê (Hà Nam)

Tính chất cơ lý và thành phần hạt của đá dăm sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện trong Bảng 6.

Bảng 6. Tính chất cơ lý của đá dăm Kiện Khê (Hà Nam)

STT	Chỉ tiêu kỹ thuật thí nghiệm	Đơn vị tính	Kết quả thí nghiệm	Theo TCVN 7570:2006
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,65	-
2	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1520	-
3	Độ hồng giữa các hạt cốt liệu	%	42,6	-
4	Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	13,5	< 15
5	Hàm lượng bùn, bụi, sét	%	0,60	≤ 3,0 tùy thuộc mục đích sử dụng
6	Lượng sót sàng tích lũy trên các sàng có kích thước lỗ sàng:			
	40 mm	%	0	0
	20 mm	%	6,5	0÷10
	10 mm	%	57,7	40÷70
	5 mm	%	92,8	90÷100

* Nước sạch

Nước sử dụng trộn mẫu trong nghiên cứu này là nước máy sinh hoạt thành phố Hà Nội. Tính chất của nước (N) phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 - “Nước trộn cho bê tông và vữa -Yêu cầu kỹ thuật”.

* Cốt thép

Trong nghiên cứu này, cốt thép $\Phi 10$ được sử dụng với vai trò là điện cực dương và đặt vào chính giữa mẫu bê tông. Thép thanh mác CB300-V đường kính $\Phi 10$ của Công ty Thép Hòa Phát có các chỉ tiêu cơ lý được trình bày trong Bảng 7.

Bảng 7. Tính chất cơ lý của thép thanh mác CB300-V đường kính $\Phi 10$

STT	Chỉ tiêu cơ lý	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm	Phương pháp thử
1	Giới hạn chảy	MPa	375,4	TCVN 1651-2:2018
2	Giới hạn bền	MPa	524,6	
3	Độ giãn dài tương đối	%	28,5	

2. Phương pháp nghiên cứu

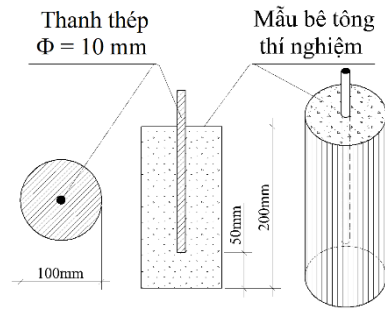
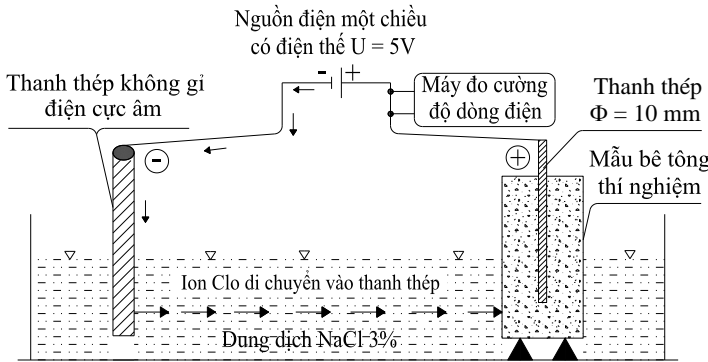
- Tính toán thành phần của bê tông trong nghiên cứu này được thực hiện theo Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại theo Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD ngày 05/9/1998 của Bộ Xây dựng

[5] và kết hợp điều chỉnh bằng thực nghiệm trên cơ sở chủng loại vật liệu thực tế sử dụng;

- Tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định bằng độ xòe của côn tiêu chuẩn với kích thước 100x200x300 mm theo TCVN 3106:2022 [17];

- Cường độ nén của bê tông được xác định trên mẫu hình trụ có đường kính $D=150\text{mm}$ và chiều cao $H=300\text{mm}$ theo tiêu chuẩn TCVN 3105:2022 [18];
- Cường độ kéo khi uốn của mẫu bê tông được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 3119:2022 trên mẫu dầm lẳng trụ kích thước chuẩn $150 \times 150 \times 600\text{mm}$ [21];
- Khả năng bảo vệ cốt thép trong các mẫu bê tông cường độ cao được thực hiện theo tiêu chuẩn NT Build 356 [19].

Phương pháp thí nghiệm này được gọi là phương pháp với ưu điểm là có thể đánh giá nhanh được mức độ bảo vệ cốt thép không bị ăn mòn của bê tông trong môi trường nước biển nhân tạo với nồng độ NaCl 3%. Mẫu thí nghiệm trong thí nghiệm này có dạng hình trụ với đường kính $D=100\text{mm}$, chiều cao $L=200\text{mm}$ và ở tâm được đặt một thanh thép đường kính $\Phi 10$, cách đáy mẫu 50mm . Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện cụ thể như trong Hình 8.



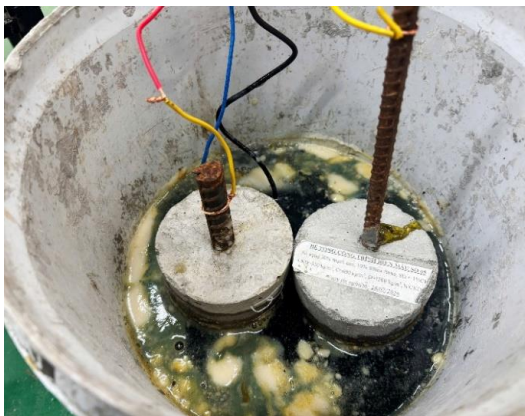
(b) Sơ đồ và kích thước mẫu bê tông thí nghiệm

(a) Sơ đồ thiết bị và mô hình thí nghiệm ăn mòn nhanh

Hình 8. Thí nghiệm xác định thời gian bảo vệ cốt thép của bê tông theo tiêu chuẩn NT Build 356

Mẫu bê tông hình trụ được chế tạo và bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn và được đưa đi thí nghiệm ở tuổi 28 ngày. Mẫu thí nghiệm được ngâm trong dung dịch điện li NaCl 3% sao cho luôn giữ mực nước cách đỉnh mẫu là 3cm. Cốt thép đặt giữa trung tâm mẫu bê tông được nối với cực dương của nguồn điện một chiều có điện thế không đổi 5V, cực âm nối với một điện cực khác bằng thép không gỉ

cùng nhúng trong dung dịch NaCl 3%. Dưới tác động của dòng điện một chiều không đổi, tốc độ khuếch tán ion Cl^- trong dung dịch điện li tăng nhanh, di chuyển qua các lỗ rỗng của lớp bê tông bảo vệ để tiếp xúc với thanh thép $\Phi 10$ trong mẫu bê tông và quá trình ăn mòn cốt thép được tăng tốc mạnh, tạo gỉ gây nứt vỡ mẫu bê tông thí nghiệm (Hình 9).



Hình 9. Bề mặt các mẫu thí nghiệm bị phá hoại theo phương pháp ăn mòn nhanh

- Các kết quả thực nghiệm được đo trực tiếp trong điều kiện phòng thí nghiệm và xử lý theo TCVN 6702:2013 “Xử lý kết quả thử nghiệm để xác định sự phù hợp với yêu cầu kỹ thuật”.

2.3 Thiết kế cấp phối bê tông trong môi trường biển

Trong giới hạn nghiên cứu này, cấp phối bê tông sử dụng trong xây dựng cơ sở hạ tầng ven biển được xác định dựa trên các yêu cầu sau:

- Hỗn hợp bê tông có tính công tác tốt, với độ sụt trong côn hình nón cụt tiêu chuẩn dao động từ $150 \div 200\text{mm}$;
- Giá trị cường độ nén trung bình của mẫu thí nghiệm tại tuổi 28 ngày dao động từ $30 \div 40\text{MPa}$;
- Dựa trên các thí nghiệm đã khảo sát, nghiên cứu đã lựa chọn tổng hàm lượng chất kết dính (CKD) sử dụng trong nghiên cứu này là 400kg/m^3 ;

VẬT LIỆU XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG

- Hàm lượng Silica fume SF-90 được sử dụng trong nghiên cứu là 0% và 10% hàm lượng xi măng sử dụng;

- Hàm lượng thạch cao nhân tạo được sử dụng lần lượt là 50% và 60% hàm lượng xi măng sử dụng;

- Phụ gia siêu dẻo SR5000F được sử dụng với hàm lượng bằng 1,0% hàm lượng chất kết dính;

- Tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) được lựa chọn là 0,3.

Tính toán thành phần của bê tông trong nghiên cứu này được thực hiện theo Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại theo Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD ngày 05/9/1998 của Bộ Xây dựng trên cơ sở các tỷ lệ lựa chọn đã thu được 04 cấp phối hỗn hợp bê tông có thành phần như trong bảng 8.

Bảng 8. Các tỷ lệ vật liệu sử dụng và cấp phối của bê tông

STT	Ký hiệu mẫu thí nghiệm	Tỷ lệ thạch cao nhân tạo và silica fume		Cấp phối bê tông bền ăn mòn trong môi trường biển (kg/m ³)						
		TCNT	SF-90	XM	TCNT	SF-90	PGSD	CB	ĐD	N
1	BT-TC-01	50%	0%	266,7	133,3	0,0	4,0	650	1250	120
2	BT-TC-02	50%	10%	250,0	125,0	25,0	4,0	650	1250	120
3	BT-TC-03	60%	0%	250,0	150,0	0,0	4,0	650	1250	120
4	BT-TC-04	60%	10%	235,3	141,2	23,5	4,0	650	1250	120

4. Kết quả nghiên cứu

4.1 Các tính chất của bê tông ở trạng thái dẻo

Các kết quả được đo trực tiếp trong điều kiện phòng thí nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm theo

TCVN 6702:2013, sau đó tính giá trị trung bình. Các giá trị khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông và độ sụt của các mẫu bê tông nghiên cứu được thể hiện trong Bảng 9 và Hình 10.

Bảng 9. Các tính chất của hỗn hợp bê tông

STT	Ký hiệu mẫu thí nghiệm	Tỷ lệ thạch cao nhân tạo và silica fume (%)		Độ sụt SN hỗn hợp bê tông (cm)		Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông (kg/m ³)
		TCNT	SF-90	Ngay sau khi trộn	Sau 30 phút	
1	BT-TC-01	50	0	20,5	17,5	2415
2	BT-TC-02	50	10	18,0	15,5	2410
3	BT-TC-03	60	0	18,5	15,0	2402
4	BT-TC-04	60	10	16,5	13,5	2395

Khi tăng hàm lượng thạch cao nhân tạo và tăng hàm lượng silica fume SF-90, khối lượng thể tích và độ sụt của hỗn hợp bê tông đều có xu hướng suy giảm. Đặc biệt, độ sụt của hỗn hợp bê tông giảm nhiều nhất, với mẫu BT-TC-01 chứa 50% thạch cao và 0% Silica fume có độ sụt ngay sau khi trộn là 20,5 cm, nhưng với mẫu chứa 60% thạch cao và 10% Silica fume giá trị độ sụt ngay sau khi trộn chỉ còn 16,5 cm. Điều này được giải thích dựa trên tỷ diện bề mặt của vật liệu sử dụng. Tức là do thạch cao nhân tạo và silica

fume SF-90 có kích thước hạt rất nhỏ mịn, tỷ diện bề mặt lớn, lượng cần nước để thấm ướt bề mặt nhiều hơn, trong khi đó lượng nước nhào trộn được sử dụng không đổi trong cả 04 cấp phối thí nghiệm. Do đó, hỗn hợp bê tông sau khi nhào trộn xong, có lượng nước dư thừa giảm, hỗn hợp khô hơn và độ sụt đã giảm đi đáng kể. Mặt khác, dưới tác dụng của phụ gia siêu dẻo SR5000F, độ sụt của hỗn hợp bê tông sau 30 phút nhào trộn chỉ suy giảm khoảng từ 14÷20% so với độ sụt ngay sau khi nhào trộn.



Hình 10. Xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông ngay sau khi nhào trộn

Bên cạnh đó, do thạch cao nhân tạo và silica fume SF-90 đều có khối lượng riêng nhỏ hơn xi măng PCB40 Hoàng Thạch. Vì vậy khi lượng xi măng giảm, thạch cao nhân tạo và silica fume tăng đã làm giá trị

khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông sau khi nhào trộn giảm nhẹ.

4.2 Tính chất cơ học của bê tông ở trạng thái cứng rắn

Bảng 10. Kết quả thí nghiệm cường độ nén và cường độ kéo khi uốn các mẫu bê tông thí nghiệm

STT	Ký hiệu mẫu thí nghiệm	Các tỷ lệ vật liệu sử dụng (%)		Cường độ nén của mẫu bê tông hình trụ kích thước DxDH = 150x300 mm (MPa) ở tuổi:					Cường độ kéo khi uốn của mẫu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày (MPa)
		TCNT	SF-90	1 ngày	3 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày	
1	BT-TC-01	50%	0%	15,1	23,1	28,7	34,0	38,8	4,4
2	BT-TC-02	50%	10%	17,2	26,2	32,5	39,2	42,1	5,5
3	BT-TC-03	60%	0%	12,2	18,3	22,6	26,5	31,0	3,6
4	BT-TC-04	60%	10%	14,1	21,4	26,8	31,9	34,5	4,5

Kết quả thí nghiệm trong Bảng 10 cho thấy, các cấp phối bê tông sử dụng thạch cao nhân tạo đều đạt yêu cầu về cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày

trong khoảng 30÷40 MPa, phù hợp với mục tiêu thiết kế cho công trình hạ tầng ven biển với tỷ lệ N/CKD = 0,3 và tổng hàm lượng chất kết dính 400 kg/m³.



Hình 11. Mẫu bê tông hình trụ đường kính D = 150 mm và chiều cao H = 300 mm

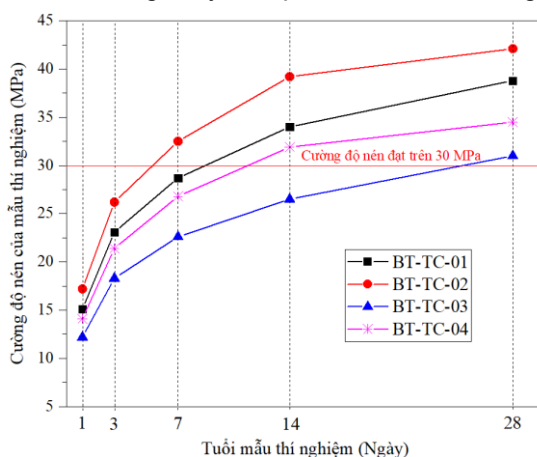


Hình 12. Thí nghiệm xác định cường độ nén của mẫu thí nghiệm

Đối với các cấp phối sử dụng 50% thạch cao nhân tạo (BT-TC-01 và BT-TC-02), cường độ nén 28 ngày đạt lần lượt 38,8 MPa và 42,1 MPa. Đáng chú ý, khi bổ sung 10% Silica fume (BT-TC-02), cường độ nén tăng rõ rệt ở tất cả các tuổi thí nghiệm. Cụ thể, tại 1 ngày tuổi tăng từ 15,1 MPa lên 17,2 MPa (khoảng 14%), tại 3 ngày tăng khoảng 13%, tại 7 ngày tăng khoảng 13% và tại 14 ngày tăng khoảng 15%. Ở tuổi 28 ngày, cường độ tăng khoảng 8,5% so với mẫu không sử dụng Silica fume. Điều này được giải thích nhờ hiệu ứng của silica fume có 70% cỡ hạt nano và chứa đến 91,4% SiO₂ hoạt tính đã thúc đẩy quá trình

thủy hóa sớm, tăng mật độ cấu trúc đá xi măng nhờ hiệu ứng filler và phản ứng pozzolan mạnh với Ca(OH)₂, qua đó cải thiện tốc độ phát triển cường độ.

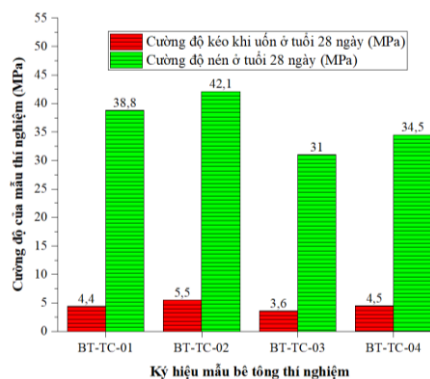
Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận ở nhóm cấp phối sử dụng 60% thạch cao nhân tạo (BT-TC-03 và BT-TC-04). Việc bổ sung 10% Silica fume giúp cường độ nén tăng khoảng 15–17% ở tuổi sớm và tăng khoảng 11% ở tuổi 28 ngày (từ 31,0 MPa lên 34,5 MPa) (Hình 13). Điều này chứng tỏ vai trò tích cực của phụ gia siêu mịn trong việc cải thiện cấu trúc vi mô và nâng cao liên kết vùng chuyển tiếp cốt liệu – hồ xi măng.



Hình 13. Tốc độ phát triển cường độ nén của mẫu bê tông thí nghiệm theo thời gian

Tuy nhiên, khi tăng hàm lượng thạch cao nhân tạo từ 50% lên 60%, cường độ nén có xu hướng giảm. So sánh hai cấp phối không sử dụng Silica fume, cường độ 28 ngày giảm từ 38,8 MPa xuống 31,0 MPa (giảm khoảng 20%). Tương tự, ở nhóm có 10% Silica fume, cường độ giảm từ 42,1 MPa xuống 34,5 MPa (giảm khoảng 18%). Nguyên nhân có thể do hàm lượng thạch cao cao làm thay đổi cân bằng pha hydrat, tăng nguy cơ hình thành sản phẩm ettringite thứ cấp hoặc làm suy giảm tỷ lệ các sản phẩm C-S-H bền chắc trong hệ.

Về cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày, xu hướng biến đổi tương đồng với cường độ nén. Mẫu BT-TC-02 đạt 5,5 MPa, cao hơn 25% so với BT-TC-01 (4,4 MPa). Ở nhóm 60% thạch cao, việc bổ sung Silica fume giúp tăng cường độ uốn từ 3,6 MPa lên 4,5 MPa (khoảng 25%) (Hình 14). Điều này khẳng định Silica fume không chỉ nâng cao cường độ nén mà còn cải thiện đáng kể khả năng chịu kéo khi uốn, nhờ làm giảm vi khe nứt và tăng độ đặc chắc của vi cấu trúc hồ xi măng.



Hình 14. Giá trị cường độ kéo khi uốn và cường độ nén của mẫu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày

Từ kết quả thu được cho thấy, việc sử dụng 50% thạch cao nhân tạo kết hợp 10% Silica fume là phương án tối ưu trong phạm vi khảo sát, vừa đảm bảo cường độ nén cao (≥ 40 MPa), vừa cải thiện cường độ kéo khi uốn, phù hợp cho kết cấu hạ tầng ven biển yêu cầu độ bền và khả năng làm việc lâu dài trong môi trường xâm thực.

4.3 Khả năng bảo vệ cốt thép của bê tông trong môi trường nước biển nhân tạo

Kết quả thí nghiệm ăn mòn nhanh và bảo vệ cốt thép theo tiêu chuẩn NT Build 356 của Hội thử nghiệm Bắc Âu Nordtest của các mẫu bê tông thí nghiệm được trình bày trong Bảng 11 và Bảng 12.

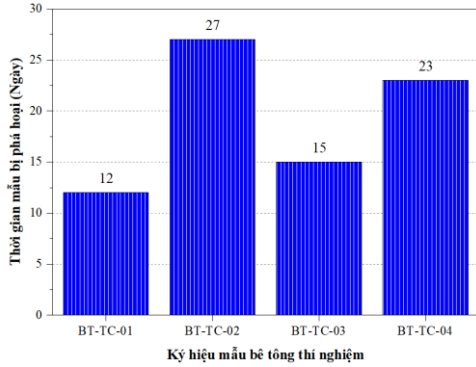
Bảng 11. Kết quả thí nghiệm thời điểm phá hủy và cường độ dòng điện của mẫu bê tông theo phương pháp ăn mòn nhanh

Số ngày thử mẫu trong môi trường dung dịch NaCl 3%	Cường độ dòng điện chạy qua các mẫu (mA)				Ghi chú
	BT-TC-01	BT-TC-02	BT-TC-03	BT-TC-04	
1	3,6	2,4	3,2	3,0	
2	3,5	2,2	3,1	3,0	
3	3,7	2,3	3,4	3,1	
.	
.	
10	5,5	2,5	3,5	3,2	
11	6,4	2,6	3,6	3,2	
12	16,1*	2,6	4,1	3,3	Nứt vỡ mẫu BT-TC-01
13	-	2,7	5,7	3,3	
14	-	2,8	6,0	3,4	
15	-	2,9	14,8*	3,5	Nứt vỡ mẫu BT-TC-03
.	
.	
21	-	3,2	-	4,6	
22	-	3,4	-	5,2	
23	-	3,6	-	12,0*	Nứt vỡ mẫu BT-TC-04
24	-	3,7	-	-	
25	-	4,2	-	-	
26	-	5,0	-	-	
27	-	10,5*	-	-	Nứt vỡ mẫu BT-TC-02

Ghi chú: * là thời điểm cường độ dòng điện cực đại và mẫu thí nghiệm bị phá hoại.

Bảng 12. Thời gian nứt mẫu, cường độ dòng điện trước và sau khi nứt mẫu bê tông thí nghiệm

STT	Ký hiệu mẫu thí nghiệm	Các tỷ lệ vật liệu sử dụng (%)		Thời gian mẫu bị phá hoại (Ngày)	Cường độ dòng điện trung bình trước khi mẫu bị nứt vỡ (mA)	Cường độ dòng điện tại thời điểm mẫu bị nứt vỡ (mA)
		TCNT	SF-90			
1	BT-TC-01	50%	0%	12	4,72	16,1
2	BT-TC-02	50%	10%	27	3,61	10,5
3	BT-TC-03	60%	0%	15	4,44	14,8
4	BT-TC-04	60%	10%	23	4,05	12,0



Hình 15. Ảnh hưởng của hàm lượng thạch cao nhân tạo và silica fume đến thời gian phá hoại mẫu thí nghiệm

Từ kết quả thực nghiệm thu được trên Hình 15 cơ sở phương pháp ăn mòn nhanh theo tiêu chuẩn NT Build 356, rút ra một số kết luận như sau:

Kết quả thí nghiệm ăn mòn nhanh theo phương pháp NT Build 356 trong môi trường dung dịch NaCl 3% trong Bảng 12 và trên Hình 17 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về khả năng bảo vệ cốt thép giữa các cấp phối bê tông có chứa 0% và 10% Silica fume, đồng thời phản ánh ảnh hưởng của hàm lượng (50÷60)% thạch cao nhân tạo đến vi cấu trúc và độ bền lâu của mẫu thí nghiệm.

Việc bổ sung 10% Silica fume đã làm gia tăng đáng kể thời gian phá hoại mẫu trong điều kiện cưỡng bức của dòng điện một chiều với hiệu điện thế 5V. Ở nhóm sử dụng 50% thạch cao nhân tạo, thời gian xuất hiện nứt vỡ tăng từ 12 ngày lên 27 ngày, tức tăng hơn hai lần so với mẫu không chứa Silica fume. Tương tự, ở nhóm sử dụng 60% thạch cao nhân tạo, thời gian phá hoại tăng từ 15 ngày lên 23 ngày. Sự gia tăng này có thể được lý giải bởi hàm lượng SiO₂ hoạt tính cao (91,4%) và tỷ lệ hạt kích thước nano lớn (khoảng 70%) của Silica fume, tạo hiệu ứng điền đầy lỗ rỗng gel và tăng cường phản ứng pozzolan với Ca(OH)₂, từ đó hình thành thêm C-S-H thứ cấp. Cấu trúc vi mô trở nên đặc chắc hơn, hệ mao dẫn bị gián đoạn, làm giảm hệ số khuếch tán ion Cl⁻ và hạn chế quá trình ăn mòn điện hóa của cốt thép trong môi trường dung dịch NaCl 3%.

Từ giá trị trung bình cường độ dòng điện trong từ mẫu thí nghiệm cũng cho thấy rõ ràng nhận định này. Các mẫu chứa Silica fume đều có giá trị dòng điện trung bình trước khi nứt thấp hơn so với mẫu đối chứng, cho thấy điện trở suất bê tông tăng lên và khả

năng dẫn truyền ion Cl⁻ giảm xuống. Tại thời điểm nứt vỡ, mặc dù dòng điện tăng đột ngột do sự hình thành và phát triển của sản phẩm ăn mòn gây trương nở phá hủy lớp bảo vệ, nhưng biên độ dòng điện của các mẫu có Silica fume vẫn thấp hơn đáng kể. Điều này phản ánh độ đặc chắc của vi cấu trúc bê tông có chứa Silica fume, điều này làm cho các sản phẩm ăn mòn, gỉ thép và mức độ phá hoại nội tại diễn ra chậm hơn, phù hợp với cơ chế giảm tính thấm và giảm tính liên thông lỗ rỗng.

Bên cạnh đó, khi tăng tỷ lệ từ 50% lên 60%, thời gian phá hoại của mẫu không chứa Silica fume tăng nhẹ, cho thấy khả năng tham gia của các pha chứa sunfat trong việc điều chỉnh cấu trúc sản phẩm hydrat. Tuy nhiên, sự gia tăng hàm lượng thạch cao đồng thời làm suy giảm cường độ cơ học của mẫu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày như đã phân tích trước đó. Tuy nhiên, khi kết hợp với Silica fume, mặc dù thời gian phá hoại vẫn được cải thiện rõ rệt, nhưng hiệu quả tăng thêm không lớn bằng nhóm 50% thạch cao, cho thấy hiệu quả tương hỗ của hỗn hợp thạch cao nhân tạo, silica fume và phụ gia siêu dẻo trong việc kiểm soát và điều khiển quá trình hình thành vi cấu trúc của sản phẩm.

Tóm lại, từ các kết quả tính chất cơ học và ăn mòn theo phương pháp gia tốc cho thấy, tồn tại mối quan hệ tương quan giữa cường độ nén, độ đặc chắc vi mô, khả năng kháng xâm thực ion Cl⁻ và bảo vệ cốt thép trong bê tông. Cấp phối sử dụng 50% thạch cao nhân tạo kết hợp 10% Silica fume và 1% phụ gia siêu dẻo không chỉ đạt cường độ cơ học cao nhất mà còn thể hiện thời gian phá hoại dài nhất và cường độ dòng điện thấp nhất trong quá trình thí nghiệm cưỡng bức. Điều này khẳng định vai trò của Silica fume trong việc tối ưu hóa cấu trúc vi mô, ngăn cản sự xâm nhập của các ion Cl⁻ và nâng cao độ bền lâu của cốt thép trong kết cấu bê tông sử dụng trong môi trường biển, đồng thời chỉ ra rằng việc sử dụng thạch cao nhân tạo ở mức hợp lý hoàn toàn có thể đáp ứng yêu cầu kỹ thuật đối với bê tông cốt thép làm việc trong điều kiện xâm thực clorua. Mặt khác, việc sử dụng (50÷60)% thạch cao nhân tạo để thay thế xi măng trong thành phần bê tông là một trong những giải

pháp mang lại nhiều lợi ích to lớn, góp phần tạo ra các sản phẩm vật liệu xây dựng bền vững, bảo vệ nguồn tài nguyên thiên nhiên, tận dụng phế thải công nghiệp và thúc đẩy nền kinh tế tuần hoàn ở Việt Nam.

4. Kết luận và kiến nghị

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu và phân tích như trên, có thể rút ra những kết luận sau:

- Khi tăng hàm lượng thạch cao nhân tạo và silica fume, độ sụt của hỗn hợp bê tông có xu hướng giảm do tăng tỷ diện bề mặt và nhu cầu nước. Tuy nhiên, với tỷ lệ N/CKD = 0,3 và 1% phụ gia siêu dẻo, các cấp phối vẫn đảm bảo yêu cầu tính công tác cho thi công công trình ven biển;

- Việc bổ sung 10% silica fume làm tăng rõ rệt cường độ nén và cường độ kéo khi uốn ở tất cả các tuổi thí nghiệm. Ở tuổi 28 ngày, cường độ nén tăng từ 8÷17% so với mẫu không sử dụng silica fume. Ngược lại, khi tăng hàm lượng thạch cao nhân tạo từ 50% lên 60%, cường độ có xu hướng giảm;

- Kết quả thí nghiệm ăn mòn nhanh theo phương pháp NT Build 356 cho thấy mẫu có chứa 10% silica fume có thời gian phá hoại dài hơn đáng kể. Đặc biệt, cấp phối sử dụng 50% thạch cao nhân tạo kết hợp 10% silica fume đạt thời gian bảo vệ cốt thép dài nhất (27 ngày), chứng tỏ khả năng cải thiện độ đặc chắc và giảm khuếch tán ion Cl⁻;

- Trong phạm vi nghiên cứu, cấp phối sử dụng 50% thạch cao nhân tạo và 10% silica fume được đánh giá là tối ưu về cả tính chất cơ học và độ bền lâu cho bê tông sử dụng cát biển trong điều kiện môi trường biển đảo.

Cần tiếp tục nghiên cứu đánh giá độ bền lâu trong điều kiện phơi nhiễm tự nhiên ven biển để so sánh với kết quả thí nghiệm gia tốc. Nên nghiên cứu bổ sung các phân tích vi cấu trúc nhằm làm rõ hơn cơ chế tương tác giữa thạch cao nhân tạo và silica fume trong hệ bê tông sử dụng cát biển. Xem xét khả năng ứng dụng cấp phối tối ưu cho các cấu kiện hạ tầng ven biển và hải đảo có yêu cầu cao về độ bền trong môi trường xâm thực clorua.

Lời cảm ơn:

Bài báo được sự hỗ trợ nguồn nguyên vật liệu của Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng. Nhóm nghiên cứu chân thành cảm ơn Công ty Cổ phần Đầu tư Trường An Hải Phòng và nhóm Bê tông Xanh Trường Đại học Mở - Địa chất đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Chương P.V., Khoan P.V., Thắng, N.N., (2019). *Nghiên cứu áp dụng phương pháp gia tốc để đánh giá mức độ ăn mòn cốt thép trong bê tông cát nhiễm mặn*. Tạp chí KHCN Xây dựng, số 4.

[2] Nguyễn Mạnh Kiểm (1992), *Nghiên cứu sử dụng cát biển làm cốt liệu trong bê tông*, Tuyển chọn các công trình nghiên cứu khoa học 1960-1975, tháng 5, Hà Nội.

[3] Zhenhai Zhang et al (2013), *"Experimental Research on Durability of Concrete Made by Seawater and Sea-Sand"*, Advanced Materials Research, tr. 385-388.

[4] Do-Gyeum Kim (May 2013), *The Effects of Chloride on Durability of Concrete Mixed With Sea Sand*, ISSN 2161-623X, chủ biên, , US-China Education Review A.

[5] Tính toán thành phần của chất kết dính không xi măng theo Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại theo Quyết định số 778/1998/QĐ-BXD ngày 05/9/1998 của Bộ Xây dựng.

[6] Đồng Kim Hạnh, Dương Thị Thanh Hiền (2011). *Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép và giải pháp chống ăn mòn cho công trình bê tông cốt thép trong môi trường biển Việt Nam*. Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, Viện KHTLVN, tr 44-49.

[7] Nguyễn Thanh Bằng (2011). *Nguyên nhân gây xâm thực bê tông và bê tông cốt thép công trình thủy lợi – Giải pháp khắc phục phòng ngừa*. Tạp chí KH&CN Thủy lợi, Viện KHTLVN, số 3, tr 56-60.

[8] Phạm Văn Khoan, Nguyễn Nam Thắng, (2010). *Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép ở vùng biển Việt Nam và một số kinh nghiệm sử dụng chất ức chế ăn mòn canxi nitrit*. Tạp chí KHCN Xây dựng, Số 2.

[9] Phạm Duy Hữu, Nguyễn Ngọc Long, Đào Văn Đông, Phạm Duy Anh (2008). *Bê tông cường độ cao và chất lượng cao*. NXB Giao thông vận tải.

[10] Nguyễn Thị Thu Hương (2014). *Nghiên cứu đề xuất phương pháp thí nghiệm tính thấm nước phù hợp cho bê tông có độ bền cao*. Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, Viện KHTLVN, số 47.

[11] Nguyễn Mạnh Phát, (2007). *Lý thuyết ăn mòn và chống ăn mòn bê tông – bê tông cốt thép trong xây dựng*. NXB Xây dựng.

[12] Nguyễn Mạnh Tuấn (2018). *Sản xuất bê tông bền trong môi trường biển từ nguồn nguyên liệu tại chỗ*. Tạp chí Khoa học và công nghệ Việt Nam, số 3, tr 26-28.

[13] TCVN 2682 : 2009, (2009). *Xi măng poóc lăng - yêu cầu kỹ thuật*. 6 Tr.

[14] TCVN 10302:2014 (2014). *Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng*".

[15] TCVN 7570:2006 (2006). *Cốt liệu cho bê tông và vữa - yêu cầu kỹ thuật*. 6 Tr.

[16] TCVN 4506:2012 (2012). *Nước cho bê tông và vữa - yêu cầu kỹ thuật*. 7tr.

[17] TCVN 3106: 2022 (2022). *Hỗn hợp bê tông nặng - phương pháp thử độ sụt*. 3 Tr.

[18] TCVN 3105:2022 (2022). *Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu bê tông*. 6 Tr.

[19] NT Build 356-2009 (2009). *Concrete, repairing materials and protective coating: embedded steel method*. Chloride permeability nordtest method.

[20] TCVN 6702:2013 (2013). *Xử lý kết quả thử nghiệm để xác định sự phù hợp với yêu cầu kỹ thuật*.

[21] TCVN 3119:2022 (2022). *Bê tông-Phương pháp xác định cường độ chịu kéo khi uốn*.