



MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF BLAST FURNACE SLAG SAND CONCRETE AND APPLICABILITY IN MARINE CONSTRUCTIONS

Nguyen Tan Khoa^{1*}, Nguyen Thanh Sang²

¹Dong A University, 33 Xo Viet Nghe Tinh, Danang, Vietnam

²University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 25/4/2020

Revised: 23/6/2020

Accepted: 26/6/2020

Published online: 28/6/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.9>

* Corresponding author

Email: ntkhoa2013@gmail.com; Tel: 0935788756

Abstract. Fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) are the materials that have shown an improvement in strength and durability properties of sand concrete (SC). The combination of these two materials can be more effective than using them individually. The paper presents an empirical study on the mechanical and durability properties of sand concrete when used simultaneously with FA and BFS. Sand concrete types were fabricated with a fixed amount of 150 kg/m³ of FA while GGBFS replaces binder with different ratios to consider the impact of GGBFS rate on the properties of harden sand concrete. A traditional concrete uses the amount of cement equivalent to the total amount of binder of SC was fabricated for comparison purposes. The research from this work shows that SC has optimal results of compressive strength, splitting compressive strength, under water abrasion with replacement GGBFS rate of 20%. The chloride penetration of SC was the best with replacement GGBFS rate of 30%. The higher the GGBFS replacement rate, the lower the expansion of SC in the sulfate solution after 6 months. Three types of SC with replacement GGBFS rate of 10%, 20%, 30% have the strength and durability properties that satisfy the requirements of concrete working in the marine environment according to TCVN 12041: 2017 and CSA A23.1: 2004.

Keywords: Sand concrete, ground granulated blast furnace slag, under water abrasion, chlorine ion penetration, sulfate durability, marine construction.



TÍNH CHẤT CƠ HỌC VÀ ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG CÁT XỈ LÒ CAO VÀ KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG TRONG CÔNG TRÌNH BIỂN

Nguyễn Tấn Khoa^{1*}, Nguyễn Thanh Sang²

¹Trường Đại học Đông Á, Số 33 Xô Viết Nghệ Tĩnh, Đà Nẵng, Việt Nam

²Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 25/4/2020

Ngày nhận bài sửa: 23/6/2020

Ngày chấp nhận đăng: 26/6/2020

Ngày xuất bản Online: 28/6/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.9>

* Tác giả liên hệ

Email: ntkhoa2013@gmail.com; Tel: 0935788756

Tóm tắt. Tro bay và xỉ lò cao là các loại vật liệu đã cho thấy được sự cải thiện các tính chất cường độ và độ bền khi được sử dụng trong bê tông cát. Sự kết hợp đồng thời của 2 loại vật liệu này với nhau có thể sẽ nâng cao hơn nữa hiệu quả sử dụng so với việc dùng riêng từng loại. Bài báo trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về tính chất cơ học và độ bền của bê tông cát (BTC) khi sử dụng kết hợp đồng thời TB và XLC. Các loại bê tông cát được chế tạo với lượng cố định 150 kg/m^3 tro bay trong khi XLC thay thế chất kết dính (CKD) với các tỷ lệ khác nhau để xem xét sự ảnh hưởng của tỷ lệ sử dụng XLC đến tính chất của BTC đóng rắn. Một cấp phối bê tông thường (BTT) sử dụng lượng xi măng tương đương tổng lượng CKD trong BTC được chế tạo với mục đích so sánh. Kết quả nghiên cứu cho thấy tính chất cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ, độ mài mòn trong nước của bê tông cát tối ưu với tỷ lệ XLC thay thế 20%. Độ thấm clorua của BTC thấp nhất với tỷ lệ XLC thay thế 30%. Tỷ lệ XLC thay thế càng lớn, độ giãn nở của BTC trong dung dịch sunfat càng thấp sau 6 tháng. Ba loại BTC ứng với tỷ lệ XLC thay thế 10%, 20%, 30% có tính chất cường độ và độ bền đáp ứng được yêu cầu của bê tông làm việc trong môi trường biển theo TCVN 12041: 2017 và CSA A23.1: 2004.

Từ khóa: Bê tông cát, xỉ lò cao nghiền mịn, độ mài mòn trong nước, độ thấm clorua, độ bền sunfat, công trình biển.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông cát là một loại đá nhân tạo nhận được sau khi tạo hình và làm rắn chắc một hỗn hợp hợp lý bao gồm: cát thô, cát mịn, chất độn mịn, xi măng, nước, một hoặc nhiều loại phụ gia [1]. Bê tông cát đã được sử dụng phổ biến ở một số vùng quốc gia có nguồn cát dồi dào nhưng khan hiếm cốt liệu thô như Pháp, Nga, Đức các nước Bắc Phi và các quốc gia khác [2]. Nguyên lý cấu tạo của bê tông cát chính là sự nhỏ hóa dãy cấp phối cốt liệu so với bê tông thường, nghĩa là các hạt cát thô lúc này đóng vai trò là khung cốt liệu, thành phần cát mịn, chất độn mịn đóng vai trò điền đầy khung cốt liệu [3]. Thành phần chất độn mịn của bê tông cát thường sử dụng trước đây là bột đá vôi với lượng sử dụng từ 50 đến 250 kg/m³ tùy thuộc vào cấp cường độ yêu cầu [2]. Trong công trình dân dụng, bê tông cát có thể dùng để chế tạo kết cấu bê tông đúc sẵn, kết cấu sàn, dầm dự ứng lực với cường độ chịu nén 28 ngày từ 30 - 45 MPa. Trong công trình giao thông, bê tông cát được ứng dụng trong đường ống bê tông đúc sẵn, đường bê tông không cốt thép và có cốt thép với cường độ ở 28 ngày từ 20 - 50 MPa. Ngoài ra, BTC đã được ứng dụng làm bê tông phun đường hầm, bê tông cho lĩnh vực kiến trúc và khối bê tông đúc sẵn cho công trình bảo vệ bờ [2].

Hiện nay, để phát triển bền vững, việc giảm lượng xi măng tiêu thụ và tăng cường sử dụng các phụ phẩm công nghiệp (PPCN) đóng vai trò chất kết dính phụ thêm (CKDPT) trong bê tông là xu hướng tất yếu. Các loại CKDPT như silica fume, tro bay, xỉ lò cao đã và đang được nghiên cứu sử dụng trong bê tông cát. Silica fume thay thế 15% lượng xi măng chế tạo bê tông cát đạt cường độ đạt 60 MPa và có độ thấm ion clo < 500 Culong [4]. Nghiên cứu của Dalila Benamara (2015) cho thấy silica fume thay thế 15% lượng xi măng có cường độ chịu nén cao nhất và cường độ chịu nén ổn định trong dung dịch Na₂SO₄ sau 270 ngày trong khi các cấp phối khác có sự suy giảm cường độ rõ rệt [5]. Tro bay với tỷ lệ thay thế 20% xi măng trong bê tông cát cho thấy cường độ chịu nén cao hơn so với bê tông cát đối chứng và độ thấm ion clo thấp hơn so với bê tông cát đối chứng ở 28 ngày [6]. Nghiên cứu của Chaohua Jiang (2018) về bê tông cát sử dụng tro bay và xỉ lò cao với lượng dùng từ 100 kg/m³ đến 300 kg/m³ cho thấy cường độ chịu nén của bê tông cát ở 7 và 28 ngày tối ưu với 150 kg/m³ tro bay và 200 kg/m³ xỉ lò cao [7]. Các nghiên cứu trên đã cho thấy các loại CKDPT như silica fume, tro bay, xỉ lò cao khi thay thế xi măng với tỷ lệ hợp lý sẽ giúp tăng cường tính năng cường độ và độ bền của bê tông cát. Tuy nhiên sự kết hợp các loại CKDPT với xi măng trong bê tông cát ở các nghiên cứu trên chỉ mang tính riêng lẻ mà chưa có sự phối hợp với nhau để hạn chế các khuyết điểm và tăng cường ưu điểm của từng loại vật liệu. Ngoài ra, các nghiên cứu về bê tông cát sử dụng các CKDPT mới chỉ tập trung chủ yếu vào tính năng cơ học, các nghiên cứu về độ bền của BTC còn rời rạc.

Việt Nam, đặc biệt là các tỉnh duyên hải Miền Trung với lượng cát đụn mịn rất lớn có trữ lượng lên đến hàng tỷ m³ mỗi tỉnh có điều kiện thuận lợi để phát triển bê tông cát thay thế cho bê tông thường [3]. Hiện nay nhu cầu xây dựng các công trình bảo vệ bờ biển, phát triển hạ tầng ven biển ở Việt Nam rất lớn, với sự thuận lợi về nguồn vật liệu địa phương dồi dào nên định hướng nghiên cứu phát triển bê tông cát phục vụ công trình biển là phù hợp và rất cấp thiết. Các nghiên cứu và ứng dụng bê tông cát ở Việt Nam hiện nay đã có nhưng chủ yếu tập trung vào các tính năng bê tông phục vụ cho công trình giao thông [3, 6]. Trong khi bê tông dùng làm công trình biển thường yêu cầu phức tạp hơn do môi trường xâm thực mạnh, đòi hỏi yêu cầu độ bền bê tông cao hơn so với các dạng công trình khác. Giải pháp tăng cường độ bền của bê tông cát với việc sử dụng CKDPT đã cho thấy sự hiệu quả qua những nghiên cứu trước đây, tuy nhiên có thể tổ hợp các loại CKDPT với nhau để phát huy ưu và hạn chế nhược điểm của từng loại trong bê tông cát. Tro bay khi sử dụng trong bê tông giúp tăng tính công tác, với

tỷ lệ hợp lý sẽ nâng cao tính chất cơ học, độ bền của bê tông, tuy nhiên khi sử dụng nhiều sẽ làm giảm cường độ tuổi sớm của bê tông [8]. Xi lò cao nghiền mịn (XLCNM) khi sử dụng trong bê tông có tác dụng làm giảm lỗ rỗng cấu trúc, cải thiện cường độ dài hạn, cải thiện đáng kể độ bền sunfat và độ bền clorua [9, 10]. Trong bê tông, xi lò cao có thể được thay thế xi măng với tỷ lệ đến 70%, khi được nghiền đến độ mịn nhất định sẽ giúp tăng cường độ tuổi sớm của bê tông [8].

Bê tông cát sử dụng lượng lớn cốt liệu mịn do đó thường yêu cầu lượng xi măng lớn để lấp đầy khung cốt liệu và lượng nước lớn để đảm bảo tính công tác cho bê tông. Với sự kết hợp của tro bay và xi lò cao trong bê tông cát có thể thay thế được lượng lớn xi măng sử dụng, cải thiện vấn đề tính công tác và nâng cao được độ bền của bê tông cát trong mục tiêu sử dụng làm kết cấu cho công trình biển. Sự kết hợp của tro bay và xi lò cao trong bê tông thường cho thấy việc giảm độ co ngót, cải thiện rõ rệt độ chống thấm nước, chống thấm clorua làm tiền đề để phối hợp 2 loại vật liệu này một cách hiệu quả trong bê tông cát [11-13]. Bê tông cát với sự khác biệt về nguyên tắc cấu tạo so với BTT, sự kết hợp giữa xi măng – tro bay – xi lò cao cần được nghiên cứu để xác định tỷ lệ sử dụng XLC và TB hợp lý nhất giúp tối ưu tính chất cường độ và độ bền của bê tông cát.

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm về tính năng cường độ, độ bền của BTC khi sử dụng đồng thời cả XLC và TB thay thế một phần xi măng. TB được sử dụng với lượng cố định 150 kg/m^3 với vai trò vừa là vật liệu chèn đầy, vừa là một phần CKD. XLCNM thay thế xi măng với tỷ lệ 0%, 10%, 20%, 30%, 40% để xem xét ảnh hưởng của sự thay đổi đến các tính chất cường độ chịu nén, cường độ ép chèn, độ bền clorua, độ bền sunfat và độ bền mài mòn trong nước của BTC. Kết quả nghiên cứu giúp xác định tỷ lệ sử dụng XLC hợp lý trong BTC để thỏa mãn yêu cầu các tính năng của bê tông trong công trình biển, từ đó đề xuất các kết cấu công trình biển có thể sử dụng loại BTC trong nghiên cứu.

2. KẾ HOẠCH THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu chế tạo

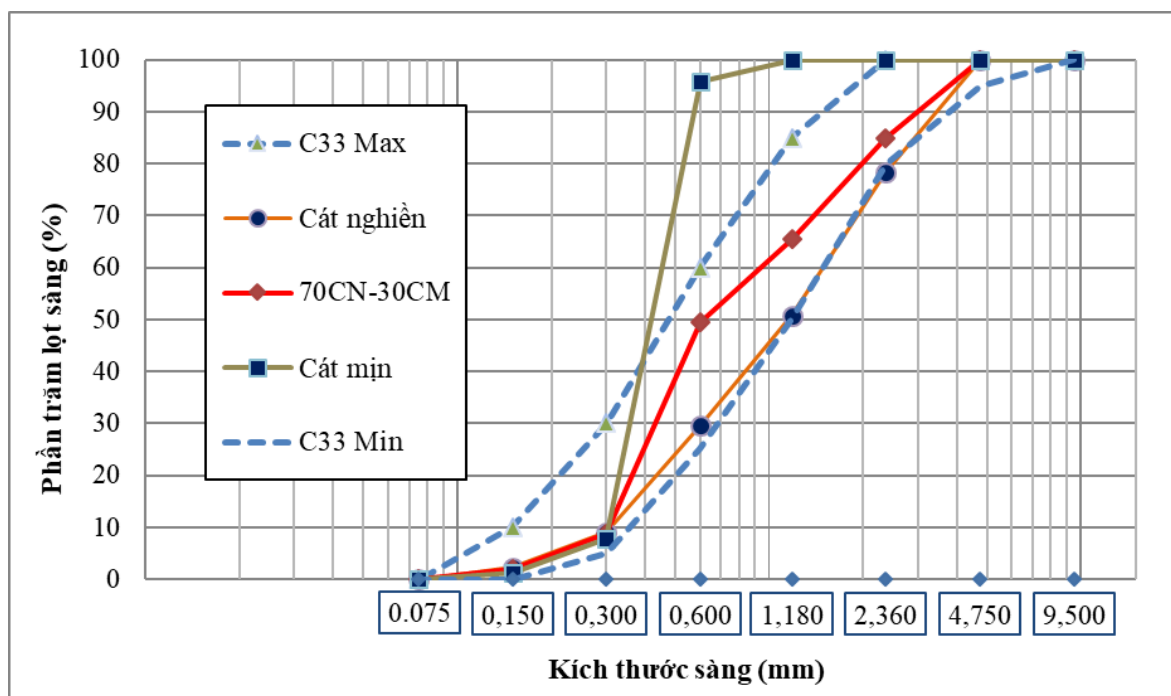
Nghiên cứu sử dụng xi măng PC40 Bút Sơn thỏa mãn TVCN 2682: 2009, tro bay thỏa mãn TVCN 10302:2014, xi lò cao nghiền mịn thỏa mãn TVCN 11586: 2016. Thành phần hóa học và tính chất vật lý của XM, TB và XLCNM được trình bày trong Bảng 1, Bảng 2. Thành phần cốt liệu của BTC bao gồm cát nghiền (CN) và cát mịn (CM), trong đó CN có $D_{\max} < 5\text{mm}$, khối lượng riêng là $2,71 \text{ g/cm}^3$; CM với mô đun độ lớn 1,97, khối lượng riêng $2,64 \text{ g/cm}^3$. Thành phần hạt của CN, CM và hỗn hợp cốt liệu được thể hiện ở Hình 1. Nghiên cứu sử dụng phụ gia siêu dẻo Master Glenium ACE 8509 thỏa mãn ASTM C494 loại F.

Bảng 1. Thành phần hóa học của xi măng, tro bay và xi lò cao nghiền mịn.

Thành phần hóa học (%)	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI
XM PC40	63,2	21,9	3,3	5,72	1,1	0,3	0,12	1,9	0,19
TB	4,27	53,9	6,7	21,8	1,45	3,4	0,67	0,2	6,27
XLCNM	34,7	36,6	0,03	12,91	7,78	1,26	0,52	1,45	0,01

Bảng 2. Tính chất vật lý của xi măng, tro bay và xỉ lò cao nghiền mịn.

Tính chất vật lý	Kích thước hạt trung bình (μm)	Khối lượng riêng (g/cm^3)	Độ mịn Blaine (cm^2/g)	Chỉ số hoạt tính cường độ ở 28 ngày (%)
XM PC40	16,1	3,1	3730	100
TB	26,9	2,2	-	85,3
XLCNM	12,2	2,9	4520	105



Ghi chú: C33 Max là đường giới hạn trên thành phần hạt theo ASTM C33; C33 Min là đường giới hạn dưới thành phần hạt theo ASTM C33; 70CN-30CM là đường thành phần hạt của hỗn hợp cốt liệu có tỷ lệ 70% cát nghiền và 30% cát mịn.

Hình 1. Thành phần hạt của cốt liệu trong bê tông cát.

2.2. Thành phần bê tông nghiên cứu

Bảng 3. Thành phần cấp phối của các loại bê tông trong nghiên cứu.

Loại bê tông	Nước (lít)	Xi măng (kg/m^3)	Xi lò cao (kg/m^3)	Tỷ lệ xi lò cao	Tro bay (kg/m^3)	N /CKD	Cát nghiền (kg/m^3)	Cát mịn (kg/m^3)	Đá 5x20 (kg/m^3)	Cát sông (kg/m^3)	Phụ gia (l/m^3)
BTTĐC	172	550	0	0	0	0,313	0	0	1035	690	6,29
BTCĐC	165	400	0	0	150	0,3	977	651	0	0	4,8
BTCX10	165	345	55	10%	150	0,3	982	655	0	0	4,6
BTCX20	165	290	110	20%	150	0,3	977	653	0	0	4,5
BTCX30	165	235	165	30%	150	0,3	977	651	0	0	4,4
BTCX40	165	180	220	40%	150	0,3	974	650	0	0	4,4

Năm loại BTC được chế tạo sử dụng kết hợp xi măng, xỉ lò cao, tro bay với tỷ lệ $N/CKD = 0,3$ có thành phần được xác định theo phương pháp thiết kế thành phần BTC [1, 2]. Trong đó, TB được sử dụng lượng cố định 150 kg/m^3 trong BTC với vai trò vừa là vật liệu điền đầy, vừa là thành phần CKDPT; XLCNM thay thế lần lượt 0%, 10%, 20%, 30%, 40% tổng lượng CKD để xem xét sự ảnh hưởng của XLC đến các tính chất của BTC đóng rắn. Một loại bê tông thường với mục đích đối chứng có lượng XM sử dụng tương đương tổng lượng XM, XLC, TB của các loại BTC, được thiết kế theo ACI 211.4R-08 [14]. Các loại bê tông trong nghiên cứu có độ sụt thiết kế là $8 \pm 2 \text{ cm}$. Các thành phần hỗn hợp bê tông được trình bày ở Bảng 3.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

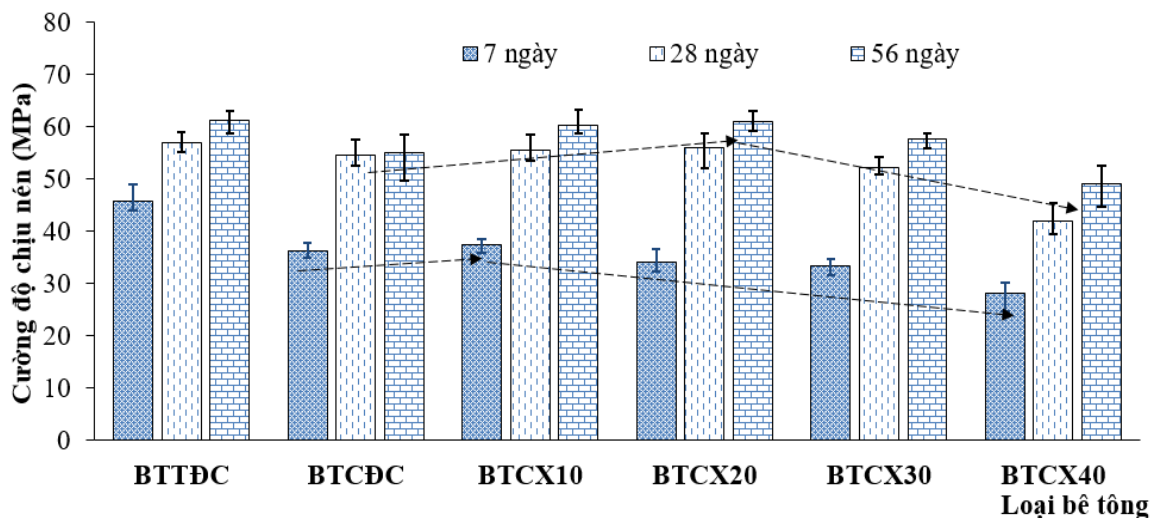
Các hỗn hợp BTC được trộn với tổng thời gian 8 phút. Cát nghiền, cát mịn và các thành phần bột mịn (XM, TB, XLCNM) được trộn khô trong vòng 2 phút. Tiếp theo, cho 70% lượng nước vào và tiếp tục trộn trong 2 phút. Cuối cùng cho phụ gia siêu dẻo vào 30% nước còn lại, cho vào hỗn hợp bê tông và trộn trong vòng 4 phút để kết thúc quá trình trộn.

Mẫu thử hình trụ kích thước $100 \times 50 \text{ mm}^2$ được chuẩn bị để thí nghiệm xác định độ thấm clorua ở 28 ngày theo TCVN 9337:2012 [15]. Mẫu thử hình trụ kích thước $100 \times 200 \text{ mm}^2$ được chuẩn bị để thí nghiệm cường độ chịu nén và cường độ ép chẻ của bê tông ở 7, 28, 56 ngày theo TCVN 3118:1993 [16] và TCVN 3120:1993 [17]. Mẫu thử hình trụ với đường kính 300 mm và chiều cao 100 mm được chuẩn bị để thí nghiệm độ mài mòn trong nước ở 28 ngày theo ASTM C1138 [18]. Mẫu thử lăng trụ kích thước $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$ được đúc để thử nghiệm độ bền sunfat của chỉ các loại BTC trong thời gian 6 tháng (180 ngày) với dung dịch Na_2SO_4 10% theo ASTM C1012 [19].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cường độ nén

Kết quả cường độ chịu nén của các loại bê tông ở 7, 28 và 56 ngày là giá trị trung bình cường độ chịu nén của 3 mẫu thử và được trình bày ở Hình 2.



Hình 2. Sự phát triển cường độ chịu nén của các loại bê tông ở 7, 28, 56 ngày.

Kết quả cường độ chịu nén (R_n) của BTCĐC, BTCX10, BTCX20, BTCX30, BTCX40 ở 7 ngày tuổi tương ứng là 36,3 MPa, 37,5 MPa, 34,2 MPa, 33,3 MPa, 28,2 MPa; ở 28 ngày tuổi tương ứng là 54,6 MPa, 55,5 MPa, 56 MPa, 52,1 MPa, 42 MPa; ở 56 ngày tuổi tương ứng là 55 MPa, 60,2 MPa, 60,9 MPa, 57,6 MPa, 49,1 MPa. Kết quả cho thấy, ở tuổi 7 ngày, cường độ chịu nén của BTCX10 cao hơn so với BTCĐC trong khi các tỷ lệ thay thế XLC khác thấp hơn; tỷ lệ thay thế XLC càng lớn thì cường độ chịu nén của BTC càng nhỏ. Ở tuổi 28 ngày, cường độ chịu nén của bê tông BTCX10 và BTCX20 cho kết quả cao hơn so với BTCĐC trong khi bê tông BTCX30 và BTCX40 vẫn thấp hơn; BTCX20 có cường độ chịu nén cao nhất so với các tỷ lệ thay thế XLC khác. Ở tuổi 56 ngày, cường độ chịu nén của BTCX10, BTCX20, BTCX30 cho kết quả cao hơn so với BTCĐC, chỉ còn loại BTCX40 vẫn thấp hơn; bê tông BTCX20 có cường độ chịu nén cao nhất so với các tỷ lệ thay thế XLC khác. Từ kết quả trên có thể nhận định việc XLC khi thay thế XM trong BTC có hiệu quả cải thiện cường độ chịu nén ở tuổi 7, 28 ngày và 56 ngày đối với BTCX10, BTCX20, BTCX30. Nghiên cứu sử dụng xi lò cao Hòa Phát S95 với độ mịn 4520 g/cm^2 lớn hơn so với xi măng, điều này làm tăng độ hoạt tính của XLC ở tuổi sớm và cường độ cũng sẽ phát triển tốt hơn ở tuổi muộn [8]. Thật vậy, thí nghiệm độ hoạt tính của xi lò cao ở 28 ngày cho thấy độ hoạt tính của XLC đạt 105%, kết quả này càng củng cố nhận định trên. Các nghiên cứu vi cấu trúc cho thấy bê tông XLC đặc chắc hơn và có lượng C-S-H lớn hơn so với bê tông xi măng poocăng [20], điều này giải thích cho cơ chế tăng cường độ của bê tông XLC.

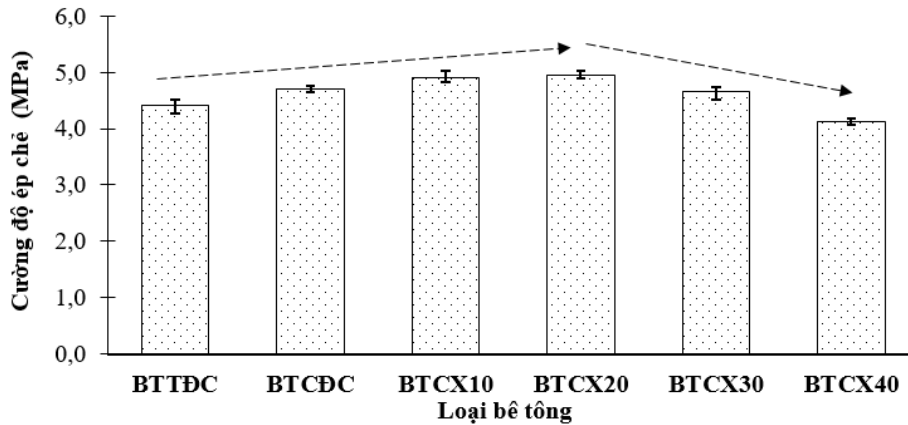
Bê tông cát với tỷ lệ XLC càng tăng có cường độ chịu nén ở tuổi sớm thấp nhưng phát triển mạnh ở tuổi càng muộn. Trong khi ở 7 ngày chỉ có bê tông BTCX10 có cường độ chịu nén lớn hơn BTCĐC nhưng đến tuổi 56 ngày có đến 3 loại BTCX10, BTCX20, BTCX30 có cường độ chịu nén cao hơn so với BTCĐC. Điều này là do XLC có lượng CaO (34,7%) thấp hơn so với xi măng Poocăng (63,2%), vì vậy khi hàm lượng thay thế XLC tăng đồng nghĩa với lượng CaO giảm, kết quả dẫn đến mức độ hydrat hóa ban đầu của XLC thấp nên giảm cường độ tuổi sớm của bê tông [20]. Tuy nhiên, hàm lượng SiO_2 (36,6%) và Al_2O_3 (12,91%) của XLC lại lớn hơn so với xi măng Poocăng, thành phần này lại có tác dụng thúc đẩy quá trình hydrat hóa và tăng sự phát triển cường độ dài hạn (28 ngày, 90 ngày) đối với bê tông XLC [21]. Ở 28 và 56 ngày, BTCX20 phát huy được tác dụng tăng cường độ dài hạn của XLC, đồng thời tỷ lệ XLC trong bê tông cũng không quá lớn đến mức làm chậm phát triển cường độ. Do đó tỷ lệ thay thế 20 % xi lò cao trong BTCX20 cho kết quả tối ưu cường độ chịu nén ở 28 và 56 ngày.

Bê tông thường đối chứng (BTTĐC) có cường độ chịu nén ở tuổi 7 ngày, 28 ngày và 56 ngày đạt 47,5 MPa, 56,9 MPa, 61,1 MPa, kết quả này đều cao hơn so với các cường độ chịu nén của các loại BTC tương ứng với các độ tuổi. Điều này có thể là do các loại BTC sử dụng lượng lớn tro bay (150 kg/m^3) vừa đóng vai trò CKD vừa là vật liệu điền đầy để giảm lượng xi măng trong BTC. Tro bay với phản ứng puzolan chậm và hiệu ứng pha loãng là một phần nguyên nhân gây ra cường độ chịu nén thấp của BTC ở các độ tuổi [22, 23]. Tuy nhiên, ở 56 ngày, BTCĐC đã đạt 90% cường độ so với BTTĐC; 2 loại BTCX10, BTCX20 với sự kết hợp giữa TB và XLC có cường độ chịu nén đạt 98,5% và 99,7% so với BTTĐC. Kết quả này chứng tỏ, với lượng CKD như nhau, hoàn toàn có thể kết hợp TB và XLC thay thế một phần XM tạo ra được BTC có cường độ tương đương với BTT.

3.2. Cường độ ép chế

Cường độ chịu ép chế (R_{ec}) của các loại bê tông ở 28 ngày là giá trị trung bình cường độ ép chế của 3 mẫu thử và được trình bày ở Hình 3.

Cường độ ép chẻ của các loại BTCĐC, BTCX10, BTCX20, BTCX30, BTCX40 ở 28 ngày tuổi tương ứng là 4,4 MPa, 4,7 MPa, 4,91 MPa, 4,95 MPa, 4,65 MPa và 4,15 MPa. Biểu đồ từ Hình 3 cho thấy khi tăng tỷ lệ thay thế XLC từ 0% đến 40% thì cường độ ép chẻ có xu hướng tăng nhẹ và đạt cường độ cao nhất ứng với tỷ lệ XLC thay thế 20% sau đó giảm lại khi tăng tỷ lệ XLC thay thế lên đến 40%. Xu hướng thay đổi cường độ ép chẻ của BTC khi tăng tỷ lệ XLC tương tự như cường độ chịu nén. Rõ ràng XLC với vai trò cải thiện vi cấu trúc làm bê tông đặc chắc hơn, tăng cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ BTC cũng sẽ cao hơn. Kết quả này đồng ý với các nghiên cứu đối với bê tông sử dụng XLC của Jianyong and Yan (2001)[24] và Khatib and Hibbert (2005) [25].

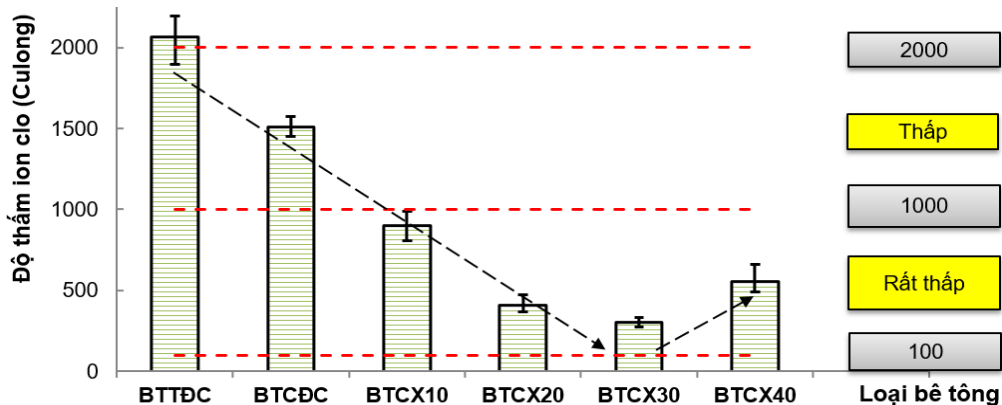


Hình 3. Cường độ ép chẻ của các loại bê tông ở 28 ngày tuổi.

So sánh cường độ ép chẻ của các loại BTC đối với BTTĐC, kết quả cho thấy các loại BTCĐC, BTCX10, BTCX20, BTCX30 tuy có cường độ 28 ngày thấp hơn so với cường độ chịu nén của BTTĐC nhưng lại có cường độ ép chẻ cao hơn. Tỷ số giữa R_n/R_{ec} của các loại BTC trong nghiên cứu đạt từ 9,72 -11,62 đều thấp hơn so với BTTĐC đạt 12,87. Có thể lý giải kết quả này là do các loại BTC sử dụng thành phần chủ yếu là cốt liệu mịn, có diện tích bề mặt riêng của cốt liệu thường lớn hơn so với bê tông thường, do đó độ ma sát giữa các hạt cốt liệu có xu hướng lớn hơn [3]. Ngoài ra, việc sử dụng cát nghiền trong thành phần làm tăng hiệu ứng chèn cài giữa các hạt cốt liệu với nhau, từ đó làm tăng cường độ ép chẻ của BTC.

3.3. Độ thấm clorua

Kết quả thấm ion clo ở 28 ngày của các loại bê tông trong nghiên cứu là giá trị trung bình của 3 mẫu thử và được trình bày ở Hình 4.



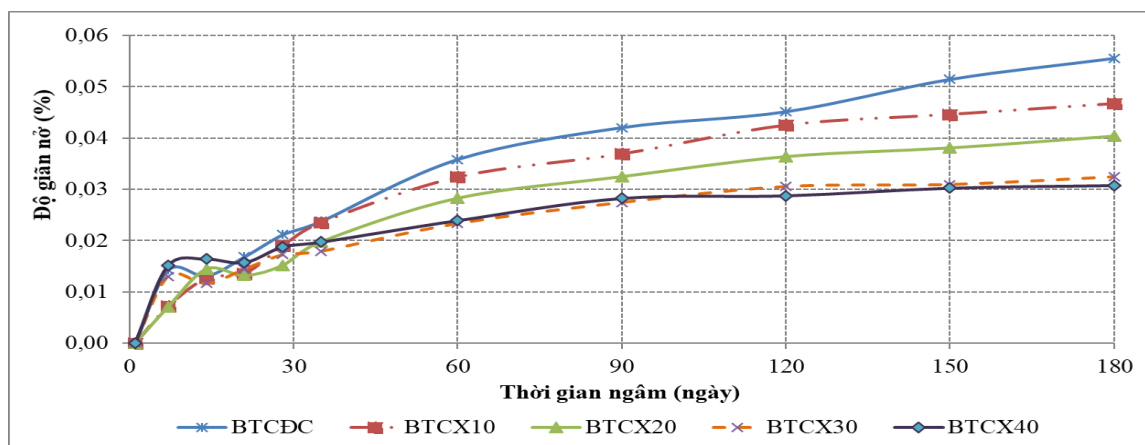
Hình 4. Điện lượng thấm ion clo của các loại bê tông ở 28 ngày tuổi.

Điện lượng thẩm ion clo của các loại BTTĐC, BTCĐC, BTCX10, BTCX20, BTCX30, BTCX40 ở 28 ngày lần lượt là 2069 Culong, 1510 Culong, 902 Culong, 410 Culong, 305 Culong, 555 Culong. Kết quả cho thấy bê tông cát sử dụng xỉ lò cao (BTCXLC) gồm các loại BTCX10, BTCX20, BTCX30, BTCX40 có độ thẩm ion clo đạt mức “rất thấp” theo ASTM C1202, so với mức “thấp” của BTCĐC (không chứa XLC) và mức “trung bình” của BTTĐC. Nếu chỉ sử dụng TB trong bê tông cát (BTCĐC) thì độ thẩm ion clo giảm 27% so với BTTĐC, trong khi nếu BTC sử dụng thêm XLC có thể giảm đến 56% - 85%. BTCX30 có độ thẩm ion clo thấp nhất so với các tỷ lệ XLC khác, giảm 6,8 lần so với BTTĐC và 5 lần so với BTCĐC. Kết quả thẩm ion clo của BTTĐC, BTC chỉ sử dụng TB và BTC sử dụng kết hợp XLC và TB trong nghiên cứu cho thấy sự phù hợp với nghiên cứu của Gesoğlu (2009) [13] và Tibbetts (2020)[12]. Rõ ràng khả năng giảm thẩm clorua của các loại BTC đến từ tác dụng của cả TB và XLC. Thật vậy, TB với phản ứng puzolan làm giảm lượng Ca(OH)_2 và tăng lượng calcium silicate hydrate (C-S-H) làm cấu trúc bê tông đặc chắc hơn giúp cải thiện độ chống thấm nước, chống thấm clorua [20, 26]. Trong khi XLC có tác dụng làm mịn cấu trúc lỗ rỗng đá xi măng, từ đó bê tông ít thấm hơn [20]. Ngoài ra XLC còn có khả năng giữ ion clo trong liên kết, tác động trực tiếp đến khả năng giảm thẩm clorua của bê tông [27, 28]. Tuy nhiên, BTC với tỷ lệ sử dụng XLC đến 40%, tốc độ phát triển cấu trúc bê tông bị giảm mạnh do hiệu ứng pha loãng và sự chậm thủy hóa, từ đó dẫn đến hiệu quả giảm thẩm clorua ở 28 ngày của BTCX40 không bằng BTCX30, nên độ thẩm clorua của BTCX40 sẽ cao hơn so với BTCX30.

Đối với các tính chất về cơ học của BTC như cường độ chịu nén, cường độ ép chế cho thấy tỷ lệ XLC thay thế 20% cho kết quả tối ưu. Tuy nhiên, tính chất độ bền clorua của BTC có giá trị tối ưu với tỷ lệ XLC thay thế 30%. Kết quả này là do cường độ và tính thấm tuy có liên quan với nhau nhưng cơ chế của nó có sự khác nhau. Cường độ và tính thấm đều liên quan đến độ đặc chắc của vi cấu trúc bê tông, nhưng tính thấm của bê tông sẽ bị ảnh hưởng chủ yếu bởi hồ xi măng, nó là một hàm của mức độ kết nối giữa các lỗ rỗng, sự phân bố kích thước lỗ rỗng và tính quanh co của lỗ rỗng [29]. Nhưng việc tăng lượng sử dụng XLC làm tăng khả năng giữ ion clo trong liên kết đồng thời hệ thống lỗ rỗng bê tông mịn hơn, mức độ kết nối với nhau ít hơn, điều này lý giải cho việc tỷ lệ sử dụng XLC để tối ưu độ bền clorua (30% XLC) lớn hơn so với tỷ lệ tối ưu về tính chất cường độ (20% XLC).

3.4. Độ bền sun phat

Kết quả thí nghiệm đo độ giãn nở sunfat của các loại bê tông cát ở các ngày tuổi khác nhau là giá trị trung bình đo được từ 3 mẫu thử và được thể hiện ở Hình 5.



Hình 5. Độ giãn nở do tác động sunfat của các loại bê tông cát.

Kết quả nghiên cứu cho thấy độ giãn nở sunfat của các loại BTC có xu hướng tăng theo thời gian. Tốc độ tăng giãn nở trung bình trong 5 tuần đầu cao hơn so với các tuần tiếp theo. Điều này là do trong 5 tuần đầu sau khi ngâm các loại BTC vẫn đang ở trạng thái thủy hóa và phát triển cường độ mạnh. Sau 5 tuần, mức độ thủy hóa của bê tông giảm lại nên ít ảnh hưởng đến sự giãn nở của các loại bê tông.

Sau 5 tuần ngâm trong dung dịch 10% Na_2SO_4 , kết quả cho thấy bắt đầu có sự khác biệt về mức độ giãn nở của các loại BTC với tỷ lệ XLC khác nhau. BTCĐC, BTCX10, BTCX20 có độ giãn nở sunfat có xu hướng cao hơn so với BTCX30, BTCX40.

Từ 3 tháng đến 6 tháng, BTCX30, BTCX40 chỉ thay đổi tương ứng 8,1% và 15,4% tổng độ giãn nở so với 24,4% của BTCĐC, 21% của BTCX10 và 19,5% của BTCX20. Điều này cho thấy sự ổn định hơn mức độ giãn nở do sunfat của BTCX30 và BTCX40 trong khi xu hướng tiếp tục tăng độ giãn nở đối với BTCĐC, BTCX10, BTCX20.

Sau 6 tháng, độ giãn nở của các loại BTCĐC, BTCX10, BTCX20, BTCX30, BTCX40 lần lượt là 0,056%, 0,047%, 0,04%, 0,032%, 0,031%. Bê tông cát có tỷ lệ XLC càng lớn thì mức độ giãn nở sunfat của bê tông sau 6 tháng càng giảm. BTCX30 và BTCX40 cho kết quả giãn nở do sunfat thấp nhất, chỉ bằng 55% và 57% so với BTCĐC. Như vậy, việc sử dụng XLC trong BTC cho thấy sự cải thiện hiệu quả mức độ giãn nở sunfat của các loại BTC. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự phù hợp với các nghiên cứu về độ bền sunfat của bê tông xi lò cao như Gollop và các cộng sự (1996), Le Hua Yu và cộng sự (2013) [30, 31]. Có thể giải thích vấn đề này như sau, khi tăng tỷ lệ thay thế XLC đối với xi măng làm giảm lượng C_3A vốn là nguyên nhân gây nên giãn nở sunfat; xi lò cao phản ứng làm giảm đáng kể sự hiện diện của $\text{Ca}(\text{OH})_2$ trong bê tông từ đó giảm phản ứng tạo thành ettringite; độ thấm ít hơn của bê tông XLC làm giảm ảnh hưởng của dung dịch sunfat tác động vào bê tông. Ngoài ra, việc sử dụng TB với lượng lên đến 150 kg/m^3 trong BTC cũng góp phần cải thiện độ thấm thấp và độ kiềm thấp do phản ứng puzolan từ đó cải thiện độ bền chống xâm thực của các loại bê tông trong nghiên cứu [32].

Sau 6 tháng (180 ngày), chỉ có loại BTCĐC có độ giãn nở sunfat $> 0,05\%$, các loại BTC dùng XLC đều có độ giãn nở $< 0,05\%$. Như vậy, thành phần CKD của các loại BTC sử dụng XLC đáp ứng yêu cầu tương tự như xi măng bền sunfat cao theo C1157 – 03 [33].

3.5. Độ bền mài mòn trong nước của bê tông cát xi lò cao

Thí nghiệm độ bền mài mòn trong nước với quy trình theo ASTM C1138.



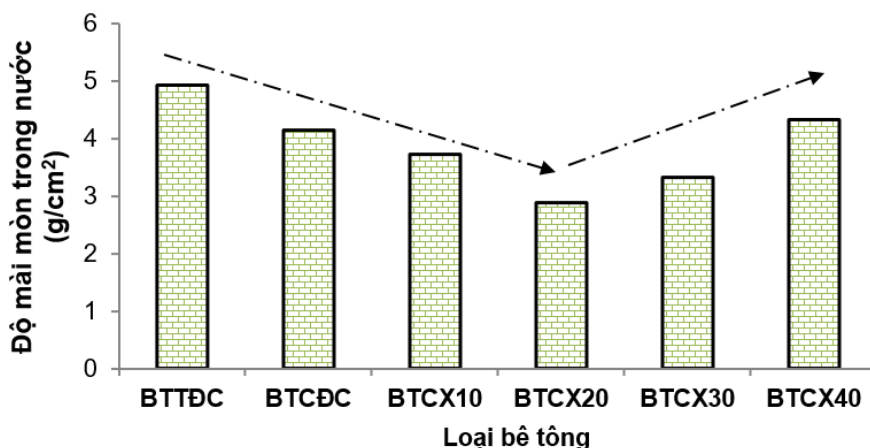
a) Mức độ mài mòn trong nước của BTT



b) Mức độ mài mòn trong nước của BTC

Hình 6. Mức độ mài mòn trong nước của bê tông thường và bê tông cát.

Kết quả thí nghiệm độ mài mòn trong nước của các loại bê tông trong nghiên cứu là giá trị trung bình của 2 mẫu thử và được thể hiện ở Hình 7.



Hình 7. Độ mài mòn trong nước ở 28 ngày của các loại bê tông.

Độ mài mòn trong nước của các loại bê tông BTTĐC, BTCĐC, BTCX10, BTCX20, BTCX30, BTCX40 lần lượt là 4,45 %, 4,15%, 3,72%, 2,89%, 3,53% và 4,32%. Độ mài mòn cao của các loại bê tông thể hiện khả năng chống mài mòn kém và ngược lại. Khi tăng tỷ lệ thay thế XLC, độ mài mòn của các loại BTC có xu hướng giảm và tăng lại, đạt giá trị thấp nhất với tỷ lệ XLC tương ứng 20%. Sự thay đổi của độ mài mòn trong nước khi tăng tỷ lệ thay thế XLC có xu hướng ngược chiều với cường độ chịu nén 28 ngày của các loại BTC. Như chúng ta đã biết, cường độ chịu nén là một trong những yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến sức kháng mài mòn của bê tông và sức kháng mài mòn của bê tông được chứng minh là có mối quan hệ tỷ lệ thuận với cường độ chịu nén của bê tông [8, 25]. Như vậy, xu hướng độ mài mòn trong nước của BTC biến đổi ngược chiều với cường độ chịu nén cho thấy sự phù hợp với các nghiên cứu trên thế giới và đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu. Rõ ràng, XLC khi thay thế một phần xi măng trong BTC giúp tăng độ đặc chắc, cải thiện cường độ chịu nén từ đó ảnh hưởng đến việc tăng sức kháng mài mòn của BTC.

So với BTTĐC, độ mài mòn trong nước của các loại BTC đều cho kết quả thấp hơn. Quan sát bề mặt mài mòn của các loại bê tông thể hiện ở Hình 6 cho thấy BTT có bề mặt lồi lõm trong khi bề mặt mài mòn của các loại BTC có xu hướng phẳng và đều hơn. Rõ ràng, bề mặt đều của các loại BTC sẽ có khả năng chống mài mòn tốt hơn so với bề mặt lồi lõm của BTTĐC, điều này góp phần giải thích cho kết quả độ mài mòn thấp hơn của các loại BTC so với BTTĐC. Như đã biết, ngoài yếu tố cường độ thì tính chất bề mặt và cấu trúc đá xi măng cũng là yếu tố ảnh hưởng rất lớn đến độ mài mòn của bê tông. BTC với kích thước hạt cốt liệu nhỏ dẫn đến tỷ diện cốt liệu lớn hơn nhiều so với BTT. Với lượng CKD đủ lớn, tỷ diện tích tiếp xúc giữa CKD và cốt liệu trong BTC lớn hơn so với BTT, do đó lực dính kết sẽ lớn hơn, khả năng giữ hạt cốt liệu chống lại sự bong tróc do tác động kết hợp giữa lực mài mòn do bị sát và dòng chảy của nước cũng sẽ tốt hơn so với BTT. Ngoài ra, các loại BTC trong nghiên cứu sử dụng loại cát đụn mịn với thành phần khoáng chính là SiO₂, có độ cứng lớn hơn so với đá dăm, số lượng hạt cát nhiều hơn, phân bố đều trong cấu trúc BTC, độ cứng và lượng lớn cát này đóng vai trò quan trọng trong việc giảm độ mài mòn của BTC so với bê tông thường. Như vậy, về mặt tổng thể BTC sẽ có độ chống mài mòn trong nước tốt hơn so với BTT khi cùng cấp cường độ.

3.6. Đánh giá khả năng đáp ứng yêu cầu của các loại bê tông cát xỉ lò cao trong công trình biển

Đối với các công trình biển, các kết cấu bê tông, bê tông cốt thép khi làm việc ở vùng thủy triều được xem là nguy hiểm nhất so với các vùng còn lại do tác động của cơ học và xâm thực hóa học vào bê tông trong vùng này là lớn nhất. Tính chất các loại BTC trong nghiên cứu và các yêu cầu tối thiểu đối với bê tông làm việc ở vùng thủy triều theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 12041:2017[34] và tiêu chuẩn Canada CSA A23.1: 2004 [35] được trình bày ở Bảng 4. Cường độ chịu nén của BTC trong nghiên cứu sử dụng mẫu trụ kích thước 100x200 mm được quy đổi sang mẫu lập phương 150x150x150 mm với hệ số 1,16 được quy định trong TCVN 3118:1993.

Bảng 4. Tính chất của các loại BTC và yêu cầu đối với vật liệu bê tông làm việc ở vùng thủy triều.

Loại bê tông	R _n (MPa) mẫu trụ 100x200 mm	R _n (MPa) quy đổi về mẫu 150x150x150	Thấm ion clo theo ASTM C1202	Tỷ lệ N/CKD
BTTĐC	56,9	66	2069	0,313
BTCĐC	54,6	63,3	1510	0,3
BTCX10	55,5	64,4	902	0,3
BTCX20	56	65	410	0,3
BTCX30	52,1	60,4	305	0,3
BTCX40	42	48,7	555	0,3
Yêu cầu đối với	TCVN 12041: 2017 [34]	B45 (60 MPa)		N/CKD < 0,4
BT vùng thủy triều	Tiêu chuẩn Canada CSA A23.1: 2004 [35]	50 MPa ở 56 ngày	Thấm ion clo theo ASTM C1202 < 1000 Culong	N/CKD < 0,37

Đối chiếu các tính chất của BTC trong nghiên cứu với các yêu cầu tối thiểu của bê tông cho công trình biển làm việc ở vùng thủy triều ta nhận thấy như sau:

- BTTĐC và BTCĐC với cường độ chịu nén đạt 66 MPa, 63 MPa thỏa mãn các yêu cầu về cường độ theo TCVN 12041:2017 tuy nhiên giá trị thấm ion Clo tương ứng là 2069 culong và 1510 Culong lại không thỏa mãn tiêu chuẩn CSA A23.1: 2004 (<1000 culong).
- Các loại BTCX10, BTCX20, BTCX30 đều thỏa mãn các điều kiện đặt ra đối với yêu cầu về cường độ chịu nén, độ thấm clorua và tỷ lệ N/CKD với bê tông làm việc ở vùng thủy triều lên xuống.
- Bê tông cát với tỷ lệ xỉ lò cao thay thế đến 40% có kết quả cường độ chịu nén 28 ngày đạt chỉ 48,7 MPa không thỏa mãn yêu cầu cường độ của bê tông làm việc ở vùng thủy triều.

Kết quả nghiên cứu độ bền sunfat cho thấy thành phần CKD của các loại BTCXLC (BTCX10, BTCX20, BTCX30, BTCX40) có tác dụng tương đương như xi măng bền sunfat mức cao được quy định theo ASTM C1157.

Độ mài mòn trong nước là tính chất khá quan trọng đối với bê tông ứng dụng cho công trình biển đặc biệt đối với kết cấu làm việc ở vùng sóng đánh và vùng có sự kết hợp của sóng

và cát. Rõ ràng việc sử dụng BTC có ưu điểm lớn trong việc cải thiện độ mài mòn trong nước so với BTTĐC.

Với các phân tích trên cho thấy các loại bê tông cát BTCX10, BTCX20, BTCX30 hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu để ứng dụng làm kết cấu bê tông, bê tông cốt thép trong công trình biển.

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm về các tính chất cơ học và độ bền của BTC xỉ lò cao và đánh giá khả năng ứng dụng trong công trình biển, có thể rút ra một số kết luận như sau:

Với tỷ lệ thay thế XLC từ 10-40%, ở mỗi tuổi của bê tông cát có một tỷ lệ xỉ lò cao tương ứng để tối ưu cường độ chịu nén. Tỷ lệ xỉ lò cao thay thế càng lớn sẽ tối ưu cường độ chịu nén ở tuổi càng muộn. Tỷ lệ XLC thay thế 10% tối ưu cường độ chịu nén của BTC ở 7 ngày tuổi, XLC thay thế 20% tối ưu ở 28 ngày và 56 ngày tuổi.

Với tỷ lệ thay thế XLC từ 10-40%, cường độ ép chẻ của bê tông cát ở 28 ngày đạt giá trị lớn nhất với tỷ lệ thay thế từ 10-20% và có xu hướng giảm với tỷ lệ thay thế XLC lớn hơn 20%

Các loại bê tông cát có sử dụng xỉ lò cao đều cho kết quả thấm ion clo ở 28 ngày thấp hơn so với bê tông cát không sử dụng xỉ lò cao. Với tỷ lệ thay thế XLC từ 10-40% cho kết quả thấm clorua thấp nhất với 30% XLC.

Các loại BTC sử dụng XLC đều có độ giãn nở sunfat < 0,05% sau 6 tháng ngâm trong dung dịch Na₂SO₄ 10%. Thành phần CKD của BTCXLC có tác dụng tương đương như xi măng bền sunfat mức cao. Tỷ lệ thay thế XLC càng tăng, độ giãn nở sunfat sau 6 tháng của BTC càng giảm.

Với việc đáp ứng được yêu cầu về cường độ cũng như tính chất độ bền của bê tông cho công trình biển theo tiêu chuẩn hiện hành, BTCX10, BTCX20, BTCX30 có thể được ứng dụng trong thi công thực tế các kết cấu bê tông, bê tông cốt thép trong môi trường biển ở điều kiện Việt Nam.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài “*Nghiên cứu sản xuất các cấu kiện bê tông hạt nhỏ đúc sẵn có độ bền cao từ nguyên liệu tro bay Vũng Áng và cát mịn trên địa bàn Hà Tĩnh*” của tỉnh Hà Tĩnh. Nhóm nghiên cứu gửi lời cảm ơn tới công ty TNHH Thương mại và Dịch vụ Vận tải Việt Hải hỗ trợ sản xuất và ứng dụng cấu kiện bê tông hạt nhỏ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. NF P18 500, Bétons de sables, 1995: French.
- [2]. Sablocrete, Synthèse du Projet National de Recherche et Développement, Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation, Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées LCPC, 1994
- [3]. T. S. Nguyễn, Nghiên cứu thành phần, tính chất cơ học và khả năng ứng dụng bê tông cát để xây dựng đường ô tô ở Việt Nam, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Giao thông vận tải, 2011.
- [4]. Nguyễn Thanh Sang, Lê Thanh Hà, Bê tông cát sử dụng phụ gia tro trấu cho các vùng thiếu đá dăm, Tạp chí Giao thông vận tải, 8 (2010) 33-36.

- [5]. D. Benamara, L. Zeghichi, B. Mezghiche, High Performance sand concrete, formulation, physico-mechanical properties and durability, Benamara Project, 2015.
- [6]. Nguyễn Thanh Sang, Trần Lê Thắng, Nguyễn Quang Ngọc, Bê tông cát nhiều tro bay làm lớp móng mặt đường ô tô, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 30 (2010) 84-90.
- [7]. J. Chaohua., G. Wenwen, C. Hui, Z. Yuliang, J. Chen, Effect of filler type and content on mechanical properties and microstructure of sand concrete made with superfine waste sand, Construction and Building Materials, 192 (2018) 442-449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.167>
- [8]. A. M. Neville, Properties of concrete, Fifth Edition, Pearson, England, 2012.
- [9]. E. Özbay, M. Erdemir, H. İ. Durmuş, Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties–A review, Construction and Building Materials, 105 (2016) 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>
- [10]. Y. Yang, B. Zhan, J. Wang, Y. Zhang, W. Duan, Damage evolution of cement mortar with high volume slag exposed to sulfate attack, Construction and Building Materials, 247 (2020) 118626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118626>
- [11]. X. Hu, Z. Shi, C. Shi, Z. Wu, B. Tong, Z. Ou, G. De Schutter, Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components, Construction and Building Materials, 149 (2017) 406-415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.113>
- [12]. C.M. Tibbetts, C.C. Ferraro, K.A. Riding, T.G. Townsend, Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials, Cement and Concrete Composites, 107 (2020) 103491. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103491>
- [13]. M. Gesoğlu, E. Güneyisi, E. Özbay, Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, Construction and Building Materials, 23 (2009) 1847-1854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015>
- [14]. ACI 211.4R 08, Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials, in American Concrete Institute, 2008.
- [15]. TCVN 9337:2012, Bê tông nặng- Phương pháp xác định độ thấm ion clo bằng phương pháp đo điện lượng, 2012.
- [16]. TCVN 3118:1993, Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ chịu nén, 1993.
- [17]. TCVN 3120:1993, Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ kéo bừa, 1993.
- [18]. ASTM C1138, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete(Underwater Method), 2019.
- [19]. ASTM C1012, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, 2012.
- [20]. R. Siddique, M. I. Khan, Supplementary cementing materials, Springer Science & Business Media, Berlin, 2011.
- [21]. A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag, Journal of Cleaner Production, 162(2017) 1407-1417.
- [22]. H. Yazıcı, M.Y. Yardımcı, S. Aydın, A.S. Karabulut, Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, Construction and Building Materials, 23 (2009) 1223-1231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003>
- [23]. W. Wongkeo, A. Ngamjarrojana, A. Chaipanich, Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume, Materials & Design, 64 (2014) 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.042>
- [24]. J. Li, Y. Yao, A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete, Cement and Concrete Research, 31 (2001) 1203-1206. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00539-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00539-7)
- [25]. J.M. Khatib, J. J. Hibbert, Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin, Construction and Building Materials, 19 (2005) 460-472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.017>

- [26]. S. Mengxiao, W. Qiang, Z. Zhikai, Comparison of the properties between high-volume fly ash concrete and high-volume steel slag concrete under temperature matching curing condition, *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 649-655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.134>
- [27]. Y. Xu, The influence of sulphates on chloride binding and pore solution chemistry, *Cement and Concrete Research*, 27 (1997) 1841-1850. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00196-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00196-8)
- [28]. R. Luo, Cai, Yuebo, C. Wang, X. Huang, Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 1-7. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00712-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00712-3)
- [29]. D.H. Phạm, T.T. Trần, K.C. Thái, V.Đ. Đào, T.S. Nguyễn, *Thiết kế kết cấu theo độ bền*, Nhà Xuất Bản Giao thông Vận tải, 2016.
- [30]. R. Gollop, H. Taylor, Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. IV. Reactions of a slag cement paste with sodium and magnesium sulfate solutions, *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 1013-1028. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00089-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00089-0)
- [31]. L.H. Yu, S. X. Zhou, H. Ou, Experimental Investigation on Properties of High Performance Concrete with Mineral Admixtures in Pavement of Highway, in *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 2013.
- [32]. V. M. Malhotra, P. K. Mehta, *High-performance, High-volume Flyash Concrete for Building Sustainable and Durable Structures*, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Incorporated, 2008.
- [33]. ASTM C1157, *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*, 2017.
- [34]. TCVN 12041:2017, *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Yêu cầu chung về thiết kế độ bền lâu và tuổi thọ trong môi trường xâm thực*, 2017.
- [35]. CSA-A23.1/A23.2, *Concrete materials and methods of concrete construction*, 2014.