ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

BÁO CÁO TÓM TẮT

ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG

NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT CƠ HỌC VÀ ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO SỬ DỤNG HÀM LƯỢNG TRO BAY CAO LÀM CỐT LIỆU MỊN VÀ ỨNG DỤNG CHO CÔNG TRÌNH BIỂN KHU VỰC MIỀN TRUNG

Mã số: T2023-06-06

Chủ nhiệm đề tài: ThS. Nguyễn Hữu Tuân
Đơn vị: Khoa Kỹ thuật Xây dựng

Đà Nẵng, 3/2025

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

BÁO CÁO TÓM TẮT

ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG

NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT CƠ HỌC VÀ ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO SỬ DỤNG HÀM LƯỢNG TRO BAY CAO LÀM CỐT LIỆU MỊN VÀ ỨNG DỤNG CHO CÔNG TRÌNH BIỂN KHU VỰC MIỀN TRUNG

Mã số: T2023-06-06

Xác nhận của cơ quan chủ trì đề tài
KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG

Chủ nhiệm đề tài

PGS. TS. Võ Trung Hùng

ThS. Nguyễn Hữu Tuân

DANH SÁCH THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU

STT	Họ và tên	Đơn vị công tác và lĩnh vực chuyên môn
1	PGS. TS. Hồ Văn Quân	Phòng Cơ sở vật Chất - Trường ĐH Sư phạm Kỹ thuật; Kỹ thuật XD Công trình Giao thông
2	ThS. Huỳnh Võ Duyên Anh	Khoa Kỹ thuật Xây dựng - Trường ĐH Sư phạm Kỹ thuật; Kỹ thuật XD Công trình Giao thông

MỤC LỤC

Danh mục các bảng iv
Danh mục các hình ảnh, đồ thị v
Danh mục các chữ viết tắt, các kí hiệu vii
Thông tin kết quả nghiên cứu viii
MỞ ĐẦU 1
1. Tính cấp thiết của đề tài 1
2. Mục tiêu nghiên cứu 3
4. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu 3
5. Kết cấu của đề tài 4
6. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn của đề tài 4
Chương 1: NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN.. 5
1.1. Các nghiên cứu về sử dụng tro bay chế tạo bê tông tính năng cao trên thế giới 5
1.2. Các nghiên cứu về sử dụng tro bay chế tạo bê tông tính năng cao ở trong nước 18
1.3. Kết luận chương 1 21
Chương 2: XÁC ĐỊNH CÁC CHỈ TIÊU, TÍNH CHẤT CỦA VẬT LIỆU CHẾ TẠO BÊ TÔNG, THIẾT KẾ THÀNH PHẦN BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO SỬ DỤNG TRO BAY THAY THẾ MỘT PHẦN CÁT SÔNG VÀ SỬ DỤNG XỈ LÒ CAO, MUỘI SILIC THAY THẾ MỘT PHẦN XI MĂNG 22
2.1. Vật liệu sử dụng chế tạo bê tông xi măng 22
2.1.1. Xi măng 22
2.1.2. Tro bay 23
2.1.3. Xỉ lò cao nghiền mịn 24
2.1.4. Muội silic 26
2.1.5. Phụ gia siêu dẻo 27
2.1.6. Cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ 28
2.1.7. Nước trộn hỗn hợp bê tông 30
2.2. Thiết kế thành phần các loại bê tông sử dụng tro bay thay thế một phần cốt liệu mịn 30
2.2.1. Xác định cường độ yêu cầu của bê tông 31
2.2.2. Xác định các thành phần của bê tông 31
2.2.3. Thiết kế thành phần các bê tông tính năng cao 36

2.3. Kết luận Chương 2 39

Chương 3: NGHIÊN CỨU TRONG PHÒNG XÁC ĐỊNH CÁC TÍNH CHẤT CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG TƯƠI, BÊ TÔNG CỨNG VÀ DỰ BÁO TUỔI THỌ CỦA CÁC CÔNG TRÌNH BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO 40

3.1. Công tác đúc, bảo dưỡng các mẫu bê tông và thí nghiệm xác định các tính chất của hỗn hợp bê tông tươi 40

3.1.1. Cân vật liệu và trộn hỗn hợp bê tông 40

3.1.2. Đúc và bảo dưỡng các mẫu bê tông xi măng 40

3.2. Phương pháp thí nghiệm 41

3.2.1. Khối lượng thể tích của bê tông tươi 41

3.2.2. Độ rỗng 42

3.2.3. Cường độ kéo uốn và cường độ nén 42

3.2.4. Vận tốc xung siêu âm 43

3.2.5. Độ hấp thụ nước 44

3.2.6. Độ thấm clorua và điện trở suất bề mặt 46

3.2.7. Phân tích vi cấu trúc của các bê tông bằng hình SEM 47

3.3. Thí nghiệm xác định một số tính chất của hỗn hợp bê tông tươi 47

3.3.1. Độ sụt 47

3.3.2. Khối lượng thể tích 48

3.4. Thí nghiệm xác định một số tính chất cơ, lý và độ bền của các loại bê tông tính năng cao 48

3.4.1. Độ rỗng 49

3.4.2. Cường độ kéo uốn và cường độ nén 50

3.4.3. Vận tốc xung siêu âm 53

3.4.4. Độ hấp thụ nước mao dẫn 54

3.4.5. Điện trở suất bề mặt và độ thấm clorua 57

3.4.6. Chụp hình SEM 60

3.5. Dự báo tuổi thọ của các công trình bê tông cốt thép sử dụng bê tông tính năng cao ở vùng biển miền Trung 62

3.6. Phân tích hiệu quả kinh tế và tác động môi trường. 65

3.7. Kết luận Chương 3. 66

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ 68

1. Kết luận 68

2. Kiến nghị 68

TÀI LIỆU THAM KHẢO 70
PHỤ LỤC ..... a
THUYẾT MINH ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
HỢP ĐỒNG TRIỂN KHAI
ĐƠN ĐỀ NGHỊ GIA HẠN THỜI GIAN THỰC HIỆN ĐỀ TÀI
BÁO CÁO TÌNH HÌNH THỰC HIỆN ĐỀ TÀI
PHỤ LỤC HỢP ĐỒNG LẦN 2 (GIA HẠN)
MỤC LỤC MINH CHỨNG SẢN PHẨM CỦA ĐỀ TÀI
BỘ MINH CHỨNG SẢN PHẨM ĐỀ TÀI

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1.1. Độ bền của các bê tông khi ngâm trong dung dịch a xit sunfuric [29] 17
Bảng 1.2. Độ bền của các bê tông khi ngâm trong dung dịch magie sunfat [17]..... 17
Bảng 2.1. Các chỉ tiêu chất lượng của xi măng PC 22
Bảng 2.2. Các chỉ tiêu cơ, lý của xi măng PC50 23
Bảng 2.3. Thành phần hóa học của xi măng PC50 23
Bảng 2.4. Các tính chất yêu cầu của tro bay 24
Bảng 2.5. Các tính chất của tro bay loại F 24
Bảng 2.6. Yêu cầu kỹ thuật của XL nghiền mịn theo ASTM C 989 25
Bảng 2.7. Yêu cầu kỹ thuật của XL nghiền mịn theo TCVN 11586:16 25
Bảng 2.8. Các chỉ tiêu của xỉ lò cao S95 Hòa Phát nghiền mịn 25
Bảng 2.9. Các chỉ tiêu chất lượng qui định của muội silic 26
Bảng 2.10. Các chỉ tiêu chất lượng của muội silic Hoa Sen 26
Bảng 2.11. Thành phần hóa học của xi măng, tro bay, xỉ lò cao và muội silic 26
Bảng 2.12. Yêu cầu về độ đồng nhất của phụ gia hóa học 27
Bảng 2.13. Các chỉ tiêu của phụ gia siêu dẻo Basf 8713 28
Bảng 2.14. Thành phần hạt của cốt liệu lớn theo ASTM C33 28
Bảng 2.15. Các chỉ tiêu chất lượng yêu cầu của cốt liệu lớn 28
Bảng 2.16. Các chỉ tiêu cơ, lý của đá dăm D_{max} = 12.5 mm 29
Bảng 2.17. Thành phần hạt yêu cầu của cát 29
Bảng 2.18. Các chỉ tiêu chất lượng yêu cầu của cát 29
Bảng 2.19. Các chỉ tiêu cơ, lý của cát sông 30
Bảng 2.20. Đề xuất độ sụt cho bê tông có và không có phụ gia siêu dẻo 32
Bảng 2.21. Kích thước lớn nhất của cốt liệu lớn 32
Bảng 2.22. Thể tích của đá dăm đã đầm chặt trên một đơn vị thể tích bê tông 32
Bảng 2.23. Lượng nước trộn và lượng không khí của bê tông tươi trên cơ sở sử dụng cát có độ rỗng 35% 33
Bảng 2.24. Gía trị tối đa N/CKD khuyên dùng đối với bê tông được sản xuất không có phụ gia siêu dẻo 33
Bảng 2.25. Gía trị tối đa N/CKD khuyên dùng đối với bê tông được sản xuất không có phụ gia siêu dẻo 33
Bảng 2.26. Thành phần vật liệu của các loại bê tông 39
Bảng 3.1. Đánh giá mức độ thấm clorua của bê tông [28] 46
Bảng 3.2. Hệ số khuếch tán clorua D_a và hệ số m của các HPC 63
Bảng 3.3. Chi phí, CO_2-E và EC cho 1 kg nguyên liệu thô [5, 72] 65
Bảng 3.4. Chi phí, CO_2-E và EC cho việc sản xuất 1 m^3 bê tông trên một đơn vị tuổi thọ sử dụng của các công trình BTCT 66

DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH, ĐỒ THỊ

Hình 1.1. . Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến độ bền gãy (a) và năng lượng gãy (b) ở 28 ngày của HPC [9] 5

Hình 1.2. Ảnh hưởng của hàm lượng TB cường độ nén của HPC: N/CKD = 0,18 (a), N/CKD = 0,16 (b), N/CKD = 0,14 (c), N/CKD = 0,12 (d) [12]..... 6

Hình 1.3. Ảnh hưởng của hàm lượng TB đến cường độ nén (a) và co ngót khô của HPC (b) [16]..... 7

Hình 1.4. Cường độ nén (a), cường độ ép chẻ (b) và cường độ kéo uốn (c) của các bê tông tro bay [19] 9

Hình 1.5. Cường độ nén và độ sâu bị mài mòn của các bê tông tro bay [20] 10

Hình 1.6. Cường độ nén của các bê tông tro bay [21]..... 10

Hình 1.7. Chiều sâu cacbonat hóa của các bê tông khi chịu ứng suất nén [21] 11

Hình 1.8. Chiều sâu cacbonat hóa của các bê tông khi chịu nhiệt độ [21]..... 11

Hình 1.9. Độ bền đông tan băng của các bê tông khi chịu ứng suất nén [22]..... 11

Hình 1.10. Cường độ nén của các bê tông [24] 12

Hình 1.11. Chiều sâu cacbonat hóa của các bê tông ở các điều kiện nhiệt độ khác nhau [24]..... 12

Hình 1.12. Độ thấm clorua của các bê tông ở các nhiệt độ khác nhau [24] 13

Hình 1.13. Co ngót khô và từ biến của các bê tông [25] 13

Hình 1.14. Cường độ nén của vữa TB [26] 14

Hình 1.15. Độ sụt (a) và khối lượng thể tích (b) của các bê tông TB [27]..... 14

Hình 1.16. . Cường độ nén và kéo uốn của các bê tông TB khi bảo dưỡng trong nước (a, c) và bảo dưỡng trong không khí (b, d) [27]..... 15

Hình 1.17. Cường độ nén (a), ép chẻ (b) và kéo uốn (c) của các bê tông TB [29]... 17

Hình 1.18. Cường độ dòng điện đi qua các mẫu bê tông cốt thép tiếp xúc với dung dịch NaCl [30]..... 17

Hình 1.19. Ảnh hưởng của tỉ lệ TB tới độ chảy xòe của vữa nhóm 1 và lượng nước yêu cầu của vữa nhóm 2 [51] 18

Hình 1.20. Tỉ lệ độ chảy xòe của hỗn hợp vữa nhóm 1 sử dụng tro bay so với mẫu vữa đối chứng F00 [51].. 19

Hình 1.21. Cường độ chịu nén của nhóm vữa 1 với tỉ lệ N/X bằng 0,6 [51] 19

Hình 1.22. Cường độ chịu nén của nhóm vữa 2 cố định độ chảy xòe [51] 19

Hình 1.23. Cường độ kéo uốn (a) và cường độ nén của các bê tông [52] 20

Hình 2.1. Thành phần hạt của đá dăm và cát..... 30

Hình 3.1. Đúc các mẫu bê tông..... 41

Hình 3.2. Thí nghiệm xác định cường độ kéo uốn và cường độ nén của các mẫu bê tông HPC 43
Hình 3.3. Thí nghiệm xác định vận tốc xung siêu âm của các mẫu bê tông HPC. .. 44
Hình 3.4. Sơ đồ thí nghiệm hấp thụ nước của các mẫu bê tông 45
Hình 3.5. Thí nghiệm độ hấp thụ nước của các mẫu bê tông HPC 45
Hình 3.6. Thí nghiệm độ thấm clorua và điện trở suất bề mặt của các mẫu bê tông HPC 47
Hình 3.7. KLTT của các hỗn hợp bê tông HPC 48
Hình 3.8. Độ rỗng của các bê tông HPC..... 49
Hình 3.9. Cường độ uốn (a) và cường độ nén (b) của các HPC 50
Hình 3.10. Quan hệ giữa cường độ uốn - độ rỗng (a), cường độ nén - độ rỗng (b) của các bê tông 52
Hình 3.11. Vận tốc xung siêu âm của các mẫu bê tông HPC 53
Hình 3.12. Quan hệ giữa VTXSA – cường độ uốn (a) và VTXSA – cường độ nén (b) của các bê tông HPC..... 54
Hình 3.13. Độ hấp thụ nước mao dẫn của các bê tông HPC: a) 7 ngày, b) 28 ngày, c) 56 ngày, d) 90 ngày, e) 150 ngày 56
Hình 3.14. Quan hệ giữa độ HTN mao dẫn và độ rỗng của các bê tông 57
Hình 3.15. ĐTSBM (a) và ĐTCL (b) của các bê tông HPC..... 58
Hình 3.16. Quan hệ giữa ĐTCL – độ rỗng (a), ĐTCL và ĐTSBM (b), và ĐTCL và ĐHTN ở 168 h (c) của các bê tông HPC 60
Hình 3.17. Hình chụp SEM của các HPC ở 29 ngày và 150 ngày: 0TB (a), 35TB (b), 50TB (c), 65TB (d), 35XL (e), 10MS (f) 62
Hình 3.18. Hồi quy xác định hệ số m của HPC 0TB và 35TB 64
Hình 3.19. Tuổi thọ sử dụng của các công trình BTCT ở vùng thủy triều sử dụng các HPC 64

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT, CÁC KÍ HIỆU

ASTM	American society of testing materials (Hiệp hội Vật liệu và Thử nghiệm Hoa Kỳ)
ACI	American concrete institute (Viện bê tông Hoa Kỳ)
BTTB	Bê tông tro bay
C	Cát
CS	Cát sông
Đ	Đá dăm
ĐR	Độ rỗng
ĐHTN	Độ hấp thụ nước
HHBT	Hỗn hợp bê tông
KLTT	Khối lượng thể tích
I	Độ hấp thụ nước
MMBM	Mài mòn bề bặt
SD	Phụ gia siêu dẻo
TB	Tro bay
CKD	Chất kết dính
BTXM	Bê tông xi măng
BTCT	Bê tông cốt thép
KCBT	Kết cấu bê tông
N	Nước
N/CKD	Tỉ lệ nước-chất kết dính
N/X	Tỉ lệ nước-xi măng
Q	Độ thấm clorua
R_n	Cường độ nén của bê tông
R_{ku}	Cường độ kéo uốn của bê tông
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
X	Xi măng
V	Vận tốc xung siêu âm
ρ_c	Khối lượng riêng của cát
$\rho_đ$	Khối lượng riêng của đá
ρ_{PGK}	Khối lượng riêng của phụ gia khoáng
ρ_N	Khối lượng riêng của nước
ρ_{TB}	Khối lượng riêng của tro bay
ρ_x	Khối lượng riêng của xi măng

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐH SƯ PHẠM KỸ THUẬT

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

1. Thông tin chung

Tên đề tài: ***Nghiên cứu tính chất cơ học và độ bền của bê tông tính năng cao sử dụng hàm lượng tro bay cao làm cốt liệu mịn và ứng dụng cho công trình biển khu vực miền Trung***

Mã số: T2023-06-06

Chủ nhiệm: ThS. Nguyễn Hữu Tuân

Thành viên tham gia: TS. Hồ Văn Quân, ThS. Huỳnh Võ Duyên Anh

Cơ quan chủ trì: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng

Thời gian thực hiện: Từ tháng 3 năm 2024 đến tháng 2 năm 2025

2. Mục tiêu

Thiết kế thành phần bê tông tính năng cao (HPC) có cường độ nén trung bình 80 MPa, độ thấm clorua ở 28 ngày ở mức rất thấp < 1000 Culong, trong thành phần bê tông sử dụng tro bay thay thế một phần cốt liệu mịn. Xác định ảnh hưởng của tro bay cũng như xỉ lò cao và muội silic đến tính công tác, khối lượng thể tích của bê tông tươi; độ rỗng, cường độ nén, cường độ kéo uốn, độ hấp thụ nước, điện trở suất bề mặt, độ thấm clorua của bê tông cứng. Phân tích vi cấu trúc các bê tông bằng hình chụp SEM, phân tích hiệu quả kinh tế, tác động môi trường và dự báo tuổi thọ của các công trình bê tông cốt thép (BTCT) ở môi trường biển khu vực miền Trung khi sử dụng các bê tông HPC chứa các phụ gia khoáng.

3. Tính mới và sáng tạo

Việc khai thác cát sông quá mức không những làm cạn kiệt nguồn tài nguyên cát sông mà còn gây ra nhiều vấn đề tiêu cực như ô nhiễm nguồn nước, thay đổi dòng chảy, trượt, sụt lở bờ sông gây mất an toàn cho các khu vực dân cư và các công trình dọc sông. Nguồn cát sông ngày càng khan hiếm chủ yếu là do khai thác quá mức, một phần do tác động của các công trình thủy điện ở thượng nguồn gây hạn chế bồi lắng, tái tạo các mỏ cát trên sông.

Ở nước ta hiện có khoảng 31 nhà máy nhiệt điện đốt than đang hoạt động và phát thải ra khoảng 18 triệu tấn tro thải/năm, tổng tỷ lệ tiêu thụ tro thải tại các nhà máy nhiệt điện chỉ chiếm khoảng 60%, phần tro thải còn lại được đổ tại các bãi chôn lấp, chiếm diện tích bãi chứa và có nguy cơ gây ô nhiễm môi trường rất cao. Việc nghiên cứu sử dụng tro bay thay thế một phần cát sông để chế tạo HPC sẽ tiêu thụ được một lượng tro bay lớn thay vì cát sông, giảm khai thác tài nguyên cát sông và hạn chế ô nhiễm môi trường và có ý nghĩa rất lớn trong vấn đề phát triển bền vững.

4. Tóm tắt kết quả nghiên cứu

Chế tạo được các bê tông HPC sử dụng tro bay thay thế (35-65)% cát sông có cường độ và độ bền vượt trội so với bê tông sử dụng hoàn toàn cát sông và tương đương với các HPC sử dụng muội silic hoặc xỉ lò cao thay thế một phần xi măng. Các bê tông HPC này hoàn toàn có thể sử dụng để xây dựng các công trình ở môi trường xâm thực mạnh như môi trường biển.

5. Tên sản phẩm

01 Bài báo khoa học đã được chấp nhận đăng trên Tạp chí Quốc tế uy tín: ***Innovative infrastructure solutions*** thuộc danh mục Scopus, Q2.

01 Bài báo khoa học đã được đăng trên Tạp chí Giao thông Vận tải.

6. Hiệu quả, phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu và khả năng áp dụng

- Phương thức chuyển giao: Sản phẩm của đề tài được bàn giao cho Bộ môn Cầu đường và Khoa Kỹ thuật Xây dựng - Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – ĐH Đà Nẵng. Số 48 Cao Thắng, P. Thanh Bình, Quận Hải Châu, TP. Đà Nẵng.

- Tác động và lợi ích mang lại của kết quả nghiên cứu: Kết quả nghiên cứu là tài liệu tham khảo tốt, giúp bổ sung kiến thức cho các kỹ sư, các sinh viên và học viên cao học ngành Xây dựng. Sử dụng tro bay thay thế cát sông trong HPC không những cải thiện cường độ và độ bền của bê tông mà còn hạn chế được việc sử dụng cát sông ngày càng cạn kiệt, giảm khai thác các nguồn tài nguyên thiên nhiên, giảm thiểu tiêu thụ năng lượng, giảm giá thành và góp phần bảo vệ môi trường.

- Khả năng áp dụng: Kết quả nghiên cứu của đề tài cho thấy hoàn toàn có thể sử dụng tro bay thay thế một phần cát sông để chế tạo bê tông HPC có độ bền cao và có thể ứng dụng cho các công trình ở môi trường xâm thực như môi trường biển.

Đà Nẵng, ngày tháng năm 2025

TM. Hội đồng Khoa	**Chủ nhiệm đề tài**
Chủ tịch	
TS. Phan Tiến Vinh	**ThS. Nguyễn Hữu Tuân**

XÁC NHẬN CỦA TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

KT. HIỆU TRƯỞNG

PHÓ HIỆU TRƯỞNG

PGS. TS. Võ Trung Hùng

INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

1. General Information

Project Title: ***Study on the mechanical properties and durability of high-performance concrete using high fly ash content as fine aggregate for marine structures in the Central region***

Code number: T2023-06-06

Coordinator: MSc. Nguyen Huu Tuan

Research Team Member: Dr. Ho Van Quan, MSc. Huynh Vo Duyen Anh

Implementing institution: University of Technical Education – The University of Danang

Duration: From March 2024 to February 2025

2. Objective(s)

Design high-performance concrete (HPC) with an average compressive strength of 80 MPa and very low chloride permeability at 28 days (< 1000 Coulombs). The concrete mixture incorporates fly ash as a partial replacement for fine aggregates. Evaluate the effects of fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBFS), and silica fume on the workability and bulk density of fresh concrete, as well as on the porosity, compressive strength, flexural tensile strength, water absorption, surface resistivity, and chloride permeability of hardened concrete. Perform microstructural analysis using SEM imaging, assess economic efficiency, evaluate environmental impacts, and predict the service life of reinforced concrete structures (RC) exposed to marine environments in Central Vietnam when using HPC with mineral admixtures.

3. Creativeness and innovativeness

Excessive river sand mining not only depletes river sand resources but also causes numerous negative impacts, such as water pollution, alterations in river flow, landslides, and riverbank erosion, posing safety risks to residential areas and infrastructure along the river. The increasing scarcity of river sand is primarily due to over-extraction and, to some extent, the influence of upstream hydropower projects, which limit sediment deposition and the natural replenishment of sand deposits in rivers.

Currently, Vietnam has approximately 31 coal-fired power plants in operation, generating around 18 million tons of coal ash annually. However, only about 60% of this ash is utilized, while the remaining portion is disposed of in landfills, occupying large areas and posing a significant risk of environmental pollution. Researching the use of fly ash as a partial replacement for river sand in producing high-performance concrete (HPC) can consume a substantial amount of fly ash instead of river sand, thereby reducing sand mining, mitigating environmental pollution, and contributing significantly to sustainable development.

4. Research Results

High-performance concrete (HPC) incorporating fly ash as a partial replacement (35-65%) for river sand has been successfully developed. This concrete exhibits superior strength and durability compared to conventional HPC made with 100% river sand and is comparable to HPC incorporating silica fume or ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as a partial cement replacement. These HPC mixtures are highly suitable for construction in aggressive environments, including marine conditions.

5. Products

01 scientific paper accepted for publication in a reputable international journal: ***Innovative Infrastructure Solutions***, indexed in Scopus, Q2.

01 scientific paper published in the Transport magazine.

6. Effects, transfer alternatives of research results, and applicability

- Technology Transfer Method: The project's outcomes have been handed over to the Department of Bridge and Road Engineering, the Faculty of Civil Engineering at University of Technical Education – The University of Danang, located at 48 Cao Thang Street, Thanh Binh Ward, Hai Chau District, Da Nang City.

- Impact and Benefits of the Research Results: The research findings serve as a valuable reference, enriching the knowledge base of engineers, students, and graduate learners in the field of Civil Engineering. The use of fly ash as a replacement for river sand in High-Performance Concrete (HPC) not only enhances the strength and durability of concrete but also mitigates the depletion of river sand resources, reduces the exploitation of natural resources, minimizes energy consumption, lowers costs, and contributes to environmental protection.

- Applicability: The research results demonstrate that fly ash can effectively replace a portion of river sand in the production of durable HPC. This material can be applied to structures exposed to aggressive environments, such as marine environments.

MỞ ĐẦU

1. TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI

Bê tông là một trong những vật liệu xây dựng linh hoạt và được sử dụng rộng rãi nhất trên toàn cầu. Nó có cường độ cao và bền, dễ bảo trì hơn, có khả năng chống cháy, sử dụng đơn giản và dễ tạo hình [1]. Mỗi năm, có hơn 21 tỉ tấn bê tông được sản xuất trên toàn thế giới [2], tiêu thụ khoảng 40-50 tỷ tấn cát sông chỉ riêng cho các dự án xây dựng, tăng 200% trong 20 năm qua, dẫn đến cuộc khủng hoảng toàn cầu về cạn kiệt tài nguyên cát sông [3, 4].

Hiện nay, Việt Nam đang bước vào giai đoạn bùng nổ phát triển kinh tế, trong đó có hệ thống kết cấu hạ tầng, hàng chục vạn công trình lớn nhỏ đã, đang và sẽ được thi công trong tương lai gần như: đường cao tốc Bắc - Nam; sân bay quốc tế Long Thành; mạng lưới đường sắt đô thị TP. Hồ Chí Minh; mạng lưới đường sắt đô thị Thủ đô Hà Nội; hàng vạn công trình cầu, cống; hàng trăm toà cao ốc, …. Vì vậy, nhu cầu sử dụng cát xây dựng là cực kỳ lớn. Mỗi năm ở nước ta tiêu thụ khoảng khoảng 130 triệu m^3 cát cho việc sản xuất vữa và bê tông, và dự kiến sẽ tăng lên lần lượt khoảng 170–190 triệu m^3 và khoảng 200–220 triệu m^3 mỗi năm vào năm 2025 và 2030 [5]. Việc khai thác cát sông từ thiên nhiên không những gây các tác hại cho môi trường mà còn gây xói lở bờ sông, dịch chuyển dòng chảy, ô nhiễm nước và lũ lụt [5, 6]. Nếu việc việc khai thác cát sông vẫn tiếp diễn như hiện nay, nguồn cát sông sẽ mau chóng cạn kiệt và nguy cơ nước ta nhập khẩu cát xây dựng là điều đã được dự báo. Nguồn cát để chế tạo vữa và bê tông ở nước ta chủ yếu là cát sông, việc khai thác cát sông quá mức từ lòng sông không những làm cạn kiệt tài nguyên thiên nhiên mà còn gây ra những tác động tiêu cực rất lớn đến môi trường, đời sống và sản xuất, đó là gây ô nhiễm nguồn nước, trượt lở, sụt lún bờ sông, làm mất đất sản xuất, thay đổi dòng chảy, gây tình trạng thiếu nước vào mùa khô và lũ lụt vào mùa mưa, đe dọa trực tiếp đến sự an toàn của nhiều hộ gia đình và các công trình ở dọc hai bên bờ sông. Ngoài ra, việc khai thác cát từ lòng sông cũng là nguyên nhân làm hạ thấp mực nước ngầm gây ra triều cường và xâm nhập mặn, ảnh hưởng nghiêm trọng đến sản xuất nông nghiệp.

Nguồn cát sông ngày càng khan hiếm một phần do khai thác quá mức, một phần vì việc bồi lắng, tái tạo các mỏ cát ngày càng hạn chế do tác động ngăn chặn dòng chảy của các công trình thủy điện ở thượng nguồn, mặt khác còn là do tác động của biến đổi khí hậu, lượng mưa ngày càng ít đi, tình trạng chặt phá rừng hoặc chuyển đổi rừng sang trồng các loại cây khác. Để hạn chế các tác hại từ khai thác cát từ lòng sông, nhiều địa phương đã siết chặt quản lý khai thác cát sông, do vậy nguồn cung cấp cát sông ngày càng khan hiếm, cung không đủ cầu, giá cát sông liên tục tăng cao. Chẳng hạn ở các tỉnh khu vực Nam Trung bộ như Đà Nẵng, Quảng Nam, Quảng Ngãi, Bình Định, …

những năm trước đây nguồn cung cấp cát sông khá dồi dào, nhưng trong vài năm trở lại đây nguồn cát sông đã rất khan hiếm, giá cát sông để chế tạo bê tông hiện nay đã tăng lên rất cao khoảng 350.000-500.000 đ/m^3 tùy theo địa phương, gấp 2-3 lần so với những năm 2020-2023, thậm chí một số tỉnh như TP. Đà Nẵng, Thừa Thiên Huế, … đã phải nhập cát xây dựng từ các tỉnh lân cận. Chính vì vậy việc tìm ra các nguồn vật liệu phi truyền thống để thay thế một phần cát sông theo định hướng phát triển bền vững đang là vấn đề được nhà nước và các nhà quản lý quan tâm. Để hạn chế khai thác cát sông, tận dụng các nguồn phế thải công nghiệp thay thế cát sông, Thủ tướng Chính phủ ra quyết định số 1266/QĐ-TTg [7] với mục tiêu là giai đoạn từ 2021 đến 2030, sử dụng các loại phế thải công nghiệp, phế thải xây dựng làm cát xây dựng; từng bước hạn chế sử dụng cát sông làm vật liệu san lấp, không sử dụng cát sông đạt tiêu chuẩn kỹ thuật dùng cho bê tông làm vật liệu san lấp. Không xuất khẩu cát xây dựng khai thác từ thiên nhiên; giai đoạn từ 2031 đến 2050, hạn chế tối đa sử dụng cát tự nhiên trong xây dựng; nâng cao tỷ lệ sử dụng cát tái chế từ phế thải công nghiệp và xây dựng lên tối thiểu 60% tổng lượng cát dùng trong xây dựng.

Ở Việt Nam hiện có khoảng 29 nhà máy nhiệt điện đốt than đang hoạt động, phát thải ra tổng lượng tro, xỉ thải khoảng 16 triệu tấn/năm, tổng tỷ lệ tiêu thụ tro, xỉ thải tại các nhà máy nhiệt điện khoảng 48%, phần lớn tro bay được đổ tại các bãi chôn lấp, chiếm diện tích bãi chứa và có nguy cơ gây ô nhiễm môi trường rất cao. Để tiêu thụ lượng tro, xỉ thải nhiều hơn trong thời gian tới nhằm mục đích bảo vệ môi trường, tiết kiệm diện tích đất làm bãi chứa, giảm sử dụng tài nguyên khoáng sản để sản xuất vật liệu xây dựng, đảm bảo phát triển bền vững, Chính phủ đã liên tục khuyến khích, kêu gọi các nhà nghiên cứu, các bộ, ngành và doanh nghiệp đẩy mạnh việc sử dụng tro, xỉ thải làm nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng và trong công trình xây dựng bằng Chỉ thị số 08/CT-TTg ngày 26/3/2021.

Tro bay hiện nay đã được sử dụng trong một số lĩnh vực như làm phụ gia cho xi măng, bê tông tươi, sản xuất gạch không nung, làm vật liệu san lấp. Tổng lượng tro bay được tiêu thụ hiện nay chiếm khoảng gần 40%, trong đó, tro bay được sử dụng nhiều nhất là làm phụ gia cho xi măng chiếm khoảng 20% và phụ gia cho bê tông tươi chiếm khoảng 3%. Khi sử dụng tro bay thay thế một phần xi măng trong bê tông tươi, chúng thường gây ra vấn đề chậm phát triển cường độ ở tuổi sớm, do vậy lượng tro bay thường được sử dụng không quá 15-20% [8-18], đây cũng là lý do chính hạn chế việc sử dụng tro bay trong bê tông. Tuy nhiên, khi tro bay được thay thế một phần cốt liệu mịn, các nghiên cứu đều kết luận rằng tro bay không làm suy giảm cường độ của bê tông ở tuổi sớm mà còn gia tăng cường độ và độ bền lâu [19-29], đồng thời lượng tro bay được sử dụng sẽ nhiều hơn, góp phần giải quyết được vấn đề tồn chứa tro bay, giảm thiểu được việc khai thác và sử dụng cát sông. Cùng với sự phát triển kinh tế, xã hội của

đất nước, việc xây dựng cơ sở hạ tầng theo hướng hiện đại, bền vững để đáp ứng nhu cầu phát triển kinh tế, xã hội là điều tất yếu, các công trình xây dựng ngày càng đòi hỏi có khả năng chịu tải trọng lớn hơn, vượt nhịp dài hơn, độ bền lâu dài và tuổi thọ cao hơn. Do vậy, nhu cầu sử dụng bê tông tính năng cao (HPC) trong xây dựng công trình ngày càng lớn, đặc biệt là các công trình ở các điều kiện chịu xâm thực mạnh như môi trường biển.

Rõ ràng đây là một hướng nghiên cứu khá mới, rất khả thi trong bối cảnh lượng tro bay phát thải tích lũy ngày càng nhiều, khả năng khai thác cát sông làm cốt liệu mịn cho bê tông ngày càng thiếu hụt, khan hiếm, đặc biệt là những khu vực khan hiếm cát sông và đang có các nhà máy nhiệt điện đốt than hoạt động. Vì vậy đề tài **"*Nghiên cứu tính chất cơ học và độ bền của bê tông tính năng cao sử dụng hàm lượng tro bay cao làm cốt liệu mịn và ứng dụng cho công trình biển khu vực miền Trung*"** là hết sức cấp thiết và có tính thời sự.

2. MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU

Thiết kế thành phần bê tông tính năng cao có cường độ nén trung bình 80 MPa, độ thấm clorua ở 28 ngày ở mức rất thấp < 1000 Culong, trong thành phần bê tông sử dụng tro bay thay thế một phần cát sông.

Thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ, lý và độ bền của các loại bê tông tính năng cao (cường độ nén, cường độ kéo uốn, điện trở suất, độ thấm clorua, độ hấp thụ nước, vận tốc xung siêu âm).

Phân tích vi cấu trúc bằng hình chụp SEM.

Phân tích hiệu quả kinh tế và tác động môi trường của các bê tông sử dụng tro bay so với bê tông không có tro bay.

Dự báo tuổi thọ của các công trình bê tông cốt thép (BTCT) ở môi trường biển khu vực miền Trung khi sử dụng các bê tông HPC chứa tro bay.

3. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI NGHIÊN CỨU

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Bê tông tính năng cao sử dụng tro bay thay thế một phần cát sông.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

Bê tông HPC có cường độ nén trung bình ở 28 ngày đạt trên 80 MPa, sử dụng (35-65)%TB thay thế cát sông.

4. CÁCH TIẾP CẬN, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

4.1. Cách tiếp cận

Nghiên cứu thực nghiệm trong phòng xác định tính công tác, khối lượng thể tích của bê tông tươi; cường độ nén, cường độ kéo uốn, độ chống thấm clorua, vận tốc xung siêu âm, độ hấp thụ nước của các HPC với các tỉ lệ tro bay thay thế cát sông khác nhau so với bê tông không có tro bay.

Ngoài ra, để đánh giá hiệu quả của TB thay thế cát sông so với các bê tông HPC truyền thống sử dụng các phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng, trong nghiên cứu này còn nghiên cứu các bê tông HPC sử dụng 35% xỉ lò cao (XL) thay thế xi măng và HPC sử dụng 10% muội silic (MS) thay thế XM.

4.2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết, tổng quan các tài liệu đã công bố và kết hợp với thí nghiệm trong phòng.

So sánh các tính chất của các bê tông HPC chứa (35-65)%TB thay thế cát sông với bê tông đối chứng không có tro bay và các bê tông HPC chứa XL và MS.

5. KẾT CẤU CỦA ĐỀ TÀI

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và kiến nghị, các Phụ lục. Đề tài gồm 03 Chương như sau:

Mở đầu;

Chương 1: Nghiên cứu tổng quan;

Chương 2: Xác định các chỉ tiêu, tính chất của các vật liệu chế tạo bê tông, thiết kế thành phần bê tông tính năng cao sử dụng tro bay thay thế một phần cát sông và sử dụng xỉ lò cao, muội silic thay thế một phần xi măng;

Chương 3: Nghiên cứu trong phòng xác định các tính chất của hỗn hợp bê tông tươi, bê tông cứng và dự báo tuổi thọ của các công trình bê tông cốt thép sử dụng bê tông tính năng cao;

Kết luận và kiến nghị.

6. Ý NGHĨA KHOA HỌC VÀ Ý NGHĨA THỰC TIỄN CỦA ĐỀ TÀI

Đề tài góp phần làm rõ hơn vai trò của các phụ gia khoáng TB, XL và MS đến các tính chất cơ học và độ bền của HPC, góp phần cải thiện chất lượng của bê tông. Việc sử dụng TB thay thế CS trong bê tông sẽ tiêu thụ được một lượng lớn TB, hạn chế khai thác và sử dụng CS, góp phần giảm ô nhiễm môi trường và giảm giá thành xây dựng.

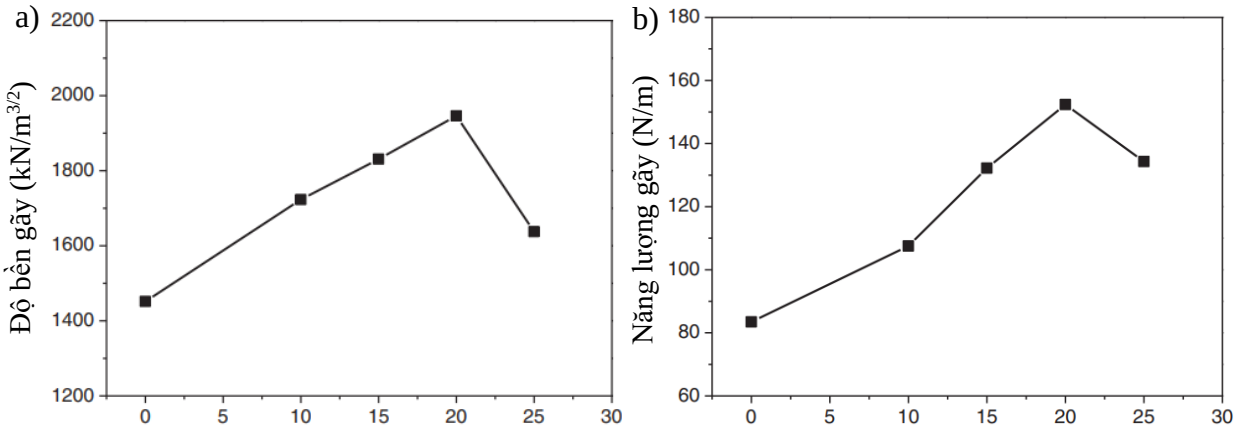
Chương 1: NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

1.1. CÁC NGHIÊN CỨU VỀ SỬ DỤNG TRO BAY CHẾ TẠO BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO TRÊN THẾ GIỚI

Bê tông tính năng cao (HPC) là loại bê tông được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong những năm gần đây, vì nó có cường độ và độ bền cao nên thường được dùng cho các công trình chịu tải trọng lớn, có nhịp dài hay ở những khu vực có điều kiện môi trường khắc nghiệt như môi trường biển. Phần lớn các nghiên cứu đều sử dụng tro bay (TB) thay thế một phần xi măng (X), sau đây là một số nghiên cứu điển hình.

T.R. Naik và cộng sự (cs) [8] sử dụng TB loại C thay thế (0-70)% X trong bê tông HPC, họ kết luận rằng sử dụng 30% TB thay thế X đáp ứng yêu cầu về cường độ và cải thiện độ bền của HPC.

P. Zhang và cs [9] sử dụng TB loại F thay thế (10-25)% X, kết quả nghiên cứu cho thấy sử dụng (10-20)%TB thay thế X để chế tạo bê tông HPC cải thiện lớn về khả năng chịu kéo uốn. Tuy nhiên, cường độ kéo uốn bắt đầu giảm sau khi hàm lượng TB vượt quá 20 phần trăm. Bên cạnh đó, khi hàm lượng TB tăng từ 10-20%, các đường cong quan hệ giữa tải trọng thẳng đứng và độ võng giữa nhịp, chuyển vị mở miệng vết nứt và chuyển vị mở đầu vết nứt trở nên đầy đặn hơn, điều này cho thấy khả năng chống lại sự lan truyền vết nứt của HPC chứa TB mạnh hơn, trong khi các đường cong trở nên co lại sau khi hàm lượng TB vượt quá 20%.



Hình 1.1. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến độ bền gãy (a) và năng lượng gãy (b) ở 28 ngày của HPC [9]

Thời gian (h)

Bên cạnh sử dụng TB trong HPC, việc sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn (XL) hay muội silic (MS) thay thế một phần X trong HPC cũng đã được nghiên cứu sâu rộng [31-48], tất cả các nghiên cứu đều kết luận rằng sử dụng XL và MS thay thế một phần X trong HPC cải thiện tính chất cơ học và độ bền của bê tông.

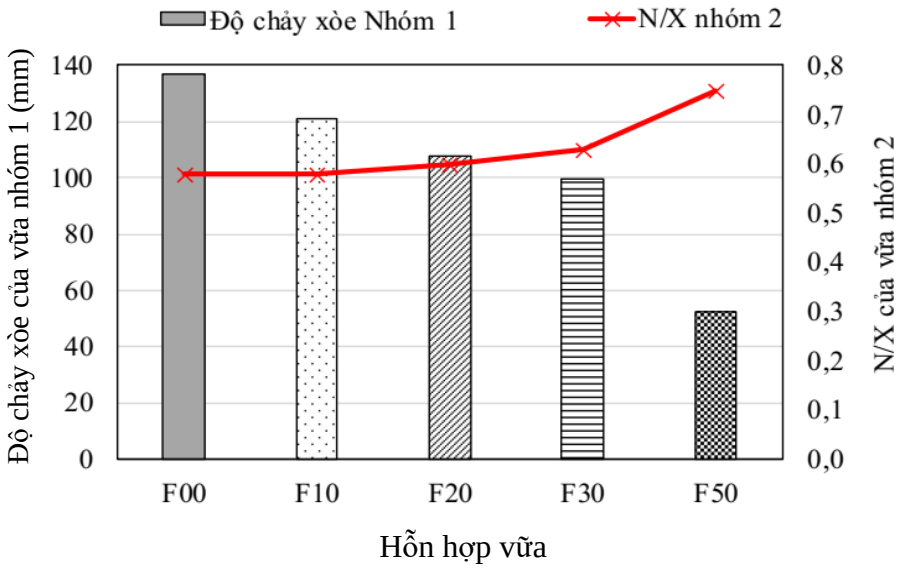
1.2. CÁC NGHIÊN CỨU VỀ SỬ DỤNG TRO BAY CHẾ TẠO BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO Ở TRONG NƯỚC

Ở Việt Nam, việc sử dụng TB thay thế một phần X để chế tạo bê tông HPC cũng đã có một số tác giả nghiên cứu.

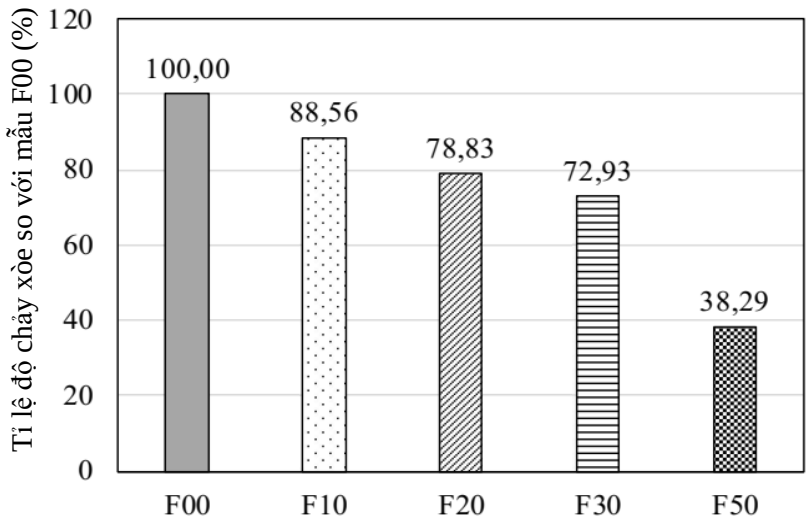
Nguyễn Công Thắng và cs [49] nghiên cứu khả năng chống ăn mòn cốt thép của bê tông HPC với các phụ gia khoáng khác nhau, kết quả cho thấy sử dụng (10-20)%TB thay thế X cải thiện cường độ và sức kháng ăn mòn cốt thép của bê tông HPC.

Bùi Thị Thanh Huyền và cs [50] nghiên cứu khả năng chống thấm và sức kháng ăn mòn cốt thép của HPC sử dụng (40-70)%TB thay thế X, họ kết luận rằng các HPC sử dụng (40-50)% TB giảm tính thấm, cải thiện cường độ nén sau 90 ngày đồng thời các các HPC chứa (40-50)%TB cũng cải thiện sức kháng ăn mòn cốt thép.

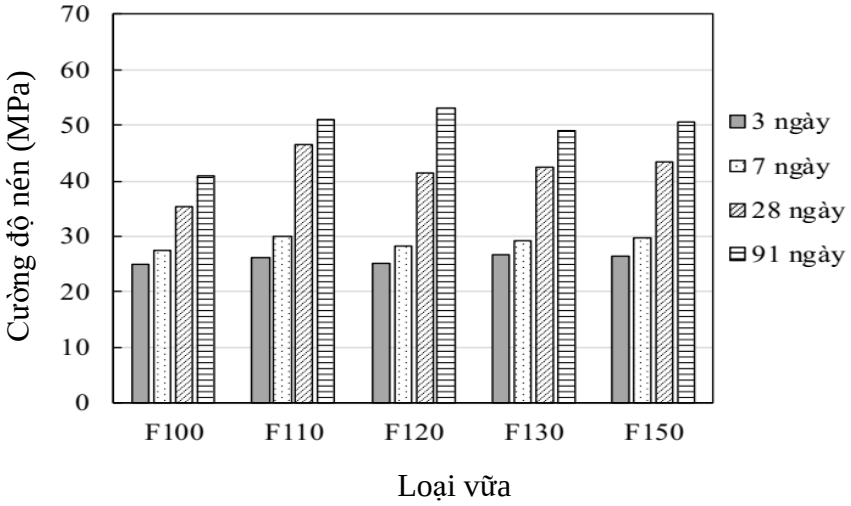
Nguyễn Thị Bích Thủy và cộng sự [51] sử dụng TB thay thế (0-50)% CS (F0, F10, F20, F30, F40, F50) trong vữa xi măng, các hỗn hợp vữa được phân thành 2 nhóm: nhóm (1) giữ cố định lượng nước, nhóm (2) thay đổi lượng nước để đảm bảo độ chảy xòe là 110±5 mm, kết quả nghiên cứu cho thấy khi tỉ lệ TB thay thế CS càng lớn thì độ chảy của vữa càng giảm (Hình 1.19, Hình 1.20), cả hai nhóm đều cải thiện cường độ nén của vữa, cường độ nén của vữa đạt giá trị cao nhất là ở mức thay thế CS bằng 20% TB (Hình 1.21, Hình 1.22).



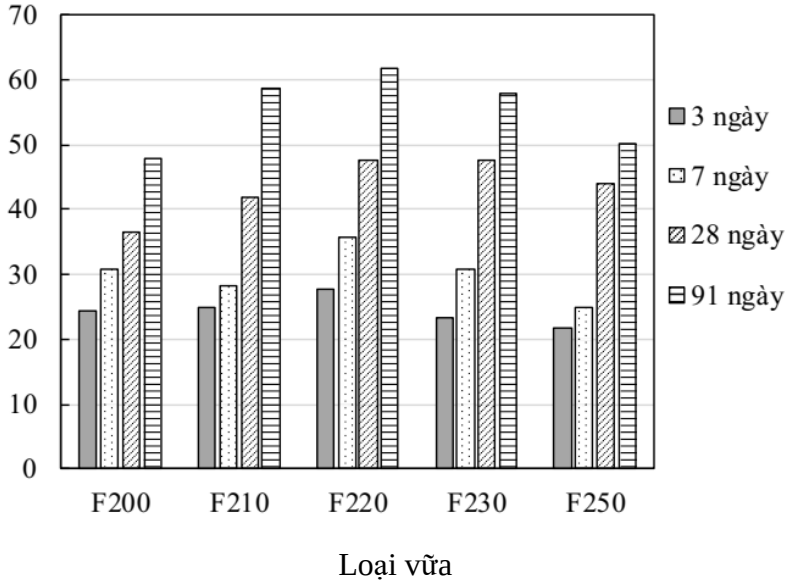
Hình 1.19. Ảnh hưởng của tỉ lệ TB tới độ chảy xòe của vữa nhóm 1 và lượng nước yêu cầu của vữa nhóm 2 [51]



Hình 1.20. Tỉ lệ độ chảy xòe của hỗn hợp vữa nhóm 1 sử dụng tro bay so với mẫu vữa đối chứng F00 [51]

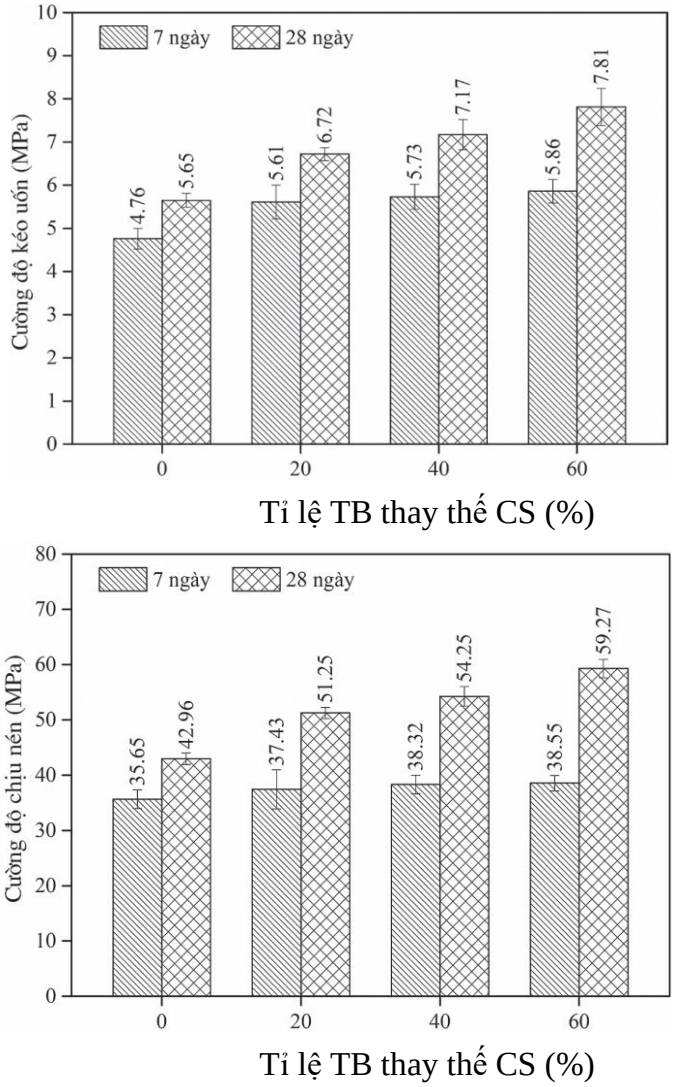


Hình 1.21. Cường độ chịu nén của nhóm vữa 1 với tỉ lệ N/X bằng 0,6 [51]

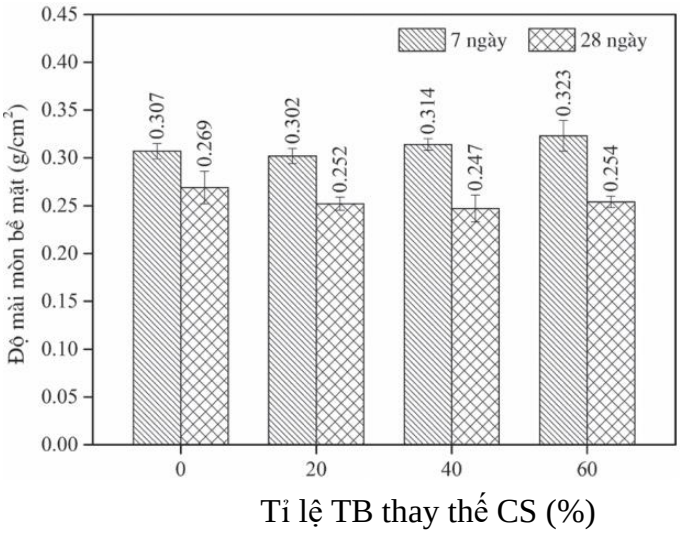


Hình 1.22. Cường độ chịu nén của nhóm vữa 2 cố định độ chảy xòe [51]

Lâm Văn Trung và cs [52] sử dụng (20-60)%TB thay thế CS trong bê tông thường, kết quả cho thấy TB cải thiện cường độ nén, cường độ uốn, sức kháng mài mòn và làm giảm độ thấm nước, tỉ lệ TB thay thế CS càng cao thì chất lượng của bê tông càng tốt.



Hình 1.23. Cường độ kéo uốn (a) và cường độ nén của các bê tông [52]



Hình 1.23. Cường độ kéo uốn (a) và cường độ nén của các bê tông [52]

1.3. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan về các vấn đề nghiên cứu. Phần thứ nhất của Chương 1 đã trình bày các nghiên cứu về bê tông sử dụng TB thay thế một phần CS trên thế giới, phần thứ 2 đã trình bày các nghiên cứu có liên quan ở trong nước.

Khi sử dụng TB thay thế một phần CS, các nghiên cứu đều khẳng định rằng sử dụng TB thay thế một phần CS với hàm lượng thích hợp trong bê tông sẽ cải thiện tính chất cơ học và độ bền của bê tông. Tuy nhiên, hiện nay chưa có nghiên cứu nào sử dụng TB thay thế một phần CS trong HPC, đây là một khoảng trống lớn cần phải nghiên cứu bổ sung. Do vậy, Đề tài sẽ tập trung nghiên cứu các tính chất cơ học và độ bền của HPC sử dụng TB thay thế một phần CS.

Chương 2: XÁC ĐỊNH CÁC CHỈ TIÊU, TÍNH CHẤT CỦA VẬT LIỆU CHẾ TẠO BÊ TÔNG, THIẾT KẾ THÀNH PHẦN BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO SỬ DỤNG TRO BAY THAY THẾ MỘT PHẦN CÁT SÔNG VÀ SỬ DỤNG XỈ LÒ CAO, MUỘI SILIC THAY THẾ MỘT PHẦN XI MĂNG

2.1. VẬT LIỆU SỬ DỤNG CHẾ TẠO BÊ TÔNG XI MĂNG

2.1.1. Xi măng

Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ, lý và thành phần hóa học của xi măng PC50:

Bảng 2.2. Các chỉ tiêu cơ, lý của xi măng PC50

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	TCVN 2682:2020
1	Cường độ nén: - 3 ngày - 28 ngày	MPa	36,4 52,5	Min 25 Min 50
2	Thời gian đông kết: - Bắt đầu - Kết thúc	Phút	95 185	Min 45 Max 375
3	Độ ổn định thể tích	mm	1,88	Max 10
4	Độ mịn Blaine	cm^2/g	3520	--
5	Hàm lượng SO_3	%	2,22	Max 3,5
6	Khối lượng riêng	g/cm^3	3,10	--
7	Lượng nước tiêu chuẩn	%	31,0	--

Bảng 2.3. Thành phần hóa học của xi măng PC50

Thành phần hóa học	Đơn vị	Xi măng PC50
CaO	%	63.06
SiO_2	%	21.64
Fe_2O_3	%	3.58
Al_2O_3	%	5.18
MgO	%	0.92
K_2O	%	0.63
Na_2O	%	0.10
SO_3	%	1.97
Cl^-	%	0.008
MKN	%	1.54
Chất khác	%	1.37

Kết quả thí nghiệm cho thấy XM PC50 thỏa mãn TCVN 2682:2020 và phù hợp để chế tạo bê tông.

2.1.2. Tro bay

Sử dụng tro bay (TB) loại F của nhà máy nhiệt điện Fomosa Hà Tĩnh, Theo tiêu chuẩn ASTM C618:05 và TCVN 10302:2014, các chỉ tiêu chất lượng của TB được qui định trong Bảng 2.4.

Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ, lý và thành phần hóa học của TB được thể hiện trong Bảng 2.5 và Bảng 2.11.

Bảng 2.5. Các tính chất của tro bay loại F

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	TCVN 10302:2014
1	Tổng hàm lượng ô xit $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	%	84,06	≥ 70
2	Hàm lượng CaO	%	3,56	-
3	Hàm lượng SO_3	%	0,21	≤ 3
4	Chỉ số hoạt tính ở 28 ngày	%	95,6	≥ 75
5	Lượng nước yêu cầu	%	94,8	≤ 100
6	Lượng sót trên sàng 45 µm	%	21,5	≤ 34
7	Độ mịn Blaine	cm^2/g	3685	--
8	Hàm lượng MKN	%	6,10	≤ 8
9	Độ ẩm	%	0,60	≤ 3
10	Hàm lượng ion clorua	%	0,01	≤ 0,1
11	Khối lượng riêng	g/cm^3	2,26	-

Kết quả thí nghiệm trên cho thấy tro bay loại F thỏa mãn TCVN 10302:2014 và phù hợp để chế tạo bê tông.

2.1.3. Xỉ lò cao nghiền mịn

Hiện nay chỉ có tập đoàn Hòa Phát đã thương mại hóa xỉ lò cao nghiền mịn (XL). Ở khu vực Miền trung, nhà máy thép Hòa Phát ở Dung Quất – Quảng Ngãi đã hoạt động và thương mại sản phẩm xỉ lò cao nghiền mịn từ năm 2019, đề tài sử dụng XL S95 của Hòa Phát ở Dung Quất – Quảng Ngãi. Theo tiêu chuẩn ASTM C 989 và TCVN 11586:2016, các chỉ tiêu chất lượng của XL được qui định trong Bảng 2.6 và Bảng 2.7.

Kết quả thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ, lý và thành phần hóa học của XL được thể hiện trong Bảng 2.8 và 2.11.

Bảng 2.8. Các chỉ tiêu của xỉ lò cao S95 Hòa Phát nghiền mịn

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	TCVN 11586:2016
1	Khối lượng riêng	g/cm^3	2,89	≥ 2,8
2	Bề mặt riêng	cm^2/g	5110	≥ 5000
3	Chỉ số hoạt tính cường độ ở 28 ngày	%	101,0	≥ 95
4	Tỷ lệ độ lưu động	%	112	≥ 90
5	Độ ẩm	%	0,25	≤ 1,0

Kết quả trên cho thấy XL thỏa mãn TCVN 11586:16 và phù hợp để chế tạo bê tông.

2.1.4. Muội silic

Kết quả thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ, lý và thành phần hóa học của MS được thể hiện trong Bảng 2.8 và 2.11.

Bảng 2.10. Các chỉ tiêu chất lượng của muội silic Hoa Sen

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả
1	Hàm lượng SiO_2	%	91,94
2	Độ ẩm	%	2,15
3	Lượng mất khi nung	%	2,52
4	Độ hoạt hóa Pozzolan với xi măng - ở tuổi 7 ngày - ở tuổi 28 ngày	%	 107,2 112,6
5	Bề mặt riêng	m^2/g	25,5
6	Khối lượng riêng	kg/m^3	2150

Kết quả trên cho thấy MS thỏa mãn ASTM C1240:20 và TCVN 8827:11 và phù hợp để chế tạo bê tông.

Bảng 2.11. Thành phần hóa học của xi măng, tro bay, xỉ lò cao và muội silic

Thành phần	Đơn vị	**PC50**	**XL**	**TB**	**MS**
CaO	%	63.06	37.85	4.56	0.54
SiO_2	%	21.64	34.86	52.26	91.94
Fe_2O_3	%	3.58	0.45	5.15	0.58
Al_2O_3	%	5.18	14.04	27.75	0.52
MgO	%	0.92	8.46	1.02	0.85
K_2O	%	0.63	0.87	1.85	0.32
Na_2O	%	0.10	0.34	0.14	0.25
SO_3	%	1.97	1.12	0.51	0.66
Cl^-	%	0.008	0.012	0.01	0.00
MKN	%	1.54	0.25	5.1	2.74

Chất khác	%	1.37	1.75	1.65	1.60

2.1.5. Phụ gia siêu dẻo

Sử dụng phụ gia siêu dẻo SD 3054 của Công ty TNHH Master Builders Solutions Việt Nam. TCVN 8826:2011 qui định về độ đồng nhất của phụ gia hóa học như trong Bảng 2.12.

Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu của SD 3054 theo TCVN 8826-2011 và được thể hiện trong Bảng 2.13.

Bảng 2.13. Các chỉ tiêu của phụ gia siêu dẻo SD 3054

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Phương pháp thí nghiệm
Hàm lượng chất khô	%	43,8	TCVN 8826-2011
Độ PH	-	5,7	
Khối lượng riêng	g/cm^3	1,09	

2.1.6. Cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ

2.1.6.1. Cốt liệu lớn

Kết quả thí nghiệm thành phần hạt và các chỉ tiêu cơ lý của đá dăm D_{max} = 12,5 mm được thể hiện trong Bảng 2.16 và Hình 2.1.

Bảng 2.16. Các chỉ tiêu cơ, lý của đá dăm D_{max} = 12,5 mm

TT	Tên các chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	TCVN 7570:06
1	Khối lượng riêng	g/cm^3	2,75	-
2	Khối lượng thể tích đầm chặt	kg/m^3	1620	-
3	Độ hút nước	%	1,26	-
4	Hàm lượng thoi dẹt	%	6,22	≤ 15
5	Hàm lượng phong hóa	%	0,0	≤ 1,0
6	Hàm lượng bùn, bụi, sét	%	0,07	≤ 1,0
7	Độ mài mòn Los Angeles	%	22,8	≤ 50

Kết quả thí nghiệm trên cho thấy đá dăm thỏa mãn TCVN 7570:2006 và ASTM C33:11 và phù hợp để chế tạo bê tông.

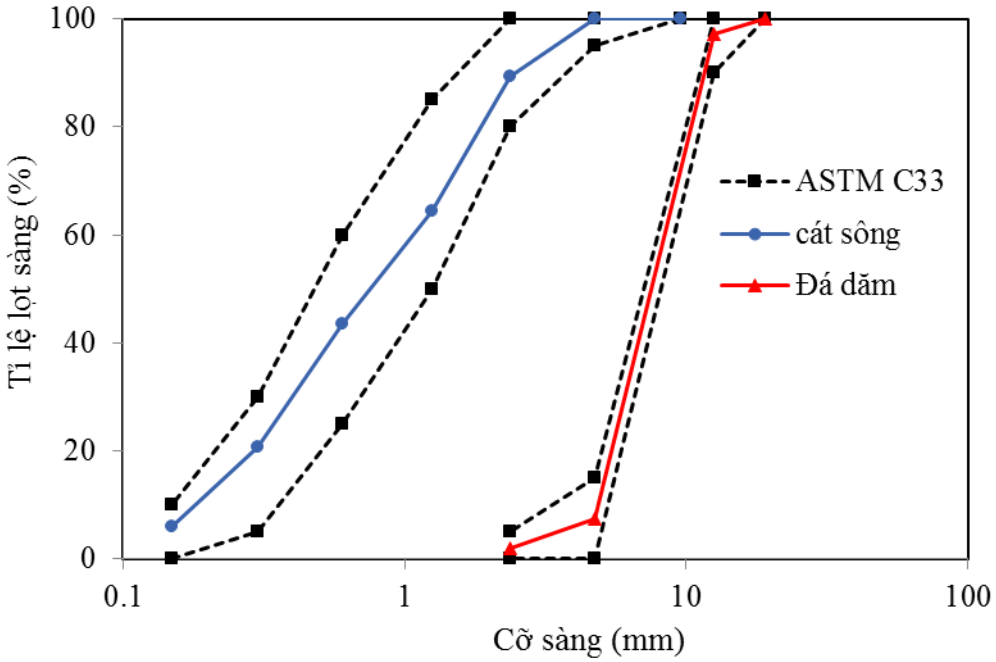
2.1.6.2. Cốt liệu nhỏ

Đề tài nghiên cứu sử dụng cát sông (CS) hạt lớn có mô đun độ lớn ≥ 2,0 làm cốt liệu mịn để chế tạo bê tông. Theo TCVN 7570:2006 và ASTM C33:2011, thành phần hạt của cát được qui định như trong Bảng 2.17. Các chỉ tiêu chất lượng của cát được qui định ở Bảng 2.18.

Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ, lý và thành phần hạt của CS được thể hiện trong Bảng 2.19 và trên Hình 2.1.

Bảng 2.19. Các chỉ tiêu cơ, lý của cát sông

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	TCVN 7570:2006
1	Khối lượng riêng	g/cm^3	2,66	-
2	Khối lượng thể tích xốp	g/cm^3	1,45	-
3	Độ hút nước	%	0,42	-
4	Độ hỗng tự nhiên	%	45,1	-
5	Mô đun độ lớn	-	2,70	2,0-3,3
6	Hàm lượng bùn sét	%	0,62	≤ 1,5
7	Hàm lượng ion Cl^-	%	0,0011	≤ 0,05
8	Tạp chất hữu cơ	-	Sáng hơn màu chuẩn	Không thẫm hơn màu chuẩn



Hình 2.1. Thành phần hạt của đá dăm và cát sông

Các chỉ tiêu cơ, lý và thành phần hạt của CS thỏa mãn TCVN 7570:2006 và ASTM C33:2011 và phù hợp để chế tạo bê tông.

2.1.7. Nước trộn hỗn hợp bê tông

Sử dụng nước máy sạch phù hợp với TCVN 4506:2012 để trộn các hỗn hợp bê tông.

2.2. THIẾT KẾ THÀNH PHẦN CÁC BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO SỬ DỤNG TRO BAY THAY THẾ MỘT PHẦN CÁT SÔNG

Đề tài sử dụng Tiêu chuẩn của Hoa Kỳ ACI 211.4R [53] để thiết kế thành phần vật liệu của các bê tông tính năng cao.

2.2.1. Xác định cường độ yêu cầu của bê tông

Tiêu chuẩn ACI 318 [54] cho phép những thành phần hỗn hợp bê tông được chọn trên kinh nghiệm thực tế hoặc các mẻ trộn thử trong phòng thí nghiệm. Để đạt được cường độ chịu nén đặc trưng của dự án, thì bê tông cần phải được tính toán tỉ lệ sao cho cường độ chịu nén trung bình ngoài thực tế lớn hơn cường độ chịu nén đặc trưng f'_c bằng 1 giá trị đủ lớn để xác suất các kết quả không đạt là nhỏ.

Khi không xác định được độ lệch chuẩn thì cường độ chịu nén trung bình yêu cầu được tính theo công thức sau:

$$f_{cr}' = 1{,}1f_c' + 4{,}8 \text{ (MPa)} \quad (2.1)$$

Khi thiết kế thành phần bê tông trong phòng thí nghiệm, cường độ chịu nén trung bình yêu cầu được tính theo công thức sau:

$$f_{cr}' = (1{,}1f_c' + 4{,}8)/0{,}9 \text{ (MPa)} \quad (2.2)$$

Trong đó:

f_{cr}' là cường độ chịu nén trung bình yêu cầu, MPa

f_c' là cường độ chịu nén đặc trưng, MPa

2.2.2. Xác định các thành phần của bê tông

**** Bước 1: Chọn độ sụt gốc của hỗn hợp bê tông yêu cầu***

**** Bước 2: Chọn kích thước tối đa của cốt liệu***

Dựa trên yêu cầu cường độ, kích thước tối đa danh nghĩa khuyến khích cho cốt liệu thô được đưa ra trong Bảng 2.21.

**** Bước 3: Chọn tối ưu hàm lượng cốt liệu thô***

Lượng cốt liệu thô được đưa ra trong Bảng 2.22 như một hàm của kích thước tối đa. Các giá trị được đưa ra trong Bảng 2.22 được khuyến cáo để sử dụng với cốt liệu mịn có giá trị mô đun độ mịn 2,5-3,2. Khối lượng cốt liệu thô được tính theo công thức:

$$Đ = \rho_{đ}.V_{đ} \quad (2.3)$$

**** Bước 4: Ước tính lượng nước trộn và hàm lượng không khí***

Lượng nước trộn và không khí của bê tông tươi được lựa chọn theo Bảng 2.23.

**** Bước 5: Lựa chọn tỉ lệ N/CKD***

**** Bước 6: Xác định khối lượng chất kết dính***

Khối lượng chất kết dính cần thiết trên 1 m^3 bê tông được tính bằng cách chia lượng nước cho tỉ lệ N/CKD:

$$CKD = N.\frac{CKD}{N} \text{ (kg)} \quad (2.4)$$

**** Bước 7: Xác định khối lượng xi măng và phụ gia khoáng***

1. Trường hợp không dùng phụ gia khoáng thì khối lượng xi măng cần thiết 1 m^3 bê tông bằng chính khối lượng chất kết dính:

$$X = CKD \text{ (kg)} \quad (2.5)$$

2. Trường hợp dùng XL với tỉ lệ a (%) thay thế một phần CKD thì khối lượng XL cần cho 1 m^3 bê tông là:

$$XL = a.CKD \text{ (kg)} \quad (2.6)$$

**** Bước 8: Xác định khối lương cát sông***

1. Khi không có phụ gia khoáng, khối lượng cát được tính theo công thức:

$$CS = [1000 - \frac{X}{\rho_X} - \frac{Đ}{\rho_Đ} - N - V_{KK}].\rho_C \text{ (kg)} \quad (2.11)$$

2. Khi có XL, khối lượng cát được tính theo công thức:

$$CS = [1000 - \frac{X}{\rho_X} - \frac{XL}{\rho_{XL}} - \frac{Đ}{\rho_Đ} - N - V_{KK}].\rho_C \text{ (kg)} \quad (2.12)$$

4. Khi có MS, khối lượng cát được tính theo công thức:

$$CS = [1000 - \frac{X}{\rho_X} - \frac{MS}{\rho_{MS}} - \frac{Đ}{\rho_Đ} - N - V_{KK}].\rho_C \text{ (kg)} \quad (2.13)$$

**** Bước 9: Xác định khối lương tro bay thay thế cát sông***

Vì khối lượng riêng của TB nhỏ hơn cát, nên khối lượng của TB thay thế cát sông theo thể tích để đảm đảm thể tích của 1 m^3 bê tông không đổi như sau:

$$TB = \frac{P.CS.\rho_{TB}}{\rho_{CS}} \text{ (kg)} \quad (2.14)$$

Trong đó:

P - tỉ lệ TB thay thế cát

CS - khối lượng cát cho 1 m^3 bê tông (kg),

ρ_{TB} – khối lượng riêng của TB (g/cm^3),

ρ_{CS} – khối lượng riêng của cát (g/cm^3).

**** Bước 10: Chọn tỉ lệ phụ gia siêu dẻo***

Cần sử dụng phụ gia siêu dẻo trong bê tông tính năng cao để tăng tính công tác tạo điều kiện thuận lợi khi thi công và để đảm bảo độ sụt theo yêu cầu. Khi dùng phụ gia siêu dẻo thì lượng nước có thể giảm từ 15-30% tùy thuộc vào loại phụ gia siêu dẻo sử dụng. Có thể sử dụng phụ gia siêu dẻo vào hỗn hợp mà không cần điều chỉnh các tỉ lệ hỗn hợp để cải thiện tính công tác của bê tông.

**** Bước 11: Các hỗn hợp thử nghiệm***

Các hỗn hợp thử nghiệm theo tỉ lệ đã tính ở trên cần tạo ra một tập hợp các thử nghiệm để xác định tính công tác và các tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông. Các khối lượng của cốt liệu, nước phải điều chỉnh cho phù hợp về độ ẩm. Nếu các đặc tính mong muốn của bê tông không đạt được thì các tỉ lệ hỗn hợp ban đầu cần được điều chỉnh theo hướng dẫn sau đây để tạo ra tính công tác mong muốn.

**** Bước 12: Lựa chọn thành phần bê tông***

Sau khi đã đúc mẻ thử kiểm tra đảm bảo yêu cầu về tính công tác, đạt được cường độ mục tiêu và một số chỉ tiêu khác (nếu có), tiến hành hiệu chỉnh lại lượng cát để đảm bảo tổng thể tích các vật liệu trong từng hỗn hợp đạt thể tích tuyệt đối là 1000 lít.

Công việc kiểm tra cường độ và một số chỉ tiêu khác (nếu có) thường chỉ thực hiện đối với bê tông đối chứng, đối với những bê tông khác (chứa TB, XL, MS) là những đối tượng nghiên cứu nên chỉ kiểm tra tính công tác để xác định chính xác các lượng vật liệu sử dụng cho 1 m^3 bê tông.

2.2.3. Thiết kế thành phần các bê tông tính năng cao

Kết quả tính toán thành phần vật liệu của các loại bê tông HPC được trình bày trong Bảng 2.26.

Bảng 2.26. Thành phần vật liệu của các loại bê tông

Kí hiệu hỗn hợp	X (kg)	N (lit)	TB (kg)	XL (kg)	MS (kg)	CS (kg)	Đ (kg)	N/CKD	SD (kg)	SN (cm)
0TB	550	154	0	0	0	742,4	1053	0,28	7,2	12-14
35TB	550	154	220,8	0	0	479,9	1053	0,28	8,3	
50TB	550	154	315,4	0	0	360,5	1053	0,28	11,6	
65TB	550	154	410,0	0	0	241,1	1053	0,28	14,9	
35XL	357,5	154	0	192.5	0	733,8	1053	0,28	5,8	
10MS	495	154	0	0	55	723,6	1053	0,28	6,3	

2.3. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Trong Chương 2, nhóm nghiên cứu đã trình bày các nội dung về công tác lựa chọn và thí nghiệm xác định được các chỉ tiêu chất lượng của các vật liệu để chế tạo bê tông.

Nội dung chương 2, đã trình bày chi tiết về phương pháp thiết kế thành phần vật liệu bê tông HPC và thiết kế được thành phần vật liệu của bê tông HPC đối chứng có cường độ nén trung bình ở 28 ngày đạt trên 80 MPa; thiết kế được thành phần vật liệu của các bê tông HPC sử dụng TB thay thế (35-65)% cát sông, các bê tông HPC sử dụng XL và MS thay thế lần lượt 35% xi măng và 10% xi măng.

Chương 3: NGHIÊN CỨU TRONG PHÒNG XÁC ĐỊNH CÁC TÍNH CHẤT CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG TƯƠI, BÊ TÔNG CỨNG VÀ DỰ BÁO TUỔI THỌ CỦA CÁC CÔNG TRÌNH BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO

3.1. CÔNG TÁC ĐÚC, BẢO DƯỠNG CÁC MẪU BÊ TÔNG VÀ THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC TÍNH CHẤT CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG TƯƠI

3.1.1. Cân vật liệu và trộn hỗn hợp bê tông

Các loại vật liệu được cân theo khối lượng bằng cân tự động. Trước khi cân các loại vật liệu cho một mẻ trộn cần phải xác định độ ẩm của cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ để trừ lượng nước có trong cốt liệu đảm bảo lượng nước đúng theo thiết kế.

3.1.2. Đúc và bảo dưỡng các mẫu bê tông xi măng

Việc đúc các mẫu BTXM thực hiện theo TCVN 3105:2022. Trước khi đúc mẫu phải chuẩn bị khuôn đúc. Khuôn đúc các mẫu bê tông để thí nghiệm cường độ kéo uốn là khuôn dầm 100x100x400 mm, sau khi thí nghiệm uốn dùng các mẫu dầm gãy để thí nghiệm xác định cường độ nén. Khuôn đúc mẫu bê tông để thí nghiệm xác định độ rỗng, độ thấm clorua và hấp thụ nước là khuôn trụ 100x200 mm.

3.2. PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

3.2.1. Khối lượng thể tích của bê tông tươi

KLTT của hỗn hợp bê tông tươi trong từng khuôn được xác định theo công thức:

$$\text{KLTT} = \frac{m_1 - m_0}{V} \ (\text{kg/m}^3) \qquad (3.1)$$

Trong đó: m_0 và m_1 - khối lượng của khuôn đúc và khối lượng của khuôn chứa hỗn hợp bê tông tươi sau khi đầm chặt (kg); V - thể tích của khuôn đúc (m^3).

KLTT của hỗn hợp bê tông là giá trị trung bình của 3 mẫu.

3.2.2. Độ rỗng

Độ rỗng của từng mẫu bê tông được tính theo công thức:

$$r = \frac{B - A}{B - C}.100\,(\%) \qquad (3.2)$$

Độ rỗng của các loại bê tông được thí nghiệm ở 7, 28, 56, 90 và 150 ngày. Độ rỗng của mỗi loại bê tông ở từng thời điểm thí nghiệm là giá trị trung bình của 3 mẫu.

3.2.3. Cường độ kéo uốn và cường độ nén

Cường độ kéo uốn của từng mẫu bê tông được tính theo công thức:

$$R_{ku} = \frac{P_{ku}.l}{a.b^2} \text{ (MPa)} \quad (3.3)$$

Trong đó: P_{ku} - tải trọng uốn gãy mẫu (N); *l* - khoảng cách giữa hai gối tựa, *l* = 300 mm; a, b - chiều rộng và chiều cao tiết diện ngang của mẫu (mm);

Cường độ nén của từng mẫu bê tông được tính theo công thức:

$$R_n = \frac{P_n}{F} \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

Trong đó: P_n - lực nén phá hoại mẫu (N); F_n - diện tích chịu lực nén của viên mẫu (mm^2).

Cường độ kéo uốn và nén của các loại bê tông được thí nghiệm ở 3, 7, 28, 56, 90 và 150 ngày. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn là giá trị trung bình của 3 mẫu, cường độ nén là giá trị trung bình của 6 mẫu.

3.2.4. Vận tốc xung siêu âm

VTXSA của từng viên mẫu V_{sa} (m/s) được tính theo công thức:

$$V_{sa} = \frac{L}{t} \text{ (m/s)} \quad (3.5)$$

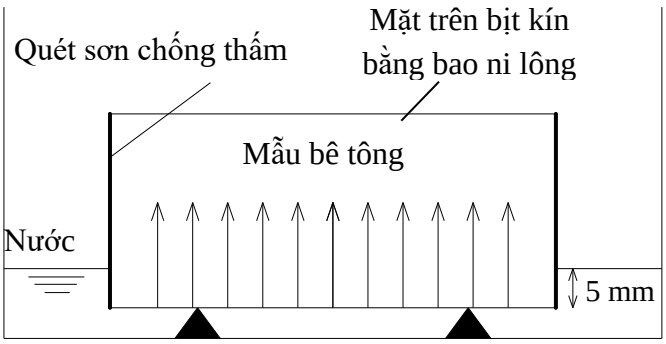
Trong đó:

L - chiều dài thực dọc trục của mẫu trụ 100×200 mm;

t - thời gian sóng siêu âm truyền qua mẫu (s);

VTXSA của các loại bê tông được thí nghiệm ở 3, 7, 28, 56 và 90 ngày. Vận tốc xung siêu âm của mỗi loại bê tông ở từng thời điểm thí nghiệm là giá trị trung bình của 3 mẫu.

3.2.5. Độ hấp thụ nước



Hình 3.4. Sơ đồ thí nghiệm hấp thụ nước của các mẫu bê tông

ĐHTN I (mg/cm^2) của các mẫu bê tông được tính theo công thức:

$$I = \frac{P_t - P_{bd}}{S} \text{ (mg/cm}^2\text{)} \quad (3.6)$$

Trong đó:

P_t – khối lượng của mẫu ở thời điểm t sau khi tiếp xúc với nước (mg);

$P_{bđ}$ – khối lượng ban đầu của mẫu trước khi tiếp xúc với nước (mg);

S - diện tích bề mặt tiếp xúc của mẫu với nước (cm^2);

ĐHTN của các loại bê tông được thí nghiệm ở 7, 28, 56, 90 và 150 ngày. ĐHTN của mỗi loại bê tông ở từng thời điểm thí nghiệm là giá trị trung bình của 3 mẫu.

3.2.6. Độ thấm clorua và điện trở suất bề mặt

Đối với thiết bị bán tự động, điện lượng truyền qua mẫu bê tông được tính theo công thức:

$$Q = \left(\frac{95}{x}\right)^2 .900.(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + ...2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3.7)$$

Trong đó: Q là tổng điện lượng truyền qua mẫu thử trong thời gian 6 h, tính bằng culông; I_0, I_{30}, I_{60}, ..., I_{330}, I_{360} là cường độ dòng điện ở thời điểm bắt đầu bật máy đo ở 30, 60, ... 330, 360 phút, tính bằng ampe (A); x là đường kính thực tế của mẫu thử, tính bằng milimét (mm).

Mức độ thấm clorua của bê tông xi măng được đánh giá theo Bảng 3.1

Bảng 3.1. Đánh giá mức độ thấm clorua của bê tông [28]

Điện lượng truyền qua mẫu bê tông (culông)	Mức độ thấm ion clorua
> 4000	Cao
từ 2000 đến 4000	Trung bình
từ 1000 đến 2000	Thấp
Từ 100 đến 1000	Rất thấp
< 100	Không đáng kể

Thí nghiệm điện trở suất bề mặt được thực hiện trên các mẫu trụ 100x200 mm ở trạng thái bảo hòa nước theo AASHTO T95 [63] ở 7, 28, 56, 90, 150 và 210 ngày.

3.2.7. Phân tích vi cấu trúc của các bê tông bằng hình SEM

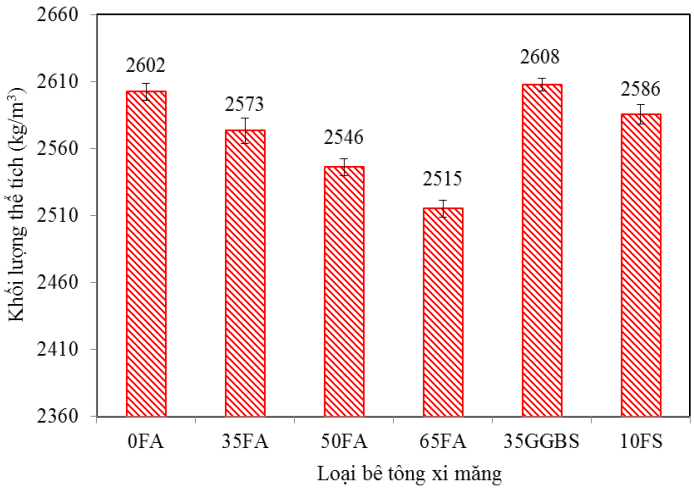
Phân tích cấu trúc vi mô trong các HPC ở 28 ngày và 150 ngày được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM), giúp hiểu được quá trình hydrat hóa của puzzolan và tác động của TB, XL và MS đến tính chất cơ học và độ bền của các HPC.

3.3. THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH MỘT SỐ TÍNH CHẤT CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG TƯƠI

3.3.1. Độ sụt

Thử độ sụt được thực hiện trong quá trình đúc các mẫu bê tông và thực hiện theo ASTM C143.

3.3.2. Khối lượng thể tích

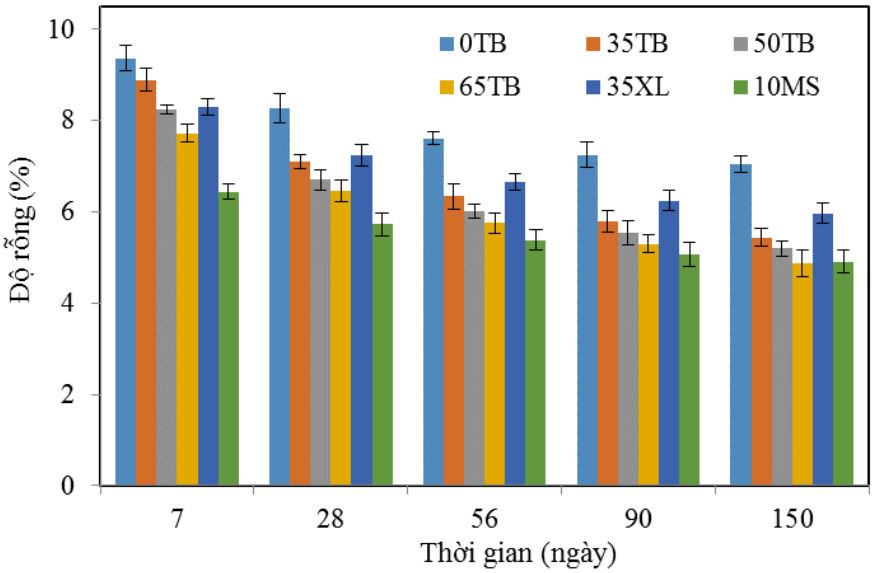


Hình 3.7. KLTT của các hỗn hợp bê tông HPC

3.4. THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ, LÝ VÀ ĐỘ BỀN CỦA CÁC LOẠI BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO

3.4.1. Độ rỗng

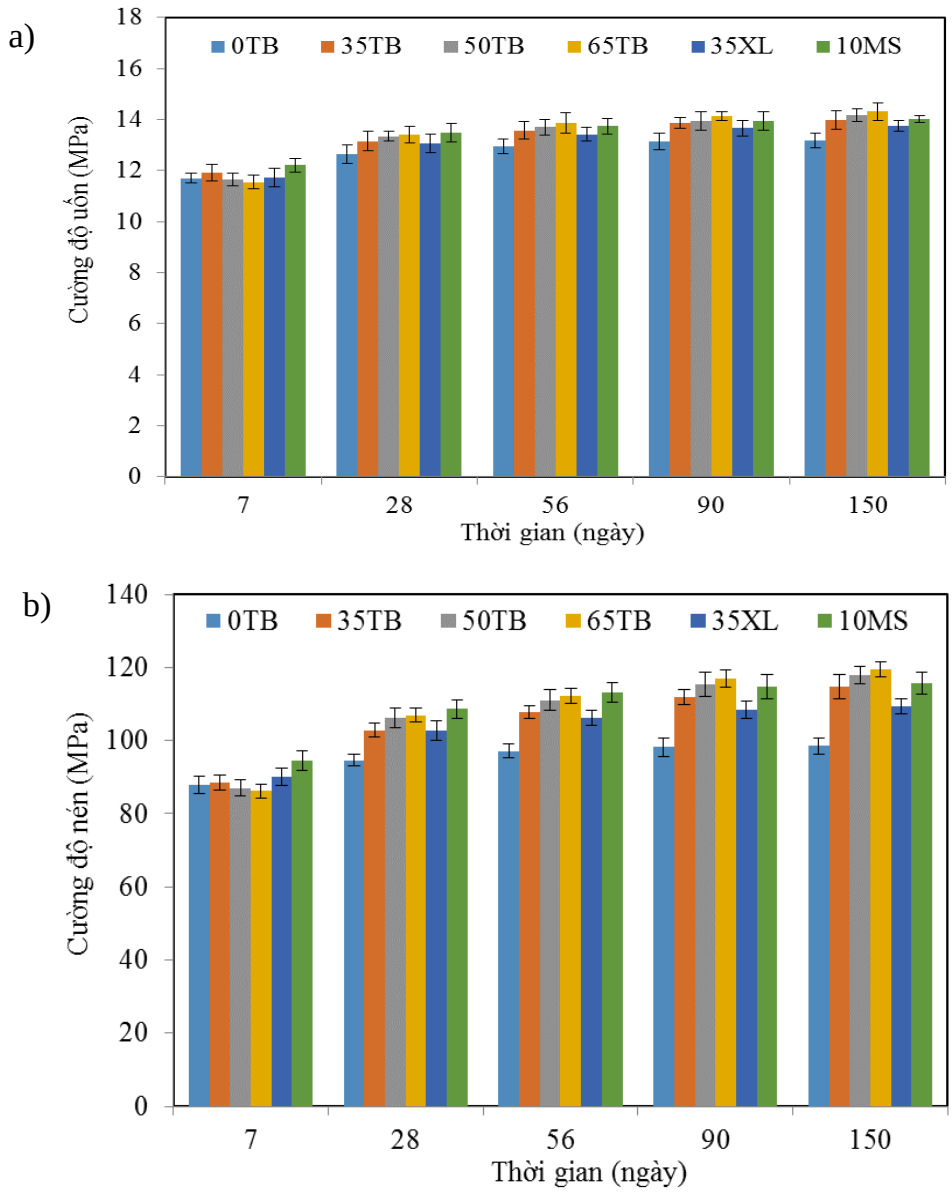
Độ rỗng của các bê tông theo thời gian được trình bày chi tiết trong Phụ lục II và thể hiện trên Hình 3.8.



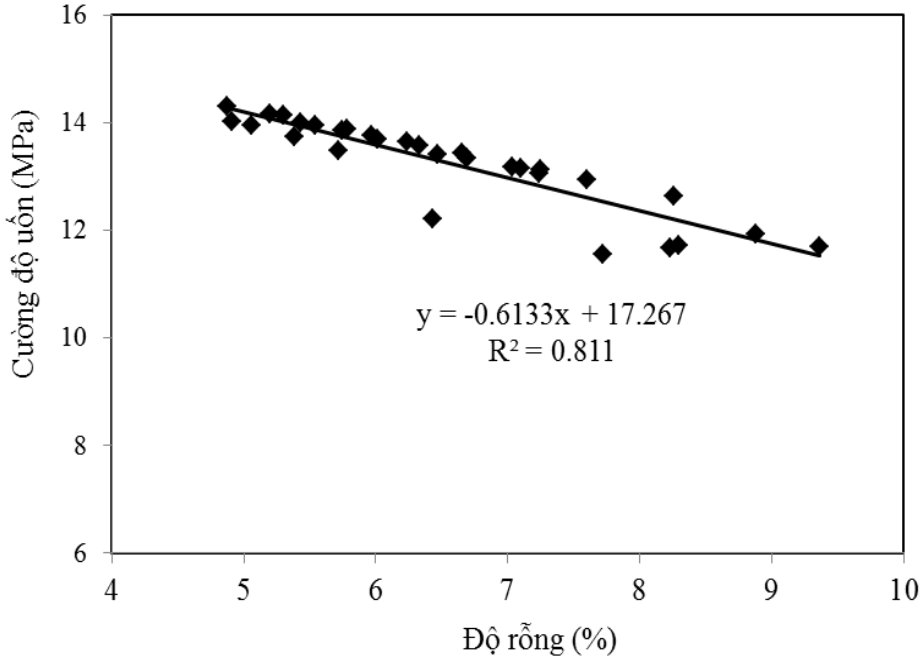
Hình 3.8. Độ rỗng của các bê tông HPC

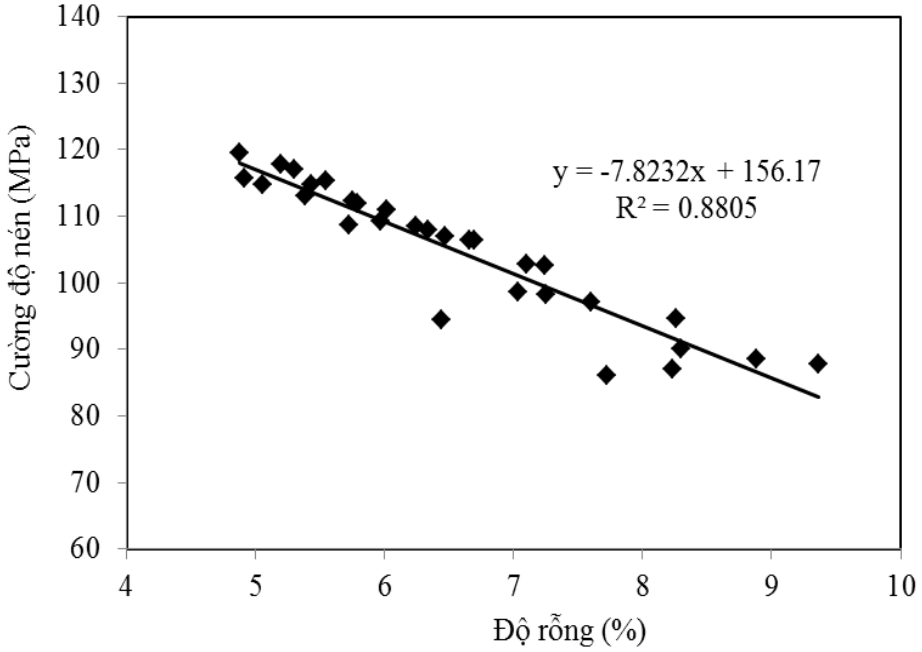
3.4.2. Cường độ kéo uốn và cường độ nén

Cường độ uốn và nén của các bê tông HPC được trình bày chi tiết trong Phụ lục III và thể hiện trên Hình 3.9.



Hình 3.9. Cường độ uốn (a) và cường độ nén (b) của các HPC



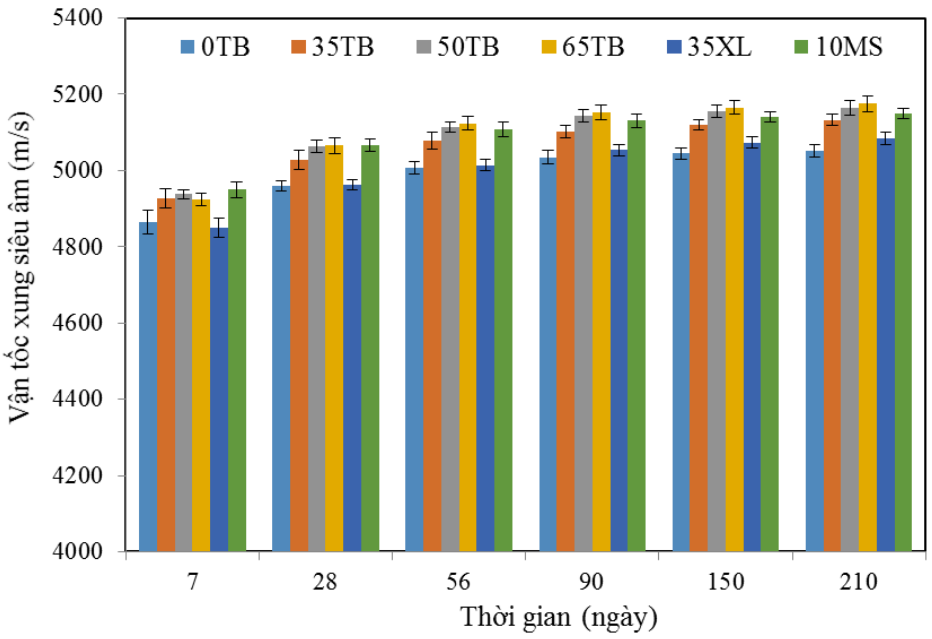


Hình 3.10. Quan hệ giữa cường độ uốn - độ rỗng (a), cường độ nén - độ rỗng (b) của các bê tông

Quan hệ giữa cường độ uốn, cường độ nén và độ rỗng của các bê tông HPC được thể hiện trên Hình 3.10, các quan hệ này có dạng tuyến tính tỉ lệ nghịch tương đối chặt chẽ với hệ số xác định R^2 lần lượt bằng 0,811 và 0,881. Mối quan hệ cho thấy khi độ rỗng tăng lên thì cường độ uốn và cường độ nén giảm xuống.

3.4.3. Vận tốc xung siêu âm

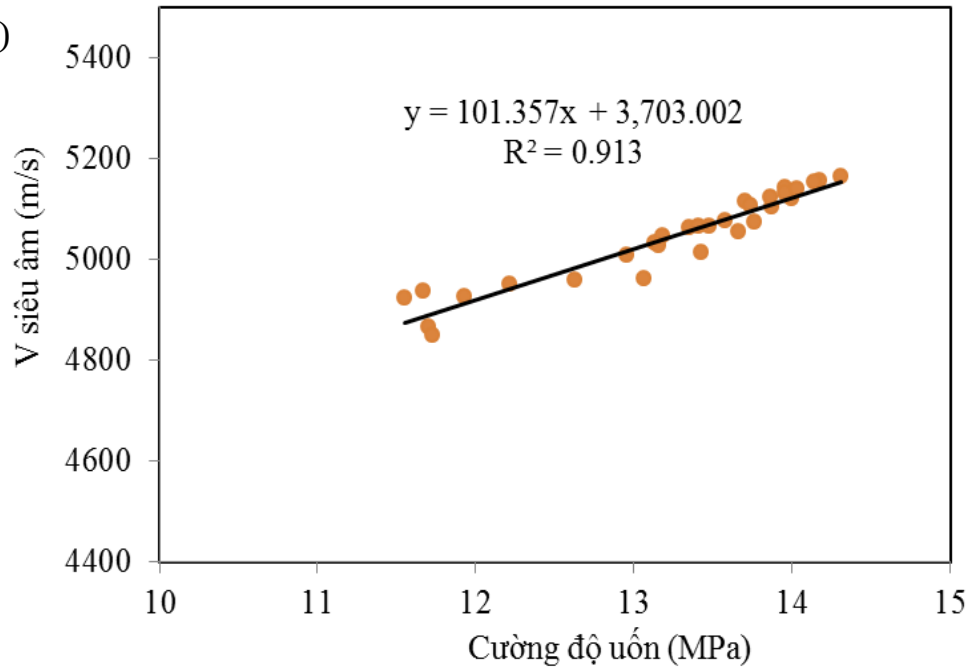
Vận tốc xung siêu âm (VTXSA) của các HPC được trình bày chi tiết trong Phụ lục IV và thể hiện trên Hình 3.11.



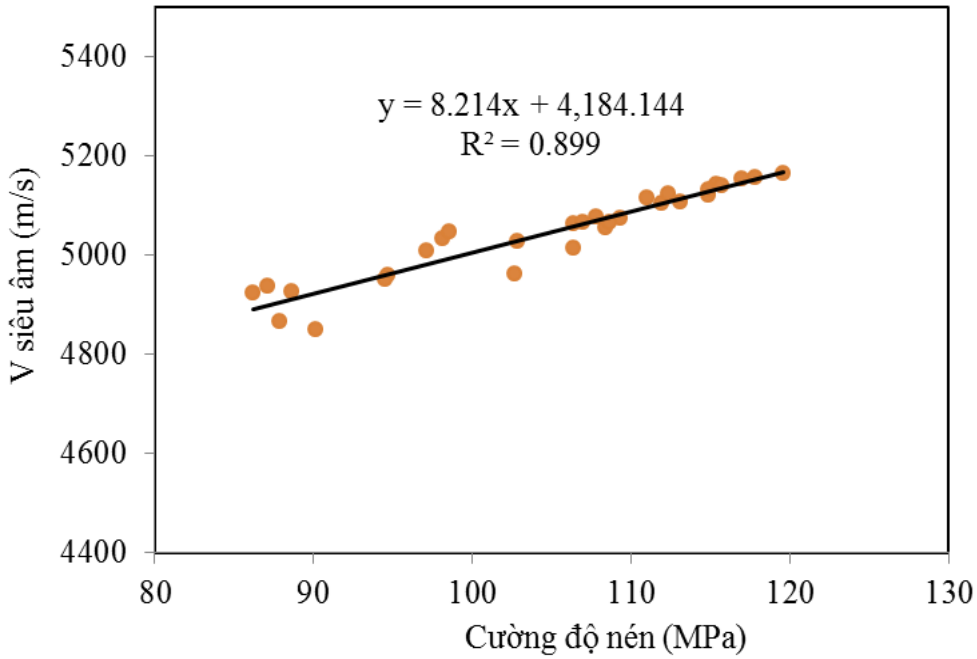
Hình 3.11. Vận tốc xung siêu âm của các mẫu bê tông HPC

Quan hệ giữa VTXSA với cường độ uốn và cường độ nén của các HPC được thể hiện trên Hình 3.12, các quan hệ này có dạng tuyến tính tỉ lệ thuận khá chặt chẽ với hệ số xác định $R^2 \geq 0.90$. Mối quan hệ cho thấy khi cường độ tăng thì VTXSA tăng.

a)



b)

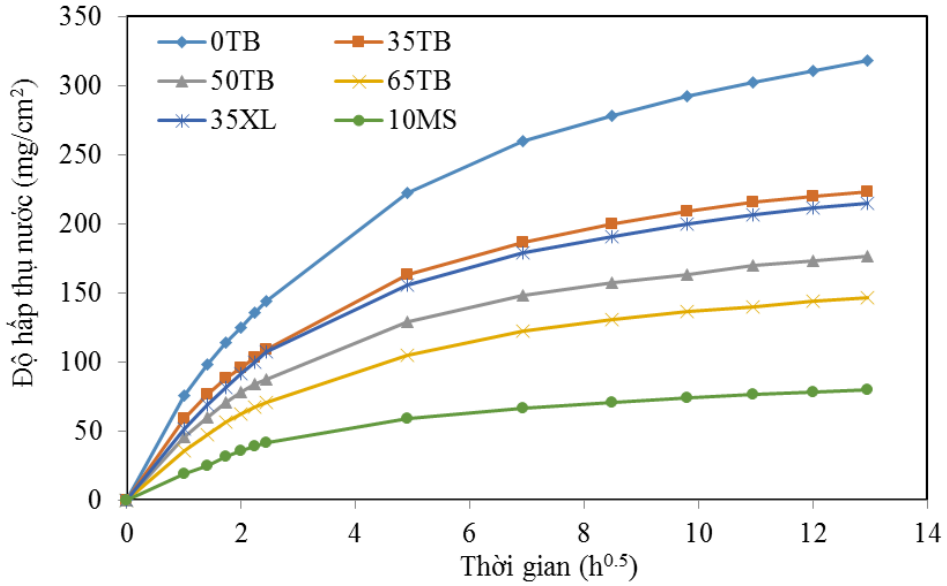


Hình 3.12. Quan hệ giữa VTXSA – cường độ uốn (a) và VTXSA – cường độ nén (b) của các bê tông HPC

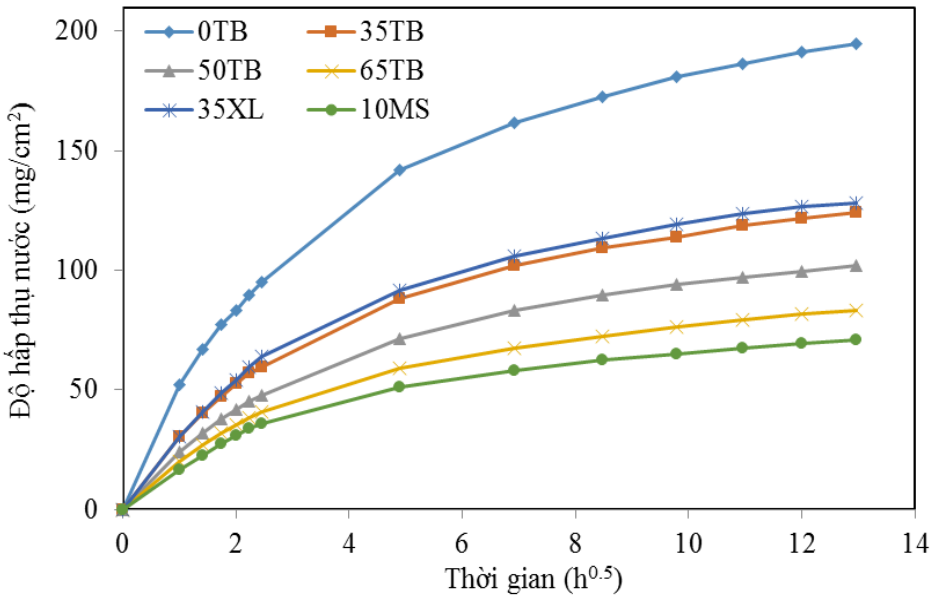
3.4.4. Độ hấp thụ nước mao dẫn

Độ hấp thụ nước mao dẫn (ĐHTN) của các HPC được trình bày chi tiết trong Phụ lục V và thể hiện trên Hình 3.13.

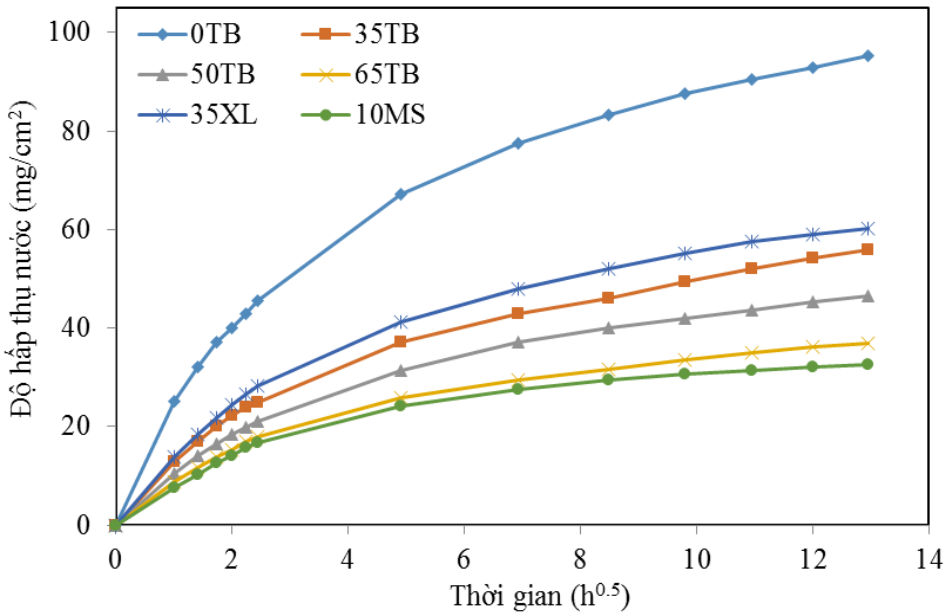
a)



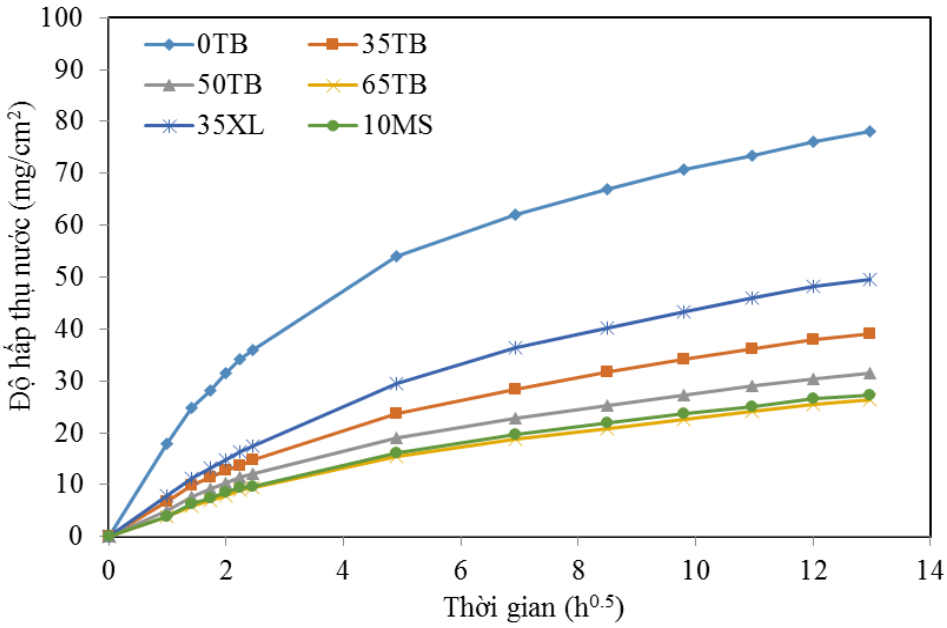
b)


0TB
35TB
50TB
65TB
35XL
10MS
Độ hấp thụ nước (mg/cm²)
Thời gian (h^0.5)
0
50
100
150
200
0
2
4
6
8
10
12
14

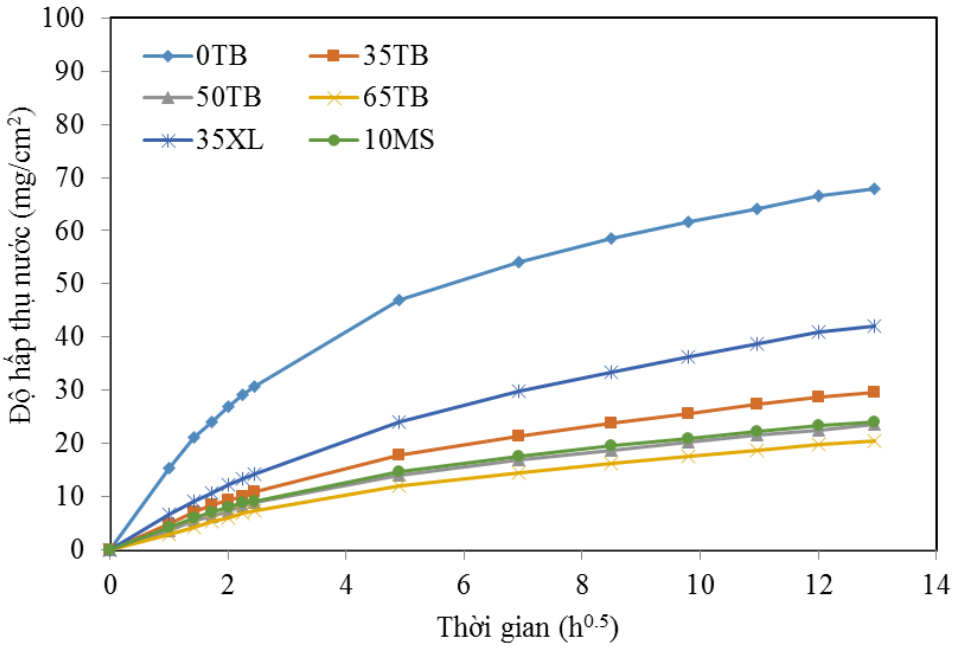
c)


0TB
35TB
50TB
65TB
35XL
10MS
Độ hấp thụ nước (mg/cm²)
Thời gian (h^0.5)
0
20
40
60
80
100
0
2
4
6
8
10
12
14

d)


0TB
35TB
50TB
65TB
35XL
10MS
Độ hấp thụ nước (mg/cm²)
Thời gian (h^0.5)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
2
4
6
8
10
12
14

e)

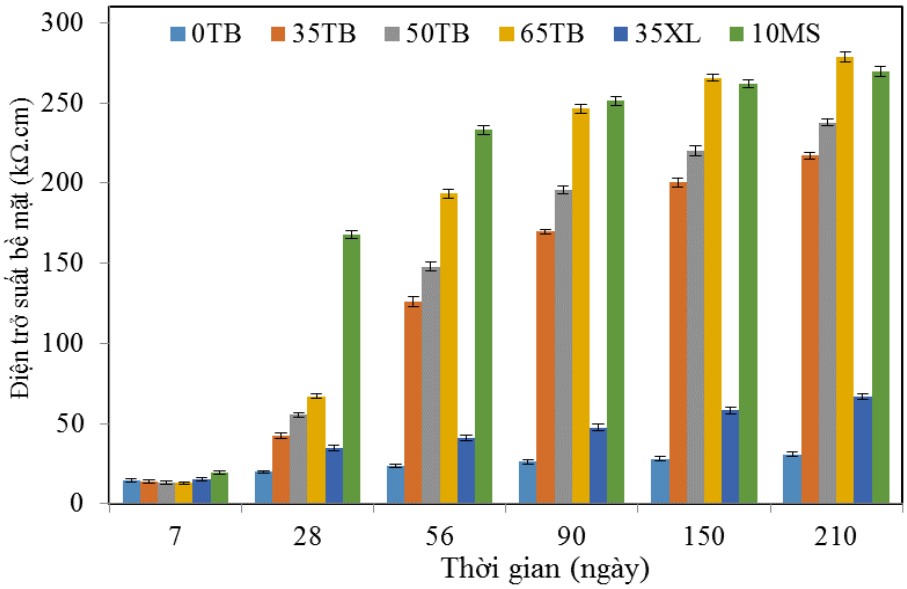


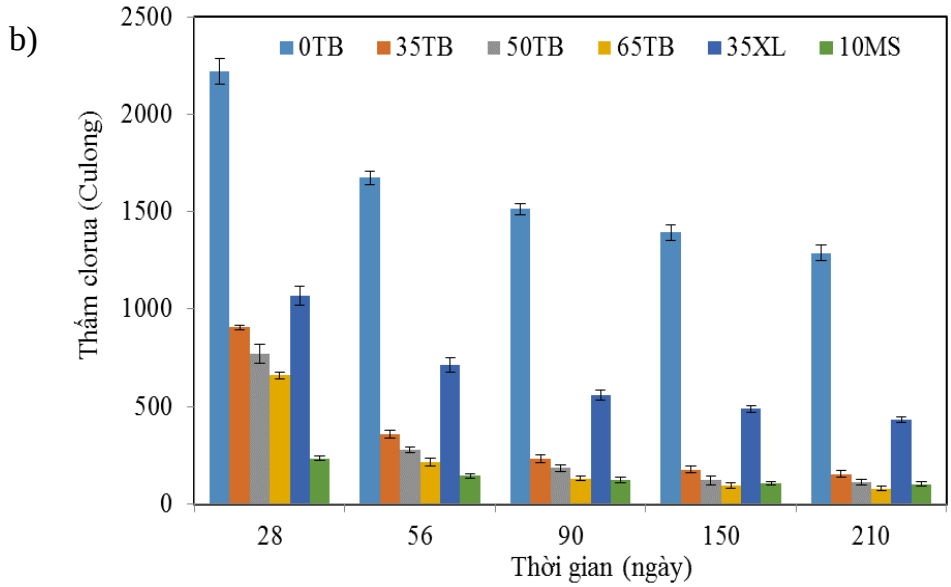
Hình 3.13. Độ hấp thụ nước mao dẫn của các bê tông HPC: a) 7 ngày, b) 28 ngày, c) 56 ngày, d) 90 ngày, e) 150 ngày

3.4.5. Điện trở suất bề mặt và độ thấm clorua

Điện trở suất bề mặt (ĐTSBM) và độ thấm clorua (ĐTCL) của các bê tông được trình bày chi tiết trong Phụ lục VI và được thể hiện trên Hình 3.15.

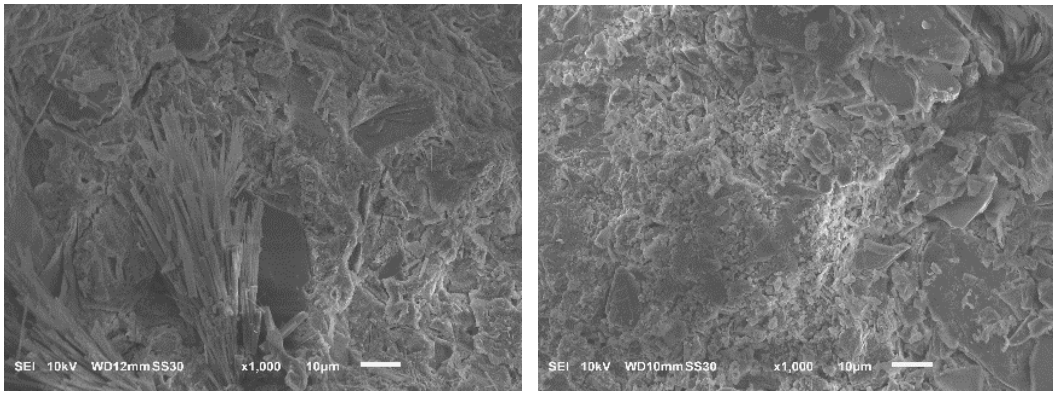
a)



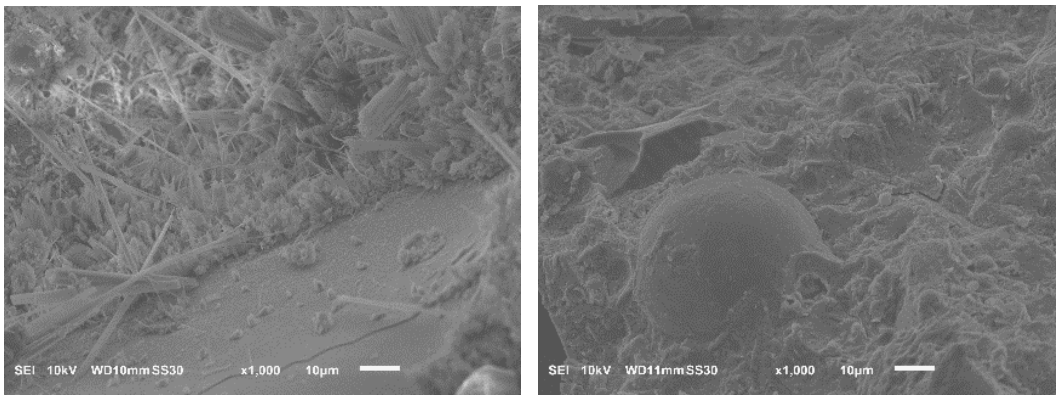


Hình 3.15. ĐTSBM (a) và ĐTCL (b) của các bê tông HPC

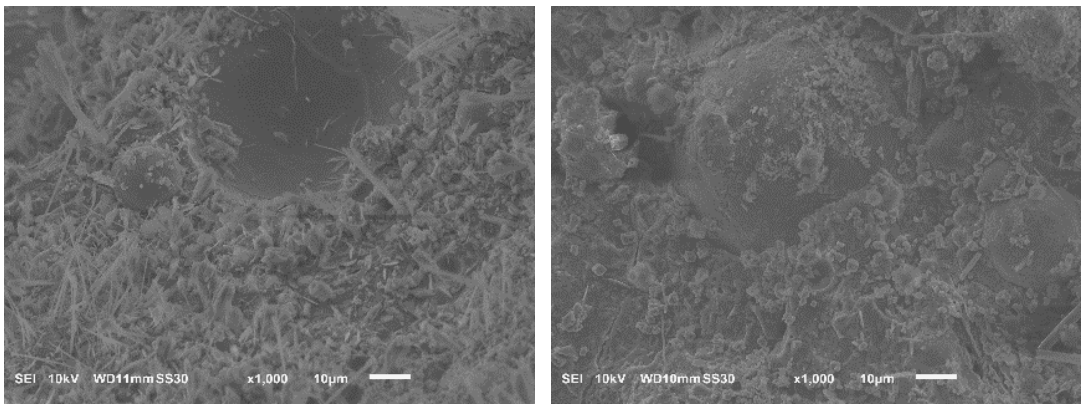
3.4.6. Hình chụp SEM



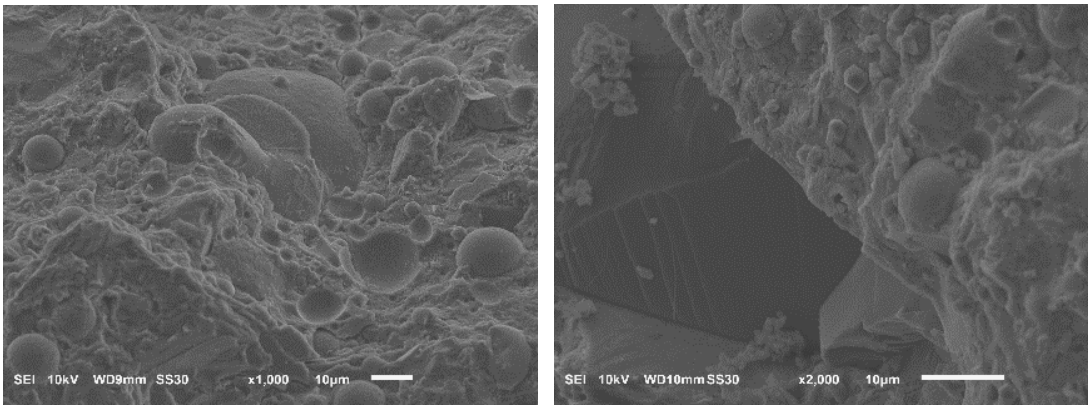
a. HPC 0TB ở 28 ngày và 150 ngày



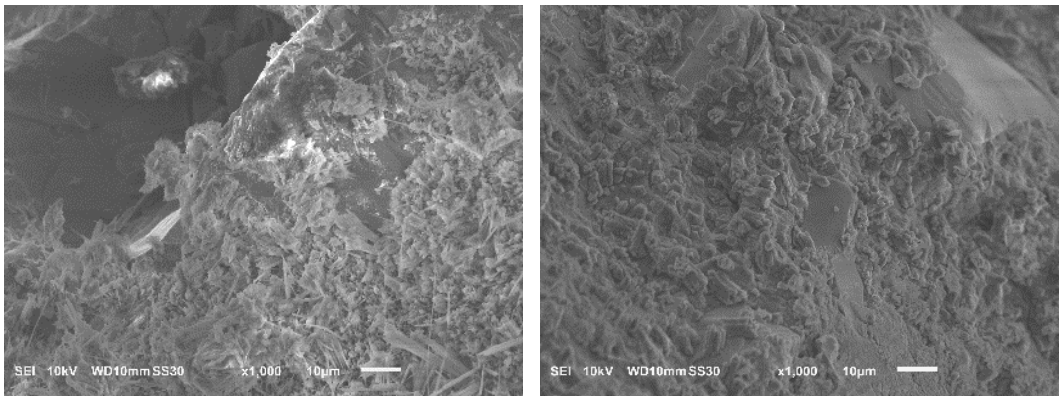
b. HPC 35TB ở 28 ngày và 150 ngày



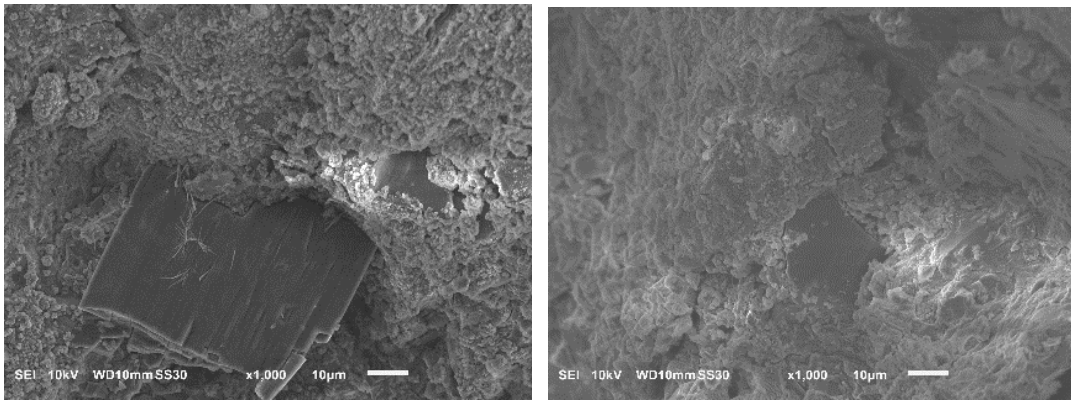
c. HPC 50TB ở 28 ngày và 150 ngày



d. HPC 65TB ở 28 ngày và 150 ngày



e. HPC 35XL ở 28 ngày và 150 ngày



f. HPC 10MS ở 28 ngày và 150 ngày

Hình 3.17. Hình chụp SEM của các HPC ở 29 ngày và 150 ngày: 0TB (a), 35TB (b), 50TB (c), 65TB (d), 35XL (e), 10MS (f)

3.5. DỰ BÁO TUỔI THỌ CỦA CÁC CÔNG TRÌNH BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO Ở VÙNG BIỂN MIỀN TRUNG

Thời gian bắt đầu ăn mòn cốt thép của công trình BTCT (tuổi thọ sử dụng) ở vùng biển và biển do thâm nhập clorua được ước tính từ phương trình sau [67, 68]:

$$C_S\left[1-\mathrm{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4.D(t).t}}\right)\right]=C_{Cr} \quad (3.1)$$

$$D_a(t) = D_{a28}\left(\frac{t_{28}}{t}\right)^m \quad (3.2)$$

C_{CR}: C_{CR} phụ thuộc vào loại CKD, đối với bê tông 0TB, 35XL và 10MS, lấy $C_{Cr}^{0TB} = C_{Cr}^{35XL} = C_{Cr}^{10MS} = 0{,}45\%CKD \approx 0{,}098\%$ khối lượng bê tông; đối với các bê tông chứa (35-65)%TB, $C_{Cr}^{35TB} = C_{Cr}^{50TB} = C_{Cr}^{65TB} = 0{,}30\%CKD \approx 0{,}076\%$ khối lượng bê tông [68].

C_S: C_S chủ yếu phụ thuộc vào điều kiện phơi nhiễm, ở đây lấy gần đúng theo kết quả nghiên cứu của Q.V. Ho và cs [32] khi khảo sát các công trình ven biển ở khu vực Đà Nẵng, Việt Nam cho vùng thủy triều như sau:

$$C_S = 0.291.t^{0.426} \quad (3.3)$$

Hệ số khuếch tán clorua biểu kiến (D_a) của các bê tông HPC có thể tính gần đúng theo các công thức thực nghiệm từ độ thấm ion clorua (ĐTCL) như sau:

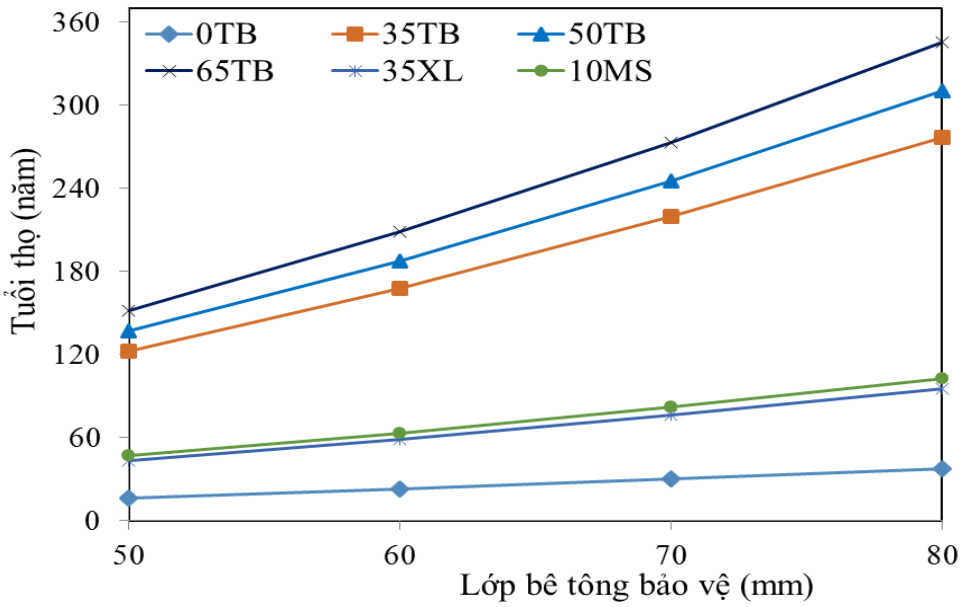
Đối với bê tông 0TB không có phụ gia khoáng, tính theo Hooton et al [69]:

$$D_a = 0.88.(ĐTCL)^{0.76}\ (10^{-14}\ m^2/s) \quad (3.4)$$

Đối với bê tông HPC chứa TB, XL và MS, tính theo Olek et al [70]:

$$D_a = 2.10^{-15}.ĐTCL + 4.10^{-13}\ (m^2/s) \quad (3.5)$$

Hệ số m: từ các hệ số $D_a(t)$, hồi qui theo phương trình (3.2) như thể hiện trên Hình 3.18 đối với HPC 0TB và 35TB, xác định được các hệ số m và hệ số xác định R^2, đối với các HPC khác thực hiện tương tự. Kết quả xác định các hệ số m và R^2 của các HPC được thể hiện trong Bảng 3.2. Life 365 [67] qui định hệ số m khi tính toán tuổi thọ sử dụng nhỏ hơn 0,60, các bê tông TB có hệ số m đều hơn hơn 0,60, do vậy khi ước tính tuổi thọ lấy hệ số m của các bê tông này bằng 0,60.



Hình 3.19. Tuổi thọ sử dụng của các công trình BTCT ở vùng thủy triều sử dụng các HPC

3.6. PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ KINH TẾ VÀ TÁC ĐỘNG MÔI TRƯỜNG

Bảng 3.4. Chi phí, CO_2-E và EC cho việc sản xuất 1 m^3 bê tông trên một đơn vị tuổi thọ sử dụng của các công trình BTCT

Bê tông	Giá thành ($/$m^3$/năm)	Tỉ lệ giảm giá thành	CO_2-E (kg/m^3/năm)	Tỉ lệ giảm CO_2-E	EC (MJ/m^3/năm)	Tỉ lệ giảm EC
0TB	3.10	0	33.73	0	319.07	0
35TB	0.42	-86.44	4.60	-86.36	43.41	-86.39
50TB	0.39	-87.33	4.11	-87.81	38.82	-87.83
65TB	0.37	-88.11	3.70	-89.04	34.95	-89.05
35XL	1.04	-66.48	8.94	-73.51	86.11	-73.01
10MS	1.45	-53.13	11.14	-66.99	105.67	-66.88

3.7. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Chương 3 đã tiến hành thí nghiệm, đánh giá ảnh hưởng của TB thay thế (35-65)%CS và ảnh hưởng của XL, MS thay thế lần lượt là 35%X và 10%X đến các tính chất của các bê tông HPC. Các kết luận được rút ra từ Chương 3 như sau:

1. Sử dụng TB thay thế (35-65)%CS làm giảm tính công tác và KLTT của hỗn hợp bê tông tươi, trong khi sử dụng 35%XL hoặc 10%MS thay thế X cải thiện tính công tác của các bê tông tươi nhưng ít ảnh hưởng đến KLTT.

KLTT của hỗn hợp HPC 35TB, 50TB, 65TB và 10MS giảm lần lượt tương ứng là 1,12%, 2,16%, 3,36% và 0,64% so với hỗn hợp HPC 0TB. Trong khi KLTT của hỗn hợp 35XL cao hơn 0,2% so với hỗn hợp 0TB.

2. Các PGK TB, XL và MS làm giảm đáng kể ĐR của các HPC, hàm lượng TB thay thế CS càng lớn thì ĐR của các HPC càng nhỏ.

3. TB, XL và MS đều cải thiện cường độ nén và kéo uốn của các HPC, trong đó hàm lượng TB thay thế CS càng lớn thì sự cải thiện cường độ càng lớn.

4. TB, XL và MS đều cải thiện VTXSA của các HPC, riêng HPC 35XL có VTXSA ở 7 ngày xấp xỉ với HPC 0TB.

5. Các HPC chứa TB, XL và MS làm giảm đáng kể ĐHTN, trong đó hàm lượng TB càng nhiều, thời gian bảo dưỡng càng lâu thì ĐHTN của các HPC chứa TB càng thấp.

6. Các HPC chứa TB, XL và MS làm tăng và giảm đáng kể ĐTSBM và độ thấm clorua, hàm lượng TB càng nhiều thì ĐTSBM càng cao và độ thấm clorua càng thấp.

7. Tuổi thọ sử dụng của các công trình BTCT ở vùng biển khi sử dụng các HPC chứa TB, XL và MS tăng lên rất đáng kể.

8. Gía thành vật liệu, CO_2-E và EC của các HPC chứa TB, XL và MS trên một đơn vị tuổi thọ sử dụng đều giảm đáng kể so với HPC 0TB.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. KẾT LUẬN

1. Sử dụng TB thay thế (35-65)%CS làm giảm KLTT của bê tông, mức suy giảm KLTT tỉ lệ thuận với hàm lượng TB thay thế CS, bê tông 10MS giảm nhẹ KLTT trong khi bê tông 35XL có KLTT tương đương với bê tông 0TB.

2. Các bê tông chứa TB, XL và MS có độ rỗng nhỏ hơn đáng kể so với bê tông 0TB. Các bê tông chứa TB thể hiện sự suy giảm độ rỗng theo thời gian là lớn nhất, kế đến là bê tông 35XL, bê tông 10MS có độ rỗng thấp nhất ở các độ tuổi sớm nhưng sự suy giảm độ rỗng tương tự như bê tông 0TB.

3. Cường độ nén và cường độ uốn của các HPC chứa (35-65)%TB đều cao hơn so với bê tông 0TB, sự gia tăng cường độ ở 7 ngày thấp hơn nhưng từ sau 28 ngày tương đương với bê tông 10MS và cao hơn đáng kể so với bê tông 35XL. Vận tốc xung siêu âm của các HPC chứa TB, XL và MS cũng thể hiện theo xu hướng tương tự như cường độ của chúng.

4. ĐHTN của các HPC chứa TB, XL và MS luôn nhỏ hơn so với HPC 0TB ở mọi độ tuổi, HPC 10MS thể hiện ĐHTN thấp nhất ở các độ tuổi sớm, tuy nhiên các HPC chứa TB lại thể hiện ĐHTN thấp nhất ở các độ tuổi muộn.

5. Sức kháng clorua của các HPC chứa TB, XL và MS vượt trội so với HPC 0TB. Bê tông 10MS thể hiện sức kháng clorua lớn nhất ở tuổi sớm, trong khi các HPC TB thể hiện sự gia tăng sức kháng clorua theo thời gian là lớn nhất.

6. Tuổi thọ sử dụng của các công trình BTCT ở vùng biển khi sử dụng các HPC chứa TB, XL và MS lớn hơn gấp nhiều lần so với HPC 0TB.

7. Các HPC chứa TB, XL và MS có giá thành vật liệu, CO_2-E và EC trên một đơn vị tuổi thọ sử dụng giảm đáng kể so với HPC 0TB. Trong đó, các HPC chứa TB thể hiện hiệu quả kinh tế và lợi ích môi trường lớn nhất.

2. KIẾN NGHỊ

Măc dù HPC chứa (35-65)%TB có những ưu thế vượt trội về cường độ và độ bền, tuy nhiên khi sử dụng hàm lượng TB thay thế cát sông trên 50% làm gia tăng liều lượng siêu dẻo, hàm lượng TB và SD nhiều dẫn đến kéo dài thời gian đông kết và giảm cường độ của HPC ở tuổi sớm, do vậy khi yêu cầu thi công tháo ván khuôn sớm và đạt cường độ cao ở tuổi sớm cần phải sử dụng hàm lượng TB ≤ 50% để đảm bảo yêu cầu. Ngoài ra, cần nghiên cứu thêm một số tính chất độ bền khác của các HPC chứa TB như độ co ngót khô, độ bền trong môi trường sunfat, a xít, …

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Sourav Ray, Mohaiminul Haque, Md. Nazmus Sakib, Ayesha Ferdous Mita, M.D. Masnun Rahman, Bibhas B. Tanmoy, Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review, Journal of Building Engineering 43 (2021) 102567.

[2]. Zhang, Y., Luo, W., Wang, J., Wang, Y., Xu, Y., Xiao, J., 2019. A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. Constr. Build. Mater. 209, 115–125.

[3]. Shi, J.; Tan, J.; Liu, B.; Chen, J.; Dai, J.; He, Z. Experimental study on full-volume slag alkali-activated mortars: Air-cooled blast furnace slag versus machine-made sand as fine aggregates. Journal of Hazardous Materials, 2021, *403*, 123983.

[4]. Santhosh, K.G.; Subhani, S.M.; Bahurudeen, A. Cleaner production of concrete by using industrial by-products as fine aggregate: A sustainable solution to excessive river sand mining. Journal of Building Engineering, 2021, 42, 102415.

[5]. Trong-Phuoc Huynh, Lanh Si Ho, Quan Van Ho, Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag, Construction and Building Materials 347 (2022) 128512.

[6]. M.C. Collivignarelli, G. Cillari, P. Ricciardi, M.C. Miino, V. Torretta, E.C. Rada, A. Abbà, The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: a review, Sustainability 12 (19) (2020) 7903.

[7]. Quyết định số 1266/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ: Phê duyệt Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021 - 2030, định hướng đến năm 2050, ngày 18 tháng 08 năm 2020.

[8]. T.R. Naik, S. S. Singh, M. M. Hossain, Properties of high performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash, Construction and Building Materials, Volume 9, Issue 4, August 1995, Pages 195-204.

[9]. P. Zhang, Q. Li and H. Zhang, Fracture properties of high-performance concrete containing fly ash, Journal of Materials: Design and Applications, 2012, Vol. 226 (2). p. 170-176.

[10]. H.K. Lee, K.M. Lee and B.G. Kim, Autogenous shrinkage of high-performance concrete containing fly ash, Magazine of Concrete Research, 2003, 55, No. 6, December, 507–515.

[11]. B.H. Bharatkumar, B.K. Raghuprasad, D.S. Ramachandramurthy, R. Narayanan and S. Gopalakrishnan, Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete, Materials and Structures, 38, 2005, 63-72.

[12]. Pham Sy Dong, Nguyen Van Tuan, Le Trung Thanh, Nguyen Cong Thang, Viet Hung Cu and Ju-Hyun Mun, Compressive Strength Development of High-Volume Fly Ash Ultra-High-Performance Concrete under Heat Curing Condition with Time, *Appl. Sci.* 2020, *10* (20), 7107.

[13]. H. Shi, B. Xu, T. Shi, X. Zhou, Determination of gas permeability of high performance concrete containing fly ash, Materials and Structures (2008) 41:1051–1056.

[14]. P. Zhang and Q. Li, Effect of Fly Ash on Durability of High Performance Concrete Composites, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, 6(1): 7-12.

[15]. Z. Fang, Y. Luo, H. Chen, Y. Gao, W. Yang, C. Wang, Research on mechanical properties and hydration characteristics of ultra-high performance concrete with high-volume fly ash microsphere, Journal of Building Engineering, Vol. 78, 1, 2023, 107738.

[16]. J.M. Khatib, Performance of self-compacting concrete containing fly ash, Construction and Building Materials, Vol. 22, Issue 9, September 2008, Pages 1963-1971.

[17]. P. R. De Matos, M. Foiato, L. R. Prudêncio Jr, Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete, Construction and Building Materials, Vol. 203, 10 April 2019, Pages 282-293.

[18]. Y. Li , Y. Gong and J. Yin, Strength and Durability of High Performance Road Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash, Applied Mechanics and Materials Vols 99-100 (2011) pp. 1264-1268.

[19]. R. Siddique, Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete, Cement and Concrete Research 33 (2003) 539–547.

[20]. R. Siddique, Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the abrasion resistance of concrete, Cement and Concrete Research 33 (2003) 1877–1881.

[21]. D. Zhang, M. Mao, S. Zhang, Q. Yang, Influence of stress damage and high temperature on the freeze–thaw resistance of concrete with fly ash as fine aggregate, Construction and Building Materials 229 (2019) 116845.

[22]. D. Zhang, Q. Yang, M. Mao, J. Li, Carbonation performance of concrete with fly ash as fine aggregate after stress damage and high temperature exposure. Construction and Building Materials, 242 (2019), 118125.

[23]. D. Zhang, Y. Wang, M. Ma, X. Guo, S. Zhao, S. Zhang, Q. Yang (2022), Effect of equal volume replacement of fine aggregate with fly ash on carbonation resistance of concrete, Materials 15, 1550.

[24]. M. L. C. Surangi, P. Julnipitawong, S. Tangtermsiriku, Y. Ohgi, and Y. Ishii, Using fly ash as a partial replacement for fine aggregate in concrete and its effects on concrete properties under different curing temperatures, ASEAN Engineering Journal, Vol 10 No 2 (2020), pp. 35-49.

[25]. T. Seo, M. Lee, C. Choi and Y. Ohno, Properties of drying shrinkage cracking of concrete containing fly ash as partial replacement of fine aggregate, Magazine of Concrete Research, 2010, 62, No. 6, June, 427–433.

[26]. S. Saxena, A. D. Pofale, Effective Utilization of Fly Ash and Waste Gravel in Green Concrete by Replacing Natural Sand and Crushed Coarse Aggregate, Materials Today: Proceedings 4 (2017) 9777–9783.

[27]. M. N. A. A. Zawawi, K. Muthusamy, A. P. P. A. Majeed, R. M. Musa, A. M. A. Budiea, Mechanical properties of oil palm waste lightweight aggregate concrete with fly ash as fine aggregate replacement, Journal of Building Engineering 27 (2020) 100924.

[28]. G. Joseph, K. Ramamurthy, Influence of fly ash on strength and sorption characteristics of cold-bonded fly ash aggregate concrete, Construction and Building Materials 23 (2009) 1862–1870.

[29]. B. Nanda, S. Rout, Properties of concrete containing fly ash and bottom ash mixture as fine aggregate, International journal of sustainable engineering, 2021, Vol. 14, No. 4, 809–819.

[30]. Q.V. Ho, P.N. Pham, Durability properties and steel corrosion resistance of reinforced concrete using fly ash and ground granulated blast furnace slag as partial replacements for sand and cement, Innov. Infrastruct. Solut. 9 (2024) 1–18.

[31]. Quan Van Ho, Trong-Phuoc Huynh, A comprehensive investigation on the impacts of steel slag aggregate on characteristics of high-performance concrete incorporating industrial by-products, Journal of Building Engineering 80 (2023) 107982.

[32]. Quan Van Ho, Tri Ho Minh Le and Trong-Phuoc Huynh, The influence of pre-compression on the durability of high-performance concrete incorporating industrial by-products, Proc IMechE Part L: J. Materials: Design and Applications, 2023, p. 15.

[33]. Quan Van Ho, Trong-Phuoc Huynh, Improving Corrosion Resistance and Prolonging the Service Life of High-performance Concrete Structures Using Fly Ash and Ground Granulated Blast-furnace Slag, Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 68 (2), pp. 669–683, 2024.

[34]. M. F. M Zain, Md Safiuddin, H Mahmud, Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water–binder ratios, Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 9, September 2000, Pages 1501-1505.

[35]. M. Mazloom, A.A. Ramezanianpour, J.J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, Cement & Concrete Composites, 26 (2004) 347–357.

[36]. F.A. Mustapha, A. Sulaiman, R.N. Mohamed, S.A. Umara, The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete, Materials Today: Proceedings, Volume 39, Part 2, 2021, Pages 965-969.

[37]. S.K. Chaudhary, A.K. Sinha, Effect of Silica Fume on Permeability and Microstructure of High Strength Concrete, Civil Engineering Journal, Vol. 6, No. 9, September, 2020, 1697-1703.

[38]. Biswas R., Rai B., Samui P., Compressive strength prediction model of high-strength concrete with silica fume by destructive and non-destructive technique. *Innov. Infrastruct. Solut.* 6, 65 (2021).

[39]. J.R. Weng, W.C. Liao, Microstructure and shrinkage behavior of high-performance concrete containing supplementary cementitious materials, Construction and Building Materials, Volume 308, 15 November 2021, 125045.

[40]. D. Shen, Y. Jiao, Y. Gao, S. Zhu, G. Jiang, Influence of ground granulated blast furnace slag on early-age cracking potential of internally cured high performance concrete, Construction and Building Materials, Volume 241, 30 April 2020, 117839.

[41]. L. Ma, Y. Zhao, J. Gong, Restrained early-age shrinkage cracking properties of high-performance concrete containing fly ash and ground granulated blast-furnace slag, Construction and Building Materials, Volume 191, 10 December 2018, Pages 1-12.

[42]. F.A. Sabet, N.A. Libre, M. Shekarchi, Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash, Construction and Building Materials, Volume 44, July 2013, Pages 175-184.

[43]. D. Pedro, J. De Brito, L. Evangelista, Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume, Cement and Concrete Composites, Volume 93, October 2018, Pages 63-74.

[44]. A. Elahi, P.A.M. Basheer, S.V. Nanukuttan, Q.U.Z. Khan, Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials, Construction and Building Materials, Vo. 24 (3), March 2010, Pages 292-299.

[45]. K. Konieczna, K. Chilmon and W.J. Rek, Investigation of Mechanical Properties, Durability and Microstructure of Low-Clinker High-Performance Concretes Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag, Siliceous Fly Ash and Silica Fume, Appl. Sci. 2021, 11(2), 830.

[46]. S. Teng, T.Y.D. Lim, B.S. Divsholi, Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag, Construction and Building Materials, Volume 40, March 2013, Pages 875-881.

[47]. Y. Biskri, D. Achoura, N. Chelghoum, M. Mouret, Mechanical and durability characteristics of High Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates, Construction and Building Materials, Volume 150, 30 September 2017, Pages 167-178.

[48]. K. C. Onyelowe, A. M. Ebid, The influence of fly ash and blast furnace slag on the compressive strength of high-performance concrete (HPC) for sustainable structures, Asian Journal of Civil EngineeringVolume 25, 2024, pages 861–882.

[49]. Nguyễn Công Thắng, Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh, Ảnh hưởng của phụ gia khoáng đến khả năng ăn mòn cốt thép trong bê tông chất lượng siêu cao, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2023, tập 12, số 2, 2018, trang 86-91.

[50]. Bùi Thị Thanh Huyền, Tống Tôn Kiên, Lê Mạnh Cường, Nguyễn Tuấn Minh, Nguyễn Mạnh Phát, Nghiên cứu đánh giá khả năng bảo vệ cốt thép của bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng tro bay lớn tiếp xúc với nước biển, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2021, 15 (6V): 94–110.

[51]. Nguyễn Thị Bích Thủy, Huỳnh Công Ka, Trần Triệu Duy Khánh, Nguyễn Tiến Đạt, Ảnh hưởng của tro bay thay thế một phần cát tới tính chất của vữa xi măng, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2022, 16 (3V): 128–137.

[52]. Lâm Văn Trung, Huỳnh Trọng Phước, Nguyễn Ngọc Sơn; Hồ Văn Quân, Nghiên cứu sử dụng tro bay thay thế một phần cốt liệu mịn trong bê tông xi măng ứng dụng cho xây dựng mặt đường ô tô, Tạp chí GTVT, số 8 (2023), trang 30-34.

[53]. ACI 211.4R, Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials, 2008.

[54]. ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2008.

[55]. ASTM C143, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, 2015.

[56]. ASTM C138/C138M, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, 2018.

[57]. ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, 2021.

[58]. ASTM C78/C78M, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), 2010.

[59]. ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2021.

[60]. ASTM C597, Standard test method for pulse velocity through concrete, 2016.

[61]. ASTM C1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, 2020.

[62]. ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2019.

[63]. AASHTO T95 Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, Washington, D.C., USA, 2014.

[64]. H. J. Chen, S. S. Huang, C. W. Tang, M. A. Malek, L. W. Ean, Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes: a construction site study, Constr. Build. Mater. 35 (2012) 1063–1070.

[65]. T. Aly and J. G. Sanjayan, Effect of Pore-Size Distribution on Shrinkage of Concretes**,** Journal Of Materials In Civil Engineering, 2010 (22): 525-532.

[66]. Z. Wan, T. He, N. Chang, R. Yang, H. Qiu, Effect of silica fume on shrinkage of cement-based materials mixed with alkali accelerator and alkali-free accelerator, Journal of Materials Research and Technology, Volume 22, January–February 2023, Pages 825-837.

[67]. Life-365, Service life prediction model and computer program for predicting the service life and life-cycle cost of reinforced concrete exposed to chlorides. ACI Committe 365, 2020.

[68]. TCVN 12041, 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.

[69]. Hooton R.D, Thomas M.D.A and Standish K., Prediction of chloride penetration in concrete, 2001, p. 419.

[70]. Olek J., Lu A., Feng X., Magee B., Performance-related specifications for concrete bridge superstructures, Vol. 2: high performance concrete, 2012.

[71]. S. Sadati, M.K. Moradllo and M. Shekarchi, Long-Term Performance of Silica Fume Concrete in Soil Exposure of Marine Environments, J. Mater. Civ. Eng., 2017, 29(9).

[72]. J. Yu, C. Lu, C.K.Y. Leung, G. Li, Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash, Construction and Building Materials, Vol. 147, 30 August 2017, Pages 510-518.