

Nghiên cứu thiết kế thực nghiệm tối ưu hóa thành phần bê tông ít xi măng có độ bền cao cho kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường ven biển Việt Nam bằng phương pháp Plackett-Burman

Design of experiment based optimization of low-cement concrete mixtures using the Plackett-Burman method for reinforced concrete structures in Vietnam's coastal environment

> THS.NCS NGUYỄN TUẤN CƯỜNG, TS VŨ VIỆT HƯNG*, PGS.TS NGUYỄN THANH SANG

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: hungvv_ph@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Plackett-Burman để tối ưu hóa thành phần bê tông ít xi măng có độ bền cao cho kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường ven biển Việt Nam. Tro bay nhiệt điện Duyên Hải và xỉ hạt lò cao nghiền mịn Formosa được sử dụng làm vật liệu thay thế một phần xi măng poóc-lăng. Ba yếu tố gồm tổng lượng chất kết dính, hàm lượng tro bay và hàm lượng xỉ lò cao nghiền mịn được đánh giá thông qua 12 cấp phối thực nghiệm. Kết quả cho thấy hàm lượng xỉ lò cao nghiền mịn có ảnh hưởng lớn nhất đến khả năng kháng xâm nhập ion clorua, hàm lượng tro bay quyết định cường độ chịu nén của bê tông, trong khi tổng lượng chất kết dính ảnh hưởng nhiều nhất đến cường độ chịu kéo khi bẻ. Cấp phối bê tông tối ưu được xác định với 450 kg/m³ chất kết dính, 40% xỉ lò cao nghiền mịn và 13% tro bay, đạt cường độ chịu nén đặc trưng 28 ngày là 45 MPa, cường độ chịu kéo khi bẻ 28 ngày là 3,2 MPa và điện lượng thấm ion clorua 387 cu-lông. Nghiên cứu chứng minh phương pháp Plackett-Burman là công cụ hiệu quả để thiết kế và tối ưu hóa bê tông ít xi măng bền vững cho các công trình ven biển.

Từ khóa: Bê tông ít xi măng; phương pháp Plackett-Burman; thiết kế thực nghiệm (DOE); xỉ hạt lò cao nghiền mịn; tro bay nhiệt điện; kháng xâm nhập ion clorua.

ABSTRACT

This study employed the Plackett-Burman experimental design method to optimize the mix proportions of high-durability low-cement concrete for reinforced concrete structures in Vietnam's coastal environment. Duyen Hai fly ash and Formosa ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) were utilized as partial replacements for Portland cement. Three factors, comprising the total binder, fly ash and GGBFS contents, were evaluated through 12 experimental mix designs. The results indicate that GGBFS content exerts the most significant effect on the chloride ion penetration resistance, the fly ash content governs the compressive strength of the concrete, while the total binder content has the greatest influence on the splitting tensile strength. The optimal concrete mix proportion was determined to comprise 450 kg/m³ of total binder, 40% GGBFS and 13% fly ash, achieving a 28-day specified compressive strength of 45 MPa, a 28-day splitting

tensile strength of 3.2 MPa and a chloride ion penetrability of 387 Coulombs. The study demonstrates that the Plackett-Burman method is an effective tool for designing and optimizing sustainable low-cement concrete for coastal structures.

Keywords: Low-cement concrete; Plackett-Burman experimental design; design of experiments (DOE); ground granulated blast-furnace slag; fly ash; chloride penetration resistance.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công trình xây dựng bê tông cốt thép ven biển và hải đảo ở Việt Nam phải làm việc trong môi trường biển có tính xâm thực cao. Trong đó, sự xâm nhập của ion clorua từ nước biển và khí quyển biển được xem là một trong những nguyên nhân chính gây ăn mòn cốt thép, dẫn đến suy giảm độ bền và tuổi thọ công trình [1]. Nghiên cứu đối với các công trình bê tông cốt thép ven biển Việt Nam cho thấy quá trình ăn mòn cốt thép do ion clorua có thể xuất hiện sau 10 - 30 năm khai thác tùy thuộc vào chất lượng bê tông, điều kiện môi trường và chế độ bảo trì công trình [2]. Vì vậy, nghiên cứu các giải pháp nâng cao khả năng kháng xâm nhập ion clorua và kéo dài tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường biển Việt Nam từ việc tối ưu hóa thành phần bê tông độ bền cao sử dụng chất kết dính phụ thêm (SCMs) như tro bay (FA) và xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS) cho công trình ven biển Việt Nam có ý nghĩa khoa học và thực tiễn quan trọng. Việc sử dụng hàm lượng lớn FA và GGBFS để thay thế xi măng poóc-lăng được xem là một giải pháp hiệu quả để giảm lượng dùng xi măng trong bê tông, từ đó giảm phát thải CO₂ và giá thành sản xuất bê tông [3, 4].

Chất kết dính phụ thêm như FA và GGBFS đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trên thế giới nhằm cải thiện cấu trúc vi mô, giảm độ thấm ion clorua và nâng cao độ bền lâu của bê tông [5, 6, 7, 8]. Phản ứng pozzolanic của FA với Ca(OH)₂ sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng, cùng với phản ứng thủy hóa (hydraulic) của GGBFS trong môi trường kiềm, tạo ra thêm C-S-H lấp đầy lỗ rỗng mao quản, giảm đáng kể hệ số khuếch tán ion clorua [9, 10].

Tại Việt Nam, nguồn FA và GGBFS là rất lớn và đang ngày càng tăng. Theo báo cáo của Bộ Xây dựng năm 2025, sản lượng tro xỉ thải ra từ các nhà máy nhiệt điện than trong cả nước vượt 25 triệu tấn/năm và nếu không được tận dụng hiệu quả, tổng lượng tồn trữ có thể đạt 422 triệu tấn vào năm 2030 [11]. Bên cạnh đó, Việt Nam là một trong những nước sản xuất thép hàng đầu khu vực, dẫn đến lượng xỉ lò cao nghiền mịn từ các khu liên hợp gang thép như Formosa Hà Tĩnh ngày càng lớn. Việc sử dụng hai loại chất thải công nghiệp này vừa giải quyết vấn đề môi trường, vừa mang lại giá trị kinh tế cho ngành Xây dựng. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu trong nước về bê tông có SCMs thường tập trung vào đánh giá tính chất của từng cấp phối riêng lẻ mà chưa có nhiều ứng dụng hệ thống các công cụ quy hoạch thực nghiệm (DOE) để xác định tối ưu đồng thời nhiều chỉ tiêu kỹ thuật và kinh tế. Phương pháp DOE cho phép với số lượng thí nghiệm ít nhất có thể thu được lượng thông tin tối đa về hệ thống, từ đó xây dựng mô hình hồi quy đáng tin cậy và thực hiện tối ưu hóa đa mục tiêu [12, 13].

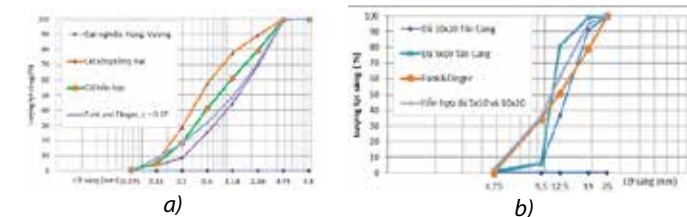
Trong nghiên cứu này, phương pháp quy hoạch thực nghiệm Plackett-Burman Design (PBD) được áp dụng để sàng lọc và đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thành phần cấp phối đến các chỉ tiêu cường độ và độ bền của bê tông ít xi măng. Thiết kế PBD cho phép xác định các yếu tố quan trọng với số lượng thí nghiệm hạn chế, qua đó nâng cao hiệu quả nghiên cứu và giảm chi phí thực nghiệm [14]. Với 3 biến số đầu vào (lượng chất kết dính, tỷ lệ GGBFS, tỷ lệ FA) và 3 hàm mục tiêu đầu ra (cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi bừa, điện lượng thấm ion clorua) để lựa chọn cấp phối tối ưu cho bê tông ít xi măng có độ bền cao ứng dụng công trình ven biển tại Việt Nam.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu chế tạo bê tông

Xi măng poóc-lăng PC40 INSEE (XM) được sử dụng, đáp ứng TCVN 2682:2020. Tro bay nhiệt điện loại F (FA) lấy từ Nhà máy nhiệt điện Duyên Hải, đáp ứng TCVN 10302:2014 và ASTM C618. Xỉ lò cao nghiền mịn S95 (GGBFS) được cung cấp bởi Công ty CHC (nghiên từ xỉ Formosa), đáp ứng TCVN 11586:2016.

Cốt liệu nhỏ sử dụng hỗn hợp 50% cát nghiền từ Hùng Vương (đá Andesit) và 50% cát sông Đồng Nai, cốt liệu lớn là đá dăm D_{max} = 20 mm từ hỗn hợp 60% đá cỡ (10×20)mm và 40% đá cỡ (5×10)mm có nguồn gốc từ mỏ Tân Cang - Đồng Nai, có phân bố cỡ hạt được tối ưu trên cơ sở lý thuyết độ đặc của Funk & Dinger [15] với q = 0,37 (Hình 1). Phụ gia siêu dẻo Polycarboxylate thế hệ mới của SilkRoad VINA được sử dụng để duy trì tính công tác trong khi giảm tỷ lệ nước/chất kết dính.



Hình 1. Thành phần cấp phối hạt của: a) - Cốt liệu nhỏ; b) - Cốt liệu lớn

2.2. Thiết kế thí nghiệm theo phương pháp DOE

Nghiên cứu sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm DOE dạng thí nghiệm hai mức. Các biến thí nghiệm và khoảng giá trị được thiết lập:

- Tổng lượng chất kết dính (CKD): 420 kg/m³ và 465 kg/m³;
- Tỷ lệ GGBFS trong tổng CKD: 30% và 40%;
- Tỷ lệ FA trong tổng CKD: 10% và 30%.

Ma trận thí nghiệm gồm 12 thí nghiệm được ngẫu nhiên hóa thứ tự thực hiện để hạn chế ảnh hưởng của các yếu tố gây nhiễu. Mỗi cấp phối được chế tạo và thử nghiệm theo nguyên tắc lập. Thành phần cấp phối chi tiết được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần cấp phối bê tông ít xi măng có độ bền cao

Ký hiệu cấp phối	CKD = XM + GGBFS + FA (kg)	GGBFS (kg)	FA (kg)	Nước (lít)	Cát nghiền (kg)	Cát sông (kg)	Đá 5x10 (kg)	Đá 10x20 (kg)	PG (lít)
B45X3T1	465	140	47	150	344	344	420	630	7,0
B35X3T3	420	126	126	158	307	307	420	630	6,3
B45X4T1	465	186	47	150	344	344	420	630	7,0
B45X3T1	465	140	47	150	340	340	420	630	7,0
B35X4T1	420	168	42	150	307	307	420	630	6,3
B45X4T1	465	186	47	150	344	344	420	630	7,0
B35X3T1	420	126	42	150	307	307	420	630	6,3
B35X4T3	420	168	126	150	302	302	420	630	6,3
B45X3T3	465	140	140	155	340	340	420	630	7,0
B45X4T3	465	186	140	155	349	349	420	630	7,0
B35X4T3	420	168	126	150	307	307	420	630	6,3
B35X3T1	420	126	42	150	315	315	420	630	6,3
B45XM100 (đối chứng)	465	-	-	148	360	360	420	630	7,0

2.3. Các phương pháp thí nghiệm

Cường độ chịu nén (R_n) được xác định trên mẫu lập phương ($150 \times 150 \times 150$) mm tại các tuổi 3, 7, 28 và 90 ngày theo TCVN 3118:2022. Cường độ chịu kéo khi bừa (R_{ech}) được xác định trên mẫu trụ (150×300) mm tại các tuổi 3, 7, 28 và 90 ngày theo TCVN 3119:2022. Điện lượng thẩm ion clorua (Q_{s28}) được xác định tại 28 ngày tuổi theo phương pháp TCVN 9337:2012/ASTM C1202 trên mẫu trụ đường kính 100 mm, chiều dày 50 mm, với điện áp một chiều 60V trong 6 giờ.



Hình 2. Các thí nghiệm: a) - Cường độ chịu nén; b) - Cường độ chịu kéo khi bừa; c) - Đo điện lượng thẩm ion clorua

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

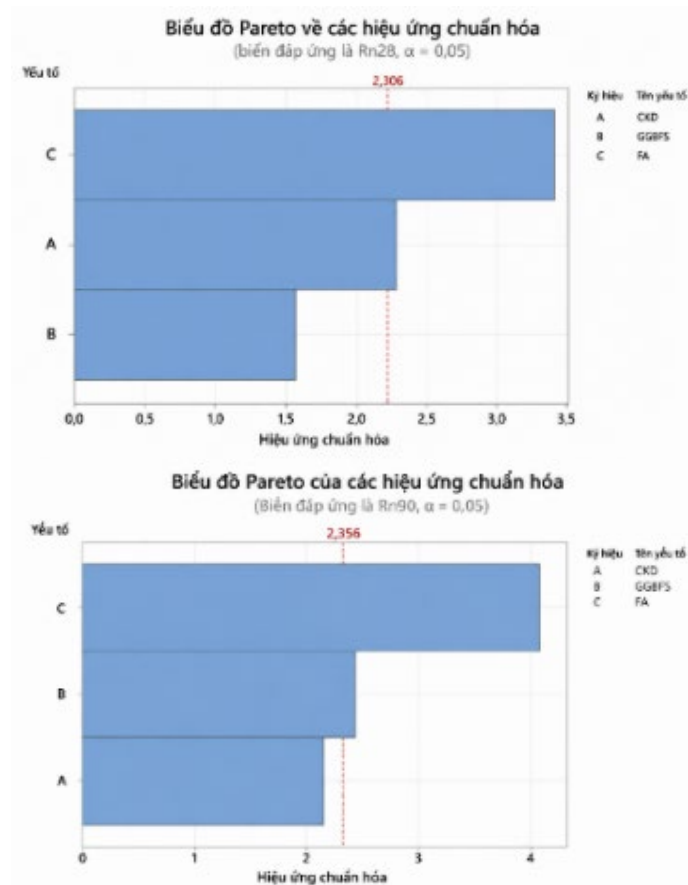
3.1. Cường độ chịu nén

Kết quả cường độ chịu nén của các cấp phối bê tông được trình bày trong Bảng 2. Nhìn chung, tất cả các cấp phối có SCMs đều đạt cường độ nén 28 ngày trong khoảng 39,1 - 47,9 MPa. Cấp phối B45X4T1 đạt cường độ nén 28 ngày cao nhất trong nhóm có phụ gia khoáng với 47,9 MPa, vượt trội so với một số cấp phối khác.

Tốc độ phát triển cường độ ở tuổi sớm (R_{n3}/R_{n28}) của các cấp phối có SCMs dao động từ 0,41 đến 0,55, thấp hơn đáng kể so với mẫu đối chứng B45XM100 (0,64). Điều này phản ánh đặc tính phát triển chậm nhưng bền vững của FA và GGBFS thông qua phản ứng pozzolanic thứ cấp. Tỷ lệ R_{n7}/R_{n28} của các cấp phối đều duy trì ở mức 0,64 - 0,78, cho thấy tốc độ phát triển cường độ khá nhanh; R_{n90}/R_{n28} duy trì ở mức 1,12 - 1,19, cho thấy cường độ ở 90 ngày tăng đáng kể so với bê tông đối chứng (1,09).

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén và điện lượng thẩm ion clorua

Ký hiệu hỗn hợp	R_{n3} (MPa)	R_{n7} (MPa)	R_{n28} (MPa)	R_{n90} (MPa)	R_{n3}/R_{n28}	R_{n7}/R_{n28}	R_{n90}/R_{n28}	Q_{s28} (C)
B45X3T1	18,1	29,2	42,5	49,8	0,43	0,69	1,17	644
B35X3T3	19,1	24,9	39,1	46,6	0,49	0,64	1,19	781
B45X4T1	23,3	36,6	47,9	57,0	0,49	0,76	1,19	341
B45X3T1	18,1	29,2	42,5	49,8	0,43	0,69	1,17	486
B35X4T1	22,8	33,6	46,1	53,9	0,49	0,73	1,17	980
B45X4T1	23,3	36,6	47,9	57,0	0,49	0,76	1,19	356
B35X3T1	22,8	28,8	41,2	47,8	0,55	0,70	1,16	360
B35X4T3	21,8	30,7	39,6	46,3	0,55	0,78	1,17	631
B45X3T3	17,9	31,2	42,6	47,8	0,42	0,73	1,12	322
B45X4T3	16,3	30,6	39,9	44,7	0,41	0,77	1,12	967
B35X4T3	21,8	30,7	39,6	46,3	0,55	0,78	1,17	278
B35X3T1	22,8	28,8	41,2	47,8	0,55	0,70	1,16	389
B45XM100 (đối chứng)	36,9	49,9	57,8	63,2	0,64	0,86	1,09	2741



Hình 3. Ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến R_n theo biểu đồ Pareto

Phân tích Pareto (Hình 3) và phương trình hồi quy (1) cho cường độ chịu nén 28 ngày cho thấy FA ảnh hưởng mạnh đến cường độ, sau đó đến tổng chất kết dính (CKD), cuối cùng là hàm lượng GGBFS. Tương tự như vậy, phương trình (2) cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê và FA là yếu tố ảnh hưởng quan trọng đến phát triển cường độ dài ngày.

$$R_{n28} = 9,4 + 0,0734 \text{ CKD} + 13,8 \text{ GGBFS} - 22,2 \text{ FA} \quad (1)$$

$$R_{n90} = 16,5 + 0,0685 \text{ CKD} + 24,2 \text{ GGBFS} - 30,7 \text{ FA} \quad (2)$$

Trong đó: CKD là tổng lượng chất kết dính (kg/m^3); GGBFS là tỷ lệ xỉ lò cao nghiền mịn (%); FA là tỷ lệ tro bay (%).

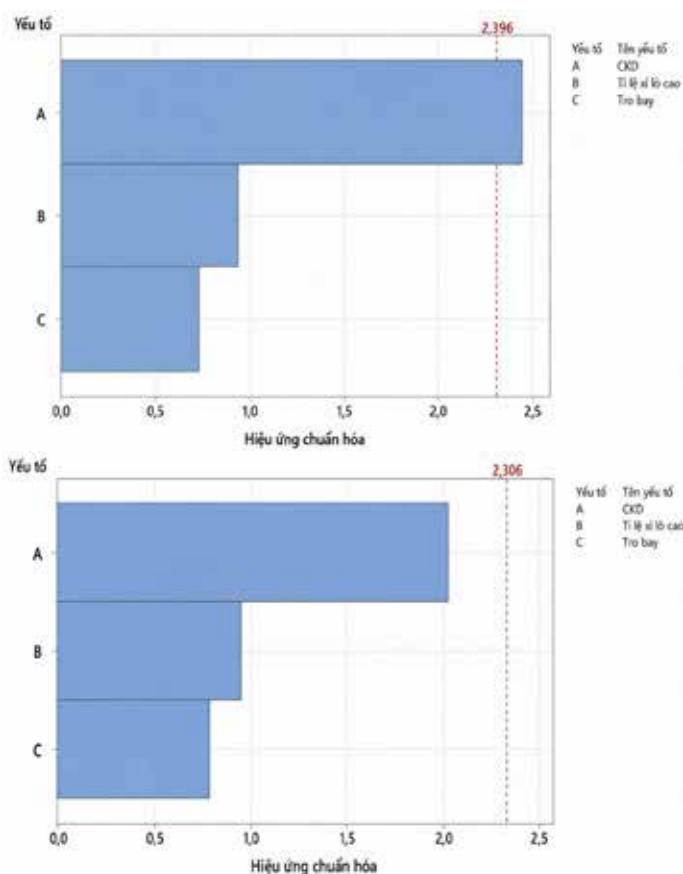
3.2. Cường độ chịu kéo khi bừa

Kết quả cường độ chịu kéo khi bừa trình bày ở Bảng 3 cho thấy xu hướng tương tự như cường độ chịu nén nhưng với sự khác biệt rõ ràng hơn theo tỷ lệ GGBFS. Cấp phối B45X4T1 đạt R_{ech} cao nhất ở 28 ngày là 3,5 MPa, ở tuổi 90 ngày đạt 4,2 MPa vượt cả mẫu đối chứng B45XM100 (4,0 MPa), trong khi đó cấp phối B35X3T1 cho R_{ech28} thấp nhất là 2,6 MPa.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu kéo khi bừa

Ký hiệu hỗn hợp	R_{ech3} (MPa)	R_{ech7} (MPa)	R_{ech28} (MPa)	R_{ech90} (MPa)
B45X3T1	1,3	2,2	3,1	3,6
B35X3T3	1,3	2,0	3,2	3,8
B45X4T1	1,5	2,5	3,5	4,2
B45X3T1	1,5	2,2	3,1	3,6
B35X4T1	1,7	2,9	3,2	3,7
B45X4T1	1,5	2,5	3,5	4,2

B35X3T1	1,4	1,7	2,6	3,0
B35X4T3	1,7	2,2	2,7	3,2
B45X3T3	1,3	2,2	3,1	3,6
B45X4T3	1,7	2,2	2,7	3,2
B35X4T3	1,7	2,2	2,7	3,2
B35X3T1	1,4	1,7	2,6	3,0
B45XM100 (đối chứng)	2,4	3,0	3,7	4,0



Hình 4. Ảnh hưởng của yếu tố đầu vào đến cường độ chịu kéo khi bừa theo biểu đồ Pareto: R_{ech28} (trái), R_{ech90} (phải)

Phân tích Pareto (Hình 4) và hồi quy cho cường độ chịu kéo khi bừa tuổi 28 ngày (công thức 3) cho thấy CKD là yếu tố ảnh hưởng duy nhất có ý nghĩa thống kê ($P = 0,040$), trong khi GGBFS và FA ở giai đoạn 28 ngày chưa thể hiện ảnh hưởng rõ ràng ($P > 0,05$). Điều này hàm ý rằng cường độ kéo của bê tông tuổi 28 ngày chủ yếu được quyết định bởi chất lượng của pha nền CKD, trong khi đóng góp của SCMs trở nên rõ nét hơn ở tuổi dài hơn.

$$R_{ech28} = -0,94 + 0,00808 \text{ CKD} + 1,39 \text{ GGBFS} - 0,547 \text{ FA} \quad (3)$$

$$R_{ech90} = -1,26 + 0,00963 \text{ CKD} + 2,00 \text{ GGBFS} - 0,830 \text{ FA} \quad (4)$$

Trong đó: CKD là tổng lượng chất kết dính (kg/m^3); GGBFS là tỷ lệ xỉ lò cao nghiền mịn (%); FA là tỷ lệ tro bay (%).

3.3. Điện lượng thẩm ion clorua

Điện lượng thẩm ion clorua (Q_{s28}) là chỉ tiêu quan trọng nhất để đánh giá độ bền lâu của bê tông trong môi trường biển. Theo TCVN 9337:2012/ASTM C1202, bê tông được phân loại theo mức thấm: Không đáng kể ($<100 \text{ C}$), rất thấp ($100 - 1.000 \text{ C}$), thấp ($1.000 - 2.000 \text{ C}$),

vừa phải ($2.000 - 4.000 \text{ C}$) và cao ($>4.000 \text{ C}$). Mẫu đối chứng B45XM100 ($100\% \text{ xỉ}$) sử dụng làm cơ sở so sánh.

Kết quả thực nghiệm cho thấy tất cả các cấp phối có SCMs đều có Q_{s28} thấp hơn đáng kể so với mẫu đối chứng (Bảng 2), và GGBFS là yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất và có ý nghĩa thống kê ($P = 0,045$) đến Q_{s28} . Lượng CKD gần như không ảnh hưởng đến Q_{s28} ($P = 0,883$), phản ánh tầm quan trọng của SCMs trong việc cải thiện khả năng kháng thấm.

$$Q_{s28} = 1272 - 0,33 \text{ CKD} - 2322 \text{ GGBFS} - 796 \text{ FA} \quad (5)$$

Từ phương trình (5), GGBFS có hệ số ảnh hưởng âm lớn nhất (-2322), nghĩa là cứ tăng tỷ lệ GGBFS thêm 10% thì điện lượng thấm giảm khoảng $232,2 \text{ cu-lông}$. Cơ chế chính là GGBFS phản ứng với $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tạo thêm C-S-H thứ cấp lấp đầy và làm mịn lỗ rỗng mao quản, đồng thời hình thành $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (muối Friedel) có khả năng liên kết hóa học ion clorua [9, 16].

3.4. Tối ưu hóa đa mục tiêu và lựa chọn cấp phối tối ưu

Tối ưu hóa đa mục tiêu được thực hiện bằng hàm tổng hợp mong muốn (Composite Desirability Function-hệ số d), kết hợp đồng thời 09 hàm mục tiêu: R_{n3} , R_{n7} , R_{n28} , R_{n90} , R_{ech3} , R_{ech7} , R_{ech28} , R_{ech90} , và Q_{s28} . Các ràng buộc kỹ thuật được thiết lập dựa trên yêu cầu của bê tông độ bền cao theo tiêu chuẩn và yêu cầu dự án sao cho:

$$D = (dQ \cdot dR_{ech3} \cdot dR_{ech7} \cdot dR_{ech28} \cdot dR_{ech90} \cdot dR_{n3} \cdot dR_{n7} \cdot dR_{n28} \cdot dR_{n90})^{1/9} \rightarrow \max \quad (6)$$

Trong đó: d là các hệ số mong muốn của các yếu tố ($0 \leq d \leq 1$); D là hệ số mong muốn đa mục tiêu;

Các mục tiêu thiết kế là R_{n28} đạt là 45 MPa , còn Q_{s28} nhỏ nhất có thể, và các mục tiêu khác là đạt cao nhất có thể, với R_n là yếu tố quan trọng nhất ở hàm mục tiêu này.

Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu xác định điểm tối ưu tại: CKD = $450 \text{ kg}/\text{m}^3$, GGBFS = 40% , FA = 13% , với hệ số mong muốn tổng hợp đạt $0,700$ và đây là hệ số mong muốn ở mức tốt. Kết quả dự báo chi tiết cho cấp phối tối ưu này được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả dự báo và khoảng tin cậy 95% cho cấp phối tối ưu đa mục tiêu (CKD= $450 \text{ kg}/\text{m}^3$)

Chỉ tiêu	R_{n3} (MPa)	R_{n7} (MPa)	R_{n28} (MPa)	R_{n90} (MPa)	R_{ech28} (MPa)	Q_{s28} (C)	Điểm tối ưu
Giá trị dự báo (Fit)	21,8	33,9	45,0	53,0	3,2	387	0,700
Khoảng tin cậy $95\% \text{ CI}$	20,0~ 23,7	30,9~ 36,8	42,6~ 47,4	50,0~ 56,0	2,9~3, 5	206~5 68	

Điện lượng thẩm dự báo $Q_{s28} = 387 \text{ cu-lông}$ nằm trong mức thấp theo ASTM C1202, thấp hơn đáng kể so với ngưỡng 1.000 cu-lông được quy định cho bê tông kết cấu BTCT bền biển. Cường độ chịu nén 28 ngày dự báo là $45,0 \text{ MPa}$, đáp ứng cường độ đặc trưng và cường độ chịu kéo khi bừa 28 ngày dự báo là $3,2 \text{ MPa}$.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng cấp phối B35X4T1 mặc dù không phải là điểm tối ưu theo hàm đa mục tiêu, lại có cường độ nén 28 ngày cao thứ 2 ($46,1 \text{ MPa}$) trong nhóm có SCMs. Tùy theo yêu cầu cụ thể của từng công trình (ưu tiên cường độ hay độ bền lâu), kỹ sư có thể lựa chọn cấp phối phù hợp dựa trên các đường cong hồi quy đã xây dựng.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng thành công phương pháp Plackett-Burman để tối ưu hóa thành phần bê tông ít xỉ măng độ bền cao sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện Duyên Hải và xỉ lò cao nghiền mịn Formosa, tận dụng nguồn chất thải công nghiệp sẵn có cho công trình ven biển tại Việt Nam. Các kết luận chính bao gồm:

(1) Về cường độ cơ học ưu tiên cường độ nén: Cấp phối B45X4T1 có 40% xỉ lò cao nghiền mịn kết hợp với 10% tro bay (CKD = 465 kg) cho cường độ nén 28 ngày cao nhất trong nhóm có sử dụng SCMs, đạt 47,9 MPa và 57,0 MPa ở tuổi 90 ngày, đồng thời có cường độ chịu kéo khi bửa ở 28 ngày tuổi đạt 3,5 MPa. Ngoài ra, kết quả cho thấy hàm lượng FA quyết định cường độ chịu nén, trong khi tổng lượng chất kết dính CKD ảnh hưởng nhiều nhất đến cường độ chịu kéo khi bửa của bê tông.

(2) Về khả năng kháng xâm nhập ion clorua: GGBFS là yếu tố quyết định nhất trong việc cải thiện Q_{s28} . Tất cả các cấp phối có SCMs đều đạt $Q_{s28} < 1000$ cu-lông, đáp ứng tiêu chí bê tông bền biển. Hàm hồi quy $Q_{s28} = 1272 - 0,33 \text{ CKD} - 2322 \text{ GGBFS} - 796 \text{ FA}$ cho phép dự báo điện lượng thẩm theo thành phần cấp phối bê tông.

(3) Về tối ưu hóa đa mục tiêu: Cấp phối tối ưu được xác định là CKD = 450 kg/m³, GGBFS = 40%, FA = 13% với điểm tổng hợp mong muốn là 0,700, cho $R_{n28} = 45$ MPa, $Q_{s28} = 387$ cu-lông (mức thẩm rất thấp). Cấp phối này để xuất để thực hiện mẻ trộn thử nghiệm tại trạm trộn bê tông thương phẩm trước khi đưa vào sản xuất đại trà.

(4) Về ứng dụng phương pháp Plackett-Burman: Phương pháp này tỏ ra rất hiệu quả trong bài toán thiết kế thành phần bê tông có sử dụng SCMs, cho phép đánh giá đồng thời nhiều biến và nhiều hàm mục tiêu với số lượng thí nghiệm tối thiểu. Khuyến nghị phổ biến phương pháp này rộng rãi trong nghiên cứu và phát triển vật liệu xây dựng tại Việt Nam.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần đánh giá cường độ và độ bền lâu tại tuổi 180 ngày và 360 ngày, đồng thời thực hiện các thử nghiệm dài hạn như chu kỳ khô-ướt, co ngót, kháng sun phát... để đánh giá độ bền thực tế của các cấp phối đã tối ưu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Q. C. Truong, C. Van Nguyen, C.-P. E. Soueidy and E. Bastidas-Arteaga. Service Life Prediction of Reinforced Concrete Coastal Structures in Vietnam Subjected to Chloride Ingress. in ICSCEA 2021, vol. 268, J. N. Reddy, C. M. Wang, V. H. Luong and A. T. Le, Eds., in Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 268, Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 467-475, 2023, doi: 10.1007/978-981-19-3303-5_40.
- [2] Lê Văn Tuấn và Y. Zheng. Xâm thực ion clo vào bê tông: cơ chế, yếu tố ảnh hưởng và một số phương pháp xác định. Tạp chí KH và CN ĐH Đà Nẵng, tập 3, số 76, tr. 64-67, 2014.
- [3] I. H. Shah, S. A. Miller, D. Jiang and R. J. Myers. Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO₂ emissions by up to 1.3 gigatons, Nat. Commun, vol. 13, no. 1, p. 5758, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-33289-7.
- [4] Nguyễn Thanh Sang, Nguyễn Tuấn Anh, Nguyễn Thanh Vũ, Nguyễn Tuấn Khoa và Huỳnh Thị Mỹ Dung. Giảm thiểu phát thải và chỉ số tiêu thụ năng lượng của bê tông nhiều tro bay ở Việt Nam. Tạp chí Xây dựng, số 07, tr. 94-97, 2025.
- [5] R. Luo, Y. Cai, C. Wang and X. Huang. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete, Cem. Concr. Res., vol. 33, no. 1, pp. 1-7, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00962-2.
- [6] F. Leng, N. Feng and X. Lu. An Experimental Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride Ions of Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete. Cem. Concr. Res., vol. 30, no. 6, pp. 989-992, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00250-7.
- [7] A. R. Boğa and İ. B. Topçu. Influence of Fly Ash on Corrosion Resistance and Chloride Ion Permeability of Concrete. Constr. Build. Mater., vol. 31, pp. 258-264, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.106.
- [8] Y. Kawabata, T. Sagawa and R. Sato. The Long-Term Suppression Effects of Fly Ash and Slag on the Expansion of Heat-Cured Mortar Due to Delayed Ettringite Formation. Constr. Build. Mater., vol. 310, p. 125263, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125263.
- [9] G. De Schutter. Hydration and Temperature Development of Concrete Made with Blast-Furnace Slag Cement. Cem. Concr. Res., vol. 29, no. 1, pp. 143-149, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00171-8.
- [10] T.-P. Huynh, L. S. Ho and Q. V. Ho. Experimental Investigation on the Performance of Concrete Incorporating Fine Dune Sand and Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Constr. Build. Mater., vol. 347, p. 128512, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128512.

[11] Bộ Xây dựng. Báo cáo số 27/BC-BXD ngày 18/02/2025 về kết quả triển khai thực hiện Chỉ thị số 08/CT-TTg ngày 26/3/2021 của Thủ tướng Chính phủ về đẩy mạnh xử lý, sử dụng tro, xỉ, thạch cao của các nhà máy nhiệt điện, hóa chất, phân bón làm nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng và trong công trình xây dựng, Bộ Xây dựng, Hà Nội, Việt Nam, Báo cáo, 2025.

[12] D. C. Montgomery. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.

[13] P. Klieger and S. H. Gebler. Fly Ash and Concrete Durability. In Concrete Durability: Proceedings of the Katharine and Bryant Mather International Conference, J. M. Scanlon, Ed., in ACI Special Publication, vol. 100, American Concrete Institute, pp. 1043-1069, 1987, doi: 10.14359/9941.

[14] R. L. Plackett and J. P. Burman. The Design of Optimum Multifactorial Experiments. Biometrika, vol. 33, no. 4, pp. 305-325, 1946, doi: 10.1093/biomet/33.4.305.

[15] J. E. Funk and D. R. Dinger. Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1994.

[16] Nguyễn Công Thắng và cộng sự. Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng hỗn hợp phụ gia khoáng Silica Fume và Tro bay sẵn có ở Việt Nam. Tạp chí KH CNXD, số 2, tr. 24-31, 2013.