

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA TRO BAY VÀ TRO ĐÁY NHÀ MÁY NHIỆT ĐIỆN SÔNG HẬU 1 ĐẾN MỘT SỐ CHỈ TIÊU ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG SỬ DỤNG CÁT MỊN

EFFECTS OF FLY ASH AND BOTTOM ASH FROM SONG HAU 1 THERMAL POWER PLANT ON THE DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE USING FINE RIVER SAND

KS. Nguyễn Nhật Anh, KS. Lê Đặng Thiên Phúc, KS. Nguyễn Văn Hưng Thịnh,

KS. Dương Hoàng Phúc. Email: nnanh@nctu.edu.vn

TS. Lương Nguyễn Hoàng Phương - Trường Đại học Nam Cần Thơ. Email: lnhphuong@nctu.edu.vn

TS. Nguyễn Hà Quốc Tín - Trường Đại học Tây Đô. Email: nhqtin@tdu.edu.vn

Tóm tắt: Việc tận dụng tro bay và tro đáy từ các nhà máy nhiệt điện than làm vật liệu thay thế cát tự nhiên trong bê tông là một giải pháp tiềm năng nhằm giảm lượng chất thải công nghiệp, hạn chế khai thác tài nguyên cát sông và hướng tới phát triển vật liệu xây dựng bền vững. Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của tro bay và tro đáy từ Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 đến một số chỉ tiêu độ bền của bê tông sử dụng cát mịn sông Hậu có mô đun độ lớn thấp. Tám cấp phối bê tông được thiết kế, bao gồm một cấp phối đối chứng sử dụng hoàn toàn cát tự nhiên và bảy cấp phối sử dụng cố định 25% tro bay kết hợp với hàm lượng tro đáy thay thế cát tự nhiên lần lượt là 0%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65% và 75%. Các chỉ tiêu độ bền được đánh giá thông qua thí nghiệm vận tốc truyền xung siêu âm (UPV), độ hấp thụ nước mao dẫn, điện trở suất bề mặt và khả năng chống xâm nhập ion clorua theo phương pháp thấm điện nhanh (RCPT).

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng kết hợp tro bay và tro đáy với tỷ lệ phù hợp có khả năng cải thiện đáng kể cấu trúc đặc chắc và các đặc tính độ bền của bê tông. Các cấp phối chứa tro bay và tro đáy cho thấy xu hướng giảm độ hấp thụ nước mao dẫn, tăng điện trở suất bề mặt và giảm điện lượng truyền qua trong thí nghiệm RCPT so với bê tông đối chứng. Kết quả UPV cho thấy các cấp phối bê tông đều đạt chất lượng từ tốt đến rất tốt, phản ánh cấu trúc bên trong tương đối đặc chắc. Trong phạm vi nghiên cứu, cấp phối sử dụng 25% tro bay kết hợp 65% tro đáy (25TB65TĐ) thể hiện hiệu quả tổng thể tốt nhất về các chỉ tiêu độ bền. Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng sử dụng tro bay và tro đáy Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 làm vật liệu thay thế cốt liệu mịn trong sản xuất bê tông bền vững, góp phần giảm nhu cầu khai thác cát tự nhiên và nâng cao khả năng ứng dụng bê tông trong điều kiện môi trường có nguy cơ xâm nhập ion clorua tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long.

Từ khóa: Bê tông bền vững; tro bay; tro đáy; cát mịn sông Hậu; hấp thụ mao dẫn; điện trở suất; RCPT.

Abstract: The utilization of fly ash and bottom ash from coal-fired thermal power plants as alternative materials in concrete is considered a promising solution to reduce industrial waste, conserve natural sand resources, and promote the development of sustainable construction materials. This study investigates the effects of fly ash and bottom ash from Song Hau 1 Thermal Power Plant on the durability properties of concrete incorporating fine Song Hau river sand with a low fineness modulus. Eight concrete mixtures were designed, including one control mixture using natural sand and seven mixtures incorporating a fixed replacement level of 25% fly ash combined with bottom ash contents of 0%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, and 75% as natural sand replacements. The durability performance of concrete was evaluated through ultrasonic pulse velocity (UPV), capillary water absorption, surface electrical resistivity, and rapid chloride penetration test (RCPT) according to ASTM C1202.

The experimental results indicated that the combined use of fly ash and bottom ash at appropriate replacement levels significantly improved the compactness and durability characteristics of concrete. The mixtures incorporating fly ash and bottom ash exhibited lower capillary water absorption, higher surface electrical resistivity, and reduced charge passed in the RCPT compared with the control concrete, indicating enhanced resistance to fluid transport and chloride ion penetration. The UPV results showed that all concrete mixtures achieved good to excellent quality, reflecting a dense internal microstructure. Within the scope of this study, the mixture containing 25% fly ash and 65% bottom ash (25FA65BA) exhibited the best overall performance in terms of durability properties. The findings confirm the potential application of fly ash and bottom ash from Song Hau 1 Thermal Power Plant as alternative fine aggregate materials in concrete production. This approach contributes to reducing natural river sand consumption, promoting the beneficial reuse of coal combustion by-products, and improving the durability performance of concrete exposed to environments with a risk of chloride ingress, particularly in the Mekong Delta region.

Keywords: Sustainable concrete; fly ash; bottom ash; fine river sand; capillary water absorption; surface electrical resistivity; RCPT.

1. GIỚI THIỆU

Bê tông là vật liệu xây dựng được sử dụng rộng rãi trong các công trình dân dụng, giao thông, thủy lợi và hạ tầng kỹ thuật nhờ khả năng chịu lực tốt, tính linh hoạt trong thi công và độ bền tương đối cao. Tuy nhiên, trong quá trình khai thác sử dụng, độ bền lâu của bê tông chịu ảnh hưởng mạnh bởi cấu trúc lỗ rỗng, khả năng vận chuyển nước, ion clorua và các tác nhân xâm thực từ môi trường. Đối với các công trình làm việc trong môi trường ẩm ướt, ven biển hoặc khu vực có nguy cơ xâm nhập mặn, sự thâm nhập của nước và ion clorua vào bê tông là một trong những nguyên nhân chính làm suy giảm tuổi thọ kết cấu bê tông cốt thép. Vì vậy, việc nghiên cứu các giải pháp cải thiện độ đặc chắc, giảm khả năng thấm hút nước và hạn chế xâm nhập ion clorua của bê tông có ý nghĩa quan trọng trong phát triển vật liệu xây dựng bền vững.

Tại vùng Đồng bằng sông Cửu Long, nhu cầu phát triển hạ tầng ngày càng gia tăng trong khi nguồn cát tự nhiên đang suy giảm do khai thác quá mức. Bên cạnh đó, nhiều khu vực trong vùng thường xuyên chịu tác động của môi trường xâm thực, nước lợ, nước mặn và điều kiện ẩm ướt kéo dài. Trong bối cảnh đó, việc sử dụng các nguồn vật liệu thay thế cát tự nhiên không chỉ góp phần giảm áp lực khai thác tài nguyên mà còn cần hướng đến cải thiện các chỉ tiêu độ bền của bê tông. Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021–2030, định hướng đến năm 2050 cũng khuyến khích sử dụng phế thải công nghiệp và vật liệu thay thế nhằm giảm phụ thuộc vào tài nguyên thiên nhiên và phát triển vật liệu xây dựng thân thiện môi trường.

Tro bay và tro đáy là hai loại phụ phẩm chính phát sinh từ quá trình đốt than tại các nhà máy nhiệt điện. Tro bay có kích thước hạt nhỏ, dạng gần hình cầu và chứa hàm lượng đáng kể các oxit SiO_2 , Al_2O_3 và Fe_2O_3 . Khi được sử dụng trong bê tông, tro bay có thể cải thiện cấu trúc vi mô thông qua hiệu ứng lấp đầy và phản ứng pozzolan, tạo thêm sản phẩm C–S–H thứ cấp, làm giảm độ rỗng mao dẫn và hạn chế tính liên thông của hệ lỗ rỗng. Nhiều nghiên cứu cho thấy việc sử dụng tro bay trong bê tông có thể cải thiện khả năng chống thấm, giảm độ hấp thụ nước và nâng cao khả năng kháng xâm nhập ion clorua [1] [2] [3] [4] [5].

Khác với tro bay, tro đáy thường có kích thước hạt lớn hơn, bề mặt thô ráp, hình dạng góc cạnh và cấu trúc rỗng xốp hơn. Các đặc điểm này có thể làm tăng khả năng hút nước và ảnh hưởng đến tính công tác của bê tông khi sử dụng với hàm lượng lớn. Tuy nhiên, nếu được phối hợp hợp lý với cát tự nhiên và tro bay, tro đáy có thể tham gia vào hệ cốt

liệu mịn, góp phần điều chỉnh thành phần hạt và tận dụng hiệu quả nguồn phụ phẩm công nghiệp. Rafieizonooz và cộng sự [6] cho thấy việc sử dụng đồng thời tro bay và tro đáy trong bê tông có thể mang lại hiệu quả tích cực khi cấp phối được thiết kế phù hợp. Các nghiên cứu về vật liệu thay thế cốt liệu cũng cho thấy việc sử dụng phụ phẩm công nghiệp trong bê tông là một hướng tiếp cận khả thi nhằm giảm khai thác cốt liệu tự nhiên và phát triển bê tông bền vững [7] [5] [8] [9].

Đối với bê tông, độ hấp thụ nước mao dẫn phản ánh khả năng nước di chuyển vào hệ lỗ rỗng thông qua lực mao dẫn. Chỉ tiêu này có liên quan trực tiếp đến độ đặc chắc, kích thước lỗ rỗng và mức độ liên thông của hệ mao quản trong bê tông. Bê tông có độ hấp thụ mao dẫn thấp thường có cấu trúc đặc chắc hơn và khả năng chống xâm nhập của các tác nhân gây hại tốt hơn. Bên cạnh đó, khả năng kháng xâm nhập ion clorua thường được đánh giá thông qua thí nghiệm RCPT theo ASTM C1202. Điện lượng truyền qua càng thấp cho thấy khả năng vận chuyển ion trong bê tông càng hạn chế, từ đó phản ánh khả năng chống thấm ion clorua tốt hơn. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng tro bay có thể làm giảm điện lượng truyền qua và cải thiện khả năng chống xâm nhập ion clorua nhờ cơ chế tinh chỉnh hệ lỗ rỗng và phản ứng pozzolan [1] [2] [10] [11] [12].

Ngoài RCPT và độ hấp thụ mao dẫn, điện trở suất bề mặt và vận tốc truyền xung siêu âm cũng là các chỉ tiêu quan trọng để đánh giá gián tiếp chất lượng và độ bền của bê tông. Điện trở suất bề mặt càng cao thường cho thấy khả năng dẫn điện của dung dịch lỗ rỗng và khả năng vận chuyển ion trong bê tông càng thấp, qua đó liên quan đến khả năng chống ăn mòn cốt thép trong môi trường chứa clorua. Trong khi đó, vận tốc truyền xung siêu âm phản ánh mức độ đặc chắc, tính đồng nhất và sự tồn tại của khuyết tật bên trong bê tông. Các nghiên cứu về bê tông sử dụng phụ gia khoáng và phụ phẩm công nghiệp cho thấy sự cải thiện cấu trúc lỗ rỗng thường đi kèm với sự gia tăng điện trở suất, giảm độ thấm clorua và cải thiện chất lượng vi cấu trúc của bê tông [3] [4] [10] [13] [14].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về ảnh hưởng của tro bay đến cường độ và độ bền của bê tông, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào việc sử dụng tro bay thay thế một phần xi măng hoặc sử dụng riêng lẻ tro bay như vật liệu thay thế cát. Các nghiên cứu về việc sử dụng đồng thời tro bay và tro đáy để thay thế cốt liệu vẫn còn hạn chế, đặc biệt trong điều kiện sử dụng cát mịn sông Hậu có mô đun độ lớn thấp và nguồn tro xỉ địa phương từ Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1. Ngoài ra, mối liên hệ giữa các chỉ tiêu độ bền như hấp thụ nước mao dẫn, điện

trở suất bề mặt, RCPT và vận tốc xung siêu âm đối với hệ bê tông sử dụng đồng thời tro bay và tro đáy vẫn cần được làm rõ hơn.

Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của tro bay và tro đáy Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 đến một số chỉ tiêu độ bền của bê tông sử dụng cát mịn sông Hậu. Tầm cấp phối bê tông được thiết kế, gồm một cấp phối đối chứng và bảy cấp phối sử dụng cố định 25% tro bay kết hợp với hàm lượng tro đáy thay thế cát tự nhiên từ 0% đến 75%. Các chỉ tiêu được đánh giá gồm độ hấp thụ nước mao dẫn, khả năng chống xâm nhập ion clorua theo ASTM C1202, điện trở suất bề mặt và vận tốc truyền xung siêu âm. Kết quả nghiên cứu góp phần xác định tỷ lệ phối hợp phù hợp giữa tro bay và tro đáy nhằm cải thiện độ bền của bê tông, đồng thời tận dụng hiệu quả phụ phẩm nhiệt điện và giảm nhu cầu khai thác cát tự nhiên tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long.

2. VẬT LIỆU VÀ THIẾT KẾ THÀNH PHẦN BÊ TÔNG

2.1. Vật liệu

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 Tây Đô, đáp ứng yêu cầu của TCVN 6260:2009. Cốt liệu mịn là cát sông Hậu có mô đun độ lớn thấp, trong khi cốt liệu lớn là đá dăm kích thước 5–20 mm, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006. Phụ gia hóa học sử dụng là phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate nhằm cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông; nước trộn là nước sạch dùng cho chế tạo bê tông.

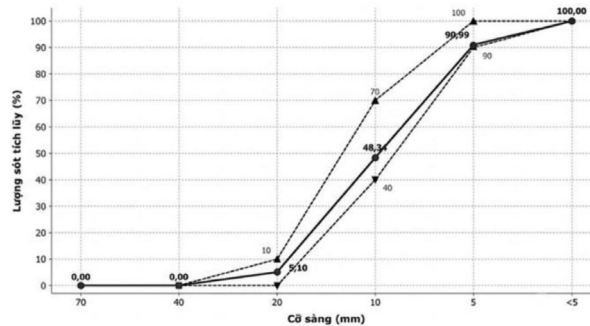
Tro bay và tro đáy được thu nhận từ Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 và được sử dụng để thay thế một phần cát tự nhiên trong bê tông. Các tính chất vật lý của các loại vật liệu được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Tính chất vật lý của xi măng PCB40, tro bay và tro đáy

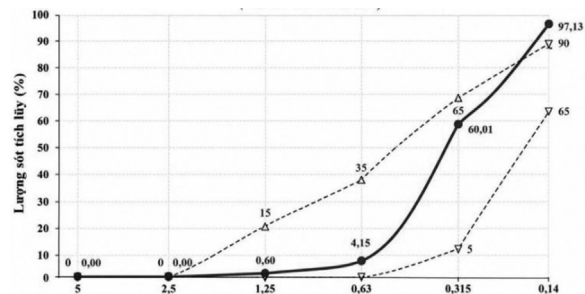
Chỉ tiêu	PCB40	Tro bay (TB)	Tro đáy (TĐ)
Tính chất vật lý			
Khối lượng riêng (g/cm ³)	3,10	2,15	2,05
Cường độ nén 28 ngày (MPa)	≥40	–	–
Mô đun độ lớn	–	0,347	4,316
Dạng hạt	Bột mịn	Hạt mịn, gần hình cầu	Không đều, góc cạnh, bề mặt nhám
Màu sắc	Xám	Xám nhạt	Xám đen

Thành phần hạt của cốt liệu lớn và cốt liệu mịn sử dụng trong nghiên cứu được trình bày trong Hình 1a. Đá dăm có kích thước hạt danh định 5–20 mm với đường cấp phối nằm trong giới hạn yêu cầu đối với cốt liệu lớn dùng cho bê tông. Cát tự

nhien khai thác tại khu vực sông Hậu có mô đun độ lớn $M_{dl} = 1,619$, thuộc nhóm cát mịn theo TCVN 10796:2015. Đặc điểm kích thước hạt nhỏ và hàm lượng hạt mịn cao của loại cát này có thể ảnh hưởng đến nhu cầu nước cũng như cấu trúc lỗ rỗng của bê tông.



Hình 1. Đường hành phần hạt của đá 5x20



Hình 2. Đường thành phần hạt của cát sông Hậu

Thành phần hóa học của tro bay và tro đáy được xác định bằng phương pháp phổ tán sắc năng lượng tia X (EDS). Các nguyên tố thu được từ kết quả phân tích EDS được quy đổi về dạng oxide tương ứng và chuẩn hóa nhằm đánh giá thành phần khoáng chính của vật liệu. Kết quả phân tích được trình bày trong Bảng 2 và Bảng 3 cho thấy cả tro bay và tro đáy Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 đều có thành phần chủ yếu là các oxide giàu silic và nhôm. Tro bay có tổng hàm lượng $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ đạt 77,57%, trong khi tro đáy có tổng hàm lượng $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ đạt 94,72%, thể hiện đặc trưng của nhóm vật liệu aluminosilicat và cho thấy tiềm năng sử dụng làm vật liệu thay thế một phần cốt liệu mịn trong bê tông.

Bảng 2. Thành phần tro bay theo EDS sau quy đổi và chuẩn hóa.

Thành phần	Mass% (EDS)	Hàm lượng quy đổi (%)	Hàm lượng chuẩn hóa (%)
C	15.45	15.45	18.84
Al_2O_3	10.71	20.24	24.69
SiO_2	20.27	43.36	52.88
K_2O	2.42	2.92	3.59
Tổng	–	81.97	100.00

Bảng 3. Thành phần oxide trong tro đáy sau khi chuẩn hóa

Nguyên tố	Mass% (EDS)	Oxide	Hệ số chuyển đổi	Hàm lượng oxide (%)	Hàm lượng oxide chuẩn hóa (%)
Al	10.98	Al ₂ O ₃	1.8895	20.75	23.04
Si	28.14	SiO ₂	2.1393	60.20	66.85
K	2.76	K ₂ O	1.2046	3.32	3.69
Ca	1.03	CaO	1.3992	1.44	1.60
Fe	3.04	Fe ₂ O ₃	1.4297	4.35	4.83
Tổng	—	—	—	90.06	100.00

2.2. Thiết kế thành phần bê tông xi măng

Thành phần bê tông được thiết kế với cấp độ bền B40, sử dụng xi măng PCB40, cát mịn sông Hậu, đá dăm kích thước 5–20 mm và phụ gia siêu dẻo nhằm đảm bảo khả năng thi công của hỗn hợp bê tông. Cát sông Hậu sử dụng trong nghiên cứu có mô đun độ lớn thấp, do đó việc kết hợp các vật liệu thay thế được xem xét nhằm cải thiện thành phần hệ cốt liệu mịn và nâng cao hiệu quả sử dụng nguồn vật liệu địa phương.

Trong nghiên cứu này, tro bay và tro đáy thu được từ Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 được sử dụng để thay thế một phần cát tự nhiên theo thể tích. Tám cấp phối bê tông được chế tạo, bao gồm một cấp phối đối chứng (BTĐC) sử dụng hoàn toàn cát tự nhiên và bảy cấp phối sử dụng tro bay kết hợp với tro đáy. Hàm lượng tro bay được giữ cố định ở mức 25% thể tích cát thay thế, trong khi hàm lượng tro đáy thay thế cát tự nhiên được thay đổi lần lượt là 0%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65% và 75%, tương ứng với các cấp phối 25TB0TĐ, 25TB25TĐ, 25TB35TĐ, 25TB45TĐ, 25TB55TĐ, 25TB65TĐ và 25TB75TĐ.

Trong tất cả các cấp phối, hàm lượng xi măng được giữ không đổi nhằm đánh giá riêng ảnh hưởng của việc thay thế cát tự nhiên bằng tro bay và tro đáy đến các đặc tính của bê tông. Các loại vật liệu chính như xi măng, cốt liệu lớn và phụ gia siêu dẻo được sử dụng thống nhất cho toàn bộ các hỗn hợp. Lượng nước và phụ gia được điều chỉnh phù hợp nhằm đảm bảo độ sụt mục tiêu của bê tông

Bảng 4. Thành phần vật liệu cho 1m³ bê tông

Kịch bản	Kí hiệu hỗn hợp	Đ (kg)	C (kg)	X (kg)	TB (kg)	TĐ (kg)	N (lit)	SD (kg)	N/X	SN (cm)
I	0TB0TĐ	1095	783.1	410	0.0	0.0	156	6.15	0.38	8-10
II	25TB0TĐ	1095	587.3	410	162.5	0.0	156	6.15	0.38	
III	25TB25TĐ	1095	391.5	410	162.5	155.0	156	6.15	0.38	
IV	25TB35TĐ	1095	313.2	410	162.5	216.9	156	6.15	0.38	
V	25TB45TĐ	1095	234.9	410	162.5	278.9	156	6.15	0.38	
VI	25TB55TĐ	1095	156.6	410	162.5	340.9	156	6.15	0.38	
VII	25TB65TĐ	1095	78.3	410	162.5	402.9	156	6.15	0.38	
VIII	25TB75TĐ	1095	0.0	410	162.5	464.9	156	6.15	0.38	

tươi. Thành phần chi tiết của các cấp phối bê tông được trình bày trong Bảng 2.

3. CHUẨN VỊ MẪU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

Các hỗn hợp bê tông được chế tạo bằng máy trộn cưỡng bức trong phòng thí nghiệm. Thành phần vật liệu cho mỗi mẻ trộn được xác định theo cấp phối trình bày trong Bảng 2. Trước tiên, xi măng, cát sông Hậu, tro bay, tro đáy và đá dăm được đưa vào máy trộn và tiến hành trộn khô nhằm đảm bảo các thành phần vật liệu được phân bố đồng đều. Sau đó, nước trộn và phụ gia siêu dẻo được bổ sung vào hỗn hợp, quá trình trộn tiếp tục được thực hiện đến khi bê tông đạt trạng thái đồng nhất.

Sau khi trộn, bê tông được đúc mẫu và bảo dưỡng theo TCVN 3105:2022. Các mẫu sau khi đúc được lưu giữ trong khuôn trong 24 ± 2 giờ ở điều kiện phòng thí nghiệm, sau đó tháo khuôn và bảo dưỡng trong nước sạch đến thời điểm tiến hành các thí nghiệm đánh giá độ bền (Hình 3).

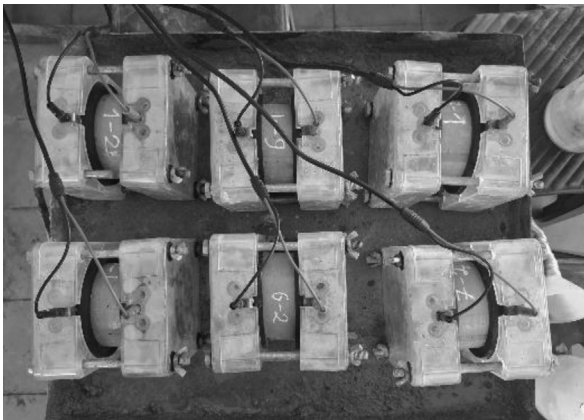
**Hình 3. Bảo dưỡng mẫu bê tông trong nước trước khi tiến hành thí nghiệm.****Hình 4. Mẫu bê tông phục vụ thí nghiệm RCPT và hấp thụ nước mao dẫn**

Khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông được đánh giá thông qua thí nghiệm thẩm điện nhanh (Rapid Chloride Penetration Test – RCPT) theo ASTM C1202 (Hình 6). Mẫu thí nghiệm có dạng hình trụ đường kính 100 mm, chiều dày 50 mm (Hình 4), được cắt từ mẫu trụ kích thước 100 × 200 mm. Thí nghiệm được thực hiện tại các tuổi 7, 28 ngày nhằm đánh giá sự thay đổi khả năng kháng ion clorua theo thời gian.

Khả năng hấp thụ nước mao dẫn được xác định theo ASTM C1585 nhằm đánh giá khả năng vận chuyển nước trong hệ thống lỗ rỗng của bê tông (Hình 5). Điện trở suất bề mặt được xác định nhằm đánh giá khả năng cản trở sự dịch chuyển của các ion trong cấu trúc bê tông. Ngoài ra, vận tốc truyền xung siêu âm (Ultrasonic Pulse Velocity – UPV) được xác định theo ASTM C597 nhằm đánh giá mức độ đồng nhất và độ đặc chắc bên trong của bê tông.



Hình 5. Xác định độ hấp thụ nước mao dẫn theo ASTM C1585



Hình 6. Xác định khả năng chống xâm nhập ion clorua theo ASTM C1202

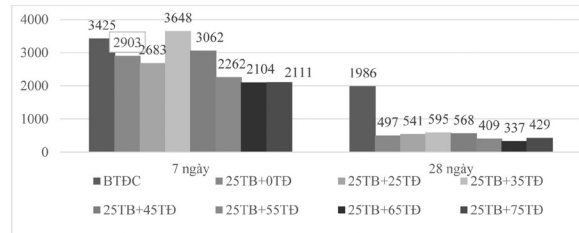
Các phương pháp thí nghiệm trên được lựa chọn nhằm đánh giá ảnh hưởng của việc sử dụng tro bay và tro đáy Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 thay thế một phần cát mịn sông Hậu đến các đặc tính vận chuyển và độ đặc chắc của bê tông.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông

Khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông được đánh giá thông qua thí nghiệm RCPT

theo ASTM C1202, kết quả được thể hiện trên Hình 7. Kết quả cho thấy điện lượng truyền qua của tất cả các cấp phối đều giảm khi tuổi bê tông tăng từ 7 lên 28 ngày, chứng tỏ cấu trúc bê tông ngày càng đặc chắc nhờ quá trình thủy hóa tiếp tục phát triển. Đối với bê tông đối chứng, điện lượng truyền qua giảm từ 3425C xuống 1986C, tương ứng mức giảm khoảng 42,0%.



Hình 7. Khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông

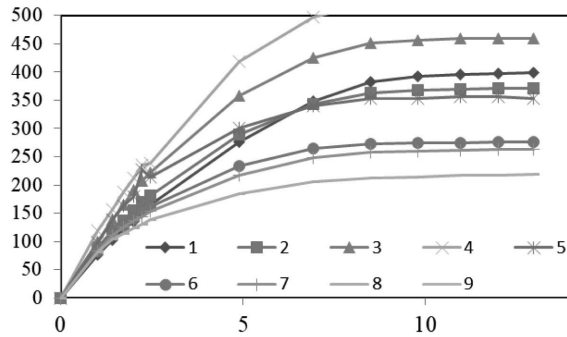
Việc sử dụng tro bay và tro đáy thay thế một phần cát tự nhiên đã cải thiện đáng kể khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông. Nguyên nhân chủ yếu do các hạt tro bay mịn tạo hiệu ứng chèn lấp, đồng thời phản ứng puzolan hình thành thêm các sản phẩm C-S-H thứ cấp, góp phần làm giảm độ rỗng mao dẫn và hạn chế sự di chuyển của ion clorua trong bê tông. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về vai trò của tro bay trong việc cải thiện độ đặc chắc và khả năng kháng ion clorua của bê tông [1] [2] [10].

Ở tuổi 7 ngày, các cấp phối sử dụng 55–75% tro đáy kết hợp với 25% tro bay cho khả năng chống xâm nhập ion clorua tốt hơn, với điện lượng truyền qua dao động từ 2104–2262C. Trong đó, cấp phối 25TB65TĐ đạt giá trị thấp nhất là 2104C. Xu hướng này tiếp tục được ghi nhận ở tuổi 28 ngày khi 25TB65TĐ đạt điện lượng truyền qua chỉ 337C, giảm khoảng 83,0% so với bê tông đối chứng và thuộc mức xâm nhập ion clorua rất thấp theo ASTM C1202.

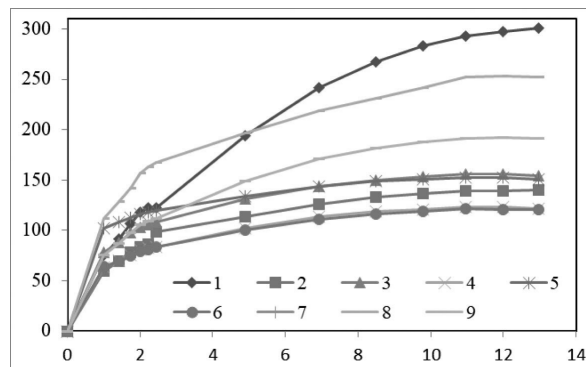
Sự cải thiện của cấp phối 25TB65TĐ có thể được giải thích bởi sự kết hợp hợp lý giữa hiệu ứng lấp đầy của tro bay và sự tối ưu thành phần hạt của hệ cốt liệu mịn khi sử dụng tro đáy ở hàm lượng phù hợp. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Rafeizonooz và cộng sự [6], trong đó việc kết hợp tro bay và tro đáy với tỷ lệ thích hợp có thể cải thiện đặc tính của bê tông. Như vậy, trong phạm vi nghiên cứu này, cấp phối 25TB65TĐ cho hiệu quả tốt nhất về khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông sử dụng cát mịn sông Hậu.

4.2. Khả năng hấp thụ nước mao dẫn của bê tông

Kết quả thí nghiệm hấp thụ nước mao dẫn của các cấp phối bê tông được thể hiện trên Hình 8 và 9.



Hình 8. Biểu đồ hấp thụ mao dẫn các cấp phối của bê tông ở 7 ngày tuổi



Hình 9. Biểu đồ hấp thụ mao dẫn các cấp phối của bê tông ở 28 ngày tuổi.

Nhìn chung, lượng nước hấp thụ của các mẫu tăng nhanh trong giai đoạn đầu và có xu hướng tăng chậm dần theo thời gian. Đây là đặc trưng của quá trình vận chuyển nước trong hệ mao quản của bê tông, khi tốc độ hấp thụ phụ thuộc chủ yếu vào kích thước, thể tích và mức độ liên thông của hệ thống lỗ rỗng bên trong vật liệu.

Kết quả cho thấy khả năng hấp thụ nước mao dẫn của bê tông giảm đáng kể khi tuổi mẫu tăng từ 7 ngày lên 28 ngày. Sự suy giảm này liên quan đến quá trình thủy hóa xi măng tiếp tục phát triển và phản ứng puzolan của tro bay, tạo thêm các sản phẩm C-S-H thứ cấp, góp phần lấp đầy hệ thống lỗ rỗng mao dẫn và làm tăng độ đặc chắc của cấu trúc bê tông. Xu hướng này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về ảnh hưởng tích cực của tro bay đến việc cải thiện cấu trúc lỗ rỗng và khả năng chống vận chuyển nước trong bê tông [1] [2] [10].

Việc sử dụng 25% tro bay thay thế cát tự nhiên giúp giảm khả năng hấp thụ nước so với bê tông đối chứng nhờ hiệu ứng chèn lấp của các hạt mịn. Khi kết hợp với tro đáy, khả năng hấp thụ nước phụ thuộc đáng kể vào hàm lượng thay thế. Ở hàm lượng tro đáy thấp (25–35%), sự cải thiện chưa rõ rệt do đặc điểm rỗng xốp và khả năng hút nước của tro đáy. Tuy nhiên, khi tăng hàm lượng tro đáy đến mức phù hợp, đặc biệt trong khoảng 55–65%, sự phân bố thành phần hạt trong hệ cốt liệu mịn được cải thiện, góp phần giảm sự liên thông của hệ

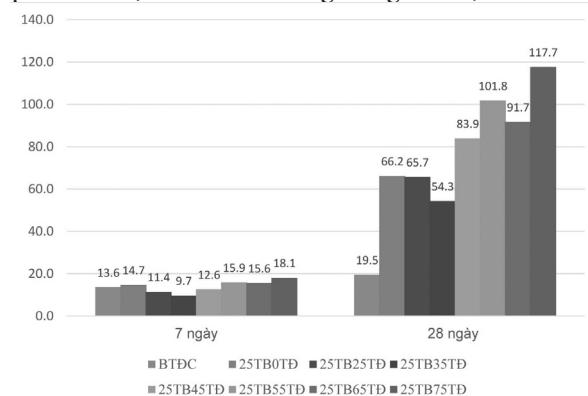
mao quản trong bê tông. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Rafieizonooz và cộng sự [6] về việc sử dụng kết hợp tro bay và tro đáy trong bê tông.

Trong phạm vi nghiên cứu này, cấp phối sử dụng 25% tro bay kết hợp 65% tro đáy (25TB65TĐ) cho hiệu quả tốt nhất về khả năng hạn chế hấp thụ nước mao dẫn. Kết quả này có sự tương đồng với xu hướng RCPT, cho thấy cấp phối 25TB65TĐ có khả năng cải thiện cấu trúc đặc chắc và nâng cao khả năng chống xâm nhập của các tác nhân bên ngoài đối với bê tông sử dụng cát mịn sông Hậu.

4.3. Điện trở suất bề mặt của bê tông

Điện trở suất bề mặt của các cấp phối bê tông được thể hiện trên Hình 10. Kết quả thí nghiệm cho thấy điện trở suất bề mặt của bê tông tăng theo thời gian dưỡng hộ đối với tất cả các cấp phối. Xu hướng này cho thấy cấu trúc bên trong bê tông ngày càng được cải thiện do quá trình thủy hóa xi măng tiếp tục phát triển, đồng thời phản ứng puzolan của tro bay góp phần hình thành thêm các sản phẩm C-S-H thứ cấp, làm giảm độ rỗng và hạn chế sự liên thông của hệ mao quản trong bê tông [2] [10].

Việc sử dụng tro bay và tro đáy thay thế một phần cát tự nhiên làm tăng đáng kể điện trở suất



Hình 10. Điện trở suất bề mặt các cấp phối của bê tông

bề mặt so với bê tông đối chứng, đặc biệt ở tuổi 28 ngày. Sự cải thiện này chủ yếu đến từ hiệu ứng chèn lấp của các hạt tro bay mịn kết hợp với sự điều chỉnh thành phần hạt của hệ cốt liệu mịn khi sử dụng hàm lượng tro đáy phù hợp. Cấu trúc bê tông đặc chắc hơn làm giảm khả năng di chuyển của các ion trong dung dịch lỗ rỗng, từ đó góp phần nâng cao khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông [11].

Kết quả cho thấy các cấp phối sử dụng hàm lượng tro đáy cao kết hợp với 25% tro bay có xu hướng đạt điện trở suất lớn hơn. Điều này phù hợp với kết quả thí nghiệm hấp thụ nước mao dẫn và RCPT, trong đó cấp phối 25TB65TĐ thể hiện khả

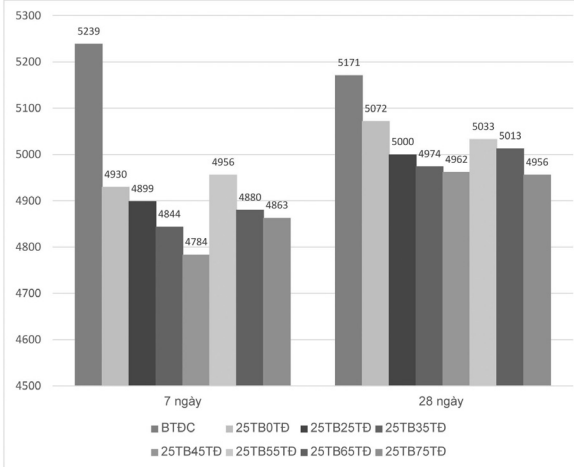
năng hạn chế vận chuyển nước và ion tốt nhất. Kết quả này cũng tương đồng với nghiên cứu của Rafieizonooz và cộng sự [6], khi việc sử dụng kết hợp tro bay và tro đáy với tỷ lệ thích hợp có thể cải thiện cấu trúc và đặc tính của bê tông.

Nhìn chung, kết quả điện trở suất bề mặt cho thấy việc sử dụng kết hợp tro bay và tro đáy Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 có khả năng cải thiện cấu trúc đặc chắc của bê tông sử dụng cát mịn sông Hậu. Trong phạm vi nghiên cứu này, cấp phối 25TB65TD tiếp tục cho thấy hiệu quả tốt về khả năng hạn chế sự vận chuyển ion, phù hợp với xu hướng cải thiện độ bền được ghi nhận từ kết quả RCPT và hấp thụ nước mao dẫn.

4.4. Vận tốc truyền xung siêu âm của bê tông

Vận tốc truyền xung siêu âm của các cấp phối bê tông được thể hiện trên Hình 11. Kết quả thí nghiệm cho thấy tất cả các cấp phối bê tông đều đạt giá trị UPV lớn hơn 4500 m/s ở cả tuổi 7 và 28 ngày, cho thấy bê tông có cấu trúc tương đối đặc chắc và đồng nhất. Theo phương pháp đánh giá chất lượng bê tông dựa trên UPV, các cấp phối nghiên cứu đều thuộc nhóm bê tông có chất lượng tốt đến rất tốt.

Ở tuổi 7 ngày, một số cấp phối sử dụng tro bay và tro đáy có giá trị UPV thấp hơn nhẹ so với bê



Hình 11. Vận tốc truyền xung siêu âm các cấp phối của bê tông

tông đối chứng. Nguyên nhân có thể liên quan đến đặc điểm của tro đáy với cấu trúc rỗng xốp và khả năng hút nước cao, làm ảnh hưởng đến độ đặc chắc của bê tông ở giai đoạn đầu. Bên cạnh đó, phản ứng puzolan của tro bay thường phát triển chậm nên hiệu quả cải thiện vì cấu trúc chưa thể hiện rõ ở tuổi sớm [2].

Khi tuổi bê tông tăng đến 28 ngày, giá trị UPV của các cấp phối chứa tro bay và tro đáy tiếp tục được duy trì ở mức cao. Điều này cho thấy quá trình thủy hóa xi măng kết hợp với phản ứng puzolan của

tro bay đã góp phần tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng, tăng độ đặc chắc và tính đồng nhất của bê tông. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây khi cho rằng việc sử dụng phụ phẩm khoáng với tỷ lệ thích hợp có thể cải thiện cấu trúc vi mô và các đặc tính độ bền của bê tông [10] [11].

Nhìn chung, việc sử dụng kết hợp tro bay và tro đáy Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 thay thế một phần cát mịn sông Hậu không làm suy giảm chất lượng bên trong của bê tông thông qua đánh giá UPV. Kết quả UPV phù hợp với xu hướng cải thiện của các chỉ tiêu RCPT, hấp thụ nước mao dẫn và điện trở suất bề mặt, qua đó khẳng định vai trò tích cực của cấp phối tro bay – tro đáy phù hợp trong việc nâng cao độ đặc chắc của bê tông.

4.5. Thảo luận

Kết quả tổng hợp cho thấy các cấp phối sử dụng kết hợp tro bay và tro đáy đều cải thiện các chỉ tiêu Bảng 3. Đánh giá tổng hợp các chỉ tiêu độ bền của các cấp phối bê tông

Cấp phối	Hấp thụ nước mao dẫn	Khả năng kháng ion Cl ⁻	Điện trở suất bề mặt	Chất lượng UPV	Đánh giá tổng hợp
BTĐC	Cao	Thấp	Thấp	Tốt	Kém nhất
25TB0TD	Trung bình	Tốt	Cao	Rất tốt	Cải thiện
25TB25TD	Trung bình	Tốt	Cao	Rất tốt	Cải thiện
25TB35TD	Cao	Trung bình	Trung bình	Tốt	Chưa tối ưu
25TB45TD	Thấp	Tốt	Rất cao	Rất tốt	Tốt
25TB55TD	Rất thấp	Rất tốt	Rất cao	Rất tốt	Rất tốt
25TB65TD	Rất thấp	Tốt nhất	Rất cao	Rất tốt	Tối ưu
25TB75TD	Thấp nhất	Tốt	Cao nhất	Rất tốt	Tốt

độ bền so với bê tông đối chứng. Trong đó, mặc dù cấp phối 25TB75TD đạt giá trị tốt nhất ở một số chỉ tiêu riêng lẻ, cấp phối 25TB65TD thể hiện sự cân bằng tốt nhất giữa khả năng hạn chế hấp thụ nước, chống xâm nhập ion clorua, điện trở suất bề mặt và chất lượng cấu trúc bên trong. Do đó, 25TB65TD được xem là cấp phối tối ưu về độ bền trong phạm vi nghiên cứu này.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của việc sử dụng tro bay và tro đáy từ Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 thay thế một phần cát mịn sông Hậu đến một số chỉ tiêu độ bền của bê tông. Trên cơ sở các kết quả thí nghiệm về khả năng chống xâm nhập ion clorua, hấp thụ nước mao dẫn, điện trở suất bề mặt và vận tốc truyền xung siêu âm, một số kết luận chính được rút ra như sau:

(1) Việc sử dụng kết hợp tro bay và tro đáy thay

thể một phần cát tự nhiên có ảnh hưởng tích cực đến các đặc tính độ bền của bê tông. Các cấp phối sử dụng tro bay và tro đáy nhìn chung cho thấy khả năng giảm hấp thụ nước mao dẫn, giảm điện lượng truyền qua trong thí nghiệm RCPT và tăng điện trở suất bề mặt so với bê tông đối chứng.

(2) Khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông được cải thiện rõ rệt khi sử dụng hàm lượng tro đáy phù hợp kết hợp với 25% tro bay. Trong đó, cấp phối 25TB65TĐ cho hiệu quả cao nhất với điện lượng truyền qua ở tuổi 28 ngày chỉ đạt 337 C, giảm khoảng 83% so với bê tông đối chứng. Điều này cho thấy sự cải thiện đáng kể khả năng hạn chế sự dịch chuyển ion trong cấu trúc bê tông.

(3) Kết quả thí nghiệm hấp thụ nước mao dẫn và điện trở suất bề mặt cho thấy xu hướng tương đồng với kết quả RCPT. Các cấp phối sử dụng 55–75% tro đáy kết hợp với 25% tro bay thể hiện khả năng cải thiện tốt các đặc tính vận chuyển trong bê tông, trong đó cấp phối 25TB65TĐ cho sự cân bằng phù hợp nhất giữa các chỉ tiêu đánh giá độ bền.

(4) Kết quả vận tốc truyền xung siêu âm cho thấy tất cả các cấp phối bê tông nghiên cứu đều đạt giá trị lớn hơn 4500 m/s, phản ánh cấu trúc bên trong tương đối đặc chắc và đồng nhất. Việc thay thế một phần cát tự nhiên bằng tro bay và tro đáy không làm suy giảm chất lượng bê tông theo đánh giá UPV.

(5) Kết quả nghiên cứu cho thấy tiềm năng sử dụng tro bay và tro đáy Nhà máy Nhiệt điện Sông Hậu 1 làm vật liệu thay thế cát tự nhiên trong sản xuất bê tông bền vững. Trong phạm vi nghiên cứu này, cấp phối sử dụng 25% tro bay kết hợp 65% tro đáy được xem là phương án phù hợp nhất xét trên tổng thể các chỉ tiêu độ bền, góp phần tận dụng phụ phẩm nhiệt điện và giảm nhu cầu khai thác nguồn cát tự nhiên tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Mao, Q. Ai, D. Zhang, S. Li, and J. Li, "Durability Performance of Concrete with Fly Ash as Fine Aggregate Eroded by Chloride Salt," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, no. 1, p. 6760385, 2022, doi: 10.1155/2022/6760385.
- [2] P. Nath and P. Sarker, "Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete," *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 1149–1156, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.144.
- [3] Q. Van Ho, T. H. Nguyen, P. N. Pham, P. H. N. Luong, P. Nguyen, and R. Siddique, "Recycling fly ash in high-performance concrete for sand conservation: durability, service life, and environmental benefits," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 10, no. 4, p. 132, Apr. 2025, doi: 10.1007/s41062-025-01936-9.
- [4] Q. V. Ho, T. H. M. Le, and T.-P. Huynh, "The influence of pre-compression on the durability of high-performance concrete incorporating industrial by-products," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 238, no. 5, pp. 901–915, May 2024, doi: 10.1177/14644207231203350.
- [5] S. Gedela, S. Subhani, and B. 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*, vol. 42, p. 102415, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102415.
- [6] M. Rafieizonooz, J. Mirza, M. R. Salim, M. W. Hussin, and E. Khankhaje, "Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement," *Construction and Building Materials*, vol. 116, pp. 15–24, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.080.
- [7] S. Ray, M. Haque, Md. N. Sakib, A. F. Mita, M. D. M. Rahman, and B. B. Tammo, "Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 102567, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102567.
- [8] M. Collivignarelli et al., "The Production of Sustainable Concrete with the Use of Alternative Aggregates: A Review," *Sustainability*, vol. 12, p. 7903, Sep. 2020, doi: 10.3390/su12197903.
- [9] C. Liyanage, P. Julnipitawong, S. Tangtermsirikul, 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, Mar. 2021, doi: 10.11113/aej.v10.16595.
- [10] A. Elahi, P. A. M. Basheer, S. V. Nanukuttan, and Q. U. Z. Khan, "Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 292–299, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.045.
- [11] How Ji Chen, Shao-Siang Huang, Chao-Wei Tang, and Marlinda Abdul Malek, "Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 35:1063–1070, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.052.
- [12] H. K. Kim and H. K. Lee, "Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 1115–1122, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065.
- [13] D. Pedro, J. de Brito, and L. Evangelista, "Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume," *Cement and Concrete Composites*, vol. 93, pp. 63–74, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.07.002.
- [14] M. Singh and R. Siddique, "Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 39–48, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.034.