

Giảm thiểu phát thải và chỉ số tiêu thụ năng lượng của bê tông nhiều tro bay ở Việt Nam

Minimisation embodied carbon and embodied energy of high volume fly ash concrete in Vietnam

> PGS.TS NGUYỄN THANH SANG¹, NGUYỄN TUẤN ANH¹, THS NGUYỄN THANH VŨ²
TS NGUYỄN TẤN KHOA³, THS.NCS HUỖNH THỊ MỸ DUNG^{1*}

¹Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải

²Công ty CP Nghiên cứu và Chuyển giao công nghệ xây dựng RETECH

³Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng

*Email: mydung@tvu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu sử dụng tro bay (FA) với hàm lượng cao (25 - 50%) để thay thế chất kết dính (CKD) trong bê tông xi măng dùng cho các khối bê tông kết cấu tại Việt Nam. Các thí nghiệm được thực hiện để lựa chọn xi măng, cốt liệu, phụ gia siêu dẻo và tro bay để chế tạo bê tông có độ sụt 10 - 12 cm và cường độ chịu nén từ 30 - 40 MPa. Kết quả cho thấy bê tông nhiều tro bay (HVFA) không chỉ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật mà còn giảm đáng kể phát thải khí nhà kính lên đến 31% và chỉ số tiêu thụ năng lượng giảm đến 38%. Đặc biệt, tiềm năng kết hợp FA với các CKD phụ thêm khác như xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS) hoặc silica fume (SF) để cải thiện tính chất cơ học và độ bền. Nghiên cứu cũng phân tích các yếu tố ảnh hưởng như vận chuyển FA và đề xuất giải pháp tối ưu hóa ứng dụng HVFA tại Việt Nam, hứa hẹn thúc đẩy phát triển bền vững trong ngành Xây dựng.

Từ khóa: Bê tông nhiều tro bay; phát thải khí nhà kính; chỉ số tiêu thụ năng lượng; cường độ chịu nén; độ bền.

ABSTRACT

This paper presents a study on the use of high-volume fly ash (25 - 50%) as a binder replacement in cement concrete for mass concrete structures in Vietnam. Experiments were conducted to select suitable cement, aggregates, superplasticizers and fly ash to produce concrete with a slump of 10 - 12 cm and compressive strength ranging from 30 to 40 MPa. The results show that high-volume fly ash concrete (HVFA) not only meets technical requirements but also significantly reduces greenhouse gas emissions up to 31% and reduce energy consumption index to 38%. Notably, the potential of combining fly ash with supplementary cementitious materials such as ground granulated blast-furnace slag (GGBS) or silica fume was evaluated to enhance mechanical properties and durability. The study also analyzes influencing factors such as fly ash transportation and proposes solutions to optimize the application of HVFA in Vietnam, promising to promote sustainable development in the construction.

Keywords: High-volume fly ash concrete; greenhouse gas emissions; energy consumption index; compressive strength; durability.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành công nghiệp xi măng và bê tông đóng góp khoảng 8% tổng lượng phát thải CO₂ toàn cầu (IEA, 2024). Tại Việt Nam, sự phát triển nhanh chóng của cơ sở hạ tầng và đô thị hóa đã làm tăng tiêu thụ xi măng, dẫn đến lượng phát thải khí nhà kính và tiêu thụ năng lượng đáng kể. Sản xuất 1 tấn xi măng Portland phát thải khoảng 0,8 - 1,0 tấn CO₂ và tiêu tốn 3,2 - 5,0 GJ năng lượng, chủ yếu do quá trình nung clinker và sử dụng nhiên liệu hóa thạch (GCCA, 2024). Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, việc giảm tác động môi trường của ngành Xây dựng là ưu tiên hàng đầu.

Tro bay - phụ phẩm từ các nhà máy nhiệt điện đốt than với thành phần chủ yếu là oxit SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO... là vật liệu làm

CKD phụ thêm cho xi măng giúp giảm phát thải CO₂ và tiêu hao năng lượng. Bê tông nhiều FA (High Volume Fly Ash - HVFA) với hàm lượng FA từ 25 - 50% đã được nghiên cứu rộng rãi trên thế giới (Malhotra & Mehta, 2002; Nath & Sarker, 2017). Ngoài việc giảm phát thải CO₂, HVFA còn cải thiện độ bền dài hạn, đặc biệt trong môi trường ăn mòn như vùng ven biển Việt Nam, nơi các công trình thường xuyên chịu tác động của clorua và sunphat.

Nghiên cứu này tập trung vào việc sử dụng HVFA cho bê tông khối lớn, bê tông làm móng công trình hạ tầng tại Việt Nam, với mục tiêu đạt độ sụt 10 - 12 cm, cường độ chịu nén 30 - 40 MPa, đồng thời đánh giá tiềm năng kết hợp FA với các CKD phụ thêm khác như GGBS và SF để nâng cao độ bền. Ngoài ra, nghiên cứu cũng phân

tích các yếu tố ảnh hưởng như vận chuyển FA và đề xuất các giải pháp thực tiễn để thúc đẩy ứng dụng HVFA trong ngành Xây dựng Việt Nam.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Xi măng Portland PC40, đạt TCVN 2682:2020, với thành phần hóa học gồm 62% CaO, 21% SiO₂, 5% Al₂O₃.

Tro bay loại F từ Nhà máy Nhiệt điện Phả Lại, Việt Nam, với hàm lượng SiO₂ ≥ 50%, đạt ASTM C618. Hàm lượng mất khi nung < 6%.

Cốt liệu: Cát sông tự nhiên, mô-đun độ lớn FM = 2,8, phù hợp TCVN 7572-2:2006.

Đá dăm có D_{max} = 20 mm, đáp ứng TCVN 7572-2:2006, với cường độ nén ≥ 80 MPa.

Phụ gia siêu dẻo có gốc polycarboxylate, cải thiện tính công tác và duy trì độ sụt, liều lượng 0,8 - 1,2% theo khối lượng CKD.

Nước sạch không chứa tạp chất, đáp ứng TCVN 4506:2012.

Xi lò cao nghiền mịn từ Nhà máy Gang thép Hòa Phát, với SiO₂ ≈ 35% và CaO ≈ 40%, đạt TCVN 11586:2016.

Silica fume có hàm lượng SiO₂ ≥ 90%, dùng khi cần cường độ sớm đạt TCVN 4506:2012.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Thiết kế cấp phối HVFA với hàm lượng FA thay thế xi măng (CM) từ 25 - 50% theo khối lượng CKD, tỷ lệ nước/CKD (N/CKD) từ 0,35 - 0,45. Kết hợp vật liệu thay thế 40% CKD bằng hỗn hợp FA (20 - 30%) và GGBS (10 - 20%) hoặc SF (5 - 10%). Tổng lượng CKD 400 kg/m³ bê tông.

Bảng 1. Kiểm kê Carbon và Năng lượng (ICE) của một số vật liệu (Hammond and Jones, 2011)

Vật liệu	Hệ số tiêu thụ năng lượng và phát thải carbon			Ghi chú
	Năng lượng (EE) (MJ/kg)	Carbon (EC) (kgCO ₂ /kg)	Carbon(CO ₂ e) (kgCO ₂ e/kg)	
Cốt liệu chung	0,083	0,0048	0,0052	Đá sỏi hoặc đá nghiền
Xi măng	5,50	0,93	0,95	Xi măng 94% clinker
GGBS	2,96 - 2,4	0,37 - 0,25	0,38 - 0,26	66 - 80% GGBS
Cát	0,081	0,0048	0,0051	
Đá	1,50	0,087	0,09	Đá vôi
Tro bay	0,10	0,008	-	
GGBS	1,60	0,083	-	
Nước	0,01	0,001	-	
Sắt	25,00	1,91	2,03	

Bảng 2. Phân tích phát thải CO₂, giá thành và tiêu thụ năng lượng của các hỗn hợp bê tông

Hỗn hợp	Vật liệu chế tạo bê tông				Phát thải		Chi phí chế tạo		Tiêu thụ năng lượng	
	CM (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	GGBS (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	CO ₂ (kg/m ³)	Giảm CO ₂	Giá thành (đồng/m ³)	Giảm giá thành (%)	Năng lượng (MJ/kg)	Giảm năng lượng (%)
ĐC	400	0	0	0	623	-	1.073.760	-	2.420	-
HVFA25	300	100	0	0	528	15%	933.530	13%	1.965	19%
HVFA40	240	160	0	0	471	24%	842.330	22%	1.691	30%
HVFA50	200	200	0	0	432	31%	784.700	27%	1.505	38%

Phương pháp thí nghiệm trong phòng được thực hiện để xác định: Cường độ chịu nén thí nghiệm theo TCVN 3118:2022 trên mẫu lập phương cạnh 150 mm ở 7, 28 và 56 ngày tuổi.

Thử nghiệm thẩm clorua sử dụng phương pháp thấm nhanh (RCPT - Rapid Chloride Permeability Test) theo ASTM C1202.

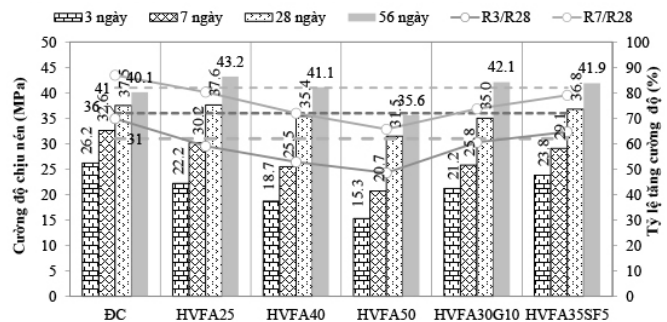
Chỉ số tiêu thụ năng lượng được tính toán ban đầu dựa trên năng lượng sản xuất vật liệu (Hammond & Jones, 2008) gồm xi măng 4,6 MJ/kg, tro bay 0,2 MJ/kg (chủ yếu từ xử lý và vận chuyển), GGBS 1,33 MJ/kg, Silica fume 2,5 MJ/kg. Phát thải CO₂ được đánh giá dựa trên hệ số phát thải CO₂ của xi măng 0,83 kg CO₂/kg, tro bay 0,008 kg CO₂/kg, GGBS là 0,083 kg CO₂/kg, Silica fume 0,5 kg CO₂/kg (Hammond & Jones, 2011). Chi tiết phát thải của các loại vật liệu được trình bày trong Bảng 1.

Áp dụng đánh giá vòng đời (LCA) để so sánh tác động môi trường của việc sử dụng bê tông HVFA bằng phần mềm SimaPro 9.5.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tính chất cơ học

Kết quả cường độ chịu nén của các loại bê tông được trình bày tại Hình 1. Kết quả cho thấy, các hỗn hợp HVFA với hàm lượng FA 25 - 40% đạt cường độ chịu nén từ 30 - 40 MPa tại 28 ngày, phù hợp cho khối bê tông lớn. Ở tuổi 56 ngày, cường độ chịu nén tăng thêm 10 - 15% nhờ hoạt tính puzolan của FA. Với 50% FA, cường độ chịu nén ở 7 ngày, giảm khoảng 20% so với bê tông thông thường (20 MPa so với 25 MPa), nhưng vẫn đạt ≥ 30 MPa ở 28 ngày.



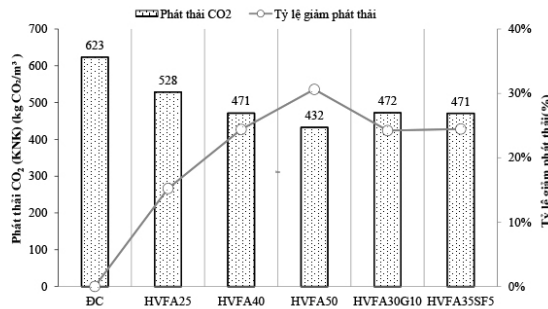
Hình 1. Cường độ chịu nén các loại bê tông theo tuổi

Hỗn hợp kết hợp 30% FA và 10% GGBS đạt cường độ chịu nén 35 MPa tại 28 ngày, cao hơn 10% so với hỗn hợp chỉ dùng 40% FA (32 MPa). Hỗn hợp bê tông dùng 5% SF và 35% FA giúp cải thiện cường độ sớm (7 ngày) thêm 15%, đạt 25 MPa so với 21 MPa của HVFA40. Độ sụt của tất cả hỗn hợp đều nằm trong khoảng 10 - 12 cm, đáp ứng yêu cầu thi công thông thường. Hỗn hợp kết hợp GGBS và SF cho thấy cải thiện rõ rệt cường độ chịu nén ở tuổi sớm và dài hạn.

3.2. Giảm thiểu phát thải khí nhà kính và giá thành

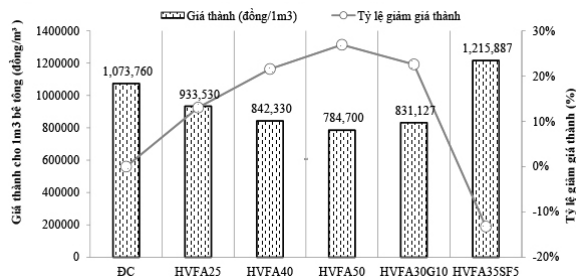
Kết quả phân tích phát thải CO₂, tiêu thụ năng lượng và giá thành chế tạo các loại bê tông trong nghiên cứu được trình bày ở Bảng 2 và được thể hiện ở Hình 2, 3, 4.

HVFA30SB10	240	120	40	0	472	24%	831.127	23%	1.746	28%
HVFA35SF5	240	140	0	20	471	24%	1.215.887	-13%	1.694	30%



Hình 2. Phát thải CO₂ của các loại bê tông

Kết quả phân tích phát thải CO₂ ở Hình 2 cho thấy các hỗn hợp bê tông sử dụng FA thay thế 25 - 50% xi măng làm giảm phát thải CO₂ đáng kể so với hỗn hợp bê tông đối chứng, với mức giảm lượng phát thải CO₂ từ 15 - 31%. Trong đó, hỗn hợp HVFA50 đạt mức giảm CO₂ tối ưu, giảm 31% lượng phát thải CO₂; các hỗn hợp HVFA40, HVFA25 giảm lần lượt là 15% và 24% so với hỗn hợp đối chứng. Với cùng tỷ lệ thay thế 40% CKD thì các hỗn hợp HVFA40, HVFA35SF5, HVFA30G10 có lượng phát thải CO₂ tương đương nhau. Kết quả này cho thấy lượng phát thải CO₂ phụ thuộc chính vào lượng xi măng sử dụng và tỷ lệ PGK thay thế xi măng. Do lượng phát thải CO₂ đơn vị của FA, GGBS, SF thấp hơn nhiều so với xi măng nên việc sử dụng các loại khác nhau ít ảnh hưởng đến lượng phát thải tổng thể.



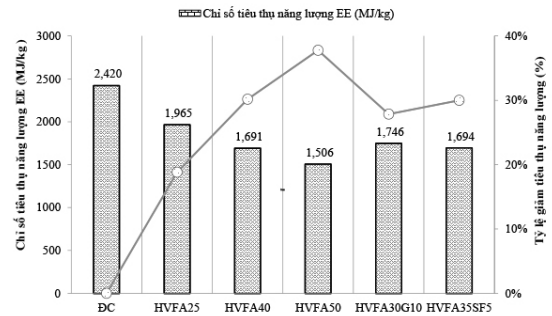
Hình 3. Giá thành của các loại bê tông

Kết quả phân tích giá thành các loại bê tông ở Hình 3 cho thấy, việc sử dụng FA trong bê tông giúp giảm đáng kể chi phí sản xuất so với bê tông đối chứng. Giá thành bê tông HVFA25, HVFA40 và HVFA50 lần lượt giảm 13%, 22% và 27% so với bê tông ĐC, tương ứng với chi phí là 933.530, 842.330 và 784.700 đồng/m³. Hỗn hợp HVFA30G10 (sử dụng 30% FA và 10% GGBS) có giá thành là 831.127 đồng/m³, giảm khoảng 22,6% so với ĐC, cho thấy hiệu quả kinh tế tốt khi kết hợp tro bay và xi. Tuy nhiên, hỗn hợp HVFA35SF5 (gồm 35% tro bay và 5% silica fume) lại có chi phí cao nhất (1.215.887 đồng/m³), tăng 13,2% so với bê tông ĐC, điều này là do giá thành cao hơn của SF so với FA và GGBS.

3.3. Chỉ số tiêu thụ năng lượng

Phân tích tiêu thụ năng lượng của các hỗn hợp bê tông HVFA được trình bày ở Bảng 2 và được thể hiện ở Hình 4.

Chỉ số tiêu thụ năng lượng giảm từ 2.420 MJ/kg (bê tông thông thường) xuống 1.185 MJ/kg (HVFA35SF5). Các chỉ số tiêu thụ năng lượng được trình bày tại Bảng 3 và Hình 4. Cụ thể, HVFA 50% tro bay đạt mức tiết kiệm năng lượng cao nhất (30%), từ 2.420 MJ/kg xuống 1.505 MJ/kg. Hỗn hợp 30% tro bay và 10% GGBS có chỉ số 1.783 MJ/kg, trong khi thêm SF tăng nhẹ lên 1.985 MJ/kg do quy trình sản xuất SF tiêu tốn năng lượng. HVFA 50% đạt mức tiết kiệm năng lượng cao nhất.



Hình 4. Chỉ số tiêu thụ năng lượng EE (MJ/kg)

Kết quả phân tích chỉ số tiêu thụ năng lượng (EE) của các loại bê tông HVFA cho thấy hỗn hợp bê tông ĐC có chỉ số EE cao nhất, đạt 2.420 MJ/kg, kết quả này cho thấy mức tiêu thụ năng lượng đáng kể cho quá trình sản xuất xi măng Portland truyền thống. Khi thay thế một phần xi măng bằng FA, chỉ số EE giảm đáng kể. Bê tông HVFA25 và HVFA40 lần lượt có chỉ số EE là 1.965 và 1.691 MJ/kg, tương ứng mức giảm 18,8% và 30,1% so với bê tông ĐC. Chỉ số EE thấp nhất với bê tông HVFA50 (1.506 MJ/kg), giảm 37,8% so với bê tông ĐC. Với các hỗn hợp bê tông sử dụng các loại PGK thay thế 40% CKD thì bê tông HVFA40 và HVFA35SF5 có chỉ số EE tương đương nhau và thấp hơn so với HVFA30G10. Kết quả phân tích này cho thấy bê tông sử dụng FA và SF có lượng phát thải thấp hơn so với sử dụng GGBS.

3.4. Thảo luận

3.4.1. Hiệu quả của việc sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện với các CKD phụ thêm khác trong hỗn hợp bê tông

Với các kết quả nghiên cứu về tính chất cơ học, phân tích phát thải CO₂, phân tích giá thành và phân tích tiêu thụ năng lượng của các loại bê tông HVFA trong nghiên cứu đã cho thấy việc sử dụng FA, sự kết hợp của FA với GGBS và SF với tỷ lệ phù hợp giúp cải thiện được tính chất cơ học của bê tông, giảm phát thải CO₂, giảm giá thành chế tạo và giảm mức tiêu thụ năng lượng cho 1 m³ bê tông. Các lợi ích này cũng được chứng minh trong nghiên cứu của Liu et al. (2022). Việc bổ sung GGBS với hoạt tính thủy lực cao, giúp tăng cường mức độ hoạt tính puzolan chậm của FA, cải thiện cường độ sớm và độ bền dài hạn. Trong thí nghiệm, hỗn hợp bê tông 30% FA và 10% GGBS đạt cường độ 35 MPa tại 28 ngày, cao hơn 10% so với bê tông 40% FA. Điều này phù hợp với nghiên cứu của Nath và Sarker (2017), khi kết hợp 20% GGBS với 30% FA cải thiện cường độ nén và độ bền uốn. SF với hàm lượng SiO₂ cao, làm tăng cường phản ứng puzolan và tạo cấu trúc bê tông đặc chắc, cải thiện cường độ sớm (15% tại 7 ngày). Tuy nhiên, chi phí SF cao (khoảng 500 USD/tấn so với 50 USD/tấn của GGBS) và năng lượng sản xuất lớn làm giảm lợi ích môi trường, như Kurda et al. (2018) đã chỉ ra. Do đó, GGBS là lựa chọn khả thi hơn tại Việt Nam, nơi nguồn cung GGBS từ các nhà máy thép như Hòa Phát dồi dào.

Kết hợp ba thành phần (FA, GGBS, SF) cũng được xem xét trong nghiên cứu của Zhang (2014), cho thấy hỗn hợp 25% FA 15% GGBS và 5% SF đạt cường độ 45 MPa và giảm 40% CO₂. Tuy nhiên, chi phí cao và độ phức tạp trong cấp phối hạn chế ứng dụng thực tế tại Việt Nam. Một nghiên cứu mới hơn từ Journal of Cleaner Production (2023) cho thấy hỗn hợp 30% tro bay, 10% GGBS và 5% SF có thể giảm 42% CO₂, nhưng cần tối ưu hóa chi phí và quy trình thi công.

3.4.2. Ứng dụng thực tiễn của bê tông nhiều tro bay tại Việt Nam

Với sản lượng FA khoảng 13 triệu tấn/năm từ các nhà máy nhiệt điện (Phả Lại, Duyên Hải, Vũng Áng), HVFA có tiềm năng lớn trong

việc giảm phụ thuộc vào xi măng và xử lý chất thải công nghiệp. Kết hợp GGBS từ ngành thép càng tăng tính bền vững, đặc biệt cho các công trình lớn như cầu, đập hoặc cảng biển. Một số công trình thực tế như cầu Vĩnh Nghiê (Bình Dương, 2023) sử dụng HVFA 40% tro bay cho móng cầu, giảm 30% phát thải CO₂ (1.200 tấn CO₂) và tiết kiệm 15% chi phí vật liệu. Cảng Cái Mép - Thị Vải (Bà Rịa - Vũng Tàu, 2024) sử dụng hỗn hợp 30% FA và 10% GGBS, cải thiện độ bền chống clorua, phù hợp với môi trường biển.

Tuy nhiên, như O'Brien et al. (2009) đã lưu ý, vận chuyển tro bay qua khoảng cách xa có thể làm tăng phát thải CO₂ liên quan đến logistics. Trong nghiên cứu này, khoảng cách vận chuyển tro bay từ nhà máy Phả Lại đến công trình là 150 km, tương ứng với phát thải 0,03 kg CO₂/kg tro bay, không đáng kể. Tuy nhiên, nếu khoảng cách vượt quá 200 km, phát thải có thể tăng lên 0,05 kg CO₂/kg, làm giảm lợi ích môi trường. Do đó, cần ưu tiên sử dụng FA và GGBS từ các nguồn địa phương.

3.4.3. Thách thức và giải pháp trong việc ứng dụng bê tông nhiều tro bay

Chất lượng tro bay không đồng nhất: Tro bay từ các nhà máy khác nhau có thành phần hóa học biến động (hàm lượng carbon, silica). Giải pháp: Tiêu chuẩn hóa chất lượng tro bay theo ASTM C618 hoặc EN 450, kiểm tra định kỳ tại phòng thí nghiệm.

Cường độ sớm thấp: HVFA 50% tro bay chỉ đạt 20 MPa tại 7 ngày, không phù hợp với các dự án cần thi công nhanh. Giải pháp: Thêm GGBS hoặc SF để cải thiện cường độ sớm hoặc sử dụng phụ gia tăng tốc đông rắn.

HVFA yêu cầu thời gian bảo dưỡng kéo dài (56 - 90 ngày) để đạt cường độ tối ưu, vì vậy phải điều chỉnh quy trình thi công tại công trường, sử dụng màng bảo dưỡng để duy trì độ ẩm.

Tại Việt Nam, các nhà đầu tư vẫn có tâm lý e ngại về độ tin cậy của HVFA. Do đó, cần tăng cường truyền thông, đào tạo và áp dụng thí điểm trong các dự án công cộng để chứng minh tính hiệu quả.

Việc ứng dụng bê tông chứa hàm lượng tro bay cao (HVFA) trong thực tiễn còn đối mặt với một số thách thức kỹ thuật và tâm lý triển khai.

- Tính không đồng nhất của nguồn tro bay: FA từ các nhà máy nhiệt điện khác nhau thường có sự biến động đáng kể về thành phần hóa học, đặc biệt là lượng mất khi nung và hàm lượng silica, ảnh hưởng đến tính chất của hỗn hợp bê tông. Để khắc phục, cần áp dụng các tiêu chuẩn kỹ thuật như ASTM C618 hoặc EN 450 nhằm tiêu chuẩn hóa chất lượng tro bay, đồng thời thực hiện kiểm tra định kỳ thông qua các thí nghiệm tại phòng thí nghiệm vật liệu.

- Cường độ nén ở tuổi sớm thấp: Các hỗn hợp HVFA với 50% tro bay thường chỉ đạt cường độ khoảng 20 MPa tại 7 ngày tuổi, không đáp ứng yêu cầu đối với các dự án có tiến độ thi công nhanh. Giải pháp tiềm năng bao gồm việc sử dụng kết hợp các vật liệu bổ sung như GGBFS hoặc SF để cải thiện cường độ sớm hoặc sử dụng phụ gia hóa học có khả năng tăng tốc quá trình đông rắn.

- Yêu cầu bảo dưỡng kéo dài: Do đặc điểm phản ứng pozzolan chậm của tro bay, HVFA thường cần thời gian bảo dưỡng dài (từ 56 đến 90 ngày) để đạt được cường độ tối ưu. Vì vậy, cần điều chỉnh quy trình thi công ngoài hiện trường, trong đó việc sử dụng màng bảo dưỡng hoặc hệ thống giữ ẩm là cần thiết nhằm đảm bảo điều kiện thủy hóa thuận lợi.

- Rào cản tâm lý và nhận thức tại địa phương: Tại Việt Nam, một số chủ đầu tư vẫn còn e ngại về độ tin cậy và tính ổn định lâu dài của bê tông HVFA. Để vượt qua rào cản này, cần tăng cường truyền thông khoa học, tổ chức các chương trình đào tạo kỹ thuật chuyên sâu và triển khai các dự án thí điểm sử dụng HVFA trong công trình công cộng nhằm minh chứng tính hiệu quả và bền vững của loại vật liệu này trong điều kiện thực tế.

3.4.4. Phân tích kinh tế

Chi phí vật liệu là yếu tố quan trọng để thúc đẩy ứng dụng HVFA tại Việt Nam. Dựa trên giá thị trường năm 2025 ước tính như sau: Xi măng 100 USD/tấn, FA 20 USD/tấn, GGBS 50 USD/tấn, SF 500 USD/tấn, vận chuyển 5 USD/tấn/100 km. Vì vậy, HVFA 40% tro bay tiết kiệm 26% chi phí so với bê tông thông thường (29,6 USD so với 40 USD). Hỗn hợp kết hợp GGBS có chi phí tương đương nhưng cải thiện độ bền, trong khi SF làm tăng chi phí đáng kể.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu xác nhận rằng bê tông nhiều tro bay với hàm lượng 25 - 50% đạt các yêu cầu kỹ thuật (độ sụt 10 - 12 cm, cường độ 30 - 40 MPa) và giảm phát thải CO₂ (lên đến 31%) cùng chỉ số tiêu thụ năng lượng (38%). Kết hợp tro bay với GGBS hoặc SF cải thiện cường độ sớm, độ bền chống xâm thực và phù hợp cho công trình ven biển. GGBS là lựa chọn tối ưu tại Việt Nam nhờ nguồn cung dồi dào và chi phí thấp, trong khi SF phù hợp cho các dự án yêu cầu cường độ sớm cao.

HVFA không chỉ mang lại lợi ích môi trường mà còn tiết kiệm chi phí (26% với HVFA 40%) và góp phần xử lý chất thải công nghiệp (FA, GGBS). Tuy nhiên, cần giải quyết các thách thức như chất lượng tro FA số nội dung như: Tối ưu hóa cấp phối ba thành phần (FA, GGBS, SF); đánh giá độ bền dài hạn (90 - 180 ngày) trong môi trường thực tế; phát triển quy trình thi công và tiêu chuẩn ứng dụng HVFA tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. ASTM C618. (2019), Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [2]. Hammond, G., & Jones, C. (2008), Inventory of Carbon & Energy (ICE), University of Bath.
- [3]. Hammond, G., & Jones, C. (2011), A BSRIA guide, Embodied Carbon, The Inventory of Carbon and Energy (ICE), BSRIA BG 10/2011, University of Bath.
- [4]. IEA. (2024), Cement Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, International Energy Agency.
- [5]. TCVN 2682:2020, Xi măng Portland - Yêu cầu kỹ thuật.
- [6]. TCVN 3106:2022, Phương pháp xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông.
- [7]. TCVN 3118:2022, Phương pháp xác định cường độ chịu nén của bê tông.
- [8]. Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2002), High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.
- [9]. O'Brien, K. R., Ménaché, J., & O'Moore, L. M. (2009), Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water consumption in concrete, The International Journal of Life Cycle Assessment, 14(7), 621-629.
- [10]. Nath, P., & Sarker, P. K. (2017), Flexural strength and elastic modulus of high-volume fly ash concrete, Construction and Building Materials, 141, 512-521.
- [11]. Kurda, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2018), Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. Resources, Conservation and Recycling, 139, 407-417.
- [12]. Liu, Z., Takasu, K., Koyamada, H., & Suyama, H. (2022), A study on engineering properties and environmental impact of sustainable concrete with fly ash or GGBS, Construction and Building Materials, 316, 125776.
- [13]. Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007), Green house gas emissions due to concrete manufacture, The International Journal of Life Cycle Assessment, 12(5), 282-288.
- [14]. Van den Heede, P., & De Belie, N. (2012), Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations, Cement and Concrete Composites, 34(4), 431-442.
- [15]. Zhang, Y. (2014), Assessment of CO₂ emissions and cost of fly ash concrete, Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction Materials, 45-52.
- [16]. Teixeira, E. R., Camões, A., & Branco, F. G. (2020), Valorisation of wood fly ash on concrete. Resources, Conservation and Recycling, 162, 105027.
- [17]. Journal of Cleaner Production (2023), Life Cycle Assessment of High-Volume Fly Ash Concrete: CO₂ Emissions and Energy Consumption.
- [18]. Construction and Building Materials (2024), Impact of Fly Ash Transportation on the Carbon Footprint of HVFA Concrete.
- [19]. Sustainable Materials and Technologies (2023), Energy Savings in High-Volume Fly Ash Concrete: A Global Perspective.
- [20]. GCCA (2024), Global Cement and Concrete Sustainability Report.