

TÁI CHẾ CHẤT THẢI RẮN XÂY DỰNG VÀ PHỤ PHẨM CÔNG NGHIỆP HƯỚNG ĐẾN GIẢM PHÁT THẢI CARBON TRONG BÊ TÔNG TẠI VIỆT NAM

RECYCLING CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE AND INDUSTRIAL BY-PRODUCTS TOWARDS REDUCING CARBON EMISSIONS FOR CONCRETE IN VIETNAM

NGUYỄN ANH ĐỨC*, NGUYỄN PHAN ANH

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: ducna.ctt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Hiện nay, Việt Nam đang phát triển hạ tầng nhanh chóng khiến nhu cầu về vật liệu xây dựng tăng trưởng vượt bậc. Lượng cốt liệu tự nhiên đang bị khai thác quá mức dẫn đến sự thiếu hụt trầm trọng nguồn cung đồng thời kéo theo những ảnh hưởng rất lớn đến môi trường tự nhiên. Ngoài ra, các ngành sản xuất công nghiệp hiện nay cũng phát thải ra một lượng phụ phẩm công nghiệp khổng lồ. Nếu không được xử lý, những phụ phẩm này sẽ chiếm dụng diện tích đất lớn, phát sinh nhiều vấn đề môi trường nghiêm trọng. Trong nghiên cứu này, cốt liệu tái chế được sản xuất từ chất thải rắn xây dựng, sử dụng để thay thế cốt liệu tự nhiên trong bê tông, kết hợp với các loại phụ phẩm công nghiệp như xỉ lò cao nghiền mịn thay xi măng nhằm giảm lượng phát thải carbon, tăng lượng tro bay trong cấp phối, giảm tối đa lượng cát tự nhiên sử dụng trong bê tông. Kết quả, bê tông có thành phần cốt liệu tái chế và các loại phụ phẩm công nghiệp như xỉ lò cao và tro bay có tính năng thỏa mãn kết cấu bê tông cốt thép. Ngoài ra, lượng phát thải carbon của bê tông đã giảm đến 67% khi so sánh với bê tông đối chứng.

Từ khóa: Cốt liệu tái chế, tro bay, xỉ lò cao, phát thải carbon, phát triển bền vững.

Abstract

In recent years, Vietnam has been in a period of rapid infrastructure development accompanied by a rapid increase in the demand for construction materials. The amount of natural aggregates is currently being overexploited, leading to a serious shortage in the supply, while also causing huge impacts on the environment. In addition, current industrial production also emits a huge amount of industrial by-products. These by-products will occupy large areas of landfill, causing serious environmental issues. This

study proposes a method of recycling construction and demolition waste and industrial by-products in concrete towards a circular economy, promoting sustainable development and minimizing environmental impacts. The results show that the use of construction and demolition waste to produce recycled aggregates combined with fly ash and blast furnace slag to produce an environmentally friendly concrete is an effective measure to reduce carbon emissions up to 67% while still ensuring the performance of concrete.

Keywords: Recycled aggregate, fly ash, ground granulated blast furnace slag, carbon emission, sustainable development.

1. Mở đầu

Vào năm 2023, theo Báo cáo hàng hóa khoáng sản của Bộ Nội vụ Hoa Kỳ, Việt Nam đang trở thành quốc gia sản xuất xi măng đứng thứ ba trên thế giới với sản lượng 110 triệu tấn [1]. Theo một khảo sát trước đây [2], nhu cầu sử dụng cát trong vữa và bê tông của nước ta một năm lên đến khoảng 120 triệu m³ nhưng chỉ đáp ứng được khoảng 24,2%, nhu cầu cát sử dụng cho san lấp khoảng 575 triệu m³ nhưng chỉ đáp ứng được khoảng 1,5%.

Theo thống kê năm 2023 từ Bộ Công thương, 31 nhà máy nhiệt điện đốt than phát sinh khối lượng tro, xỉ khoảng 18,07 triệu tấn vào năm 2023 và đang có xu hướng tăng dần theo hàng năm. Bên cạnh đó, các nhà máy sản xuất gang thép cũng sẽ phát thải ước tính lên đến 10 triệu tấn xỉ lò cao vào năm 2025 [3]. Nếu không được xử lý, những phụ phẩm công nghiệp này sẽ chiếm dụng diện tích đất lớn, phát sinh nhiều vấn đề trầm trọng về nguồn nước và môi trường.

Bên cạnh đó, công nghệ sản xuất xi măng tại Việt Nam vẫn là công nghệ đốt than, vì thế mỗi tấn xi măng sản xuất tại Việt Nam phát thải ra 920kg CO₂ ra môi trường [4]. Mặt khác, Chính phủ đã đề ra mục tiêu

giảm phát thải khí nhà kính trong Nghị định số 06/2022/NĐ-CP. Trong đó, ngành xây dựng phải giảm 13,2% tổng lượng giảm phát thải, tương ứng với 74,3 triệu tấn CO₂ tương đương [5]. Vì thế, ngành xây dựng cần phải có ngay biện pháp kịp thời nhằm giảm phát thải carbon một cách bền vững và hiệu quả.

Đứng trước những vấn đề này, có nhiều tác giả đã nghiên cứu những loại vật liệu như cốt liệu tái chế hay phụ phẩm công nghiệp trong bê tông, hoặc kết hợp những vật liệu trên nhưng vẫn chưa thực hiện theo hướng thân thiện với môi trường mà giữ nguyên lượng xi măng [6]. Bên cạnh đó, tính toán lượng phát thải carbon của bê tông vẫn chưa được chú ý.

Trong nghiên cứu, các cấp phối bê tông được thực hiện kết hợp giữa cốt liệu tái chế sản xuất từ chất thải rắn xây dựng để thay thế một phần hoặc hoàn toàn cho cốt liệu tự nhiên, kết hợp với xi lò cao thay 40% và 70% lượng xi măng nhằm giảm lượng phát thải carbon, tro bay với tỷ lệ 20% chất kết dính nhằm giảm tối đa lượng cát tự nhiên sử dụng. Sản phẩm bê tông này có tính năng thỏa mãn cho kết cấu bê tông cốt thép. Ngoài ra, lượng phát thải carbon của loại bê tông này đã giảm đến 67% khi so sánh với mẫu đối chứng.

2. Vật liệu

2.1. Chất kết dính và tro bay

Bảng 1 thể hiện các chỉ tiêu của chất kết dính (CKD) và tro bay. Xi măng (XM) là loại PC40 với khối lượng riêng 3,13g/cm³. Phụ gia khoáng là xi hạt lò cao nghiền mịn S95 Hòa Phát (XLC) có khối lượng riêng 2,89g/cm³. Tro bay (TB) loại F được sử dụng như phụ gia độn cho cốt liệu mịn [7] có khối lượng riêng 2,22g/cm³ với tổng hàm lượng SiO₂, Al₂O₃,

Bảng 1. Chỉ tiêu chất lượng CKD và tro bay

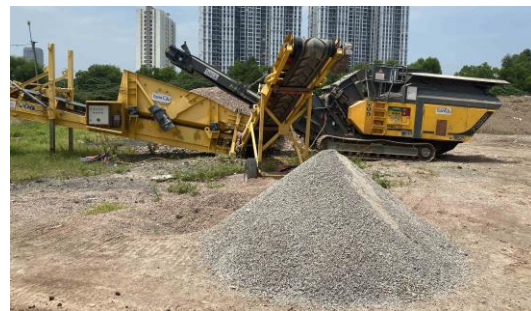
Hạng mục	Đơn vị	XM ¹	XLC ²	TB ³
Khối lượng riêng	g/cm ³	3,13	2,89	2,22
Mất khi nung	%	3,87	0,08	4,68
SiO ₂	%	-	34,04	58,91
Al ₂ O ₃	%	-	14,36	-
CaO	%	-	40,51	0,00
MgO	%	-	7,25	-
SO ₃	%	2,01	0,12	0,03
Cl	%	-	0,002	< 0,001

1 XM: Xi măng Portland; 2 XLC: Xi hạt lò cao nghiền mịn; 3 TB: tro bay có tổng hàm lượng SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ là 80,51%.

Fe₂O₃ là 80,51% của nhà máy nhiệt điện Phả Lại.

2.2. Cốt liệu

Cốt liệu tái chế được sản xuất bằng máy nghiền tác động RM 70GO! 2.0 và sau đó được sàng phân loại như trong Hình 1. Bảng 2 thể hiện các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu. Cốt liệu tự nhiên lần lượt là đá tự nhiên (DTN) với kích thước 05-20 mm và cát sông (CTN) với kích thước 0-5 mm. Cốt liệu lớn tái chế (DTC) có độ hút nước 6,21% và khối lượng thể tích ở trạng thái khô là 2,25 g/cm³. Theo TCVN 11969:2018 Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông (TCVN 11969:2018), DTC tương đương với loại II. Cốt liệu nhỏ tái chế (CTC) có độ hút nước 9,71% và khối lượng thể tích ở trạng thái khô 2,09g/cm³, tương đương cốt liệu nhỏ tái chế cấp L theo tiêu chuẩn JIS A 5023:2018 Recycled aggregate concrete-Class L.



(a)



(b)

(c)

Hình 1. (a) Công tác nghiền và sàng phân loại cốt liệu tái chế và sản phẩm đầu ra; (b) Cốt liệu lớn tái chế; (c) Cốt liệu nhỏ tái chế.

3. Thành phần cấp phối

Bảng 3 thể hiện các thành phần cấp phối tiến hành thực nghiệm. Các cấp phối được thiết kế với cấp độ bền chịu nén tương đương cấp B15 trở lên theo TCVN 5574:2018 Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép (TCVN 5574:2018). Các cấp phối đều có tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) là 55%, có phụ gia hóa dẻo giảm nước (PG) với tỷ lệ 1% khối lượng CKD.

Sau khi thử nghiệm, khối lượng nước đơn vị được lựa chọn là 180kg/m³ và 173kg/m³ để đảm bảo độ sụt mục tiêu 18±2,5 (cm). Đối với CKD, mẫu đối chứng

Bảng 2. Chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu

Hạng mục	Đơn vị	DTN ¹	CTN ²	DTC ³	CTC ⁴
Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa nước	g/cm ³	2,64	2,62	2,39	2,29
Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	g/cm ³	2,61	2,58	2,25	2,09
Khối lượng thể tích xốp	g/cm ³	1,64	1,72	1,44	1,33
Khối lượng thể tích đầm chặt	g/cm ³	2,63	2,58	2,31	2,08
Độ hút nước	%	1,09	1,47	6,21	9,71
Mô đun độ lớn	-	6,67	2,61	6,73	3,31
Hàm lượng hạt nhỏ hơn 75µm	%	1,2	2,2	1,2	5,2
Hàm lượng vật liệu tạp lai	%	-	-	0,22	0,18

¹DTN: Đá tự nhiên, ²CTN: Cát tự nhiên (cát sông), ³DTC: Đá tái chế, ⁴CTC: Cát tái chế

Bảng 3. Thiết kế thành phần cấp phối bê tông

Mẫu thí nghiệm ¹	Tỷ lệ thay thế ² (%)					Khối lượng đơn vị ³ (kg/m ³)							Q _{dt} (g/cm ³)
	DTC	CTC	XLC	TB	N	XM	XLC	TB	CTN	CTC	DTN	DTC	
XM-DTNCTN	-	-	-	-	180	327	-	-	895	-	987	-	2.60
XLC40-TBDTNCTN	-	-	40	20	173	189	126	63	841	-	987	-	2.58
XLC40-TBDTC50CTN	50	-	40	20	173	189	126	63	841	-	493	447	2.49
XLC40-TBDTC50CTC30	50	30	40	20	173	189	126	63	589	221	493	447	2.42
XLC40-TBDTCCTN	100	-	40	20	173	189	126	63	841	-	-	893	2.40
XLC70-DTNCTN	-	-	70	-	180	98	229	-	879	-	987	-	2.60
XLC70-DTNCTC	-	100	70	-	180	98	229	-	-	768	987	-	2.36
XLC70-DTC50CTC50	50	50	70	-	180	98	229	-	440	384	493	447	2.39
XLC70-DTCCTN	100	-	70	-	180	98	229	-	879	-	-	893	2.41

¹Mẫu thí nghiệm có N/CKD = 55% được đặt tên theo dạng “vật liệu chất kết dính - cốt liệu sử dụng”, sử dụng phụ gia hóa dẻo gốc Naphthalene formaldehyde sunfonate với hàm lượng 1% khối lượng chất kết dính, con số bên cạnh vật liệu thể hiện tỷ lệ thay thế, trường hợp không ghi số thể hiện tỷ lệ thay thế 100%. ²DTC: Đá tái chế, CTC: Cát tái chế, XLC: Xi lô cao nghiền mịn, TB: Tro bay; ³N: Nước, XM: Xi măng, DTN: Đá tự nhiên, CTN: Cát tự nhiên (cát sông).

dùng XM PC40, các mẫu còn lại sử dụng 40% và 70% XLC thay cho một phần XM. TB có tỷ lệ 20% chất kết dính nhằm tăng lượng phụ gia khoáng trong cấp phối làm giảm khối lượng cát sử dụng. Ngoài ra, DTC có tỷ lệ 50% và 100% thay cho DTN, CTC có tỷ lệ 30%, 50% và 100% thay cho CTN.

Chỉ số chất lượng tương đương được xem xét để đánh giá mối tương quan giữa các tính năng của bê tông và độ hút nước tương đương hoặc khối lượng thể tích tương đương của các loại cốt liệu trong thành phần cấp phối [8]. Tro bay được sử dụng làm phụ gia độn với tỷ lệ 20% khối lượng chất kết dính, vì tro bay không có chỉ tiêu độ hút nước nên chỉ tiêu khối lượng thể tích ở trạng thái khô được sử dụng để tính toán chỉ số khối lượng thể tích tương đương (Q_{dt}) [8]. Dựa trên thành phần cấp phối, chỉ số Q_{dt} được tính toán bằng phép tính trung bình trọng số theo công thức (1), sau đó được dùng để đánh giá mối tương quan với các tính năng của bê tông.

$$Q_{dt} = \frac{Q_{DTN} \times V_{DTN} + Q_{CTN} \times V_{CTN} + Q_{DTC} \times V_{DTC} + Q_{CTC} \times V_{CTC} + Q_{TB} \times V_{TB}}{V_{DTN} + V_{CTN} + V_{DTC} + V_{CTC} + V_{TB}} \quad (1)$$

Trong đó,

Q_{dt}: Khối lượng thể tích tương đương (g/cm³);

Q_{DTN}: Khối lượng thể tích ở trạng thái khô của cốt liệu đá tự nhiên (g/cm³);

Q_{CTN}: Khối lượng thể tích ở trạng thái khô của cốt liệu cát tự nhiên (g/cm³);

Q_{DTC}: Khối lượng thể tích ở trạng thái khô của cốt liệu đá tái chế (g/cm³);

Q_{CTC}: Khối lượng thể tích ở trạng thái khô của cốt liệu cát tái chế (g/cm³);

Q_{TB}: Khối lượng riêng của tro bay (g/cm³);

V_{DTN}, V_{CTN}, V_{DTC}, V_{CTC}, V_{TB}: Thể tích của cốt liệu trong bê tông (L/m³).

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm ở trạng thái tươi của bê tông

Mẫu thí nghiệm	Độ sụt (cm)	Khối lượng thể tích (kg/m ³)	Nhiệt độ (°C)
XM-DTNCTN	18,0	2370	28,4
XLC40-TBDTNCTN	19,0	2320	27,1
XLC40-TBDTC50CTN	19,5	2277	26,9
XLC40-TBDTC50CTC30	20,5	2169	27,2
XLC40-TBDTCCTN	20,0	2077	27,7
XLC70-DTNCTN	20,5	2302	28,1
XLC70-DTNCTC	19,5	2182	26,6
XLC70-DTC50CTC50	17,5	2200	27,8
XLC70-DTCCTN	19,5	2108	26,5

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Bê tông ở trạng thái tươi

Thí nghiệm đo độ sụt được thực hiện theo TCVN 3106:2022 Hỗn hợp bê tông - Phương pháp xác định độ sụt. Khối lượng thể tích, và nhiệt độ của bê tông tươi được xác định lần lượt theo TCVN 3108:1993 Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp xác định khối lượng thể tích và TCVN 9340:2012 Bê tông trộn sẵn - Yêu cầu cơ bản đánh giá chất lượng và nghiệm thu. Bảng 4 thể hiện kết quả thí nghiệm ở trạng thái tươi của bê tông. Các mẫu bê tông đều có độ sụt thỏa mãn mục tiêu 18±2,5cm. So với mẫu đối chứng XM-DTNCTN, các mẫu XLC70 có độ sụt lớn hơn do tỷ lệ thay thế cao của xi hạt lò cao nghiền mịn làm tăng tính công tác của bê tông [9]. Trong đó, các mẫu sử dụng cốt liệu tái chế của các tổ mẫu XLC70 có xu hướng giảm độ sụt, đặc biệt là trường hợp sử dụng kết hợp 50% DTC và 50% CTC, độ sụt ghi nhận được là 17,5 cm. Đối với các mẫu sử dụng kết hợp xi hạt lò cao nghiền mịn và tro bay ở các tổ mẫu XLC40, với đặc trưng các hạt dạng hình cầu với đường kính từ 0,1 - 30 (µm), việc sử dụng tro bay sẽ làm tăng tính công tác của bê tông nhiều hơn. Thông qua các lần thử nghiệm, khối lượng nước đơn vị của các tổ mẫu XLC40 đã giảm 4% so với mẫu đối chứng chỉ sử dụng XM để đảm bảo được độ sụt. Có thể thấy rằng các mẫu XLC40 đều có độ sụt cao hơn mẫu đối chứng chỉ sử dụng XM. Tuy nhiên, khi tăng tỷ lệ thay thế cốt liệu tái chế, xu hướng suy giảm độ sụt không được quan sát thấy. Hiện tượng này cũng xảy ra tương tự trong nghiên cứu của Dosho Y. khi kết hợp các vật liệu làm tăng tính công tác của bê tông như xi hạt lò cao nghiền mịn và tro bay với cốt liệu tái chế [8].

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của bê tông

Mẫu thí nghiệm	Cường độ chịu nén (N/mm ²)		Mô đun đàn hồi (kN/mm ²)	
	ngày	ngày	ngày	ngày
XM-DTNCTN	28	91	28	91
XLC40-TBDTNCTN	40,4	42,1	29,1	30,1
XLC40-TBDTCCTN	39,9	51,2	27,1	32,5
XLC40-TBDTC50CTN	36,4	47,4	27,9	33,2
XLC40-TBDTC50CTC30	32,3	42,7	24,9	29,7
XLC40-TBDTCCTN	30,7	40,2	24,2	26,8
XLC70-DTNCTN	32,2	44,2	27,4	29,4
XLC70-DTNCTC	30,8	36,1	24,9	26,4
XLC70-DTC50CTC50	28,9	36,4	24,5	28,0
XLC70-DTCCTN	23,6	27,2	22,0	24,4

Ngoài ra, khối lượng thể tích của mẫu đối chứng là 2370kg/m³, khi tỷ lệ thay thế của cốt liệu tái chế tăng dần, khối lượng thể tích có xu hướng giảm dần do hàm lượng vữa dính bám trên bề mặt cốt liệu tái chế. Nhiệt độ của các mẫu đo được trong khoảng 26,5°C -28,4°C.

4.2. Bê tông ở trạng thái đóng rắn

Mẫu được dỡ sau khi đúc 24 giờ và được bảo dưỡng ở nhiệt độ 27±2°C, độ ẩm ≥ 95% đến thời điểm thí nghiệm. Các tổ mẫu được chuẩn bị dạng hình trụ với Φ=100mm, h=200mm. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén tuân thủ theo TCVN 3118:2022 Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén và thí nghiệm mô đun đàn hồi tuân thủ theo JIS A 1149:2017 Method of test for static modulus of elasticity of concrete tại 28 ngày và 91 ngày cho 6 mẫu trụ đối với mỗi cấp phối. Kết quả thí nghiệm được thể hiện tại Bảng 5.

4.2.1. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi

Hình 2 so sánh kết quả thí nghiệm tại 28 ngày với đường cong mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi tính toán theo tiêu chuẩn JASS 5 (2022), Reinforced concrete work (JASS5) và TCVN 11823-5:2017 Thiết kế cầu đường bộ - Phần 5: Kết cấu bê tông (TCVN 11823-5:2017). Mô đun đàn hồi tính toán theo JASS 5 bằng công thức (2).

$$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{f_c}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{f_{Bk}}{60}\right)^{1/3} \quad (2)$$

Trong đó,

E : Mô đun đàn hồi bê tông (N/mm²);

k_1 : Hệ số hiệu chỉnh cốt liệu, sử dụng giá trị 1,0 nếu không phải các loại đá quy định tại JASS 5;

k_2 : Hệ số hiệu chỉnh chất kết dính, sử dụng giá trị 1,1 nếu dùng tro bay, 0,95 khi dùng xi lò cao, 1,0 khi không dùng phụ gia khoáng;

γ : Khối lượng thể tích của bê tông (t/m³);

σ_B : Cường độ chịu nén của bê tông (N/mm²).

Mô đun đàn hồi tính toán theo lý thuyết của tiêu chuẩn TCVN 11823-5:2017 bằng công thức (3).

$$E_c = 0.0017 \times K_1 \times W_c^2 \times f'_c{}^{0,33} \quad (3)$$

Trong đó,

E_c : Mô đun đàn hồi bê tông (N/mm²);

K_1 : Hệ số hiệu chỉnh cốt liệu, sử dụng giá trị 1,0;

W_c : Tỷ trọng của bê tông (kg/m³);

f'_c : Cường độ nén quy định của bê tông (MPa).

Khối lượng thể tích hoặc tỷ trọng trong tính toán lý thuyết của mẫu đối chứng là 2350kg/m³, xác định theo TCVN 3115:2022 Bê tông - Phương pháp xác định khối lượng thể tích. Đối với cách tính toán mô đun đàn hồi theo lý thuyết trong tiêu chuẩn JASS 5, vì cường độ chịu nén của bê tông trong tính toán là cường độ chịu nén thực tế nên khi so sánh với kết quả thí nghiệm, phải sử dụng cường độ chịu nén của tổ mẫu tại 28 ngày. Còn với cách tính toán mô đun đàn hồi theo lý thuyết trong TCVN 11823-5:2017, cường độ chịu nén tính toán là cường độ chịu nén quy định (cường độ chịu nén thiết kế), vì thế không sử dụng cường độ chịu nén theo kết quả thí nghiệm. Thay vào đó, nghiên cứu dùng cường độ chịu nén thiết kế của các mẫu để so sánh với tính toán lý thuyết.

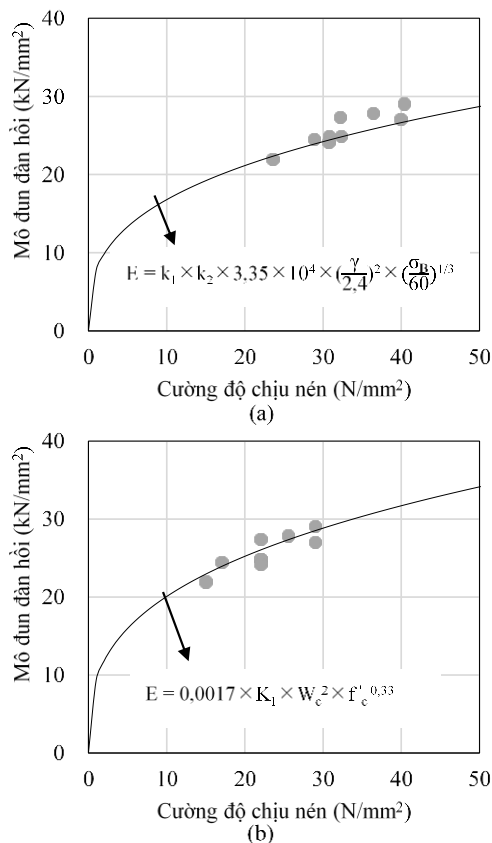
Trong Hình 2, khi so sánh với tiêu chuẩn JASS 5, kết quả thực nghiệm tại 28 ngày tương đối sát với đường cong thể hiện mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi theo lý thuyết. Trong Hình 2(b), kết quả của cường độ chịu nén thiết kế và mô đun đàn hồi thực nghiệm tại 28 ngày cũng bám sát đường cong theo lý thuyết trong Hình 2(a) và 2(b) cho thấy kết quả thí nghiệm có độ tin cậy cao.

4.2.2. Khối lượng thể tích tương đương

Bảng 3 thể hiện kết quả tính toán khối lượng thể tích tương đương (Q_{dt}). Căn cứ theo giá trị Q_{dt} này, Hình 3 (a), (b) thể hiện mối quan hệ giữa Q_{dt} và cường độ chịu nén tại 28 (f_{28}) ngày và 91 (f_{91}) ngày. Hình 3 (c), (d) thể hiện mối quan hệ giữa Q_{dt} và mô đun đàn

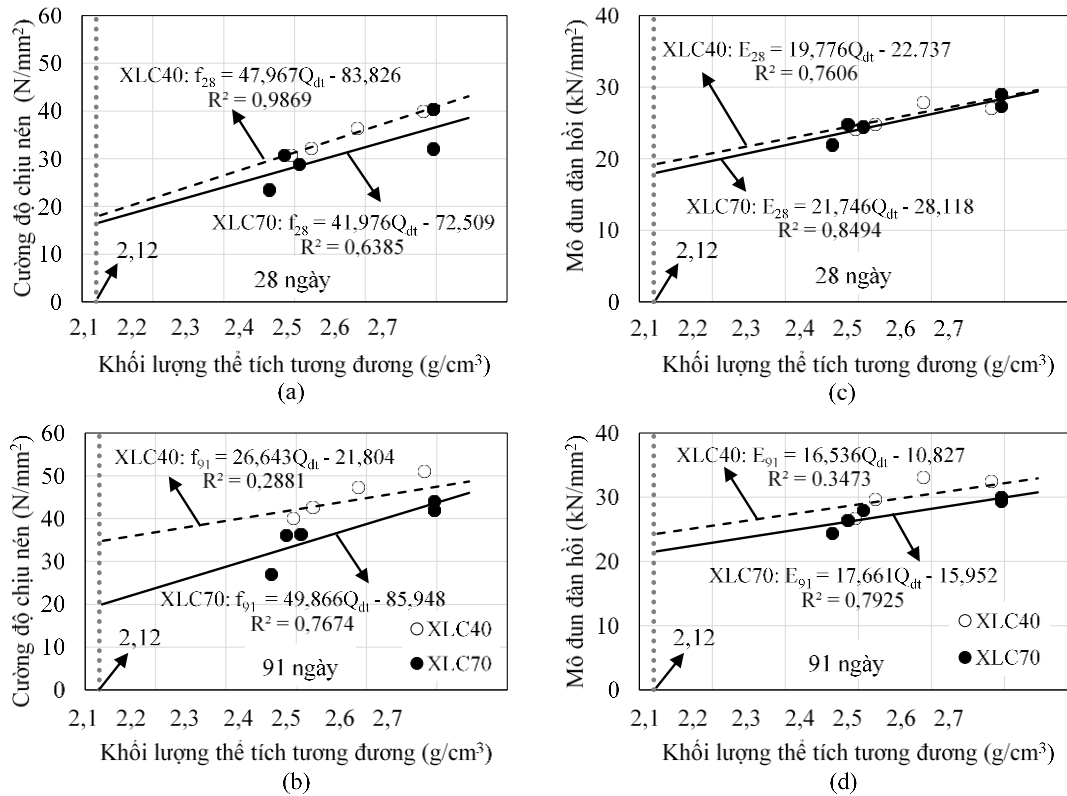
hồi tại 28 (E_{28}) ngày và 91 (E_{91}) ngày. Qua đó, nghiên cứu xây dựng các hàm dự báo cho các tính năng của bê tông sử dụng cốt liệu tái chế kết hợp với phụ phẩm công nghiệp.

Ngưỡng 2,12g/cm³ của Q_{dt} trong Hình 3 được tính toán bằng công thức (1) nhằm xác định trường hợp bất lợi nhất bằng các giá trị khối lượng thể tích tối thiểu theo các tiêu chuẩn với thành phần cấp phối trong Bảng 3. Tro bay có khối lượng thể tích tối thiểu là 1,95g/cm³ quy định tại tiêu chuẩn JIS A 6201:2015 Fly ash for use in concrete. Khối lượng thể tích tối thiểu của DTN và CTN là 2,5g/cm³, được quy định tại tiêu chuẩn JIS A 5308:2019, Ready-mixed concrete. Khối lượng thể tích tối thiểu của DTC là 1,8 g/cm³ theo tiêu chuẩn TCVN 11969:2018. Khối lượng thể tích tối thiểu của CTC sử dụng giá trị 1,91g/cm³ theo nghiên cứu của Dosho Y. [8].



Hình 2. Kết quả thí nghiệm tại 28 ngày so sánh với mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi (a) theo tiêu chuẩn JASS 5 và (b) theo tiêu chuẩn TCVN 11823-5:2017

Hình 3 cho thấy khi giá trị Q_{dt} tăng dần, các giá trị f_{28} , f_{91} , E_{28} và E_{91} cũng tăng lên. Hàm dự báo của giá trị f_{28} của các mẫu XLC40 có tính tương quan rất cao



Hình 3. Mối quan hệ giữa khối lượng thể tích tương đương (Q_{dt}) và (a) cường độ chịu nén của bê tông tại 28 ngày (f_{28}); (b) cường độ chịu nén của bê tông tại 91 ngày (f_{91}); (c) mô đun đàn hồi của bê tông tại 28 ngày (E_{28}); và (d) mô đun đàn hồi của bê tông tại 91 ngày (E_{91})

với $R^2=0,9869$, hàm dự báo của các mẫu XLC70 cũng có tính tương quan với $R^2=0,6385$. Thông qua hàm dự báo có thể dự báo với các mẫu XLC40 và XLC70 có $Q_{dt}=2,12g/cm^3$ vẫn có cường độ chịu nén trên $15N/mm^2$ thỏa mãn cấp B15 theo TCVN 5574:2018 nên có thể sử dụng được trong các kết cấu bê tông cốt thép. Tuy nhiên, tại 91 ngày, chỉ có các mẫu XLC70 có hàm dự báo với tính tương quan khá cao, còn các mẫu XLC40 không có tính tương quan nên không thể sử dụng trong việc dự báo giá trị f_{91} .

Đối với giá trị E_{28} và E_{91} , các tổ mẫu XLC40 và XLC70 đều có tính tương quan khá cao tại 28 ngày với hệ số xác định lần lượt là $R^2=0,7606$ và $R^2=0,8494$. Vì thế, có thể dùng hàm dự báo để dự báo E_{28} của các mẫu XLC40 và XLC70 với giá trị Q_{dt} được tính toán trước. Tại 91 ngày, chỉ có hàm dự báo của các mẫu XLC70 có tính tương quan cao nên có thể dự báo cho các cấp phối sử dụng 70% xi lò cao.

5. Phát thải carbon

Tại Việt Nam, công nghệ đốt than vẫn được sử dụng cho các nhà máy xi măng, dẫn đến lượng phát

thải carbon cao, khoảng 920kg CO_2 /tấn. Bằng cách giảm thiểu lượng xi măng sử dụng, thay thế bằng phụ phẩm công nghiệp như XLC có thể giúp giảm lượng khí thải carbon, làm cho bê tông trở nên thân thiện hơn với môi trường. Điều này góp phần thúc đẩy sự phát triển bền vững cho ngành xây dựng.

Theo một số nghiên cứu và các tiêu chuẩn như JIS Q 13315-4:2020 Environmental management for concrete and concrete structures - Part 4: Environmental design of concrete structures, lượng carbon phát thải từ các vật liệu sử dụng đã được ghi nhận và thống kê chi tiết như trong Bảng 6 [4], [10]. Khối lượng phát thải carbon này sẽ được sử dụng cùng với thông tin thành phần cấp phối trong Bảng 3 để tính toán lượng phát thải carbon của từng tổ mẫu theo công thức (4).

$$CO_{2pt} = \sum_{i=1}^n n_i \times m_i \quad (4)$$

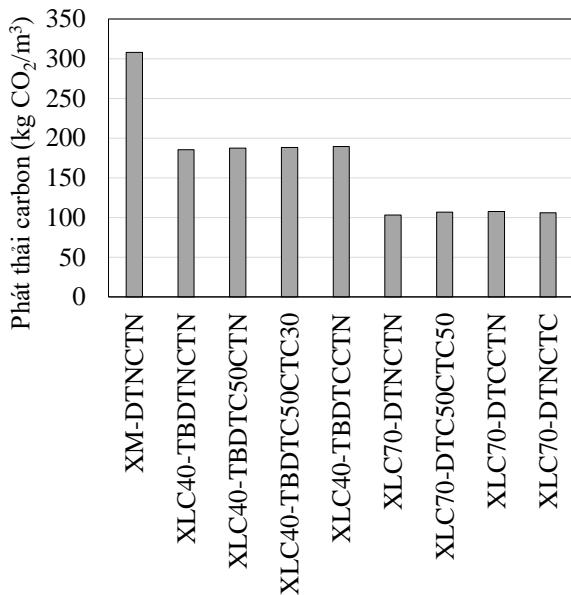
Trong đó,

CO_{2pt} : Khối lượng phát thải carbon (kg CO_2 /tấn);

n_i : Khối lượng phát thải carbon (kg CO_2 /tấn);

Bảng 6. Khối lượng phát thải carbon của các vật liệu

Vật liệu	Ký hiệu	Khối lượng phát thải CO ₂ (kg CO ₂ / tấn)
Nước	N	0,0035
Xi măng PC40	XM	920
Xi lò cao	XLC	27
Tro bay	TB	27
Cát sông	CTN	3,7
Cốt liệu mịn tái chế	CTC	8,1
Đá tự nhiên	DTN	2,9
Cốt liệu lớn tái chế	DTC	8,1
Phụ gia hóa dẻo giảm nước	PG	150



Hình 4. Khối lượng phát thải carbon của các cấp phối bê tông

m_i : Khối lượng đơn vị trong thành phần cấp phối theo Bảng 3 (kg/m³);

Hình 4 thể hiện kết quả tính toán khối lượng phát thải carbon của các thành phần cấp phối. Đối với mẫu đối chứng sử dụng hoàn toàn xi măng, lượng phát thải lên tới 310kg CO₂/m³. Các mẫu XLC40 phát thải từ 185-190 (kg CO₂/m³). Với lượng xi lò cao thay cho 40% xi măng, các mẫu XLC40 giảm từ 38%-40% lượng phát thải carbon khi so với mẫu đối chứng. Ngoài ra, các mẫu XLC70 phát thải từ 103-108 (kg CO₂/m³). Khi thay thế xi lò cao cho một lượng xi măng với tỷ lệ 70%, bê tông có thể giảm phát thải carbon từ 65%-67% so với mẫu đối chứng.

6. Kết luận

(1) Cốt liệu tái chế và các phụ phẩm công nghiệp như tro bay và xi lò cao đều có chất lượng đáp ứng các tiêu chuẩn hiện hành để sử dụng trong sản xuất bê tông.

(2) Mối quan hệ giữa kết quả cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi có tính tương đồng với tính toán lý thuyết cho thấy độ tin cậy cao. Ngoài ra, bằng giá trị khối lượng thể tích tương đương, hàm dự báo đã được xây dựng cho giá trị cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi tại 28 ngày.

(3) Bằng cách thay xi lò cao cho xi măng trong chất kết dính với các tỷ lệ 40% và 70%, bê tông có thể giảm phát thải carbon từ 38%-67% so với mẫu đối chứng.

Sử dụng cốt liệu tái chế cùng các phụ phẩm công nghiệp như xi lò cao nghiền mịn và tro bay, bê tông có thể giảm phát thải carbon nhưng vẫn đảm bảo chất lượng cho kết cấu bê tông cốt thép. Nhờ vậy, loại vật liệu thân thiện với môi trường này có tiềm năng mở ra một hướng phát triển mới, đóng góp vào sự phát triển bền vững của Việt Nam nói chung và lĩnh vực xây dựng nói riêng.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.97**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] U.S. Geological Survey (2024), *Mineral Commodity Summaries 2024*.
- [2] Trịnh Khắc Kiên Hoàng Quốc Gia (2019), *Thực trạng khai thác sử dụng cát tự nhiên tại Việt Nam và nghiên cứu tính chất cát biển tại một số vùng biển Việt Nam*, Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi Trường, Số 66, tr.151-156.
- [3] Hoàng Minh Bằng, Vũ Văn Huy, Nguyễn Thùy Linh, Phạm Tuấn Dũng, Nguyễn Mạnh Hùng, Phạm Thanh Mai, Lưu Thị Hồng, và Trịnh Thị Châm (2021), *Xi măng siêu ít clanhke từ xi lò cao*, Tạp chí khoa học Kiến trúc Xây dựng, Số 42, tr.65-68.
- [4] Volker Hoenig, Helmut Hoppe, và Bernhard Emberger (2007), *Carbon capture technology-options and potentials for the cement industry*, PCA R&D Serial, Vol.3022.
- [5] Nghị định số 06/2022/NĐ-CP, (2022), *Quy định giảm nhẹ khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn*.
- [6] Hoàng Phạm Đình Huy, Sang Nguyễn Thanh, và Đức Vũ Bá (2020), *Ảnh hưởng của hàm lượng cốt liệu tái chế từ gạch đất sét nung và bê tông phế*

- thải đến tính chất cơ học của bê tông cường độ cao*, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, số 71(8), tr.944-955.
- [7] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2020), Fly ash.
- [8] Yasuhiro Dosho (2021), *Effect of mineral admixtures on the performance of low-quality recycled aggregate concrete*, Crystals, Vol.11(6), p.596.
- [9] Architectural Institute of Japan (AIJ) (1996), *Recommendation for practice of concrete make use of ground granulated blast furnace slag*.
- [10] Agustinus Agus Setiawan, Harianto Hardjasaputra, Roesdiman Soegiarso (2023). *Embodied carbon dioxide of fly ash based geopolymer concrete*. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing.

Ngày nhận bài:	19/11/2024
Ngày nhận bản sửa:	20/12/2024
Ngày duyệt đăng:	25/12/2024