

Nghiên cứu cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông cốt liệu tái chế sử dụng bê tông phá dỡ và xỉ hạt lò cao nghiền mịn

Study of compressive strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete using demolished concrete and ground granulated blast furnace slag

> **THS NGUYỄN XUÂN HIỂN^{1,2}, GS.TS PHAN QUANG MINH¹, PGS.TS NGUYỄN NGỌC TÂN^{1,*}**

¹Khoa XDDD&CN, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

²Vụ Khoa học Công nghệ và Môi trường, Bộ Xây dựng

TÓM TẮT

Ngày nay, tại các thành phố lớn ở Việt Nam, việc phá dỡ các công trình cũ cũng như xây dựng các công trình mới diễn ra thường xuyên và liên tục. Theo đó, một lượng lớn chất thải rắn xây dựng phát sinh hàng ngày từ các hoạt động xây dựng. Bên cạnh đó, việc sản xuất vật liệu thép tạo ra một lượng lớn xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GGBFS) là một loại phế phẩm công nghiệp. Vì vậy, việc sử dụng các chất thải rắn này để sản xuất bê tông cốt liệu tái chế (BTCCLTC) là một giải pháp có tính khả thi, góp phần phát triển bền vững trong lĩnh vực xây dựng và giảm tác động ô nhiễm môi trường. Bài báo trình bày kết quả thực nghiệm cường độ nén và mô đun đàn hồi theo thời gian của BTCCLTC sử dụng cốt liệu bê tông tái chế và GGBFS.

Từ khóa: Bê tông cốt liệu tái chế; cường độ nén; mô đun đàn hồi; cốt liệu lớn tái chế; xỉ hạt lò cao nghiền mịn.

ABSTRACT

Nowadays, in big cities in Vietnam, the demolition of old buildings and the construction of new ones occur regularly and continuously. Following that, a large volume of construction and demolition waste was generated daily. Besides, producing steel materials also creates a large amount of ground granulated blast furnace slag (GGBFS), a by-product. Therefore, it is interesting to use these solid wastes to produce recycled aggregate concrete (RAC), which contributes to sustainable development in civil engineering and reduces the impact of environmental pollution. This paper shows the experimental results of RAC's compressive strength and elastic modulus over time made with recycled concrete aggregate and GGBFS.

Keywords: Recycled aggregate concrete, compressive strength; modulus of elasticity; recycled coarse aggregate; ground granulated blast furnace slag.

1. MỞ ĐẦU

Trong quá trình đô thị hóa, các hoạt động xây dựng và phá dỡ công trình tạo ra một lượng lớn chất thải rắn xây dựng (CTRXD), làm quá tải các bãi rác thải và bãi chôn lấp tập trung. Đồng thời, CTRXD thường xuyên bị đổ trộm ra sông, hồ, vĩa hè đặt ra các vấn đề liên quan đến hệ thống quản lý chất thải rắn, cũng như mỹ quan đô thị. Trong khi đó, các hoạt động xây dựng mới đặt ra nhu cầu cao về vật liệu bê tông, dẫn đến tăng mức tiêu thụ cốt liệu tự nhiên (đá, cát sông), thường chiếm khoảng 70% tổng khối lượng trong thành phần cấp phối [1]. Khai thác cốt liệu tự nhiên quá mức gây ra những hậu quả tiêu cực về môi trường, chẳng hạn như ô nhiễm không khí, ô nhiễm nguồn nước và phá vỡ sự cân bằng sinh thái được hình thành trong hàng triệu năm. Do đó, việc tái chế CTRXD không chỉ góp phần phát triển bền vững trong lĩnh vực xây dựng mà còn giúp bảo vệ tài nguyên thiên nhiên và giảm lượng chất thải rắn đổ vào các bãi chôn lấp [2, 3].

Trong số các loại CTRXD, bê tông cũ và khối xây thường được sử dụng để sản xuất cốt liệu tái chế với các cỡ hạt khác nhau (cốt liệu

lớn, cốt liệu nhỏ) bằng công nghệ nghiền. Các nghiên cứu chỉ ra rằng cốt liệu tái chế có thể được sử dụng làm vật liệu cho lớp móng của đường giao thông [4-6]. Cốt liệu tái chế cũng được sử dụng để thay thế một phần cốt liệu tự nhiên trong sản xuất bê tông [7-9]. Nghiên cứu của Tam và cs. [10] đã tổng hợp các kết quả nghiên cứu thu được từ hơn 26 nghiên cứu được thực hiện trước đó, chỉ ra rằng cốt liệu lớn tự nhiên có thể được thay thế bằng cốt liệu lớn tái chế, với các tỷ lệ thay thế từ 30% đến 100%. Các nghiên cứu của Silva và cs. [11, 12] cũng chỉ ra rằng cường độ nén của BTCCLTC phụ thuộc đồng thời chất lượng và hàm lượng của cốt liệu tái chế sử dụng. Chất lượng của cốt liệu tái chế được phân loại thành bốn cấp từ cao đến thấp (A, B, C và D), dựa trên ba chỉ tiêu là: (i) khối lượng thể tích; (ii) độ hút nước; (iii) độ hao mòn Los Angeles (LA). Theo đó, cường độ nén của BTCCLTC giảm khoảng 15% so với bê tông cốt liệu tự nhiên khi sử dụng đến 70% cốt liệu lớn tái chế loại A, hoặc đến 39,5% cốt liệu lớn tái chế loại B. Trong khi đó, hàm lượng cốt liệu tái chế ảnh hưởng nhiều hơn đến mô đun đàn hồi của BTCCLTC [13].

Xi măng được sử dụng rộng rãi làm chất kết dính trong sản xuất bê tông. Theo Hiệp hội Xi măng, Việt Nam đứng thứ 5 thế giới về năng lực sản xuất xi măng, sau Trung Quốc, Ấn Độ, Mỹ và Nga. Năm 2021, sản lượng sản xuất xi măng đạt xấp xỉ 110 triệu tấn/năm. Tuy nhiên, quá trình sản xuất xi măng tạo ra bụi mịn và các tác nhân hóa học (CH_4 , VOC, NO_x , SO_x , CO , CO_2), là nguyên nhân gây ra hiện tượng nóng lên toàn cầu và ảnh hưởng có hại đến sức khỏe con người. Nhìn chung, việc sản xuất mỗi tấn xi măng thải ra môi trường khoảng 0,7 tấn CO_2 [14], chiếm khoảng 8% lượng khí thải CO_2 toàn cầu [15]. Hơn nữa, thép cũng là loại vật liệu xây dựng phổ biến ở Việt Nam và có nhu cầu rất lớn. Cùng với quá trình sản xuất thép, lượng xỉ thép thải ra đã chiếm diện tích đất lớn và gây ra những tác động nghiêm trọng đến môi trường với hàm lượng bụi và kim loại nặng cao. Vì vậy, việc tái chế xỉ thép được coi là cần thiết để đáp ứng các mục tiêu kinh tế và sinh thái. Xi hạt lò cao nghiền mịn có các thành phần hóa học chính, bao gồm CaO (40-48%), SiO_2 (35-38%) và Al_2O_3 (6-18%). Do đó, GGBFS được coi là vật liệu có tính kiềm cao, với mô đun kiềm nằm trong khoảng từ 0,9 đến 1,2 và mô đun hoạt động nằm trong khoảng từ 0,16 đến 0,53. Chính vì những đặc điểm này nên có thể sử dụng GGBFS để thay thế một phần xỉ măng trong sản xuất bê tông [16, 17]. Tỷ lệ thay thế xỉ măng bằng GGBFS thường dao động trong khoảng từ 15% đến 60%. Cường độ nén của bê tông tăng lên khi sử dụng sử dụng từ 15% đến 30% GGBFS thay thế cho xỉ măng [18].

Để thúc đẩy việc tái chế CTRXD, sử dụng cốt liệu tái chế và bê tông cốt liệu tái chế ở nước ta, cần thiết phải thực hiện các nghiên cứu để xác định các đặc trưng cơ học của các loại vật liệu này. Trong khuôn khổ bài báo này, cốt liệu lớn tái chế từ bê tông cũ đã được sử dụng để thay thế cho cốt liệu lớn tự nhiên với tỷ lệ 70%, GGBFS được sử dụng thay thế cho xỉ măng với tỷ lệ 30%. Ba hỗn hợp bê tông đã được thiết kế và chế tạo trong phòng thí nghiệm để kiểm tra cường độ nén và mô đun đàn hồi theo thời gian, lần lượt tại các độ tuổi 28, 60, 90 và 120 ngày. Những kết quả thí nghiệm cho phép so sánh các tính chất cơ học này giữa bê tông cốt liệu tái chế và bê tông cốt liệu tự nhiên.

2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu sử dụng

Chất kết dính sử dụng là xi măng PC40 của Nhà máy xi măng Bút Sơn với các tính chất kỹ thuật đảm bảo yêu cầu về tính chất và chất lượng theo tiêu chuẩn TCVN 2682:2009 [19]. Khối lượng riêng của xi măng là $3,12 \text{ g/cm}^3$. Bảng 1 giới thiệu các thành phần hóa học của loại xi măng sử dụng.

Bảng 1. Thành phần hóa học của xi măng

Thành phần	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	MKN (%)
Hàm lượng (%)	22,3	6,7	4,7	55,5	2,4	1,3	0,3	0,5

Trong nghiên cứu này, xỉ hạt lò cao nghiền mịn, được sử dụng để thay thế một phần cho xỉ măng trong hỗn hợp bê tông. Xi hạt từ quá trình luyện gang trong lò cao tại nhà máy thép Hòa Phát được làm lạnh nhanh bằng nước sau đó nghiền mịn trong máy nghiền bi để đạt độ mịn ở mức S95, thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 11586:2016 [20], với khối lượng riêng là $2,82 \text{ g/cm}^3$, bề mặt riêng không nhỏ hơn $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$, và chỉ số hoạt tính lớn hơn 75% ở 7 ngày tuổi và 95% ở 28 ngày tuổi. Bảng 2 giới thiệu các thành phần hóa học của loại GGBFS sử dụng trong nghiên cứu.

Bảng 2. Thành phần hóa học của GGBFS

Thành phần	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	MKN (%)
Hàm lượng (%)	36,9	12,4	-	30,7	14,8	0,4	-	0,4

Cốt liệu tự nhiên được sử dụng bao gồm cốt liệu lớn tự nhiên (CLLN) và cốt liệu nhỏ tự nhiên (CLNTN) đáp ứng các chỉ tiêu kỹ

thuật theo tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 [21] dùng sản xuất bê tông. CLLN là đá dăm Cẩm Phả, Quảng Ninh, có cỡ hạt phổ biến trong khoảng từ 10 mm đến 20 mm. CLNTN là cát vàng sông Lô, là loại cốt liệu phổ biến tại Việt Nam, có cỡ hạt phổ biến từ 0,14 mm đến 5 mm.



Hình 1. Cốt liệu lớn tái chế từ bê tông cũ

Cốt liệu lớn tái chế (CLLTC) được sản xuất bằng dây chuyền nghiền sàng, như trên Hình 1, từ 100% bê tông cũ từ một công trình phá dỡ trên địa bàn thành phố Hà Nội. Trong phòng thí nghiệm, CLLTC có đường kính hạt từ 5 mm đến 20 mm được sử dụng để phù hợp với kích thước hạt CLLN. Do đó, nghiên cứu này sử dụng hai loại cốt liệu lớn để chế tạo bê tông là: (1) đá tự nhiên; (2) CLLTC từ 100% bê tông cũ. Cả hai loại cốt liệu lớn tự nhiên và tái chế đều có cỡ hạt lớn nhất là 20 mm.

Các thí nghiệm được tiến hành theo tiêu chuẩn TCVN 7572:2006 [22], để xác định các tính chất cơ bản của cốt liệu, bao gồm: (1) khối lượng riêng, (2) khối lượng thể tích, (3) độ hút nước, (4) độ hao mòn LA, (5) hàm lượng thoi dẹt. Các kết quả thí nghiệm được trình bày trong Bảng 3 và so sánh với yêu cầu kỹ thuật đối với CLLTC cho bê tông theo tiêu chuẩn TCVN 11969:2018 [23]. Kết quả thu được cho thấy, CLLTC có khối lượng thể tích bằng $2,43 \text{ g/cm}^3$, độ hút nước bằng 3,53%, độ hao mòn LA bằng 30% và hàm lượng thoi dẹt bằng 12,2%. Do đó, có thể xếp loại CLLTC sử dụng trong nghiên cứu là loại I theo tiêu chuẩn TCVN 11969:2018 [23].

Bảng 3. Các tính chất cơ bản của CLLTC

Tính chất	Kết quả	TCVN 11969:2018	
		Loại I	Loại II
Khối lượng riêng	2,62	-	-
Khối lượng thể tích khô	2,38	-	-
Khối lượng thể tích (g/cm^3)	2,43	$\geq 2,3$	$\geq 1,8$
Độ hút nước (%)	3,53	≤ 5	≤ 20
Độ hao mòn LA (%)	30	≤ 50	≤ 50
Hàm lượng hạt thoi dẹt (%)	12,2	≤ 35	≤ 35

Nước sinh hoạt được sử dụng để trộn bê tông, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 [24]. Khối lượng nước sử dụng được kiểm tra bằng cân kỹ thuật trước khi thêm vào hỗn hợp bê tông.

Dựa trên kết quả nghiên cứu tổng quan trình bày trong phần mở đầu, ba hỗn hợp bê tông đã được thiết kế trong nghiên cứu này, ký hiệu lần lượt là CP0, CP1 và CP2, với thành phần cấp phối được trình bày chi tiết trong Bảng 4. Trong đó, hỗn hợp CP0 là bê tông đối chứng được chế tạo bằng 100% CLTN như cát, đá dăm, xi măng và nước. Hỗn hợp CP1 là BTCLTC sử dụng 70% CLLTC thay thế cho CLLN. Hỗn hợp CP2 là BTCLTC sử dụng 70% CLLTC thay thế cho CLLN và 30% GGBFS thay thế cho xỉ măng PC40. Các thành phần khác của ba cấp phối được lấy giống nhau. Tỷ lệ nước/chất kết dính (tổng khối lượng xi măng và GGBFS), ký hiệu N/CKD , bằng 0,39 cho cả ba loại bê tông.

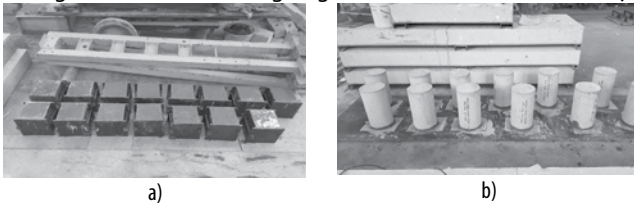
Bảng 4. Thành phần cấp phối bê tông

Bê tông	Xi măng (kg)	GGBFS (kg)	CLNTN (kg)	CLLTN (kg)	CLLTC (kg)	Nước (kg)	N/CKD
CP0	470	-	596	1250	-	185	0,39
CP1	470	-	596	375	875	185	0,39
CP2	329	141	596	375	875	185	0,39

2.2. Mẫu thí nghiệm

Đối với bê tông sử dụng cốt liệu tái chế, do bề mặt cốt liệu có thể tồn tại vữa cũ có cấu trúc xốp và độ hút nước cao hơn so với đá tự nhiên, nên có thể ảnh hưởng đến liên kết giữa hạt cốt liệu và hồ xi măng mới. Trong nghiên cứu này, quy trình trộn theo hai giai đoạn, đã được sử dụng để chế tạo bê tông đối chứng CP0 và hai loại bê tông cốt liệu tái chế CP1 và CP2. Theo nghiên cứu của Tam và cs. [25], quy trình trộn theo hai giai đoạn này có thể cải thiện được cường độ nén của bê tông sử dụng CLLTC nhờ hiệu ứng xâm nhập và đẩy các lỗ rỗng hồ xi măng trên bề mặt hạt cốt liệu của hồ xi măng, đồng thời bao bọc bề mặt hạt cốt liệu và tạo liên kết tốt trong vùng ITZ (Interfacial Transition Zone) giữa hồ xi măng và hạt cốt liệu.

Giai đoạn thứ nhất, cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn được cho vào máy trộn và trộn đều với nhau trong thời gian 60 giây. Thêm 1/2 lượng nước thiết kế và trộn tiếp trong 60 giây. Giai đoạn thứ hai, thêm xi măng vào hỗn hợp cốt liệu đã được làm ẩm, trộn trong vòng 30 giây. Tiếp theo, thêm 1/2 lượng nước còn lại vào hỗn hợp và trộn tiếp trong vòng 120 giây để đạt được trạng thái đồng nhất của hỗn hợp bê tông. Quy trình này được sử dụng thống nhất đối với ba loại bê tông CP0, CP1 và CP2, và giống nhau đối với tất cả các mẻ trộn.



Hình 2. Mẫu bê tông: (a) Hình lập phương; (b) Hình trụ

Đối với mỗi loại bê tông, các mẫu thí nghiệm đã được chế tạo với cùng một cấp phối vật liệu và trong cùng một lần trộn, bao gồm: (i) Mẫu hình lập phương có kích thước 150×150×150 mm, như trên Hình 2(a), dùng để thực hiện thí nghiệm xác định cường độ nén của bê tông; Mẫu hình trụ có đường kính 150 mm và chiều cao 300 mm dùng để thực hiện thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi của bê tông. Sau khi tháo khuôn, các mẫu hình trụ phải được bảo quản để làm phẳng bề mặt, như trên Hình 2(b). Tất cả các mẫu được bảo quản trong cùng một điều kiện khí hậu của phòng thí nghiệm cho đến khi bê tông đủ 28 ngày tuổi thì bắt đầu tiến hành các thí nghiệm.

2.3. Thí nghiệm xác định cường độ nén

Thí nghiệm nén được thực hiện trên các mẫu thử hình lập phương 150×150×150 mm theo tiêu chuẩn TCVN 3118:1993 [26], để xác định cường độ nén của bê tông. Cường độ nén của bê tông là giá trị trung bình của một tổ mẫu có 3 viên. Thí nghiệm nén được thực hiện ở các thời điểm khác nhau, lần lượt là 28, 60, 90 và 120 ngày tuổi, để theo dõi sự phát triển cường độ nén của bê tông theo thời gian và trong điều kiện khí hậu phòng thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm cho phép so sánh cường độ nén giữa ba loại bê tông sử dụng. Từ đó, xác định ảnh hưởng của CLLTC và GGBFS đến cường độ nén của bê tông. Cường độ nén trung bình trên mẫu lập phương được quy đổi sang mẫu hình trụ, để xác định tải trọng thử trong thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi của bê tông.

Mỗi mẫu thử được đặt vào tâm máy nén thủy lực 200 tấn và chịu một lực nén tăng dần cho đến khi bị phá hoại, như trên Hình 3. Tốc độ tăng tải trọng không đổi và bằng 6±4 daN/cm²/s. Tải trọng phá hoại mẫu là lực nén lớn nhất thể hiện trên máy nén. Cường độ nén của bê

tông, ký hiệu R_n (MPa), được tính toán theo công thức (1), bằng tỷ số giữa lực phá hoại (P) và diện tích tiết diện chịu lực của mẫu thử (S). Do sử dụng mẫu chuẩn hình lập phương, nên hệ số quy đổi α lấy bằng 1.

$$R_n = \alpha \frac{P}{S} \quad (2)$$



Hình 3. Thí nghiệm nén mẫu bê tông

2.4. Thí nghiệm mô đun đàn hồi bê tông

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm mô đun đàn hồi được thực hiện trên mẫu bê tông hình trụ theo tiêu chuẩn RILEM CPC8 [27]. Mỗi mẫu thử hình trụ được dán ba phiến điện trở sản xuất bởi Kyowa, Nhật Bản, có chiều dài chuẩn đo bằng 60 mm và điện trở 120 Ω. Tại vị trí dán, bề mặt bê tông được mài nhẵn bằng giấy nhám, làm sạch bằng khăn sạch và côn 90 độ. Mỗi phiến điện trở được dán theo phương chịu lực của mẫu thử, dọc theo chiều cao của mẫu, như thể hiện trên Hình 4(a). Ba phiến điện trở tạo với nhau một góc 120°, và hình thành một bộ ba cảm biến đo biến dạng nén của bê tông. Biến dạng nén của từng mẫu thử là giá trị trung bình của ba phiến điện trở. Tổng cộng 9 mẫu thử, bảo quản trong cùng điều kiện khí hậu, đã được thí nghiệm, chia thành ba tổ mẫu đại diện cho ba loại bê tông CP0, CP1 và CP2.



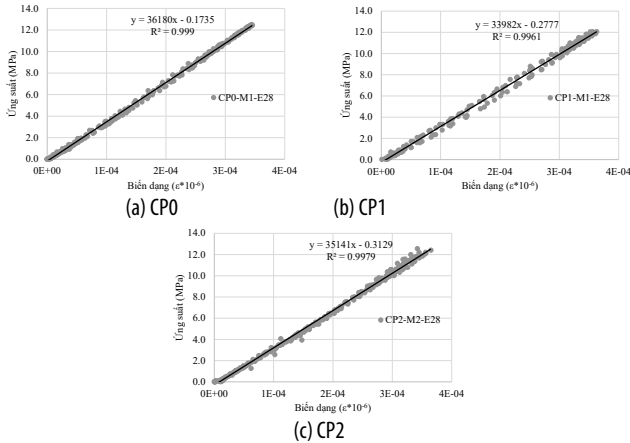
Hình 4. Thí nghiệm mô đun đàn hồi bê tông

Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi được thực hiện trên máy nén thủy lực 50 tấn kết hợp với load-cell đo lực điện tử và bộ xử lý số liệu Data-logger TDS530, cho phép ghi nhận số liệu liên tục và tự động trong suốt quá trình thí nghiệm, như trên Hình 4(b). Mẫu thử được gia tải đến lực nén có giá trị bằng 40% của lực phá hoại mẫu. Mỗi mẫu thử được nén ba chu kỳ tăng tải và hạ tải với vận tốc không đổi. Tại mỗi thời điểm thí nghiệm (t), mô đun đàn hồi của bê tông, ký hiệu E_c (GPa), được xác định theo công thức (2), trong đó σ_c là ứng suất nén, ϵ_c là biến dạng nén dọc trục của bê tông. Mô đun đàn hồi của bê tông là giá trị trung bình của ba mẫu thử. Tương tự như thí nghiệm nén bê tông, thí nghiệm mô đun đàn hồi được thực hiện lần lượt khi bê tông đủ 28, 60, 90 và 120 ngày tuổi.

$$E_c(t) = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} \quad (2)$$

Dựa trên kết quả thí nghiệm nén bê tông ở 28 ngày tuổi, tải trọng thí nghiệm mô đun đàn hồi được xác định cho từng tổ mẫu. Tải trọng thí nghiệm được giữ nguyên cho các lần thí nghiệm tiếp theo trên cùng tổ mẫu. Hình 5 giới thiệu biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng thu được trên một số mẫu thử điển hình của ba loại bê tông CP0, CP1 và CP2 ở 28 ngày tuổi. Ứng suất nén trong bê tông

được tính toán bằng lực tác dụng chia cho tiết diện chịu lực của mẫu. Biến dạng dọc trục được lấy bằng giá trị trung bình của ba phiến diện trợ dán trên mẫu thử. Bê tông làm việc trong giai đoạn đàn hồi, nên mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng có dạng phương trình tuyến tính. Mô đun đàn hồi của từng mẫu thử được xác định bằng độ dốc của phương trình tuyến tính giữa ứng suất và biến dạng của bê tông.



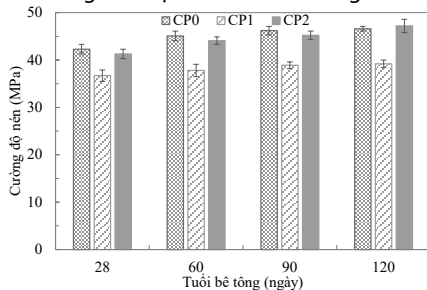
Hình 5. Biểu đồ ứng suất – biến dạng trên các mẫu điển hình của ba loại bê tông

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

3.1. Cường độ nén của bê tông cốt liệu tái chế

Những kết quả thu được từ thí nghiệm nén mẫu bê tông được biểu diễn trên đồ thị Hình 6 cho thấy sự phát triển cường độ của bê tông theo thời gian và cho phép so sánh cường độ nén giữa các loại bê tông sử dụng. Cường độ nén trung bình của ba loại bê tông ở 28 ngày tuổi cho kết quả từ 37 MPa trở lên, đạt cấp cường độ nén B30 (tương đương mác bê tông M400). Do đó, hai loại BTCLTC sử dụng trong nghiên cứu đều ứng yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn đối với gạch bê tông tự chèn, mác từ M200 đến M600, tương ứng với cường độ nén tối thiểu dao động từ 20 MPa đến 60 MPa.

Ở 28 ngày tuổi, bê tông đối chứng CP0 sử dụng 100% cốt liệu tự nhiên đạt cường độ nén trung bình là 42,3 MPa, độ lệch chuẩn là 1,0 MPa và hệ số biến động là 2,5%. Bê tông CP1 sử dụng 70% CLLTC thay thế CLLTN có cường độ nén trung bình là 36,7 MPa, độ lệch chuẩn là 1,2 MPa và hệ số biến động là 3,4%. Cường độ nén trung bình của bê tông CP1 giảm 13,2% so với bê tông đối chứng CP0. Trong khi đó, bê tông CP2 có cường độ nén trung bình là 41,3 MPa, độ lệch chuẩn là 1,0 MPa và hệ số biến động là 2,3%. Cường độ nén của bê tông CP2 giảm 1,0 MPa so với bê tông đối chứng CP0, tương đương giảm 2,4%. Điều này được giải thích bởi tác dụng của việc sử dụng 30% GGBFS thay thế cho xi măng, có tác dụng đẩy cấu trúc, làm cho bê tông CP2 đặc chắc hơn bê tông CP1.



Hình 6. Cường độ nén của bê tông theo thời gian

Tương tự như trên, sự chênh lệch về cường độ nén của ba loại bê tông tiếp tục được quan sát thấy trên kết quả thí nghiệm nén ở 60, 90 và 120 ngày tuổi. Ở 60 ngày tuổi, cường độ nén trung bình

của bê tông đối chứng là 45,1 MPa (tăng khoảng 3 MPa so với 28 ngày), với độ lệch chuẩn là 1,0 MPa và hệ số biến động là 2,2%. Bê tông CP1 có cường độ nén trung bình là 37,8 MPa, độ lệch chuẩn là 1,3 MPa và hệ số biến động là 3,4%. Có thể thấy cường độ nén của bê tông CP1 tăng không nhiều, khoảng 1,1 MPa so với cường độ nén ở 28 ngày. Bê tông CP2 có cường độ nén trung bình là 44,1 MPa, độ lệch chuẩn là 0,8 MPa và hệ số biến động là 1,8%.

Cường độ nén của bê tông tiếp tục tăng khi kiểm tra ở 90 ngày tuổi. Cường độ nén của ba loại bê tông CP0, CP1 và CP2 có các giá trị trung bình lần lượt là 46,2 MPa, 38,9 MPa và 45,2 MPa. Ở 120 ngày tuổi, cường độ nén trung bình của ba loại bê tông tăng lên không đáng kể so với cường độ nén ở 90 ngày. Bê tông đối chứng CP0 có cường độ nén trung bình là 46,6 MPa, độ lệch chuẩn là 0,5 MPa và hệ số biến động là 1,2%. Bê tông CP1 tiếp tục có cường độ nén trung bình nhỏ nhất, là 46,6 MPa, độ lệch chuẩn là 0,5 MPa và hệ số biến động là 1,2%. Trong khi đó, cường độ nén của bê tông CP2 phát triển nhanh hơn so với bê tông đối chứng CP0, đạt giá trị trung bình là 47,2 MPa, độ lệch chuẩn là 1,4 MPa và hệ số biến động là 3%. Do đó, có thể nhận thấy sự phát triển cường độ nén của BTCLTC gần như tương tự với BTCLTN.

Bảng 5. So sánh cường độ nén của ba loại bê tông

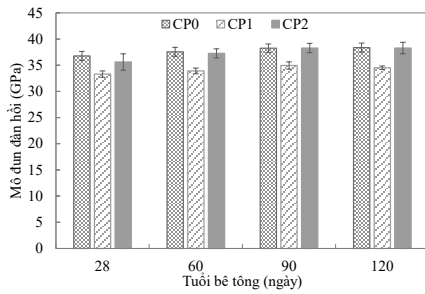
Tỷ số	Tuổi bê tông (ngày)				Trung bình
	28	60	90	120	
R_n^{CP1} / R_n^{CP0}	0,868	0,840	0,842	0,842	0,848
R_n^{CP2} / R_n^{CP0}	0,977	0,979	0,978	1,013	0,987

Bảng 5 trình bày các kết quả tính toán tỷ số cường độ nén giữa bê tông CP1 và bê tông CP0 (ký hiệu R_n^{CP1} / R_n^{CP0}), giữa bê tông CP2 và bê tông CP0 (ký hiệu R_n^{CP2} / R_n^{CP0}), lần lượt ở 28, 60, 90 và 120 ngày tuổi. Tỷ số R_n^{CP1} / R_n^{CP0} có giá trị nằm trong khoảng 0,840 đến 0,868, tương đương mức giảm cường độ nén của bê tông CP1 so với bê tông CP0 thay đổi trong khoảng 13,2% đến 16%, với giá trị trung bình bằng 15,2%. Do đó, có thể kết luận rằng khi sử dụng 70% CLLTC thì cường độ nén của bê tông giảm khoảng 15% so với bê tông đối chứng. Kết quả thực nghiệm này tương đồng với kết quả trình bày trong các nghiên cứu của Silva và cs. [11, 12].

Tỷ số R_n^{CP2} / R_n^{CP0} có giá trị nằm trong khoảng 0,977 đến 1,013 với giá trị trung bình bằng 0,987. Phần lớn kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng cường độ nén của bê tông CP2 thấp hơn bê tông CP0, nhưng với chênh lệch không đáng kể trong khoảng 1,3% đến 2,3%. Thậm chí, ở 120 ngày tuổi, cường độ nén của bê tông CP2 lớn hơn cường độ nén của bê tông đối chứng CP0. Do đó, việc sử dụng GGBFS với tỷ lệ 30% thay thế cho xi măng có tác dụng cải thiện cường độ bê tông, bù lại sự giảm cường độ do CLLTC gây ra. Như vậy, sử dụng kết hợp cốt liệu lớn bê tông tái chế (70%) và xi hạt lò cao nghiền mịn (30%) là phương án tối ưu trong ba cấp phối được sử dụng, vì tỷ lệ sử dụng cốt liệu tái chế đồng thời cải thiện được cường độ nén của BTCLTC.

3.2. Mô đun đàn hồi của bê tông cốt liệu tái chế

Các kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi của bê tông theo thời gian được tổng hợp trong Bảng 6 và thể hiện trên Hình 7. Ở 28 ngày tuổi, mô đun đàn hồi của bê tông đối chứng CP0 đạt giá trị trung bình bằng 36,8 GPa, trong khi bê tông cốt liệu tái chế CP1 và CP2 có các giá trị trung bình lần lượt là 33,3 GPa và 35,6 GPa. Có thể nhận thấy, bê tông CP1 có mô đun đàn hồi thấp nhất và bê tông CP0 có mô đun đàn hồi cao nhất. Sử dụng CLLTC thay thế cho CLLTN làm giảm mô đun đàn hồi của BTCLTC. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu đã được thực hiện trước đây ở trên thế giới. Sự suy giảm mô đun đàn hồi của BTCLTC được giải thích là do cường độ nén nhỏ hơn so với bê tông đối chứng, trong khi đó bề mặt của CLLTC thường có một hàm lượng nhất định vữa cũ, làm giảm cường độ của vùng ITZ, dẫn đến tăng biến dạng của bê tông khi chịu nén.



Hình 7. Mô đun đàn hồi của bê tông theo thời gian

Bảng 6. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi

Bê tông	Mô đun đàn hồi (GPa)			
	28 ngày	60 ngày	90 ngày	120 ngày
CP0	36,8	37,6	38,3	38,4
CP1	33,3	33,9	34,9	34,5
CP2	35,6	37,2	38,2	38,3

Những kết quả mô đun đàn hồi của bê tông ở 60, 90 và 120 ngày cũng thu được nhận xét tương tự như ở 28 ngày. Mô đun đàn hồi tăng rõ rệt khi tuổi của bê tông từ 28 đến 90 ngày. Sau 90 ngày, mô đun đàn hồi gần như thay đổi không đáng kể. Để so sánh mô đun đàn hồi giữa các loại bê tông, Bảng 7 trình bày các kết quả tính toán tỷ số mô đun đàn hồi giữa bê tông CP1 và bê tông CP0 (ký hiệu E_c^{CP1}/E_c^{CP0}) và giữa bê tông CP2 và bê tông CP0 (ký hiệu E_c^{CP2}/E_c^{CP0}). Tỷ số E_c^{CP1}/E_c^{CP0} có thay đổi trong khoảng 0,9 đến 0,914, với giá trị trung bình bằng 0,905. Kết quả này chỉ ra rằng, bê tông CP1 có mô đun đàn hồi giảm khoảng 9,5% so với bê tông đối chứng CP0. Tỷ số E_c^{CP2}/E_c^{CP0} có giá trị trong khoảng 0,969 đến 1,001, với giá trị trung bình bằng 0,99. Kết quả cho thấy, ở tuổi sớm bê tông CP2 có mô đun đàn hồi nhỏ hơn so với bê tông đối chứng CP0. Tuy nhiên, kể từ 90 ngày tuổi, mô đun đàn hồi của bê tông CP2 tương đương với bê tông CP0. Như vậy, có thể nhận thấy BTCLTC sử dụng 70% CLLTC và 30% GGBFS có mô đun đàn hồi tương đương với BTCLTN.

Bảng 7. So sánh mô đun đàn hồi của ba loại bê tông

Tỷ số	Tuổi bê tông (ngày)				Trung bình
	28	60	90	120	
E_c^{CP1}/E_c^{CP0}	0,905	0,903	0,914	0,900	0,905
E_c^{CP2}/E_c^{CP0}	0,969	0,992	1,001	0,998	0,990

Như vậy, kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng sử dụng CLLTC phù hợp với yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 11969:2018 [23] với tỷ lệ thay thế 70% CLLTN (đã tự nhiên) có thể chế tạo bê tông có cường độ nén trung bình lớn hơn 35 MPa ở 28 ngày tuổi, phù hợp để chế tạo cấu kiện có khả năng chịu lực trong kết cấu công trình. Nghiên cứu cũng chỉ ra, GGBFS có thể được sử dụng để thay thế một phần xi măng, với tỷ lệ thay thế trong khoảng 30%, để cải thiện cường độ nén và mô đun đàn hồi của BTCLC, gần như tương đương với BTCLTN.

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày những kết quả thu được từ một chương trình thí nghiệm trên các mẫu bê tông đối chứng và bê tông cốt liệu tái chế sử dụng bê tông có phá vỡ và xỉ hạt lò cao nghiền mịn. Cường độ nén và mô đun đàn hồi của các bê tông sử dụng đã được kiểm tra theo thời gian, lần lượt ở 28, 60, 90 và 120 ngày tuổi. Trong phạm vi nghiên cứu, chỉ cốt liệu lớn tái chế có thành phần 100% bê tông cũ thu gom trong quá trình phá dỡ công trình được sử dụng. Khi sử dụng cốt liệu lớn tái chế thay thế 70% cốt liệu lớn tự nhiên trong thành phần cấp phối, thì cường độ nén giảm đến 15%, mô đun đàn hồi giảm đến 10% so với bê tông đối chứng. Nghiên cứu chỉ ra rằng, khi kết hợp với xỉ hạt lò cao nghiền mịn thay thế cho 30% xi măng, giúp cải thiện cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông cốt liệu

tái chế tương đương với bê tông đối chứng. Việc sử dụng cốt liệu lớn tái chế và xỉ lò cao nghiền mịn không ảnh hưởng đến sự phát triển của cường độ nén và mô đun đàn hồi trong quá trình bê tông đông rắn.

Các loại bê tông cốt liệu tái chế sử dụng trong nghiên cứu này đều đạt được cường độ nén yêu cầu thường dùng cho kết cấu dân dụng và công nghiệp. Tuy nhiên, cần nghiên cứu thêm các tính chất cơ học dài hạn và độ bền vững của bê tông cốt liệu tái chế, để có đánh giá toàn diện hơn khi sử dụng vật liệu bê tông này cho kết cấu công trình.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự giúp đỡ của các thành viên Dự án SATREPS (No. JPMJSA1701) giữa Trường Đại học Xây dựng Hà Nội và Trường Đại học Saitama, Nhật Bản.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Xie T., Gholampour A., Ozbakkaloglu T. (2018). Toward the development of sustainable concretes with recycled concrete aggregates: Comprehensive review of studies on mechanical properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), 04018211.
- [2] Hoang N.H., Ishigaki T., Kubota R., Tong T.K., Nguyen T.T., Nguyen H.G., Yamada M., Kawamoto K. (2020). Waste generation, composition, and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam. *Waste Management*, 117, 32–41.
- [3] Tong T.K., Nguyen N.T., Nguyen H.G., Ishigaki T., Kawamoto K. (2022). Management assessment and future projections of construction and demolition waste generation in Hai Phong City, Vietnam. *Sustainability*, 14, 9628.
- [4] Thai H.N., Nguyen T.D., Nguyen V.T., Nguyen H.G., Kawamoto K. (2022). Characterization of compaction and CBR properties of recycled concrete aggregates for unbound road base and subbase materials in Vietnam. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24, 34–48.
- [5] Nguyen T.L., Nguyen V.T., Nguyen H.G., Matsuno A., Sakanakura H., Kawamoto K. (2022). Mechanical and hydraulic properties of recycled concrete aggregates mixed with clay brick aggregates and particle breakage characteristics for unbound road base and subbase materials in Vietnam. *Sustainability*, 14, 4854.
- [6] TCVN 13694:2023. Cấp phối tái chế từ chất thải rắn xây dựng làm lớp móng đường giao thông đô thị - Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử.
- [7] Quang N.T., Cường T.V., Tân N.N., Tân N.H., Giang N.H. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của tỷ lệ sử dụng cốt liệu lớn tái chế đến sự phát triển cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông theo thời gian. *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng*, 15(1V), 48–59.
- [8] Quang N.T., Cuong T.V., Tan N.N., Tan N.H., Kawamoto K., Giang N.H. (2022). Experimental studies on behaviors of reinforced concrete column structures made of recycled aggregates under concentric loads. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, 16(2), 1–11.
- [9] Nghiem H.T., Tran V.C., Nguyen N.T., Phan Q.M., Nguyen T.D., Kawamoto K., Nguyen H.G. (2024). An empirical study of the behavior of recycled aggregate concrete beams from CDW in Hanoi, Vietnam. *International Journal of Geomeat*, 26(118), 122–132.
- [10] Tam V.W.Y., Kotrayothar D., Xiao J. (2015). Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 100, 262–272.
- [11] Silva R.V., de Brito J., Ravindra D. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217.
- [12] Silva R.V., de Brito J., Ravindra D. (2014). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7), 825–849.
- [13] Nguyen X.H., Phan Q.M., Nguyen N.T., Tran V.Q. (2023). Interpretable machine learning model for evaluating mechanical properties of concrete made with recycled concrete aggregate. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202300614>.
- [14] World Business Council for Sustainable Development (2009). Cement industry energy and CO2 performance: Getting the numbers right. <http://www.wbcsdcement.org>.
- [15] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (2015). Trend in global CO2 emissions: 2015 Report.
- [16] Jalull G., Ganjian E., Sadeghi-Pouya H. (2014). Using ground granulated blast-furnace slag and mineral wastes to reduce cement in paving block. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 167(2), 91–103.
- [17] Viện Vật liệu Xây dựng (2021). Chỉ dẫn kỹ thuật: Sử dụng xỉ hạt lò cao nghiền mịn làm phụ gia khoáng sản xuất cho bê tông.
- [18] Ngo S-H., Nguyen N.T., Nguyen X.H. (2022). Assessing the effect of GGBFS content on mechanical and durability properties of high-strength mortars. *Civil Engineering Journal*, 8(5), 983–950.
- [19] TCVN 2682:2009. Tiêu chuẩn xi măng poóc lăng – Yêu cầu kỹ thuật.
- [20] TCVN 11586:2016. Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa.
- [21] TCVN 7570:2006. Cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật.
- [22] TCVN 7572:2006. Cốt liệu cho bê tông và vữa – Phương pháp thử.
- [23] TCVN 11969:2018. Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông.
- [24] TCVN 4506:2012. Nước trộn bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật.
- [25] Tam V.W.Y., Gao X.F., Tam C.M. (2006). Quality improvement of recycled aggregate concrete. *Key Engineering Materials*, Vol. 302–303, 308–313.
- [26] TCVN 3118:1993. Bê tông nặng – Phương pháp xác định cường độ nén.
- [27] RILEM CPC8 (1994). Modulus of elasticity of concrete in compression. *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*, 25–27.