Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (4V): 124–137

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG CỐT LIỆU TỔNG HỢP SẢN XUẤT TỪ BỘT BÊ TÔNG TÁI CHẾ ĐẾN CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN, CƯỜNG ĐỘ CHỊU UỐN VÀ MÔ ĐUN ĐÀN HỒI CỦA BÊ TÔNG

Trần Viết Cường[a], Nguyễn Trung Hiếu[a], Nguyễn Hoàng Giang[a,*]

[a]*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 04/8/2026, Sửa xong 9/10/2026, Chấp nhận đăng 10/10/2026

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng cốt liệu tổng hợp (CLTH) sản xuất từ bột bê tông tái chế đến mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn của bê tông. Năm cấp phối bê tông được chế tạo với tỷ lệ thay thế cốt liệu lớn tự nhiên bằng CLTH lần lượt là 0%, 25%, 50%, 75% và 100%. Các thí nghiệm xác định cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn được thực hiện ở tuổi 28 ngày. Kết quả cho thấy khi hàm lượng CLTH tăng, cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của bê tông có xu hướng giảm; trong đó mô đun đàn hồi là chỉ tiêu chịu ảnh hưởng rõ rệt hơn. Cường độ chịu uốn cũng giảm theo hàm lượng CLTH nhưng mức suy giảm nhỏ hơn so với mô đun đàn hồi, đặc biệt ở các tỷ lệ thay thế 25% và 50%. Trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm, các mối tương quan giữa cường độ chịu uốn, mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén được đánh giá và đề xuất công thức dự báo có xét đến tỷ lệ thay thế CLTH.

Từ khoá: cốt liệu tổng hợp; bột bê tông tái chế; bê tông tái chế; mô đun đàn hồi; cường độ chịu uốn.

STUDY ON THE EFFECT OF SYNTHETIC AGGREGATE CONTENT PRODUCED FROM RECYCLED CONCRETE POWDER ON THE COMPRESSIVE STRENGTH, FLEXURAL STRENGTH, AND ELASTIC MODULUS OF CONCRETE

Abstract

This paper presents an experimental investigation into the effects of synthetic aggregate (SA) produced from recycled concrete powder on the elastic modulus and flexural strength of concrete. Five concrete mixtures were prepared with SA replacing natural coarse aggregate at replacement ratios of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. The compressive strength, elastic modulus, and flexural strength of the concrete mixtures were determined at 28 days. The experimental results indicate that increasing the SA content led to a reduction in both compressive strength and elastic modulus compared with the reference concrete. Among these properties, the elastic modulus was more significantly affected, reflecting the differences in stiffness, porous structure, and deformation capacity of SA. The flexural strength also decreased with increasing SA content, but the reduction was less pronounced than that of the elastic modulus, particularly at replacement ratios of 25% and 50%. Based on the experimental data, correlations between flexural strength, elastic modulus, and compressive strength were evaluated, and prediction models incorporating the SA replacement ratio were proposed.

Keywords: synthetic aggregate; recycled concrete powder; recycled concrete; elastic modulus; flexural strength.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(4V)-10 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Quá trình đô thị hóa và cải tạo, phá dỡ công trình tại Việt Nam tạo ra lượng lớn chất thải rắn xây dựng (CTRXD). Trong dòng vật liệu này, phần bê tông thải sau nghiền sàng có thể được tái sử dụng dưới dạng cốt liệu tái chế; tuy nhiên, phần hạt mịn và bột bê tông tái chế thường khó sử dụng trực tiếp trong bê tông kết cấu do có độ hút nước lớn, thành phần không đồng nhất và chất lượng biến

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* giangnh@huce.edu.vn (Giang, N. H.)

động [1–3]. Nếu không được tận dụng, nhóm vật liệu dạng bột này tiếp tục trở thành nguồn thải gây áp lực cho bãi chôn lấp và môi trường không khí [1, 4].

Một hướng tiếp cận có tiềm năng là sử dụng bột bê tông tái chế làm nguyên liệu sản xuất CLTH bằng công nghệ vê viên và đóng rắn tự nhiên. Công nghệ này cho phép chuyển hóa vật liệu dạng bột thành cốt liệu có kích thước phù hợp để thay thế một phần hoặc toàn bộ cốt liệu lớn tự nhiên trong bê tông [4–7]. So với việc dùng trực tiếp bột tái chế như phụ gia khoáng hoặc vật liệu thay thế xi măng, phương án sản xuất CLTH có ưu điểm là tận dụng được lượng bột lớn hơn, đồng thời tạo ra sản phẩm có hình dạng và kích thước ổn định hơn cho chế tạo bê tông [1, 3, 4].

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng việc sử dụng cốt liệu tái chế hoặc cốt liệu nhân tạo có thể làm thay đổi các đặc trưng cơ học của bê tông, đặc biệt là mô đun đàn hồi, cường độ kéo/uốn và biến dạng [2, 8–11]. Đối với bê tông sử dụng CLTH từ bột bê tông tái chế, ngoài cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn là hai chỉ tiêu cần được quan tâm khi đánh giá khả năng ứng dụng trong cấu kiện chịu uốn hoặc cấu kiện có yêu cầu khống chế độ võng [4, 12]. Các công thức dự báo thông thường chủ yếu liên hệ mô đun đàn hồi hoặc cường độ chịu uốn với cường độ chịu nén, trong khi chưa xét trực tiếp ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế CLTH [13, 14].

Gần đây, nhiều nghiên cứu về bê tông sử dụng cốt liệu tái chế cho thấy mô đun đàn hồi thường suy giảm rõ rệt hơn cường độ chịu nén do cốt liệu tái chế có vữa cũ bám dính, độ rỗng lớn và vùng chuyển tiếp yếu hơn bê tông thường [15–17]. Các nghiên cứu ở cấp độ cấu kiện cũng cho thấy độ cứng, tải trọng nứt và độ võng của dầm bê tông cốt thép có thể bị ảnh hưởng đáng kể khi dùng cốt liệu tái chế hoặc cốt liệu nhân tạo, mặc dù khả năng chịu uốn giới hạn có thể thay đổi không lớn [12, 18–20]. Vì vậy, việc đánh giá riêng mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn ở cấp độ vật liệu là cần thiết để phục vụ thiết kế và kiểm soát trạng thái giới hạn sử dụng của cấu kiện.

Một phần hình ảnh và dữ liệu vật liệu về CLTH trong nghiên cứu này kế thừa từ công bố trước về đặc trưng cơ lý của CLTH [4], trong khi một số thông số cường độ bê tông đã từng được sử dụng như dữ liệu đầu vào trong nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép [12]. Khác với các công bố đó, bài báo này tập trung vào phân tích cấp độ vật liệu, xây dựng và đánh giá các công thức bán thực nghiệm dự báo mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn của bê tông có xét đến tỷ lệ thay thế CLTH.

Mục tiêu của bài báo là đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng CLTH sản xuất từ bột bê tông tái chế đến cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn của bê tông. Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, các công thức dự báo mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn có xét đến tỷ lệ thay thế CLTH được đề xuất. Phạm vi áp dụng của các công thức được giới hạn cho loại vật liệu, cấp phối và tuổi thí nghiệm trong nghiên cứu này; các vấn đề về độ bền lâu, co ngót, từ biến và làm việc dài hạn chưa được xem xét trong bài báo.

2. Vật liệu và chương trình thực nghiệm

2.1. Vật liệu sử dụng

Vật liệu sử dụng bao gồm xi măng PC40 Bút Sơn, cát vàng sông Lô, đá dăm tự nhiên có kích thước lớn nhất D_{max} = 20 mm, nước trộn và phụ gia siêu dẻo giảm nước. Xi măng sử dụng có khối lượng riêng khoảng 3,1 g/cm^3 và đáp ứng yêu cầu của TCVN 2682:2009 [21]. Cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn tự nhiên đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của TCVN 7570:2006 [22]. Phụ gia sử dụng trong nghiên cứu là Sikament® NN. Sản phẩm có gốc hóa học Naphtalen Formaldehyt Sulfonat, dạng chất lỏng màu nâu đậm, khối lượng thể tích 1,19–1,22 kg/lít, phù hợp tiêu chuẩn ASTM C494 [23] Loại F. Liều lượng sử dụng trong nghiên cứu là 1,72 lít/m^3 bê tông.

CLTH được sản xuất từ bột bê tông tái chế thu được trong quá trình xử lý CTRXD (Hình 1). Hỗn hợp nguyên liệu gồm bột bê tông tái chế và xi măng làm chất kết dính, được vê viên bằng thiết bị dạng đĩa và bảo dưỡng trong điều kiện tự nhiên; quy trình này kế thừa kết quả chế tạo CLTH đã được

công bố trước đó [4]. Sau khi đóng rắn, CLTH được sàng thành hai nhóm kích thước 5–10 mm và 10–20 mm để thay thế tương ứng cho đá dăm tự nhiên trong cấp phối bê tông. Một số chỉ tiêu cơ lý chính của CLTH được trình bày trong Bảng 1, xác định theo TCVN 7572:2006 [24] và đối chiếu với yêu cầu của TCVN 11969:2018 [25].



(a) CLTH sử dụng có kích thước hạt 10–20 mm (b) CLTH có kích thước hạt 5–10 mm

Hình 1. CLTH có kích thước hạt 5–20 mm trong nghiên cứu [4]

Bảng 1. Một số tính chất cơ lý của CLTH sử dụng trong nghiên cứu [4]

Chỉ tiêu	CLTH 5–10 mm	CLTH 10–20 mm
Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,55	2,45
Khối lượng thể tích khô (g/cm^3)	1,90	1,85
Khối lượng thể tích bão hòa (g/cm^3)	2,15	2,10
Độ hút nước (%)	13,2	13,2
Độ nén dập (%)	19,2	27,9
Hao mòn Los Angeles (%)	23,0	33,0

2.2. Thành phần cấp phối bê tông

Năm cấp phối bê tông được thiết kế với cùng tỷ lệ nước/xi măng (N/X) = 0,48. CLTH được sử dụng để thay thế cốt liệu lớn tự nhiên theo khối lượng với các tỷ lệ 0%, 25%, 50%, 75% và 100%. Các cấp phối được ký hiệu lần lượt là CP0, CP25, CP50, CP75 và CP100. Thành phần vật liệu cho 1 m^3 bê tông được trình bày trong Bảng 2.

Trước khi trộn, CLTH được tạo ẩm để hạn chế hiện tượng hút nước mạnh trong quá trình trộn và làm giảm biến động độ sụt của hỗn hợp bê tông. Cách xử lý này phù hợp với đặc trưng độ hút nước cao của cốt liệu tái chế và cốt liệu nhân tạo đã được chỉ ra trong các nghiên cứu trước [2, 5, 9]. Các mẫu thử sau khi đúc được bảo dưỡng trong điều kiện phòng thí nghiệm đến tuổi thí nghiệm 28 ngày.

2.3. Phương pháp thí nghiệm

Cường độ chịu nén được xác định trên mẫu bê tông ở tuổi 28 ngày theo nguyên tắc thí nghiệm nén mẫu bê tông theo ASTM C39/C39M-26 [26], Hình 2 cho thấy mẫu trước và sau khi nén. Với mỗi cấp phối, giá trị cường độ chịu nén trung bình được xác định từ ba mẫu đại diện. Kết quả cường độ chịu nén được sử dụng làm cơ sở để phân tích quan hệ với mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn.

Mô đun đàn hồi được xác định từ quan hệ ứng suất – biến dạng khi nén mẫu trụ, với biến dạng được ghi bằng cảm biến và bộ thu thập số liệu TDS-530 (Hình 3). Mỗi cấp phối có ba giá trị đo. ASTM C469/C469M-22 [27] được sử dụng làm tiêu chuẩn hiện hành để đối chiếu phương pháp xác định mô đun đàn hồi tĩnh trên mẫu trụ. Mô đun đàn hồi trung bình của mỗi cấp phối được xác định từ ba mẫu thử.

Bảng 2. Thành phần vật liệu cho 1 m^3 bê tông [4, 12]

Thành phần	CP0	CP25	CP50	CP75	CP100
Xi măng (kg)	344	344	344	344	344
Nước (kg)	165	165	165	165	165
Cát (kg)	751	751	751	751	751
Đá dăm 5–10 mm (kg)	570	427	285	142	–
Đá dăm 10–20 mm (kg)	466	350	233	117	–
CLTH 5–10 mm (kg)	–	142	285	427	570
CLTH 10–20 mm (kg)	–	117	233	350	466
Phụ gia (lít)	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72



(a) Thí nghiệm nén mẫu (b) Hình ảnh phá hoại mẫu thử

Hình 2. Nén mẫu bê tông CLTH trong phòng thí nghiệm

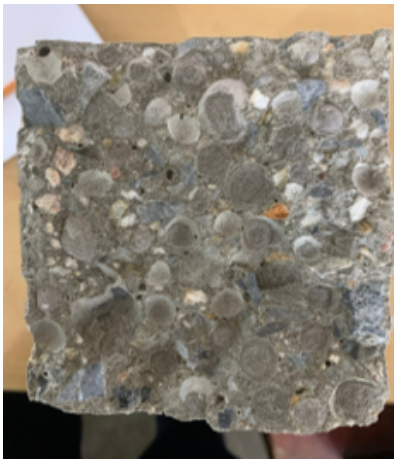


Hình 3. Thí nghiệm đo mô đun đàn hồi mẫu bê tông CLTH

Cường độ chịu uốn được xác định trên mẫu lăng trụ kích thước 100 × 100 × 400 mm ở tuổi 28 ngày theo sơ đồ thí nghiệm uốn được trình bày phù hợp với nguyên tắc của ASTM C78 [28] (Hình 4). Với mỗi cấp phối, ba mẫu được thí nghiệm và giá trị trung bình được sử dụng để phân tích.



(a) Lắp đặt thí nghiệm uốn mẫu



(b) Hình ảnh phá hoại mẫu

Hình 4. Thí nghiệm xác định cường độ chịu uốn trong phòng thí nghiệm

2.4. Phương pháp xây dựng công thức dự báo

Hai công thức dự báo được xây dựng theo phương pháp hồi quy phi tuyến trên bộ dữ liệu trung bình của năm cấp phối. Đối với mô đun đàn hồi, dạng hàm cơ sở được chọn từ quan hệ thông dụng giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của bê tông, sau đó bổ sung hệ số hiệu chỉnh phụ thuộc tỷ lệ thay thế CLTH. Đối với cường độ chịu uốn, dạng hàm được xây dựng tương tự trên cơ sở quan hệ giữa cường độ chịu uốn và cường độ chịu nén. Các hệ số trong công thức được xác định bằng phương pháp bình phương tối thiểu, với hàm mục tiêu là cực tiểu hóa tổng bình phương sai lệch giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự báo.

Sai số tương đối của từng cấp phối được xác định theo công thức (1):

$$\delta_i = \frac{X_{\text{dự báo},i} - X_{\text{thực nghiệm},i}}{X_{\text{thực nghiệm},i}} \times 100\% \tag{1}$$

trong đó X là đại lượng cần dự báo, gồm mô đun đàn hồi E_c hoặc cường độ chịu uốn f_r. Bộ dữ liệu sử dụng để hiệu chỉnh và đánh giá công thức là cùng một bộ dữ liệu gồm năm cấp phối, do đó các công thức đề xuất chỉ nên được xem là công thức bán thực nghiệm trong phạm vi nghiên cứu. Việc kiểm chứng bằng bộ dữ liệu độc lập và dữ liệu từ các loại CLTH khác cần được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

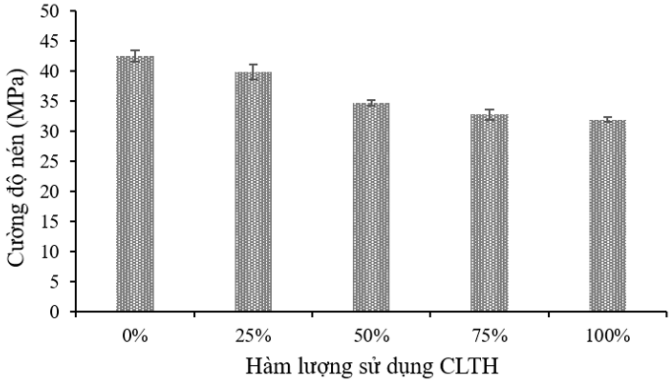
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng CLTH đến cường độ chịu nén

Kết quả cường độ chịu nén của các cấp phối bê tông sử dụng CLTH được trình bày ở Hình 5 và Bảng 3. Bê tông đối chứng CP0 đạt cường độ chịu nén trung bình 42,41 MPa. Khi thay thế cốt liệu lớn tự nhiên bằng CLTH, cường độ chịu nén có xu hướng giảm xuống trong khoảng 31,92–39,82 MPa tùy theo tỷ lệ thay thế. So với CP0, các cấp phối sử dụng 25%, 50%, 75% và 100% CLTH giảm tương ứng 6,10%; 18,32%; 22,78% và 24,74%. Độ lệch chuẩn dao động từ 0,34 đến 1,18 MPa đối với các tổ ba mẫu. Mức giảm không tuyến tính theo tỷ lệ thay thế: chênh lệch từ CP25 đến CP50 lớn hơn chênh lệch từ CP75 đến CP100.

Sự suy giảm này có thể được giải thích bởi đặc trưng của CLTH: khối lượng thể tích thấp hơn, độ hút nước lớn hơn và cường độ bản thân hạt thấp hơn so với đá dăm tự nhiên [4, 5, 9]. Khi tỷ lệ CLTH

tăng, vùng vật liệu có độ rỗng cao trong bê tông tăng lên, làm giảm khả năng chịu nén của nền bê tông. Tuy nhiên, các cấp phối sử dụng CLTH vẫn đạt mức cường độ của bê tông thông thường trong phạm vi 25–40 MPa, phù hợp với định hướng ứng dụng trong các cấu kiện bê tông cốt thép thông dụng nếu kiểm soát tốt yêu cầu biến dạng [4, 12].



Hình 5. Cường độ chịu nén của bê tông theo hàm lượng sử dụng CLTH

Bảng 3. Cường độ chịu nén trung bình của bê tông ở tuổi 28 ngày

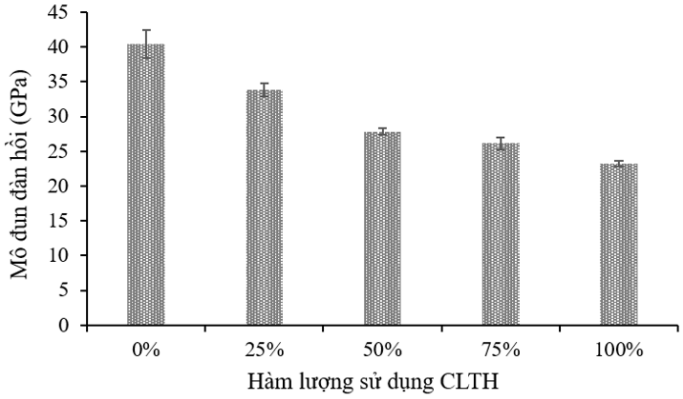
Cấp phối	Mẫu	$P_{\text{phá hủy}}$ (kN)	f_{cm} (MPa)	f_{cm} trung bình (MPa)	Độ lệch chuẩn s (MPa)
CP0	1	761,1	43,07	42,41	0,94
	2	756,9	42,83		
	3	730,4	41,33		
CP25	1	718,3	40,65	39,82	1,18
	2	713,1	40,35		
	3	679,8	38,47		
CP50	1	602,7	34,11	34,64	0,47
	2	615,1	34,81		
	3	618,6	35,01		
CP75	1	566,5	32,06	32,75	0,87
	2	596,0	33,73		
	3	573,8	32,47		
CP100	1	565,4	32,00	31,92	0,34
	2	569,2	32,21		
	3	557,5	31,55		

3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng CLTH đến mô đun đàn hồi

Bảng 4 và Hình 6 trình bày mô đun đàn hồi (E_c) của các cấp phối bê tông. Mô đun đàn hồi của bê tông đối chứng CP0 đạt 40,47 GPa. Khi hàm lượng CLTH tăng, mô đun đàn hồi giảm rõ rệt, mô đun đàn hồi trung bình của CP25, CP50, CP75 và CP100, lần lượt là 33,80; 27,83; 26,13 và 23,17 GPa. Tỷ số $E_{\text{CP-x}}/E_{\text{CP0}}$ tương ứng là 1,00; 0,84; 0,69; 0,65 và 0,57. Như vậy, thay thế 25%, 50%, 75% và 100% cốt liệu lớn tự nhiên bằng CLTH làm mô đun đàn hồi giảm lần lượt 16,47%; 31,22%; 35,42% và 42,75%.

Bảng 4. Mô đun đàn hồi trung bình của bê tông ở tuổi 28 ngày

Cấp phối	Mẫu	Mô đun đàn hồi E (GPa)	$E_{c,tb}$ (GPa)	Độ lệch chuẩn s (GPa)	Tỷ lệ $E_{CP\text{-}x}/E_{CP0}$
CP0	1	38,5	40,47	2,00	1
	2	42,5			
	3	40,4			
CP25	1	34,8	33,80	0,95	0,84
	2	32,9			
	3	33,7			
CP50	1	27,3	27,83	0,50	0,69
	2	28,3			
	3	27,9			
CP75	1	27,1	26,13	0,91	0,65
	2	25,3			
	3	26,0			
CP100	1	22,8	23,17	0,40	0,57
	2	23,6			
	3	23,1			



Hình 6. Mô đun đàn hồi của bê tông theo hàm lượng sử dụng CLTH

Nguyên nhân chính của sự suy giảm mô đun đàn hồi là do CLTH có cấu trúc rỗng hơn và khả năng biến dạng lớn hơn so với đá tự nhiên [4, 5, 9]. Khi cốt liệu trong bê tông có độ cứng thấp hơn, biến dạng tổng thể của mẫu bê tông dưới cùng mức ứng suất tăng lên, dẫn đến mô đun đàn hồi thấp hơn. Xu hướng mô đun đàn hồi giảm mạnh hơn cường độ chịu nén cũng phù hợp với các nghiên cứu về bê tông sử dụng cốt liệu tái chế và cốt liệu nhân tạo [2, 8, 10, 11].

3.3. Quan hệ dự báo mô đun đàn hồi của BTCLTH

Trong các công thức dự báo truyền thống, mô đun đàn hồi thường được biểu diễn theo cường độ chịu nén của bê tông [13, 14]. Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm ở trên cho thấy với bê tông sử dụng CLTH, cùng một mức cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi còn chịu ảnh hưởng đáng kể của tỷ lệ thay thế CLTH. Vì vậy, việc đưa thêm biến r vào quan hệ dự báo là cần thiết để phản ánh ảnh hưởng của CLTH đến độ cứng vật liệu [4, 12].

Quan hệ thực nghiệm giữa mô đun đàn hồi, cường độ chịu nén và tỷ lệ thay thế CLTH được đề xuất theo công thức (2) như sau:

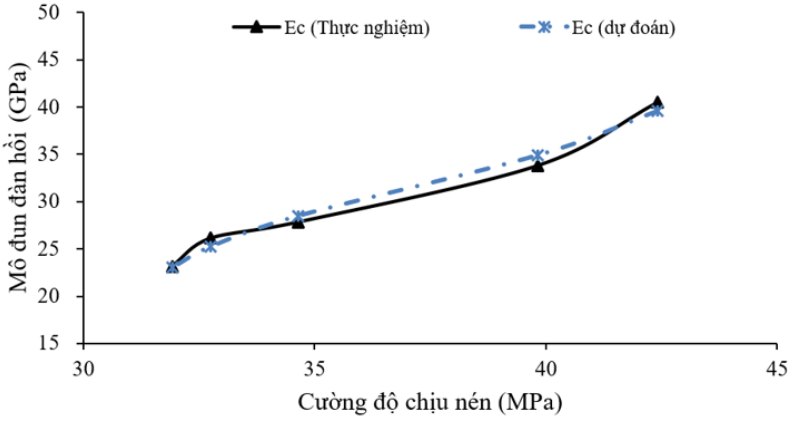
$$E_c = 0{,}94082 \cdot (1 - 0{,}06231r)^4 \cdot f_{cm}^{0{,}99799} \tag{2}$$

trong đó E_c là mô đun đàn hồi của bê tông (GPa); f_{cm} là cường độ chịu nén trung bình (MPa); r là tỷ lệ thay thế CLTH theo khối lượng, lấy bằng 0; 0,25; 0,50; 0,75 và 1,00.

Kết quả so sánh giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự báo được trình bày trong Bảng 5 và Hình 7 cho thấy sai số tương đối có dấu nằm trong khoảng −3,32% đến +3,33% cho thấy độ tin cậy cao (< 5%), sai lệch tuyệt đối trung bình MAPE bằng 2,34% và R^2 bằng 0,983. Mô hình không chỉ thể hiện phù hợp xu hướng suy giảm mô đun đàn hồi khi tăng tỷ lệ thay thế CLTH trong hỗn hợp bê tông, mà còn phản ánh hợp lý mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và độ cứng của vật liệu. Vì vậy, công thức trên có thể được xem xét sử dụng như một công cụ dự báo hiệu quả phục vụ thiết kế cấp phối bê tông có sử dụng CLTH với các tỷ lệ thay thế khác nhau.

Bảng 5. So sánh mô đun đàn hồi thực nghiệm và mô đun đàn hồi dự báo

Cấp phối	f_{cm} (MPa)	E_c thực nghiệm (GPa)	E_c dự báo (GPa)	Sai số (%)
CP0	42,41	40,47	39,60	−2,14
CP25	39,82	33,80	34,93	+3,33
CP50	34,64	27,83	28,51	+2,43
CP75	32,75	26,13	25,27	−3,32
CP100	31,92	23,17	23,05	−0,48

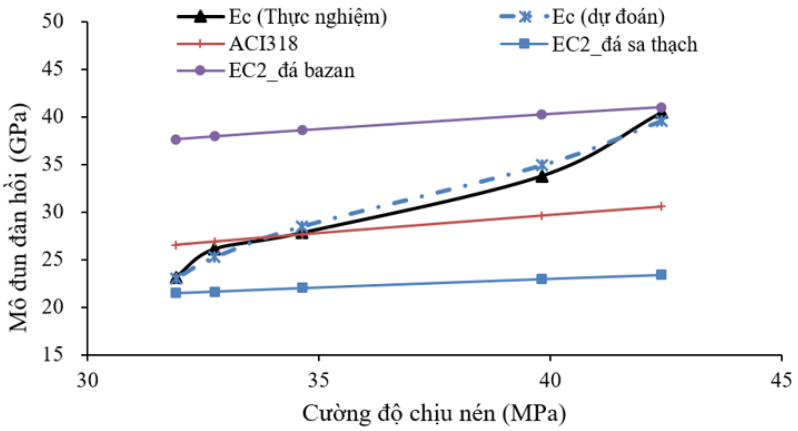


Hình 7. Mối quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của BTCLTH từ thực nghiệm và tính toán

Các mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi chịu ảnh hưởng bởi các loại cốt liệu khác nhau và thể hiện trong Hình 8. Một số công thức (3) và (4) được nghiên cứu trên thế giới đã được sử dụng để đối chứng như:

$$\text{EC2 [14]: } E_c = 22\left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0{,}3} \text{ (GPa); CLTN} \tag{3}$$

$$\text{ACI 318 [13]: } E_c = 4{,}7\sqrt{f_{cm}} \text{ (GPa); CLTN} \tag{4}$$



Hình 8. Mối quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của các nghiên cứu

Hình 8 cho thấy mô đun đàn hồi của bê tông có xu hướng tăng khi cường độ chịu nén tăng, phù hợp với quy luật chung của bê tông xi măng. Tuy nhiên, khi so sánh với các mô hình dự báo theo ACI 318 và EC2, có thể thấy sự sai khác khá rõ giữa bê tông sử dụng CLTH và các quan hệ được xây dựng cho bê tông thông thường. Công thức ACI 318 cho giá trị mô đun đàn hồi thấp hơn đáng kể so với bê tông đối chứng CP0 và một số cấp phối có hàm lượng CLTH thấp, nhưng lại tiệm cận hơn với kết quả thực nghiệm khi hàm lượng CLTH tăng. Điều này cho thấy công thức ACI 318 có thể phản ánh tương đối xu hướng suy giảm độ cứng khi bê tông sử dụng loại cốt liệu có độ cứng thấp hơn, nhưng chưa xét trực tiếp ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế CLTH.

Các đường dự báo theo EC2 thể hiện ảnh hưởng rõ của loại cốt liệu đến mô đun đàn hồi. Đường EC2 ứng với loại cốt liệu có hệ số hiệu chỉnh cao cho kết quả lớn hơn đáng kể so với số liệu thực nghiệm của BTCLTH, trong khi đường ứng với loại cốt liệu có hệ số hiệu chỉnh thấp lại cho giá trị thấp hơn. Kết quả này cho thấy CLTH sản xuất từ bột bê tông tái chế không thể được xem tương đương trực tiếp với các loại đá tự nhiên thông dụng trong EC2. Nguyên nhân là CLTH có cấu trúc rỗng, độ hút nước lớn và độ cứng hạt thấp hơn so với đá dăm tự nhiên, làm tăng biến dạng của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén.

So với ACI 318 và EC2, công thức đề xuất trong nghiên cứu này bám sát hơn các điểm thực nghiệm do có xét đồng thời cường độ chịu nén và tỷ lệ thay thế CLTH. Vì vậy, việc đưa tham số hàm lượng CLTH vào mô hình dự báo là cần thiết để mô tả hợp lý hơn sự thay đổi mô đun đàn hồi của BTCLTH trong phạm vi vật liệu và cấp phối khảo sát.

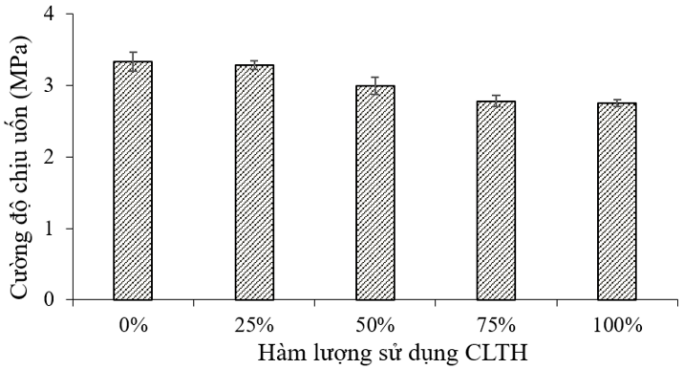
3.4. Ảnh hưởng của hàm lượng CLTH đến cường độ chịu uốn

Bảng 6 và Hình 9 trình bày cường độ chịu uốn được tính lại với nhịp 300 mm. Giá trị trung bình của CP0, CP25, CP50, CP75 và CP100 lần lượt là 3,33; 3,29; 2,99; 2,78 và 2,75 MPa. Độ lệch chuẩn tương ứng là 0,13; 0,06; 0,12; 0,08 và 0,05 MPa. Các trị số này là cường độ trên mẫu thử đã nêu ở mục 2.3, không phải giá trị quy đổi về mẫu chuẩn TCVN.

So với CP0, cường độ chịu uốn giảm lần lượt 1,20%; 10,23%; 16,39% và 17,44% ở các tỷ lệ thay thế 25%, 50%, 75% và 100%. Tại CP100, mức giảm cường độ chịu uốn 17,44% vẫn nhỏ hơn mức giảm cường độ nén 24,74% và mô đun đàn hồi 42,75%. Chênh lệch trung bình rất nhỏ giữa CP0 và CP25 chưa đủ để khẳng định sự khác biệt có ý nghĩa thống kê với mỗi nhóm chỉ có ba mẫu. Kết quả này cho thấy mặc dù CLTH làm giảm độ cứng của bê tông, khả năng kháng nứt khi uốn của vật liệu vẫn được duy trì ở mức tương đối tốt, đặc biệt khi tỷ lệ thay thế không vượt quá 50%.

Bảng 6. Cường độ chịu uốn trung bình của bê tông ở tuổi 28 ngày

Cấp phối	Mẫu	P (kN)	f_r (MPa)	f_r^{tb} (MPa)	Độ lệch chuẩn s (MPa)
CP0	1	10,65	3,20	3,33	0,13
	2	11,10	3,33		
	3	11,50	3,45		
CP25	1	10,75	3,23	3,29	0,06
	2	11,15	3,35		
	3	10,95	3,29		
CP50	1	10,40	3,12	2,99	0,12
	2	9,80	2,94		
	3	9,65	2,90		
CP75	1	9,50	2,85	2,78	0,08
	2	9,00	2,70		
	3	9,30	2,79		
CP100	1	9,15	2,75	2,75	0,05
	2	9,30	2,79		
	3	9,00	2,70		



Hình 9. Cường độ chịu uốn của bê tông theo hàm lượng sử dụng CLTH

Sự suy giảm cường độ chịu uốn có thể liên quan đến độ rỗng và cường độ hạt của CLTH [4, 5, 9]. Tuy nhiên, hình dạng hạt tương đối tròn, sự phân bố kích thước phù hợp và quá trình tạo ẩm trước khi trộn có thể góp phần cải thiện điều kiện tiếp xúc giữa CLTH và hồ xi măng, từ đó hạn chế mức suy giảm cường độ chịu uốn [4].

3.5. Quan hệ dự báo cường độ chịu uốn của BTCLTH

Cường độ chịu uốn thường được liên hệ với cường độ chịu nén của bê tông trong các quan hệ thực nghiệm và tiêu chuẩn thiết kế [13, 14]. Tuy nhiên, tương tự mô đun đàn hồi, đối với BTCLTH cần xét thêm ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế CLTH. Từ kết quả thực nghiệm, quan hệ dự báo cường độ chịu uốn được đề xuất theo công thức (5) như sau:

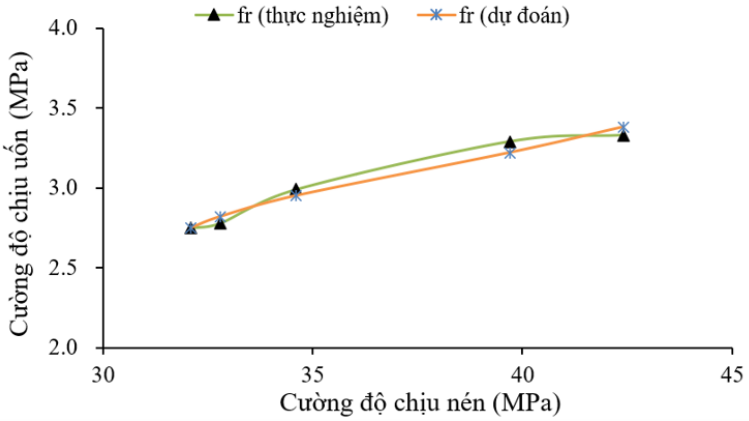
$$f_r = 0{,}42579 \cdot (1 - 0{,}04755r) \cdot f_{cm}^{0{,}55261} \tag{5}$$

trong đó f_r là cường độ chịu uốn của bê tông (MPa); f_{cm} là cường độ chịu nén trung bình (MPa); r là tỷ lệ thay thế CLTH theo khối lượng.

Bảng 7 và Hình 10 thể hiện sự phù hợp giữa kết quả thực nghiệm và kết quả dự báo. Sai số tương đối giữa giá trị dự báo và kết quả thực nghiệm có dấu từ −1,89% đến +1,57%, cho thấy công thức đề xuất có độ chính xác và độ tin cậy cao. Đặc biệt, khi tỷ lệ sử dụng CLTH từ 50% trở lên, sai số giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự báo có xu hướng tiến gần về 0. Bên cạnh đó, hệ số xác định (R^2 = 0,967) giữa cường độ chịu uốn thực nghiệm và cường độ chịu uốn dự báo cho thấy mô hình có khả năng mô tả tốt mối quan hệ giữa các đại lượng. Vì vậy, công thức đề xuất có thể được xem là công cụ dự báo đáng tin cậy, phù hợp để xác định cường độ chịu uốn của bê tông sử dụng CLTH trong phạm vi nghiên cứu.

Bảng 7. So sánh cường độ chịu uốn thực nghiệm và cường độ chịu uốn dự báo

Cấp phối	f_{cm} (MPa)	f_r thực nghiệm (MPa)	f_r dự báo (MPa)	Sai số (%)
CP0	42,41	3,33	3,38	+1,57
CP25	39,82	3,29	3,22	−1,89
CP50	34,64	2,99	2,95	−1,24
CP75	32,75	2,78	2,82	+1,56
CP100	31,92	2,75	2,75	+0,15



Hình 10. Mối quan hệ giữa cường độ chịu uốn và cường độ chịu nén của BTCLTH từ thực nghiệm và tính toán

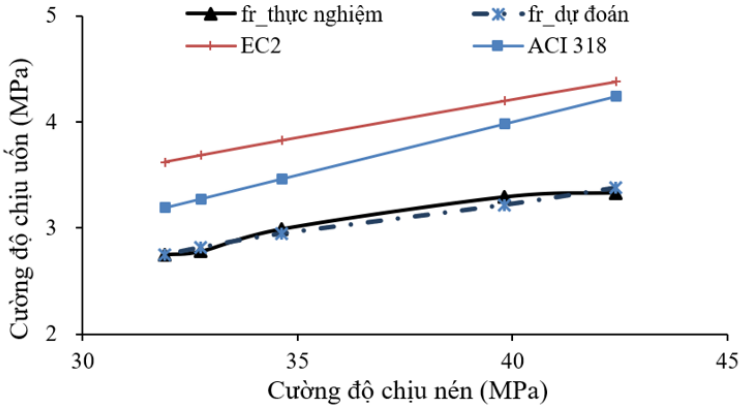
Các giá trị cường độ chịu uốn thực tế đã được so sánh với các giá trị giới hạn trên và dưới dự đoán thu được từ các công thức (6) và (7) do tiêu chuẩn ACI 318 đề xuất, công thức (3.14) theo EC2 và được thể hiện trên Hình 11.

$$\text{EC2 [14]: } f_r = 0{,}36 f_{cm}^{2/3} \tag{6}$$

$$\text{ACI 318 [13]: } f_r = (10\% \sim 15\%) f_{cm} \tag{7}$$

trong đó: f_r, f_{cm} là cường chịu uốn (MPa) và cường độ chịu nén (MPa).

Hình 11 cho thấy cường độ chịu uốn có xu hướng tăng theo cường độ chịu nén, phù hợp với quy luật chung của bê tông xi măng. Tuy nhiên, đối với BTCLTH, quan hệ này không chỉ phụ thuộc vào f_{cm} mà còn chịu ảnh hưởng của hàm lượng CLTH trong cấp phối. Khi tỷ lệ thay thế CLTH tăng, cả cường độ chịu nén và cường độ chịu uốn đều giảm, nhưng mức độ suy giảm của cường độ chịu uốn nhỏ hơn. Điều này cho thấy sự thay đổi của khả năng kháng uốn không hoàn toàn tỷ lệ thuận với sự thay đổi của cường độ chịu nén.



Hình 11. Mối quan hệ giữa cường độ chịu uốn và cường độ chịu nén

Các số đo sau hiệu chỉnh đều thấp hơn các đường đối chiếu ACI 318 và EC2 trong Hình 11. Sai khác này cần được xem xét cùng ảnh hưởng loại cốt liệu, kích thước mẫu và giả định chuẩn hóa cường độ nén; không dùng các đường đối chiếu như tiêu chí chấp nhận chất lượng cho bê tông CLTH.

Đường dự báo đề xuất trong nghiên cứu này bám sát xu hướng của các điểm thực nghiệm hơn do có xét đồng thời cường độ chịu nén và tỷ lệ thay thế CLTH. Về bản chất, tham số r đóng vai trò hiệu chỉnh mức suy giảm khả năng chịu uốn do sự thay đổi loại cốt liệu, đặc biệt là ảnh hưởng của độ rỗng, độ hút nước và cường độ hạt của CLTH. Vì vậy, công thức đề xuất nên được xem là công thức bán thực nghiệm phù hợp cho loại CLTH, cấp phối bê tông và khoảng cường độ khảo sát trong nghiên cứu này, thay vì một quan hệ tổng quát áp dụng cho mọi loại bê tông cốt liệu tái chế.

3.6. Đánh giá tỷ lệ thay thế CLTH phù hợp

Từ các kết quả trên, có thể nhận thấy tỷ lệ thay thế 25–50% CLTH là vùng phù hợp hơn nếu xét đồng thời cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn. Ở các cấp phối CP25 và CP50, cường độ chịu uốn chỉ giảm nhẹ hoặc ở mức có thể kiểm soát, trong khi mô đun đàn hồi tuy giảm nhưng chưa quá lớn so với trường hợp thay thế toàn bộ. Nhận xét này thống nhất với kết quả nghiên cứu cấu kiện dầm BTCT dùng CLTH, trong đó tỷ lệ thay thế đến 50% cho thấy khả năng làm việc gần với dầm đối chứng hơn so với các tỷ lệ cao hơn [12].

Khi tỷ lệ thay thế tăng đến 75–100%, bê tông vẫn đạt cường độ chịu nén thuộc vùng bê tông kết cấu thông thường, nhưng mô đun đàn hồi giảm rõ rệt. Do đó, với các cấu kiện sử dụng tỷ lệ CLTH cao, cần kiểm tra kỹ hơn các trạng thái giới hạn sử dụng như độ võng, bề rộng vết nứt và biến dạng dài hạn. Điều này đặc biệt quan trọng đối với dầm, sàn và các cấu kiện chịu uốn, phù hợp với xu hướng quan sát được trong thí nghiệm dầm BTCT sử dụng CLTH [12].

4. Kết luận

Nghiên cứu đánh giá năm cấp phối bê tông có N/X = 0,48 ở tuổi 28 ngày, với CLTH thay thế 0–100% cốt liệu lớn tự nhiên theo khối lượng. Từ kết quả đã rà soát về cách tính và thống kê, các kết luận trong phạm vi vật liệu và chương trình thí nghiệm được rút ra như sau:

1. CLTH sản xuất từ bột bê tông tái chế có thể được sử dụng để thay thế cốt liệu lớn tự nhiên trong chế tạo bê tông. Cường độ nén trung bình của CP0 là 42,41 MPa. Các cấp phối thay thế 25%, 50%, 75% và 100% CLTH đạt lần lượt 39,82; 34,64; 32,75 và 31,92 MPa, tương ứng giảm 6,10%; 18,32%; 22,78% và 24,74% so với đối chứng. Các giá trị cường độ chịu nén này thuộc vùng bê tông thường dùng cho kết cấu thông dụng.

2. Mô đun đàn hồi là chỉ tiêu chịu ảnh hưởng rõ rệt nhất. Ở cấp phối sử dụng 100% CLTH, mô đun đàn hồi giảm khoảng 42,75% so với bê tông đối chứng. Do đó, khi ứng dụng BTCLTH trong cấu kiện chịu uốn, cần quan tâm đặc biệt đến độ cứng, độ võng và khả năng kiểm soát nứt.

3. Cường độ chịu uốn trên mẫu 100 × 100 × 400 mm với nhịp 300 mm lần lượt là 3,33; 3,29; 2,99; 2,78 và 2,75 MPa cho CP0 – CP100. Mức giảm ở các cấp phối dùng CLTH là 1,20%; 10,23%; 16,39% và 17,44%, nhỏ hơn mức suy giảm mô đun đàn hồi.

4. Tỷ lệ thay thế 25–50% CLTH có mức suy giảm cường độ nhỏ hơn các tỷ lệ cao trong chương trình thí nghiệm, nhưng mô đun đàn hồi vẫn giảm đáng kể. Việc chọn tỷ lệ cho ứng dụng cần đồng thời xét độ cứng, độ võng, kiểm soát nứt và độ bền lâu; nghiên cứu chưa xác lập một tỷ lệ tối ưu chung cho kết cấu và cần được nghiên cứu sâu hơn ở nghiên cứu tiếp theo.

5. Hai quan hệ bán thực nghiệm sau hiệu chỉnh cho MAPE lần lượt 2,34% và 1,28%, với R^2 tương ứng 0,983 và 0,967 đối với mô đun đàn hồi và cường độ chịu uốn. Đây là mức độ khớp trên năm điểm trung bình dùng để hiệu chỉnh. Các quan hệ chỉ được xem xét trong phạm vi vật liệu, tuổi 28 ngày, N/X = 0,48 và khoảng cường độ đã khảo sát; cần dữ liệu độc lập để kiểm chứng khả năng dự báo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Dự án hợp tác nghiên cứu khoa học và công nghệ cho phát triển bền vững JST-JICA SATREPS No. JPMJSA1701. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Phòng Thí nghiệm và Kiểm định công trình, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội và các đơn vị liên quan đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện thí nghiệm.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng ChatGPT (OpenAI) nhằm rà soát chính tả. Các tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Zhang, H., Zhang, C., He, B., Yi, S., Tang, L. (2023). Recycling fine powder collected from construction and demolition wastes as partial alternatives to cement: A comprehensive analysis on effects, mechanism, cost and CO2 emission. *Journal of Building Engineering*, 71:106507.

[2] Tam, V. W. Y., Soomro, M., Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 172:272–292.

[3] Tang, Q., Ma, Z., Wu, H., Wang, W. (2020). The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 114:103807.

[4] Cuong, T. V., Kawamoto, K., Nga, T. T. V., Giang, N. H. (2023). Mechanical properties of synthetic aggregate pelletized by waste concrete fines in Vietnam. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 17(2):1–8.

[5] Bekkeri, G. B., Kiran, K., Shetty, K., Nayak, G. (2023). Synthesis of artificial aggregates and their impact on performance of concrete: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(4):1988–2011.

[6] Wainwright, P. J., Cresswell, D. J. F., van der Sloot, H. A. (2002). The production of synthetic aggregate from a quarry waste using an innovative style rotary kiln. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 20(3):279–289.

[7] Bach, D. T., Hoang, V. L., Nguyen, N. B. (2020). Pelletized fly ash aggregates use for making eco-friendly concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869(3):032028.

[8] Nguyen, H. P., Le, N. L., Nguyen, T. T. T., Nguyen, C. T., Nguyen, V. T. (2023). Mechanical properties of structural lightweight concrete using lightweight aggregates from construction and demolition waste. *International Journal of GEOMATE*, 25(110):40–48.

[9] Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65:201–217.
[10] Hwang, C.-L., Tran, V.-A. (2016). Engineering and durability properties of self-consolidating concrete incorporating foam lightweight aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9):120–127.
[11] Terzic, A. et al. (2015). Properties of fly ash based lightweight aggregates and their application in concrete. *Construction and Building Materials*, 94:445–455.
[12] Cuong, T. V., Tan, N. N., Kawamoto, K., Giang, N. H. (2024). Flexural behavior of reinforced concrete beams using synthetic aggregates produced from concrete waste powder in Vietnam. *International Journal of GEOMATE*, 27(120):69–76.
[13] ACI 318-19 (2019). *Building code requirements for structural concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
[14] EN 1992-1-1:2004. *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
[15] Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A., Duan, Z. (2018). Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, 188:720–731.
[16] Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., Zerbino, R. (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7):1500–1506.
[17] Yang, I. H., Park, J., Kim, K. C., Lee, H. (2020). Structural Behavior of Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregates under Flexure. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1): 8037131.
[18] Zhang, H., Wan, K., Wu, B., Hu, Z. (2021). Flexural behavior of reinforced geopolymer concrete beams with recycled coarse aggregates. *Advances in Structural Engineering*, 24(14):3281–3298.
[19] Arezoumandi, M., Smith, A., Volz, J. S., Khayat, K. H. (2015). An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate. *Engineering Structures*, 88:154–162.
[20] Choi, W. C., Yun, H. D. (2013). Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate. *Materials & Design*, 51:742–750.
[21] TCVN 2682:2009. *Xi măng pooc lăng - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
[22] TCVN 7570:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
[23] ASTM C494/C494M-24 (2024). *Standard specification for chemical admixtures for concrete*.
[24] TCVN 7572:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
[25] TCVN 11969:2018. *Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
[26] ASTM C39/C39M-26 (2026). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
[27] ASTM C469/C469M-22 (2022). *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
[28] ASTM C78/C78M. *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.