

Nghiên cứu đặc tính cơ học của bê tông geopolimer cốt liệu tái chế

Study on mechanical properties of recycled aggregates geopolimer concrete

> TS PHẠM ĐỨC THIÊN*, THS BÙI VĂN HIỀN

Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM

*Email: thienpd@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của cốt liệu tái chế (CLTC) đến một số tính chất cơ học của bê tông geopolimer. Các cấp phối bê tông geopolimer với cốt liệu đá tự nhiên được lần lượt thay thế bằng CLTC từ bê tông xi măng phế thải và từ bê tông geopolimer phế thải đến tỷ lệ 100%. Thử nghiệm cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo gián tiếp (ép chẻ) được thực hiện để khảo sát ảnh hưởng của CLTC đến khả năng chịu tải của vật liệu. Kết quả thực nghiệm cho thấy các cấp phối bê tông với tỷ lệ 40% CLTC cho cường độ chịu nén và chịu kéo tốt nhất. Ngoài ra, khi thay thế đến 100% CLTC, các cấp phối bê tông vẫn đạt cường độ tương đương như bê tông dùng cốt liệu đá tự nhiên. Kết quả nghiên cứu góp phần minh chứng tính khả thi của việc sử dụng CLTC từ bê tông geopolimer phế thải và từ bê tông xi măng phế thải để sản xuất bê tông mới dùng trong xây dựng.

Từ khóa: Bê tông geopolimer; cốt liệu tái chế; cường độ chịu nén; cường độ chịu kéo.

ABSTRACT

This paper presents a study on the effects of recycled aggregates on some mechanical properties of geopolimer concrete. In geopolimer concrete mixtures, natural aggregates were replaced by recycled aggregates derived from waste cement concrete and waste geopolimer concrete, at replacement ratios up to 100%. Compressive strength and splitting tensile strength tests were conducted to investigate the impact of recycled aggregates on the mechanical performance of the recycled aggregate concrete. Experimental results indicate that concrete mixtures with a 40% recycled aggregate replacement ratio exhibit optimal compressive and tensile strengths. Furthermore, even at a 100% replacement rate, the concrete mixes still achieve comparable strength to that of conventional natural aggregate concrete. These findings contribute to demonstrating the feasibility of utilizing recycled aggregates from waste geopolimer and cement concrete for the production of new concrete in the construction industry.

Keywords: Geopolimer concrete; recycled aggregate; compressive strength; tensile strength.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển mạnh mẽ của ngành xây dựng toàn cầu dẫn đến sự phụ thuộc lớn vào bê tông xi măng Portland, gây áp lực nghiêm trọng lên sinh thái và tài nguyên thiên nhiên. Quá trình sản xuất xi măng không chỉ làm cạn kiệt nguồn tài nguyên không tái tạo như đá vôi và đất sét [1], [2], mà còn chịu trách nhiệm cho lượng lớn phát thải khí nhà kính (CO_2) toàn cầu, bắt nguồn từ quá trình nung clinker ở nhiệt độ cao tiêu tốn năng lượng và phản ứng nhiệt phân canxi cacbonat (CaCO_3) [3–5].

Để giải quyết cuộc khủng hoảng này, bê tông geopolimer (chất kết dính vô cơ kiềm hoạt hóa) đã nổi lên như một giải pháp thay thế mang tính cách mạng. Bằng cách tận dụng các phế phẩm công nghiệp giàu aluminosilicate (tro bay, xỉ lò cao, metakaolin) kết hợp với dung dịch kiềm hoạt hóa (NaOH và Na_2SiO_3), geopolimer loại bỏ hoàn toàn nhu cầu sử dụng đá vôi và đất sét [6], đồng thời có khả năng cố định các kim loại nặng độc hại [7]. Dù các đánh giá vòng đời toàn diện cho thấy mức giảm phát thải carbon thực tế có thể thấp hơn con số 80% ban đầu do năng lượng sản xuất dung dịch kiềm, geopolimer vẫn giảm thiểu đáng kể dấu chân carbon so với

xi măng truyền thống [4], [8], [9]. Giải pháp này giúp xử lý khối lượng lớn chất thải rắn, đóng vai trò mũi nhọn trong mô hình kinh tế tuần hoàn và phát triển bền vững [10], [11].

Bê tông geopolimer còn sở hữu tính chất cơ lý và độ bền vượt trội nhờ vi cấu trúc đặc thù [12–15]. Khác với phản ứng thủy hóa tạo gel C-S-H của xi măng, geopolimer hình thành qua quá trình trùng ngưng các monome aluminat và silicat trong môi trường kiềm mạnh, tạo mạng lưới không gian ba chiều vô định hình bền vững (N-A-S-H hoặc C-A-S-H) [16]. Cấu trúc đặc khít này giúp bê tông đạt cường độ sớm rất cao ở nhiệt độ phòng hoặc nhiệt độ cao [17]. Cấp phối tro bay kết hợp xi có thể đạt cường độ chịu nén trên 60–80 MPa, trong khi cường độ kéo, uốn và mô-đun đàn hồi đều đáp ứng tốt yêu cầu thiết kế kết cấu [18–22]. Ngoài ra, cấu trúc dạng gốm chịu lửa giúp geopolimer chống cháy và bền nhiệt vượt trội (lên tới 800–1000°C) [23], [24]. Độ co ngót sấy khô thấp [25], [26] cùng đặc tính không chứa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tự do giúp vật liệu này kháng axit, sunfat và ion clo tối ưu [14], [27], [28].

Sự kết hợp giữa chất kết dính geopolimer cường độ cao và CLTC tạo thành hệ vật liệu bê tông geopolimer CLTC đầy hứa hẹn [35],

[36]. Tính đột phá nằm ở sự tương tác hóa học tại vùng chuyển tiếp giao diện (ITZ). Môi trường kiềm cao không chỉ hòa tan các tiền chất mà còn kích hoạt lại hạt xi măng chưa thủy hóa trong lớp vữa cũ của CLTC [37], [38]. Phản ứng hóa học chéo này giúp tái cấu trúc bề mặt xốp, cho phép gel geopolymer thâm nhập sâu vào các lỗ rỗng và vi vết nứt, tối ưu hóa cấu trúc vi mô ITZ và tăng cường độ đặc chắc liên kết [39], [40]. Nhờ vậy, sự sụt giảm cường độ do CLTC được bù đắp hiệu quả, cho phép sử dụng tỷ lệ thay thế lên đến 100% mà vẫn đảm bảo tính năng cơ lý tiệm cận bê tông thông thường [41].

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm làm rõ tính khả thi khi sử dụng các phế phẩm công nghiệp địa phương như tro bay từ các nhà máy nhiệt điện trong nước và bê tông phế thải để sản xuất bê tông geopolymer CLTC phục vụ ngành công nghiệp xây dựng. Phạm vi nghiên cứu được giới hạn ở việc xác định ảnh hưởng của tỷ lệ CLTC từ bê tông xi măng phế thải và từ bê tông geopolymer phế thải đến cường độ chịu nén và chịu kéo gián tiếp (ép chéo) của bê tông CLTC mới.

2. NGUYÊN VẬT LIỆU, CẤP PHỐI BÊ TÔNG VÀ THÍ NGHIỆM

2.1. Cốt liệu

Cốt liệu tự nhiên dùng chung cho bê tông geopolymer và bê tông xi măng bao gồm cát và đá dăm đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [42]. Cát có mô đun độ lớn 1,82, khối lượng thể tích 1,52 g/cm³ và khối lượng riêng 2,63 g/cm³. Đá dăm có khối lượng riêng 2,73 g/cm³, khối lượng thể tích 1,62 g/cm³.

Nhân tố khảo sát chính của nghiên cứu này là CLTC từ bê tông geopolymer phế thải cường độ chịu nén khoảng 20 MPa (ký hiệu CLG20) và 30 MPa (ký hiệu CLG30); cũng như CLTC từ bê tông xi măng phế thải cường độ chịu nén khoảng 20 MPa (ký hiệu CLX20) và 30 MPa (ký hiệu CLX30).

2.2. Chất kết dính

Chất kết dính geopolymer là sản phẩm của phản ứng geopolymer hóa giữa các chất hoạt hóa kiềm và vật liệu aluminosilicat như tro bay, xỉ hạt lò cao, metakaolin,... Tro bay sử dụng trong nghiên cứu này được lấy từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải Trà Vinh và được phân loại F theo tiêu chuẩn ASTM C618 [43]. Tro bay có khối lượng riêng 2,5 g/cm³. Thành phần hóa học của tro bay được trình bày trong Bảng 1, tổng hàm lượng (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) đạt trên 70% và hàm lượng CaO thấp cho thấy nguồn tro bay có hoạt tính cao phù hợp chế tạo bê tông geopolymer.

Bảng 1. Thành phần hoá học của tro bay

Thành phần	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MKN
% KL	51,92	29,44	4,41	2,07	0,11	6,45

(*) MKN: hàm lượng mất khi nung; % KL: % khối lượng.

Dung dịch hoạt hóa trong nghiên cứu này là sự kết hợp giữa Sodium Hydroxide (NaOH) và Sodium Silicate (Na₂SiO₃). Trong đó, dung dịch NaOH có nồng độ 12 M được pha chế từ nguyên liệu dạng vảy khô với độ tinh khiết đạt trên 90%. Đối với dung dịch Sodium Silicate, các thông số kỹ thuật bao gồm tỷ trọng 1,42 ± 0,01 g/ml, tỷ lệ theo khối lượng của Na₂O và SiO₂ lần lượt là 11,8% và 29,5% (tương ứng tỷ lệ SiO₂/Na₂O là 2,5).

2.3. Cấp phối và thí nghiệm

Nghiên cứu này được thực hiện cho 4 bộ cấp phối bê tông geopolymer (Bảng 2). Trong 1m³ bê tông geopolymer cường độ mục tiêu 20 MPa (ký hiệu BG20) có 593 kg cát, 418 kg tro bay, 75 kg NaOH và 185 kg Na₂SiO₃. Cốt liệu đá tự nhiên ban đầu 1079 kg lần lượt được thay thế bằng CLTC từ bê tông xi măng phế thải cường độ khoảng 20 MPa (ký hiệu CLX20) hoặc CLTC từ bê tông geopolymer phế thải cường độ khoảng 20 MPa (ký hiệu CLG20) đến tỷ lệ 100%. Còn trong 1 m³ bê tông geopolymer cường độ mục tiêu 30 MPa (ký hiệu BG30) có 584 kg cát, 441kg tro bay, 75,6 kg NaOH và 189kg

Na₂SiO₃ tương ứng. Khối lượng CLTC trong BG30 cũng được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần cốt liệu lớn cho 1 m³ bê tông geopolymer

Cấp phối	CLTC thay thế đá tự nhiên					Đá
	Tỷ lệ %	CLX20 kg	CLX30 kg	CLG20 kg	CLG30 kg	
BG20, CLX20	0	0				1079
	20	216				863
	40	432				647
	60	647				432
	80	863				216
	100	1079				0
BG20, CLG20	0			0		1079
	20			216		863
	40			432		647
	60			647		432
	80			863		216
	100			1079		0
BG30, CLX30	0		0			1061
	20		212			849
	40		424			637
	60		637			424
	80		849			212
	100		1061			0
BG30, CLG30	0			0		1061
	20			212		849
	40			424		637
	60			637		424
	80			849		212
	100			1061		0

Các mẫu bê tông geopolymer CLTC sau khi đúc khuôn được tính định ở nhiệt độ phòng trong 24 giờ, sau đó được dưỡng hộ nhiệt ở 100°C trong thời gian 10 giờ để thúc đẩy quá trình geopolymer hoá tạo nhanh cường độ (Hình 1).

Thí nghiệm này sử dụng mẫu trụ kích thước DxDH = 100x200 mm. Cường độ vật liệu sau đó được quy đổi về mẫu lập phương cạnh 150 mm để trình bày trong phần kết quả.

Cường độ chịu nén của vật liệu được xác định bằng thí nghiệm nén theo tiêu chuẩn TCVN 3118:2022 [44], còn cường độ chịu kéo gián tiếp của bê tông được xác định thông qua thí nghiệm ép chéo theo tiêu chuẩn TCVN 8862:2011 [45] (Hình 2).



Hình 1. Dưỡng hộ nhiệt các mẫu bê tông geopolymer



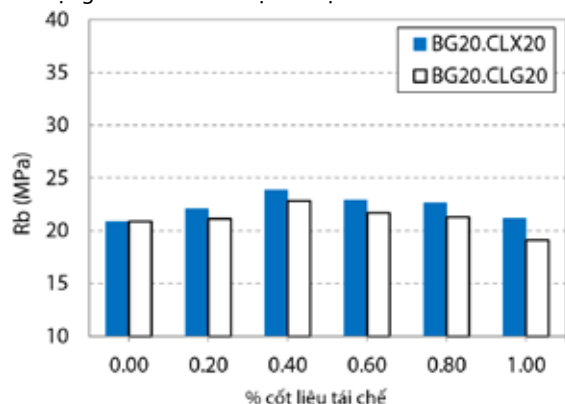
Hình 2. Thí nghiệm cường độ chịu nén và thí nghiệm ép chéo

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của CLTC đến cường độ chịu nén của bê tông geopolimer BG20

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của các cấp phối bê tông geopolimer cường độ mục tiêu 20 MPa (BG20) được trình bày trong Hình 3. Cường độ chịu nén của BG20 tăng đến 14,24% khi tỷ lệ CLTC tăng đến 40%, đạt giá trị 23,84 MPa đối với cấp phối BG20.CLX20 và đạt 22,79 MPa đối với cấp phối BG20.CLG20.

Khi tiếp tục tăng tỷ lệ CLTC, cường độ chịu nén của BG20 có xu hướng giảm. Tuy nhiên, khi thay thế đến 100% CLX20 hoặc đến 80% CLG20 thì bê tông mới vẫn đạt cường độ tương đương như bê tông BG20 sử dụng hoàn toàn cốt liệu đá tự nhiên.



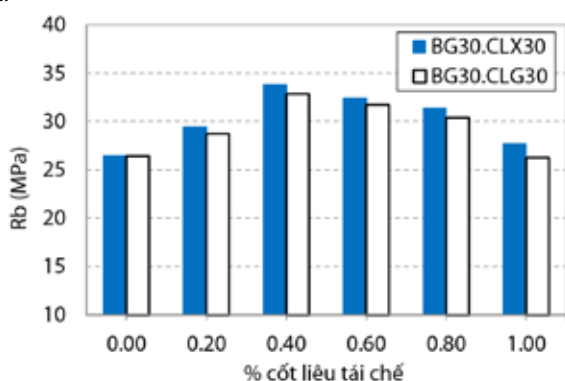
Hình 3. Cường độ chịu nén của bê tông BG20

Sự gia tăng cường độ của các cấp phối bê tông geopolimer CLTC thấp là do các "hiệu ứng gia cường vi mô", còn xu hướng giảm cường độ khi tỷ lệ CLTC cao có nguyên nhân do các "hiệu ứng tích lũy khuyết tật cấu trúc" được trình bày trong phần biện luận chung bên dưới.

Bên cạnh đó, kết quả thực nghiệm cũng cho thấy chênh lệch cường độ chịu nén giữa bê tông BG20 sử dụng CLX20 và CLG20 đa số dưới 6,5%. Các kết quả này góp phần minh chứng cho tính khả thi và tương đồng khi tận dụng bê tông xi măng phế thải cũng như bê tông geopolimer phế thải để làm cốt liệu sản xuất bê tông geopolimer mới.

3.2. Ảnh hưởng của CLTC đến cường độ chịu nén của bê tông geopolimer BG30

Dưới ảnh hưởng của CLTC, xu hướng biến thiên cường độ chịu nén của bê tông geopolimer cường độ mục tiêu 30 MPa (BG30) cũng tương đồng với cấp phối bê tông BG20 đã thí nghiệm trước đó (Hình 4). Cường độ chịu nén tăng dần khi thay thế CLTC đến 40%, bê tông BG30.CLX30 đạt 33,30 MPa (tăng 18,65%) và bê tông BG30.CLG30 đạt 31,19 MPa (tăng 11,10%) so với bê tông không CLTC.



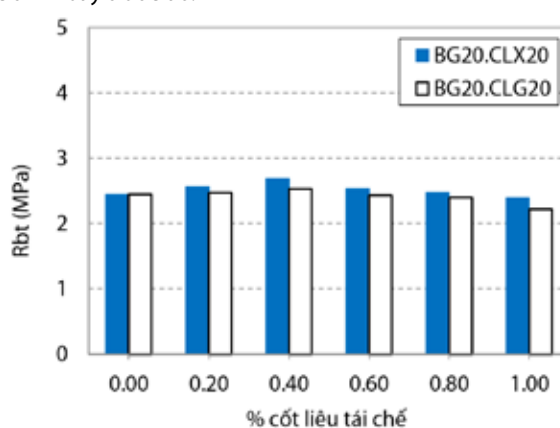
Hình 4. Cường độ chịu nén của bê tông BG30

Tiếp tục tăng hàm lượng CLTC đến 100%, khả năng chịu nén của bê tông BG30 có giảm nhưng vẫn đạt cường độ tương đồng với bê tông không CLTC (chênh lệch chỉ 2,56% đến 4%). Chênh lệch cường độ giữa bê tông dùng CLX30 và CLG30 cũng rất thấp, chỉ từ 2,13 đến 5,39%. Các kết quả này tiếp tục góp phần minh chứng tính khả thi tận dụng khối lượng lớn CLTC trong các cấp phối bê tông geopolimer mới.

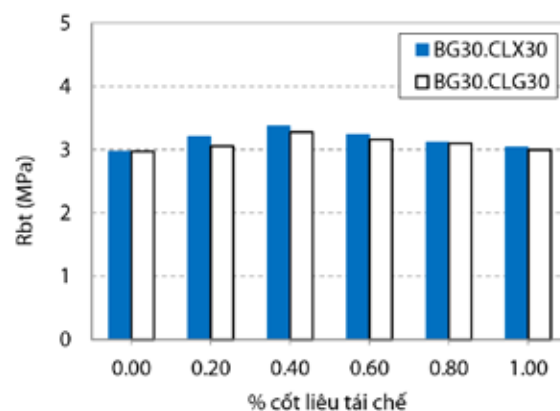
3.3. Ảnh hưởng của CLTC đến cường độ chịu kéo của bê tông geopolimer

Do cùng chịu ảnh hưởng bởi các tác nhân giống nhau như chất kết dính, thành phần cấp phối, tính chất bề mặt tiếp xúc,... nên cường độ chịu kéo của các mẫu bê tông có xu hướng biến thiên tương đồng với cường độ chịu nén đã được trình bày trước đó.

Cường độ chịu kéo của các cấp phối bê tông geopolimer cường độ mục tiêu 20 MPa (BG20) và cường độ mục tiêu 30 MPa (BG30) được thể hiện trong Hình 5 và Hình 6. Xu hướng phát triển cường độ chịu kéo của các cấp phối tương đồng với cường độ chịu nén đã được trình bày trước đó.



Hình 5. Cường độ chịu kéo của bê tông BG20



Hình 6. Cường độ chịu kéo của bê tông BG30

Ở tỷ lệ CLTC 40% các cấp phối đạt cường độ chịu kéo tốt nhất lần lượt là 2,69 MPa cho BG20.CLX20 (tăng 9,84% so với bê tông cốt liệu đá tự nhiên) và 2,53 MPa cho BG20.CLG20 (tăng 3,36%). Đối với bê tông BG30, cường độ chịu kéo tốt nhất lần lượt là 3,37 MPa (tăng 13,54%) và 3,27 MPa (tăng 10,18%).

Đối với bê tông BG20, khi thay thế đến 80% CLTC, cường độ chịu kéo vẫn đạt tương đồng như bê tông không CLTC (chỉ suy giảm 2,07%). Còn đối với bê tông BG30 khi thay thế đến 100% CLTC, cường độ chịu kéo vẫn đạt giá trị như bê tông cốt liệu đá tự nhiên. Các kết quả này một lần nữa góp phần khẳng định có thể dùng CLTC từ bê tông phế thải để sản xuất bê tông mới dùng trong xây dựng.

3.4. Biện luận chung

Nhìn chung, quy luật biến thiên cường độ chịu nén và chịu kéo của các cấp phối bê tông tương đồng nhau, phản ánh sự cạnh tranh giữa hiệu ứng gia cường vi mô (ở tỷ lệ CLTC thấp) và hiệu ứng tích lũy khuyết tật (ở tỷ lệ CLTC cao).

Hiệu ứng gia cường vi mô được lý giải qua ba cơ chế:

- Khóa cơ học và kết dính vật lý: Lớp vữa cũ bao quanh CLTC sau khi đập nghiền tạo ra bề mặt xù xì, góc cạnh với độ nhám cao vượt trội so với đá tự nhiên [29]. Ở hàm lượng thay thế dưới 40%, độ nhám này tăng cường lực ma sát trượt và hiệu ứng "khóa cơ học" giữa CLTC với ma trận chất kết dính mới, mở rộng diện tích tiếp xúc và tối ưu hóa khả năng phân tán ứng suất [30].

- Bảo dưỡng nội sinh: Do cấu trúc vữa cũ xốp, CLTC hấp thụ một lượng dung dịch kiềm lớn trong quá trình trộn và giải phóng từ từ sau khi đóng rắn [31], [46]. Đối với ma trận geopolimer mới, lượng dung dịch kiềm dự trữ này giúp duy trì môi trường pH cao lâu dài, thúc đẩy phản ứng trùng ngưng muôn của các hạt aluminosilicate, giúp tăng cường độ vi mô ở tuổi muôn [40].

- Tương tác hóa học chéo tại ITZ: Ở cấp phối BG.CLX, dung dịch kiềm mạnh từ vữa geopolimer tấn công lớp vữa xi măng cũ, hòa tan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dư thừa để hình thành các gel C-A-S-H đan xen mạng lưới N-A-S-H. Quá trình này giúp "chữa lành" vi vết nứt và thu hẹp vùng ITZ kép [37], [39]. Đối với cấp phối BG.CLG, độ ổn định thể tích của vữa geopolimer cũ cùng việc tiếp tục kích hoạt các monome và hạt tro bay/xi chưa phản ứng hết tạo nên liên kết đồng chất bền vững giữa cốt liệu và vữa mới [47].

Ngược lại, khi hàm lượng CLTC vượt quá 40% lên đến 100%, sự tích lũy khuyết tật cấu trúc sẽ lấn át hoàn toàn và làm suy giảm cường độ theo các cơ chế:

- Sự gia tăng độ xốp và cấu trúc ITZ yếu: Thể tích vữa cũ tăng cao tạo ra mạng lưới ITZ cũ - mới chằng chịt và chống chéo [34]. Vữa cũ xốp trở thành điểm tập trung ứng suất, khiến các vết nứt dễ dàng khởi phát và lan truyền xuyên qua vùng ITZ yếu thay vì đi vòng qua cốt liệu [33], [48].

- Sự lan truyền vi vết nứt: Các vi vết nứt sẵn có trong CLTC từ quá trình đập nghiền [32], [46] không được lấp đầy hoàn toàn khi lượng hồ vữa mới trở nên thiếu hụt ở tỷ lệ thay thế cao. Hệ quả là các vết nứt vi mô kết nối thành mạng lưới nứt vi mô, làm giảm khả năng chịu lực [34], [39].

- Hiệu ứng "pha loãng" bộ khung chịu lực: Việc thay thế hơn 40% cốt liệu tự nhiên bằng CLTC (có khối lượng nhẹ, giòn và mô-đun đàn hồi thấp) làm giảm đáng kể độ cứng của khung chịu lực [31]. Ở tỷ lệ 60-100%, hạt CLTC có xu hướng bị nghiền nát nội tại trước khi ma trận đạt ứng suất phá hoại cực đại [47], [49].

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của CLTC đến cường độ chịu nén và chịu kéo của bê tông geopolimer. Tuy số lượng mẫu khảo sát còn hạn chế, các kết quả thí nghiệm cho thấy các xu hướng biến thiên tương đồng, logic, có thể giải thích được và phù hợp các nghiên cứu trước. Một số kết luận đúc kết từ phạm vi nghiên cứu:

- CLTC từ bê tông geopolimer phế thải và từ bê tông xi măng phế thải hoàn toàn phù hợp dùng làm cốt liệu cho bê tông geopolimer mới với khả năng chịu kéo nén tương đồng và có phần vượt trội so với bê tông sử dụng cốt liệu đá tự nhiên.

- Cường độ chịu kéo nén của bê tông mới tăng khi tăng tỷ lệ CLTC đến 40%.

- Khi tiếp tục tăng tỷ lệ CLTC trên 40%, cường độ chịu kéo nén của bê tông mới có xu hướng giảm, tuy nhiên mức độ suy giảm cường độ không quá nghiêm trọng.

- Đa số cấp phối, khi thay thế hoàn toàn 100% CLTC, vật liệu vẫn đạt cường độ chịu kéo nén tương đồng so với bê tông cốt liệu đá tự nhiên.

- Kết quả nghiên cứu góp phần khẳng định tính khả thi trong việc sử dụng tỷ lệ lớn CLTC trong sản xuất bê tông dùng trong xây dựng.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài mã số T2025-235, được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J Davidovits. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, vol. 37, pp. 1633-1656, 1991, doi: 10.1007/BF01912193.
- [2] P Duxson, JL Provis, GC Lukey and JSJ van Deventer. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 12, pp. 1590-1597, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.08.018.
- [3] RM Andrew. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, vol. 10, no. 1, pp. 195-217, 2018, doi: 10.5194/essd-10-195-2018.
- [4] LK Turner and FG Collins. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolimer and OPC yield concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 125-130, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023.
- [5] BC McLellan, RP Williams, J Lay, A van Riessen and GD Corder. Costs and carbon emissions for geopolimer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 9-10, pp. 1080-1090, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.02.010.
- [6] B Singh, G Ishwarya, M Gupta and SK Bhattacharyya. Geopolimer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, vol. 85, pp. 78-90, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.
- [7] Y Zhang, W Sun, Q Chen and L Chen. Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolimer. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 143, no. 1-2, pp. 206-213, 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.09.033.
- [8] E Benhelal, G Zahedi, E Shamsaei and A Bahadori. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 142-161, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- [9] G Habert, JB d'Espinose de Lacaillerie, and N Roussel. An environmental evaluation of geopolimer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 11, pp. 1229-1238, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.03.012.
- [10] MCG Juenger, F Winnefeld, JL Provis and JH Ideker. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1232-1243, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012.
- [11] JSJ van Deventer, JL Provis, and P Duxson. Technical and commercial progress in the adoption of geopolimer cement. *Minerals Engineering*, vol. 29, pp. 89-104, 2012, doi: 10.1016/j.mineng.2011.09.009.
- [12] BV Rangan. Design, Properties, and Applications of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolimer Concrete. *Developments in Porous, Biological and Geopolimer Ceramics: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, vol. 28, no. 9, 2007, doi: 10.1002/9780470339749.ch31.
- [13] AM Fernandez-Jimenez, A Palomo and C Lopez-Hombrados. Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 103, no. 2, pp. 106-112, 2006, doi: 10.14359/15261.
- [14] T Bakharev. Resistance of geopolimer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 4, pp. 658-670, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005.
- [15] RJ Thomas and S Peethamparan. Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress-strain behavior. *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 49-56, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.039.
- [16] Sindhunata, JL Provis, GC Lukey, H Xu and JSJ van Deventer. Structural evolution of fly ash based geopolimers in alkaline environments. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 47, no. 09, pp. 2991-2999, 2008, doi: 10.1021/ie0707671.
- [17] GS Ryu Young, YB Lee, KT Koh and YS Chung. The mechanical properties of fly ash-based geopolimer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 409-418, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069.
- [18] G Fang, WK Ho, W Tu and M Zhang. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 476-487, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.008.

- [19] P Nath and PK Sarker. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp. 163-171, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080.
- [20] M Sofi, JSJ van Deventer, PA Mendis and GC Lukey. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 2, pp. 251-257, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.10.008.
- [21] P Chindaprasirt, T Chareerat and V Sirivivatnanon. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 224-229, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002.
- [22] P Nath and PK Sarker. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 130, pp. 22-31, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034.
- [23] WDA Rickard, R Williams, J Temuujin and A van Riessen. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 9, pp. 3390-3397, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2011.01.005.
- [24] DLY Kong and JG Sanjayan. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 2, pp. 334-339, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.10.017.
- [25] MF Nuruddin, FA Memon, N Shafiq and S Demie. Drying shrinkage of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 567, pp. 362-368, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.567.362.
- [26] PS Deb, P Nath and PK Sarker. Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 594-600, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.066.
- [27] T Bakharev. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1233-1246, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.002.
- [28] M Olivia and H Nikraz. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design*, vol. 36, pp. 191-198, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.10.036.
- [29] CS Poon, SC Kou, HW Wan and M Etxeberria. Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates. *Waste Management*, vol. 29, no. 8, pp. 2369-2377, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.02.018.
- [30] B Wang, L Yan, Q Fu and B Kasal. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 171, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [31] VWY Tam, XF Gao and CM Tam. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1195-1203, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025.
- [32] M Etxeberria, E Vázquez, A Mari and M Barra. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 5, pp. 735-742, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- [33] J Xiao, W Li, Y Fan and X Huang. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 364-383, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074.
- [34] M Behera, SK Bhattacharyya, AK Minocha, R Deoliya and S Maiti. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability. *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 501-516, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003.
- [35] P Zhang, X Sun, F Wang and J Wang. Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Polymers*, vol. 15, no. 3, pp. 615, 2023, doi: 10.3390/polym15030615.
- [36] FUA Shaikh. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 5, no. 2, pp. 277-287, 2016, doi: 10.1016/j.ijbs.2016.05.009.
- [37] O Nanayakkara, C Gunasekara, DW Law, J Xia and S Setunge. Alkali-Activated Slag Concrete with Recycled Aggregate: Long-Term Performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 33, no. 7, 2021, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003773.
- [38] J Xie, J Wang, R Rao, C Wang and C Fang. Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*, vol. 164, pp. 179-190, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.11.067.
- [39] E Pawluczuk, KK Wichrowska, JR Jiménez, JMF Rodríguez and DS Morales. Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior. *Journal of Building Engineering*, vol. 44, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103317.
- [40] BS Thomas, J Yang, A Bahurudeen, SN Chinnu, JA Abdalla, RA Hawileh and HM Hamada. Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, vol. 3, 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100056.
- [41] M Ahmed, P Colajanni and S Pagnotta. A Review of Current Research on the Use of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete for Structural Members. *Materials*, vol. 15, no. 24, pp. 8911, 2022, doi: 10.3390/ma15248911.
- [42] TCVN 7570:2006. Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [43] ASTM C618-03. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials, 2003, doi: 10.1520/C0618-03.
- [44] TCVN 3118:2022. Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [45] TCVN 8862:2011. Quy trình thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chế của vật liệu hạt liên kết bằng các chất kết dính. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [46] MS de Juan and PA Gutiérrez. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 872-877, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.
- [47] P Nuaklong, V Sata and P Chindaprasirt. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, no. 4, pp. 2300-2307, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.109.
- [48] R Kurda, J de Brito and JD Silvestre. Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties. *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 554-572, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.128.
- [49] SC Kou, CS Poon and F Agrela. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 8, pp. 788-795, 2011, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009.