



Ứng dụng bột thủy tinh tái chế trong sản xuất bê tông: giải pháp bền vững cho công trình giao thông

Application of recycled glass powder in concrete production: a sustainable solution for transportation infrastructure

Nguyễn Tuấn Anh^{1*}, Nguyễn Tiến Thủy¹, Trần Huy Hoàng²

¹Nhóm nghiên cứu Dữ liệu Lớn cho Kỹ thuật Xanh và Cơ sở Hạ tầng (BRIDGE), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

²Tổng công ty Đầu tư phát triển đô thị và khu công nghiệp Việt Nam

Từ khóa:

Kết cấu bê tông
Bột thủy tinh
Rác thải
Cường độ chịu nén
Vật liệu tái chế
Công trình giao thông

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả của việc sử dụng bột thủy tinh tái chế từ rác thải làm vật liệu thay thế xi măng trong bê tông. Thí nghiệm được thực hiện với các tỷ lệ thay thế 10%, 20% và 30% xi măng bằng bột thủy tinh có kích thước hạt 75-150 μm . Kết quả chỉ ra rằng với tỷ lệ thay thế 10-20%, bê tông vẫn đạt 93-96% cường độ chịu nén của bê tông truyền thống ở 28 ngày tuổi, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật mác M200. Ở tỷ lệ 30%, cường độ giảm đáng kể, chỉ đạt 78% so với mẫu đối chứng. Phân tích cho thấy bột thủy tinh phát huy hiệu quả thông qua phản ứng pozzolan và hiệu ứng vi cầu, mặc dù phát triển cường độ chậm hơn ở giai đoạn đầu. Giải pháp này không chỉ giúp xử lý rác thải thủy tinh khó phân hủy mà còn giảm phát thải CO₂ từ sản xuất xi măng, có tiềm năng ứng dụng cho một số hạng mục công trình giao thông.

Keywords:

Concrete structures
glass powder
Waste
Compressive strength
Recycled materials
Transportation infrastructure

ABSTRACT

This study evaluates the effectiveness of recycled glass powder from waste as a cement replacement material in concrete. Experiments were conducted with replacement ratios of 10%, 20%, and 30% of cement with glass powder having particle sizes of 75-150 μm . Results indicate that at replacement ratios of 10-20%, concrete still achieves 93-96% of the compressive strength of traditional concrete at 28 days, meeting the technical requirements for M200 grade concrete. At a 30% ratio, strength significantly decreases, reaching only 78% compared to the control sample. Analysis shows that glass powder is effective through pozzolanic reaction and microfiller effect, despite slower strength development in the early stages. This solution not only helps process non-biodegradable glass waste but also reduces CO₂ emissions from cement production, showing potential for application in various transportation infrastructure elements.

* Nguyễn Tuấn Anh. Nhóm nghiên cứu Bridge, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh
Email: tuananh.nguyen@ut.edu.vn

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.14\(2\).116-124](https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(2).116-124)

Ngày nhận bài: 17/02/2025; Ngày nhận bài sửa: 11/03/2025; Ngày chấp nhận đăng: 14/03/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/03/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Phát triển bền vững đã trở thành ưu tiên chiến lược của nhiều ngành công nghiệp toàn cầu, đặc biệt trong lĩnh vực xây dựng - một ngành đòi hỏi tiêu thụ khối lượng lớn tài nguyên thiên nhiên và đồng thời tạo ra lượng chất thải đáng kể. Một trong những thách thức môi trường quan trọng hiện nay là quản lý hiệu quả chất thải thủy tinh, khi số liệu thống kê cho thấy hàng tỷ tấn thủy tinh phế thải được tạo ra trên toàn cầu mỗi năm. Đáng chú ý, khoảng 50% trong số này được xử lý bằng phương pháp chôn lấp, với tổng lượng thủy tinh bị chôn lấp toàn cầu ước tính lên đến 200 triệu tấn hàng năm [1]. Tình trạng này không chỉ xuất hiện ở các nước đang phát triển mà còn phổ biến tại các quốc gia phát triển, minh chứng là tại Vương quốc Anh, khoảng 1,65 triệu tấn thủy tinh phế thải hàng năm bị đưa vào bãi chôn lấp do không đáp ứng được các điều kiện để tái chế [2].

Vấn đề này càng trở nên nghiêm trọng khi các bãi chôn lấp đang ở ngưỡng giới hạn và đầy lên nhanh chóng, trong khi thủy tinh là vật liệu không phân hủy sinh học với thời gian phân hủy có thể kéo dài trên một triệu năm [3], [4]. Mặc dù thủy tinh được coi là vật liệu có khả năng tái chế vô hạn mà không làm giảm chất lượng, các quá trình phân loại, làm sạch và nấu chảy khá phức tạp đã khiến tỷ lệ tái chế trên toàn cầu ở mức thấp. Vào năm 2018, chỉ khoảng 1/5 tổng lượng thủy tinh sản xuất trên toàn thế giới được tái chế [5].

Ngành công nghiệp thủy tinh cũng đang sử dụng một lượng tài nguyên thiên nhiên khổng lồ làm nguyên liệu đầu vào. Ước tính rằng mỗi 1 kg kính tấm tiêu thụ 1,73 kg nguyên liệu thô và 0,15 m³ nước [6]. Ngoài ra, ngành công nghiệp thủy tinh được xem là một trong những ngành tiêu tốn năng lượng nhiều nhất, do cần nhiệt độ rất cao - lên tới 1600°C - để nấu chảy nguyên liệu. Mỗi 1 kg kính tấm tạo ra 16,9 MJ

hiệu năng [6], trong khi việc sản xuất mỗi tấn thủy tinh ở châu Âu tiêu thụ khoảng 7,8 GJ năng lượng. Tổng mức tiêu thụ năng lượng của ngành thủy tinh châu Âu vào năm 2007 là 352 PJ, chiếm khoảng 13-17% tổng mức tiêu thụ năng lượng công nghiệp của châu Âu [7].

Việc sử dụng năng lượng lớn này kéo theo lượng phát thải CO₂ và các khí nhà kính khác rất cao. Năm 2007, sản xuất mỗi tấn thủy tinh ở châu Âu tạo ra khoảng 0,57 tấn CO₂ [7]. Riêng bước nấu chảy đã có thể phát thải 0,2 tấn CO₂ cho mỗi tấn thủy tinh được sản xuất [8]. Một vấn đề khác liên quan đến môi trường là một số loại thủy tinh chứa thành phần độc hại như oxit chì trong thủy tinh pha lê, sắc tố chứa cadmium trong thủy tinh màu, có thể gây ô nhiễm môi trường nếu không được xử lý đúng cách [9], [10]. Do đó, việc tái sử dụng và tái chế - mục tiêu chính của phát triển bền vững - đóng vai trò quan trọng trong bảo tồn tài nguyên, giảm phát thải khí nhà kính, tiết kiệm năng lượng và chi phí, hướng tới ngành công nghiệp thủy tinh bền vững [9], [10], [11].

Bê tông sử dụng bột thủy tinh tái chế thay thế một phần xi măng đã được ứng dụng thành công ở một số nước phát triển. Tuy nhiên, tại Việt Nam, nghiên cứu và ứng dụng loại vật liệu này còn rất hạn chế. Với mục đích cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng bột thủy tinh trong ngành xây dựng Việt Nam, nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của việc thay thế một phần xi măng bằng bột thủy tinh đến tính chất của bê tông. Cụ thể, nghiên cứu sẽ thực hiện các thí nghiệm với bê tông mác M200 ở các tỷ lệ thay thế 10%, 20% và 30%, đánh giá tính công tác và cường độ chịu nén ở các tuổi khác nhau (7, 14 và 28 ngày). Từ kết quả nghiên cứu, bài báo sẽ đề xuất giải pháp ứng dụng cụ thể cho các công trình giao thông như bó vỉa, dải phân cách tại các khu công nghiệp, đồng thời đánh giá hiệu quả về mặt kỹ thuật, kinh tế và môi trường của giải pháp này.

Kết quả từ nghiên cứu sẽ góp phần thúc đẩy việc sử dụng vật liệu xây dựng bền vững tại Việt Nam, hướng tới mục tiêu giảm thiểu phát thải khí nhà kính và xử lý hiệu quả rác thải công nghiệp. Đây là những bước đi cụ thể nhằm đáp ứng yêu cầu phát triển bền vững trong lĩnh vực xây dựng, đặc biệt là công trình giao thông - lĩnh vực có nhu cầu sử dụng bê tông lớn và ngày càng gia tăng.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Thủy tinh và tiềm năng tái chế trong bê tông

Thủy tinh tái chế dưới dạng bột mịn đã được chứng minh là một giải pháp thay thế xi măng hiệu quả trong sản xuất bê tông, đặc biệt là trong các ứng dụng hạ tầng giao thông. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc sử dụng bột thủy tinh tái chế ở mức thay thế từ 10-30% mang lại nhiều lợi ích đáng kể [12], [13].

Bột thủy tinh tái chế có thành phần chủ yếu là silica vô định hình (SiO_2), cùng với một lượng đáng kể CaO và Na_2O - tương tự với thành phần hóa học chính của xi măng Portland [14]. Khi được nghiền mịn, bột thủy tinh thể hiện tính chất pozzolanic rõ rệt, tức là khả năng phản ứng với canxi hydroxit (Ca(OH)_2) - sản phẩm phụ của quá trình thủy hóa xi măng - để tạo thành gel silicat canxi (C-S-H), là thành phần chính tạo cường độ trong bê tông [15]. Phản ứng pozzolan này không những góp phần hình thành thêm C-S-H, tăng mật độ vi cấu trúc bê tông, mà còn làm giảm hàm lượng Ca(OH)_2 dư thừa - vốn là yếu tố dễ bị hòa tan, gây rỗng và giảm độ bền của vật liệu [15], [16].

2.2. Ảnh hưởng của bột thủy tinh đến tính chất của bê tông

2.2.1. Ảnh hưởng đến độ sụt

Các nghiên cứu cho thấy kết quả không đồng nhất về ảnh hưởng của bột thủy tinh đến tính công tác của bê tông khi thay thế một phần xi măng. Phần lớn các nghiên cứu ghi nhận rằng

bột thủy tinh làm tăng độ sụt do đặc tính bề mặt trơn và khả năng hấp thụ nước thấp, so với hạt xi măng có xu hướng hút nước nhiều hơn [17], [18]. Kamali và Ghahremaninezhad nhận thấy việc thay thế 5-20% xi măng bằng bột thủy tinh nhìn chung làm tăng độ sụt, ngoại trừ ở mức thay thế 15%, có thể do sai số thí nghiệm [17].

Ngoài ra, việc ngâm bột thủy tinh trong nước trước khi trộn có thể thúc đẩy hoạt tính pozzolanic bằng cách thúc đẩy quá trình thủy phân và giải phóng các ion như Ca^{2+} và Na^+ , từ đó hỗ trợ sự hình thành canxi silicat hydrat (CSH) - sản phẩm đóng vai trò quan trọng trong sự phát triển cường độ của bê tông [19]. Hossain và cộng sự đã chỉ ra khi thay thế 10% xi măng bằng bột thủy tinh đã ngâm, hàm lượng ion Ca^{2+} và Na^+ giải phóng lần lượt là 23,0 mmol/L và 96,3 mmol/L [19].

Tuy nhiên, một số nghiên cứu khác lại cho rằng bột thủy tinh có thể làm giảm tính công tác do các đặc điểm như hình dạng sắc cạnh, diện tích bề mặt cao, diện tích bề mặt riêng lớn, bề mặt thô và hiệu ứng lấp đầy - những yếu tố này có thể gây cản trở chuyển động của hạt và làm tắc nghẽn cấu trúc rỗng trong hỗn hợp [20], [21], [22]. Các yếu tố như loại chất thải thủy tinh, kích thước hạt, loại xi măng, tỷ lệ nước/xi măng và phụ gia sử dụng là những biến số quan trọng ảnh hưởng đến kết quả cuối cùng [17], [20], [21], [23], [24].

2.2.2. Ảnh hưởng đến thời gian đông kết

Nhiều nghiên cứu cho thấy việc thay thế xi măng bằng bột thủy tinh có thể làm tăng cả thời gian đông kết đầu và đông kết cuối, mặc dù một số ít báo cáo lại cho kết quả trái ngược [20], [24], [25]. Các dữ liệu thực nghiệm trước đó cho thấy, ở nhiều mẫu có hàm lượng bột thủy tinh khác nhau, thời gian đông kết đều cao hơn so với mẫu đối chứng. Khi tỷ lệ thay thế tăng từ 5% lên 20%, thời gian đông kết đầu và cuối

tăng rõ rệt, sau đó tốc độ tăng giảm dần ở mức thay thế 25% và 30%.

2.2.3. Ảnh hưởng đến phản ứng kiềm-silica (ASR)

Phản ứng kiềm-silica (ASR) xảy ra khi ion hydroxyl và cation kiềm từ xi măng và bột thủy tinh hòa tan và phản ứng với pha silica của cốt liệu, dẫn đến hình thành gel có thể tích lớn gây nứt cấu trúc bên trong [26], [27]. Sự giãn nở ASR chịu ảnh hưởng mạnh bởi kích thước hạt bột thủy tinh, với các hạt lớn hơn thường gây giãn nở lớn hơn [28], [29]. Hơn 80% các nghiên cứu cho thấy việc sử dụng bột thủy tinh giúp cải thiện hiệu quả ASR, dù chỉ có dưới 50% đáp ứng tiêu chuẩn về giới hạn giãn nở cho phép [17], [25], [28], [29], [30].

2.2.4. Ảnh hưởng đến cường độ nén

Tuổi bảo dưỡng có ảnh hưởng quan trọng đến cường độ nén của bê tông chứa bột thủy tinh. Ở 28 ngày tuổi, khoảng 40% mẫu cho thấy sự tăng cường độ, trong khi 50% mẫu thể hiện sự suy giảm. Tại 90 ngày, hầu hết các nghiên cứu đều ghi nhận sự cải thiện cường độ nén, và ở 365 ngày, 100% các mẫu đều cho thấy cường độ được tăng cường [17], [19], [20], [21], [23], [24], [30]. Elaqra và cộng sự phát hiện rằng mặc dù bột thủy tinh có thể làm giảm cường độ nén ở 28 ngày, nhưng việc sử dụng 10% và 20% bột tinh có thể đạt cường độ nén cao hơn ở 90 ngày, đặc biệt khi ngâm bột thủy tinh trong nước trước khi sử dụng [19].

2.2.5. Ảnh hưởng đến tính chất độ bền

Bột thủy tinh cải thiện nhiều tính chất độ bền của bê tông. Về khả năng hấp thụ nước, sau thời gian dài, đặc biệt với bột thủy tinh có kích thước 0-25 μm , khả năng hấp thụ nước giảm đáng kể do các hạt mịn lấp đầy lỗ rỗng [31]. Đối với khả năng kháng thâm nhập clorua, đa số nghiên cứu chỉ ra rằng bột thủy tinh cải thiện hiệu quả này, với mức độ cải thiện tăng theo thời gian.

Từ những kết quả trong phần tổng quan nghiên cứu, nhóm tác giả tiến hành các thí nghiệm thực tế để đánh giá khả năng thay thế xi măng bằng bột thủy tinh tái chế trong bê tông, với mục tiêu xác định tỷ lệ thay thế phù hợp cho các ứng dụng trong công trình giao thông tại Việt Nam.

3. Vật liệu và thí nghiệm

3.1. Vật liệu

Nghiên cứu này sử dụng các vật liệu sau:

Xi măng: Xi măng Holcim PCB40 với khối lượng riêng $3,13 \text{ g/cm}^3$, độ dẻo tiêu chuẩn 28,5%, thời gian bắt đầu đông kết 140 phút và kết thúc đông kết 180 phút. Các chỉ tiêu cơ lý của xi măng đều đạt yêu cầu kỹ thuật.

Bột thủy tinh: Bột thủy tinh có kích thước hạt 75-150 μm , được nghiền từ thủy tinh phế thải. Thành phần hóa học được thể hiện tại [Bảng 1](#), tương đồng với thành phần thủy tinh thông thường (70-74% SiO_2 , 5-11% CaO và 12-16% Na_2O) trong các nghiên cứu trước đây.

Bảng 1. Thành phần hóa học của bột thủy tinh.

Khoáng chất	Tỉ lệ (%)
SiO_2	72,5
Al_2O_3	0,4
CaO	9,8
$\text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3$	0,2
MgO	3,3
Na_2O	13,7
K_2O	0,1

Cốt liệu lớn: Đá dăm từ mỏ đá Hóa An - Đồng Nai, có khối lượng riêng $2,733 \text{ g/cm}^3$, khối lượng thể tích xốp $1,419 \text{ g/cm}^3$, hàm lượng hạt thoi dẹt 8,11%, độ nén đập 6,67% và độ mài mòn Los Angeles 19,44%. Thành phần hạt nằm trong giới hạn quy định của TCVN 7570:2006 [32].

Cốt liệu nhỏ: Cát Tân Châu - An Giang có mô đun độ lớn 2,238, thuộc loại cát hạt vừa. Thành

phần hạt đảm bảo nằm trong phạm vi quy định của TCVN 7570:2006 [32].

3.2. Thí nghiệm mẫu bê tông

Nghiên cứu thực hiện với bê tông mác M200 có độ sụt $S_n = 8 \pm 2$ cm. Các cấp phối được thiết kế với 4 loại mẫu: mẫu chuẩn (100% xi măng),

mẫu thay thế 10%, 20% và 30% xi măng bằng bột thủy tinh. Ký hiệu các mẫu M10%, M20%, M30% - mẫu thay thế xi măng bằng bột thủy tinh với tỷ lệ 10%, 20%, 30% theo thứ tự. Các thành phần cấp phối chi tiết được trình bày trong **Bảng 2**.

Bảng 2. Thành phần cấp phối bê tông cho $1m^3$.

Thành phần	Đơn vị	Mẫu chuẩn	M10%	M20%	M30%
Xi măng	kg	320	288	256	224
Bột thủy tinh	kg	0	32	64	96
Đá	kg	1130	1130	1130	1130
Cát	kg	760	760	760	760
Nước	lít	195	175,5	156	135,5

Mẫu bê tông được chế tạo theo TCVN 3118:2022 [33], với 9 mẫu hình lập phương kích thước $150 \times 150 \times 150$ mm cho mỗi cấp phối để xác định cường độ chịu nén ở 7, 14 và 28 ngày tuổi. Các mẫu được bảo dưỡng trong môi trường ẩm (độ ẩm $\geq 95\%$) ở nhiệt độ $27 \pm 2^\circ C$ và thí nghiệm cường độ chịu nén theo TCVN 3118:2022 [33] (**Hình 1**).



Hình 1. Bảo dưỡng mẫu bê tông.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Độ sụt của hỗn hợp bê tông

Kết quả đo độ sụt của các hỗn hợp bê tông được thể hiện trong **Bảng 3**.

Kết quả cho thấy khi tăng tỷ lệ thay thế xi măng bằng bột thủy tinh, độ sụt của hỗn hợp bê tông có xu hướng giảm dần. Hiện tượng này có thể được giải thích bởi hình dạng góc cạnh của

hạt bột thủy tinh tạo ma sát lớn hơn và kích thước hạt ($75-150 \mu m$) lớn hơn đáng kể so với xi măng ($1-20 \mu m$). Mặc dù độ sụt giảm, tất cả các mẫu vẫn đáp ứng yêu cầu về độ sụt thiết kế (8 ± 2 cm), ngoại trừ mẫu M30% có độ sụt thấp hơn một chút (6,8 cm) nhưng vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được.

Bảng 3. Kết quả đo độ sụt của các cấp phối bê tông.

STT	Loại mẫu	Giá trị độ sụt S_n (cm)	Đánh giá
1	Mẫu chuẩn	9,1	Đạt
2	M10%	8,5	Đạt
3	M20%	8,0	Đạt
4	M30%	6,8	Đạt

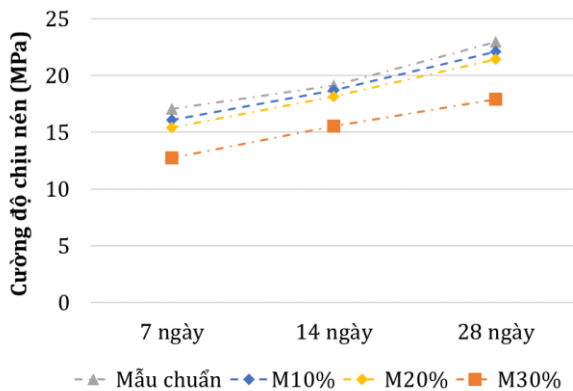
Kết quả này phù hợp với một số nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng bột thủy tinh có thể làm giảm tính công tác của hỗn hợp bê tông do các đặc tính như hình dạng góc cạnh, diện tích bề mặt riêng lớn và hiệu ứng lấp đầy gây cản trở chuyển động của hạt trong hỗn hợp. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng không quá lớn để làm giảm đáng kể khả năng thi công của bê tông ở các tỷ lệ thay thế được nghiên cứu.

4.2. Cường độ chịu nén

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của các mẫu bê tông ở các thời điểm 7, 14 và 28 ngày tuổi được thể hiện trong **Bảng 4** và **Hình 2**.

Bảng 4. Cường độ chịu nén trung bình của các mẫu bê tông (MPa).

Loại mẫu	7 ngày	14 ngày	28 ngày	So với mẫu chuẩn ở 28 ngày (%)
Mẫu chuẩn	17,03	19,11	22,92	100,00
M10%	16,06	18,70	22,06	96,32
M20%	15,40	18,18	21,44	93,54
M30%	12,76	15,56	17,90	78,07



Hình 2. Sự phát triển cường độ chịu nén trung bình của các mẫu bê tông theo thời gian.

Từ kết quả thí nghiệm, có thể thấy rõ ràng xu hướng giảm cường độ chịu nén khi tăng tỷ lệ thay thế xi măng bằng bột thủy tinh. Tuy nhiên, mức độ giảm không đáng kể ở tỷ lệ thay thế thấp. Với tỷ lệ thay thế 10%, cường độ bê tông ở 28 ngày tuổi đạt 96,32% so với mẫu đối chứng. Với tỷ lệ thay thế 20%, cường độ bê tông ở 28 ngày tuổi đạt 93,54% so với mẫu đối chứng. Cả hai tỷ lệ thay thế này đều cho kết quả cường độ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của bê tông mác M200. Tuy nhiên, khi tăng tỷ lệ thay thế lên 30%, cường độ giảm đáng kể, chỉ đạt 78,07% so với mẫu chuẩn, không đảm bảo yêu cầu kỹ thuật.

Về tốc độ phát triển cường độ theo thời gian, có thể nhận thấy rằng các mẫu có bột thủy tinh phát triển cường độ chậm hơn ở giai đoạn đầu (0-7 ngày) so với mẫu đối chứng. Tuy nhiên, tốc độ phát triển cường độ từ 7-14 ngày và 14-28 ngày của các mẫu có bột thủy tinh tỷ lệ 10% và 20% khá tương đồng với mẫu đối chứng, thể

hiện qua độ dốc của đường phát triển cường độ. Đáng chú ý là mẫu có tỷ lệ thay thế 30% không chỉ có cường độ ban đầu thấp mà còn duy trì tốc độ phát triển cường độ thấp hơn trong suốt quá trình bảo dưỡng, cho thấy giới hạn hiệu quả của việc thay thế xi măng bằng bột thủy tinh ở tỷ lệ cao.

Sự suy giảm cường độ khi tăng tỷ lệ thay thế xi măng bằng bột thủy tinh có thể được giải thích bởi một số cơ chế:

- Giảm hàm lượng xi măng: Xi măng là thành phần chính tạo cường độ trong bê tông, việc giảm hàm lượng xi măng tất yếu làm giảm tiềm năng phát triển cường độ;
- Hoạt tính pozolan chậm của bột thủy tinh: Phản ứng pozolan của bột thủy tinh diễn ra chậm hơn so với quá trình thủy hóa xi măng, dẫn đến sự phát triển cường độ chậm ở giai đoạn đầu;
- Khả năng gây phản ứng ASR: Với kích thước hạt bột thủy tinh lớn hơn 75 μm , có thể xảy ra phản ứng kiềm-silica (ASR) làm giảm cường độ của bê tông;
- Hàm lượng CaO thấp: Bột thủy tinh có hàm lượng CaO thấp (9,8%) so với xi măng (62-67%), làm giảm khả năng tạo ra canxi silicat hydrat (C-S-H) - thành phần chính tạo cường độ trong bê tông.

Tuy nhiên, ở tỷ lệ thay thế thấp (10-20%), những ảnh hưởng tiêu cực này được bù đắp một phần bởi hiệu ứng vi cầu, khi các hạt bột thủy tinh lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt cốt

liệu, làm cho bê tông đặc chắc hơn. Đồng thời, phản ứng pozolan của bột thủy tinh tạo ra thêm gel C-S-H, góp phần tăng cường độ của bê tông ở tuổi dài ngày.

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc thay thế 10-20% xi măng bằng bột thủy tinh có thể đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật đối với bê tông mác M200, phù hợp với các ứng dụng không chịu lực hoặc chịu lực thấp trong công trình giao thông như bó vỉa, dải phân cách, vỉa hè, và các kết cấu tương tự.

5. Kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo

5.1. Kết luận

Nghiên cứu này đã đánh giá việc sử dụng bột thủy tinh tái chế làm vật liệu thay thế xi măng trong sản xuất bê tông, đóng góp vào cơ sở khoa học cho ngành vật liệu xây dựng bền vững tại Việt Nam. Các kết quả thí nghiệm đã xác định tỷ lệ thay thế phù hợp và giới hạn ứng dụng của giải pháp này.

Đối với tỷ lệ thay thế 10-20% khối lượng xi măng bằng bột thủy tinh có kích thước hạt 75-150 μm , bê tông vẫn duy trì 93-96% cường độ chịu nén của bê tông truyền thống ở tuổi 28 ngày, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật cho bê tông mác M200. Tuy nhiên, khi tăng tỷ lệ thay thế lên 30%, cường độ giảm đáng kể xuống còn 78% so với mẫu đối chứng, không đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật cho các ứng dụng thực tế.

Mặc dù quá trình phát triển cường độ ở giai đoạn đầu (0-7 ngày) chậm hơn do phản ứng pozolan diễn ra chậm hơn quá trình thủy hóa xi măng, các mẫu có bột thủy tinh ở tỷ lệ thích hợp vẫn đạt cường độ đáp ứng yêu cầu ở 28 ngày tuổi.

Giải pháp này mang lại lợi ích kép về môi trường: vừa giúp xử lý rác thải thủy tinh khó phân hủy, vừa giảm phát thải CO_2 từ quá trình sản xuất xi măng. Kết quả nghiên cứu cho thấy bê tông chứa bột thủy tinh có tiềm năng ứng dụng cho các cấu kiện không chịu lực hoặc chịu

lực thấp trong công trình giao thông như bó vỉa, dải phân cách, và vỉa hè.

Nghiên cứu này góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc đưa bột thủy tinh tái chế vào sản xuất bê tông tại Việt Nam, hướng tới phát triển vật liệu xây dựng bền vững, tăng cường tái chế chất thải và giảm thiểu tác động môi trường của ngành xây dựng.

5.2. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Nghiên cứu trong tương lai nên tập trung vào tối ưu hóa công nghệ và mở rộng ứng dụng:

- Nghiên cứu ảnh hưởng của các kích thước hạt bột thủy tinh khác nhau đến tính chất của bê tông để xác định ngưỡng kích thước tối ưu cân bằng giữa chi phí nghiền và cải thiện hiệu suất;

- Đánh giá toàn diện các tính chất cơ học và độ bền của bê tông bột thủy tinh, bao gồm cường độ kéo, mô đun đàn hồi, từ biến, co ngót và khả năng chống thấm;

- Tiến hành các dự án xây dựng thí điểm sử dụng bê tông bột thủy tinh với giám sát hiệu suất dài hạn;

- Phát triển bê tông bột thủy tinh cường độ cao (>30 MPa) bằng cách kết hợp với nano silica, tro bay hoặc xỉ lò cao để mở rộng ứng dụng cho các kết cấu chịu lực;

- Nghiên cứu mô hình kinh tế tuần hoàn về thu gom, phân loại và tái chế rác thải thủy tinh cho ngành xây dựng để thúc đẩy ứng dụng rộng rãi, đồng thời tạo việc làm trong lĩnh vực kinh tế xanh.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Tuấn Anh: Phương pháp, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Phản hồi ý kiến phản biện, Viết – bản thảo gốc. **Nguyễn Tiến Thủy:** Phân tích dữ liệu, Xác thực, Viết – bản thảo gốc. **Trần Huy Hoàng:** Phương pháp, Giám sát, chỉnh sửa bản thảo.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

1st Nguyễn Tuấn Anh*. *Nhóm nghiên cứu Dữ liệu Lớn cho Kỹ thuật Xanh và Cơ sở Hạ tầng (BRIDGE), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh*

2nd Nguyễn Tiến Thủy. *Nhóm nghiên cứu Dữ liệu Lớn cho Kỹ thuật Xanh và Cơ sở Hạ tầng (BRIDGE), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh*

3rd Trần Huy Hoàng. *Tổng công ty Đầu tư phát triển đô thị và khu công nghiệp Việt Nam*

*Corresponding author: tuanh.nguyen@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] İ. B. Topçu and M. Canbaz, "Properties of concrete containing waste glass," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 2, pp. 267–274, Feb. 2004, doi: [10.1016/j.cemconres.2003.07.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003).
- [2] A. Mehta and D. K. Ashish, "Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 29, p. 100888, May 2020, doi: [10.1016/j.jobbe.2019.100888](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100888).
- [3] M. Amin, I. S. Agwa, N. Mashaan, S. Mahmood, and M. H. Abd-Elrahman, "Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High Performance Concrete with Recycled Waste Glass," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, 2023, doi: [10.3390/su15043085](https://doi.org/10.3390/su15043085).
- [4] P. Guo, W. Meng, H. Nassif, H. Gou, and Y. Bao, "New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure," *Construction and Building Materials*, vol. 257, p. 119579, Oct. 2020, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119579](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579).
- [5] J. Barrett, T. Cooper, G. P. Hammond, and N. Pidgeon, "Industrial energy, materials and products: UK decarbonisation challenges and opportunities," *Applied Thermal Engineering*, vol. 136, pp. 643–656, May 2018, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2018.03.049](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.049).
- [6] M. Saito and M. Shukuya, "Energy and material use in the production of insulating glass windows," *Solar Energy*, vol. 58, no. 4–6, pp. 247–252, Oct. 1996, doi: [10.1016/S0038-092X\(96\)00056-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00056-4).
- [7] A. Schmitz, J. Kamiński, B. Maria Scalet, and A. Soria, "Energy consumption and CO2 emissions of the European glass industry," *Energy Policy*, vol. 39, no. 1, pp. 142–155, Jan. 2011, doi: [10.1016/j.enpol.2010.09.022](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.022).
- [8] M. Ruth and P. Dell'Anno, "An industrial ecology of the US glass industry," *Resources Policy*, vol. 23, no. 3, pp. 109–124, Sep. 1997, doi: [10.1016/S0301-4207\(97\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4207(97)00020-2).
- [9] W. Dong, W. Li, and Z. Tao, "A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 172, p. 105664, Sep. 2021, doi: [10.1016/j.resconrec.2021.105664](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105664).
- [10] I. Mallum, A. R. Mohd.Sam, N. H. A. S. Lim, and N. Omolayo, "Sustainable Utilization of Waste Glass in Concrete: a Review," *Silicon*, vol. 14, no. 7, pp. 3199–3214, May 2022, doi: [10.1007/s12633-021-01152-x](https://doi.org/10.1007/s12633-021-01152-x).
- [11] S. Kumari, S. Agarwal, and S. Khan, "Micro/nano glass pollution as an emerging pollutant in near future," *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 6, p. 100063, May 2022, doi: [10.1016/j.hazadv.2022.100063](https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100063).
- [12] D. Paul, K. R. Bindhu, A. M. Matos, and J. Delgado, "Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution," *Construction and Building Materials*, vol. 355, p. 129217, Nov. 2022, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2022.129217](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129217).
- [13] R.-U.-D. Nassar and P. Soroushian, "Field investigation of concrete incorporating milled waste glass," *J solid waste technol mngmnt*, Vol. 37, no. 4, pp. 307–319, Nov. 2011, doi: [10.5276/JSWTM.2011.307](https://doi.org/10.5276/JSWTM.2011.307).
- [14] I. Almeshal, B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mustafa Mohamed, and A. Alaskar, "Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 253, p. 119146, Aug. 2020, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119146](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119146).
- [15] E. Harrison, A. Berenjian, and M. Seifan, "Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials," *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 4, p. 100064, Oct. 2020, doi: [10.1016/j.e.2020.100064](https://doi.org/10.1016/j.e.2020.100064).
- [16] A. M. Matos and J. Sousa-Coutinho, "Durability of mortar using waste glass powder as cement

- replacement,” *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 205–215, Nov. 2012, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027).
- [17] M. Kamali and A. Ghahremaninezhad, “Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 407–416, Nov. 2015, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010).
- [18] A. Hendi, D. Mostofinejad, A. Sedaghatdoost, M. Zohrabi, N. Naeimi, and A. Tavakolinia, “Mix design of the green self-consolidating concrete: Incorporating the waste glass powder,” *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 369–384, Feb. 2019, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.12.020](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.020).
- [19] H. A. Elaqla, M. A. A. Haloub, and R. N. Rustom, “Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 203, pp. 75–82, Apr. 2019, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.01.077](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.077).
- [20] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty, and A. Y. Aboshama, “Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 866–877, Oct. 2016, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016).
- [21] H. Lee, A. Hanif, M. Usman, J. Sim, and H. Oh, “Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 170, pp. 683–693, Jan. 2018, doi: [10.1016/j.jclepro.2017.09.133](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.133).
- [22] M. S. Ammari, M. B. Tobchi, Y. Amrani, A. Mim, M. Bederina, and A. Ferhat, “Influence of glass powder incorporation on the physical-mechanical properties of sand concrete,” *WJE*, vol. 20, no. 2, pp. 314–324, Mar. 2023, doi: [10.1108/WJE-08-2021-0474](https://doi.org/10.1108/WJE-08-2021-0474).
- [23] K. I. M. Ibrahim, “Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, p. e00630, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.cscm.2021.e00630](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00630).
- [24] S. Ibrahim and A. Meawad, “Towards green concrete: Study the role of waste glass powder on cement/superplasticizer compatibility,” *Journal of Building Engineering*, vol. 47, p. 103751, Apr. 2022, doi: [10.1016/j.job.2021.103751](https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103751).
- [25] H. Elaqla and R. Rustom, “Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste,” *Construction and Building Materials*, vol. 179, pp. 326–335, Aug. 2018, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.05.263](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.263).
- [26] G. Lee, T.-C. Ling, Y.-L. Wong, and C.-S. Poon, “Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 5, pp. 2611–2618, May 2011, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2010.12.008](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.008).
- [27] A. Shayan and A. Xu, “Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs,” *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 3, pp. 457–468, Mar. 2006, doi: [10.1016/j.cemconres.2005.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012).
- [28] M. C. Bignozzi, A. Saccani, L. Barbieri, and I. Lancellotti, “Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 55, pp. 45–52, Jan. 2015, doi: [10.1016/j.cemconcomp.2014.07.020](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.020).
- [29] J. Kim, C. Yi, and G. Zi, “Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar,” *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 242–246, Jan. 2015, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2014.11.007](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.007).
- [30] T. Ali-Boucetta, M. Behim, F. Cassagnabere, M. Mouret, A. Ayat, and W. Laifa, “Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag,” *Construction and Building Materials*, vol. 270, p. 121133, Feb. 2021, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121133](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121133).
- [31] M. Mirzahosseini and K. A. Riding, “Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM),” *Cement and Concrete Composites*, vol. 56, pp. 95–105, Feb. 2015, doi: [10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004).
- [32] *TCVN 7570:2006 - Cốt liệu cho bê tông và vữa (yêu cầu kỹ thuật)*, Tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam, 2006.
- [33] *TCVN 3118:2022 - Bê tông, Phương pháp xác định cường độ chịu nén*, Tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam, 2022.