

Nghiên cứu tổng quan về bê tông geopolyme siêu tính năng

Lê Thanh Hà^{1*}, Đỗ Trần Minh Vũ¹, Lê Văn Trường¹, Đoàn Trọng Kiên¹

¹ Trường Đại học Giao thông vận tải

TỪ KHOÁ

Bê tông geopolyme siêu tính năng
Tính công tác
Cường độ nén
Cường độ uốn
Độ bền

TÓM TẮT

Bê tông geopolyme là một loại bê tông mới sử dụng vật liệu silicat nhôm được kích hoạt bởi các dung dịch kiềm mạnh. Vật liệu này mang lại những lợi thế đáng kể so với bê tông truyền thống gốc xi măng Portland, đặc biệt là về các tính chất nhiệt, cơ học, độ bền và tác động môi trường thấp hơn. Bê tông geopolyme siêu tính năng (BTGSTN) là một loại bê tông geopolyme nâng cao, được phát triển để đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về vật liệu xây dựng siêu tính năng, thân thiện với môi trường và tiết kiệm chi phí. Bài báo này cung cấp một đánh giá toàn diện về những tiến bộ mới nhất trong phát triển BTGSTN, thảo luận về các tính chất kỹ thuật và việc chế tạo, các yếu tố môi trường, thiết kế thành phần cấp phối, tính công tác, tính chất cơ học, độ bền.

KEYWORDS

Ultra-High-Performance
Geopolymer Concrete
Workability
Compressive Strength
Flexural Strength
Durability

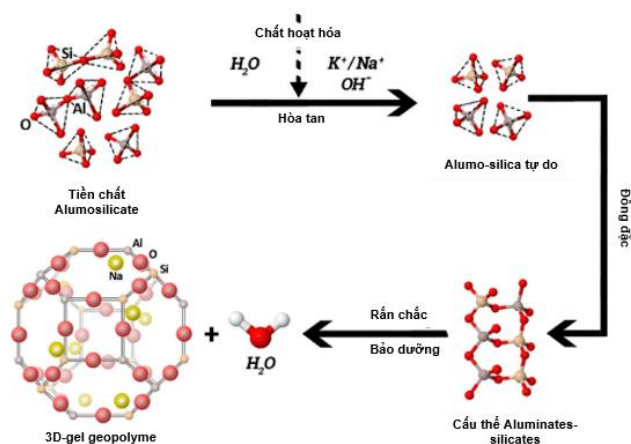
ABSTRACT

Geopolymer concrete is a novel class of concrete that utilizes aluminum silicate materials activated by highly alkaline solutions. This material offers significant advantages over traditional Portland cement-based concrete, particularly in terms of its thermomechanical properties, durability, and reduced environmental impact. Ultra-High-Performance Geopolymer Concrete (UHPGPC) is an advanced form of geopolymer concrete, designed to meet the increasing demand for ultra-high-strength, eco-friendly, and cost-effective construction materials. This paper provides a comprehensive review of the latest advancements in UHPGPC, discussing its technical and production properties, environmental parameters, mix design, fresh properties, mechanical properties, durability.

1. Giới thiệu

Bê tông siêu tính năng (BTSTN) là loại vật liệu tổng hợp làm từ xi măng Portland với cường độ chịu nén siêu cao, độ bền vượt trội và độ dẻo dai cao. BTSTN đặc biệt phù hợp để xây dựng các cấu kiện chịu lực chống nổ, cầu có nhịp dài và các công trình tiếp xúc với môi trường khắc nghiệt [1-3]. Mặc dù BTSTN có các đặc tính cơ học và độ bền cao, nhưng cũng có những lo ngại về sự phát triển của loại vật liệu này do lượng xi măng Portland được sử dụng lớn, có thể dẫn đến gia tăng lượng khí CO₂. Hàm lượng xi măng trong BTSTN thường từ 750–1200 kg/m³, cao gấp 2 đến 3 lần so với bê tông thông thường. Quá trình sản xuất xi măng Portland đòi hỏi một lượng lớn tài nguyên thiên nhiên, tiêu tốn nhiều năng lượng và phát thải CO₂ đáng kể. Cụ thể, để sản xuất một tấn clinker cần khoảng 6,65 MJ năng lượng và thải ra khoảng 0,83 tấn CO₂. Do đó, các nhà nghiên cứu đã tìm cách giảm lượng chất kết dính trong BTSTN và thay thế xi măng Portland bằng các vật liệu khác có nguồn gốc từ xi măng. Trong những năm gần đây, cộng đồng khoa học đã tích cực nghiên cứu để tạo ra bê tông có hàm lượng clinker thấp hoặc không chứa clinker. Một trong những giải pháp tiềm năng là sử dụng geopolyme, một loại chất kết dính ít carbon và không chứa clinker. Geopolymer được tạo ra bằng cách kích hoạt các nguồn aluminosilicat rắn như tro bay (FA), xỉ lò cao hạt (GBFS) và metakaolin (MK) bằng các dung dịch kiềm như silicat, cacbonat, hydroxit kiềm hoặc

sunfat. Geopolymer có thể được sử dụng để sản xuất bê tông geopolyme với các tính chất cơ học tương đương bê tông xi măng Portland.



Hình 1. Cơ chế và Quá trình Geopolyme [1].

Một bước tiến gần đây trong lĩnh vực vật liệu bền vững là việc phát triển bê tông Geopolyme siêu tính năng (BTGSTN), trong đó sử dụng geopolyme làm chất kết dính thay cho xi măng Portland. Trong những năm gần đây, đã có nhiều nghiên cứu nhằm cải thiện đặc tính cơ học của bê tông geopolyme, nhưng số lượng nghiên cứu về BTGSTN vẫn

*Liên hệ tác giả: halethanh@utc.edu.vn

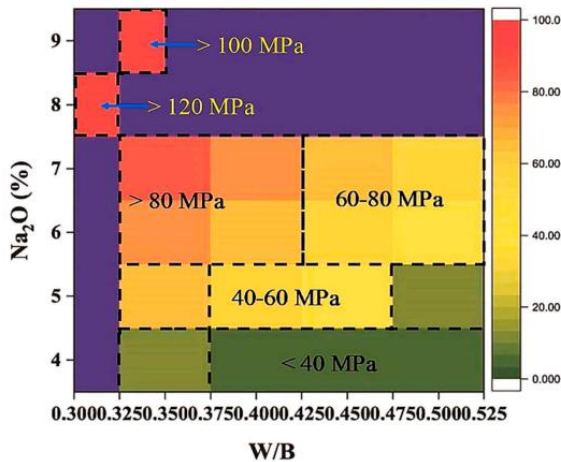
Nhận ngày 06/04/2025, sửa xong ngày 25/06/2025, chấp nhận đăng ngày 26/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2025.896>

còn hạn chế. Việc phát triển BTGSTN là rất quan trọng để đáp ứng nhu cầu về vật liệu có hiệu suất cao, chi phí hợp lý và thân thiện với môi trường trong xây dựng hiện đại. Vì lý do đó, nghiên cứu này cung cấp tổng quan cập nhật về các đặc tính kỹ thuật, quá trình sản xuất và các tiến bộ gần đây của BTGSTN.

2. Thiết kế thành phần cấp phối

Các đặc tính của bê tông geopolymer (GPC) có liên quan mật thiết đến thành phần hỗn hợp. Những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến cường độ và độ bền của GPC bao gồm tỷ lệ hóa chất kiềm trên chất kết dính, nồng độ silicat natri, loại và tỷ lệ của hóa chất kiềm, cũng như điều kiện bảo dưỡng. Tuy nhiên, tác động chính xác của nhiều yếu tố khác nhau đến tính chất cơ học của GPC vẫn chưa được làm sáng tỏ hoàn toàn. Do có nhiều thành phần tham gia, việc phát triển một thiết kế hỗn hợp toàn diện là một thách thức đáng kể. Một phương pháp đã được đề xuất để xây dựng thiết kế hỗn hợp sơ bộ hiệu quả cho bê tông geopolymer siêu hiệu suất cao trong các ứng dụng kỹ thuật dân dụng [2]. Các nhà nghiên cứu đã ghi nhận quá trình phát triển của một thiết kế hỗn hợp BTGSTN ban đầu bằng cách sử dụng các vật liệu hoạt hóa hóa học giàu alumino-silicate. Dung dịch hóa chất kiềm được sử dụng bao gồm sự kết hợp của dung dịch NaOH và NaSiO₃, trong khi các alumino-silicate bao gồm xỉ lò cao nghiền mịn (GBFS), tro trấu (RHA), silica fume (SF) và tro bay (FA).



Hình 2. Cường độ chịu nén của BTGSTN liên quan đến tỷ lệ nước/chất kết dính (W/B) và tỷ lệ Na₂O [2].

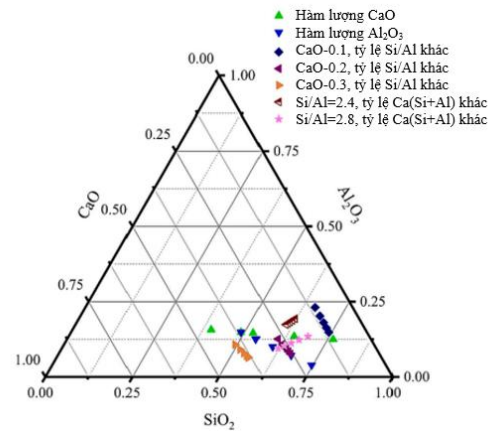
Nghiên cứu của các tác giả đã sử dụng phương pháp cường độ mục tiêu để thiết kế hỗn hợp sơ bộ của BTGSTN. Hơn nữa, Hình 2 cung cấp một minh họa chi tiết về phát hiện của họ liên quan đến cường độ nén của bê tông geopolymer so với tỷ lệ nước/chất kết dính (w/b) và tỷ lệ natri oxit trên chất kết dính. Dữ liệu này được so sánh với kết quả do Li et al. [3] đề xuất để tham chiếu. Tỷ lệ của từng thành phần trong thành phần, bao gồm xỉ lò cao nghiền mịn, tro trấu, tro bay, metakaolin và silica fume, có thể được xác định bằng cách sử dụng thành phần mol của các oxit tương ứng.

Cách tiếp cận này cho phép hiểu rõ hơn về sự đóng góp của từng thành phần đối với các đặc tính và hiệu suất tổng thể của vật liệu thu được. Tuy nhiên, điều quan trọng là phải phát triển một quan điểm học thuật để tiêu chuẩn hóa thiết kế hỗn hợp bê tông geopolymer nhằm thúc đẩy sự ứng dụng rộng rãi của nó.

Trong nghiên cứu [4], các tác giả đã phân loại các phương pháp thiết kế hỗn hợp BTGSTN hiện có thành ba cách tiếp cận chính: hướng đến hiệu suất, mô hình thống kê, và phương pháp cường độ mục tiêu. Quy trình xây dựng hỗn hợp dựa trên cường độ mong muốn bao gồm các bước sau:

- (i) xác định tỷ lệ hóa chất kiềm trên chất kết dính hoặc tỷ lệ nước trên chất kết dính liên quan đến cường độ nén;
- (ii) xác định hàm lượng nước hoặc chất kết dính dựa trên yêu cầu độ chảy hoặc cường độ;
- (iii) tính toán thể tích cốt liệu mịn theo tỷ lệ xi măng trên cốt liệu;
- (iv) điều chỉnh tỷ lệ hỗn hợp để đáp ứng yêu cầu thiết kế;
- (v) xác định thể tích cốt liệu thô dựa trên tỷ lệ cát trên cốt liệu để duy trì độ linh động thích hợp.

Cách tiếp cận theo định hướng hiệu suất có xu hướng tăng cường niềm tin của nhà cung cấp và thuyết phục người tiêu dùng về lợi ích của bê tông geopolymer hoặc bê tông xi hoạt hóa kiềm. Kỹ thuật mô hình hóa thống kê sử dụng phân tích độ nhạy để đánh giá tác động của các yếu tố chính lên đặc tính của bê tông geopolymer, bao gồm tỷ lệ kiềm, tỷ lệ nước trên chất kết dính và thành phần hóa học của tiền chất.



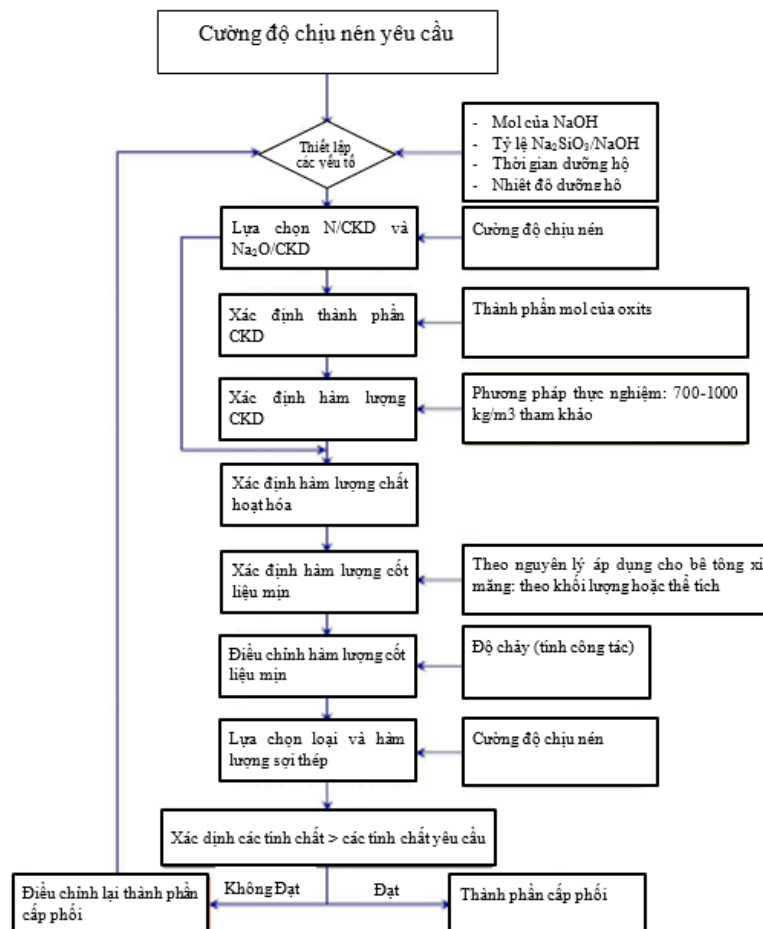
Hình 3. Thành phần mol của oxit được thiết kế cho chất kết dính [5].

Trong kết luận của họ, các nhà nghiên cứu đã khuyến nghị việc áp dụng phương pháp tiếp cận dựa trên hiệu suất để xác định bê tông geopolymer hoặc bê tông xi hoạt hóa kiềm, vì cách tiếp cận truyền thống liên quan đến thiết kế hỗn hợp và tỷ lệ nước trên chất kết dính không thể áp dụng một cách hiệu quả [6]. Do đó, tỷ lệ hỗn hợp phù hợp có thể được xác định bằng cách sử dụng các giá trị tối ưu của các yếu tố chính này. Bảng 1 trình bày thành phần cấp phối điển hình của BTGSTN [7].

Bảng 1. Thành phần cấp phối điển hình của BTGSTN.

Agg. types	Agg. Maximum size (mm)	Precursors	Activator	Maximum SF (%)	Molarity	W/B	Curing	Maximum Com. Str.	Maximum Flex. Str.
RS	2.36	FA, GBFS, SFu	SH, SS		/	0.32	Steam (22C)	170	33
QP, QS	0.50	SFu, MK	PH, SH	/	10	0.175-0.40	Sealing	178	/
QS	/	FA, GBFS, SFu	SH, SS		/	0.30	Water	162	29
QS, RS	2.0	FA, GBFS, SFu	SH, SS, PH		/	/	Ambient	175	12
QS	2.36	SFu, GBFS	SH, SS	2.0	8-16	/	Ambient	150	12
QP, RS	2.36	SFu, GBFS	SH, SS		/	/	Ambient (27C)	150	/
/	0.80	SFu, FA, GBFS	SH, SS	1.5	/	0.13	Thermal (90C-48hr)	114	15
LS	10.0	Wheat-Straw-ash	SH, SMS	/	9-16	/	Ambient	117	34

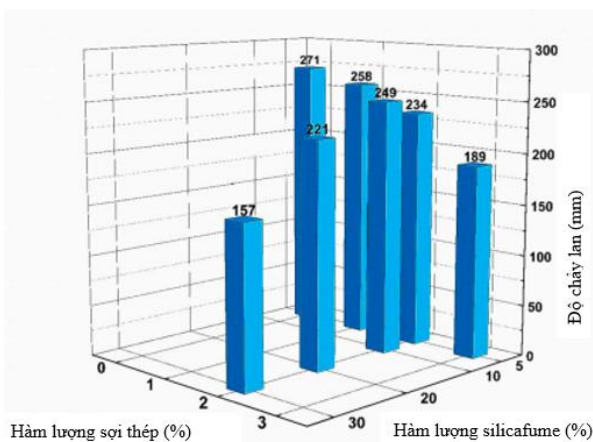
Trong đó: SFu – Khói silica, QP – Bột thạch anh, QS – Cát thạch anh, RS – Cát sông, LS – Đá vôi, SLS – Cát xi, SMS – Natri metasilicat, SS – Natri silicat, PH – Kali hydroxit, SH – Natri hydroxit, PC – Kali cacbonat.



Hình 4. Thiết kế thành phần cấp phối BTGSTN theo cường độ nén [2].

3. Các tính chất của hỗn hợp bê tông (bê tông tươi)

So với bê tông thông thường, do quá trình trùng hợp của bê tông geopolymere khác biệt với quá trình thủy hóa của xi măng Portland, nên các phụ gia điển hình như tác nhân điều chỉnh độ nhớt, chất giảm nước tầm cao, v.v., thường không có hiệu quả trong hầu hết các trường hợp. Điều này dẫn đến việc các chất hoạt hóa và vật liệu sử dụng trong hỗn hợp có ảnh hưởng quan trọng hơn. Nhiều nghiên cứu đã ghi nhận rằng việc tăng hàm lượng chất hoạt hóa và do đó làm tăng độ pH của chất kết dính geopolymere sẽ làm giảm thời gian đông kết của chúng [8]. Điều này cải thiện ảnh hưởng của các vật liệu chất kết dính phụ thêm (chủ yếu là silica fume) lên đặc tính lưu biến của BTGSTN [9-11]. Ứng suất chảy và độ nhớt của mẫu BTGSTN chứa 12,5 % silica fume là thấp nhất. Tuy nhiên, xu hướng này thay đổi khi lượng silica fume vượt quá 15 % hoặc giảm xuống dưới 5 % [12]. Tương tự, việc tăng lượng silica fume từ 10 % lên 20 % làm thay đổi đặc tính lưu biến, trong đó lượng silica fume cao hơn làm giảm tính chảy dẻo của hỗn hợp [13]. Điều này cũng có thể thấy trong.



Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép và silica fume đến độ chảy lan của BTGSTN [14].

Tính chảy dẻo của hỗn hợp được tối ưu hóa cho BTGSTN cũng bị ảnh hưởng bởi hàm lượng sợi trong khoảng 0 đến 3 %. Chiều dài và hình dạng sợi cũng ảnh hưởng đáng kể đến xu hướng này. Hàm lượng sợi có xu hướng làm giảm tính công tác của vật liệu nói chung. Điều này là do sự hình thành khung xương, cản trở khả năng chảy của hỗn hợp bê tông [13, 14]. Ngoài ra, chiều dài và hình dạng của sợi cũng ảnh hưởng đến cấu trúc này. Theo các nhà sản xuất, sợi có đầu móc mang lại tính chảy dẻo cao hơn so với các dạng sợi thẳng hoặc gợn sóng. Đặc điểm này chủ yếu bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ nước/chất kết dính (w/b), khi tăng tỷ lệ này sẽ tạo ra một lớp hồ dày hơn, giúp giảm sự kết cụm và ma sát của sợi [15].

Một khía cạnh quan trọng khác đặc trưng cho BTGSTN, là việc bổ sung cát thạch anh, một thành phần thường có mặt trong các hỗn hợp nhằm đạt được các đặc tính cơ học vượt trội. Trong bối cảnh này, đã có ghi nhận rằng việc bổ sung cát thạch anh làm giảm tính chảy dẻo của vật

liệu tổng hợp, đặc biệt là khi sử dụng ở kích thước hạt nhỏ hơn do diện tích bề mặt hạt tăng lên, kéo theo ma sát cao hơn [16]. Như thể hiện trong việc thêm cát thạch anh ở tỷ lệ 20–40 % làm giảm tính chảy dẻo xuống còn 22 %, 28 % và 22,5 % đối với các hỗn hợp có hàm lượng silica fume lần lượt là 0 %, 15 % và 30 %. Mặc dù ảnh hưởng này không giống như tác động trực tiếp của các yếu tố chính của GEO (chẳng hạn như nồng độ mol và hàm lượng chất kích hoạt), nhưng nó có thể là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến đặc tính tươi tổng thể của BTGSTN do hàm lượng cốt liệu cao trong quá trình phát triển của nó.

4. Tính chất cơ học

4.1. Cường độ nén của BTGSTN

Việc kết hợp các loại phụ gia pozzolan khác nhau vào hỗn hợp BTGSTN đã mang lại những kết quả khác nhau về cường độ nén. Khi metakaolin (MK) được sử dụng làm nguồn alumino-silicate trong các mẫu BTGSTN, cường độ nén giảm so với các hỗn hợp BTGSTN chứa xỉ hạt lò cao (GBFS). Điều này có thể là do MK có tỷ lệ canxi thấp hơn so với GBFS. Hàm lượng canxi cao trong nguồn alumino-silicate giúp thúc đẩy sự hình thành cấu trúc canxi-alumin-silicat trong vi cấu trúc, từ đó tăng cường đặc tính chịu lực của BTGSTN [18-20]. Hàm lượng nước dư thừa trong hỗn hợp BTGSTN cũng có thể làm giảm cường độ nén do cản trở quá trình polymer hóa [21, 22]. Trong một nghiên cứu, khi tỷ lệ nước/chất kết dính (w/b) là 0,4, cường độ nén đạt 69 MPa, trong khi tỷ lệ w/b là 0,25 giúp đạt cường độ nén cao nhất là 199 MPa sau 56 ngày [8]. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tối ưu hóa tỷ lệ w/b để đạt được hiệu suất cơ học tối ưu cho BTGSTN.

Cường độ nén của BTGSTN được quan sát thấy tăng lên khi tỷ lệ sợi thép (SFs) được gia tăng. Trong một nghiên cứu [15], khi tích hợp 3 % SFs vào BTGSTN, cường độ nén cao nhất đạt 170.3 MPa (khi bảo dưỡng bằng hơi nước) và 157.7 MPa (khi bảo dưỡng thông thường) (Hình 8(a)). Điều này có thể là do sợi thép làm chậm sự phát triển của vết nứt vi mô và vết nứt vĩ mô. Tuy nhiên, sợi thép cũng làm giảm tính lưu biến của BTGSTN, vì vậy việc bổ sung quá 3% SFs, mặc dù có thể tăng cường độ nén, nhưng không được khuyến nghị trong quá trình phát triển BTGSTN [23]. Dưới điều kiện bảo dưỡng thông thường, cường độ nén có xu hướng tăng theo chiều dài sợi. Tuy nhiên, khi bảo dưỡng bằng hơi nước, việc tăng chiều dài sợi lại dẫn đến kết quả mâu thuẫn (Hình 8(b)), cho thấy sự tương tác phức tạp giữa chiều dài sợi và phương pháp bảo dưỡng.

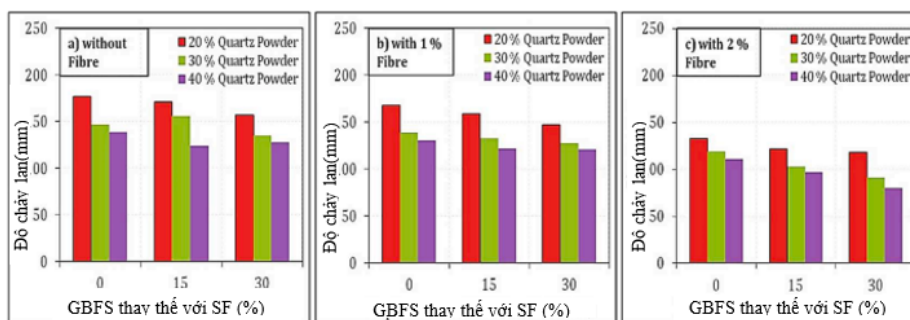
Trong nghiên cứu này [24], đã đánh giá cường độ nén của BTGSTN được biến đổi với bột cao su phế thải (WRP), thủy tinh phế thải (GW) và đá cẩm thạch phế thải (MW). Khi bổ sung 15 % GW, cường độ nén cao nhất đạt 179 MPa sau 90 ngày bảo dưỡng, so với mẫu đối chứng có cường độ 161 MPa trong cùng khoảng thời gian. Tuy nhiên, việc bổ sung 15 % WRP làm giảm cường độ nén xuống còn 120 MPa sau 90 ngày. Ở 56 ngày, việc thêm 5 % GW giúp đạt cường độ nén 154 MPa, trong khi 15 % GW giúp đạt 159 MPa (ở 56 ngày) và 179 MPa (ở 90 ngày). Mật độ ma trận chặt chẽ được hình thành bởi SiO₂ trong các hạt thủy tinh liên kết với ma trận geopolymere giúp tăng cường độ nén

(Hình 9). Tahwia et al. [25] đã đánh giá cường độ nén của BTGSTN bằng cách thay thế cốt liệu mịn bằng thủy tinh nghiền (CG), gốm nghiền (CC) và cao su vụn (CR). Kết quả cho thấy sự phát triển cường độ nén bị ảnh hưởng bởi việc tích hợp các vật liệu phế thải này. Khi thay thế 7,5 %, CG1 đạt cường độ nén cao nhất sau 28 ngày là 149 MPa, tương đương với hỗn hợp đối chứng (152 MPa). Tuy nhiên, khi bổ sung CR, cường độ nén sau 28 ngày giảm xuống mức thấp nhất là 102 MPa. Thay thế 7,5 % CC làm giảm cường độ sau 28 ngày từ 152 MPa xuống còn 131 MPa. Các tác giả lưu ý rằng hình dạng và kết cấu không đồng đều của các vật liệu phế thải này có thể dẫn đến hỗn hợp bê tông kém đặc chắc hơn, ảnh hưởng đến hiệu suất cơ học tổng thể. Ngoài ra, cao su vụn (CR) – một vật liệu linh hoạt và có độ cứng thấp hơn – có thể làm giảm khả năng chịu tải của ma trận bê tông. Hơn nữa, liên kết giữa các vật liệu phế thải và ma trận geopolimer có thể không chặt chẽ bằng liên kết giữa cốt liệu mịn và ma trận, dẫn đến các vùng giao diện yếu hơn và do đó làm giảm cường độ nén.

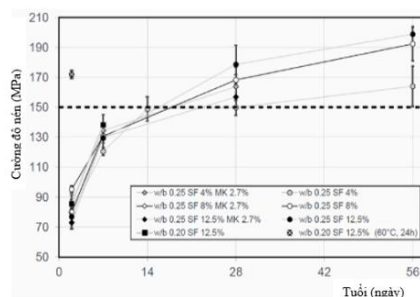
4.2. Ứng xử chịu uốn của BTGSTN

Sợi thép (SFs) được coi là vật liệu thiết yếu để cải thiện độ dẻo dai và đặc tính uốn của bê tông truyền thống cũng như bê tông geopolimer [26]. Wu et al. [27] báo cáo rằng chỉ cần 1,5 % SFs trong bê tông geopolimer siêu hiệu suất (BTGSTN) có thể làm tăng năng lượng gãy uốn lên gấp 30 lần. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng lượng sợi thấp như vậy có thể ảnh hưởng đến độ giòn của BTGSTN. Liu et al. [13] đã thực hiện một nghiên cứu để kiểm tra ảnh hưởng của sợi thép đối với đặc tính gãy và cường độ của BTGSTN. Các tác giả đã sử dụng ba tỷ lệ thể tích khác nhau của SFs (0 %, 1 %, 2 %) và bốn tỷ lệ silica

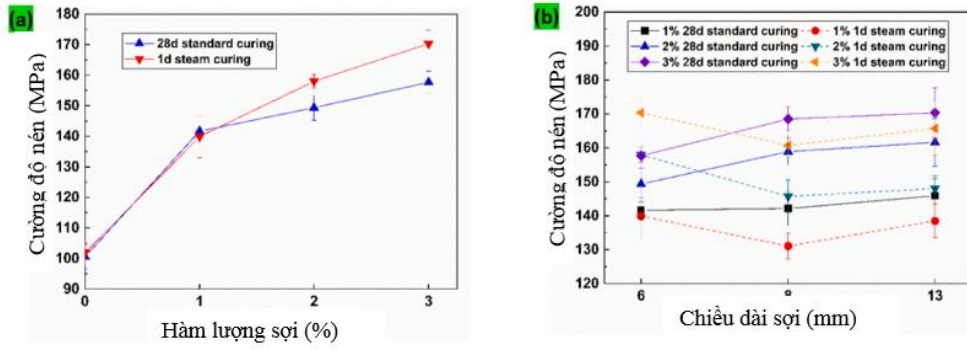
fume (SF) (5 %, 10 %, 20 % và 30 %) theo khối lượng của chất kết dính. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc bổ sung SF vào BTGSTN giúp cải thiện khả năng chống gãy và cường độ, bao gồm cường độ nén, kéo bứt và uốn, cũng như mô đun đàn hồi. Việc tăng hàm lượng SF làm tăng đáng kể khả năng chịu lực của BTGSTN, khẳng định kết quả của các nghiên cứu trước đây về bê tông BTSTN dựa trên xi măng Portland [28]. Sự cải thiện này có thể được lý giải bởi vai trò của silica fume trong việc giảm khoảng cách trung bình giữa các sợi, đồng thời tăng áp lực liên kết giữa sợi và ma trận bê tông. Điều này giúp hạn chế quá trình hình thành và lan rộng của vết nứt trong vật liệu. Khối lượng của SF đóng một vai trò quan trọng trong việc ảnh hưởng đến đặc tính ma trận của chất kết dính trong BTGSTN, điều này, theo đó, ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất cường độ của nó. Các hồ geopolimer bám vào bề mặt của sợi thép, mặc dù chúng xuất hiện ít hơn trong các mẫu chứa 10% SF. Do đó, những quan sát này chỉ ra rằng đặc tính cường độ của BTGSTN phụ thuộc mạnh mẽ vào sự kết dính giữa sợi và ma trận liên quan đến lượng SF, như đã được xác nhận bởi các nghiên cứu trước đó [29]. Trong một nghiên cứu [14], các tác giả đã kiểm tra tác động của hàm lượng SF đối với đường cong tải trọng-chuyển vị của bê tông geopolimer siêu hiệu suất, như được minh họa trong Hình 9 (a và d). Họ quan sát thấy rằng hình dạng của đường cong thay đổi khi hàm lượng silica fume tăng lên. Như đã đề cập trước đó, tính năng chịu uốn của các mẫu thử suy giảm khi có 10 % SF. Khi tiếp tục tăng hàm lượng silica, diện tích của đường cong mở rộng và mô hình răng cưa ở phần đi xuống trở nên tinh tế hơn. Hiệu quả gia cường liên quan đến các sợi và ma trận được cho là ảnh hưởng đến bản chất răng cưa của phần đi xuống của đường cong [30]. Tải trọng đỉnh tối đa đạt được khi sử dụng 30 % SF.



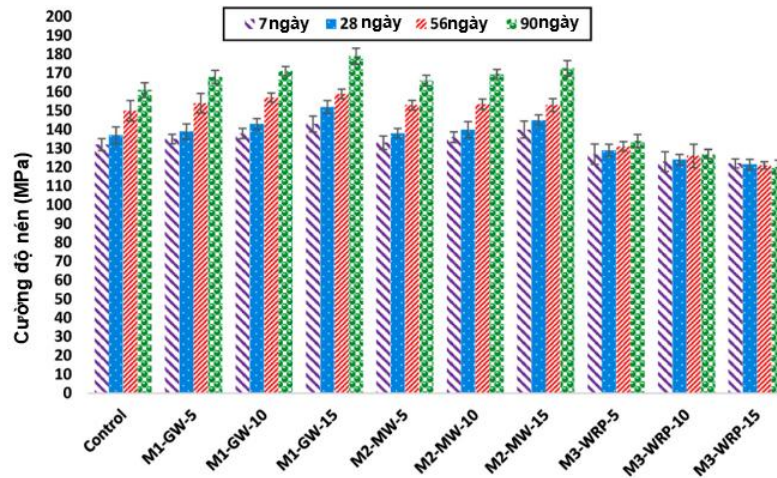
Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng cát quartz đến độ chảy lan của BTGSTN [17].



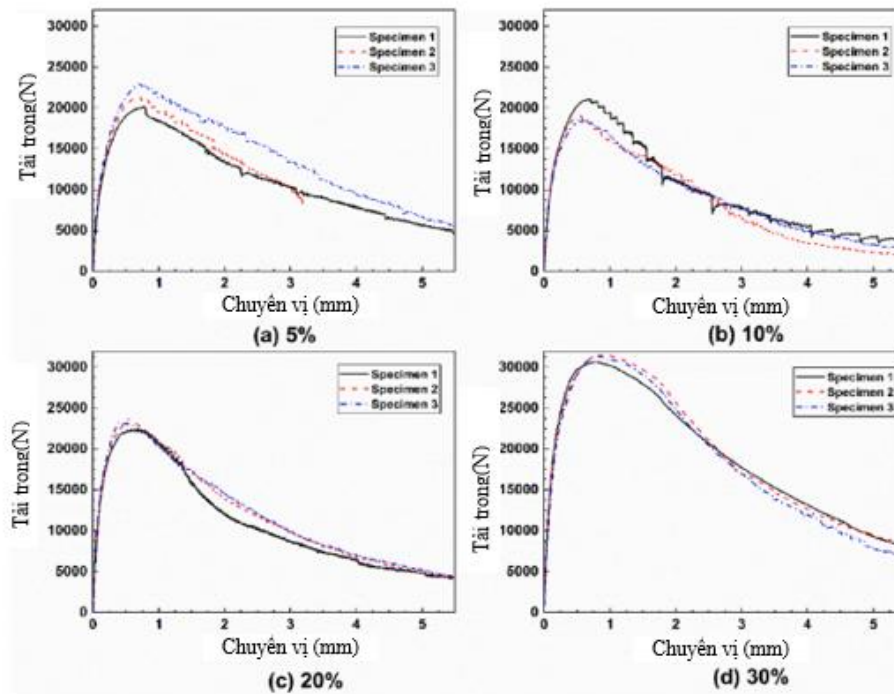
Hình 7. Sự phát triển cường độ nén của BTGSTN với hàm lượng MK và SF khác nhau [8].



Hình 8. Ảnh hưởng của sợi thép đến cường độ nén của BTGSTN (a) hàm lượng (b) chiều dài sợi [15].



Hình 9. Ảnh hưởng của các loại nguyên liệu khoáng đến cường độ nén của BTGSTN[24].



Hình 10. Quan hệ tải trọng – chuyển vị của BTGSTN với (a) 5 %, (b) 10 %, (c) 20 %, và (d) 30 % SF.

Đối với các vật liệu geopolymer, việc bổ sung SF làm giảm mức độ phản ứng của FA và GBFS do mô đun của dung dịch kiềm tăng lên, điều này giải thích cho sự suy giảm cường độ uốn khi có 10% SF. Khi thêm SF, chất lượng vi cấu trúc được cải thiện, dẫn đến độ dẻo dai tăng lên nhờ vào sự phát triển của ma trận chất kết dính đặc chắc [30]. So với các hệ chất kết dính khác, các yếu tố như sự sắp xếp, hình dạng, kích thước và liều lượng của sợi có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất của bê tông khi chịu tải trọng uốn. Điều thú vị là, trong khi các sợi xoắn và gợn sóng được công nhận là giúp tăng cường đặc tính cường độ của BTSTN thông thường, chúng lại mang lại hiệu suất gia cường kém trong BTGSTN [31]. Điều này có thể do sự giòn của chất kết dính geopolymer, có thể dẫn đến ứng suất tập trung thay vì phân bố đồng đều trong vi cấu trúc của sợi xoắn. Do đó, cường độ uốn của bê tông geopolymer siêu hiệu suất dường như bị ảnh hưởng đáng kể bởi chiều dài của sợi thép hơn là số lượng hoặc hình dạng của sợi được sử dụng [32]. Sự khác biệt này có thể tạo điều kiện thuận lợi cho việc tích hợp nhiều loại sợi mà không cần chuẩn bị bổ sung, qua đó tăng cường khả năng thích ứng của các vật liệu composite này. Gần đây, BTGSTN đã được sản xuất bằng cách kết hợp sợi thép và sợi polymer. Đáng chú ý, các nghiên cứu [33, 34] đã sử dụng polyethylene và polyvinyl alcohol làm thành phần sợi chính, quan sát thấy sự gia tăng đáng kể về khả năng chịu tải, hấp thụ năng lượng và năng lượng gãy vỡ lên đến 70 lần trong các mẫu có chứa các sợi này.

Althoe et al. [35] đã đánh giá tác động của các tỷ lệ Nano-silica khác nhau (5 %, 10 % và 15 %) và sợi polypropylene (PPF) (1 %, 2 % và 3 %) đối với hành vi chịu uốn và tải-triệt tiêu của bê tông geopolymer siêu cường độ. Các tác giả quan sát thấy rằng cường độ uốn tăng từ 22,7 MPa lên 25,43 MPa, với sự bổ sung 1 %–2 % sợi polypropylene sau 90 ngày [36]. Sự cải thiện này có thể được giải thích bởi sự gia tăng diện tích tiếp xúc giữa PPF và ma trận bê tông, giúp tăng cường khả năng chống chịu tải trọng bên ngoài của ma trận. Tuy nhiên, hàm lượng nano-silica hiện diện cũng ảnh hưởng đáng kể đến cường độ uốn. Hành vi phức tạp của nano-silica xuất phát từ sự cân bằng tinh tế giữa vi cấu trúc dày đặc và chất hoạt hóa hóa học được điều chỉnh. Các tác giả [35] ghi nhận rằng độ bền gãy của mẫu cơ bản thể hiện phản ứng tương tự với các mẫu có chứa PPF và NS cho đến khi vết nứt ban đầu xảy ra, sau đó đường cong bắt đầu khác biệt khi bổ sung sợi polypropylene. Các tác giả đã đánh giá tác động kết hợp của nano-silica và sợi polypropylene, cho thấy rằng độ dẻo của bê tông được cải thiện với liều lượng tối ưu là 10 % nano-silica và 2 % PPF. Ngoài ra, hỗn hợp tối ưu này còn cho thấy độ bền tăng lên, cường độ dư cao hơn và giảm sự thư giãn tải so với các mẫu không chứa sợi và NS.

Tahwia et al. [25] đã chỉ ra rằng việc tăng hàm lượng thủy tinh nghiền đáng kể làm tăng cường độ uốn của BTGSTN. Sự cải thiện này có thể được giải thích bởi sự tương tác giữa silica có trong xi hoạt hóa kiềm và các hạt thủy tinh nghiền, điều này làm tinh chỉnh vi cấu trúc của ma trận bê tông. Kết quả là, khi nồng độ thủy tinh nghiền tăng từ 7,5 % lên 22,5 %, cường độ uốn tăng lần lượt 0,12 %, 1,27 % và 2,74 % so với hỗn hợp tham chiếu có cường độ uốn là 12,75 MPa. Wu et al. [30] đã tích hợp sợi thép vào hỗn hợp để đánh giá cường độ uốn của

BTGSTN. Các tác giả ghi nhận rằng cường độ uốn tối đa tăng từ 12,1 MPa lên 18,9 MPa khi hàm lượng sợi thép tăng từ 1 % lên 3 %. Việc tăng số lượng sợi thép làm tăng diện tích tiếp xúc giữa sợi thép và ma trận bê tông, từ đó cải thiện khả năng chịu tải của vật liệu. Tuy nhiên, ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến cường độ uốn tối đa lại phức tạp hơn. So với các mẫu có 5 % sợi thép, các mẫu có 10 % silica fume giảm 8,7 % cường độ uốn. Khi hàm lượng silica fume tăng từ 10 % lên 20 % và 30 %, cường độ uốn tăng từ 14,6 MPa lên 17,2 MPa và 23,1 MPa. Các nghiên cứu trong tương lai trong lĩnh vực này có thể khám phá sự phát triển của các chất kết dính geopolymer mới, sợi và phụ gia thay thế, cũng như ảnh hưởng của các phương pháp bảo dưỡng khác nhau đối với hành vi uốn và khả năng chịu tải của BTGSTN. Thêm vào đó, việc nghiên cứu hiệu suất dài hạn, độ bền và khả năng chống chịu các điều kiện môi trường khắc nghiệt là rất quan trọng để đảm bảo độ tin cậy của vật liệu trong các ứng dụng đa dạng.

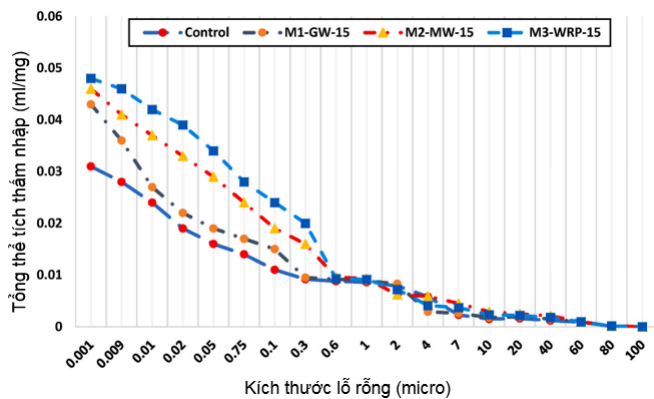
5. Đặc tính độ bền

5.1. Độ rỗng

Một trong những lợi ích đáng mong đợi nhất của bê tông siêu tính năng (BTSTN) là tuổi thọ kéo dài, giúp giảm thiểu nhu cầu phục hồi và sửa chữa. Do đó, các vật liệu siêu tính năng được thiết kế để có độ nhay thấp hơn đối với hiện tượng nứt, độ bền cao hơn và độ rỗng giảm. Tuy nhiên, do chất kết dính geopolymer có độ rỗng cao hơn so với bê tông xi măng thông thường, nên sự kết nối mạng lưới lỗ rỗng và tổng độ rỗng của các vật liệu tổng hợp này đóng vai trò quan trọng trong việc xác định các đặc tính độ bền của chúng, chẳng hạn như khả năng chống phong hóa, hiệu suất nhiệt và khả năng chống chu kỳ đóng băng – tan băng.

So với bê tông thông thường, bê tông geopolymer (BTG) thường được công nhận là có độ rỗng cao hơn, khiến cho việc phát triển bê tông geopolymer siêu tính năng (BTGSTN) trở nên phức tạp hơn [37]. Tuy nhiên, vật liệu bê tông có thể được phân loại dựa trên độ rỗng của chúng thành lỗ rỗng bị giữ lại, lỗ rỗng mao quản và lỗ rỗng gel. Trong một nghiên cứu [24] đánh giá tổng độ rỗng của BTGSTN được cải tiến bằng cách sử dụng WRP, GW và MW thông qua phương pháp đo độ xâm nhập thủy ngân (mercury intrusion porosimetry), các tác giả nhận thấy rằng mẫu M1-GW-15 có độ rỗng thấp hơn so với M2-MW-15 và M3-WRP-15, phù hợp với kết quả cường độ nén.

Kích thước hạt của chất thải kính (GW) và chất thải đá cẩm thạch (MW) có ảnh hưởng đến độ rỗng và sự kết nối lỗ rỗng trong BTGSTN. Các hạt mịn giúp lấp đầy các khoảng trống, tạo ra một cấu trúc vi mô dày đặc hơn và giảm độ rỗng. Việc tối ưu hóa kích thước hạt giúp tăng mật độ đóng gói của vật liệu. Tính pozzolanic của chất thải kính (GW) và chất thải đá cẩm thạch (MW) giúp tinh chỉnh hệ thống lỗ rỗng. Trong khi đó, bê tông chứa bột cao su phế thải (WRP) có tổng thể tích lỗ rỗng cao nhất, cho thấy hiệu quả geopolymer hóa bị giảm. Khi thay thế 15 %, độ rỗng tích lũy tăng lần lượt 29,53 % (GW), 43,78 % (MW) và 55,61 % (WRP) so với hỗn hợp tham chiếu. GW góp phần hình thành các pha bổ sung, giúp giảm độ rỗng và tạo ra cấu trúc vi mô đặc chắc hơn.



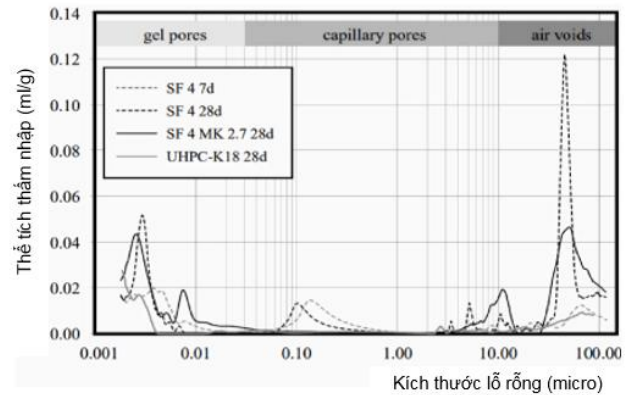
Hình 11. Độ rỗng của BTGSTN theo kết quả thử nghiệm MIP ở tuổi 90 ngày [24].

Hình 11 mô tả tác động của các chất hoạt hóa kiềm đối với sự phát triển mạng lưới lỗ rỗng và quá trình polymer hóa trong vữa geopolimer. Mẫu chứa kết hợp NaOH và NaSiO₃ tạo ra nhiều lỗ rỗng gel hơn so với mẫu chỉ được hoạt hóa bằng NaOH. Các nghiên cứu trước đây, như nghiên cứu của Wetzal et al. [8], chỉ ra rằng độ rỗng của BTGSTN bao gồm các lỗ rỗng khí hình thành trực tiếp từ quá trình polymer hóa trong quá trình đóng rắn. Để giảm mức độ rỗng, một lượng nhỏ metakaolin (MK) được đề xuất nhờ hàm lượng nhôm cao, giúp thúc đẩy quá trình polymer hóa và có thể ngăn chặn sự hình thành lỗ rỗng gel [38]. Ví dụ, Ranjbar et al. [39] đã nghiên cứu tác động của kỹ thuật ép nóng lên hành vi của BTG thông qua một loạt thí nghiệm. Theo nghiên cứu này, phương pháp ép nóng tỏ ra hiệu quả hơn đáng kể so với các phương pháp tiềm năng khác như giảm tổng độ rỗng, lựa chọn chất hoạt hóa kiềm phù hợp và xử lý nhiệt. Ngoài ra, các thành phần khác của BTGSTN, như tỷ lệ sợi thép, cũng ảnh hưởng đến sự thay đổi tỷ lệ rỗng [40]. Độ rỗng của BTGSTN là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đáng kể đến các đặc tính cơ học, độ bền và hiệu suất tổng thể của nó như một giải pháp thay thế bền vững cho bê tông xi măng Portland truyền thống. Tầm quan trọng của độ rỗng trong BTGSTN thể hiện qua tác động trực tiếp đến độ bền và cường độ của bê tông. Độ rỗng cao hơn thường dẫn đến cường độ thấp hơn và giảm khả năng chống suy thoái môi trường. Do đó, các nhà nghiên cứu đã và đang khám phá nhiều phương pháp để giảm độ rỗng, bao gồm tối ưu hóa loại và tỷ lệ chất hoạt hóa, sử dụng metakaolin và áp dụng kỹ thuật ép nóng.

Việc phát triển BTGSTN có độ rỗng thấp vẫn là một thách thức phức tạp do sự khác biệt vốn có về độ rỗng giữa chất kết dính geopolimer và bê tông xi măng Portland. Tuy nhiên, những tiến bộ trong khoa học vật liệu và kỹ thuật chế tạo tiếp tục góp phần nâng cao hiểu biết về các yếu tố ảnh hưởng đến độ rỗng trong BTGSTN, từ đó cho phép tạo ra các vật liệu hiệu quả và bền vững hơn.

Tương lai của BTGSTN đầy hứa hẹn khi nó mang lại nhiều cơ hội tối ưu hóa và cải thiện hơn nữa về độ rỗng cũng như các đặc tính vật liệu khác. Khi nhu cầu về vật liệu xây dựng bền vững và hiệu suất cao

ngày càng tăng, khả năng ứng dụng của BTGSTN được kỳ vọng sẽ mở rộng trong nhiều lĩnh vực, bao gồm các dự án hạ tầng, cơ sở công nghiệp và công trình dân dụng.



Hình 12. Độ rỗng của BTGSTN được đánh giá bằng phương pháp thẩm thủy ngân [8].

5.2. Độ thấm nhập ion Clo

Các nhà nghiên cứu thường sử dụng phương pháp kiểm tra độ thấm thấu ion clorua nhanh để đánh giá dòng ion đi qua mạng lưới rỗng trong bê tông. Đã được chứng minh rằng sự gia tăng số lượng lỗ rỗng trong bê tông dẫn đến độ rỗng cao hơn, cho phép dòng ion lớn hơn. Trong bê tông siêu tính năng (BTSTN), lượng vật liệu kết dính tối thiểu tạo ra một cấu trúc vi mô có mật độ cao và độ rỗng thấp, dẫn đến dòng ion yếu hơn [41]. Ngược lại, bê tông geopolimer siêu tính năng (BTGSTN) có độ rỗng cao hơn so với BTSTN và có xu hướng thể hiện dòng ion mạnh hơn. Trong các mẫu BTGSTN có sợi, khả năng chống lại sự phát triển của vết nứt và độ thấm thấp hơn so với các loại bê tông cốt sợi khác góp phần làm giảm dòng ion đi qua vật liệu. Sự giảm dòng ion này cuối cùng dẫn đến độ bền cao hơn của BTGSTN cốt sợi [42, 43]. Việc bổ sung sợi trong BTGSTN đã được chứng minh là làm giảm độ dẫn điện giữa các lỗ rỗng bằng cách tạo liên kết chắc chắn với ma trận kết dính, từ đó nâng cao khả năng chống xâm nhập ion clorua của bê tông.

Việc sử dụng sợi polypropylen (PPF) kết hợp với sợi thép (SF) đã được phát hiện là có khả năng chống xâm nhập ion clorua tốt hơn so với chỉ sử dụng SF trong BTGSTN [40]. Khả năng chống thấm được cải thiện này có thể được lý giải bởi sự hình thành vùng liên kết chặt chẽ hơn giữa cốt liệu, sợi và ma trận kết dính, dẫn đến độ rỗng thấp hơn và độ thấm giảm trong BTGSTN. Những đặc tính này góp phần nâng cao độ bền của BTGSTN cốt sợi. Kết quả thử nghiệm RCP và ER trên bê tông geopolimer siêu tính năng (BTGSTN) không chỉ bị ảnh hưởng bởi lỗ mao quản mà còn bởi độ dẫn điện của dung dịch trong lỗ rỗng. Do đó, các thử nghiệm này (ER và RCPT) có thể bị tác động bởi độ dẫn điện của dung dịch trong lỗ rỗng. Ví dụ, các mẫu BTGSTN có độ kiềm thấp thể hiện độ dẫn điện giảm so với các mẫu có độ kiềm cao. Hạn chế này áp dụng cho cả thử nghiệm điện trở suất và thử nghiệm thẩm thấu

nhận ion clorua. Để khắc phục vấn đề này, thử nghiệm di chuyển nhanh ion clorua (RCMT) có thể được sử dụng như một phương pháp thay thế để đánh giá sự xâm nhập của ion clorua trong BTGSTN. Phương pháp này có ưu điểm là giảm thiểu tác động của các ion khác và yếu tố độ dẫn điện, cung cấp đánh giá chính xác hơn về sự thâm thấu của ion clorua trong bê tông. Nghiên cứu đã chứng minh rằng bê tông geopolimer siêu tính năng có hệ số khuếch tán ion nhỏ hơn 2,5, cho thấy khả năng chống xâm nhập ion clorua cực kỳ cao [34]. Hơn nữa, việc bổ sung sợi làm giảm hệ số khuếch tán của ion clorua, giúp tăng cường độ bền của BTGSTN. Hệ số khuếch tán thấp của ion clorua đạt được khi sử dụng kết hợp sợi thép (SF) và sợi polypropylen (PPF). Người ta đã quan sát thấy rằng sự ăn mòn xung quanh SF và sự gián đoạn giữa sợi với OPC có thể đẩy nhanh sự xâm nhập của ion clorua vào mẫu [44]. Việc sử dụng PPF là một phương pháp hiệu quả để giảm thiểu vấn đề này trong BTGSTN. Do đó, có thể suy ra rằng sợi làm giảm độ dẫn điện của lỗ rỗng và độ thấm bằng cách tạo liên kết với gel calcium-silicate-hydrate (C-S-H), cuối cùng cải thiện khả năng chống thấm ion clorua của BTGSTN.

Việc sử dụng chất độn khoáng như xi lò cao nghiền mịn (GBFS), tro bay, silica fume,... trong BTGSTN, tương tự như trong bê tông siêu tính năng, giúp tăng cường các phản ứng pozzolanic và tạo ra một lượng lớn sản phẩm thủy hóa. Sự cải thiện này làm cho các mẫu BTGSTN có khả năng chống lại sự xâm nhập của ion clorua tốt hơn. Về cơ bản, việc hình thành cấu trúc vi mô dày đặc hơn tạo ra một rào cản vững chắc, ngăn chặn hiệu quả sự xâm nhập của ion clorua, qua đó cải thiện độ bền của bê tông. Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào khả năng chống xâm nhập ion clorua để đánh giá độ bền của BTGSTN. Tuy nhiên, khả năng chống chịu của BTGSTN trong các môi trường khắc nghiệt khác, chẳng hạn như môi trường axit và sunfat, vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Lỗ hổng này mở ra cơ hội cho các nghiên cứu sâu hơn về độ bền của BTGSTN, bao gồm việc xem xét toàn diện tính thấm của nó. Khi đánh giá các đặc tính độ bền của BTGSTN, cần xem xét ảnh hưởng của các loại chất hoạt hóa khác nhau và vật liệu thay thế GBFS – những khía cạnh đã bị bỏ qua trước đây. Hơn nữa, sợi có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ bền của BTGSTN, nhưng tác động của các loại sợi khác nhau và tỷ lệ của chúng đối với độ bền của BTGSTN vẫn chưa được nghiên cứu một cách toàn diện. Mở rộng nghiên cứu trong các lĩnh vực này sẽ góp phần cung cấp hiểu biết đầy đủ hơn về hiệu suất tổng thể và độ bền của BTGSTN trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau.

6. Các khía cạnh môi trường

Mặc dù bê tông siêu hiệu suất cao (BTSTN) có các đặc tính cơ học và độ bền vượt trội, nhưng vẫn có những lo ngại về quá trình phát triển của BTSTN do việc sử dụng nhiều xi măng Portland, có thể dẫn đến lượng khí carbon dioxide gia tăng. Lượng xi măng trong BTSTN thường nằm trong khoảng 750–1200 kg/m³, tức là cao gấp 2 đến 3 lần so với bê tông thông thường. Việc sản xuất PC đòi hỏi một lượng lớn tài nguyên thiên nhiên và năng lượng, đồng thời tạo ra một lượng lớn

khí carbon dioxide. Dự đoán rằng để sản xuất một tấn clinker cần khoảng 6,65 MJ năng lượng và thải ra khoảng 0,83 tấn carbon dioxide [45, 46].

Các nhà nghiên cứu đã cố gắng giảm khối lượng chất kết dính và thay thế một phần xi măng bằng các vật liệu bổ sung. Do đó, trong những năm gần đây, cộng đồng khoa học đã khuyến khích phát triển các loại bê tông xi măng có hàm lượng clinker thấp hoặc không chứa clinker. Geopolymer đã nổi lên như một chất kết dính thay thế tiềm năng cho xi măng, có hàm lượng carbon thấp và không chứa clinker [47-49].

Do xi lò cao nghiền mịn (GBFS) là sản phẩm phụ của ngành sản xuất thép, nên lượng khí CO₂ thải ra và mức tiêu thụ năng lượng của nó có thể được giả định là bằng không. Tuy nhiên, do GBFS có dạng hạt trong quá trình sản xuất, nó cần được nghiền mịn để đạt diện tích bề mặt cụ thể tương đương hoặc lớn hơn PC, điều này tiêu tốn năng lượng và thải ra khí CO₂. Giá trị trung bình của khí CO₂ thải ra và năng lượng tiêu hao lần lượt là 0,083 kgCO₂/kg và 1,6 MJ/kg, thấp hơn đáng kể so với PC. Vì cát được khai thác trực tiếp từ lòng sông nên không cần năng lượng để sản xuất, tuy nhiên một giá trị danh nghĩa là 0,15 MJ/kg đã được sử dụng và lượng khí CO₂ thải ra tương ứng được đặt ở mức 0,005 kgCO₂/kg.

Nghiên cứu này [16] đã đánh giá khả năng kết hợp khái niệm bê tông bột phản ứng (RPC) vào công nghệ bê tông geopolimer để tạo ra BTSTN. Các nhà nghiên cứu đã khảo sát các hỗn hợp bao gồm các tỷ lệ khác nhau của GBFS thay thế bằng silica fume (SF), cát sông thay thế bằng bột thạch anh, và việc bổ sung SF. Các đặc tính sinh thái được đánh giá và so sánh thông qua mức tiêu thụ năng lượng và lượng khí CO₂ thải ra. Theo các tác giả, tổng năng lượng tiêu hao để sản xuất nguyên liệu thô dùng trong BTGSTN dao động 2725 - 8528 MJ/m³, thấp hơn so với bê tông bột phản ứng thông thường, vốn sử dụng xi măng ở mức 1000 kg/m³.

Tương tự, lượng khí CO₂ thải ra của tất cả các hỗn hợp BTGSTN được đánh giá và nằm trong khoảng 105 đến 385 kgCO₂/m³. Kết quả cường độ nén của BTGSTN thấp hơn một chút so với bê tông bột phản ứng thông thường nhưng vẫn thường xuyên đạt trên 200 MPa. Các kết quả nghiên cứu cho thấy việc sản xuất hỗn hợp BTGSTN tiêu thụ ít năng lượng hơn đáng kể so với sản xuất hỗn hợp bê tông bột phản ứng có cường độ tương đương. Kết quả tương tự cũng được ghi nhận đối với lượng khí CO₂ thải ra, cho thấy rằng hỗn hợp BTGSTN thân thiện với môi trường hơn so với bê tông bột phản ứng thông thường [49-51].

7. Ứng dụng

Mặc dù đã có nhiều năm nghiên cứu, việc sử dụng bê tông geopolimer và các vật liệu kiểm soát hóa vẫn còn khá hạn chế do khó khăn trong việc xử lý, vận chuyển và sử dụng các chất hoạt hóa kiềm ở dạng lỏng. Để sử dụng đúng các thành phần có tính ăn mòn cao này (ví dụ: natri hydroxit, natri silicat, kali hydroxit, v.v.), cần có các biện pháp phòng ngừa đặc biệt, dẫn đến việc ngày càng sử dụng nhiều hơn các chất hoạt hóa ở dạng rắn, bao gồm natri metasilicat khan. Mặt khác,

natri metasilicat có thể được sử dụng như một hỗn hợp trộn sẵn, có hình thức rất giống với bê tông xi măng Portland. Nhóm nghiên cứu của Illikainen đã chứng minh khả năng đạt cường độ nén lên đến 107 MPa (sau 28 ngày) bằng cách sử dụng bê tông GP một thành phần và phương pháp bảo dưỡng ở nhiệt độ môi trường [52, 53]. Tuy nhiên, các chất kết dính geopolymere và vật liệu kiềm hoạt hóa có tiềm năng trở thành vật liệu bê tông bền vững và hiệu suất cao trong các công trình hạ tầng quan trọng, nhờ vào khả năng chịu nhiệt cực cao lên đến 1350°C và khả năng giảm tác động của axit khoảng 75 % [54, 55]. Chúng cũng có chi phí thấp hơn so với bê tông BTSTN thông thường. Do đó, gần đây, loại vật liệu này đã được xác định là một lựa chọn đầy hứa hẹn để sản xuất BTSTN dựa trên geopolymere.

Bất kể chất hoạt hóa được sử dụng là gì, bê tông geopolymere có thể ứng dụng trong các lĩnh vực như gốm chịu nhiệt độ cao, bê tông đúc sẵn, chất kết dính bê tông thân thiện với môi trường, lớp phủ chống cháy, cũng như trong việc bọc giữ chất phóng xạ và chất độc hại [56, 57].

8. Kết luận

Dựa trên bài tổng quan này, có thể đưa ra các kết luận sau:

1. Theo các tiêu chí môi trường ước tính, công nghệ geopolymere là giải pháp phù hợp nhất để phát triển hỗn hợp BTSTN tiêu thụ ít năng lượng hơn và thải ra ít CO₂ hơn trong quá trình sản xuất nguyên liệu thô.

2. Do các phụ gia có tác động thấp hơn đến đặc tính lưu biến của BTGSTN, quá trình sản xuất BTGSTN phụ thuộc nhiều hơn vào các thành phần trộn. Ba thành phần chính của BTGSTN là sợi thép (SF), silica fume và cát thạch anh, được báo cáo có ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhớt của hỗn hợp.

3. Việc bổ sung SF làm giảm tính chảy của BTGSTN. Độ chảy giảm khi lượng SF tăng lên. Với cùng một hàm lượng SF, không chỉ tỷ lệ của sợi ảnh hưởng đến tính chảy mà số lượng sợi thực tế cũng đóng vai trò quan trọng. So với BTSTN truyền thống, hình dạng sợi có ảnh hưởng ít đáng kể hơn đến tính chảy. Ngoài ra, các đặc tính của hỗn hợp tươi giảm khi tăng tỷ lệ thay thế cát sông bằng cát thạch anh và GGBFS bằng silica fume. Hơn nữa, GGBFS, mô đun silicat natri và tỷ lệ Si/Al có ảnh hưởng bất lợi đến tính chảy. Tuy nhiên, tro bay (FA), silica fume (10 %) và thủy tinh lỏng lại cải thiện khả năng chảy.

4. Việc tăng hàm lượng SF có thể cải thiện cường độ nén, cường độ kéo khi gãy, đặc tính uốn, năng lượng phá hủy, mô đun đàn hồi và hệ số cường độ ứng suất của BTGSTN. Hỗn hợp BTGSTN chứa 2 % thể tích sợi thép đạt cường độ cơ học cao nhất.

5. Mặc dù cường độ uốn cuối cùng tăng khi chiều dài sợi thép tăng, nhưng ảnh hưởng của chiều dài sợi thép đến cường độ nén lại phụ thuộc vào điều kiện bảo dưỡng do độ giòn của ma trận tăng lên. Giảm đường kính sợi có thể làm tăng cả cường độ nén và cường độ uốn tối đa. Tuy nhiên, việc tăng tỷ lệ biến dạng không ảnh hưởng đến cường độ nén hoặc cường độ uốn tối đa.

6. Khi thay thế sợi polypropylene (PP) cho SF, các đặc tính cơ học của BTGSTN bị suy giảm. Điều này có thể là do sợi PP có cường độ kéo

thấp hơn so với SF. Tuy nhiên, khi bổ sung sợi PP vào các mẫu BTGSTN chỉ được gia cố bằng SF, các đặc tính cơ học có sự cải thiện nhẹ.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Mabroum, S., et al., *Mine wastes based geopolymers: A critical review*. Cleaner Engineering and Technology, 2020. 1: p. 100014.
- [2]. Xu, S., et al., *Development and preliminary mix design of ultra-high-performance concrete based on geopolymere*. Construction and Building Materials, 2021. 308: p. 125110.
- [3]. Li, N., et al., *Composition design and performance of alkali-activated cements*. Materials and Structures, 2017. 50(3): p. 178.
- [4]. Li, N., et al., *A review on mixture design methods for geopolymer concrete*. Composites Part B: Engineering, 2019. 178: p. 107490.
- [5]. Li, N., et al., *Effect of Poly(phthalazinone ether ketone) with amino groups on the interfacial performance of carbon fibers reinforced PPBES resin*. Composites Science and Technology, 2017. 149: p. 178-184.
- [6]. Oh, J.E., et al., *The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers*. Cement and Concrete Research, 2010. 40(2): p. 189-196.
- [7]. Qaidi, S.M.A., et al., *Ultra-high-performance geopolymer concrete: A review*. Construction and Building Materials, 2022. 346: p. 128495.
- [8]. Wetzel, A. and B. Middendorf, *Influence of silica fume on properties of fresh and hardened ultra-high performance concrete based on alkali-activated slag*. Cement and Concrete Composites, 2019. 100: p. 53-59.
- [9]. Ambily, P.S., et al., *Development of ultra-high-performance geopolymer concrete*. Magazine of Concrete Research, 2014. 66(2): p. 82-89.
- [10]. Memon, F.A., M.F. Nuruddin, and N. Shafiq, *Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete*. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2013. 20(2): p. 205-213.
- [11]. Qaidi, S., *Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: Fresh properties*. University of Duhok, Duhok, 2022.
- [12]. Nugteren, H., et al., *High Strength Geopolymers from Fractionated and Pulverized Fly Ash*. 3rd World of Coal Ash, WOCA Conference - Proceedings, 2009.
- [13]. Liu, J., et al., *Investigations on the response of ceramic ball aggregated and steel fibre reinforced geopolymer-based ultra-high performance concrete (G-UHPC) to projectile penetration*. Composite Structures, 2021. 255: p. 112983.
- [14]. Liu, Y., et al., *Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume*. Cement and Concrete Composites, 2020. 112: p. 103665.
- [15]. Liu, Y., et al., *Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): Influence of steel fiber on mechanical properties*. Cement and Concrete Composites, 2020. 112: p. 103670.
- [16]. Karimipour, A. and J. de Brito, *RETRACTED: Influence of polypropylene fibres and silica fume on the mechanical and fracture properties of ultra-high-performance geopolymer concrete*. Construction and Building Materials, 2021. 283: p. 122753.
- [17]. Kathirvel, P. and S. Sreekumaran, *Sustainable development of ultra high performance concrete using geopolymer technology*. Journal of Building Engineering, 2021. 39: p. 102267.
- [18]. Alharbi, Y.R., et al., *Engineering properties of alkali activated materials reactive powder concrete*. Construction and Building Materials, 2021. 271: p. 121550.

- [19]. Al-Majidi, M.H., et al., *Development of geopolymers mortar under ambient temperature for in situ applications*. Construction and Building Materials, 2016. 120: p. 198-211.
- [20]. Hadi, M.N.S., N.A. Farhan, and M.N. Sheikh, *Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method*. Construction and Building Materials, 2017. 140: p. 424-431.
- [21]. Wardhono, A., D.W. Law, and A. Strano, *The Strength of Alkali-activated Slag/fly Ash Mortar Blends at Ambient Temperature*. Procedia Engineering, 2015. 125: p. 650-656.
- [22]. Najafi Kani, E. and A. Allahverdi, *Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan*. Journal of Materials Science, 2009. 44(12): p. 3088-3097.
- [23]. Yoo, D.-Y., et al., *Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites*. Composite Structures, 2017. 174: p. 375-388.
- [24]. Althoey, F., et al., *Determining engineering properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete modified with different waste materials*. PLOS ONE, 2023. 18(5): p. e0285692.
- [25]. Tahwia, A.M., et al., *Characteristics of eco-friendly ultra-high-performance geopolymer concrete incorporating waste materials*. Ceramics International, 2022. 48(14): p. 19662-19674.
- [26]. Althoey, F., et al., *Impact of sulfate activation of rice husk ash on the performance of high strength steel fiber reinforced recycled aggregate concrete*. Journal of Building Engineering, 2022. 54: p. 104610.
- [27]. Wu, Z., et al., *Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete*. Construction and Building Materials, 2016. 103: p. 8-14.
- [28]. Yoo, D.-Y. and N. Banthia, *Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review*. Cement and Concrete Composites, 2016. 73: p. 267-280.
- [29]. Wang, W. and T. Noguchi, *Alkali-silica reaction (ASR) in the alkali-activated cement (AAC) system: A state-of-the-art review*. Construction and Building Materials, 2020. 252: p. 119105.
- [30]. Wu, Z., C. Shi, and W. He, *Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes*. Construction and Building Materials, 2017. 136: p. 307-313.
- [31]. Abadel, A., et al., *Experimental study of shear behavior of CFRP strengthened ultra-high-performance fiber-reinforced concrete deep beams*. Case Studies in Construction Materials, 2022. 16: p. e01103.
- [32]. Aydın, S. and B. Baradan, *The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars*. Composites Part B: Engineering, 2013. 45(1): p. 63-69.
- [33]. Gülşan, M.E., et al., *Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber*. Construction and Building Materials, 2019. 211: p. 271-283.
- [34]. Mousavinejad, S.H.G. and M. Sammak, *Strength and chloride ion penetration resistance of ultra-high-performance fiber reinforced geopolymer concrete*. Structures, 2021. 32: p. 1420-1427.
- [35]. Althoey, F., et al., *Experimental study on the properties of ultra-high-strength geopolymer concrete with polypropylene fibers and nano-silica*. PLOS ONE, 2023. 18(4): p. e0282435.
- [36]. Ahmed, H.U., et al., *Compressive strength of geopolymer concrete modified with nano-silica: Experimental and modeling investigations*. Case Studies in Construction Materials, 2022. 16: p. e01036.
- [37]. Nodehi, M., *A comparative review on foam-based versus lightweight aggregate-based alkali-activated materials and geopolymer*. Innovative Infrastructure Solutions, 2021. 6(4): p. 231.
- [38]. Bernal, S.A., et al., *Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags*. Cement and Concrete Research, 2010. 40(6): p. 898-907.
- [39]. Ranjbar, N., A. Kashefi, and M.R. Maheri, *Hot-pressed geopolymer: Dual effects of heat and curing time*. Cement and Concrete Composites, 2018. 86: p. 1-8.
- [40]. Gao, X., et al., *Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites*. Materials and Structures, 2017. 50(2): p. 165.
- [41]. Smarzewski, P. and D. Barnat-Hunek, *Property Assessment of Hybrid Fiber-Reinforced Ultra-High-Performance Concrete*. International Journal of Civil Engineering, 2018. 16(6): p. 593-606.
- [42]. Ramezani-pour, A.A., et al., *Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers*. Construction and Building Materials, 2013. 44: p. 411-418.
- [43]. Ede, A. and A. Ige, *Optimal Polypropylene Fiber Content for Improved Compressive and Flexural Strength of Concrete*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2014. 11: p. 129-135.
- [44]. Provete Vincler, J., et al., *A modified accelerated chloride migration tests for UHPC and UHPFRC with PVA and steel fibers*. Cement and Concrete Research, 2019. 117: p. 38-44.
- [45]. Xu, D., et al., *On the future of Chinese cement industry*. Cement and Concrete Research, 2015. 78: p. 2-13.
- [46]. Qaidi, S.M.A. and Y.S.S. Al-Kamaki, *State-of-the-art review: concrete made of recycled waste PET as fine aggregate*. Duhok Univ, 2021. 23(2): p. 412-429.
- [47]. Shi, C., B. Qu, and J.L. Provis, *Recent progress in low-carbon binders*. Cement and Concrete Research, 2019. 122: p. 227-250.
- [48]. Ahmed, S.N., et al., *Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate*. Materials Today: Proceedings, 2022. 57: p. 818-823.
- [49]. Qaidi, S., *Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: Applications*. University of Duhok, Duhok, 2022.
- [50]. Qaidi, S.M., *Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: Cost assessment*. University of Duhok, Duhok, 2022.
- [51]. Qaidi, S., *Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: Durability properties*. University of Duhok, Duhok, 2022.
- [52]. Adesanya, E., et al., *One-part geopolymer cement from slag and pretreated paper sludge*. Journal of Cleaner Production, 2018. 185: p. 168-175.
- [53]. Abdollahnejad, Z., et al., *Microstructural Analysis and Strength Development of One-Part Alkali-Activated Slag/Ceramic Binders Under Different Curing Regimes*. Waste and Biomass Valorization, 2020. 11(6): p. 3081-3096.
- [54]. Abdel-Gawwad, H.A. and K.A. Khalil, *Application of thermal treatment on cement kiln dust and feldspar to create one-part geopolymer cement*. Construction and Building Materials, 2018. 187: p. 231-237.
- [55]. Qaidi, S.M., et al., *Rubberized geopolymer composites: A comprehensive review*. Ceramics International, 2022. 48(17): p. 24234-24259.
- [56]. Provis, J.L., *Alkali-activated materials*. Cement and concrete research, 2018. 114: p. 40-48.
- [57]. Ahmed, H.U., et al., *Compressive Strength of Sustainable Geopolymer Concrete Composites: A State-of-the-Art Review*. Sustainability, 2021. 13(24): p. 13502.