

**GEOPOLYMER TỪ BÃ MÍA (SUGARCANE BAGASSE ASH) VÀ CHẤT KẾT DÍNH ĐỊA
POLYME ỨNG DỤNG LÀM ĐƯỜNG GIAO THÔNG NÔNG THÔN**Võ Hồng Thiện¹, Nguyễn Huy Thắm^{2*}¹Trường Đại học Quang Trung, 327 Đào Tấn, Phường Quy Nhơn Bắc, Tỉnh Gia Lai, Việt Nam²Trường Đại học Lương Thế Vinh, Đường Cầu Đông, Phường Nam Định, Tỉnh Ninh Bình, Việt Nam* Tác giả liên hệ: nguyenhuytham@ltvu.edu.vn**THÔNG TIN BÀI BÁO**

Ngày nhận: 02/7/2025
Ngày hoàn thiện: 25/8/2025
Ngày chấp nhận: 29/8/2025
Ngày đăng: 05/9/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung phát triển vật liệu geopolimer từ tro bã mía (SCBA) ứng dụng trong xây dựng đường giao thông nông thôn nhằm giải quyết các vấn đề về môi trường và kinh tế. Bằng phương pháp hoạt hóa SCBA (nung 700°C, nghiền mịn <75µm) với dung dịch NaOH 8-12M và Na₂SiO₃ (tỷ lệ 1.5-2.5), kết quả cho thấy tỷ lệ tối ưu NaOH 12M và Na₂SiO₃/NaOH=2.5 đạt cường độ nén 24.7 MPa, vượt 64.7% yêu cầu kỹ thuật. Vật liệu thể hiện ưu điểm vượt trội về độ bền (chỉ suy giảm 8.5% cường độ khi ngâm nước biển), khả năng chịu tải (CBR 85%) và tính kinh tế (giảm 30.6% chi phí, 68.4% phát thải CO₂ so với bê tông truyền thống). Nghiên cứu kiến nghị ứng dụng thí điểm tại các tuyến đường nông thôn cấp IV-V và phát triển tiêu chuẩn riêng cho vật liệu geopolimer tại Việt Nam.

TỪ KHÓA

Geopolymer
Tro bã mía (SCBA)
Chất kết dính địa polyme
Đường giao thông nông thôn
Vật liệu bền vững

**GEOPOLYMER FROM SUGARCANE BAGASSE ASH AND GEOPOLYMER
BINDER APPLIED IN RURAL ROAD CONSTRUCTION**Thien Vo Hong¹, Tham Nguyen Huy^{2*}¹Quang Trung University, 327 Dao Tan Street, Quy Nhon Bac Ward, Binh Dinh Province, Viet Nam²Luong The Vinh University, Cau Dong Street, Ninh Binh Province, Viet Nam*Corresponding Author: nguyenhuytham@ltvu.edu.vn**ARTICLE INFO**

Received: Jul 02nd, 2025
Revised: Aug 25th, 2025
Accepted: Aug 29th, 2025
Published: Sep 05th, 2025

ABSTRACT

This study focuses on developing geopolimer materials from sugarcane bagasse ash (SCBA) for application in rural road construction to address environmental and economic challenges. Through activation of SCBA (calcined at 700°C, ground to <75µm) using NaOH solution (8-12M) and Na₂SiO₃ (ratio 1.5-2.5), the optimal formulation of 12M NaOH with Na₂SiO₃/NaOH=2.5 achieved a compressive strength of 24.7 MPa, exceeding technical requirements by 64.7%. The material demonstrated superior durability (only 8.5% strength reduction after seawater immersion), load-bearing capacity (CBR 85%), and economic efficiency (30.6% cost reduction, 68.4% lower CO₂ emissions compared to conventional concrete). The study recommends pilot applications on Class IV-V rural roads and the development of specific standards for geopolimer materials in Vietnam.

KEYWORDS

Geopolymer
Sugarcane bagasse ash (SCBA),
Geopolymer binder
Rural roads
Sustainable construction materials

1. Giới Thiệu

Geopolymer là vật liệu xây dựng thể hệ mới được phát triển từ các nguồn vật liệu giàu aluminosilicate như tro bay, xỉ lò hoặc phế phẩm nông nghiệp thông qua quá trình polymer hóa trong môi trường kiềm. So với xi măng truyền thống, geopolymer có nhiều ưu điểm vượt trội như giảm 80% lượng khí thải CO₂, cường độ cơ học cao (20-100 MPa) và khả năng chống chịu tốt với các tác nhân hóa học (Davidovits, 2008). Trong bối cảnh phát triển bền vững, việc ứng dụng geopolymer trong xây dựng hạ tầng, đặc biệt là đường giao thông nông thôn đang trở thành xu hướng được nhiều quốc gia quan tâm.

Tro bã mía (SCBA), một phế phẩm từ ngành công nghiệp mía đường, đã được nghiên cứu như nguồn nguyên liệu tiềm năng để sản xuất geopolymer do chứa hàm lượng cao SiO₂ (60-85%) và Al₂O₃ (5-15%) ở dạng vô định hình (Rerkam et al., 2020). Các nghiên cứu gần đây cho thấy geopolymer từ SCBA đạt cường độ nén từ 15-25 MPa khi được hoạt hóa bằng dung dịch NaOH 8-12M và bảo dưỡng ở nhiệt độ 60-80°C (Sukprasert et al., 2021). Đặc biệt, vật liệu này đã chứng minh khả năng đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật cho đường giao thông nông thôn theo tiêu chuẩn AASHTO khi sử dụng làm lớp móng hoặc bê tông mặt đường.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về geopolymer từ SCBA, các vấn đề về độ bền lâu dài trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm và khả năng chống mài mòn vẫn cần được nghiên cứu sâu hơn. Ngoài ra, việc tối ưu hóa quy trình sản xuất để giảm chi phí và năng lượng tiêu thụ cũng là những thách thức cần giải quyết trước khi ứng dụng rộng rãi trong thực tế. Nghiên cứu này tập trung đánh giá toàn diện tính chất cơ lý của geopolymer từ SCBA, đồng thời đề xuất giải pháp ứng dụng hiệu quả trong xây dựng đường giao thông nông thôn tại Việt Nam.

2. Vật liệu và phương pháp

2.1. Vật liệu nghiên cứu

2.1.1. Tro bã mía (Sugarcane Bagasse Ash - SCBA)

Thu tại nhà máy đường AyunPa – Gia Lai

Xử lý ban đầu: Rửa sạch để loại bỏ tạp chất hữu cơ => Sấy khô ở 105°C trong 24 giờ => Nung ở nhiệt độ 700°C trong 2 giờ để đốt cháy hoàn toàn carbon và tăng hoạt tính pozzolan.

Đặc tính vật lý-hóa học: Hạt được nghiền mịn đến kích thước < 75µm (sàng #200).

Thành phần hóa học (phân tích XRF): SiO₂ (72.5%), Al₂O₃ (12.3%), Fe₂O₃ (5.1%), CaO (3.8%), K₂O (2.5%), MgO (1.2%), tổn thất khi nung (LOI) < 3%.

Cấu trúc tinh thể (XRD): Chủ yếu ở dạng vô định hình, thuận lợi cho phản ứng geopolymer hóa.

2.1.2. Chất hoạt hóa kiềm

Dung dịch NaOH: Nồng độ 8M, 10M và 12M, pha chế từ NaOH bột (độ tinh khiết 99%) và nước cất.

Dung dịch Na₂SiO₃ (nước thủy tinh): Tỉ lệ SiO₂/Na₂O = 2.5, tỉ trọng 1.4 g/cm³.

Tỉ lệ phối trộn dung dịch kiềm: Na₂SiO₃/NaOH = 1.5; 2.0; 2.5 (theo khối lượng).

2.1.3. Cát liệu

Cát vàng: Module độ lớn 2.5, cỡ hạt 0.15-5mm, sạch và không lẫn tạp chất hữu cơ.

Đá dăm: Cỡ hạt 5-10mm, cường độ nén > 60MPa.

Tỉ lệ phối trộn: SCBA : cát : đá = 1 : 2 : 3 (theo khối lượng).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Quy trình tổng hợp geopolymer từ SCBA

Chuẩn bị dung dịch kiềm: Hòa tan NaOH trong nước cất, để nguội 24h trước khi sử dụng => Trộn Na₂SiO₃ và NaOH theo tỉ lệ đã chọn, khuấy đều => Trộn hỗn hợp geopolymer: Trộn khô SCBA, cát và đá trong máy trộn 2 phút + Thêm dung dịch kiềm vào hỗn hợp khô, trộn tiếp 5 phút + Thêm phụ gia (nếu có) và trộn thêm 2 phút.

Đúc mẫu và bảo dưỡng: Đổ hỗn hợp vào khuôn thép (kích thước 50×50×50mm hoặc 150×150×150mm).

Lắc trên bàn rung 30 giây để đầm chặt.

Bảo dưỡng ở 75°C trong 24 giờ, sau đó để ở nhiệt độ phòng (25-30°C) đến ngày thí nghiệm.

2.2.2. Các phương pháp đánh giá tính chất vật liệu

Cường độ nén (ASTM C109): Thí nghiệm ở 3, 7, 14, 28 ngày bằng máy nén thủy lực (tốc độ tải 0.5MPa/s).

Độ hút nước (ASTM C642): Sấy khô mẫu đến khối lượng không đổi, ngâm nước 24h.

Tính % hút nước = $[(m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}})/m_{\text{dry}}] \times 100\%$.

Phân tích vi cấu trúc:

GEOPOLYMER TỪ BÃ MÍA (SUGARCANE BAGASSE ASH) VÀ CHẤT KẾT DÍNH ĐỊA POLYME ỨNG DỤNG LÀM ĐƯỜNG GIAO THÔNG NÔNG THÔN

SEM (Kính hiển vi điện tử quét): Quan sát hình thái bề mặt và cấu trúc geopolymer.

XRD (Nhiều xạ tia X): Xác định pha tinh thể và cấu trúc vô định hình.

FTIR (Phổ hồng ngoại): Phân tích liên kết hóa học Si-O-Al.

Độ bền hóa học: Ngâm mẫu trong dung dịch H_2SO_4 5% và NaCl 5% trong 28 ngày, đánh giá suy giảm cường độ.

2.2.3. Phương pháp xử lý số liệu

Phân tích ANOVA để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố (nồng độ kiềm, tỉ lệ phối trộn) đến tính chất cơ lý.

Sử dụng phần mềm Design-Expert để tối ưu hóa thành phần.

3. Kết quả và thảo luận

3.1 Ảnh hưởng của nồng độ kiềm đến tính chất geopolymer

3.1.1. Cường độ nén

Nồng độ dung dịch kiềm (NaOH) đóng vai trò quyết định trong quá trình geopolymer hóa thông qua 3 cơ chế chính: Hòa tan aluminosilicate, vận chuyển ion,

Thúc đẩy hình thành mạng lưới Si-O-Al-O. Kết quả thí nghiệm cường độ nén sau 3, 7, 28 ngày cho thấy nồng độ NaOH có ảnh hưởng rõ rệt đến quá trình phát triển cường độ của geopolymer từ tro bã mía (SCBA). Ở nồng độ 8M, mẫu đạt cường độ nén 10.2 ± 0.5 MPa sau 3 ngày và tăng lên 18.5 ± 0.8 MPa sau 28 ngày, với tốc độ đóng rắn từ 3-7 ngày là 48.0%. Khi tăng nồng độ NaOH lên 12M, cường độ nén tăng đáng kể đạt 17.8 ± 0.9 MPa sau 3 ngày và 24.7 ± 1.5 MPa sau 28 ngày, trong khi tốc độ đóng rắn giai đoạn 3-7 ngày giảm xuống còn 21.3%. Đặc biệt, giá trị cường độ 24.7 MPa ở nồng độ 12M không chỉ vượt trội so với các nồng độ thấp hơn mà còn đáp ứng vượt yêu cầu tối thiểu 15MPa cho lớp móng đường theo QCVN 104:2020/BGTVT. Phân tích ANOVA với p-value <0.05 khẳng định sự khác biệt về cường độ giữa các nồng độ kiềm có ý nghĩa thống kê. Hiệu suất phản ứng cũng tăng từ 72.3% ở 8M lên 85.6% ở 10M, cho thấy khả năng chuyển hóa nguyên liệu tốt hơn ở nồng độ kiềm cao. Kết quả thực nghiệm cho thấy nồng độ NaOH 12M là tối ưu để đạt được cả cường độ cao và hiệu suất phản ứng tốt cho ứng dụng geopolymer trong xây dựng đường giao thông.

3.1.2. Phân tích SEM

Bảng 1. Phân tích SEM

Nồng độ NaOH	Đặc điểm hình thái học	Độ xốp (%)	Kích thước lỗ rỗng (μm)
8M	Cấu trúc không đồng nhất, nhiều hạt chưa phản ứng	12.3	0.5-5
10M	Mạng lưới gel phát triển, lỗ rỗng phân bố đều	8.7	0.2-3
12M	Cấu trúc đặc chắc, gel bao phủ hoàn toàn hạt SCBA	5.1	<1

Kết quả phân tích SEM cho thấy sự thay đổi rõ rệt về hình thái học và cấu trúc vi mô của geopolymer theo nồng độ NaOH. Ở nồng độ 8M, mẫu vật liệu thể hiện cấu trúc không đồng nhất với nhiều hạt SCBA chưa phản ứng (khoảng 30-40% diện tích bề mặt), độ xốp lên tới 12.3% và kích thước lỗ rỗng dao động trong khoảng 0.5-5 μm . Khi tăng nồng độ NaOH lên 10M, mạng lưới gel geopolymer phát triển mạnh hơn, bao phủ khoảng 70-80% bề mặt hạt, độ xốp giảm xuống còn 8.7% và kích thước lỗ rỗng thu hẹp về khoảng 0.2-3 μm . Đặc biệt, ở nồng độ tối ưu 12M, cấu trúc trở nên đặc chắc với lớp gel bao phủ hoàn toàn (>95%) các hạt SCBA, độ xốp chỉ còn 5.1% - giảm tới 58.5% so với mẫu 8M, đồng thời kích thước lỗ rỗng giảm mạnh xuống dưới 1 μm . Sự cải thiện này có thể giải thích qua cơ chế: nồng độ kiềm cao hơn thúc đẩy quá trình hòa tan các thành phần aluminosilicate trong SCBA, tạo điều kiện hình thành mạng lưới geopolymer dày đặc và đồng nhất hơn. Mối tương quan nghịch giữa nồng độ kiềm và độ xốp ($R^2 = 0.98$) khẳng định vai trò quan trọng của NaOH trong việc kiểm soát cấu trúc vi mô vật liệu. Những kết quả này hoàn toàn phù hợp với các số liệu về cường độ cơ học, nơi mẫu 12M đạt giá trị cao nhất nhờ cấu trúc đặc chắc và ít khuyết tật.

3.1.3. Độ bền hóa học

Khả năng chống chịu của vật liệu geopolymer được cải thiện đáng kể khi tăng nồng độ NaOH. Sau khi ngâm trong dung dịch H_2SO_4 5% trong 30 ngày, mẫu geopolymer với nồng độ kiềm 8M bị suy giảm cường độ tới 22.3%, trong khi ở nồng độ 12M, tỷ lệ suy giảm chỉ còn 15.2% - giảm 31.8% so với mẫu 8M. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận khi ngâm trong dung dịch NaCl 5%, với tỷ lệ suy giảm cường độ giảm từ 15.7% (8M) xuống còn 8.5% (12M), tương ứng giảm 45.9%. Sự cải thiện độ bền hóa học này có thể được giải thích bởi ba cơ chế chính: (1) Ở nồng độ kiềm cao hơn, mạng lưới geopolymer hình thành đặc chắc hơn (được chứng minh qua phân tích SEM) làm giảm khả năng thẩm thấu của các tác nhân ăn mòn; (2) Tỷ lệ Al/Si trong gel cao hơn ở nồng độ 12M tạo ra cấu trúc bền vững hơn với axit; (3) Sự có mặt của Na^+ dư thừa ở nồng độ kiềm cao giúp trung hòa ion Cl^- trong môi trường muối. Đặc biệt, kết quả cho thấy geopolymer SCBA có khả năng chống chịu môi trường muối tốt hơn so với môi trường axit, phù hợp với ứng dụng trong điều kiện khí hậu biển tại Việt Nam. Mối tương quan nghịch giữa nồng độ NaOH và tỷ lệ suy giảm cường độ ($R^2 = 0.96$ cho H_2SO_4 và $R^2 = 0.94$ cho NaCl) khẳng định tính nhất quán của xu hướng này.

3.2. Phân tích ảnh hưởng của tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ đến tính chất geopolymer SCBA

Tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ có ảnh hưởng rõ rệt đến các tính chất của geopolymer từ tro bã mía (SCBA). Khi tỷ lệ này tăng từ 1.5 lên 2.5, độ chuyển hóa aluminosilicate tăng đáng kể từ 78.2% lên 92.3%, đồng thời độ hút nước giảm từ 8.2% xuống còn 5.1%. Điều này chứng tỏ sự gia tăng hàm lượng silicate đã thúc đẩy quá trình geopolymer hóa, tạo ra cấu trúc mạng lưới đặc chắc hơn.

Về tính chất cơ học, cường độ nén 28 ngày tăng tuyến tính từ 18.7 MPa (tỷ lệ 1.5) lên 24.6 MPa (tỷ lệ 2.5), tương ứng với mức tăng 31.6%. Sự cải thiện này có mối tương quan chặt chẽ với việc giảm mật độ lỗ rỗng từ 420 lỗ/mm³ xuống còn 150 lỗ/mm³. Phân tích chỉ số bền hóa học cũng cho thấy xu hướng tăng dần từ 0.82 lên 0.97 khi tăng tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, chứng tỏ khả năng chống chịu môi trường hóa chất được cải thiện đáng kể.

Các kết quả này có thể được giải thích qua cơ chế: (1) hàm lượng silicate cao hơn thúc đẩy quá trình hình thành liên kết Si-O-Al bền vững, (2) giảm hàm lượng kiềm tự do trong hệ thống giúp hạn chế sự tấn công của các tác nhân ăn mòn, và (3) cấu trúc vi mô đặc chắc hơn làm giảm khả năng thẩm thấu của các chất lỏng. Tỷ lệ tối ưu 2.5 không chỉ cho cường độ cao nhất mà còn đảm bảo độ bền lâu dài của vật liệu trong các điều kiện môi trường khác nghiệt.

3.3. Diễn biến cường độ nén theo thời gian

Kết quả nghiên cứu cho thấy quá trình phát triển cường độ của geopolymer SCBA (với nồng độ NaOH 12M và tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$) diễn ra theo hai giai đoạn rõ rệt. Trong giai đoạn đầu (1-3 ngày), cường độ nén tăng mạnh từ 8.2 MPa lên 17.8 MPa, đạt 72.1% cường độ cuối cùng, với tốc độ tăng trưởng lên tới 4.8 MPa/ngày. Điều này phản ánh quá trình geopolymer hóa diễn ra mạnh mẽ ngay sau khi đúc. Giai đoạn sau (7-28 ngày), tốc độ tăng cường độ giảm dần, chỉ còn 1.3 MPa/ngày (7 ngày) và 0.09 MPa/ngày (28 ngày), cho thấy phản ứng đã dần đạt trạng thái cân bằng.

Đặc biệt, sau 7 ngày, mẫu đã đạt tới 87.4% cường độ tối đa (24.7 MPa), vượt xa yêu cầu kỹ thuật cho vật liệu xây dựng đường giao thông. Sự chênh lệch về tốc độ tăng cường độ giữa các giai đoạn (giảm 26 lần từ 3 đến 28 ngày) cho thấy: (1) giai đoạn đầu chủ yếu là quá trình hòa tan và tái kết tủa nhanh các thành phần hoạt tính, (2) giai đoạn sau liên quan đến quá trình tái tổ chức mạng lưới và làm đặc chắc cấu trúc từ từ.

3.4. Khả năng ứng dụng làm đường nông thôn

Vật liệu geopolymer từ tro bã mía (SCBA) hoàn toàn đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật cho đường nông thôn theo tiêu chuẩn 22TCN 334-06. Chỉ số CBR sau 7 ngày đạt $85 \pm 3.2\%$, vượt 21.4% so với yêu cầu tối thiểu ($\geq 70\%$) và chỉ kém bê tông xi măng M200 khoảng 7.6%. Về khả năng chịu tải, mô đun đàn hồi đạt $15,200 \pm 450$ MPa, cao hơn 26.7% so với yêu cầu tối thiểu ($\geq 12,000$ MPa) và tương đương 92% so với bê tông xi măng truyền thống. Các chỉ tiêu về lực dính (320 ± 15 kPa) và góc ma sát trong ($38 \pm 2^\circ$) đều vượt từ 28-8.6% so với yêu cầu kỹ thuật, đảm bảo khả năng ổn định kết cấu. Đặc biệt, độ mài mòn Los Angeles ($18.5 \pm 1.1\%$) nằm trong giới hạn cho phép ($\leq 25\%$), chứng tỏ khả năng chống mài mòn tốt

GEOPOLYMER TỪ BÃ MÍA (SUGARCANE BAGASSE ASH) VÀ CHẤT KẾT DÍNH ĐỊA POLYME ỨNG DỤNG LÀM ĐƯỜNG GIAO THÔNG NÔNG THÔN

khí chịu tác động của giao thông. Mặc dù các chỉ số cơ học của geopolimer SCBA thấp hơn bê tông xi măng M200 từ 7-10%, nhưng sự chênh lệch này không đáng kể so với lợi ích về mặt kinh tế và môi trường mà vật liệu mới mang lại. Các kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tế của geopolimer SCBA trong xây dựng đường giao thông nông thôn tại Việt Nam.

3.4.2. Độ bền môi trường

Bảng 2. Ảnh hưởng của điều kiện môi trường đến tính chất vật liệu

Điều kiện	Suy giảm cường độ (%)	Thay đổi khối lượng (%)	Độ bền tương đối so với BTXM
Ngâm nước biển 30 ngày	8.5 ± 0.7	$+0.32 \pm 0.05$	1.7 lần
Ngâm H_2SO_4 5% 30 ngày	15.2 ± 1.2	-1.8 ± 0.2	2.3 lần
50 chu kỳ đông-tan	12.7 ± 0.9	$+0.9 \pm 0.1$	1.9 lần
UV 1000 giờ	5.3 ± 0.4	-0.2 ± 0.03	1.2 lần

Kết quả nghiên cứu cho thấy geopolimer SCBA thể hiện khả năng chống chịu xuất sắc trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt. Khi ngâm trong nước biển 30 ngày, vật liệu chỉ bị suy giảm cường độ $8.5 \pm 0.7\%$ và tăng khối lượng nhẹ $0.32 \pm 0.05\%$, thể hiện khả năng chống thấm tốt với độ bền gấp 1.7 lần so với bê tông xi măng thông thường. Trong môi trường axit (H_2SO_4 5%), mặc dù bị suy giảm cường độ $15.2 \pm 1.2\%$ và giảm khối lượng $1.8 \pm 0.2\%$, geopolimer SCBA vẫn thể hiện ưu thế vượt trội với độ bền gấp 2.3 lần bê tông truyền thống. Đặc biệt, sau 50 chu kỳ đông-tan, vật liệu duy trì được cấu trúc ổn định với suy giảm cường độ $12.7 \pm 0.9\%$ và tăng khối lượng $0.9 \pm 0.1\%$, chứng tỏ khả năng chống nứt vỡ do nhiệt tốt. Dưới tác động của tia UV 1000 giờ, geopolimer hầu như không bị ảnh hưởng đáng kể (suy giảm $5.3 \pm 0.4\%$), phù hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới.

Các kết quả này khẳng định cấu trúc geopolimer có khả năng bảo vệ tốt hơn so với bê tông xi măng trước các tác nhân ăn mòn, đặc biệt trong môi trường axit và muối - những yếu tố phổ biến gây hư hỏng kết cấu đường giao thông tại Việt Nam.

3.4.3. Phân tích kinh tế - kỹ thuật

Bảng 3. So sánh toàn diện giữa geopolimer SCBA và BTXM

Chỉ tiêu	Geopolimer SCBA	BTXM M200	Lợi thế geopolimer
Chi phí trực tiếp (đ/m ³)	1,250,000	1,800,000	Giảm 30.6%
Năng lượng sản xuất (kWh/m ³)	380	850	Giảm 55.3%
Phát thải CO ₂ (kg/m ³)	120	380	Giảm 68.4%
Thời gian thi công (ngày đạt 70% cường độ)	3	7	Rút ngắn 57%
Tuổi thọ dự kiến (năm)	15-20	10-15	Tăng 33-50%
Tái chế phế thải (%)	100	0	Hoàn toàn tái sử dụng

Vật liệu geopolimer từ tro bã mía (SCBA) thể hiện ưu thế vượt trội so với bê tông xi măng M200 trên cả phương diện kinh tế và kỹ thuật. Về chi phí, geopolimer giúp tiết kiệm 30.6% (550,000đ/m³) nhờ tận dụng phế phẩm nông nghiệp. Quá trình sản xuất tiêu thụ ít hơn 55.3% năng lượng và giảm 68.4% phát thải CO₂, đóng góp tích cực vào bảo vệ môi trường. Về tính năng kỹ thuật, geopolimer đạt 70% cường độ chỉ sau 3 ngày (nhanh hơn 57% so với bê tông truyền thống), đồng thời có tuổi thọ dự kiến cao hơn từ 33-50%. Đặc biệt, khả năng tái chế 100% phế thải sau sử dụng giúp geopolimer trở thành giải pháp bền vững cho ngành xây dựng, phù hợp với xu hướng phát triển vật liệu xanh tại Việt Nam.

4. Kết luận và kiến nghị

4.1. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh thành công tiềm năng ứng dụng geopolimer từ tro bã mía (SCBA) trong xây dựng đường giao thông nông thôn tại Việt Nam. Các kết quả nổi bật bao gồm:

Tính chất cơ lý vượt trội: Vật liệu đạt cường độ nén 24.7 MPa sau 28 ngày (nồng độ NaOH 12M, tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2.5), vượt 64.7% so với yêu cầu tối thiểu cho lớp móng đường (15MPa). Chỉ số CBR 85% và mô đun đàn hồi 15,200 MPa đáp ứng đầy đủ tiêu chuẩn 22TCN 334-06.

Độ bền môi trường cao: Thể hiện khả năng chống chịu vượt trội trong điều kiện khắc nghiệt (suy giảm cường độ chỉ 8.5% khi ngâm nước biển, 15.2% trong H_2SO_4 5%), gấp 1.7-2.3 lần so với bê tông xi măng thông thường.

Hiệu quả kinh tế - môi trường: Giảm 30.6% chi phí vật liệu, 68.4% phát thải CO_2 và 55.3% năng lượng tiêu thụ so với bê tông truyền thống, đồng thời tận dụng hiệu quả phế phẩm nông nghiệp.

4.2. Kiến nghị

Triển khai thí điểm trên các tuyến đường nông thôn cấp IV-V tại khu vực nông thôn.

Ưu tiên sử dụng cho các công trình ven biển nhờ khả năng chống mặn vượt trội.

Cần có những nghiên cứu tiếp theo để đánh giá hiệu quả sử dụng phụ gia địa phương để giảm nhiệt độ bảo dưỡng; nghiên cứu khả năng kết hợp với các phế thải nông nghiệp khác (tro trấu, xơ dừa...).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Adgate, J.L.; Mongin, S.J.; Pratt, G.C.; Zhang, J.; Field, M.P.; Ramachandran, G.; Sexton, K. (2007). Relationships between personal, indoor, and outdoor exposures to trace elements in PM2.5. *Sci. Total Environ*, 386, 21-32.

[2] Châu, N.T.N.; Liên, Đ.T.A.; Phong, N.H.; Long, B.T (2022). Đánh giá hiện trạng phân bố và sự biến động theo mùa mức độ ô nhiễm PM2.5 tại vùng Tứ Giác Long Xuyên, Việt Nam. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 736(1), 54-74.

[3] Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Institut Géopolymère.

[4] Singh, N.B. et al. (2015). "Sugarcane bagasse ash as a pozzolanic material for geopolimer concrete". *Construction and Building Materials*.

[5] Đông, N.H.; Phong, D.H (2020). Mối quan hệ thực nghiệm giữa PM2.5 và độ sâu quang học aerosol AOD ở khu vực nội thành Hà Nội. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 718, 22-31.

[6] Ngọc, L.T.; Duyên, N.C.M.; Phong, N.H.; Long, B.T (2023). Đánh giá các tác động sức khỏe cộng đồng do phơi nhiễm ngắn hạn ô nhiễm PM2.5: Nghiên cứu điển hình tại tỉnh Bình Dương. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 746, 70-87.

[7] Nguyen, T.T.Q.; Takeuchi, W.; Misra, P.; Hayashida, S. (2021). Technical note: Emission mapping of key sectors in Ho Chi Minh City, Vietnam, using satellite-derived urban land use data. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 2795-2818.

[8] Ma (2019). Y et al -term variations of the PM2.5 concentration identified by MODIS in the tropical rain forest, Southeast Asia. *Atmos. Res.*, 219, 140-152