

# Tổng quan về tái chế bã mía làm vật liệu cho bê tông xi măng: Cơ tính, độ bền và khả năng ứng dụng trong mặt đường cứng

Nguyễn Đình Thắng<sup>1,2</sup>, Phạm Ngọc Phương<sup>1</sup>, Huỳnh Trọng Phước<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

<sup>2</sup> Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

<sup>3</sup> Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Bách Khoa – Đại học Cần Thơ

## TỪ KHOẢ

Bê tông xi măng  
BTXM mặt đường  
Bã mía tái chế  
Tro bã mía  
Sợi bã mía

## TÓM TẮT

Bài báo này trình bày tổng quan toàn diện về khả năng tái chế bã mía – một phụ phẩm nông nghiệp dồi dào tại Việt Nam và nhiều quốc gia nhiệt đới – làm vật liệu trong bê tông xi măng (BTXM) và tiềm năng ứng dụng trong mặt đường cứng. Hai dạng tái chế chính gồm tro bã mía (SCBA) và sợi/hạt bã mía (SBF) được phân tích theo cơ chế hoạt động, quy trình xử lý và ảnh hưởng đến các tính chất cơ học và độ bền của BTXM. Kết quả tổng hợp cho thấy SCBA, khi được xử lý và nghiền mịn thích hợp, thể hiện hoạt tính pozzolan rõ rệt, giúp cải thiện cường độ nén, độ đặc chắc và độ bền lâu; trong khi SBF đóng vai trò vật liệu gia cường tự nhiên, làm tăng khả năng chịu uốn, hạn chế nứt và nâng cao độ dẻo dai của bê tông. Các đánh giá theo tiêu chuẩn TCCS 39:2022 và TCCS 40:2022 chỉ ra rằng bã mía tái chế hoàn toàn có khả năng đáp ứng một số yêu cầu kỹ thuật của BTXM mặt đường, đặc biệt trong các thiết kế hướng tới vật liệu xanh và phát triển bền vững. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có vẫn chủ yếu ở quy mô phòng thí nghiệm; do đó cần thêm các nghiên cứu thực nghiệm, thí điểm và đánh giá dài hạn để xác định mức độ phù hợp khi triển khai vào thực tế hạ tầng giao thông tại Việt Nam.

## KEYWORDS

Portland cement concrete  
Rigid concrete pavement  
Recycled sugarcane bagasse  
Sugarcane bagasse ash  
Sugarcane bagasse fiber

## ABSTRACT

This paper provides a comprehensive review of the potential for recycling sugarcane bagasse—an abundant agricultural by-product in Vietnam and tropical countries—as a raw material for Portland cement concrete (PCC) and its applicability in rigid pavement construction. Two primary recycled forms, sugarcane bagasse ash (SCBA) and sugarcane bagasse fibers/ particles (SBF), are examined in terms of processing methods, mechanisms of action, and their influence on the mechanical and durability properties of concrete. Synthesized findings indicate that properly calcined and finely ground SCBA exhibits significant pozzolanic activity, enhancing compressive strength, microstructural densification, and long-term durability. Meanwhile, SBF functions as a natural reinforcing material that improves flexural capacity, crack resistance, and ductility. Assessment based on TCCS 39:2022 and TCCS 40:2022 standards shows that recycled bagasse materials can potentially satisfy several technical requirements for PCC pavements, especially in sustainable and low-carbon infrastructure development. However, current studies remain largely limited to laboratory-scale investigations. Therefore, further experimental, pilot-scale, and long-term performance studies are essential to validate the feasibility and practical implementation of bagasse-based materials in Vietnam's transportation infrastructure.

## 1. Đặt vấn đề

Bê tông xi măng (BTXM) từ lâu được coi là một trong những vật liệu quan trọng nhất trong xây dựng kết cấu mặt đường cứng nhờ khả năng chịu nén cao, độ bền lâu dài và khả năng chống biến dạng dư dưới tải trọng trục lớn [1], [2], [3]. Trong nhiều thập kỷ, BTXM đã chứng minh tính hiệu quả tại các công trình giao thông quan trọng như đường quốc lộ, sân bay, bến cảng và các tuyến vận tải trọng tải nặng, đặc biệt tại những khu vực có nhiệt độ cao hoặc dao động nhiệt lớn [2], [4],

[5]. Tại Việt Nam, cùng với sự mở rộng mạng lưới đường bộ và nhu cầu nâng cao năng lực chịu tải của kết cấu mặt đường, BTXM ngày càng được ứng dụng rộng rãi ở cả khu vực đô thị và nông thôn nhờ ưu điểm chống hần lún, chi phí bảo trì thấp và tuổi thọ khai thác cao [6], [7], [8], [9]. Hai tiêu chuẩn quan trọng điều chỉnh việc thiết kế – thi công mặt đường BTXM hiện nay là TCCS 39:2022 [10] và TCCS 40:2022 [11], trong đó quy định rõ các yêu cầu về cường độ uốn, mài mòn, mô đun đàn hồi và các yếu tố liên quan đến cấu tạo tấm nhằm đảm bảo độ bền lâu trong điều kiện khai thác thực tế.

\*Liên hệ tác giả: htphuoc@ctu.edu.vn

Nhận ngày 05/12/2025, sửa xong ngày 16/12/2025, chấp nhận đăng ngày 22/12/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2026.1195>

Tuy nhiên, BTXM truyền thống cũng tồn tại những hạn chế đáng kể. Tính giòn và khả năng chịu kéo thấp khiến BTXM dễ phát sinh nứt trong giai đoạn đầu do co ngót nhiệt hoặc co ngót khô, và trong quá trình khai thác do tải trọng lặp, dẫn đến suy giảm tuổi thọ kết cấu và tăng chi phí bảo trì [5], [7]. Ngoài ra, sản xuất xi măng – thành phần quyết định cường độ của BTXM – tiêu thụ lượng lớn nhiên liệu hóa thạch và đóng góp khoảng 7–8 % lượng CO<sub>2</sub> công nghiệp toàn cầu [4], [5], tạo ra thách thức lớn đối với mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính của ngành xây dựng. Những vấn đề này khiến việc phát triển BTXM bền vững trở thành yêu cầu cấp thiết, trong đó giảm tỷ lệ clinker, sử dụng phụ gia khoáng và tăng cường tái sử dụng vật liệu là các định hướng quan trọng được nhiều quốc gia theo đuổi [12], [13], [14].

Trong bối cảnh phát triển bền vững và kinh tế tuần hoàn, việc tận dụng phế thải công-nông nghiệp làm vật liệu cho BTXM đang thu hút sự quan tâm rộng rãi của giới nghiên cứu. Nhiều phụ phẩm công nghiệp như tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn và xỉ thép đã chứng minh hiệu quả khi thay thế xi măng hoặc cốt liệu một phần trong BTXM, qua đó cải thiện độ đặc chắc, tăng cường độ nén và hạn chế thấm, đồng thời giảm phát thải CO<sub>2</sub> liên quan đến sản xuất xi măng [14], [15], [16], [17]. Một số nghiên cứu cho thấy tro bay có thể thay thế tới 60% xi măng mà vẫn đảm bảo các yêu cầu về cơ tính và độ bền môi trường cho mặt đường cấp cao, nhờ hiệu ứng điền đầy hạt mịn và phản ứng pozzolan tạo gel C–S–H thứ cấp [15], [16], [17]. Các nghiên cứu khác cũng chỉ ra rằng xỉ đáy hoặc vật liệu tái chế từ chất thải rắn xây dựng có thể được sử dụng làm cốt liệu nhỏ, góp phần giảm khai thác tài nguyên thiên nhiên và tận dụng phụ-phế phẩm công nghiệp quy mô lớn [12], [13]. Song song đó, phế phẩm nông nghiệp – đặc biệt là nhóm vật liệu lignocellulose – ngày càng được quan tâm trong chế tạo BTXM. Các sợi tự nhiên như xơ dừa, sợi chuối hoặc tre đã được chứng minh có khả năng tăng độ dẻo dai, phân tán vết nứt và cải thiện tính năng cơ học dài hạn của BTXM [18], [19], [20], [21]. Cơ chế tăng cường chủ yếu hình thành từ sự tương tác giữa sợi và ma trận xi măng, tạo hiệu ứng bắc cầu, làm giảm tốc độ phát triển vi nứt và tăng khả năng chịu uốn của vật liệu. Vì mặt đường BTXM làm việc chủ yếu theo cơ chế chịu uốn và chịu mài, sự cải thiện này đặc biệt quan trọng đối với tuổi thọ kết cấu. Việc tận dụng phụ phẩm nông nghiệp cũng mang lại lợi ích môi trường lớn, góp phần giảm lượng chất thải rắn, hạn chế phát thải khí nhà kính và giảm áp lực cho hệ thống xử lý chất thải. Các kết quả nghiên cứu trước cho thấy tiềm năng rất lớn của vật liệu tái chế trong BTXM mặt đường. Tuy nhiên, mỗi loại phế thải có cơ chế tác động khác nhau, phụ thuộc vào đặc tính hóa học – vật lý và phương pháp xử lý. Điều này đặt ra nhu cầu cần có các nghiên cứu tổng quan chuyên sâu để đánh giá toàn diện từng loại vật liệu.

Trong nhóm phụ phẩm nông nghiệp, bã mía nổi lên như một nguồn phụ phẩm giàu tiềm năng nhờ khối lượng phát sinh lớn và phân bố rộng ở các quốc gia đang phát triển [22], [23], [24], [25]. Ngành mía đường thải ra lượng sinh khối đáng kể mỗi năm, nhưng phần lớn được xử lý theo phương thức truyền thống như đốt trực tiếp, gây lãng phí tài nguyên và tiềm ẩn tác động môi trường [24], [26], [27], [28]. Một số nghiên cứu bước đầu cho thấy bã mía sau khi xử lý thích hợp

có thể cải thiện các tính chất cơ học hoặc độ bền của BTXM [24], [29], [30], [31], [32], nhưng các công bố hiện hành vẫn rời rạc, thiếu tính hệ thống và chưa cung cấp được cái nhìn toàn diện về phạm vi ứng dụng, cơ chế tác động và tính tối ưu của vật liệu này.

Một vấn đề quan trọng là phần lớn nghiên cứu về bã mía mới chỉ tập trung vào các dạng bê tông thông thường, trong khi mặt đường BTXM lại có yêu cầu đặc thù cao hơn như cường độ uốn, mô đun đàn hồi, mài mòn, kháng nứt do co ngót và đặc biệt là độ bền môi dưới tải trọng lặp. Bên cạnh đó, rất ít nghiên cứu đánh giá khả năng đáp ứng tiêu chuẩn TCCS 39:2022 hoặc TCCS 40:2022 khi sử dụng bã mía trong BTXM mặt đường. Các tiêu chí quan trọng như độ bền mài mòn, độ bền thấm ion xâm thực, độ bền lâu trong môi trường ẩm – nhiệt hoặc khả năng chịu tải trọng trục nặng trong thời gian dài vẫn chưa được xem xét đầy đủ [3], [10], [11]. Đáng chú ý, vẫn còn thiếu các phân tích vi mô mang tính tổng hợp để làm rõ mối liên hệ giữa tính chất của bã mía đã qua xử lý, sự phát triển cấu trúc vi mô của BTXM và các đặc tính cơ học dài hạn. Hơn nữa, chưa có khung nghiên cứu thống nhất về hàm lượng tối ưu, điều kiện xử lý, tính tương thích với xi măng hoặc giới hạn kỹ thuật cho ứng dụng thực tế. Những thiếu hụt này cho thấy bã mía là nguồn phụ phẩm đầy tiềm năng nhưng cần được đánh giá toàn diện hơn để xác định khả năng sử dụng trong BTXM mặt đường.

Trước các khoảng trống nêu trên, bài báo này được xây dựng nhằm cung cấp một phân tích tổng quan có hệ thống về tiềm năng của bã mía trong chế tạo BTXM ứng dụng cho mặt đường cứng. Bài báo tập trung làm rõ xu hướng phát triển vật liệu tái chế trong BTXM, tổng hợp và phân tích các kết quả nghiên cứu hiện hành liên quan đến bã mía dưới dạng tro hoặc sợi, đồng thời đánh giá mức độ phù hợp của các nghiên cứu này đối với yêu cầu của mặt đường theo tiêu chuẩn Việt Nam. Bài báo cũng nhận diện các rào cản và giới hạn kỹ thuật trong nghiên cứu hiện nay, từ đó đề xuất các định hướng phát triển trong tương lai để nâng cao tính bền vững và khả năng ứng dụng thực tế. Từ những giới hạn này, để tiếp cận vấn đề một cách hệ thống, bài báo được bố cục gồm các nội dung sau: (i) trình bày chi tiết về bã mía và các quy trình xử lý để tạo vật liệu sử dụng trong BTXM, (ii) phân tích chuyên sâu ảnh hưởng của các dạng vật liệu này đến BTXM, (iii) đánh giá khả năng ứng dụng trong mặt đường và sự phù hợp với tiêu chuẩn, và (iv) đưa ra kết luận và kiến nghị.

## 2. Bã mía phế thải và quy trình xử lý làm vật liệu sử dụng trong BTXM

### 2.1. Bã mía

Bã mía là phụ phẩm đặc trưng được tạo ra trong quá trình ép mía thu hồi nước – công đoạn trung tâm của sản xuất đường. Sau khi tách bỏ nước mía, phần xác mía còn lại chủ yếu tồn tại dưới dạng các bó sợi thực vật có cấu trúc rỗng, phân tán, bề mặt phát triển mạnh (Hình 1), tạo nên một mạng lưới lignocellulose có độ rỗng cao và khả năng giữ nước đáng kể [33], [34], [35], [36]. Khối lượng bã mía thường chiếm khoảng 25–30 % khối lượng cây mía nguyên liệu [22], [23], [36], tức là mỗi tấn mía khi ép sẽ phát sinh khoảng 250–300 kg bã mía thải. Về phương diện hóa học, bã mía được xếp vào nhóm vật liệu sinh học

lignocellulose điển hình với thành phần tương đối ổn định, gồm xấp xỉ 50 % cellulose, 25 % hemicellulose và 25 % lignin [37], [38], [39], [40], [41], [42]. Ba cấu phần này không chỉ quyết định độ bền kéo, khả năng phân tách thành sợi mảnh và hoạt tính bề mặt của bã mía, mà còn là cơ sở cho việc khai thác chúng như một pha cốt sợi hoặc chất độn hữu hiệu trong các hệ vật liệu composite và hệ nền xi măng.

Xét trên bình diện nguồn cung, bã mía gắn liền trực tiếp với quy mô phát triển của ngành mía đường toàn cầu. Niên vụ 2022–2023, sản lượng mía thế giới đạt gần 182 triệu tấn [43], kéo theo lượng phụ phẩm bã mía lên đến hàng chục triệu tấn mỗi năm. Trong nhiều thập niên, bã mía chủ yếu được tận dụng cho các mục đích truyền thống như làm chất đốt trong nhà máy đường, nhiên liệu lò hơi, nguyên liệu sản xuất cồn sinh học, bột giấy, hoặc làm thức ăn gia súc sau khi lên men [24], [26], [27]. Tuy nhiên, các chuỗi giá trị này mới chỉ tiêu thụ một phần hạn chế nguồn sinh khối sẵn có; phần bã mía dư thừa thường bị đốt bỏ hoặc chất đống ngoài môi trường, tiềm ẩn nguy cơ phát thải khí nhà kính, gây ô nhiễm không khí, đất và nước, đồng thời làm lãng phí một nguồn tài nguyên sinh khối tái tạo có giá trị.

Ở Việt Nam, ngành mía đường giữ vai trò quan trọng trong cơ cấu cây trồng nông nghiệp. Theo Hiệp hội Mía đường Việt Nam, đến tháng 6/2023, sản lượng lũy kế đã đạt trên 9 triệu tấn mía ép [44]. Các thống kê những năm gần đây cho thấy sản lượng mía trung bình khoảng 15 triệu tấn/năm, tương ứng với khoảng 8,2 triệu tấn phụ phẩm sinh khối; trong đó, khoảng 4,0 triệu tấn là bã mía và 3,4 triệu tấn là ngọn, lá mía [30], [45]. Riêng vùng Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) – nơi có điều kiện khí hậu nắng nhiều, đất đai phù hợp cho cây mía – hiện có diện tích trồng mía khoảng 10.165 ha với sản lượng gần 942,4 nghìn tấn (Hình 2) [25]. Các số liệu này cho thấy bã mía tại Việt Nam nói chung và ĐBSCL nói riêng là nguồn nguyên liệu tái chế dồi dào, có tiềm năng trở thành đầu vào cho các chuỗi giá trị vật liệu mới nếu được khai thác hợp lý.

Trên cơ sở đó, nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước đã định hướng tái chế bã mía theo hướng giá trị gia tăng cao hơn, đặc biệt trong lĩnh vực vật liệu xây dựng. Các nghiên cứu trước [26], [41], [42], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52] cho thấy bã mía có thể được chuyển hóa thành hai dạng vật liệu chính có khả năng ứng dụng trong BTXM: (i) sợi bã mía (Sugarcane Bagasse Fiber – SBF) sau khi cắt, xử lý cơ-hóa học, dùng làm cốt sợi gia cường vi mô; và (ii) tro bã mía (Sugarcane Bagasse Ash – SCBA) thu được sau quá trình đốt có kiểm soát, có thể sử dụng như phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng hoặc làm cốt liệu mịn. Mỗi dạng vật liệu tác động lên cấu trúc vi mô và tính chất cơ học của BTXM theo những cơ chế khác nhau [53] – sợi SBF góp phần phân tán vết nứt, tăng khả năng chịu kéo và tăng độ dẻo phá hoại, trong khi SCBA có thể tham gia phản ứng pozzolan, cải thiện độ đặc chắc vi cấu trúc và tiềm năng giảm hàm lượng clinker. Như vậy, việc hiểu rõ bản chất vi cấu trúc, thành phần hóa học, nguồn cung và hiện trạng sử dụng bã mía là bước tiền đề quan trọng để đánh giá đúng tiềm năng của loại phụ phẩm này trong phát triển các hệ BTXM bền vững, hiệu quả vật liệu và thân thiện môi trường.

## 2.2. Quy trình xử lý bã mía dạng tro (SCBA)

SCBA được xem là một trong những phụ phẩm giàu silica có tiềm năng trở thành vật liệu pozzolan hiệu quả [54]. Khi được nghiền mịn và đưa vào hệ chất kết dính xi măng, SCBA có khả năng phản ứng với  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sinh ra trong quá trình hydrat hóa, hình thành gel C–S–H thứ cấp, nhờ đó cải thiện độ đặc chắc, giảm rỗng và tăng cường độ cho bê tông. Tuy nhiên, hoạt tính này phụ thuộc rất lớn vào mức độ loại bỏ chất hữu cơ, nhiệt độ xử lý, kích thước hạt, cũng như mức độ vô định hình của silica – những yếu tố quyết định hiệu quả của quy trình chuyển hóa bã mía thành SCBA.

Nhìn chung, quy trình chế tạo SCBA (Hình 3) bao gồm các bước tuần tự: (1) thu gom bã mía từ các nguồn sản xuất và làm khô bằng phơi hoặc sấy để hạ độ ẩm; (2) vệ sinh và loại bỏ tạp chất như đất, cát, mảnh gỗ hoặc tạp hữu cơ nhằm đảm bảo độ tinh khiết của tro; (3) xử lý nhiệt – giai đoạn quan trọng nhất, quyết định mức độ cháy hoàn toàn của cellulose và hemicellulose cũng như sự phân hủy của lignin; (4) làm nguội, sàng lọc để thu tro có kích thước đồng đều; và (5) nghiền mịn để tăng diện tích bề mặt, từ đó nâng cao khả năng tham gia phản ứng pozzolan.

Theo Itam và cộng sự [55], nhiệt độ xử lý trong khoảng 500–600 °C duy trì trong nhiều giờ giúp loại bỏ phần lớn tạp chất hữu cơ và thu được tro có hàm lượng silica cao. Tuy nhiên, các nghiên cứu tại Việt Nam như của Hiền và Sheen [30] hoặc Minh [24] thường sử dụng nhiệt độ cao hơn (700–750 °C trong 1–3 giờ) nhằm tạo SCBA có độ tinh khiết tốt hơn và giảm lượng carbon chưa cháy – một yếu tố quan trọng bởi carbon dư làm giảm hoạt tính pozzolan và ảnh hưởng màu sắc của tro. Hussien và Oan [31] đề xuất quy trình hai giai đoạn, gồm đốt ở 600 °C và xử lý bổ sung ở 200 °C để giảm carbon còn sót lại và đồng thời ổn định màu sắc sản phẩm.

Sự khác biệt đáng kể giữa các chế độ nhiệt phản ánh tầm quan trọng của kỹ thuật đốt đối với thành phần hóa học (Bảng 1), trạng thái vô định hình, và tính chất cơ – lý của SCBA. Nhiệt độ quá thấp (<500 °C) không đủ phân hủy hoàn toàn cellulose và hemicellulose, dẫn đến lượng chất hữu cơ còn sót lại cao, làm giảm hoạt tính pozzolan. Ngược lại, nhiệt độ quá cao (>800 °C) gây kết tinh silica từ dạng vô định hình sang tinh thể (thường là quartz hoặc cristobalite), làm giảm mạnh khả năng phản ứng. Vì vậy, mỗi nghiên cứu thường lựa chọn chế độ nhiệt tối ưu dựa trên mục tiêu ứng dụng cụ thể: dùng thay thế một phần xi măng, làm cốt liệu mịn, hoặc làm nguyên liệu trong các hệ chất kết dính lai (hybrid binders).

Kết quả ở Bảng 1 cho thấy thành phần SCBA biến thiên mạnh theo quy trình xử lý, với hàm lượng  $\text{SiO}_2$  từ 24–77 % và mức oxit kiềm ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) khá cao – yếu tố có thể ảnh hưởng đến tính kiềm hoạt hóa hoặc gây nguy cơ phản ứng kiềm-silica nếu sử dụng trong BTXM có cốt liệu dễ phản ứng. Điều này đặt ra yêu cầu kiểm soát chặt chẽ nhiệt độ đốt, thời gian giữ nhiệt và điều kiện nghiền nhằm thu được SCBA có trạng thái vô định hình cao, cấu trúc hạt đồng đều, phù hợp tiêu chuẩn pozzolan. Như vậy, quy trình xử lý SCBA không chỉ là bước kỹ thuật chuyển hóa phụ phẩm bã mía thành vật liệu hữu dụng mà còn là yếu

tổ quyết định chất lượng cuối cùng của tro, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến ứng dụng của SCBA trong BTXM. Việc tối ưu hóa các thông số công nghệ là cần thiết để khai thác tối đa tiềm năng của SCBA trong các hệ vật liệu xây dựng bền vững.

### 2.3. Quy trình xử lý bã mía dạng sợi (SBF)

Bên cạnh SCBA, SBF là một hướng tái chế giàu tiềm năng nhờ cấu trúc lignocellulose đặc trưng với hàm lượng cellulose cao, cho phép hoạt động như một pha gia cường hiệu quả trong các hệ vật liệu nền xi măng. Tuy nhiên, để SBF có thể tương thích với môi trường kiềm mạnh của hồ xi măng và phát huy tối đa hiệu quả cơ học, cần phải thực hiện các quy trình xử lý nhằm loại bỏ đường, tạp chất hữu cơ và cải thiện sự bám dính ở bề mặt sợi. Các bước xử lý này được mô tả chi tiết trong Hình 4 và 5.

Theo đó, quy trình tái chế SBF bắt đầu với việc thu gom và vệ sinh bã mía nhằm loại bỏ bụi, đất và tạp chất lớn, sau đó phơi hoặc sấy khô để ổn định độ ẩm. Giai đoạn tiếp theo là xử lý hóa học hoặc xử lý nhiệt – hai nhóm kỹ thuật chủ đạo được nhiều nghiên cứu áp dụng. Khalid và cộng sự [56] đề xuất phương pháp ngâm NaOH 50 % trong 3 ngày (Hình 5), với mục tiêu tách lignin và hemicellulose, loại bỏ đường sót lại và làm thô bề mặt sợi, từ đó tăng ma sát cơ học và khả năng bám dính với hồ xi măng. Nhân [57] cũng áp dụng xử lý kiềm tương tự để làm sạch sợi và nâng cao hiệu quả làm việc của chúng trong BTXM.

Ngoài xử lý hóa học, xử lý nhiệt là nhóm phương pháp được ghi nhận mang lại hiệu quả đáng kể trong việc cải thiện độ ổn định của sợi trong môi trường kiềm. Patel và Patel [58] áp dụng quy trình sấy ở 50–60 °C trong 1 giờ, qua đó làm giảm độ ẩm và tăng độ hút nước của sợi lên tới 286,6 % (Bảng 2). Độ hút nước cao giúp hồ xi măng dễ xâm nhập vào mao quản và bám dính tốt hơn trên bề mặt sợi. Desta [59] sử dụng kỹ thuật đun nước nóng ở 90 °C trong 1 giờ để hòa tan phần đường còn tồn dư, đồng thời giữ lại cấu trúc sợi cứng, phù hợp để gia cường cho BTXM.

Như thể hiện trong Bảng 2, các tính chất vật lý chủ yếu của SBF sau khi xử lý bao gồm đường kính trung bình khoảng 1,50 mm, chiều dài dao động từ 30–90 mm, khối lượng riêng 0,52 g/cm<sup>3</sup> và khối lượng thể tích 260 kg/m<sup>3</sup>. Đây đều là những thông số quan trọng phản ánh bản chất của SBF như một loại vật liệu sinh học có mật độ thấp, cấu trúc xốp và tỉ lệ diện tích bề mặt trên thể tích lớn. Chính cấu trúc rỗng cùng độ hút nước cao (lên đến hơn 280 % trong nghiên cứu của Patel và Patel [58]) cho thấy sợi có khả năng hấp thụ một lượng nước đáng kể vào hệ mao quản bên trong. Đặc tính này tạo ra hai tác động trái chiều đối với BTXM: một mặt giúp hồ xi măng thâm nhập sâu vào mạng mao quản, tăng độ bám dính cơ học và hóa học tại vùng chuyển tiếp (interfacial transition zone – ITZ); mặt khác làm tăng nhu cầu nước trộn và có nguy cơ ảnh hưởng đến độ linh động của hỗn hợp nếu không có biện pháp điều chỉnh thích hợp. Do vậy, việc hiểu rõ các tính chất vật lý này là hết sức cần thiết để thiết kế cấp phối và biện pháp xử lý tương ứng khi đưa SBF vào các hệ vật liệu xi măng.

Diện tích bề mặt lớn và hình dạng dạng sợi dài mang lại lợi thế

đáng kể trong việc kiểm soát sự phát triển vết nứt. Khi được phân tán đều trong ma trận xi măng, SBF có thể tạo thành mạng liên kết ba chiều, giúp tăng khả năng kháng nứt nhờ cơ chế neo giữ và gia cường vi mô. Trong giai đoạn đầu của sự hình thành vết nứt, sự hiện diện của sợi giúp làm chậm quá trình nứt, tăng cường độ dai và khả năng chịu biến dạng kéo. Điều này đặc biệt hữu ích trong các ứng dụng yêu cầu khả năng kiểm soát nứt sớm như trong vữa chống co ngót, tấm mỏng xi măng hoặc các cấu kiện bê tông dễ chịu tác động nhiệt. Bên cạnh đó, khối lượng riêng thấp của SBF làm giảm đáng kể mật độ tổng thể của bê tông chứa sợi, mở ra tiềm năng sử dụng trong các vật liệu nhẹ hoặc vật liệu thân thiện môi trường.

Trên bình diện tổng hợp, các phương pháp xử lý SBF dù khác nhau về bản chất nhưng đều hướng đến những mục tiêu chung: (i) gia tăng độ sạch của vật liệu thông qua loại bỏ đường, chất hữu cơ và lignin dư; (ii) cải thiện mức độ bám dính giữa sợi và hồ xi măng bằng cách làm thô hoặc hoạt hóa bề mặt; và (iii) nâng cao độ bền của sợi trong môi trường kiềm để tránh suy thoái trong thời gian dài. Điều này là tối quan trọng bởi lignocellulose vốn dễ bị phân hủy trong môi trường có pH cao của xi măng. Các phương pháp xử lý kiềm giúp loại bỏ một phần lignin và hemicellulose, đồng thời làm lộ cấu trúc cellulose tinh khiết hơn – vốn có mức ổn định cao hơn và khả năng liên kết tốt hơn với các sản phẩm hydrat hóa. Khi so sánh với SCBA, có thể nhận thấy quá trình chế tạo vật liệu từ bã mía theo hai hướng tro và sợi có nhiều điểm tương đồng trong giai đoạn đầu như thu gom, phân loại, phơi hoặc sấy khô và vệ sinh. Tuy nhiên, sự khác biệt căn bản nằm ở mục tiêu ứng dụng: SCBA được xử lý nhiệt ở nhiệt độ cao nhằm chuyển hóa thành dạng tro có hoạt tính pozzolan, phù hợp thay thế xi măng hoặc cốt liệu mịn; trong khi đó SBF lại tập trung vào duy trì hình dạng sợi và tối ưu hóa khả năng gia cường, kiểm soát vết nứt và nâng cao độ dai cho hệ BTXM. Điều này dẫn đến sự đa dạng trong các quy trình xử lý SBF, yêu cầu sự kết hợp giữa hóa học và cơ học để vừa đảm bảo độ sạch, vừa giữ được hình dạng sợi nguyên vẹn.

Quy trình tổng hợp cho cả SCBA và SBF được minh họa trong Hình 6, thể hiện chuỗi chuyển hóa bã mía từ phụ phẩm giá trị thấp thành nguồn vật liệu xây dựng tiềm năng thông qua các công đoạn liên hoàn: thu gom, sấy khô, phân loại, xử lý nhiệt hoặc hóa học, nghiền – rây sàng hoặc cắt nhỏ, và kiểm soát kích thước hạt hoặc chiều dài sợi. Chính sự chuẩn hóa quy trình này là nền tảng then chốt đảm bảo tính ổn định của vật liệu, khả năng tái lập giữa các mẻ sản xuất, và tính phù hợp khi ứng dụng vào các hệ BTXM bền vững, thân thiện môi trường.

### 3. Ảnh hưởng của SCBA đến các tính chất của BTXM

Việc sử dụng SCBA làm phụ gia khoáng hoặc vật liệu thay thế một phần xi măng trong BTXM đang ngày càng thu hút sự quan tâm trong giới nghiên cứu. Bản chất của SCBA không chỉ giúp giảm hàm lượng clinker tiêu thụ, từ đó giảm phát thải CO<sub>2</sub>, mà còn có thể cải thiện đồng thời tính chất cơ học, cấu trúc vi mô và độ bền lâu dài của bê tông. Tuy nhiên, hiệu quả này phụ thuộc vào nhiều yếu tố như hàm lượng thay thế, nhiệt độ xử lý, mức độ nghiền mịn và tỷ lệ vô định hình

của silica trong tro. Để làm rõ các xu hướng chính, nội dung dưới đây được tổng hợp theo hướng phân tích toàn diện, phản ánh một cách rõ ràng sự tương tác phức tạp giữa SCBA và hệ xi măng.

### 3.1. Đặc trưng của SCBA

Các nghiên cứu trước đây đã khẳng định rằng SCBA là một dạng phụ gia khoáng có giá trị cao trong BTXM, đặc biệt khi quá trình xử lý đảm bảo thu được lượng silica vô định hình lớn và kích thước hạt đủ mịn [60], [61], [62], [63]. Silica vô định hình đóng vai trò trung tâm trong cơ chế phản ứng pozzolan, trong đó SCBA kết hợp với  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng để hình thành gel C-S-H thứ cấp. Chính sự gia tăng hàm lượng gel C-S-H này giúp cải thiện cấu trúc vi mô, làm giảm thể tích lỗ rỗng và tăng khả năng chịu nén cũng như tính bền của bê tông.

Tuy nhiên, khả năng pozzolan của SCBA bị chi phối mạnh bởi điều kiện đốt ban đầu. Khi tro được nung ở nhiệt độ quá thấp, phần lớn cellulose, hemicellulose và lignin chưa bị phân hủy hoàn toàn, làm tăng hàm lượng carbon chưa cháy. Carbon dư này không chỉ làm giảm hoạt tính mà còn gây ảnh hưởng đến màu sắc hỗn hợp, làm giảm tính công tác và thậm chí suy giảm cường độ của BTXM. Ngược lại, khi tro được nung ở nhiệt độ quá cao (thường  $> 800\text{ }^\circ\text{C}$ ), silica chuyển từ dạng vô định hình sang dạng tinh thể, làm giảm đáng kể khả năng phản ứng pozzolan và làm giảm tốc độ phát triển cường độ. Như vậy, dải nhiệt độ tối ưu để tạo SCBA có hoạt tính cao thường nằm trong khoảng 600–750  $^\circ\text{C}$ . Khoảng nhiệt độ này vừa đảm bảo loại bỏ tạp chất hữu cơ, vừa giữ được tỷ lệ cao silica vô định hình. Bên cạnh đó, quy trình nghiền mịn cũng đóng vai trò quyết định. Nhiều nghiên cứu cho thấy kích thước hạt SCBA nhỏ (khoảng dưới 300  $\mu\text{m}$ ) giúp tăng diện tích bề mặt hoạt tính, cải thiện độ đặc chắc của BTXM và nâng cao đáng kể cường độ chịu nén. Điều này phản ánh một thực tế quan trọng: SCBA là phụ gia khoáng “xanh” giàu tiềm năng nhưng hiệu quả phụ thuộc chặt chẽ vào chế độ xử lý, mức độ nghiền, và tỷ lệ sử dụng hợp lý trong cấp phối vật liệu.

### 3.2. Độ sụt của hỗn hợp

Độ sụt là một trong những chỉ tiêu quan trọng nhất nhằm đánh giá tính công tác của hỗn hợp BTXM. Khi thay thế xi măng bằng SCBA, độ sụt có thể thay đổi theo hai xu hướng trái ngược tùy thuộc vào bản chất tro, mức độ nghiền mịn và hàm lượng carbon chưa cháy trong SCBA [64]. Xu hướng thứ nhất là tăng độ sụt. Một số nghiên cứu ghi nhận rằng hỗn hợp bê tông có SCBA trở nên linh động hơn, thậm chí đạt độ chảy vượt trội so với mẫu đối chứng. Sobuz và cộng sự [29] quan sát độ sụt tăng đáng kể khi thay thế một phần xi măng. Srinivasan và Sathiyaraj [65] báo cáo độ sụt cải thiện mạnh ở mức thay thế 5–25 %, với giá trị 187–230 mm so với chỉ 60 mm ở mẫu đối chứng. Điều này được lý giải bởi hiệu ứng “bôi trơn” của hạt mịn, giúp tăng khả năng dịch chuyển của các hạt trong hỗn hợp. Mangi và cộng sự [66] cũng ghi nhận độ sụt tăng 15–45 % ở bê tông M15 và M20 chứa 5–10 %

SCBA. Chusilp và cộng sự [67] còn cho thấy độ sụt tăng từ 150 lên 190 mm ở mức thay thế 30 %.

Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu khác lại cho thấy xu hướng giảm độ sụt khi sử dụng SCBA. Một số nghiên cứu [40], [68], [69], [70], [71] chỉ ra rằng để đạt được độ sụt tương đương với mẫu không chứa SCBA, cần bổ sung thêm nước hoặc phụ gia siêu dẻo. Abdalla và cộng sự [72] quan sát thấy độ sụt giảm mạnh khi tỷ lệ SCBA được nâng lên 50 %. Nguyên nhân chính bắt nguồn từ độ hút nước cao và cấu trúc xốp của SCBA, khiến lượng nước tự do trong hỗn hợp bị hấp thụ vào bề mặt và mao quản tro. Tình trạng này làm giảm lượng nước có sẵn để duy trì tính công tác, dẫn đến hiện tượng hỗn hợp khô nhanh, khó đầm chặt.

Do đó, ảnh hưởng của SCBA đến độ sụt không đồng nhất mà phụ thuộc vào ba yếu tố then chốt: (i) mức độ nghiền mịn, (ii) lượng carbon chưa cháy, và (iii) cấu trúc lỗ rỗng của tro. Sự khác biệt lớn giữa các nguồn SCBA và quy trình xử lý giải thích vì sao xu hướng biến thiên độ sụt trong các nghiên cứu không giống nhau, phản ánh tính chất phức tạp của SCBA khi đưa vào hệ xi măng.

### 3.3. Cường độ chịu nén

Cường độ chịu nén là chỉ tiêu cơ học quan trọng nhất phản ánh chất lượng tổng thể của hệ xi măng – cốt liệu và là chỉ số trực tiếp đánh giá vai trò của SCBA trong việc phát triển cấu trúc bền chắc của BTXM. SCBA, khi thay thế một phần xi măng, tác động đến cường độ theo nhiều cơ chế khác nhau, bao gồm hiệu ứng pozzolan, hiệu ứng điền đầy (filler effect), mức độ nghiền mịn, hàm lượng carbon chưa cháy và cấu trúc lỗ rỗng của tro. Tổng hợp các nghiên cứu tại Việt Nam và quốc tế cho thấy, khi SCBA được xử lý đúng quy trình và sử dụng ở tỷ lệ hợp lý, cường độ chịu nén có thể tăng rất đáng kể.

Một trong những nghiên cứu nổi bật nhất là của Minh [24], trong đó SCBA được thay thế ở mức chỉ 4,5 % nhưng cường độ nén tăng từ 20,83 MPa lên đến 74,33 MPa – mức tăng gần 3,5 lần. Cần lưu ý rằng mức tăng cường độ rất lớn này đạt được trong những điều kiện thí nghiệm cụ thể, bao gồm SCBA được xử lý nhiệt và nghiền mịn phù hợp, cấp phối ban đầu có cường độ tương đối thấp và chế độ dưỡng hộ được kiểm soát. Do đó, kết quả này nên được hiểu như một trường hợp điển hình phản ánh tiềm năng cải thiện cấu trúc của SCBA trong một hệ bê tông nền chưa được tối ưu, hơn là một giá trị đại diện có thể áp dụng cho mọi hệ bê tông chứa SCBA. Trong bối cảnh đó, sự gia tăng cường độ ghi nhận được cho thấy khả năng đóng góp đồng thời của hai cơ chế chính của SCBA: (i) hiệu ứng điền đầy, trong đó các hạt SCBA siêu mịn lấp đầy khoảng rỗng giữa các hạt xi măng và cốt liệu, góp phần tạo cấu trúc ban đầu đặc chắc hơn; và (ii) hoạt tính pozzolan, với phản ứng giữa SCBA và  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sinh ra gel C-S-H thứ cấp, bổ sung mạng lưới liên kết trong giai đoạn phát triển cường độ muộn. Các xu hướng này được phản ánh trong Hình 7 thông qua sự gia tăng cường độ nén ở tỷ lệ SCBA thấp.

Nhiều nghiên cứu trong nước như của Thảo và cộng sự [73] cũng cho thấy xu hướng tăng cường độ, đặc biệt trong giai đoạn sau 56–112 ngày. Điều này phù hợp với bản chất chậm của phản ứng pozzolan:

SCBA tiêu thụ dần  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  để tạo gel C–S–H phụ, làm tăng mật độ cấu trúc theo thời gian.

Ở quy mô quốc tế, các kết quả từ Elawadly và Sanad [74], Itam và cộng sự [55] hoặc Hussien và Oan [31] đều khẳng định hiệu quả của SCBA trong cải thiện cường độ. Tại mức thay thế 4,5–5 %, cường độ ở tuổi 28 ngày tăng từ 13 % đến 27 %. Ở mức thay thế 10 %, Sobuz và cộng sự [29], Sankeeth và cộng sự [75] hoặc Bheel và cộng sự [76] cũng ghi nhận mức tăng dao động 8–15 %, chứng tỏ khoảng 10 % SCBA thường là mốc cân bằng giữa lượng xi măng bị thay thế và lượng gel C–S–H tạo thêm từ phản ứng pozzolan.

Tuy nhiên, hiệu quả tăng cường độ không phải luôn duy trì ở tỷ lệ SCBA cao. Khi SCBA được dùng với hàm lượng lớn (20–60 %), đặc biệt khi tro không đủ mịn hoặc còn carbon chưa cháy, cường độ chịu nén giảm đáng kể. Kết quả của Hiên và Sheen [30] cho thấy cường độ giảm ngay cả khi tỷ lệ chỉ 10 %, còn nghiên cứu của Chindaprasirt và cộng sự [77] báo cáo cường độ 28 ngày giảm từ 44 xuống 34 MPa ở mức thay thế 20 % (Hình 8). Nguyên nhân chính xuất phát từ lượng clinker bị thay thế quá lớn, trong khi SCBA không đủ hoạt tính để tạo lượng gel C–S–H bù lại sự thiếu hụt gel từ xi măng.

Như vậy, xu hướng chung của các nghiên cứu khẳng định rằng SCBA có thể làm tăng đáng kể cường độ chịu nén nếu được xử lý đúng kỹ thuật và sử dụng ở mức thay thế tối ưu, thường nằm trong khoảng 4,5–10 %. Đây là vùng mà hiệu ứng điền đầy và phản ứng pozzolan phối hợp hiệu quả nhất với nhau.

### 3.4. Cường độ chịu uốn

Cường độ chịu uốn đóng vai trò quan trọng đặc biệt đối với các ứng dụng như BTXM mặt đường, nơi kết cấu làm việc chủ yếu theo cơ chế chịu kéo – uốn dưới tải trọng động. Ảnh hưởng của SCBA lên cường độ chịu uốn không chỉ phụ thuộc vào lượng gel C–S–H thứ cấp tạo ra mà còn phụ thuộc mạnh vào chất lượng của vùng chuyển tiếp ITZ – nơi SCBA thường đóng vai trò cải thiện mật độ liên kết và khả năng truyền lực giữa hồ xi măng và cốt liệu.

Các nghiên cứu tổng hợp cho thấy SCBA cải thiện cường độ uốn rõ nhất ở mức thay thế thấp đến trung bình. Tại mức 4,5–5 %, Elawadly và Sanad [74] ghi nhận cường độ tăng từ 8,26 lên 8,54 MPa, còn Bhargavi và Murali [78] cho thấy cường độ của bê tông M20 tăng từ 3,92 lên 4,38 N/mm<sup>2</sup>. Sự cải thiện này chủ yếu đến từ hiệu ứng điền đầy trong vùng ITZ: các hạt SCBA siêu mịn chèn vào các khoảng rỗng, làm giảm đứt đoạn cấu trúc và tạo môi trường truyền ứng suất đồng đều hơn. Ở mức 10 % SCBA, hiệu quả cải thiện còn rõ rệt hơn. Sobuz và cộng sự [29] ghi nhận mức tăng cường độ uốn lên đến 18,61 % ở 28 ngày, trong khi Malyadri và Supriya [79] hoặc Amin và cộng sự [80] ghi nhận sự phát triển cường độ ổn định từ 28 đến 90 ngày, phản ánh sự bền vững của cơ chế pozzolan. Một số nghiên cứu như của Dhengare và cộng sự [81] cho thấy SCBA vẫn có khả năng nâng cao cường độ uốn ngay ở tỷ lệ cao hơn (15–20 %), như tăng từ 4,10 lên 6,30 MPa ở bê tông M25, hoặc từ 5,10 lên 6,50 MPa ở M35. Tuy nhiên, xu hướng tăng này không phải luôn ổn định. Nếu SCBA còn carbon chưa cháy hoặc có

kích thước hạt quá lớn, các hạt tro có thể trở thành “điểm gián đoạn” trong ITZ, làm giảm khả năng chịu uốn và truyền lực của BTXM.

Nhìn chung, SCBA cải thiện cường độ uốn thông qua ba cơ chế chính: (i) làm đặc ITZ nhờ hiệu ứng điền đầy; (ii) tăng lượng gel C–S–H giúp tăng liên kết nền; và (iii) giảm sự xuất hiện và lan truyền của vết nứt. Các kết quả cho thấy mức SCBA 5–10 % là tối ưu để cải thiện cường độ uốn mà không làm suy yếu cấu trúc ITZ.

### 3.5. Độ chịu mài mòn

Độ chịu mài mòn là chỉ tiêu đặc biệt quan trọng đối với các kết cấu BTXM mặt đường, nơi bề mặt bê tông phải liên tục chịu tác động cơ học do ma sát từ bánh xe, sự cào xước của bụi cát, cũng như ảnh hưởng lâu dài của môi trường ẩm – khô và các tác nhân xâm thực. Khả năng kháng mài mòn không chỉ quyết định tuổi thọ lớp mặt mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến độ bằng phẳng, độ an toàn vận hành và chi phí bảo trì công trình giao thông. Các kết quả tổng hợp từ nhiều nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng của SCBA đối với độ chịu mài mòn có tính hai chiều, phụ thuộc mạnh vào tỷ lệ thay thế, chất lượng tro, và hiệu quả của phản ứng pozzolan. Khi SCBA được sử dụng ở tỷ lệ thấp, tro có xu hướng góp phần cải thiện hoặc duy trì khả năng kháng mài mòn, chủ yếu nhờ hiệu ứng điền đầy (filler effect) và sự gia tăng gel C–S–H thứ cấp. Các hạt SCBA siêu mịn lấp đầy những mao quản nhỏ trên bề mặt bê tông, tạo ra một lớp bề mặt đặc chắc hơn, làm giảm tốc độ phá hủy do lực ma sát. Đồng thời, phản ứng hóa học giữa SCBA và  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  làm tăng lượng gel C–S–H – thành phần chịu trách nhiệm chính cho sự gắn kết và mật độ cấu trúc của bề mặt. Tuy nhiên, xu hướng này không duy trì khi SCBA được sử dụng ở tỷ lệ lớn. Kết quả điển hình từ nghiên cứu của Chindaprasirt và cộng sự [77] cho thấy lượng vật liệu bị mài mòn tăng đáng kể khi mức thay thế tro tăng cao: từ 0,05 g ở mẫu đối chứng lên 0,06 g (20 % SCBA), 0,17 g (40 % SCBA) và đạt tới 0,30 g khi thay thế 60 % SCBA. Mức gia tăng mạnh này phản ánh rõ sự suy giảm tính bền mài mòn khi clinker – nguồn tạo gel C–S–H chính – bị thay thế quá nhiều. Khi lượng xi măng giảm đáng kể, gel C–S–H hình thành từ phản ứng thủy hóa ban đầu bị giảm mạnh, trong khi tro ở tỷ lệ cao không đủ hoạt tính để bù lại lượng liên kết bị mất. Kết quả là bề mặt bê tông trở nên kém đặc chắc, giảm khả năng chống phá hủy do mài mòn.

Ngoài ra, chất lượng tro cũng đóng vai trò quyết định. Nếu SCBA chứa lượng carbon chưa cháy cao hoặc kích thước hạt lớn, tro không tạo được lớp bề mặt liên kết đồng đều mà thậm chí hình thành các “điểm gián đoạn”, làm tăng tốc độ phá hủy cơ học khi chịu ma sát. Tình trạng này thường xuất hiện ở các mẫu SCBA đốt không đủ nhiệt độ, không được sàng lọc hoặc không được nghiền mịn. Tuy vậy, điều quan trọng cần nhấn mạnh là xu hướng giảm độ bền mài mòn chỉ xảy ra khi SCBA được dùng ở mức rất cao (20–60 %) – mức không phù hợp với yêu cầu kỹ thuật trong bất kỳ tiêu chuẩn BTXM mặt đường nào. Khi xem xét các nghiên cứu sử dụng SCBA ở mức ≤10–15 %, phần lớn công bố cho thấy SCBA không làm giảm hoặc chỉ làm giảm rất nhẹ khả năng kháng mài mòn. Ở mức thay thế thấp, hiệu ứng điền đầy và sự hình thành gel C–S–H thứ cấp đủ để duy trì độ đặc chắc của lớp mặt,

đảm bảo khả năng chịu mài mòn đáp ứng yêu cầu.

Nhìn chung, tác động của SCBA đến độ bền mài mòn phụ thuộc chủ yếu vào ba yếu tố chính: (i) Tỷ lệ thay thế – yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất; (ii) Chất lượng tro – liên quan đến mức độ nung, hàm lượng carbon chưa cháy, kích thước hạt; và (iii) Khả năng pozzolan – ảnh hưởng đến lượng gel C-S-H hình thành trong giai đoạn phát triển cấu trúc. Trong giới hạn ứng dụng thực tế (5–10 %), SCBA hoàn toàn có thể được sử dụng trong BTXM mặt đường mà vẫn đáp ứng yêu cầu của các tiêu chuẩn như TCCS 39:2022 và TCCS 40:2022, đồng thời mang lại lợi ích về cường độ, độ bền và tính bền vững môi trường.

#### 4. Ảnh hưởng của sợi, hạt bã mía tái chế đến các tính chất của BTXM

##### 4.1. Đặc trưng của SBF

Việc tái sử dụng bã mía trong ngành xây dựng dưới dạng sợi (Sugarcane Bagasse Fiber – SBF) đang trở thành một trong những hướng tiếp cận vật liệu bền vững đầy triển vọng, bổ sung cho dòng nghiên cứu sử dụng SCBA như phụ gia khoáng. Điểm nổi bật của SBF là quy trình tái chế không cần đốt ở nhiệt độ cao, giúp giữ nguyên cấu trúc lignocellulose tự nhiên – một cấu trúc hữu cơ gồm cellulose, hemicellulose và lignin với tỉ lệ cân bằng, mang lại độ dai, độ bền kéo và khả năng biến dạng cao. Cấu trúc lignocellulose không chỉ duy trì hình dạng sợi ổn định mà còn tạo ra bề mặt phân tầng – xốp – có khả năng cài móc cơ học tốt trong nền xi măng. Điều này tạo ra sự khác biệt cơ bản giữa SBF và các loại cốt liệu vô cơ, cho phép SBF hoạt động theo cơ chế gia cường giống các sợi tự nhiên hoặc sợi polymer mềm.

Một trong những ưu điểm quan trọng của SBF là khả năng phân tán ứng suất và hạn chế phát triển vết nứt trong giai đoạn đầu của quá trình chịu tải. Khi BTXM bắt đầu xuất hiện các vết nứt do biến dạng hoặc tải trọng, các sợi phân bố trong nền xi măng đóng vai trò như “cầu nối vi mô” (micro-bridges), giúp truyền ứng suất qua các mặt cắt nứt, làm chậm lại quá trình mở rộng nứt. Nhờ cơ chế này, SBF đặc biệt hiệu quả trong quá trình kiểm soát nứt sớm do co ngót hoặc biến dạng nhiệt – một vấn đề thường xuyên xảy ra ở BTXM thông thường.

Ngoài việc kiểm soát nứt, SBF còn tăng độ dai phá hoại của BTXM. Trong khi bê tông truyền thống có xu hướng phá vỡ giòn, SBF có thể chuyển hóa cơ chế phá hoại sang dạng dẻo hơn nhờ khả năng hấp thụ năng lượng khi sợi bị kéo trượt, kéo đứt hoặc bị tách ra khỏi nền xi măng. Sự kết hợp giữa khả năng chịu kéo của cellulose và tương tác cơ học tốt giữa bề mặt sợi và ma trận hồ xi măng khiến SBF hoạt động tương tự các dạng sợi gia cường nhẹ khác (như sợi PP, sợi PVC), nhưng lại có ưu thế lớn về chi phí và bền vững. Bên cạnh đó, đặc trưng nhẹ và xốp của SBF cho phép ứng dụng trong các hệ bê tông đặc biệt như bê tông nhẹ, bê tông bọt và gạch bê tông, nơi yêu cầu mật độ thấp nhưng vẫn duy trì được độ dai và khả năng chịu tải nhất định. Các nghiên cứu trước [38], [82], [83], [84] cho thấy SBF cải thiện đáng kể vùng chuyển tiếp ITZ – vốn là vùng dễ xuất hiện khuyết tật – nhờ hiệu ứng điền đầy vi mô và sự cài móc cơ học của sợi vào trong hồ xi măng.

Về phương diện môi trường, SBF nổi bật ở khả năng tái tạo, phân

hủy sinh học và phát thải carbon bằng gần 0 trong quá trình tái chế. Không giống như sợi thép hoặc sợi polymer cần năng lượng lớn trong sản xuất, SBF chỉ cần xử lý bằng phương pháp rửa, sấy hoặc xử lý kiềm ở mức độ vừa phải, giúp giảm đáng kể chi phí năng lượng và phát thải CO<sub>2</sub>. Do đó, SBF phù hợp với xu thế phát triển vật liệu xây dựng xanh và nền kinh tế tuần hoàn. Tổng hợp lại, đặc trưng của SBF cho thấy đây là vật liệu gia cường tự nhiên giàu tiềm năng, với cơ chế cải thiện tính cơ học thông qua giảm nứt – tăng độ dai – cải thiện ITZ – phân tán ứng suất, đặc biệt phù hợp cho các hệ BTXM nhẹ, BTXM mặt đường yêu cầu chống nứt và gạch bê tông cần cấu trúc ổn định.

##### 4.2. Cường độ chịu nén

Ảnh hưởng của SBF lên cường độ chịu nén của BTXM là một chủ đề nghiên cứu phức tạp với nhiều kết quả khác nhau, phản ánh sự phụ thuộc mạnh vào tỷ lệ sợi, chiều dài sợi, độ sạch của bề mặt, mức độ phân tán và mức độ tương tác hóa học – cơ học giữa sợi và nền xi măng. Khác với SCBA – vốn cải thiện cường độ nén chủ yếu thông qua phản ứng pozzolan – SBF cải thiện hoặc làm giảm cường độ chủ yếu thông qua cơ chế vi mô của sự truyền ứng suất.

Ở mức hàm lượng nhỏ đến trung bình, nhiều nghiên cứu ghi nhận xu hướng cải thiện cường độ nén. Khalid và cộng sự [56] cho thấy chỉ 0,5 % SBF (dài 5–10 cm) đã giúp tăng cường độ nén 28 ngày, nhờ khả năng hạn chế sự hình thành các vết nứt lớn trong giai đoạn chịu tải. Anandaraj và cộng sự [85] khi kết hợp SBF với tro đáy, đã ghi nhận mức tăng ấn tượng: từ 21,52 lên 26,72 MPa (7 ngày) và từ 28,80 lên 33,98 MPa (28 ngày). Điều này chứng tỏ SBF không chỉ hoạt động độc lập mà còn có thể tạo hiệu ứng cộng hưởng tích cực với các loại phế thải vô cơ khác.

Đối với bê tông bọt, Madhwani và cộng sự [86] cho thấy 1 % SBF làm tăng tới 38 % cường độ nén ở 28 ngày – một mức tăng rất lớn đối với loại vật liệu vốn có cấu trúc xốp và dễ phá hoại giòn. Các nghiên cứu của Micheal và Moussa [87], Jamshaid và cộng sự [88] và Kiamahalleh và cộng sự [89] đều ghi nhận sự cải thiện cường độ trong các loại cấu kiện và cấp phối khác nhau, thể hiện phạm vi ứng dụng rất rộng của SBF. Đáng chú ý, hình ảnh minh họa trong Hình 9 cho thấy các viên gạch bê tông có bổ sung SBF hoặc sử dụng bột bã mía mịn hơn đều có tải trọng phá hoại cao hơn và cấu trúc bề mặt bền chắc hơn. Điều này khẳng định vai trò của SBF trong việc phân tán ứng suất và tăng độ bền tổng thể. Tuy nhiên, xu hướng tăng cường độ này không phải là tuyệt đối. Khi hàm lượng sợi vượt quá mức tối ưu, cường độ nén có thể giảm nhanh.

Hussien và Oan [31] báo cáo rằng khi thêm 1–2 % SBF, cường độ giảm từ 27,7 MPa xuống 16,3 và 13,8 MPa. Nghiên cứu của Asim và cộng sự [91] còn ghi nhận sự suy giảm đáng kể hơn: tăng hàm lượng sợi từ 2,5 % lên 10 % khiến cường độ giảm từ 12,6 xuống còn 4,5 MPa, thấp hơn cả mẫu đối chứng (13,4 MPa). Hình 10 minh họa rõ hiệu ứng “giảm mạnh” này khi lượng sợi quá lớn.

Ba cơ chế chính giải thích sự suy giảm cường độ ở hàm lượng sợi cao gồm: (i) Cản trở quá trình nén chặt, tạo ra các lỗ rỗng lớn làm

suy yếu cấu trúc; (ii) Sự phân tán không đều, dẫn đến hiện tượng “kết tụ sợi” (fiber balling) gây đứt đoạn cấu trúc; (iii) Liên kết yếu tại ITZ, đặc biệt khi sợi chưa được xử lý bề mặt hoặc bị phủ bởi tạp chất, làm giảm khả năng truyền ứng suất. Tổng hợp lại, SBF có thể cải thiện cường độ nén khi sử dụng trong phạm vi 0,5–2 %, nhưng khi vượt quá mức này, hiệu ứng tiêu cực trở nên chiếm ưu thế, làm giảm đáng kể cường độ của BTXM.

#### 4.3. Cường độ chịu uốn

Ảnh hưởng của SBF lên cường độ chịu uốn của BTXM nhìn chung rõ rệt và nhất quán hơn so với cường độ nén, bởi cơ chế làm việc của sợi phát huy hiệu quả mạnh trong trạng thái chịu kéo và chịu uốn – vốn là điểm yếu đặc trưng của bê tông thông thường. Trong các hệ BTXM không cốt sợi, khi chịu uốn, vết nứt thường khởi đầu ở vùng chịu kéo rồi nhanh chóng lan truyền qua toàn bộ chiều cao tiết diện, dẫn đến phá hoại giòn. Sự hiện diện của SBF tạo nên cơ chế “bắc cầu vết nứt” (crack bridging) và “neo giữ vi mô” (micro-anchorage), giúp tăng năng lượng cần thiết để vết nứt phát triển, nhờ đó nâng cao cả cường độ uốn lẫn độ dai phá hoại của vật liệu.

Nghiên cứu của Desta [59] là một minh chứng điển hình cho hiệu quả của liều lượng sợi nhỏ. Chỉ với 0,5 % SBF có chiều dài trung bình 25 mm, cường độ uốn 28 ngày đã tăng đối với cả bê tông thường (từ 8,16 lên 8,38 MPa) và bê tông nhẹ (từ 6,58 lên 7,31 MPa). Dù giá trị tuyệt đối tăng không quá lớn, kết quả này cho thấy ngay cả hàm lượng sợi thấp cũng đủ tạo ra sự thay đổi đáng kể trong cơ chế chịu uốn, bằng cách trì hoãn sự chuyển trạng thái từ đàn hồi sang phá hoại giòn. Ở các mức hàm lượng và hình học sợi cao hơn, tác động của SBF càng rõ rệt khi sợi được phân tán tốt trong ma trận xi măng. Ruano và cộng sự [92] sử dụng 0,8 % SBF với chiều dài 6 mm và ghi nhận cường độ uốn tăng khoảng 25 %, đồng thời tải trọng phá hoại uốn vượt mẫu đối chứng tới 4 kN. Sự gia tăng này phản ánh vai trò của sợi ngăn, phân bố đồng đều trong việc cải thiện vùng chịu kéo, làm giảm mật độ và kích thước vết nứt. Anandaraj và cộng sự [85] với 1 % SBF cũng báo cáo cường độ uốn tăng rõ rệt ở 7 và 28 ngày (từ 3,12 lên 4,18 MPa và từ 4,82 lên 6,18 MPa). Các kết quả này phù hợp với phân tích vi mô: SBF góp phần lấp đầy các lỗ rỗng nhỏ trong vùng ITZ và tạo liên kết cơ học với nền xi măng, từ đó tăng khả năng truyền ứng suất qua mặt cắt chịu kéo.

Những nghiên cứu tổng quan hơn như của Jamshaid và cộng sự [88] chỉ ra rằng quanh hàm lượng 1,5 % SBF, cường độ chịu uốn đạt giá trị tối ưu trong nhiều cấp phối khác nhau; tỷ lệ này đảm bảo đủ mật độ sợi để bắc cầu vết nứt nhưng chưa gây ra hiện tượng kết tụ hoặc tăng rỗng. Philip và cộng sự [93] khi nghiên cứu trên bê tông cốt thép cũng ghi nhận xu hướng tương tự: việc bổ sung SBF cải thiện đáng kể khả năng phân tán ứng suất trong vùng bê tông bao quanh cốt thép, làm tăng mô men phá hoại và giảm độ mở rộng vết nứt ở giai đoạn làm việc giới hạn.

Đáng chú ý, một số nghiên cứu cho thấy ngay cả khi hàm lượng SBF tăng đến mức tương đối cao, cường độ uốn vẫn tiếp tục được cải thiện nếu sợi được xử lý bề mặt và phân tán hợp lý. Kiamahalleh và

cộng sự [89] báo cáo rằng với 3 % SBF theo khối lượng cốt liệu mịn, cường độ uốn tăng 35 % (từ 4,18 lên 5,65 MPa), chứng minh rằng trong các hệ bê tông được thiết kế riêng cho sợi (ví dụ dùng cốt liệu mịn hơn, phụ gia siêu dẻo), việc dùng hàm lượng sợi cao hơn vẫn có thể chấp nhận được. Tương tự, Nhân [57] cho thấy trên mẫu B25, khi sử dụng khoảng 3,91 % SBF, cường độ uốn đạt 38,95 daN/cm<sup>2</sup>, tăng khoảng 46 % so với mẫu đối chứng, kết quả được minh họa bằng đường cong trong Hình 11.

Tổng hợp các kết quả cho thấy một số điểm quan trọng: Thứ nhất, SBF đặc biệt hiệu quả trong cải thiện cường độ uốn và độ dai kéo, ngay cả ở hàm lượng thấp (0,5–1 %). Thứ hai, chiều dài và khả năng phân tán của sợi đóng vai trò quyết định: sợi quá dài dễ kết tụ, sợi quá ngắn giảm tác dụng bắc cầu vết nứt. Thứ ba, với các hệ bê tông được thiết kế phù hợp (dùng phụ gia siêu dẻo, cốt liệu mịn, quy trình trộn hợp lý), hàm lượng sợi có thể tăng lên tới 2–3 % mà vẫn cải thiện cường độ uốn. Do đó, SBF có thể được xem là một giải pháp gia cường hiệu quả cho các ứng dụng BTXM mặt đường, bản mỏng, tấm chịu uốn và các cấu kiện yêu cầu khả năng kháng nứt cao.

#### 4.4. Khả năng chống nứt

Khả năng chống nứt là một trong những ưu điểm nổi bật nhất của SBF khi ứng dụng trong BTXM, đặc biệt đối với các hệ kết cấu làm việc trong điều kiện co ngót, nhiệt độ thay đổi hoặc chịu tải trọng lặp. Trong bê tông truyền thống, nứt có thể xuất hiện ở giai đoạn rất sớm (co ngót nhựa, co ngót khô) và phát triển thành các vết nứt lớn dưới tác dụng của tải trọng và môi trường. SBF, với vai trò là pha gia cường phân tán, có khả năng thay đổi đáng kể cơ chế khởi đầu và lan truyền vết nứt.

Hussien và Oan [31] đã thực hiện một nghiên cứu có hệ thống về sự hình thành vết nứt trên tấm BTXM có và không sử dụng 1–2 % SBF. Kết quả cho thấy các tấm có bổ sung SBF xuất hiện vết nứt với chiều dài, bề rộng nhỏ hơn đáng kể so với tấm đối chứng (Hình 12). Điều này minh chứng rằng SBF hoạt động như “liên kết vi mô” duy trì tính liên tục của cấu trúc khi ứng suất kéo vượt quá sức chịu của hồ xi măng. Khi vết nứt bắt đầu khởi tạo, sợi sẽ chịu lực kéo dọc thân, chống lại sự mở rộng của vết nứt và buộc quá trình phá hoại phải tiêu tốn nhiều năng lượng hơn.

Cơ chế chống nứt của SBF có thể phân tích ở ba cấp độ:

(i) Cấp độ vi mô (micro-scale): SBF phân bố trong đá xi măng, cài vào mạng gel C–S–H và cốt liệu mịn. Khi vi nứt hình thành ở vùng ITZ, các sợi gần đó sẽ chịu lực kéo, làm giảm tốc độ mở rộng của vi nứt. Sự tương tác này làm giảm ứng suất kéo cục bộ, hạn chế tập trung ứng suất và tăng độ dẻo của vùng chịu kéo.

(ii) Cấp độ cấu kiện (meso/macro-scale): Trên các tấm BTXM mặt đường, SBF giúp chuyển hóa cơ chế phá hoại từ một vài vết nứt lớn sang nhiều vết nứt nhỏ, phân tán đều. Điều này không chỉ cải thiện độ bền chức năng (ít hư hỏng cục bộ nghiêm trọng) mà còn giảm nguy cơ phát triển thành các dạng hư hỏng thứ cấp như nứt tẩm, nứt cạnh hay mẻ góc.

(iii) Cấp độ bền lâu dài: Sự hiện diện của SBF giúp duy trì độ kín

nước tốt hơn nhờ hạn chế độ mở rộng vết nứt, giảm xâm nhập của nước, ion xâm thực và các chất gây hại. Nhờ đó, SBF gián tiếp cải thiện độ bền lâu dài của BTXM, đặc biệt trong môi trường ẩm ướt hoặc xâm thực.

Khi đặt trong bức tranh tổng thể của các sản phẩm bê tông tái chế, có thể thấy SBF và SCBA bổ sung cho nhau hơn là cạnh tranh. SCBA, với đặc trưng là phụ gia khoáng hoạt tính, chủ yếu đóng vai trò làm tăng cường độ nén và độ bền lâu dài thông qua phản ứng pozzolan và làm đặc vi cấu trúc. Ngược lại, SBF tập trung cải thiện các tính chất chịu kéo – chịu uốn, khả năng kháng nứt và độ dai phá hoại. Tổng hợp các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước cho thấy: (i) SBF đạt hiệu quả kháng nứt tối ưu ở hàm lượng khoảng 0,5–2 %, trong khi hàm lượng cao hơn tuy vẫn có thể tăng khả năng chống nứt nhưng thường làm giảm cường độ nén và tính công tác và (ii) SCBA thường được dùng ở mức 5–20 % khối lượng xi măng, có xu hướng tăng cường độ nén, cải thiện độ bền mài mòn và độ bền lâu dài, đồng thời giảm co ngót nhờ làm đặc cấu trúc lỗ rỗng.

Bảng 3 đã hệ thống hóa các khác biệt chính giữa hai dạng vật liệu bê tông tái chế – dạng sợi/hạt (SBF, bột bê tông) và dạng tro (SCBA) – về tỷ lệ sử dụng tối ưu, ảnh hưởng đến cường độ nén, cường độ uốn, khả năng chống nứt, phương pháp xử lý và ứng dụng chính. Từ đó có thể rút ra chiến lược sử dụng hợp lý: SCBA nên được xem như thành phần thay thế xi măng để cải thiện độ bền lâu dài, trong khi SBF phù hợp đóng vai trò gia cường trong các cấu kiện chịu kéo – uốn, đặc biệt là BTXM mặt đường, tấm mỏng, gạch bê tông và các cấu kiện dễ nứt. Như vậy, kết hợp SBF và SCBA trong cùng một hệ BTXM mở ra khả năng tối ưu hóa đồng thời cường độ – độ bền – khả năng chống nứt, đồng thời khai thác hiệu quả phụ phẩm bê tông theo định hướng vật liệu xây dựng xanh và kinh tế tuần hoàn.

## 5. Khả năng sử dụng phế thải bê tông tái chế trong BTXM mặt đường

Trong bối cảnh Việt Nam đang thúc đẩy chuyển đổi sang hệ vật liệu xây dựng bền vững, việc tái sử dụng phế thải nông nghiệp là một trong những chiến lược quan trọng nhằm giảm áp lực lên nguồn tài nguyên tự nhiên, giảm chi phí xử lý chất thải và hướng tới phát triển kinh tế tuần hoàn. Bê tông, với trữ lượng lớn hàng năm từ ngành bê tông, là một trong những nguồn sinh khối có tiềm năng ứng dụng cao trong BTXM – đặc biệt trong lĩnh vực mặt đường BTXM, nơi đòi hỏi cường độ cao, ổn định thể tích và khả năng chống chịu mài mòn, nứt và tác động môi trường.

Các tiêu chuẩn TCCS 39:2022 [10] và TCCS 40:2022 [11] đóng vai trò là nền tảng kỹ thuật quan trọng để đánh giá khả năng sử dụng các vật liệu thay thế trong BTXM mặt đường. Các tiêu chuẩn này quy định ngặt nghèo về hàm lượng xi măng tối thiểu, tỷ lệ nước/xi măng, cường độ chịu kéo uốn, độ mài mòn và cường độ chịu nén (Bảng 4). Các chỉ tiêu này nhằm đảm bảo mặt đường có khả năng chịu tải tốt, ổn định thể tích khi chịu co ngót – biến dạng nhiệt, và duy trì độ bền lâu trong điều kiện khí hậu ẩm nóng. Đối chiếu với các yêu cầu nêu trong TCCS 39:2022 và TCCS 40:2022, có thể nhận thấy rằng phần lớn các nghiên cứu về BTXM sử dụng bê tông tái chế hiện nay mới tập trung

kiểm chứng một số chỉ tiêu cơ học cơ bản, đặc biệt là cường độ chịu nén và cường độ chịu uốn. Các kết quả tổng hợp trong Mục 3 và Mục 4 cho thấy hai chỉ tiêu này đã được đánh giá tương đối đầy đủ đối với cả SCBA và SBF, với nhiều trường hợp đạt hoặc vượt giá trị yêu cầu ở các cấp phối phù hợp. Tuy nhiên, các chỉ tiêu mang tính quyết định đối với tuổi thọ và khả năng khai thác lâu dài của mặt đường BTXM, như độ bền mỏi do uốn dưới tải trọng lặp, khả năng kháng mài mòn bề mặt và khả năng chống thấm ion xâm thực (RCPT), vẫn còn rất hạn chế dữ liệu hoặc chưa được đánh giá trực tiếp trong các nghiên cứu tổng hợp hiện có. Do đó, việc đối sánh với tiêu chuẩn hiện nay mới chỉ dừng ở mức một phần, chủ yếu dựa trên các chỉ tiêu cơ học ngắn hạn, và chưa phản ánh đầy đủ các yêu cầu về độ bền lâu dài của mặt đường BTXM theo các tiêu chuẩn cơ sở. Điều này cho thấy, mặc dù bê tông tái chế có tiềm năng rõ rệt trong việc cải thiện cơ tính và tính bền vững của BTXM, nhưng vẫn cần thêm các nghiên cứu chuyên sâu hơn để kiểm chứng đầy đủ khả năng đáp ứng tiêu chuẩn trong điều kiện khai thác thực tế.

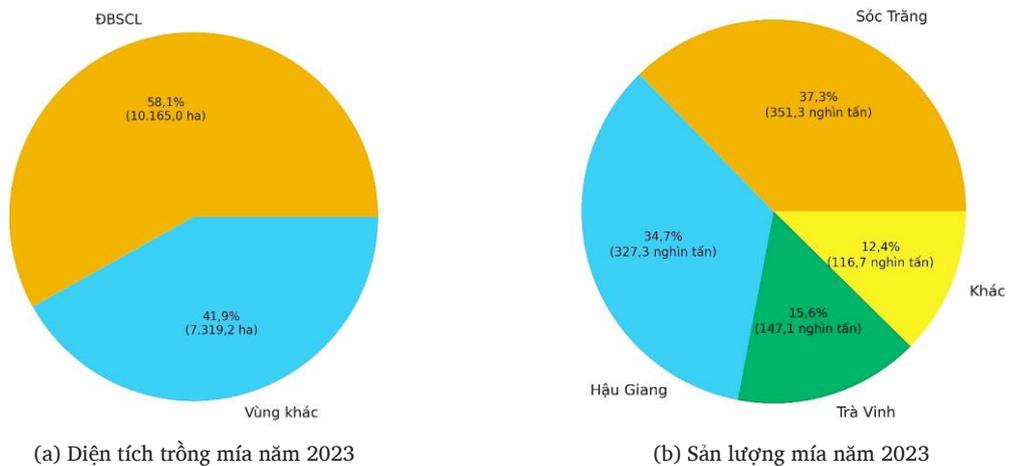
Một số chỉ tiêu kỹ thuật về BTXM mặt đường được thống kê ở Bảng 4. Trong đó, các yêu cầu kỹ thuật chính gồm: hàm lượng xi măng  $\geq 290\text{--}300\text{ kg/m}^3$ ; tỷ lệ N/X chỉ trong khoảng 0,44–0,48; cường độ kéo uốn  $\geq 4,5\text{--}5,0\text{ MPa}$ ; độ mài mòn  $\leq 0,3\text{--}0,6\text{ g/cm}^2$ ; và cường độ chịu nén phải đáp ứng phân cấp theo TCVN 12209:2018 hoặc các tiêu chuẩn liên quan. Như vậy, vật liệu tái chế chỉ có thể được chấp nhận nếu không gây suy giảm các tính chất cơ học – độ bền và ưu tiên trường hợp có thể cải thiện chúng.

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu của Patel và Patel [58] đưa ra minh chứng quan trọng cho vai trò của SBF như một vật liệu gia cường sinh học phù hợp cho BTXM mặt đường. Với hàm lượng chỉ 1 % và chiều dài sợi 90 mm, cường độ chịu nén tăng 9 % và cường độ uốn tăng 6 %, cho thấy SBF tạo tác động tích cực và ổn định lên BTXM mặt đường (Hình 13). Cơ chế chính của sự cải thiện này đến từ đặc tính phân tán ứng suất và hiệu ứng “bắc cầu vết nứt” của SBF, theo đó các sợi mảnh duy trì sự nối kết giữa hai bề mặt nứt, làm chậm tốc độ lan truyền nứt và yêu cầu năng lượng lớn hơn để phá hoại. Điều này giúp chuyển hóa dạng phá hoại từ giòn sang dẻo – yếu tố quan trọng giúp nâng cao khả năng chống nứt, chống mỏi và tăng tuổi thọ khai thác mặt đường.

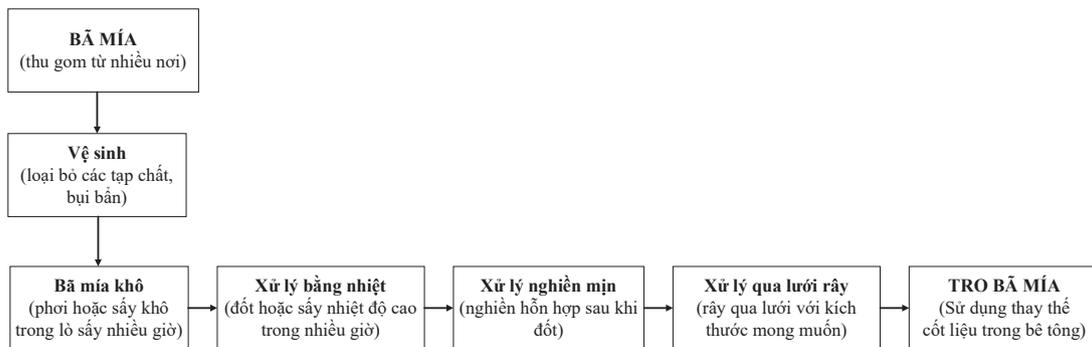
Khi đối chiếu các kết quả này với yêu cầu trong TCCS 39:2022 và TCCS 40:2022, có thể thấy bổ sung SBF không những không làm suy giảm mà còn hỗ trợ BTXM đạt hoặc vượt tiêu chuẩn: Cường độ chịu uốn  $\geq 4,5\text{--}5,0\text{ MPa}$  hoàn toàn khả thi khi dùng 1 % SBF; độ mài mòn – vốn phụ thuộc nhiều vào cấu trúc bề mặt – có thể được cải thiện gián tiếp nhờ giảm nứt vi mô; và cường độ nén tăng 9 % cho thấy SBF không gây giảm mật độ, trái lại giúp ổn định cấu trúc vi mô. Ngoài ra, vai trò của SBF càng trở nên quan trọng khi xét đến các dạng phá hoại thường gặp ở BTXM mặt đường như: Nứt do co ngót nhiệt, nứt do chênh lệch nhiệt giữa ngày và đêm, nứt do mỏi dưới tải trọng lặp và nứt sớm do nhiệt thủy hóa và độ ẩm không đồng đều. SBF giúp giảm đáng kể nguy cơ hình thành và lan truyền các dạng nứt này, nhờ vậy làm tăng tuổi thọ công trình và giảm chi phí bảo trì. Điều này đặc biệt quan trọng đối với đường giao thông nông thôn, nơi kinh phí duy tu thường hạn chế.



Hình 1. Cây mía và phế thải bã mía.



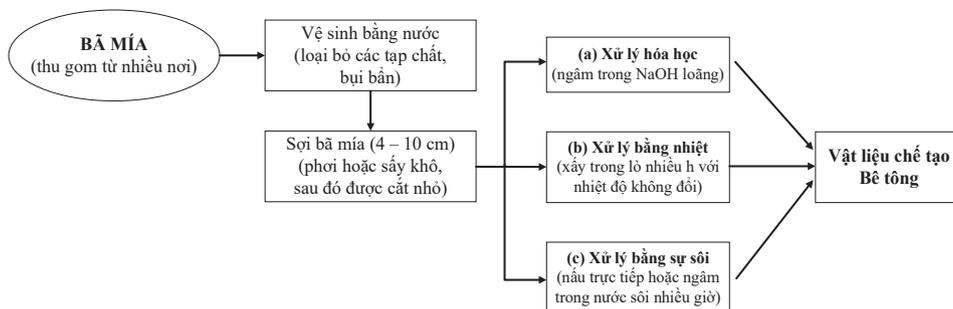
Hình 2. Diện tích và sản lượng mía vùng ĐBSCL [25].



Hình 3. Quy trình tái chế bã mía thành dạng tro.

Bảng 1. Thành phần hóa học của SCBA dùng trong các nghiên cứu.

Thành phần (%)										Tham khảo
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
24,4	-	2,4	15,0	4,2	-	3,4	0,8	-	36,2	[24]
74,9	6,5	2,1	1,4	1,1	0,4	0,8	0,6	0,8	2,8	[30]
26,9	1,7	1,5	8,5	5,3	-	8,2	-	-	21,4	[31]
65,4	4,5	1,6	2,8	2,3	-	-	-	0,6	4,7	[32]
77,3	6,4	4,3	4,1	2,6	0,6	0,6	-	1,4	2,3	[29]



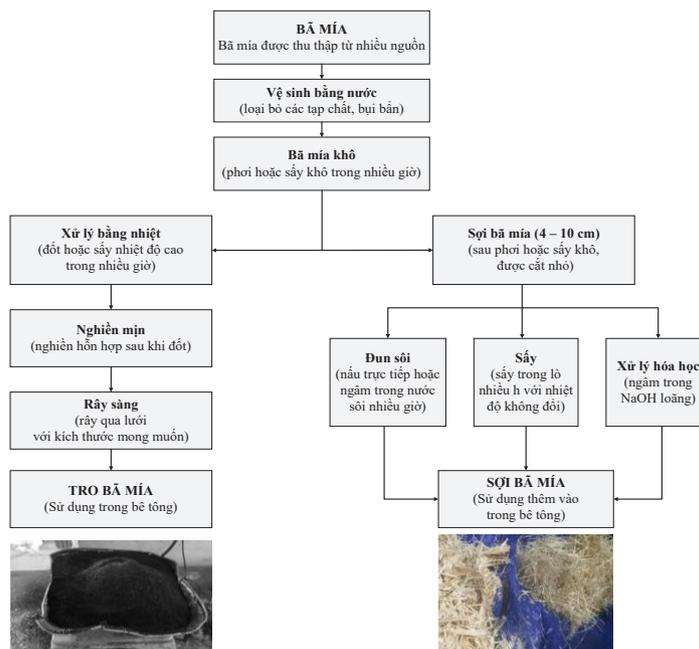
Hình 4. Quy trình tái chế bã mía thành dạng sợi [56], [57], [58], [59].



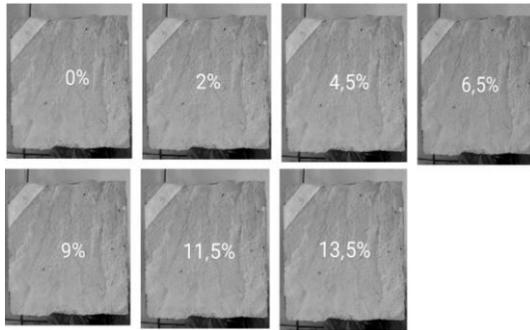
Hình 5. Quy trình xử lý SBF của Khalid và cộng sự [56].

Bảng 2. Các tính chất của SBF trong nghiên cứu Patel và Patel [58].

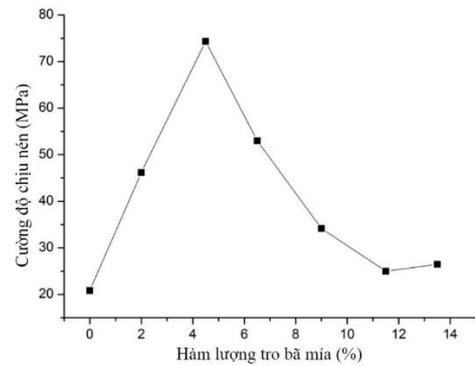
Stt	Tính chất kiểm tra	SBF
1	Đường kính, mm	1,50
2	Chiều dài, mm	30, 60 và 90
3	Khối lượng riêng, g/cm <sup>3</sup>	0,52
4	Độ hút nước, %	286,6
5	Khối lượng thể tích, kg/m <sup>3</sup>	260



Hình 6. Quy trình tổng hợp xử lý bã mía thành dạng tro hoặc sợi.

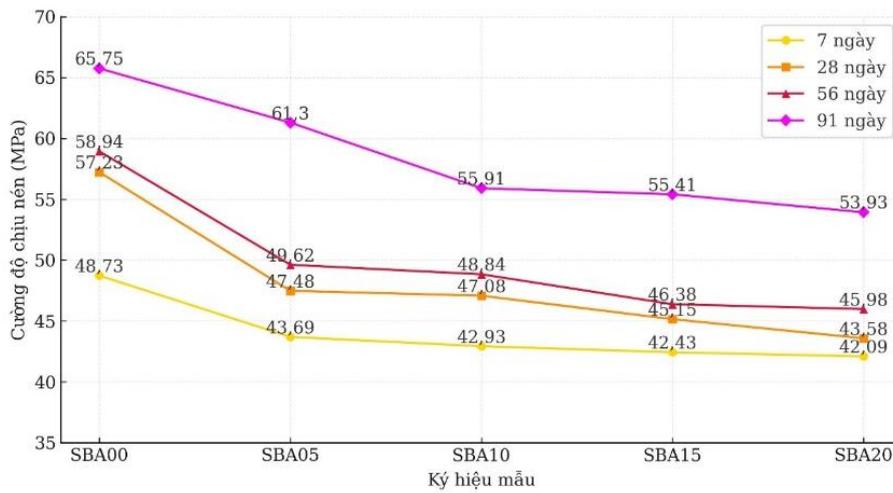


(a) Bê tông có SCBA thay xi măng



(b) Cường độ chịu nén của bê tông

**Hình 7.** Sử dụng SCBA thay thế xi măng trong sản xuất bê tông [24].



**Hình 8.** Cường độ chịu nén của mẫu bê tông sử dụng SCBA [30].

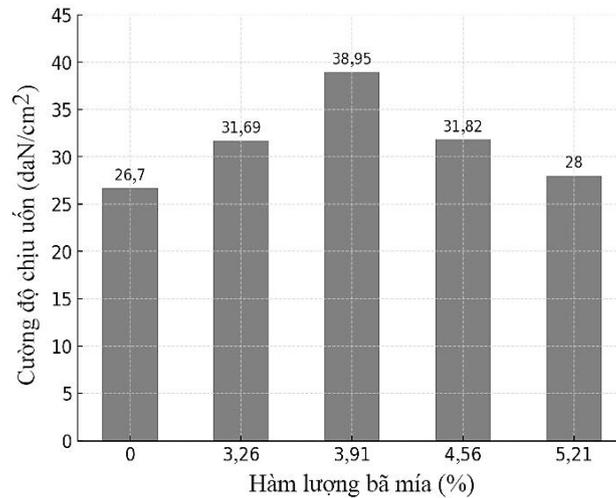


**Hình 9.** Chế tạo gạch bê tông sử dụng SBF [87], [90].



2,5% sợi bã mía BTXM    5% sợi bã mía BTXM    7,5% sợi bã mía BTXM    10% sợi bã mía BTXM

Hình 10. Chế tạo bê tông sử dụng SBF từ 2,5 – 10 % [91].



Hình 11. Giá trị cường độ chịu uốn của BTXM có sử dụng SBF [57].



(a) Tấm BTXM có SBF



(b) Tấm BTXM không có SBF

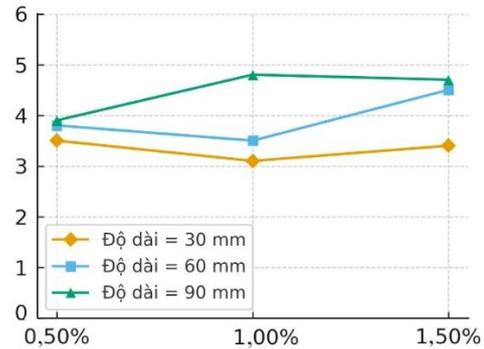
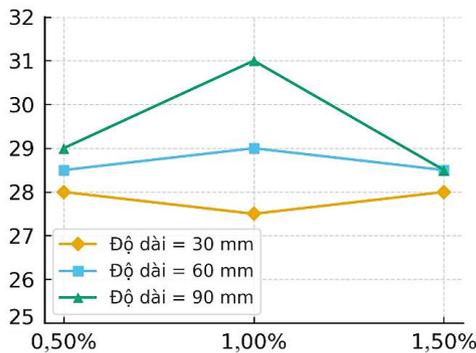
Hình 12. Sự hình thành vết nứt trong các tấm BTXM [31].

Bảng 3. Hiệu quả sử dụng bã mía tái chế làm vật liệu chế tạo BTXM.

STT	Đặc tính BTXM	Bã mía tái chế dạng sợi, hạt (bột)	Bã mía tái chế dạng tro
1	Tỷ lệ sử dụng tối ưu	0,5 % – 2,0 %	5 % – 20 %
2	Cường độ chịu uốn	Tăng đáng kể	Tăng nhưng ảnh hưởng ít hơn so với dạng sợi
3	Cường độ chịu nén	Có thể giảm nhẹ ở tỷ lệ cao	Tăng khi sử dụng
4	Khả năng chống nứt	Rất tốt, giảm ứng suất kéo	Hạn chế co ngót, giảm nứt cho bê tông
5	Phương pháp xử lý	Rửa sạch, phơi, hoặc xử lý hóa học	Nung ở nhiệt độ cao, cắt và nghiền mịn
6	Ứng dụng chính	Gia cường cấu kiện bê tông chịu lực động và chịu kéo	Thay thế xi măng, tăng cường bền lâu dài
7	Hạn chế	Khó kiểm soát đồng nhất sợi	Cần đầu tư xử lý nhiệt, các chỉ tiêu giảm ở tỷ lệ cao

**Bảng 4.** Các tiêu chuẩn kỹ thuật về BTXM mặt đường.

Chi tiêu áp dụng	Đường cấp cao (cấp I, cấp II)	Đường cấp III	Đường cấp IV
Hàm lượng xi măng (kg/m <sup>3</sup> ) [10], [11]	≥ 300	≥ 290	≥ 290
Tỷ lệ nước/xi măng (N/X)	Yêu cầu trong phạm vi 0,44 đến 0,48		
Cường độ chịu kéo uốn (MPa) [10], [11], [94], [95]	≥ 5,0	≥ 4,5	≥ 4,5
Độ mài mòn (g/cm <sup>2</sup> ) [10], [11], [96], [97], [98]	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,6
Cường độ chịu nén (MPa) [99]	Là đặc tính cơ bản của bê tông		



(a) Cường độ chịu nén

(b) Cường độ chịu uốn

**Hình 13.** Giá trị cường độ BTXM mặt đường với 1 % SBF [58].

Mặc dù SBF và SCBA cho thấy nhiều tiềm năng, việc ứng dụng phế thải bã mía trong BTXM mặt đường tại Việt Nam vẫn còn ở giai đoạn ban đầu. Hiện chưa có nghiên cứu nào trong nước đánh giá một cách hệ thống theo các tiêu chuẩn TCCS 39:2022 và TCCS 40:2022. Các nghiên cứu hiện tại chủ yếu dừng lại ở đánh giá các tính chất cơ học đơn lẻ, chưa xem xét sâu các yếu tố quan trọng sau: (i) độ bền lâu dài: kháng mài mòn theo chu kỳ, kháng môi, kháng sunfat, kháng muối – nước; (ii) tương thích vật liệu: sự tương tác giữa SBF/SCBA với các loại xi măng PCB30–PCB40–PC50 đang dùng tại Việt Nam; (iii) ảnh hưởng của điều kiện khí hậu ĐBSCL và duyên hải miền Trung, nơi độ ẩm, nhiệt độ và chu kỳ ướt–khô có thể ảnh hưởng lớn đến bền lâu của sợi; (iv) công nghệ thi công, như mức độ phân tán sợi, sử dụng phụ gia siêu dẻo, hoặc ảnh hưởng đến độ linh động và khả năng đầm; và (v) tác động thực tế tại hiện trường, thay vì chỉ kết quả trong phòng thí nghiệm.

Những khoảng trống nghiên cứu này mở ra hướng phát triển quan trọng cho các đề tài trong tương lai, đặc biệt trong bối cảnh Việt Nam đang triển khai chương trình phát triển vật liệu xanh và kinh tế tuần hoàn. Tổng quan lại, phế thải bã mía – dưới cả hai dạng SCBA và SBF – có tiềm năng rất lớn trong BTXM mặt đường nếu được nghiên cứu và ứng dụng đúng cách. Với những lợi ích về cơ học, độ bền, môi trường và kinh tế đã được chứng minh, bã mía hoàn toàn có thể trở thành một trong những nguồn vật liệu tái chế chiến lược của ngành xây dựng giao thông Việt Nam trong giai đoạn 2025–2035.

## 6. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp và phân tích toàn diện các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến việc tái chế bã mía dưới hai

dạng vật liệu chính – SCBA và SBF – để sử dụng trong BTXM, đặc biệt hướng tới ứng dụng mặt đường cứng. Kết quả tổng quan cho thấy SCBA, khi được xử lý nhiệt đúng quy trình và nghiền mịn, có hoạt tính pozzolan đáng kể và khả năng cải thiện nhiều tính chất quan trọng của BTXM, bao gồm cường độ nén, độ đặc chắc, độ bền mài mòn và khả năng kháng xâm thực. SBF, với cấu trúc lignocellulose đặc trưng, đóng vai trò là pha gia cường tự nhiên, giúp kiểm soát vết nứt, tăng độ dẻo dai và cải thiện cường độ chịu uốn.

Mặc dù các kết quả nghiên cứu bước đầu cho thấy tiềm năng lớn của SCBA và SBF trong BTXM mặt đường, việc ứng dụng thực tế vẫn còn hạn chế. Phần lớn công bố chỉ dừng ở quy mô phòng thí nghiệm, chưa đánh giá đầy đủ các chỉ tiêu bền lâu, độ bền môi, khả năng chịu tải trọng trực lập, độ bền môi trường và sự tương thích với các loại xi măng, cốt liệu và điều kiện khí hậu ở Việt Nam. Trên cơ sở các hạn chế nêu trên, các nghiên cứu tiếp theo nên được triển khai theo một lộ trình rõ ràng. Trước hết, cần tập trung tối ưu hóa quy trình xử lý và hàm lượng sử dụng SCBA và SBF gắn với các thông số thiết kế chủ chốt của BTXM mặt đường, bao gồm hàm lượng xi măng, tỷ lệ nước/xi măng và cấp phối cốt liệu. Tiếp theo, cần mở rộng đánh giá các chỉ tiêu làm việc và độ bền lâu dài như cường độ chịu uốn, độ mỏi do uốn, độ mài mòn, co ngót và khả năng kháng xâm thực trong điều kiện ẩm – nhiệt đặc trưng của Việt Nam. Cuối cùng, để nâng cao tính khả thi ứng dụng, các nghiên cứu thí điểm ở quy mô bán thực nghiệm và thực địa, kết hợp phân tích hiệu quả kinh tế – môi trường và đối chiếu trực tiếp với các yêu cầu của TCCS 39:2022 và TCCS 40:2022 trong điều kiện thi công – khai thác thực tế, là rất cần thiết.

Do đó, để đưa vật liệu tái chế từ bã mía vào ứng dụng BTXM mặt đường một cách bền vững, cần triển khai các nghiên cứu bổ sung theo

các hướng sau: (i) chuẩn hóa quy trình xử lý SCBA/SBF để đảm bảo chất lượng ổn định; (ii) tối ưu hóa cấp phối và hàm lượng sử dụng; (iii) phân tích chuyên sâu vi cấu trúc – cơ chế tương tác với sản phẩm hydrat hóa; (iv) đánh giá bền lâu dài hạn, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nóng ẩm và chu kỳ ướt – khô đặc trưng của Việt Nam; và (v) thử nghiệm hiện trường ở quy mô thí điểm. Những hướng nghiên cứu này là tiền đề quan trọng để biến bã mía – một phụ phẩm nông nghiệp dồi dào – thành nguồn vật liệu xanh, giá trị gia tăng cao và phù hợp cho hạ tầng giao thông bền vững.

**Tài liệu tham khảo**

[1]. P. V. Lự, *Giáo trình Vật liệu Xây dựng*, Hà Nội: NXB Giáo dục, 2006.  
 [2]. N. Q. Chiêu, *Mặt đường bê tông xi măng*, Hà Nội: NXB Giao thông Vận tải, 2004.  
 [3]. N. T. Quý và N. T. Ruệ, *Giáo trình công nghệ bê tông xi măng (Tập 1) – Lý thuyết Bê tông*, Đà Nẵng: NXB Giáo dục, 2003  
 [4]. Trang thông tin điện tử CJSC, “Đường Bê tông xi măng: Kinh nghiệm thế giới và xu hướng phát triển tất yếu tại Việt Nam,” Địa chỉ: <https://cjsc.vn/tin-tuc/tin-tuc-kinh-te-van-hoa-xa-hoi/du-ng-be-tong-xi-mang-kinh-nghi-m-th-gi-i-va-xu-hu-ng-phan-tri-n-t-t-y-u-t-i-vi-t-nam-2824.htm>  
 [5]. N. V. Bích, “Mặt đường BTXM rải kép,” *Đường Bộ - Thông tin tư vấn thiết kế*, số 3, tr. 29–35, 2017.  
 [6]. N. Q. Hiệp, “Hiện trạng công tác bê tông trong xây dựng kết cấu hạ tầng kỹ thuật thuộc lĩnh vực xây dựng ở Việt Nam,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 4, 2012.  
 [7]. Trang thông tin điện tử QACONS Construction, “So sánh áo đường cứng và áo đường mềm,” Địa chỉ: <https://qacons.com/ao-duong-cung-va-ao-duong-mem/>  
 [8]. Trang thông tin điện tử Open Development Vietnam, “Cơ sở hạ tầng,” Địa chỉ: <https://vietnam.opendevlopmentmekong.net/vi/topics/infrastructure/>  
 [9]. Trang thông tin điện tử Nhịp sống kinh tế Việt Nam & Thế giới, “Nhiều công nghệ, vật liệu mới ứng dụng trong xây dựng, bảo trì mạng lưới 600.000 km đường bộ,” Địa chỉ: <https://vneconomy.vn/techconnect/nhiều-cong-nghe-vat-lieu-moi-ung-dung-trong-xay-dung-bao-tri-mang-luoi-600-000-km-duong-bo.htm>  
 [10]. TCCS 39:2022, Thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông.  
 [11]. TCCS 40:2022, Thi công và nghiệm thu mặt đường bê tông xi măng trong xây dựng công trình giao thông.  
 [12]. Chỉ thị 08/CT-TTg ngày 26/3/2021 của Thủ tướng Chính phủ: Đẩy mạnh xử lý, sử dụng tro, xỉ, thạch cao của các nhà máy nhiệt điện, hóa chất, phân bón làm nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng và trong công trình xây dựng.  
 [13]. Quyết định 1266/QĐ-TTg ngày 18/8/2020 của Thủ tướng Chính phủ: Phê duyệt Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021 - 2030, định hướng đến năm 2050.  
 [14]. T. M. Quân, N. T. Sang, L. T. Trang và H. T. Văn, “Một nghiên cứu thực nghiệm bê tông hàm lượng tro bay cao có cường độ cao làm mặt đường ô tô ở Việt Nam,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ*, tập 03, tr. 105–109, 2021.  
 [15]. N. Đ. Thang and H.T. Phuoc, “Recycling of high-volume fly ash and bottom ash in sustainable concrete pavement,” *Key Engineering Materials*, vol. 1007, pp. 115–120, 2025.  
 [16]. B. Kumar, G. K. Tike, and P. K. Nanda, “Evaluation of properties of high-volume fly-ash concrete for pavements,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 10, pp. 906–911, 2007.  
 [17]. A. B. Harwalkar and S. S. Awanti, “Laboratory and field investigations on high-

volume fly ash concrete for rigid pavement,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2441, pp. 121–127, 2014.  
 [18]. S. Kesavraman, “Studies on metakaolin based banana fibre reinforced concrete,” *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 8, no. 01, pp. 532–543, 2017.  
 [19]. K. P. Guruswamy, S. Thambiannan, A. Anthonysamy, K. Jalgaonkar, A. S. Dukare, R. Pandiselvam and N. Jha, “Coir fibre-reinforced concrete for enhanced compressive strength and sustainability in construction applications,” *Heliyon*, vol. 10, no. 21, p. e39773, 2024.  
 [20]. M. Ali, A. Liu, H. Sou and N. Chouw, “Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 814–825, 2012.  
 [21]. A. Afraz and M. Ali, “Effect of banana fiber on flexural properties of fiber reinforced concrete for sustainable construction,” *Proceedings of The 1st International Conference on Energy, Power and Environment*, vol. 12, no. 01, 2021.  
 [22]. N. V. Hưng, Đ. T. Lộc, N. V. Ngu, N. T. Huân, *Giáo trình cây mía*, Hà Nội: NXB Nông nghiệp, 2012.  
 [23]. J. A. Abdalla, R. A. Hawileh, A. Bahurudeen, G. Jyothsna, A. Sofi, V. Shanmugam and B. S. Thomas, “A comprehensive review on the use of natural fibers in cement/geopolymer concrete: A step towards sustainability,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02244, 2023.  
 [24]. N. Đ. Minh, “Nghiên cứu sử dụng tro bã mía để thay thế một phần xi măng trong sản xuất bê tông,” *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp*, tập 10, số 3, tr. 77–83, 2021.  
 [25]. Tổng cục Thống kê Việt Nam, *Niên giám thống kê 2023*, Hà Nội, NXB Thống kê, 2023.  
 [26]. A. Sales and S. A. Lima, “Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement,” *Waste Management*, vol. 30, no. 6, pp. 1114–1122, 2010.  
 [27]. S. T. M. Carvalho, L. M. Mendes, A. A. D. S. Cesar, J. B. Flórez, F. A. Mori and G. F. Rabelo, “Acoustic characterization of sugarcane bagasse particleboard panels (*Saccharum officinarum* L),” *Materials Research*, vol. 18(4), pp. 821–827, 2015.  
 [28]. N. T. T. Phương, T. Q. Hải, N. V. Hoàn, N. T. Thoa, Đ. T. Hà và N. M. Hà, “Đặc tính của tro bã mía và sử dụng tro bã mía trong sản xuất gạch Ceramic,” *Tạp chí Khoa học & Công nghệ-Đại học Công nghiệp Hà Nội*, số 45, tr. 19–22, 2018.  
 [29]. Md. H. R. Sobuz, Al-Imran, S. D. Datta, J. A. Jabin, F. S. Aditto, N. Md. Sadiqul Hasan, M. Hasan and A. A. U. Zaman, “Assessing the influence of sugarcane bagasse ash for the production of eco-friendly concrete: Experimental and machine learning approaches,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e02839, 2024.  
 [30]. L. Đ. Hiền và Y. N. Sheen, “Một số đặc tính kỹ thuật của bê tông sử dụng tro bã mía đã xử lý thay thế một phần xi măng,” *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, tập 73, số 06, tr. 630–646, 2022.  
 [31]. N. T. Hussien and A. F. Oan, “The use of sugarcane wastes in concrete,” *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 69, p. e31, 2022.  
 [32]. V. Q. Thuận, H. S. Lành, H. Q. Tuấn, L. Đ. Quân và Đ. Q. Việt, “Ảnh hưởng của tro mía đến cường độ nén và độ hút nước của bê tông bọt khí có sử dụng cát biển và nước biển,” *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ – Kỹ thuật và Công nghệ*, tập 6, số 3, tr. 01–16, 2023.  
 [33]. M. J. Ghazali, C. H. Azhari, S. Abdullah and M. Z. Omar, “Characterisation of natural fibres (sugarcane bagasse) in cement composites,” *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 02, 2008.  
 [34]. F. Olutoge, O. Ofuyatan, A. Rachael and E. Opaluwa, “Strength characteristics of concrete reinforced with sugarcane bagasse fibre,” *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 68–71, 2015.  
 [35]. H. Danso, “Properties of coconut, oil palm and bagasse fibres: as potential

- building materials,” *Procedia Engineering*, vol. 200, pp. 1–9, 2017.
- [36]. H. A. Colorado and J. F. Zapata, “Composites of Portland cement paste and sugarcane bagasse fibers: Structure-property relation and Weibull statistics,” *Journal of Materials and Environmental Sciences*, vol. 10, no. 11, pp. 1162–1171, 2019.
- [37]. N. F. Mohamad, A. Hasbullah, N. H. Idris, R. Razali, and A. Z. A. Khodir, “Sugarcane bagasse as a partial replacement of fine aggregates in concrete,” *Faculty of Chemical and Civil Engineering, Universiti Teknologi MARA (UiTM), Pasir Gudang Campus, Malaysia, ID 54082*.
- [38]. C. Onésippe, N. Passe-Coutrin, F. Toro, S. Delvasto, K. Bilba and M. A. Arsène, “Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, pp. 549–556, 2010.
- [39]. S. A. Zareei, F. Ameri, and N. Bahrami, “Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash,” *Construction and Building Materials*, vol. 184, pp. 258–268, 2018.
- [40]. R. Dineshkumar and P. Balamurugan, “Behavior of high-strength concrete with sugarcane bagasse ash as replacement for cement,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 6, p. e63, 2021.
- [41]. P. P. L. D. Souza, R. Eires, and R. Malheiro, “Sugarcane bagasse as aggregate in composites for building blocks,” *Energies 2023*, vol. 16(1), p. e398, 2022.
- [42]. N. Ungureanu, V. Vlăduț, and S. Ş. Biriş, “Sustainable valorization of waste and by-products from sugarcane processing,” *Sustainability 2022*, vol. 14(17), p. e11089, 2022.
- [43]. Y. Bayapureddy, K. Muniraj, and M. R. G. Mutukuru, “Enhancing material properties of agro-industrial waste sugarcane bagasse ash—Way towards sustainable development,” *Sustainable Futures*, vol. 7, p. e100154, 2024.
- [44]. Trang thông tin điện tử Viện Nghiên cứu Mía Đường, “Niên vụ 2022/23, ngành mía đường Việt Nam hoàn thành mục tiêu kép,” Địa chỉ: <https://www.vienmiaduong.vn/vi/detailkhoa.php?idTin=3036>
- [45]. Trang thông tin điện tử Công nghệ Sinh học Việt Nam, “Nghiên cứu sản xuất và ứng dụng một số vật liệu mới từ phế phụ phẩm mía đường và lúa để nâng cao giá trị gia tăng và phục vụ nông nghiệp bền vững,” Địa chỉ: <http://congnghepinhhocvietnam.com.vn/tin-tuc/t3124/nghien-cuu-san-xuat-va-ung-dung-mot-so-vat-lieu-moi-tu-phe-phu-pham-mia-duong-va-lua-de-nang-cao-gia-tri-gia-tang-va-phuc-vu-nong-nghiep-ben-vung.html>
- [46]. K. Bilba, M-A. Arsene and A. Ouensanga, “Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 25(1), pp. 91–96, 2003.
- [47]. C. Driemeier, M. M. Oliveira, F. M. Mendes and E. O. Gómez, “Characterization of sugarcane bagasse powders,” *Powder Technology*, vol. 214(1), pp. 111–116, 2011.
- [48]. Y. R. Loh, D. Stujan, M. E. Rahman and C. A. Das, “Sugarcane bagasse—The future composite material: A literature review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 75, pp. 14–22, 2013.
- [49]. H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali and J. B. Williams, “Effect of sugarcane bagasse fibre on the strength properties of soil blocks,” *First International Conference on Bio-based Building Materials*, vol. 33(2), pp. 251–256, 2015.
- [50]. E. Arif, M. W. Clark and N. Lake, “Sugar cane bagasse ash from a high efficiency cogeneration boiler: Applications in cement and mortar production,” *Construction and Building Materials*, vol. 128, pp. 287–297, 2016.
- [51]. G. H. Kumar, H. Babuvishwanath, R. Purohit, P. Sahu and R. S. Rana, “Investigations on mechanical properties of glass and sugarcane fiber polymer matrix composites,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 4(4), pp. 5408–5420, 2017.
- [52]. M. R. Cabral, E. Y. Nakanishi, V. D. Santos, J. H. Palacios, S. Godbout, H. S. Junior and J. Fiorelli, “Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18(4), pp. 1092–1102, 2018.
- [53]. M. Anas, M. Khan, H. Bilal, S. Jadoon and M. N. Khan, “Fiber reinforced concrete: A review,” *Proceedings of the 12th International Civil Engineering Conference (ICEC)*, vol. 22(1), p. e7, 2022.
- [54]. A. L. Yadav, V. Sairam, L. Muruganandam and K. Srinivasan, “An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 245, p. e118854, 2020.
- [55]. Z. Itam, S. M. M. S. A. Fadzil, A. Syamsir, M. Zainoodin and S. Beddu, “Application of sugarcane ash as an additional cementitious material in concrete,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 66(5), pp. 2824–2829, 2022.
- [56]. F. Sheikh Khalid, H. S. Herman, and N. B. Azmi, “Properties of sugarcane fiber on the strength of the normal and lightweight concrete,” *International Symposium on Civil and Environmental Engineering 2016*, vol. 103, p. e01021, 2017.
- [57]. N. T. Nhân, “Sử dụng nguồn phế phẩm bã mía để tăng cường khả năng chịu uốn của bê tông,” *Tạp chí Xây dựng*, số. 06, tr. 197–201, 2024.
- [58]. D. Patel and V. M. Patel, “Application of sugarcane bagasse fibres as concrete composites for rigid pavement engineering,” *Paripex - Indian Journal of Research*, vol. 4(4), pp. 4–5, 2015.
- [59]. A. Desta, “Investigation on production of lightweight high tensile strength concrete using sugarcane bagasse fiber,” *Saudi Journal of Engineering and Technology*, vol. 4(3), pp. 78–122, 2019.
- [60]. E. Aprianti, P. Shafiqh, S. Bahri and J. N. Farahani, “Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 176–187, 2015.
- [61]. A. Khan and A. K. Saxena, “An experimental study on partial replacement of cement by SBCA for M-30 concrete,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 03(12), pp. 730–732, 2016.
- [62]. B. S. Thomas, J. Yang, A. Bahurudeen, J. A. Abdalla, R. A. Hawileh, H. M. Hamada, S. Nazar, V. Jittin and D. K. Ashish, “Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – A review,” *Materials Today Sustainability*, vol. 15, p. e100086, 2021.
- [63]. M. J. Khalil, M. Aslam and S. Ahmad, “Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete – A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 270, p. e121371, 2021.
- [64]. A. Bahurudeen, A. V. Marckson, A. Kishore and M. Santhanam, “Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers,” *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 465–475, 2014.
- [65]. R. Srinivasan and K. Sathiyaa, “Experimental study on bagasse ash in concrete,” *International Journal for Service Learning in Engineering*, vol. 5(2), pp. 60–66, 2010.
- [66]. S. A. Mangi, N. Jamaluddin, M. H. W. Ibrahim, A. H. Abdullah, A. S. M. A. Awal, S. Sohu and N. Ali, “Utilization of sugarcane bagasse ash in concrete as partial replacement of cement,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 271, p. e012001, 2017.
- [67]. N. Chusilp, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, “Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 3352–3358, 2009.
- [68]. K. Montakarntiwong, N. Chusilp, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, “Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry,” *Materials & Design*, vol. 49, pp. 414–420, 2013.
- [69]. H. Y. Wang, T. H. Sun, C. C. Hung, Y. N. Sheen and Y. W. Wang, “Sustainable

- development and performance assessment of concrete incorporating biofuel waste,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e02871, 2024.
- [70]. Y. Li, J. Chai, R. Wang, X. Zhang and Z. Si, “Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in construction technology: A state-of-the-art review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 56, p. e104774, 2022.
- [71]. A. Nikhade and L. Pammar, “Parametric study of concrete by using SCBA, metakaolin, rice husk ash in concrete – A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 60, pp. 1793–1799, 2022.
- [72]. T. A. Abdalla, D. O. Koteng, S. M. Shitote and M. Matallah, “Mechanical and durability properties of concrete incorporating silica fume and a high volume of sugarcane bagasse ash,” *Results in Engineering*, vol. 16, p. e100666, 2022.
- [73]. V. V. Thào, L. Đ. Hiền và P. T. A. Vũ, “Nghiên cứu tính chất kỹ thuật của vữa ba thành phần chất kết dính gồm xi măng, tro bay và tro bã mía,” *Tap chí Xây dựng*, số 03, tr. 62–67, 2024.
- [74]. N. Elawadly and S. A. Sanad, “Sustainable concrete incorporating sugarcane bagasse ash: A study on workability, mechanical behavior, and microstructure,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 10, p. e401, 2025.
- [75]. S. Sankeeth, A. A. N. Prabhath, H. G. H. Damruwan, H. M. S. T. Herath, H. V. V. Priyadarshana, S. P. S. N. B. S. Kumara, C. S. Lewangamage and K. R. Koswattage, “Optimizing mechanical properties of concrete using sugarcane bagasse ash,” *Results in Engineering*, vol. 27, p. e105968, 2025.
- [76]. N. D. Bheel, S. K. Meghwar, R. A. Abbasi, I. A. Ghunio and Z. H. Shaikh, “Use of sugarcane bagasse ash as cement replacement materials in concrete,” *International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering, Pakistan*, 2019.
- [77]. P. Chindaprasirta, P. Sujumnongtokulb and P. Posi, “Durability and mechanical properties of pavement concrete containing bagasse ash,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 17(4), pp. 1612–1626, 2019.
- [78]. P. Bhargavi and Kallemudi Murali, “An experimental study on partial replacement of cement with bagasse ash in concrete mix,” *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 9(5), pp. 175–184, 2018.
- [79]. T. Malyadri and J. Supriya, “Experimental study on bagasse ash in concrete by partially replacement with cement,” *International Journal of Computer Engineering Research Trends*, vol. 2(12), pp. 995–1001, 2015.
- [80]. M. N. Amin, M. Ashraf, R. Kumar, K. Khan, D. Saqib, S. S. Ali and S. Khan, “Role of sugarcane bagasse ash in developing sustainable engineered cementitious composites,” *Frontiers in Materials*, vol. 7, p. e65, 2020.
- [81]. S. W. Dhengare, S. P. Raut, N. V. Bandwal and A. Khandan, “Investigation into utilization of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete,” *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 3(4), pp. 109–116, 2015.
- [82]. Y. Cao, S. Shibata and I. Fukumoto, “Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37(3), pp. 423–429, 2006.
- [83]. A. Valadez-Gonzalez, J. M. Cervantes-Uc, R. Olayo and P. J. Herrera-Franco, “Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 30(3), pp. 309–320, 1999.
- [84]. J. Fiorelli, S. B. Bueno and M. R. Cabral, “Assessment of multilayer particleboards produced with green coconut and sugarcane bagasse fibers,” *Construction and Building Materials*, vol. 205, pp. 1–9, 2019.
- [85]. S. Anandaraj, S. Karthik, S. Sylesh, R. Kishor, K. Suresh, K. Jai Prakash and K. D. Kannan, “Experimental investigation on sugarcane bagasse fiber reinforced concrete using bottom ash as sand replacement,” *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [86]. H. Madhwani, D. Sathyan and K. M. Mini, “Study on durability and hardened state properties of sugarcane bagasse fiber reinforced foam concrete,” *Materialstoday: Proceedings*, vol. 46(10), pp. 4782–4787, 2021.
- [87]. A. Micheal and R. R. Moussa, “Investigating the economic and environmental effect of integrating sugarcane bagasse (SCB) fibers in cement bricks,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12(3), pp. 3297–3303, 2021.
- [88]. H. Jamshaid, R. K. Mishra, A. Raza, U. Hussain, M. L. Rahman, S. Nazari, V. Chandan, M. Muller and R. Chotoborsky, “Natural cellulosic fiber reinforced concrete: Influence of fiber type and loading percentage on mechanical and water absorption performance,” *Materials 2022*, vol. 15(3), p. e874, 2022.
- [89]. M. V. Kiamahalleh, A. Gholampour, T. D. Ngo and T. Ozbakkaloglu, “Mechanical, durability and microstructural properties of waste-based concrete reinforced with sugarcane fiber,” *Structures*, vol. 67, p. e107019, 2024.
- [90]. A. Rino, Farida, Elvaswer and D. Dahlan, “Characterization of concrete hardness by using sugarcane bagasse waste mixture by carbon oven curing process,” *In Proceedings of the International Conference in Makassar, Indonesia*, vol. 1801(1), p. e040005, 2017.
- [91]. M. Asim, G. M. Uddin, H. Jamshaid, A. Raza, Z. U. R. Tahir, U. Hussain, A. N. Satti, N. Hayat and S. M. Arafat, “Comparative experimental investigation of natural fibers reinforced light weight concrete as thermally efficient building materials,” *Journal of Building Engineering*, vol. 31, p. e101411, 2020.
- [92]. G. Ruano, F. Bellomo, G. López, A. Bertuzzi, L. Nallim and S. Oller, “Mechanical behaviour of cementitious composites reinforced with bagasse and hemp fibers,” *Construction and Building Materials*, vol. 240, p. e117856, 2020.
- [93]. A. Philip, O. S. I. Fayomi and J. O. Atiba, “Enhancement of mechanical and corrosion resistance properties of concrete reinforced with sugarcane fiber for the construction industry,” *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 19, p. e100486, 2025.
- [94]. TCVN 3105:2022, Hỗn hợp bê tông và bê tông – Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử.
- [95]. TCVN 3119:2022, Bê tông – Phương pháp xác định cường độ chịu kéo khi uốn.
- [96]. H. M. Đức và N. V. Toàn, “Nâng cao khả năng chống mài mòn của bê tông sử dụng cát mịn làm mặt đường bê tông xi măng,” *Tap chí KHCN Xây dựng*, số 03, tr. 26–33, 2018.
- [97]. Đ. A. Thái, “Nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu mài tới độ mài mòn của bê tông xi măng,” *Hội nghị khoa học quốc tế Kỷ niệm 60 năm thành lập Viện KHCN Xây dựng*, tr. 300–303, 2023.
- [98]. TCVN 3114:2022, Bê tông – Phương pháp xác định độ mài mòn.
- [99]. TCVN 3118:2022, Bê tông – Phương pháp xác định cường độ chịu nén.