VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Sử dụng tro trấu cho phát triển bền vững mặt đường bê tông xi măng ở Việt Nam: Kinh nghiệm quốc tế và đề xuất lộ trình ứng dụng

Trần Thị Thu Hà[1*]

[1] Trường Đại học Giao thông Vận tải

TỪ KHOÁ

Tro trấu
Mặt đường bê tông xi măng
Phụ gia khoáng
Phát triển bền vững
Giảm phát thải CO_2
Kinh tế tuần hoàn

TÓM TẮT

Ngành sản xuất xi măng đóng góp khoảng 5–7% tổng lượng phát thải CO_2 toàn cầu, trong khi Việt Nam đã cam kết đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050. Là quốc gia nông nghiệp với sản lượng lúa năm 2025 đạt 43,5 triệu tấn, Việt Nam có nguồn trấu ước tính 8,5–8,7 triệu tấn/năm, tương ứng tiềm năng khoảng 1,5–1,7 triệu tấn tro trấu (RHA) – một loại phụ gia khoáng hoạt tính puzolan cao có khả năng thay thế một phần xi măng poóc lăng. Bài báo tổng hợp cơ sở khoa học về hoạt tính puzolan của tro trấu, phân tích kết quả nghiên cứu quốc tế mới nhất, trong đó có thử nghiệm hiện trường sử dụng bê tông tro trấu để sửa chữa kết cấu mặt đường bê tông cốt thép liên tục (CRCP) trên đường cao tốc M180 (Vương quốc Anh, 2024). Trên cơ sở đó, bài báo đánh giá tiềm năng nguồn cung, hiện trạng tiêu chuẩn hóa ở Việt Nam và đề xuất khung yêu cầu kỹ thuật đối với tro trấu dùng cho bê tông mặt đường cùng lộ trình ứng dụng ba giai đoạn: nghiên cứu trong phòng – đoạn thử nghiệm hiện trường – tiêu chuẩn hóa. Kết quả tổng quan và thí nghiệm của nhóm tác giả cho thấy sử dụng tro trấu đốt có kiểm soát, nghiền mịn với tỷ lệ thay thế 10–20% xi măng (theo khối lượng chất kết dính) là giải pháp khả thi về kỹ thuật, có hiệu quả kinh tế – môi trường, phù hợp với định hướng phát triển mặt đường bê tông xi măng bền vững và kinh tế tuần hoàn nông nghiệp của Việt Nam.

KEYWORDS

Rice husk ash
Cement concrete pavement
Supplementary cementitious material
Sustainable development
CO_2 emission reduction
Circular economy

ABSTRACT

Cement production accounts for approximately 5–7% of global CO_2 emissions, while Vietnam has committed to achieving net-zero emissions by 2050. As an agricultural country with a 2025 paddy output of 43.5 million tonnes, Vietnam generates an estimated 8.5–8.7 million tonnes of rice husk annually, corresponding to a potential of 1.5–1.7 million tonnes of rice husk ash (RHA) – a highly pozzolanic supplementary cementitious material capable of partially replacing portland cement. This paper synthesizes the scientific basis of RHA pozzolanic activity and reviews the latest international research, including a field trial in which RHA concrete was used to repair a continuously reinforced concrete pavement (CRCP) on the M180 motorway (United Kingdom, 2024). The paper then assesses supply potential and the current standardization status in Vietnam, and proposes a technical requirement framework for RHA used in pavement concrete together with a three-stage implementation roadmap: laboratory research – field trial sections – standardization. The review and the authors' experimental results indicate that using controlled-burnt, finely ground RHA at 10–20% cement replacement (by mass of binder) is a technically feasible, economically and environmentally effective solution, consistent with Vietnam's orientation toward sustainable cement concrete pavements and agricultural circular economy.

1. Đặt vấn đề

Mặt đường bê tông xi măng (BTXM) với các ưu điểm về tuổi thọ cao, khả năng chịu tải trọng nặng, ổn định dưới tác động của nhiệt độ cao và ngập nước, chi phí duy tu thấp, đang được định hướng phát triển mạnh trong hệ thống đường bộ Việt Nam, đặc biệt cho đường cao tốc, quốc lộ khu vực chịu ngập lụt, đường tuần tra biên giới, đường giao thông nông thôn (GTNT) và mặt đường sân bay. Tuy nhiên, thành phần chủ yếu của BTXM là xi măng poóc lăng – loại vật liệu mà quá trình sản xuất (nung clanhke ở khoảng 1450 °C kèm phản ứng phân hủy đá vôi) phát thải khoảng 0,8–0,9 tấn CO_2 cho mỗi tấn xi măng (XM), đóng góp khoảng 5–7 % tổng phát thải CO_2 toàn cầu [1, 2]. Với cam kết đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050 tại COP26 và là một trong những quốc gia sản xuất, tiêu thụ xi măng lớn nhất thế giới (trên 100 triệu tấn/năm), việc giảm hàm lượng clanhke trong bê tông (BT) xây dựng hạ tầng giao thông là yêu cầu cấp thiết đối với Việt Nam.

Hướng đi phổ biến nhất hiện nay là sử dụng phụ gia khoáng hoạt tính (Supplementary Cementitious Materials – SCM) thay thế một phần xi măng, như tro bay nhiệt điện, xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS), silica fume, metakaolin. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng các nguồn SCM truyền

*Liên hệ tác giả: hattt_dbo@gmail.com
Nhận ngày 11/09/2026, sửa xong ngày 02/10/2026, chấp nhận đăng ngày 03/10/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1495

thống này đều là phụ phẩm của các ngành công nghiệp nặng đang trong xu thế thu hẹp: nhiệt điện than sẽ giảm dần theo Quy hoạch điện VIII và lộ trình chuyển dịch năng lượng, sản lượng gang thép lò cao dao động theo thị trường, còn silica fume chủ yếu nhập khẩu với giá thành cao. Về dài hạn, an ninh nguồn cung SCM cho ngành xây dựng Việt Nam là vấn đề cần được đặt ra một cách nghiêm túc [2].

Trong bối cảnh đó, tro trấu (Rice Husk Ash – RHA) nổi lên như một nguồn SCM thay thế mang tính chiến lược đối với các quốc gia nông nghiệp trồng lúa. Việt Nam với sản lượng lúa năm 2025 đạt 43,5 triệu tấn (đứng trong nhóm dẫn đầu thế giới về sản xuất và xuất khẩu gạo), lượng trấu phát sinh hằng năm ước tính 8,5–8,7 triệu tấn, tập trung chủ yếu tại Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) và Đồng bằng sông Hồng (ĐBSH). Nguồn trấu này hiện được sử dụng phân tán làm chất đốt lò hơi, viên nén nhiên liệu, giá thể trồng trọt, thậm chí một phần bị thải bỏ gây ô nhiễm. Nếu được đốt trong điều kiện kiểm soát và nghiền mịn, tro trấu chứa 85–95 % SiO_2 ở dạng vô định hình có hoạt tính puzolan rất cao, hoàn toàn có thể trở thành phụ gia khoáng chất lượng cho bê tông mặt đường – đồng thời khép kín chuỗi giá trị kinh tế tuần hoàn nông nghiệp mà Đề án phát triển bền vững một triệu héc-ta lúa chất lượng cao, phát thải thấp vùng Đồng bằng sông Cửu Long đang hướng tới.

Bài báo này (i) hệ thống hóa cơ sở khoa học về hoạt tính puzolan của tro trấu và ảnh hưởng của nó đến các tính năng của bê tông mặt đường; (ii) phân tích các kết quả nghiên cứu quốc tế cập nhật, đặc biệt là thử nghiệm hiện trường sử dụng bê tông tro trấu để sửa chữa kết cấu mặt đường bê tông cốt thép liên tục trên đường cao tốc M180, Vương quốc Anh [3]; (iii) đánh giá tiềm năng nguồn cung và hiện trạng tiêu chuẩn hóa ở Việt Nam; và (iv) đề xuất khung yêu cầu kỹ thuật cùng lộ trình ứng dụng tro trấu cho mặt đường BTXM phù hợp với điều kiện Việt Nam.

2. Tro trấu và cơ chế cải thiện tính năng bê tông xi măng

2.1. Nguồn gốc và đặc tính của tro trấu

Trấu chiếm khoảng 20 % khối lượng thóc. Khi đốt, trấu để lại khoảng 18–22 % khối lượng dưới dạng tro. Đặc tính quan trọng nhất quyết định giá trị sử dụng của tro trấu trong bê tông là trạng thái tồn tại của SiO_2: nếu đốt trong điều kiện kiểm soát ở nhiệt độ khoảng 500–700 °C với thời gian phù hợp, SiO_2 tồn tại chủ yếu ở dạng vô định hình (amorphous) có hoạt tính puzolan rất cao; ngược lại, đốt ở nhiệt độ quá cao (trên 800 °C) hoặc thời gian kéo dài sẽ làm SiO_2 kết tinh thành cristobalite, tridymite – các pha trơ, làm mất hoạt tính [4, 5]. Ngoài ra, hàm lượng cacbon chưa cháy (thể hiện qua chỉ tiêu mất khi nung – MKN) và độ mịn sau nghiền là hai thông số công nghệ quan trọng: MKN cao làm tăng nhu cầu nước và phụ gia cuốn khí, giảm độ bền; độ mịn cao (diện tích bề mặt riêng lớn) làm tăng tốc độ phản ứng puzolan và hiệu ứng điền đầy vi cấu trúc.

Như vậy, khác với tro bay nhiệt điện vốn được thu hồi tập trung từ các nhà máy lớn với chất lượng tương đối ổn định, chất lượng tro trấu phụ thuộc mạnh vào công nghệ đốt. Đây vừa là thách thức (nguồn cung phân tán, chất lượng biến động), vừa là cơ hội (có thể chủ động đầu tư công nghệ đốt tầng sôi kiểm soát nhiệt độ, thu hồi đồng thời năng lượng và tro chất lượng cao) mà phần 4 và 5 của bài báo sẽ phân tích cụ thể cho điều kiện Việt Nam.

2.2. Cơ chế cải thiện tính năng bê tông

Tác dụng của tro trấu trong bê tông xi măng được lý giải bởi ba cơ chế đồng thời. Thứ nhất là phản ứng puzolan: SiO_2 vô định hình phản ứng với $Ca(OH)_2$ – sản phẩm thủy hóa "yếu" của xi măng – tạo thêm khoáng C-S-H, là pha chịu lực chính của đá xi măng, đồng thời làm giảm hàm lượng $Ca(OH)_2$ dễ bị hòa tan, rửa trôi và cacbonat hóa. Thứ hai là hiệu ứng điền đầy (filler effect): các hạt tro trấu nghiền mịn lấp đầy lỗ rỗng mao quản, đặc chắc hóa vùng chuyển tiếp giữa đá xi măng và cốt liệu (Interfacial Transition Zone – ITZ), vốn là "mắt xích yếu" quyết định cường độ kéo và độ bền của bê tông. Thứ ba là hiệu ứng mầm kết tinh và nội dưỡng hộ: cấu trúc xốp của hạt tro trấu giữ nước và cung cấp thêm vị trí tạo mầm cho quá trình thủy hóa [4, 6].

Hệ quả đối với bê tông mặt đường là rất đáng chú ý: cường độ kéo uốn – chỉ tiêu thiết kế quyết định của mặt đường BTXM – được cải thiện nhờ đặc chắc hóa ITZ; độ chống thấm clorua và độ bền trong môi trường xâm thực tăng do giảm độ rỗng mao quản và giảm $Ca(OH)_2$; nhiệt thủy hóa đỉnh giảm giúp hạn chế nứt nhiệt ở tấm bê tông khối lớn đổ trong điều kiện khí hậu nóng – một vấn đề đặc biệt có ý nghĩa với thi công mặt đường BTXM mùa hè ở Việt Nam.

3. Kết quả nghiên cứu quốc tế về bê tông tro trấu cho mặt đường

3.1. Tổng quan các nghiên cứu trong phòng

Các nghiên cứu trong phòng về bê tông tro trấu đã được thực hiện rộng rãi trong ba thập kỷ qua. Mehta (1979) là người đặt nền móng cho công nghệ xi măng – tro trấu [5]. Ganesan và cộng sự (2008) ghi nhận bê tông thay thế 20 % xi măng bằng tro trấu đạt cường độ nén cao hơn mẫu đối chứng, gắn với silica vô định hình và cỡ hạt mịn của tro [7]. Cordeiro và cộng sự (2009) khẳng định tro trấu siêu mịn phù hợp cho bê tông tính năng cao [8]. Rodríguez de Sensale (2006) [19] cho thấy ưu thế cường độ của bê tông tro trấu thể hiện rõ nhất ở tuổi 91 ngày, phản ánh bản chất phản ứng puzolan diễn tiến chậm nhưng bền vững. Tổng hợp các nghiên cứu, tỷ lệ thay thế tối ưu thường nằm trong khoảng 10–20 % khối lượng chất kết dính tùy chất lượng tro và yêu cầu công trình; vượt quá 25–30 %, cường độ và tính công tác suy giảm rõ rệt [4, 7, 23, 24]. Đáng chú ý, một trong số ít nghiên cứu quốc tế sử dụng trực tiếp tro trấu Việt Nam là của Bui và cộng sự (2005) [15], khảo sát ảnh hưởng của cỡ hạt tro trấu tồn dư (residual RHA) đến cường độ bê tông xi măng cấp phối gián đoạn (gap-graded); kết quả cho thấy nghiền mịn tro trấu Việt Nam xuống cỡ hạt phù hợp giúp cải thiện đáng kể cường độ so với tro thô, khẳng định tiềm năng kỹ thuật của nguồn tro trấu trong nước dù nghiên cứu này chưa nhắm riêng đến ứng dụng mặt đường.

3.2. Thí nghiệm hiện trường trên đường cao tốc M180 (Vương quốc Anh, 2024)

Một công bố đáng chú ý gần đây là luận án tiến sĩ của Hyndman (Leeds Beckett University, 2024) [3]. Nghiên cứu đưa bê tông tro trấu từ phòng thí nghiệm ra thi công thực tế, sửa chữa một khoang mặt đường bê tông cốt thép liên tục (CRCP) trên cao tốc chịu tải trọng nặng. Nghiên cứu khảo sát dải cấp phối tiêu chuẩn từ C6/8 đến C50/60 dùng cho hạ tầng đường bộ Anh theo quy định của Manual of Contract Documents for Highway Works (MCHW). Tác giả dùng xi măng CEM I (≥ 95 % clanhke) và CEM II (≥ 65 % clanhke, khoảng 20 % bột đá vôi). Tro trấu là sản phẩm thương mại, chỉ sấy và sàng, không nghiền, có SiO_2 80,87 % và lượng mất khi nung 15,29 %. Kết quả cường độ của cấp phối C32/40 thay thế 5 % xi măng bằng tro trấu được tổng hợp ở Bảng 1.

Bảng 1. Phát triển cường độ của bê tông tro trấu (cấp phối C32/40) so với mẫu đối chứng.

Chỉ tiêu	Tuổi	Đối chứng CEM I	5 % RHA + CEM I	5 % RHA + CEM II
Cường độ nén (MPa)	7 ngày	20,83	19,58	16,25
	28 ngày	46,65	39,19	40,96
	56 ngày	50,34	52,86	56,53
Cường độ kéo gián tiếp (MPa)	7 ngày	1,78	1,66	1,67
	28 ngày	3,29	3,17	2,88
	56 ngày	3,59	3,87	4,11

Ghi chú: nghiên cứu [3] không có mẫu đối chứng CEM II.

Số liệu Bảng 1 thể hiện rõ quy luật đặc trưng của bê tông tro trấu. Ảnh hưởng riêng của tro trấu được đánh giá qua hai cấp phối cùng dùng xi măng CEM I. Thay thế 5 % xi măng bằng tro trấu làm cường độ nén thấp hơn đối chứng 6 % ở tuổi 7 ngày và 16 % ở tuổi 28 ngày. Ở tuổi 28 ngày, cấp phối này chỉ đạt 39,19 MPa, chưa đạt 40 MPa của mác C32/40. Đến tuổi 56 ngày, cường độ nén lại cao hơn đối chứng 5 %, cường độ kéo gián tiếp cao hơn khoảng 8 % (3,87 so với 3,59 MPa). Nguyên nhân là phản ứng puzơlan tiếp tục tạo C-S-H sau 28 ngày. Cấp phối 5 % RHA + CEM II cho cường độ ở tuổi 56 ngày cao nhất: nén 56,53 MPa, kéo 4,11 MPa, cao hơn đối chứng lần lượt 12 % và 14,5 %. Tuy nhiên, đây là hiệu quả của cả hệ chất kết dính CEM II (chứa bột đá vôi) và tro trấu, không phản ánh riêng tác dụng của tro trấu. Như vậy, nếu quy định thiết kế cho phép nghiệm thu cường độ ở tuổi 56 ngày, bê tông tro trấu có lợi thế rõ về cường độ dài hạn. Đổi lại, thời gian đạt 25 MPa để thông xe kéo dài khoảng 10 ngày. Cần lưu ý thêm hai điểm. Thứ nhất, tỷ số cường độ 7/28 ngày của mẫu đối chứng CEM I trong [3] chỉ khoảng 45 %, thấp hơn mức thông thường, nên số liệu chỉ nên dùng để so sánh tương đối giữa các cấp phối. Thứ hai, nghiên cứu [3] chưa thí nghiệm trực tiếp các chỉ tiêu độ bền lâu. Do tỷ lệ thay thế chỉ 5 % và tro trấu chưa qua nghiền, kết quả của [3] chủ yếu có giá trị minh họa quy luật phát triển cường độ và khả năng thi công thực tế, không dùng để xác định tỷ lệ thay thế hợp lý.

Về thí nghiệm hiện trường, nghiên cứu [3] đã sửa chữa toàn chiều sâu một khoang dài 6 m của mặt đường CRCP dày 240 mm trên cao tốc M180 gần Scunthorpe, tại vị trí hư hỏng dạng punchout (thủng tấm) - dạng hư hỏng đặc trưng của mặt đường CRCP, trong đó khối bê tông giới hạn bởi hai vết nứt ngang gần nhau và một vết nứt dọc bị vỡ, lún xuống dưới tác dụng của tải trọng xe. Đây là tuyến có 74 % lưu lượng là xe tải nặng, với tải trọng tích lũy 140 triệu trục xe tiêu chuẩn. Cấp phối sử dụng là C32/40 với 5 % tro trấu thay thế xi măng CEM I, trộn tại hiện trường bằng xe trộn thể tích. Mẫu lập phương dưỡng hộ tại hiện trường đạt cường độ mục tiêu 20 MPa ở tuổi 7 ngày, phù hợp kết quả trong phòng. Hỗn hợp tuy khô cứng nhưng dễ đầm chặt dưới rung, không phân tầng, không tách nước; thi công đúng tiến độ và không có khuyết tật. Hai bài học thực tiễn được rút ra: (i) cần bổ sung phụ gia dẻo hóa để cải thiện tính công tác; (ii) việc phối trộn tro trấu với xi măng trong xe trộn thể tích khó bảo đảm độ đồng nhất [3]. Vì vậy, nên ưu tiên phối trộn tại trạm trộn cố định hoặc dùng chất kết dính hỗn hợp trộn sẵn.

3.3. Kinh nghiệm từ các nước trồng lúa châu Á

Tại các quốc gia có nguồn trấu lớn như Ấn Độ, Trung Quốc, Thái Lan, Indonesia, tro trấu đã được nghiên cứu và ứng dụng ở nhiều mức độ, từ gia cố nền đất, móng cấp phối gia cố xi măng đến bê tông kết cấu và bê tông tính năng cao. Tại Thái Lan, nhóm nghiên cứu Chalee và cộng sự đã công bố nhiều kết quả về khả năng chống thấm ion clo và độ bền trong môi trường biển của bê tông dùng tro có nguồn gốc vỏ trấu (tro vỏ trấu – vỏ cây, rice husk-bark ash), trong đó thí nghiệm phơi mẫu 5 năm trong môi trường biển cho thấy hiệu quả cải thiện độ bền rõ rệt [16]. Tại Ấn Độ, tro trấu kết hợp xi măng được nghiên cứu rộng rãi để gia cố nền đường, giúp giảm chiều dày kết cấu áo đường và chi phí xây dựng [17]. Tại Indonesia, tro trấu cũng được ứng dụng ổn định nền đất đắp cho nền đường tại khu vực Yogyakarta [18]. Kinh nghiệm đáng chú ý nhất là mô hình gắn sản xuất tro trấu chất lượng cao với các nhà máy nhiệt điện trấu và lò hơi công nghiệp đốt tầng sôi: nhiệt độ buồng đốt được kiểm soát trong khoảng tối ưu, cho phép thu hồi đồng thời năng lượng và tro có hàm lượng SiO_2 vô định hình cao, MKN thấp. Đây chính là mô hình mà Việt Nam – với hàng loạt lò hơi đốt trấu tại các khu công nghiệp chế biến ở Đồng bằng sông Cửu Long – có đầy đủ điều kiện triển khai.

4. Tiềm năng và hiện trạng ở Việt Nam

4.1. Tiềm năng nguồn cung tro trấu

Theo số liệu của Cục Thống kê, sản lượng lúa cả nước năm 2025 đạt 43,5 triệu tấn trên diện tích gieo trồng 7,13 triệu ha, trong đó vùng Đồng bằng sông Cửu Long đóng góp khoảng 24 triệu tấn [9]. Với tỷ lệ trấu/thóc khoảng 20 % và tỷ lệ tro/trấu khoảng 18–20 % [5], tiềm năng nguồn tro trấu của Việt Nam được ước tính ở Bảng 2.

Cần nhấn mạnh rằng con số 1,5–1,7 triệu tấn/năm là tiềm năng lý thuyết; lượng tro trấu thực tế có thể huy động cho ngành xây dựng phụ thuộc vào mức độ tập trung hóa khâu xay xát – đốt trấu và sự cạnh tranh với các mục đích sử dụng khác. Tuy nhiên, ngay cả khi chỉ huy động được 20–30 % tiềm năng (300–500 nghìn tấn/năm), lượng tro này cũng đủ cung cấp cho hàng nghìn km làn đường BTXM mỗi năm nếu thay thế 15 % lượng xi măng trong bê tông mặt đường (khoảng 50–60 kg tro trấu/m^3 bê tông). Điểm thuận lợi có tính quyết định là nguồn trấu tập trung tại Đồng bằng sông Cửu Long – chính là khu vực đang triển khai mạng lưới đường cao tốc quy mô lớn nhưng khan hiếm vật liệu xây dựng truyền thống, đồng thời là vùng thực hiện Đề án một triệu héc-ta lúa chất lượng cao, phát thải thấp. Chuỗi giá trị "trấu → năng lượng + tro trấu → bê tông mặt đường" vì vậy có ý nghĩa kép cả về kinh tế tuần hoàn lẫn giảm phát thải cho cả hai ngành nông nghiệp và giao thông.

Bảng 2. Ước tính tiềm năng nguồn tro trấu của Việt Nam (số liệu sản lượng lúa năm 2025).

Thông số	Cả nước	Đồng bằng sông Cửu Long	Ghi chú
Sản lượng lúa (triệu tấn/năm)	43,5	≈ 24,0	Cục Thống kê, 2025
Lượng trấu phát sinh (triệu tấn/năm)	8,5–8,7	4,7–4,8	Trấu ≈ 20 % khối lượng thóc
Tiềm năng tro trấu (triệu tấn/năm)	1,5–1,7	0,85–0,95	Tro ≈ 18–20 % khối lượng trấu
Lượng xi măng có thể thay thế (triệu tấn/năm)	1,5–1,7	–	Thay thế 1:1 theo khối lượng
Lượng CO_2 giảm phát thải tiềm năng (triệu tấn/năm)	1,2–1,5	–	≈ 0,8–0,9 tấn CO_2/tấn xi măng

4.2. Hiện trạng nghiên cứu và tiêu chuẩn hóa

Về tiêu chuẩn, Việt Nam đã có TCVN 8827:2011 [10] "Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa – Silicafume và tro trấu nghiền mịn", quy định các yêu cầu kỹ thuật cơ bản (hàm lượng SiO_2, mất khi nung, độ mịn, chỉ số hoạt tính cường độ) đối với tro trấu nghiền mịn. Đây là cơ sở pháp lý – kỹ thuật quan trọng, cho thấy tro trấu đã được thừa nhận là phụ gia khoáng hoạt tính cao trong hệ thống tiêu chuẩn quốc gia. Bên cạnh đó, các tiêu chuẩn về bê tông và mặt đường BTXM hiện hành (TCVN 10306:2014 [20] về bê tông cường độ cao; TCCS 39:2022/TCĐBVN về thiết kế mặt đường BTXM thông thường có khe nối; TCCS 40:2022/TCĐBVN về thi công và nghiệm thu mặt đường BTXM [11, 12]) đều đã có cơ chế cho phép sử dụng phụ gia khoáng khi có luận chứng kỹ thuật phù hợp.

Tuy nhiên, khoảng trống lớn hiện nay nằm ở ba điểm. Thứ nhất, chưa có chỉ dẫn kỹ thuật riêng cho việc sử dụng tro trấu trong bê tông mặt đường – lĩnh vực có các yêu cầu đặc thù về cường độ kéo uốn, độ mài mòn, độ bền trong điều kiện nóng ẩm và chu kỳ khô – ướt, khác với bê tông kết cấu thông thường. Thứ hai, chưa có tiêu chuẩn kiểm soát chất lượng theo chuỗi từ khâu đốt trấu (nhiệt độ, thời gian, công nghệ lò) đến khâu nghiền và cung ứng, trong khi đây là yếu tố quyết định độ ổn định chất lượng của tro trấu thương phẩm. Thứ ba, chưa có đoạn thử nghiệm hiện trường nào trên đường ô tô cấp cao được thiết kế, quan trắc và công bố một cách hệ thống để làm cơ sở hoàn thiện tiêu chuẩn – đúng như bài học từ thí nghiệm M180 của Anh: chỉ có dữ liệu hiện trường mới trả lời được các câu hỏi về tính công tác thực tế, công nghệ trộn, và tương quan cường độ phòng thí nghiệm – hiện trường.

4.3. Kết quả thí nghiệm chi tiết với vật liệu Việt Nam

Số liệu trình bày trong mục này là kết quả thí nghiệm sơ bộ của nhóm tác giả, thực hiện trong giai đoạn 2005–2006 trên bê tông cốt liệu đá vôi kết hợp tro trấu; cấp phối và vật liệu mô tả dưới đây phản ánh chương trình thí nghiệm gốc. Do thời điểm thực hiện đã lâu, số liệu này đóng vai trò minh chứng xu hướng tác động và cơ sở tham khảo định lượng ban đầu, cần được xác nhận lại bằng chương trình thí nghiệm mặt đường BTXM chuyên biệt với vật liệu và công nghệ hiện tại như đề xuất ở mục 5.

a) Vật liệu sử dụng và phương pháp thí nghiệm

Các kết quả thí nghiệm được thực hiện với cốt liệu đá vôi Kiện Khê, cát vàng Sông Lô, xi măng PC40 Bút Sơn, và tro trấu. Tro trấu được sử dụng thay thế một phần xi măng với hàm lượng 0 %, 10 %, 15 %, 17,5 % và 20 % so với khối lượng xi măng, tổng chất kết dính (xi măng + tro trấu) giữ không đổi 500 kg/m^3; tương ứng tỷ lệ thay thế theo khối lượng chất kết dính là 0 %; 9,1 %; 13,0 %; 14,9 % và 16,7 %. Cường độ nén được xác định trên mẫu lập phương kích thước 150 × 150 × 150 mm, cường độ kéo khi uốn trên mẫu lăng trụ kích thước 150 × 150 × 600 mm; mẫu được chế tạo và bảo dưỡng theo TCVN 3105:1993, thí nghiệm theo TCVN 3118:1993 và TCVN 3119:1993; độ thẩm thấu ion clo ASTM C1202-97 [14] (phiên bản tiêu chuẩn hiện hành tại thời điểm thí nghiệm). Các kết quả cường độ được xem xét ở tuổi 7, 28 và 180 ngày.

Số liệu tại Bảng 4–6 là giá trị trung bình của tổ mẫu (03 mẫu/tổ theo TCVN 3105:1993). Do đặc thù lưu trữ dữ liệu thí nghiệm thực hiện cách đây gần 20 năm, độ lệch chuẩn và hệ số biến động của từng

tổ mẫu không còn đầy đủ để công bố – đây là hạn chế của phần dữ liệu sơ bộ này. Chương trình thí nghiệm đề xuất ở Giai đoạn 1 (mục 5.3) sẽ khắc phục hạn chế này bằng cách báo cáo đầy đủ số lượng mẫu, độ lệch chuẩn và hệ số biến động theo thông lệ quốc tế.

b) Thành phần bê tông thí nghiệm

Tổng lượng chất kết dính (xi măng + tro trấu) trong các cấp phối được giữ xấp xỉ 500 kg/m^3; khối lượng đá dăm, cát và phụ gia siêu dẻo lần lượt là 1080 kg/m^3, 668 kg/m^3 và 4,5 l/m^3. Khi hàm lượng tro trấu tăng, lượng xi măng giảm tương ứng, trong khi lượng nước cần thiết tăng từ 155 lên 186 l/m^3, làm tỷ lệ N/CKD tăng từ 0,310 lên 0,372.

Cấp phối ở Bảng 3 được thiết kế theo nguyên tắc giữ độ sụt (tính công tác) không đổi giữa các tỷ lệ thay thế, phù hợp thông lệ thiết kế thực tế; do đó lượng nước và tỷ lệ N/CKD tăng dần theo hàm lượng tro trấu là hệ quả tất yếu của diện tích bề mặt riêng lớn hơn ở tro trấu, không phải sai số thí nghiệm. Đáng lưu ý, mức tăng cường độ quan sát được ở Bảng 4 đạt được bất chấp N/CKD tăng, cho thấy hiệu ứng puzolan và điền đầy vi cấu trúc của tro trấu đủ mạnh để bù trừ vượt mức bất lợi lý thuyết do tăng N/CKD; nếu giữ N/CKD cố định (bằng cách tăng phụ gia siêu dẻo thay vì tăng nước), mức cải thiện cường độ thuần túy do bản chất khoáng của tro trấu nhiều khả năng còn cao hơn số liệu đã báo cáo.

Bảng 3. Thành phần bê tông xi măng tro trấu nghiên cứu.

Tro trấu/XM (% khối lượng)	Tỷ lệ thay thế CKD (%)	Xi măng (kg/m^3)	Tro trấu (kg/m^3)	Nước (L/m^3)	N/CKD
0	0	500,00	0,00	155	0,310
10	9,1	454,55	45,45	170	0,340
15	13,0	434,78	65,22	178	0,356
17,5	14,9	425,53	74,47	182	0,364
20	16,7	416,67	83,33	186	0,372

Ghi chú: XM – xi măng; CKD – chất kết dính (xi măng + tro trấu); N/CKD – tỷ lệ nước/chất kết dính; tỷ lệ thay thế CKD = tro trấu/(xi măng + tro trấu).

c) Phân tích kết quả

Ảnh hưởng của tro trấu đến cường độ nén và cường độ kéo uốn của bê tông: Kết quả thí nghiệm (Bảng 4) cho thấy tro trấu cải thiện rõ rệt cả cường độ nén và cường độ kéo uốn của bê tông. Cường độ tăng khi hàm lượng tro trấu tăng từ 0 đến 15–17,5 %, sau đó giảm ở mức 20 %, nhưng vẫn cao hơn đáng kể so với mẫu đối chứng. Ở hàm lượng 15 % so với khối lượng xi măng (tương ứng thay thế 13 % chất kết dính), cường độ nén tăng khoảng 30–46 % và cường độ kéo uốn tăng khoảng 24–33 % tùy tuổi mẫu; các giá trị tại 17,5 % xấp xỉ mức 15 % và không cho thấy lợi ích gia tăng rõ rệt. Đáng chú ý, mức tăng cường độ vẫn đạt được trong khi nhu cầu nước và tỷ lệ N/CKD tăng theo hàm lượng tro trấu, cho thấy tác dụng có lợi của tro trấu đối với cấu trúc và quá trình hình thành cường độ của bê tông. Trong phạm vi khảo sát, vùng 15–17,5 % so với khối lượng xi măng (tương ứng thay thế khoảng 13–15 % chất kết dính) cho hiệu quả cơ học tốt nhất; trong đó khoảng 15 % có thể xem là mức hợp lý khi đồng thời xét hiệu quả cường độ và lượng tro sử dụng. Đối với bê tông mặt đường, sự cải thiện cường độ kéo uốn có ý nghĩa đặc biệt vì đây là chỉ tiêu cơ học trực tiếp liên quan đến khả năng chịu uốn của tấm mặt đường.

Bảng 4. Cường độ nén và kéo uốn của bê tông theo tỷ lệ tro trấu và tuổi mẫu.

Tro trấu/XM (%)	R.nén 7d	R.uốn 7d	R.nén 28d	R.uốn 28d	R.nén 180d	R.uốn 180d
0	46,10	6,00	56,00	6,68	61,80	7,60
10	62,50	7,40	69,60	8,01	79,00	8,78
15	67,20	8,00	72,90	8,64	83,80	9,42
17,5	67,75	8,02	72,90	8,60	82,51	9,38
20	61,00	7,74	70,25	8,20	78,30	8,87

Vùng chuyển tiếp (ITZ): Kết quả cho thấy sử dụng 17,5 % tro trấu (so với khối lượng xi măng) hầu như không làm thay đổi bề rộng vùng chuyển tiếp ITZ so với bê tông đối chứng (178 so với 180 μm), nhưng làm vi độ cứng trung bình của ITZ tăng từ 372 lên 445 MPa, tương đương khoảng 20 % (Bảng 5). Điều này cho thấy tác dụng của tro trấu chủ yếu thể hiện ở việc cải thiện chất lượng và độ đặc chắc của vùng chuyển tiếp giữa đá xi măng và cốt liệu, góp phần giải thích sự gia tăng cường độ của bê tông.

Bảng 5. Ảnh hưởng của tro trấu đến vùng chuyển tiếp (ITZ) của bê tông cốt liệu đá vôi.

Mẫu	Bề rộng ITZ TB (μm)	Vi độ cứng ITZ TB (MPa)	Vi độ cứng tương đối
Đối chứng	180	372	1,00
Tro trấu 17,5 %	178	445	1,20

Ghi chú: TB – trung bình.

Độ thẩm thấu ion clo: Bên cạnh tro trấu ở dạng nghiền thông thường, mẫu tro trấu nghiền mịn hơn (độ mịn Blaine ≈ 20.250 cm^2/g) cũng được khảo sát để đánh giá ảnh hưởng của độ mịn đến khả năng chống thấm ion clo. Đo trực tiếp vi độ cứng tại vùng tiếp xúc giữa đá xi măng và cốt liệu đá vôi cho thấy các phụ gia tro hầu như không làm thay đổi bề rộng ITZ nhưng làm tăng đáng kể vi độ cứng của vùng này (Bảng 6), phản ánh đúng cơ chế đặc chắc hóa ITZ đã nêu ở mục 2.2. Kết quả đo điện lượng truyền qua mẫu theo ASTM C1202-97 khẳng định khả năng chống thấm ion clo được cải thiện rõ rệt khi có mặt tro trấu, đặc biệt với tro trấu nghiền mịn.

Bảng 6. Ảnh hưởng của tro trấu đến độ thẩm thấu ion clo của bê tông cốt liệu đá vôi.

Loại phụ gia	Hàm lượng (% so với XM)	Điện lượng (Coulomb)	Mức thấm ion clo*
Tro trấu	17,5	405	Rất thấp
Tro trấu nghiền mịn	10	262	Rất thấp
Tro bay nhiệt điện	10	630,5	Rất thấp

**Phân loại theo ASTM C1202-97 dựa trên điện lượng truyền qua mẫu (100-1000 Coulomb: rất thấp).*

Các mẫu sử dụng phụ gia khoáng đều có mức thấm ion clo rất thấp. Trong số các cấp phối khảo sát, mẫu sử dụng 10 % tro trấu nghiền mịn có điện lượng truyền qua thấp nhất, 262 Coulomb, so với 405 Coulomb của mẫu 17,5 % tro trấu và 630,5 Coulomb của mẫu 10 % tro bay. Kết quả cho thấy độ mịn của tro trấu có vai trò đáng kể đối với khả năng hạn chế sự vận chuyển ion trong bê tông. Tuy nhiên, do hàm lượng tro trấu của các mẫu không giống nhau, kết quả này chỉ nên được xem là xu hướng ảnh hưởng, không dùng để định lượng riêng tác động của độ mịn.

Ảnh hưởng đến độ bền chống thấm và mài mòn: Kết quả thí nghiệm cho thấy khi sử dụng 17,5 % tro trấu, áp lực nước gây thấm tăng từ khoảng 1,62 lên 2,43 MPa, đồng thời độ mài mòn giảm 32–43 % so với mẫu đối chứng. Sự gia tăng khả năng chống thấm phản ánh xu hướng cấu trúc bê tông trở nên đặc chắc hơn, trong khi mức giảm mài mòn cho thấy khả năng chống hao mòn bề mặt được cải thiện rõ rệt. Đối với bê tông mặt đường, trong đó mài mòn là chỉ tiêu có ý nghĩa trực tiếp đối với độ bền khai thác, các kết quả này cho thấy tro trấu có tiềm năng nâng cao khả năng chống tác động đồng thời của nước và tải trọng bánh xe, qua đó góp phần cải thiện độ bền lâu của mặt đường.

Để củng cố thêm cho các cơ chế nêu ở mục 2.2, phân tích nhiễu xạ tia X (XRD) trên mẫu đá xi măng 28 ngày cho thấy cường độ đỉnh đặc trưng của $Ca(OH)_2$ (d ≈ 4,9 Å) giảm rõ rệt ở mẫu có tro trấu so với đối chứng, đồng thời xuất hiện bộ đỉnh CSH mới (5,056; 4,114; 2,137 Å); phân tích nhiệt vi sai (DTA) ghi nhận biên độ hiệu ứng thu nhiệt ở 250–550 °C (khử nước $Ca(OH)_2$) giảm tương ứng, và xuất hiện thêm hiệu ứng tỏa nhiệt đặc trưng của CSH dạng sợi tại khoảng 908 °C, không có ở mẫu đối chứng. Quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (phóng đại 1000 lần) xác nhận trực tiếp: mẫu đối chứng hình thành tinh thể CSH(II) dạng tấm, trong khi mẫu có tro trấu hình thành CSH(I) dạng kim mảnh, mật độ cao – phù hợp và củng cố các cơ chế đã trình bày ở mục 2.2.

5. Đề xuất khung ứng dụng tro trấu cho mặt đường BTXM Việt Nam

5.1. Nguyên tắc tiếp cận

Kinh nghiệm quốc tế cần được tiếp thu có chọn lọc và hiệu chỉnh cho điều kiện Việt Nam theo bốn nguyên tắc. Một là, mọi nhận định phải dựa trên số liệu thí nghiệm với vật liệu Việt Nam: tro trấu từ các nguồn đốt khác nhau (lò hơi tầng sôi, lò đốt thủ công, nhiệt điện trấu) cần được đặc trưng hóa đầy đủ trước khi thiết kế thành phần. Hai là, chỉ tiêu thiết kế chủ đạo phải là cường độ kéo uốn và độ bền lâu dài trong điều kiện khí hậu nhiệt đới nóng ẩm, không dừng ở cường độ nén. Ba là, xem xét cơ chế nghiệm thu cường độ ở tuổi 56 hoặc 90 ngày cho các hạng mục phù hợp [22] nhằm phát huy ưu thế phát triển cường độ muộn của bê tông tro trấu, kèm giải pháp bảo đảm cường độ tuổi sớm cho thông xe (phụ gia, dưỡng hộ). Bốn là, kết quả nghiên cứu phải hướng tới sản phẩm cụ thể: chỉ dẫn kỹ thuật, đoạn thử nghiệm và tiêu chuẩn, không dừng ở công bố khoa học.

5.2. Đề xuất khung yêu cầu kỹ thuật đối với tro trấu dùng cho bê tông mặt đường

Trên cơ sở TCVN 8827:2011, tham chiếu ASTM C618 [13] (yêu cầu chung với puzolan tự nhiên và tro bay) và các kết quả nghiên cứu quốc tế [3, 4, 7, 8], khung yêu cầu kỹ thuật đối với tro trấu dùng cho bê tông mặt đường được đề xuất ở Bảng 7, phân thành hai cấp chất lượng nhằm phù hợp với thực tế đa dạng của nguồn cung trong nước.

Các giá trị trong Bảng 7 là đề xuất khung định hướng để thảo luận, cần được chuẩn xác hóa thông qua chương trình thí nghiệm với các nguồn tro trấu thực tế của Việt Nam trước khi đưa vào chỉ dẫn kỹ thuật hoặc tiêu chuẩn. Điểm cần đặc biệt lưu ý là yêu cầu kiểm tra pha vô định hình bằng nhiễu xạ tia X (XRD) đối với tro cấp A – chỉ tiêu chưa có trong TCVN 8827:2011 nhưng có ý nghĩa quyết định đối với hoạt tính puzolan, vì hai mẫu tro có cùng hàm lượng SiO_2 tổng có thể khác nhau hoàn toàn về hoạt tính tùy theo chế độ đốt. Ngưỡng kỹ thuật ở Bảng 7 được xây dựng trên cơ sở TCVN 8827:2011 và các nghiên cứu quốc tế đã trích dẫn; số liệu thực nghiệm sơ bộ ở mục 4.3 không được sử dụng trực tiếp làm căn cứ định lượng cho Bảng 7 do phạm vi vật liệu và thời điểm thí nghiệm khác biệt, mà chỉ đóng vai trò minh chứng bổ sung cho tính khả thi của định hướng đề xuất. Riêng ngưỡng chỉ số hoạt tính cường độ 100 % ở Cấp A được đề xuất cao hơn TCVN 8827:2011 hiện hành, dựa trên xu hướng cường độ vượt trội quan sát được ở Bảng 4 tại tuổi muộn; đây là đề xuất định hướng cần được xác nhận bằng chương trình thí nghiệm với tro trấu thương phẩm hiện tại trước khi đưa vào tiêu chuẩn chính thức.

Trên thực tế, tro trấu từ lò đốt tầng sôi kiểm soát nhiệt độ (chuyên dụng phát điện/hơi) thường đạt các chỉ tiêu của Cấp A; trong khi tro từ lò đốt thủ công, không kiểm soát nhiệt độ và thời gian đốt, thường chỉ đáp ứng được Cấp B và cần được kiểm định riêng lẻ theo lô trước khi sử dụng.

5.3. Đề xuất lộ trình ứng dụng ba giai đoạn

Lộ trình ứng dụng tro trấu cho mặt đường BTXM Việt Nam được đề xuất theo ba giai đoạn kế tiếp, trình bày ở Bảng 8.

Song song với lộ trình kỹ thuật, cần giải quyết bài toán tổ chức chuỗi cung ứng: khuyến khích doanh nghiệp đầu tư dây chuyền đốt trấu kiểm soát nhiệt độ kết hợp phát điện/hơi và nghiền tro tập trung tại các cụm xay xát lớn ở ĐBSCL, hình thành sản phẩm "tro trấu nghiền mịn thương phẩm" có chứng nhận hợp chuẩn. Kinh nghiệm từ thí nghiệm M180 cho thấy việc phối trộn tro trấu với xi măng trong xe trộn thể tích tại hiện trường khó kiểm soát độ đồng nhất [3]; do đó, khâu phối trộn nên được thực hiện tại trạm trộn cố định hoặc dưới dạng chất kết dính hỗn hợp trộn sẵn.

Bảng 7. Đề xuất khung yêu cầu kỹ thuật đối với tro trấu dùng cho bê tông mặt đường.

Chỉ tiêu	Cấp A (mặt đường cấp cao, BT tính năng cao)	Cấp B (móng gia cố, đường GTNT, lề gia cố)	Phương pháp thử tham chiếu
Hàm lượng SiO_2, % khối lượng, không nhỏ hơn	85	75	TCVN 8827:2011
Mất khi nung (MKN), %, không lớn hơn	6	10	TCVN 8827:2011
Độ ẩm, %, không lớn hơn	3	3	TCVN 8827:2011
Lượng sót sàng 45 µm, %, không lớn hơn	10	20	TCVN 8827:2011 [10] / ASTM C430 [21]
Chỉ số hoạt tính cường độ 28 ngày so với mẫu đối chứng, %, không nhỏ hơn	100	85	TCVN 8827:2011
Tỷ lệ thay thế xi măng khuyến nghị, % khối lượng chất kết dính	10–20	15–25*	Theo thiết kế thành phần
Yêu cầu bổ sung	SiO_2 chủ yếu dạng vô định hình (kiểm tra XRD); kiểm soát Cl^- và kiềm	Kiểm soát tạp chất hữu cơ, dị vật	–

**Ngưỡng trên (25 %) là ngoại suy tham khảo từ các nghiên cứu quốc tế [4, 7]; số liệu thực nghiệm của nhóm tác giả (Bảng 4) chỉ khảo sát đến 20 % và cho thấy xu hướng giảm cường độ ở mức này, cần thí nghiệm bổ sung để xác nhận trước khi áp dụng ở tỷ lệ trên 20 %.*

Ghi chú: BT – bê tông; GTNT – giao thông nông thôn.

Bảng 8. Đề xuất lộ trình ứng dụng tro trấu cho mặt đường BTXM Việt Nam.

Giai đoạn	Nội dung chính	Sản phẩm
Giai đoạn 1 (1–2 năm): Nghiên cứu trong phòng và đặc trưng hóa nguồn cung	Điều tra, lấy mẫu và đặc trưng hóa tro trấu từ các nguồn đốt chính (lò hơi tầng sôi, nhiệt điện trấu, lò thủ công) tại ĐBSCL và ĐBSH; thiết kế thành phần bê tông mặt đường với tỷ lệ thay thế 10–30 %; thí nghiệm cường độ nén, kéo uốn theo tuổi (3, 7, 28, 56, 90 ngày), mô đun đàn hồi, co ngót, độ mài mòn, thấm clorua, độ bền chu kỳ khô – ướt và môi trường nhiễm mặn ven biển	Bộ dữ liệu vật liệu Việt Nam; dự thảo chỉ dẫn thiết kế thành phần; xác nhận/hiệu chỉnh khung yêu cầu kỹ thuật (Bảng 7)
Giai đoạn 2 (2–3 năm): Đoạn thử nghiệm hiện trường	Xây dựng 2–3 đoạn thử nghiệm ở các cấp đường khác nhau: (i) đường GTNT hoặc đường tỉnh tại ĐBSCL gần nguồn tro; (ii) đoạn mặt đường BTXM trên quốc lộ hoặc đường chuyên dụng tải nặng; quan trắc cường độ hiện trường, độ bằng phẳng, nứt, độ mài mòn tối thiểu 24 tháng; đánh giá công nghệ trộn (trạm trộn cố định so với trộn hiện trường – bài học M180) và kiểm chứng khả năng thi công với tỷ lệ thay thế 10–20 %, quy trình thi công và dưỡng hộ trong khí hậu nóng ẩm; phân tích chi phí vòng đời (LCCA) và kiểm kê phát thải (LCA)	Báo cáo đánh giá hiện trường; định mức – đơn giá; hồ sơ luận chứng kinh tế – kỹ thuật – môi trường
Giai đoạn 3 (1–2 năm): Tiêu chuẩn hóa và nhân rộng	Biên soạn TCCS, tiến tới TCVN "Tro trấu dùng cho bê tông mặt đường – Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử" và chỉ dẫn thiết kế – thi công – nghiệm thu bê tông mặt đường sử dụng tro trấu; kiến nghị cơ chế khuyến khích (tiêu chí công trình xanh, ưu tiên trong dự án đầu tư công tại ĐBSCL); kết nối chính sách với Đề án 1 triệu ha lúa phát thải thấp và các chương trình kinh tế tuần hoàn	TCCS/TCVN; chỉ dẫn kỹ thuật; cơ chế chính sách khuyến khích áp dụng

Ghi chú: ĐBSCL – Đồng bằng sông Cửu Long; ĐBSH – Đồng bằng sông Hồng.

6. Kết luận và kiến nghị

Từ các phân tích trên, có thể rút ra các kết luận và kiến nghị sau:

(1) Tro trấu là phụ gia khoáng hoạt tính puzolan cao, có cơ sở khoa học và thực nghiệm (tổng quan [4, 7, 23, 24] và kết quả thí nghiệm ở Bảng 4) để sử dụng thay thế 10–20 % xi măng (theo khối lượng chất kết dính) trong bê tông mặt đường. Kết quả của [3] với tỷ lệ thay thế 5 % cho thấy bê tông tro trấu có cường độ ở tuổi sớm và tuổi 28 ngày thấp hơn, nhưng vượt mẫu đối chứng ở tuổi 56 ngày cả về cường độ nén (5–12 %) và cường độ kéo gián tiếp (8–14 %); các nghiên cứu khác ghi nhận tro trấu cải thiện khả năng chống thấm clorua [7, 16] và có xu hướng giảm nhiệt thủy hóa – các đặc tính đặc biệt phù hợp với mặt đường BTXM trong điều kiện khí hậu nóng ẩm, ven biển của Việt Nam.

(2) Thí nghiệm hiện trường trên đường cao tốc M180 (Anh, 2024) – sửa chữa toàn chiều sâu một khoang CRCP trên tuyến chịu tải trọng nặng bằng bê tông tro trấu – đã chứng minh tính khả thi thi công thực tế, đồng thời cung cấp hai bài học trực tiếp cho Việt Nam: cần phụ gia dẻo hóa để bảo đảm tính công tác, và cần phối trộn tro trấu – xi măng tại trạm trộn cố định để bảo đảm độ đồng nhất. Tuy nhiên, thí nghiệm M180 mới sử dụng tỷ lệ thay thế 5 %; khả năng thi công với tỷ lệ 10–20 % cần được kiểm chứng tại các đoạn thử nghiệm ở Giai đoạn 2.

(3) Việt Nam có tiềm năng tro trấu 1,5–1,7 triệu tấn/năm, tập trung tại ĐBSCL – nơi đồng thời khan hiếm vật liệu xây dựng và đang triển khai mạng lưới cao tốc quy mô lớn. Việc phát triển chuỗi giá trị "trấu → năng lượng + tro trấu → bê tông mặt đường" vừa giảm phát thải tiềm năng 1,2–1,5 triệu tấn CO_2/năm*, vừa tạo giá trị gia tăng cho ngành lúa gạo, phù hợp với cam kết Net Zero 2050 và định hướng kinh tế tuần hoàn.

**Ước tính trên giả định toàn bộ tiềm năng tro trấu (1,5–1,7 triệu tấn/năm) được sử dụng thay thế xi măng theo tỷ lệ khối lượng tương đương, nhân với hệ số phát thải sản xuất xi măng 0,8–0,9 tấn CO_2/tấn xi măng [1, 2]. Đây là ước tính trần lý thuyết, thực tế sẽ phụ thuộc vào tốc độ triển khai và tỷ lệ thay thế áp dụng.*

(4) Việt Nam đã có nền tảng tiêu chuẩn ban đầu (TCVN 8827:2011) nhưng còn ba khoảng trống: chỉ dẫn kỹ thuật riêng cho bê tông mặt đường sử dụng tro trấu; tiêu chuẩn kiểm soát chất lượng theo chuỗi từ khâu đốt đến cung ứng; và dữ liệu đoạn thử nghiệm hiện trường. Bài báo đã đề xuất khung yêu cầu kỹ thuật hai cấp chất lượng (Bảng 7) và lộ trình ba giai đoạn "nghiên cứu trong phòng – đoạn thử nghiệm – tiêu chuẩn hóa" (Bảng 8) với tổng thời gian 4–7 năm làm cơ sở thảo luận và triển khai.

(5) Kiến nghị Bộ Xây dựng xem xét đưa nội dung nghiên cứu ứng dụng tro trấu cho bê tông mặt đường vào danh mục nhiệm vụ khoa học công nghệ trọng điểm, gắn với các dự án đường bộ tại ĐBSCL và chương trình vật liệu xây dựng xanh; các trường đại học, viện nghiên cứu phối hợp với doanh nghiệp năng lượng sinh khối và nhà thầu xây dựng triển khai đoạn thử nghiệm có quan trắc dài hạn, làm cơ sở dữ liệu cho việc biên soạn tiêu chuẩn quốc gia.

Tài liệu tham khảo

[1]. IPCC, *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

[2]. E. Benhelal, E. Shamsaei, M. I. Rashid, "Challenges against CO_2 abatement strategies in the cement industry: A review," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 104, pp. 84–101, 2021. DOI: 10.1016/j.jes.2020.11.020.

[3]. F. J. Hyndman, "Sustainable highway pavements: The evaluation of pavement quality concrete produced with rice husk ash binder," Luận án tiến sĩ, Leeds Beckett University, Vương quốc Anh, 2024. DOI: 10.25448/lbu.28639322.v1.

[4]. M. Jamil, A. B. M. A. Kaish, S. N. Raman, M. F. M. Zain, "Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 588–593, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.088.

[5]. P. K. Mehta, "The chemistry and technology of cement made from rice husk ash," trong *Proceedings of the UNIDO/ESCAP/RCTT Workshop on Rice Husk Ash Cements*, Peshawar, Pakistan, 1979, pp. 113–122.

[6]. S. K. Antiohos, J. G. Tapali, M. Zervaki, J. Sousa-Coutinho, S. Tsimas, V. G. Papadakis, "Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 455–463, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.046.

[7]. K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel, "Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 8, pp. 1675–1683, 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011.

[8]. G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, E. M. R. Fairbairn, "Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete," *Materials and Structures*, vol. 42, no. 7, pp. 983–992, 2009. DOI: 10.1617/s11527-008-9437-z.

[9]. Cục Thống kê, Bộ Tài chính, *Báo cáo tình hình kinh tế – xã hội năm 2025*. Hà Nội, 2026.

[10]. Bộ Khoa học và Công nghệ, *TCVN 8827:2011 – Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa – Silicafume và tro trấu nghiền mịn*. Hà Nội, 2011.

[11]. Tổng cục Đường bộ Việt Nam, *TCCS 39:2022/TCĐBVN – Thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông*. Hà Nội, 2022.

[12]. Tổng cục Đường bộ Việt Nam, *TCCS 40:2022/TCĐBVN – Thi công và nghiệm thu mặt đường bê tông xi măng trong xây dựng công trình giao thông*. Hà Nội, 2022.

[13]. ASTM International, *ASTM C618-19 – Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. West Conshohocken, PA, 2019.

[14]. ASTM International, *ASTM C1202-97 – Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken, PA, 1997.

[15]. D. D. Bui, J. Hu, P. Stroeven, "Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 3, pp. 357–366, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.05.002.

[16]. W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, C. Jaturapitakkul, "Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment," *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, pp. 47–53, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.12.007.

[17]. R. Kishor, V. P. Singh, R. K. Srivastava, “Mitigation of expansive soil by liquid alkaline activator using rice husk ash, sugarcane bagasse ash for highway subgrade,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 915–930, 2022.

[18]. H. Prayuda et al., “Soil stabilization using rice husk ash and cement for pavement subgrade materials,” *Journal of Construction*, Yogyakarta, Indonesia, 2023.

[19]. G. Rodríguez de Sensale, “Strength development of concrete with rice-husk ash,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, no. 2, pp. 158–160, 2006. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.09.005.

[20]. Bộ Khoa học và Công nghệ, *TCVN 10306:2014 – Bê tông cường độ cao – Thiết kế thành phần mẫu hình trụ*. Hà Nội, 2014.

[21]. ASTM International, *ASTM C430-08(2015) – Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm (No. 325) Sieve*. West Conshohocken, PA, 2015.

[22]. T. Jones, *Specifying Sustainable Concrete: Using 56 Day Concrete Strengths*. London, UK: MPA The Concrete Centre, 2021.

[23]. M. Amran, R. Fediuk, G. Murali, N. Vatin, M. Karelina, T. Ozbakkaloglu, R. S. Krishna, A. K. Sahoo, S. K. Das, J. Mishra, “Rice husk ash-based concrete composites: A critical review of their properties and applications,” *Crystals*, vol. 11, no. 2, art. 168, 2021. DOI: 10.3390/cryst11020168.

[24]. S. A. Endale, W. Z. Taffese, D.-H. Vo, M. D. Yehualaw, “Rice husk ash in concrete,” *Sustainability*, vol. 15, no. 1, art. 137, 2023. DOI: 10.3390/su15010137.