



DOI:10.22144/ctujos.2026.067

# ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ KỸ THUẬT, KINH TẾ, XÃ HỘI VÀ MÔI TRƯỜNG CỦA BÊ TÔNG VÀ GẠCH LÁT BÊ TÔNG SỬ DỤNG TRO BAY VÀ XỈ ĐÁY: MỘT NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG THỰC TẾ TẠI ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

Lê Thành Phiêu<sup>1\*</sup>, Vũ Anh Pháp<sup>2</sup>, Hồng Minh Hoàng<sup>2</sup> và Huỳnh Trọng Phước<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

<sup>2</sup>Viện Mekong, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): [ltphieu@ctu.edu.vn](mailto:ltphieu@ctu.edu.vn)

## Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 02/11/2025

Sửa bài (Revised): 06/01/2026

Duyệt đăng (Accepted): 25/03/2026

**Title:** Evaluating the technical, economic, social, and environmental performance of concrete and paving blocks incorporating fly ash and bottom ash: A case study in the Mekong Delta, Viet Nam

**Author(s):** Le Thanh Phieu<sup>1</sup>, Vu Anh Phap<sup>2</sup>, Hong Minh Hoang<sup>2</sup> and Huynh Trong Phuoc<sup>1</sup>

**Affiliation(s):** <sup>1</sup>Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam; <sup>2</sup>Mekong Institute, Can Tho University, Viet Nam

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày đánh giá dựa trên ứng dụng thực tế đối với bê tông và gạch lát bê tông sử dụng tro bay và xỉ đáy từ nhà máy nhiệt điện than. Các sản phẩm được thiết kế, sản xuất và triển khai tại khu vực nghiên cứu, sau đó được theo dõi và đánh giá sau một năm trong điều kiện sử dụng thực tế. Đánh giá tổng hợp được thực hiện trên bốn khía cạnh chính gồm kỹ thuật, kinh tế, xã hội và môi trường. Kết quả cho thấy các sản phẩm đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn hiện hành, đồng thời mang lại hiệu quả kinh tế nhờ giảm chi phí vật liệu và tận dụng phế thải công nghiệp. Đánh giá môi trường cho thấy hàm lượng kim loại nặng nằm trong giới hạn cho phép theo quy chuẩn kỹ thuật quốc gia, đảm bảo an toàn trong quá trình sử dụng. Khảo sát xã hội sau thời gian khai thác ghi nhận mức độ chấp nhận và hài lòng cao từ người dân tại khu vực triển khai. Với cách tiếp cận dựa trên ứng dụng thực tế và thời gian theo dõi đủ dài, nghiên cứu cung cấp thêm bằng chứng về tính khả thi, an toàn và khả năng nhân rộng của các sản phẩm này, đồng thời nhấn mạnh các khía cạnh xã hội và môi trường còn hạn chế trong nhiều nghiên cứu trước.

**Từ khóa:** Bê tông, gạch lát bê tông, kinh tế tuần hoàn, tro bay, xỉ đáy

## ABSTRACT

This study presents an application-based evaluation of concrete and concrete paving blocks incorporating fly ash and bottom ash from a coal-fired power plant. The materials were designed, manufactured, and implemented at the study site, followed by monitoring and performance assessment after one year under actual service conditions. A comprehensive evaluation framework was adopted, covering four key aspects: technical, economic, social, and environmental performance. The results indicate that the developed concrete and paving blocks satisfy current technical standards, while providing economic benefits through reduced material costs and effective utilization of industrial by-products. Environmental assessment shows that heavy metal concentrations remain within the permissible limits of national technical regulations, ensuring environmental safety during use. In addition, the post-service social survey confirms a high level of acceptance and satisfaction among local residents. By integrating performance-based evaluation under real service conditions with a sufficiently long monitoring period, this study provides further experimental evidence on the feasibility, safety, and scalability of fly ash–bottom ash-based concrete and paving products, with particular emphasis on social and environmental aspects that have been insufficiently addressed in previous studies.

**Keywords:** Bottom ash, circular economy, concrete, fly ash, paving bricks

## 1. GIỚI THIỆU

Theo Tập đoàn Điện lực Việt Nam (2018), tại thời điểm năm 2018, khu vực đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) có 9 nhà máy nhiệt điện (NMNĐ) (chạy than, dầu FO và khí đốt) và dự kiến đến 2030, sẽ có khoảng 16 nhà máy trên tổng số 57 NMNĐ của cả nước. Theo các chuyên gia, việc phát triển NMNĐ là hết sức cần thiết để đảm bảo đủ nguồn điện phục vụ phát triển kinh tế - xã hội khu vực phía Nam do nhu cầu sử dụng điện tăng cao trong khi năng lượng tái tạo chưa phát triển, thủy điện quy mô lớn đã khai thác hết. Tuy nhiên, một trong những vấn đề được đặc biệt quan tâm khi phát triển các NMNĐ (đặc biệt là nhà máy chạy bằng than) là vấn đề môi trường, cụ thể là việc xử lý tro và xỉ từ hoạt động của nhà máy. Kết quả nghiên cứu của Thi et al. (2019) cho thấy, hoạt động của các NMNĐ chạy than tại khu vực ĐBSCL hàng năm phát sinh khoảng 1,8 triệu tấn tro, xỉ và lượng tro xỉ này được dự báo sẽ tăng lên khoảng 13,67 triệu tấn/năm vào năm 2030. Tuy nhiên, chỉ khoảng 20 – 30% tổng lượng tro, xỉ được tiêu thụ, phần còn lại chủ yếu được lưu giữ tại các bãi thải của nhà máy. Theo Thi et al. (2019), việc tồn lưu khối lượng lớn tro bay và xỉ đáy trong thời gian dài tiềm ẩn nguy cơ gây ô nhiễm môi trường đất, nước và không khí do trong thành phần tro, xỉ có thể chứa các chất gây hại, đặc biệt khi công tác quản lý và kiểm soát chưa được thực hiện đồng bộ. Bên cạnh đó, việc tiếp xúc thường xuyên với tro bay và xỉ đáy có tác động tiêu cực trực tiếp đến sức khỏe và làm tăng nguy cơ ung thư (Nguyen et al., 2021). Vì thế, việc tìm ra giải pháp tận dụng các loại sản phẩm phụ công nghiệp này là rất quan trọng để bảo vệ môi trường và thúc đẩy phát triển bền vững.

Đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện về việc tái sử dụng nguồn tro bay và xỉ đáy này tại các NMNĐ than như sử dụng làm phụ gia bê tông, làm phụ gia xi măng, làm vật liệu gia cố nền, san lấp, làm gạch không nung, gạch bê tông nhẹ, gạch bê tông đặc. Ngoài ra, vật liệu thải từ các sản phẩm phụ công nghiệp đã được sử dụng làm vật liệu thay thế cát và xi măng tự nhiên trong sản xuất gạch và gạch lát. Việc kết hợp tro bay giúp cải thiện độ bền, khả năng chống cháy và cường độ nén và uốn cong của sản phẩm (Naganathan et al., 2012, 2015; Verma et al., 2016). Thêm vào đó, việc sử dụng tro bay và xỉ đáy góp phần giảm lượng khí thải CO<sub>2</sub> do đã được xử lý, giảm khai thác các nguồn tài nguyên, từ đó giảm tác động đến suy giảm chất lượng môi trường. Đặc biệt là tro bay và xỉ đáy đã được công nhận là nguồn nguyên liệu xây dựng theo Quyết định số 452/QĐ-TTg phê duyệt “Đề án 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 sử dụng trong các công trình xây dựng” (Tập đoàn Điện lực Việt Nam, 2018).

Cho đến nay, đã có nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước được thực hiện về việc sử dụng tro bay và xỉ đáy trong lĩnh vực xây dựng, đặc biệt trong bê tông và gạch lát bê tông. Tổng quan các nghiên cứu cho thấy chưa có nhiều kết quả báo cáo về việc ứng dụng gạch terazo có chứa xỉ đáy trong công tác thực địa. Tuy nhiên, lược khảo cho thấy các nghiên cứu hiện có khi được thực hiện còn thiếu các phân tích so sánh/đối chiếu trực tiếp giữa kết quả đạt được với các công trình quốc tế tương đồng về bê tông tro bay hàm lượng cao (HVFC) và gạch lát sử dụng tro bay – xỉ đáy. Phần lớn các công bố mới chỉ dừng lại ở việc báo cáo kết quả thí nghiệm riêng lẻ, trong khi chưa làm rõ mức độ tương đồng, khác biệt hoặc xu hướng chung khi đặt các kết quả này trong bối cảnh các nghiên cứu đã công bố trước đó. Đây chính là khoảng trống nghiên cứu mà bài báo này hướng tới làm rõ. Để góp phần lấp đầy khoảng trống này, tác động của xỉ đáy đến hiệu suất của gạch lát bê tông đã được xem xét thông qua cả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm và thực địa, cũng như khả năng sử dụng xỉ đáy để thay thế hoàn toàn cốt liệu mịn tự nhiên được sử dụng trong sản xuất gạch. Bên cạnh đó, phương pháp so sánh/đối chiếu đã được sử dụng nhằm đặt các kết quả thu được trong mối tương quan với các nghiên cứu quốc tế tương đồng về HVFC và gạch terazo sử dụng tro bay – xỉ đáy, qua đó làm rõ tính nguyên gốc và giá trị khoa học của kết quả nghiên cứu. Khác với phần lớn các nghiên cứu trước đây về HVFC và gạch terazo sử dụng tro bay – xỉ đáy chủ yếu được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm, khả năng ứng dụng thực tiễn đã được tập trung làm rõ thông qua việc triển khai sản xuất và sử dụng thử nghiệm sản phẩm trong điều kiện thực tế tại khu vực ĐBSCL. Các sản phẩm được đánh giá không chỉ về đặc tính cơ lý theo tiêu chuẩn hiện hành mà còn thông qua quá trình thi công, sử dụng thực tế, khảo sát mức độ chấp nhận của cộng đồng và đánh giá an toàn môi trường trong điều kiện khí hậu và nguồn vật liệu đặc thù của khu vực. Việc thay thế cốt liệu mịn tự nhiên bằng xỉ đáy không chỉ có thể ngăn chặn sự cạn kiệt tài nguyên thiên nhiên mà còn bảo vệ môi trường. Bên cạnh đó, các vấn đề môi trường có thể xảy ra cũng như hiệu quả về mặt chi phí của việc sản xuất và sử dụng gạch lát bê tông có chứa xỉ đáy cũng đã được đánh giá trong nghiên cứu này.

Trong quá trình phát triển kinh tế - xã hội, đặc biệt là ở các khu vực đô thị, mức độ xây dựng tăng

cao dẫn đến nhu cầu sử dụng nguyên liệu vật liệu và sản phẩm xây dựng tăng cao; trong đó vỉa hè đóng vai trò quan trọng trong việc di chuyển trong đô thị, tạo điều kiện thuận lợi cho việc đi bộ, tăng cường kết nối đường phố và thúc đẩy lối sống năng động. Sự phát triển nhanh chóng của vỉa hè dẫn đến sự gia tăng các vật liệu lát phù hợp. Gạch lát đã trở thành sự lựa chọn phù hợp cho việc xây dựng vỉa hè do độ bền, tính thẩm mỹ và dễ bảo trì. Bề mặt chống trượt, khả năng chống mài mòn và khả năng chịu được lưu lượng đi bộ lớn khiến chúng trở nên lý tưởng để sử dụng trên vỉa hè, đảm bảo độ bền và an toàn cho người đi bộ. Trong thập kỷ qua, các nguồn nguyên liệu thô chính để sản xuất gạch lát bê tông là xi măng và cát sông. Xi măng và cát sông được sử dụng để sản xuất gạch dẫn đến cạn kiệt tài nguyên thiên nhiên và ảnh hưởng xấu đến môi trường. Kết quả nghiên cứu của Koehnken et al. (2020) và Rentier & Cammeraat (2022) cho thấy, việc khai thác cát sông đóng vai trò quan trọng trong việc thay đổi hình dạng lòng sông, làm gia tăng xói mòn lòng sông và bờ sông, làm suy thoái môi trường sinh học, làm thay đổi chất lượng nước cục bộ và ở hạ lưu.

Mục tiêu của bài báo này là đánh giá tổng thể các khía cạnh liên quan đến yếu tố kỹ thuật, kinh tế, xã hội và môi trường của sản phẩm bê tông và gạch lát bê tông được làm từ nguyên liệu tro bay và xỉ đáy của NMNĐ than. Từ đó, kết quả nghiên cứu làm cơ sở cho việc nhân rộng các sản phẩm này vào thực tế trong tương lai nhằm tối ưu hoá việc tận dụng các nguồn phụ phẩm từ NMNĐ than để làm nguyên liệu sản xuất. Việc ứng dụng sản phẩm từ nguồn nguyên liệu tro bay và xỉ đáy từ NMNĐ than có ý nghĩa trong việc giảm tác động đến ô nhiễm môi trường, khai thác tài nguyên, góp phần phát triển kinh tế – xã hội và xây dựng nông thôn mới ở ĐBSCL.

**2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

Nghiên cứu được thực hiện theo hướng nghiên cứu ứng dụng thực tế (case study), trong đó các sản phẩm được triển khai tại công trình thực tế và được theo dõi, đánh giá trong thời gian 01 năm khai thác.

**2.1. Phối trộn nguyên liệu sản xuất sản phẩm bê tông và gạch lát bê tông**

Đối với gạch lát bê tông (gạch terazo): Gạch lát bê tông được sản xuất từ các nguồn nguyên liệu gồm: xi măng, tro bay, cát nghiền, xỉ đáy và nước theo công thức phối trộn được thể hiện ở Bảng 1. So với công thức phối trộn gạch lát được sản xuất thông thường, gạch lát bê tông được sản xuất có phối trộn tro bay và xỉ đáy của NMNĐ thay thế lượng cát nghiền.

Đối với bê tông: Bê tông được sản xuất từ các nguồn nguyên liệu gồm: xi măng, vôi bột, tro bay, cát, đá, nước và phụ gia (PG) theo công thức phối trộn được thể hiện ở Bảng 1. Các công thức cấp phối trình bày trong Bảng 1 bao gồm hai nhóm khác nhau. Trong đó, cấp phối gạch tro bay – xỉ đáy và bê tông tro bay là kết quả của quá trình nghiên cứu thực nghiệm do nhóm tác giả trực tiếp thực hiện trong phòng thí nghiệm, thông qua nhiều lần thử nghiệm và điều chỉnh nhằm đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật đặt ra cũng như phù hợp với điều kiện sản xuất và thi công thực tế. Ngược lại, các công thức cấp phối gạch thông thường và bê tông thông thường được sử dụng trong nghiên cứu là các cấp phối đang được áp dụng phổ biến tại các cơ sở sản xuất bê tông và gạch lát bê tông địa phương trong khu vực ĐBSCL, được lựa chọn làm mẫu đối chứng để so sánh và đánh giá hiệu quả của việc sử dụng tro bay và xỉ đáy. So với công thức phối trộn bê tông thông thường, bê tông được sản xuất từ tro bay của NMNĐ thay thế phần lớn lượng xi măng và giảm lượng cát nhưng tăng lượng đá. Quy trình phối trộn, chế tạo mẫu và bảo dưỡng sản phẩm trong nghiên cứu được thực hiện theo các bước tương tự như quy trình sản xuất bê tông và gạch lát bê tông thương phẩm đang được áp dụng phổ biến tại hầu hết các cơ sở sản xuất địa phương, đồng thời tuân thủ các yêu cầu kỹ thuật theo các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành. Việc không sử dụng các thiết bị hoặc công nghệ đặc thù giúp quy trình này có khả năng chuẩn hóa, dễ chuyển giao và phù hợp để áp dụng ở quy mô sản xuất thực tế. Các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu được lựa chọn từ các nguồn cung phổ biến tại địa phương, nhằm đảm bảo tính đại diện và khả năng áp dụng trong điều kiện sản xuất thực tế.

**Bảng 1. Công thức phối trộn trong sản xuất gạch lát bê tông và bê tông sử dụng tro bay và xỉ đáy của NMNĐ than**

STT	Vật liệu	Sản phẩm gạch lát bê tông		Sản phẩm bê tông	
		Gạch tro bay, xỉ đáy (kg)	Gạch thông thường (kg)	Bê tông tro bay (kg)	Bê tông thông thường (kg)
1	Xi măng	368	335	142,8	400
2	Tro bay	205	0	217,2	0

STT	Vật liệu	Sản phẩm gạch lát bê tông		Sản phẩm bê tông	
		Gạch tro bay, xi đáy (kg)	Gạch thông thường (kg)	Bê tông tro bay (kg)	Bê tông thông thường (kg)
3	Cát nghiền	0	1867	0	0
4	Xi đáy	1270	0	0	0
5	Vôi bột	0	0	35,7	0
6	Cát	0	0	718,1	745
7	Đá	0	0	1224	1030
8	Nước	205	192	119,0	175
9	PG	0	0	4,8	4,4

**2.2. Thử nghiệm sử dụng thực tế và đánh giá hiệu quả sản phẩm**

*2.2.1. Thử nghiệm thực tế*

Sản phẩm gạch lát bê tông và bê tông sau khi sản xuất được ứng dụng thử nghiệm thực tế tại 2 địa điểm gồm:

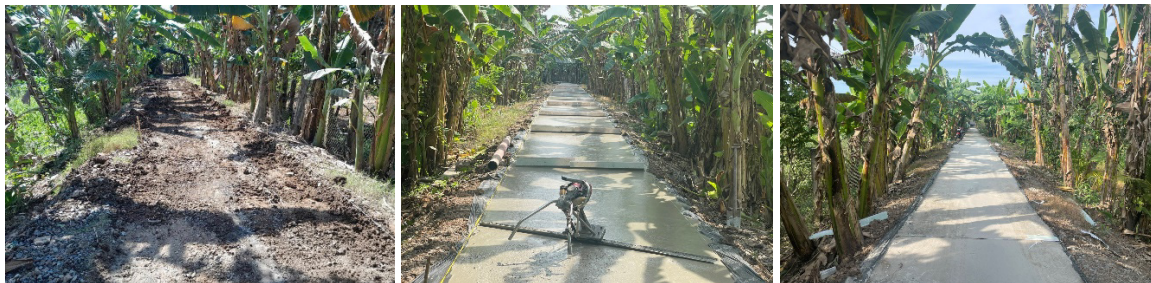
*Đối với gạch lát bê tông:* Sản phẩm gạch lát bê tông được sử dụng để lát sân của Trường Tiểu học Phú Tân (Khu B) với diện tích 275,0 m<sup>2</sup> tại địa chỉ ấp Phú Tân, xã Phú Tân, huyện Châu Thành, tỉnh

Hậu Giang nay là xã Phú Hữu, Thành phố Cần Thơ. Các hoạt động khảo sát, xây dựng và hoàn thiện được thể hiện ở Hình 1.

*Đối với sản phẩm bê tông:* Sản phẩm bê tông được sử dụng để xây dựng công trình lộ giao thông nông thôn tại ấp Nhất A, xã Thạnh Hoà, huyện Phụng Hiệp, tỉnh Hậu Giang nay là xã Thạnh Hòa, thành phố Cần Thơ. Cụ thể, công trình có chiều dài 140,0 m, chiều rộng 2,0 m, chiều dày bê tông 0,12 m với bê tông mác 400. Các hoạt động khảo sát, xây dựng và hoàn thiện được thể hiện ở Hình 2.



**Hình 1. Ảnh chụp thực tế trong việc ứng dụng sản phẩm gạch lát bê tông (gạch terazo)**



**Hình 2. Ảnh chụp thực tế trong việc ứng dụng sản phẩm bê tông**

*2.2.2. Đánh giá sản phẩm*

Trong nghiên cứu này, việc đánh giá hiệu quả của sản phẩm gạch lát bê tông và bê tông ở các khía cạnh kỹ thuật, kinh tế, xã hội và môi trường trong thời gian 01 năm sử dụng đã được thực hiện. Các thí nghiệm đánh giá chỉ tiêu kỹ thuật được thực hiện hoàn toàn theo các tiêu chuẩn hiện hành, trong đó đã quy định cụ thể về quy trình lấy mẫu, cỡ mẫu, điều kiện thí nghiệm và phương pháp xử lý số liệu. Việc

tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn này là cơ sở đảm bảo độ tin cậy và tính lặp lại của kết quả thí nghiệm, đồng thời cho phép đối chiếu trực tiếp các giá trị thu được với các yêu cầu kỹ thuật đã được tiêu chuẩn hóa. Bên cạnh đó, các tiêu chí đánh giá được xây dựng dựa trên hệ thống tiêu chuẩn và chỉ tiêu phổ biến, cho phép áp dụng thống nhất cho các sản phẩm tương tự khi triển khai ở các khu vực khác.

Cụ thể các yếu tố đánh giá của từng khía cạnh bao gồm:

– Đối với yếu tố kỹ thuật: Cường độ chịu nén và độ mài mòn bề mặt đối với bê tông, cường độ chịu uốn, độ hút nước bề mặt và độ mài mòn bề mặt đối với gạch lát bê tông đã được đánh giá và so sánh với Tiêu chuẩn Việt Nam như trình bày ở mục 3.1.

– Đối với yếu tố kinh tế: Chi phí sản xuất đã được so sánh với các sản phẩm tương tự thực tế thông qua việc tính toán chi phí thực hiện trên 01 đơn vị sản phẩm đối với sản phẩm là gạch lát bê tông và 1,0 m<sup>3</sup> đối với sản phẩm là bê tông.

– Đối với yếu tố môi trường: Nguy cơ phát tán chất thải nguy hại của sản phẩm đã được đánh giá bằng việc thu thập và thí nghiệm mẫu đất, mẫu gạch, mẫu bê tông trước khi xây dựng và sau khi sử dụng 01 năm để đánh giá. Các chỉ số phân tích bao gồm: asen (AS), cadimi (Cd), chì (Pd) và crom (Cr).

– Đối với yếu tố xã hội: Việc đánh giá mức độ hài lòng của người dân đối với sản phẩm đã được tiến hành, bao gồm tính tiện dụng, chất lượng và khả năng chấp nhận sử dụng tại khu vực triển khai mô hình thí nghiệm. Các chỉ tiêu đánh giá xã hội được lựa chọn theo hướng phân ảnh trực tiếp trải nghiệm và nhận thức của người sử dụng đối với sản phẩm trong điều kiện thực tế, phù hợp với mục tiêu đánh giá tính khả thi và khả năng nhân rộng mô hình ở giai đoạn đầu. Cách tiếp cận này thường được áp dụng trong các nghiên cứu ứng dụng vật liệu xây dựng, trong đó đánh giá xã hội đóng vai trò hỗ trợ cho các phân tích kỹ thuật, kinh tế và môi trường. Việc đánh giá đối với sản phẩm gạch lát bê tông và bê tông được thực hiện thông qua việc khảo sát bằng phiếu điều tra, phát cho các hộ dân và những người trực tiếp quan sát, sử dụng sản phẩm sau một năm kể từ khi công trình hoàn thành và đưa vào khai thác. Đối tượng khảo sát được lựa chọn là những người có liên quan trực tiếp đến quá trình sử dụng hoặc quan sát sản phẩm trong khu vực triển khai mô hình, qua đó đảm bảo các ý kiến thu thập phản ánh sát thực tế sử dụng. Cỡ mẫu khảo sát (50 phiếu đánh giá

sản phẩm gạch lát và 50 phiếu đánh giá sản phẩm bê tông) được xác định phù hợp với quy mô triển khai mô hình và mục tiêu đánh giá mô tả của nghiên cứu, không nhằm suy rộng cho toàn bộ tổng thể. Kết quả khảo sát đóng vai trò quan trọng trong việc xác định mức độ chấp nhận xã hội và tiềm năng nhân rộng mô hình trong thực tế. Đối với đánh giá hiệu quả xã hội, phương pháp phát phiếu khảo sát đã được sử dụng trong nghiên cứu, đồng thời việc thu thập số liệu và tổng hợp kết quả được thực hiện theo hướng thống kê mô tả định tính. Do mục tiêu của nội dung đánh giá xã hội là phản ánh mức độ chấp nhận của người sử dụng trong giai đoạn triển khai thử nghiệm, nghiên cứu được thực hiện theo hướng mô tả và không nhằm suy rộng cho toàn bộ cộng đồng.

### 3. KẾT QUẢ THẢO LUẬN

#### 3.1. Đánh giá hiệu quả về kỹ thuật

##### 3.1.1. Gạch lát bê tông

Khả năng hấp thụ nước trên bề mặt của vật liệu được gọi là khả năng hấp thụ nước bề mặt. Đối với gạch lát bê tông, khả năng hấp thụ nước bề mặt đóng vai trò quan trọng trong việc xác định khả năng chống thấm của bề mặt. Khi khả năng hấp thụ nước bề mặt thấp, bề mặt gạch dễ vệ sinh hơn và ít bị thấm nước. Điều này làm tăng tính phù hợp của gạch đối với môi trường ẩm ướt hoặc ngập nước. Do đó, khả năng hấp thụ nước bề mặt của gạch cần phải được xác định. Kết quả hấp thụ nước bề mặt được trình bày trong Bảng 2. Cả gạch tro bay, xỉ đáy và gạch thông thường đều đạt yêu cầu với mức hấp thụ nước bề mặt dưới 6% theo Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7744:2013 (Bộ Khoa học và Công nghệ, 2013). Ngoài ra, khả năng hấp thụ nước bề mặt trong 28 ngày ở các mẫu gạch tro bay, xỉ đáy thấp hơn 0,32% so với gạch thông thường. Sự khác biệt về khả năng hấp thụ nước bề mặt giữa các mẫu nằm trong giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn áp dụng, cho thấy tính ổn định của sản phẩm. Các mẫu gạch đã chứng minh được tính hữu ích của chúng và đáp ứng được khả năng chống thấm bề mặt cần thiết sau khi sản xuất trên quy mô lớn với các công nghệ hiện tại.

**Bảng 2. Kết quả đánh giá các yếu tố kỹ thuật của sản phẩm gạch**

Mẫu 28 ngày tuổi	Gạch tro bay, xỉ đáy		Gạch thông thường	
	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Cường độ chịu uốn (MPa)	5,69	0,28	5,46	0,33
Độ hút nước bề mặt (%)	5,00	0,21	5,32	0,18
Độ mài mòn bề mặt (g/cm <sup>2</sup> )	0,24	0,01	0,29	0,02

Khả năng chống mài mòn là một đặc tính quan trọng để xác định độ bền của gạch lát. Như kết quả

thể hiện trong Bảng 2, các giá trị mài mòn bề mặt của tất cả các loại gạch (0,24 – 0,29 g/cm<sup>2</sup>) được ghi nhận thấp hơn đáng kể so với giới hạn tiêu chuẩn tối

đa là  $\leq 0,4 \text{ g/cm}^2$  theo TCVN 7744:2013 (Bộ Khoa học và Công nghệ, 2013), chứng tỏ rằng các loại gạch được sản xuất có khả năng chịu được lưu lượng đi lại, chuyển động của con người và tác động của môi trường mà không làm mất đi độ mịn, màu sắc hoặc cấu trúc ban đầu của chúng. Độ mài mòn bề mặt của gạch thường liên quan đến độ bền của nó (Koksal et al., 2021). Do đó, các mẫu gạch tro bay, xi đáy có độ bền uốn cao hơn và do đó độ mài mòn bề mặt thấp hơn so với các mẫu gạch thông thường.

### 3.1.2. Bê tông

Độ sụt của hỗn hợp HVFC trong phòng thí nghiệm và nghiên cứu thực địa được kiểm tra ngay sau khi trộn. Độ sụt trong phòng thí nghiệm của HVFC là 18 cm, thấp hơn so với độ sụt tại hiện trường của HVFC (20 cm). Sự khác biệt về điều kiện thực tế (tức là hàm lượng ẩm) của cốt liệu được sử dụng đã gây ra sự thay đổi này. Do đó, tất cả các hỗn hợp bê tông tươi đều thể hiện khả năng thi công tốt, đáp ứng giá trị độ sụt thiết kế là  $18 \pm 2 \text{ cm}$  là điều kiện phù hợp cho phương pháp bơm ngang. Nhìn chung, việc kết hợp tro bay thể tích lớn với các hạt tương đối mịn và hình cầu mang lại hiệu ứng bôi trơn và cải thiện khả năng thi công của hỗn hợp tươi (Estakhri & Saylak, 2005). Xét dưới góc độ cơ chế vật liệu, hiệu ứng bôi trơn này có thể được giải thích bởi hình dạng hạt tương đối tròn và bề mặt nhẵn của tro bay, giúp giảm ma sát nội tại giữa các hạt rắn trong hỗn hợp. Đồng thời, tro bay với kích thước hạt mịn còn góp phần lấp đầy các khoảng rỗng giữa cốt liệu, làm tăng hiệu ứng lấp lèn của hệ hạt và cải thiện sự phân bố hồ xi măng bao quanh cốt liệu. Cơ chế này phù hợp với các phân tích về HVFC đã được báo cáo trong nghiên cứu trước (Estakhri & Saylak, 2005). Xét dưới góc độ so sánh, xu hướng cải thiện tính công tác của hỗn hợp chứa tro bay được ghi nhận trong nghiên cứu này phù hợp với các nhận định đã được báo cáo trong một số nghiên cứu quốc tế về HVFC. Tuy nhiên, các kết quả thu được cho thấy mức độ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật phụ thuộc đáng kể vào cấp phối và điều kiện nghiên cứu cụ thể, qua đó nhấn mạnh sự cần thiết của việc đối chiếu trực tiếp kết quả thay vì suy luận từ các nghiên cứu trước.

Kết quả đo cường độ nén được trình bày trong Bảng 3. Các giá trị cường độ nén của bê tông tro bay và bê tông thông thường đều cao hơn yêu cầu và đáp ứng tiêu chí của Tiêu chuẩn cơ sở TCCS 40:2022/TCĐBVN (Bộ Giao thông Vận tải, 2022) đối với ứng dụng mặt đường giao thông nông thôn cấp 4. Sau 28 ngày tuổi, bê tông tro bay có cường độ chịu nén là 47,72 MPa, còn bê tông thông thường có cường độ chịu nén là 41,62 MPa, tức cường độ chịu

nén của bê tông tro bay cao hơn khoảng 14,7% so với bê tông thông thường. Sự gia tăng cường độ nén này có thể được lý giải trên cơ sở cơ chế phản ứng pozzolan của tro bay trong môi trường kiềm của hồ xi măng. Silica hoạt tính trong tro bay phản ứng với  $\text{Ca(OH)}_2$  sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng, hình thành các sản phẩm C-S-H thứ cấp, từ đó làm tăng độ đặc chắc của cấu trúc vi mô. Bên cạnh đó, sự hình thành C-S-H bổ sung giúp cải thiện liên kết tại vùng chuyển tiếp giữa hồ xi măng và cốt liệu, góp phần nâng cao khả năng chịu lực tổng thể của bê tông, phù hợp với các nhận định đã được công bố trong các nghiên cứu về HVFC (Kumar et al., 2007; Harwalkar & Awanti, 2014).

Độ mài mòn bề mặt là một đặc tính quan trọng của mặt đường bê tông, làm thay đổi khả năng chống mài mòn của mặt đường bê tông trong suốt thời gian sử dụng. Giá trị tối đa cho phép của tổn thất mài mòn đối với ứng dụng mặt đường bê tông nông thôn cấp độ 4, theo TCCS 40:2022/TCĐBVN (Bộ Giao thông Vận tải, 2022) không lớn hơn  $0,6 \text{ g/cm}^2$ . Dữ liệu thử nghiệm chứng minh rằng các giá trị mài mòn bề mặt của cả bê tông tro bay và bê tông thông thường đều thấp hơn giới hạn tiêu chuẩn và độ mài mòn bề mặt của bê tông tro bay thấp hơn khoảng 9 – 10% so với bê tông thông thường. Kết quả các nghiên cứu trước đây đã chứng minh rằng cường độ nén là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ mài mòn bề mặt (Kumar et al, 2007; Harwalkar & Awanti, 2014). Do đó, mẫu bê tông tro bay có cường độ nén cao hơn cho thấy khả năng chống mài mòn tốt hơn so với bê tông thông thường. Xét dưới góc độ cơ chế vật liệu, khả năng chống mài mòn của bê tông chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi mức độ đặc chắc của cấu trúc vi mô và cường độ liên kết trong hồ xi măng. Việc giảm hàm lượng lỗ rỗng mao dẫn và tăng cường liên kết giữa các pha rắn giúp hạn chế hiện tượng bong tróc vật liệu bề mặt dưới tác động mài mòn. Mối quan hệ giữa cường độ, cấu trúc vi mô và khả năng chống mài mòn của bê tông đã được đề cập trong các nghiên cứu trước (Siddique, 2004; Koksal et al., 2021) và phù hợp với xu hướng kết quả ghi nhận trong nghiên cứu này. Xét dưới góc độ đối sánh với các nghiên cứu quốc tế về HVFC, các giá trị cường độ nén và khả năng chống mài mòn thu được trong nghiên cứu này nằm trong cùng khoảng và xu hướng với các kết quả đã được báo cáo cho các ứng dụng mặt đường bê tông ở điều kiện tương tự (Kumar et al., 2007; Harwalkar & Awanti, 2014; Nassar et al., 2013). Tuy nhiên, khác với phần lớn các nghiên cứu trước đây khi được thực hiện chủ yếu dừng lại ở quy mô phòng thí nghiệm hoặc thử nghiệm ngắn hạn, trong nghiên cứu này bằng chứng thực nghiệm đã

được bổ sung thông qua việc triển khai và theo dõi sản phẩm trong điều kiện sử dụng thực tế, qua đó

củng cố tính khả thi và độ tin cậy của các kết quả kỹ thuật thu được.

**Bảng 3. Kết quả đánh giá các yếu tố kỹ thuật của sản phẩm bê tông**

Mẫu 28 ngày tuổi	Bê tông tro bay		Bê tông thông thường	
	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Cường độ chịu nén (MPa)	47,72	3,212	41,62	2,339
Độ mài mòn bề mặt (g/cm <sup>2</sup> )	0,48	0,021	0,53	0,024

**3.2. Đánh giá hiệu quả về kinh tế**

*3.2.1. Gạch lát bê tông*

Kết quả phân tích chi phí của gạch lát bê tông được sản xuất trong nghiên cứu này và có sẵn trên thị trường địa phương được so sánh và thể hiện trong Bảng 4. Giá đơn vị của từng thành phần gạch được thu thập từ thị trường địa phương ở khu vực ĐBSCL. Tỷ lệ pha trộn gạch thông thường được tham khảo từ các nhà máy gạch địa phương. Đối với kết quả tính toán, tổng chi phí vật liệu của hỗn hợp gạch lát kết hợp tro bay, xi đáy là 641.498 VNĐ/m<sup>3</sup>, thấp hơn khoảng 34% so với gạch thương mại thông

thường trên thị trường. Kết quả Bảng 4 cho thấy giá đơn vị của cát nghiền tự nhiên đất hơn nhiều so với xi đáy. Do đó, việc thay thế cát nghiền bằng xi đáy làm giảm đáng kể tổng chi phí sản xuất gạch lát bê tông, dẫn đến gạch có chi phí kinh tế và tận dụng được lượng lớn các sản phẩm phụ công nghiệp. Hiệu quả kinh tế thậm chí còn tăng cao hơn nữa khi tính đến chi phí xử lý chất thải. Hơn nữa, việc sử dụng các sản phẩm phụ công nghiệp giúp tránh cạn kiệt tài nguyên thiên nhiên trong bối cảnh tài nguyên thiên nhiên có hạn, thúc đẩy tăng trưởng bền vững.

**Bảng 4. Tổng chi phí vật liệu để làm một khối gạch lát bê tông**

Vật liệu	Cấp phối (kg)		Đơn giá nguyên liệu (VNĐ/kg)	Chi phí vật liệu (VNĐ/m <sup>3</sup> )	
	Gạch tro bay, xi đáy	Gạch thông thường		Gạch tro bay, xi đáy	Gạch thông thường
Xi măng	369	335	1.440	531.360	482.400
Tro bay	205	-	99	20.295	-
Cát nghiền	-	1867	264	-	492.888
Xi đáy	1,270	-	70	88.900	-
Nước	205	192	4,6	943	883
<b>Tổng (VNĐ/m<sup>3</sup>)</b>				<b>641.498</b>	<b>976.171</b>

*3.2.2. Bê tông*

Kết quả phân tích chi phí giữa HVFC và bê tông thương mại thông thường cũng cấp được thể hiện trong Bảng 5. Cần lưu ý rằng tỷ lệ hỗn hợp của bê tông thông thường được tham khảo từ một số nhà máy sản xuất bê tông địa phương, giá đơn vị của từng thành phần bê tông là giá trị trung bình từ thị trường địa phương. Đối với kết quả tính toán, tổng

chi phí vật liệu của HVFC nhỏ hơn bê tông thương mại thông thường là 295.467 VNĐ/m<sup>3</sup>, thấp hơn khoảng 25%. Kết quả trong Bảng 5 cho thấy giá đơn vị của xi măng đất hơn nhiều so với tro bay. Do đó, việc giảm khối lượng xi măng và tăng khối lượng tro bay ở HVFC làm giảm đáng kể tổng chi phí sản xuất bê tông, dẫn đến HVFC có chi phí kinh tế và tận dụng được lượng lớn các sản phẩm phụ công nghiệp.

**Bảng 5. Tổng chi phí vật liệu để làm một khối bê tông**

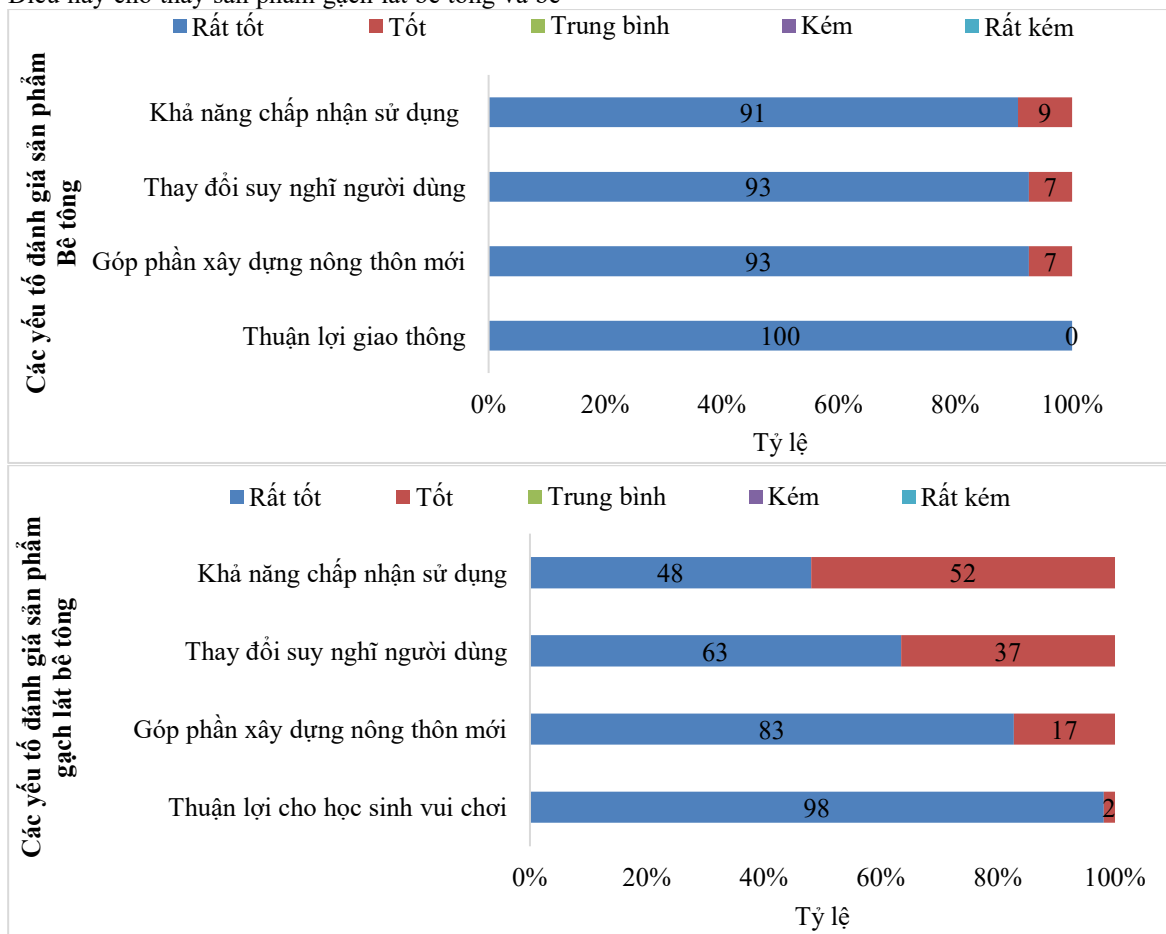
Vật liệu	Cấp phối (kg/m <sup>3</sup> )		Đơn giá nguyên liệu (VNĐ/kg)	Chi phí nguyên liệu (VNĐ/m <sup>3</sup> )	
	Bê tông tro bay	Bê tông thông thường		Bê tông tro bay	Bê tông thông thường
Xi măng	142,8	400	1.440	205.632	576.000
Tro bay	217,2	-	99	21.503	-
Vôi bột	35,7	-	5,86	209	-
Cát	718,1	745	264	189.578	196.680

Vật liệu	Cấp phối (kg/m <sup>3</sup> )		Đơn giá nguyên liệu (VNĐ/kg)	Chi phí nguyên liệu (VNĐ/m <sup>3</sup> )	
	Bê tông tro bay	Bê tông thường		Bê tông tro bay	Bê tông thường
Đá	1224	1030	242	296.208	249.260
Nước	119	175	4,6	548	805
PG	4,8	4,4	34.000	163.200	149.600
	<b>Tổng (VNĐ/m<sup>3</sup>)</b>			<b>876.878</b>	<b>1.172.345</b>

**3.3. Đánh giá hiệu quả về mặt xã hội**

Kết quả đánh giá về mặt xã hội đối với 2 sản phẩm là gạch lát bê tông và bê tông sau thời gian 01 năm sử dụng được thể hiện ở Hình 3, cho thấy các khía cạnh xem xét đều được người dân đánh giá ở mức tốt và rất tốt, đặc biệt là không có người dân được khảo sát đánh giá ở mức thấp về sản phẩm. Điều này cho thấy sản phẩm gạch lát bê tông và bê

tông không bộc lộ hạn chế rõ rệt nào so với các sản phẩm tương tự tại địa phương. Thêm vào đó, người dân cũng nhận thức được vấn đề an toàn khi sử dụng sản phẩm với chi phí thấp hơn khoảng 34% đối với gạch lát bê tông và 25% đối với bê tông, điều này có ý nghĩa trong việc nhân rộng sử dụng sản phẩm trong thời gian tới, đặc biệt trong việc xây dựng các công trình phục vụ phát triển nông thôn mới.



**Hình 3. Kết quả đánh giá hiệu quả về mặt xã hội của sản phẩm gạch lát bê tông và bê tông**

Trước đây, người dân suy nghĩ về việc sử dụng sản phẩm gạch lát bê tông và bê tông được sản xuất từ tro bay và xỉ đáy của NMNĐ than là không an toàn do sử dụng nguyên liệu từ chất thải NMNĐ và đánh giá không cao về chất lượng sản phẩm. Việc

triển khai thực tế sử dụng sản phẩm địa phương có thể giúp người dân kiểm chứng được độ bền của sản phẩm và từ đó giúp người dân thay đổi suy nghĩ về việc sử dụng sản phẩm này. Điều này được minh chứng qua kết quả khảo sát đánh giá cho thấy, có

trên 90% người dân chấp nhận sử dụng sản phẩm. So với các nghiên cứu trước về vật liệu bê tông sử dụng tro bay và xỉ đáy, trong đó yếu tố xã hội thường không được xem xét hoặc chỉ được đề cập gián tiếp thông qua chi phí và tính sẵn có của vật liệu, việc tiếp cận trực tiếp đã được tiến hành trong nghiên cứu này thông qua khảo sát mức độ hài lòng và chấp nhận của người sử dụng trong điều kiện thực tế. Kết quả cho thấy nhận thức ban đầu mang tính e ngại của cộng đồng đối với vật liệu có nguồn gốc từ chất thải công nghiệp có thể được cải thiện đáng kể khi sản phẩm được kiểm chứng thông qua quá trình sử dụng thực tế. Cách tiếp cận này phù hợp với xu hướng đánh giá vật liệu xây dựng theo hướng lấy người sử dụng làm trung tâm và góp phần bổ sung khía cạnh xã hội – một nội dung còn thiếu trong nhiều nghiên cứu về HVFC và gạch lát bê tông hiện nay.

**3.4. Đánh giá hiệu quả về mặt môi trường**

**3.4.1. Gạch lát bê tông (gạch terazo)**

Tro bay và xỉ đáy sử dụng trong nghiên cứu này là các sản phẩm phụ công nghiệp, vì vậy cần xác định hàm lượng kim loại nặng (hàm lượng asen (As), hàm lượng cadimi (Cd), hàm lượng chì (Pb), hàm lượng crom (Cr)) để ngăn ngừa nguy cơ gây ra các vấn đề về môi trường, đặc biệt là ở vỉa hè, sân trường. Việc lựa chọn các chỉ tiêu kim loại nặng trong nghiên cứu này được thực hiện theo đúng quy định của Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 07:2009/BTNMT (Bộ Tài nguyên và Môi trường,

2009), trong đó đã quy định cụ thể các chỉ tiêu, quy trình lấy mẫu, xử lý mẫu và phương pháp phân tích. Việc tuân thủ quy chuẩn này là cơ sở đảm bảo độ tin cậy của kết quả đánh giá môi trường và cho phép đối chiếu trực tiếp với các ngưỡng cho phép theo quy định hiện hành. Kết quả thí nghiệm xác định hàm lượng kim loại nặng có trong đất tại công trình lát gạch, có trong mẫu gạch và sau 1 năm lấy lại mẫu đất tại vị trí ban đầu đã lấy mẫu đất để xác định sự rò rỉ của hàm lượng kim loại nặng từ gạch ra đất, được xác định trong Bảng 6, chứng tỏ hàm lượng kim loại nặng chính trong các viên gạch có sử dụng tro bay và xỉ đáy thấp hơn nhiều so với giới hạn cho phép của QCVN 07:2009/BTNMT (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2009). Do đó, gạch lát sản xuất có thể được phân loại là vật liệu lát an toàn. Trong nghiên cứu này, các hợp chất hữu cơ độc hại không được xem xét do đây không phải là nhóm chất đặc trưng phát sinh từ bê tông và gạch lát bê tông sử dụng tro bay và xỉ đáy. Phạm vi đánh giá môi trường được tập trung vào các chỉ tiêu kim loại nặng có nguy cơ phát thải từ nguồn nguyên liệu sử dụng, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu và quy định của quy chuẩn quốc gia hiện hành. Hơn nữa, kết quả thu được trong nghiên cứu này chỉ ra rằng việc sử dụng gạch lát bê tông thân thiện với môi trường và an toàn cho con người. Kết quả cho thấy, hàm lượng kim loại nặng ghi nhận trong nghiên cứu đều nằm trong giới hạn cho phép và không gây ô nhiễm môi trường.

**Bảng 6. Kết quả thí nghiệm xác định hàm lượng kim loại nặng từ phòng Thí nghiệm của Trung tâm Kỹ thuật Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng Cần Thơ**

STT	Chỉ tiêu	Giới hạn định lượng của phương pháp thử	Đơn vị	Mẫu đất trước khi lát gạch		Mẫu gạch	Mẫu đất sau khi lát gạch 1 năm	
				Mẫu 1	Mẫu 2		Mẫu 1	Mẫu 2
1	As	8,25	mg/kg	< 8,25	< 8,25	< 15,00	2,75	2,75
2	Cd	1,20	mg/kg	< 1,20	< 1,20	< 1,80	0,40	0,40
3	Pb	8,25	mg/kg	< 8,25	< 8,25	< 15,30	2,75	2,75
4	Cr	8,25	mg/kg	< 8,25	< 8,25	< 15,00	2,75	2,75

**3.4.2. Bê tông**

Tro bay là sản phẩm phụ công nghiệp, do đó hàm lượng kim loại nặng trong HVFC cần phải tìm ra để ngăn ngừa mọi vấn đề tiềm ẩn về môi trường, đặc biệt là trong trường hợp mặt đường. Mức độ kim loại nặng bị rò rỉ trong hỗn hợp HVFC được trình bày trong Bảng 7. Như có thể thấy, mức độ rò rỉ của một số kim loại nặng quan trọng trong HVFC được phát hiện thấp hơn đáng kể so với giới hạn tối đa theo quy định của QCVN 07:2009/BTNMT (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2009), điều này chứng minh tính an

toàn và bền vững của việc tái chế tro bay khối lượng lớn trong bê tông cũng như ứng dụng thực tế của HVFC trong xây dựng mặt đường. Kết quả đánh giá môi trường của nghiên cứu này cho thấy hàm lượng kim loại nặng rò rỉ từ sản phẩm đều nằm dưới ngưỡng quy định, phù hợp với các nghiên cứu trong và ngoài nước đã công bố về tính ổn định môi trường của bê tông và gạch lát sử dụng tro bay – xỉ đáy (Nguyen et al., 2021; Nguyen et al., 2023; Koksai et al., 2021). Tuy nhiên, điểm khác biệt của nghiên cứu này là việc đánh giá được thực hiện sau thời gian sử dụng thực tế kéo dài một năm, cho phép xem xét

nguy cơ phát tán kim loại nặng trong điều kiện khai thác thực, thay vì chỉ dựa trên kết quả thí nghiệm ngắn hạn. Điều này góp phần bổ sung bằng chứng

thực nghiệm cho tính an toàn môi trường và khả năng nhân rộng ứng dụng sản phẩm trong bối cảnh phát triển kinh tế tuần hoàn tại khu vực ĐBSCL.

**Bảng 7. Kết quả thí nghiệm xác định hàm lượng kim loại nặng đối với công trình đường giao thông đã thực hiện, từ phòng Thí nghiệm của Trung tâm Kỹ thuật Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng Cần Thơ**

TT	Chỉ tiêu	Giới hạn định lượng của phương pháp thử	Đơn vị	Mẫu đất trước khi thi công đường bê tông			Mẫu hỗn hợp HVFC			Mẫu đất sau khi thi công đường bê tông hơn 1 năm		
				Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3
1	As	8,25	mg/kg	9,68	10,40	9,81	<8,25	<8,25	<8,25	11,62	2,75	2,75
2	Cd	1,20	mg/kg	<1,20	<1,20	<1,20	<1,20	<1,20	<1,20	0,40	0,40	0,40
3	Pb	8,25	mg/kg	31,50	31,50	29,30	<8,25	<8,25	<8,25	27,23	22,89	24,54
4	Cr	8,25	mg/kg	25,10	25,50	22,00	<8,25	<8,25	<8,25	26,88	18,39	26,57

**4. KẾT LUẬN**

Kết quả nghiên cứu trong khuôn khổ nghiên cứu ứng dụng thực tế (case study) cho thấy rằng việc sử dụng tro bay và xỉ đáy của NMNĐ than trong sản xuất bê tông và gạch lát bê tông tại khu vực nghiên cứu cụ thể có thể tạo ra các sản phẩm đáp ứng đồng thời các tiêu chí về kỹ thuật, kinh tế, xã hội và môi trường theo các tiêu chuẩn hiện hành. Cụ thể:

**4.1. Đối với sản phẩm gạch terazo**

– Giá trị độ bền uốn của gạch terazo đúc phục vụ nghiên cứu thực địa đạt 5,69 MPa, cao hơn so với các mẫu đúc trong phòng thí nghiệm. Điều này chứng tỏ quy trình sản xuất có tính ổn định, khả năng chuyên giao công nghệ cao và hoàn toàn khả thi khi triển khai thực tế, đồng thời khẳng định chất lượng và tính thẩm mỹ vượt trội của sản phẩm.

– Độ hút nước bề mặt của gạch terazo đúc trong phòng thí nghiệm đạt 5,32%, cao hơn 0,32% so với mẫu sản xuất tại nhà máy. Ngoài ra, gạch sản xuất từ tro bay và xỉ đáy cho thấy khả năng chống mài mòn cao hơn so với gạch terazo truyền thống. Tất cả các mẫu đều đáp ứng đầy đủ các yêu cầu của TCVN 7744:2013 (Bộ Khoa học và Công nghệ, 2013), với độ hút nước bề mặt < 6% và độ mài mòn bề mặt < 0,4 g/cm<sup>2</sup>.

– Tất cả các mẫu gạch terazo được chế tạo trong nghiên cứu đều đạt đồng thời ba tiêu chí: cường độ uốn > 5,0 MPa, độ hút nước bề mặt < 6% và độ mài mòn bề mặt < 0,4 g/cm<sup>2</sup>. Các chỉ tiêu này tương ứng với phân loại gạch terazo loại I theo TCVN 7744:2013 (Bộ Khoa học và Công nghệ, 2013), nhóm sản phẩm có chất lượng cao nhất và tính thẩm mỹ nổi bật. Nhờ đó, gạch có thể được sử dụng trong các công trình xây dựng yêu cầu độ bền và tính ổn định lâu dài.

– Hàm lượng kim loại nặng trong tất cả các mẫu gạch terazo đều thấp đáng kể so với giới hạn quy định trong các tiêu chuẩn quốc gia, chứng minh tính an toàn đối với sức khỏe con người và mức độ thân thiện môi trường của sản phẩm.

– Kết quả phân tích kinh tế cho thấy chi phí vật liệu để sản xuất gạch terazo trong nghiên cứu thấp hơn khoảng 34% so với gạch terazo thương mại thông thường. Kết quả này cho thấy việc sử dụng tro bay và xỉ đáy trong sản xuất không chỉ góp phần giảm chi phí, tận dụng hiệu quả phụ phẩm công nghiệp mà còn tạo ra sản phẩm bền vững, thân thiện với môi trường và có tiềm năng ứng dụng rộng rãi.

**4.2. Đối với bê tông**

– Kết quả thử nghiệm trong phòng thí nghiệm và ứng dụng thực tế tại hiện trường cho thấy hỗn hợp HVFC có tính công tác tốt, với giá trị độ sụt tương ứng đạt 18 cm và 20 cm, đáp ứng yêu cầu thi công và phù hợp với phương pháp bơm ngang trong thực tiễn.

– Cường độ nén 28 ngày và chỉ số mài mòn bề mặt của tất cả các mẫu bê tông đều đạt yêu cầu theo tiêu chuẩn kỹ thuật, với cường độ nén vượt 41,3 MPa và giá trị mài mòn dưới 0,6 g/cm<sup>2</sup>. Các mẫu được đúc trong phòng thí nghiệm thường ghi nhận cường độ cao hơn so với mẫu lấy tại hiện trường, chủ yếu do sự khác biệt về điều kiện thi công như thiết bị, quy trình thao tác, tay nghề nhân công và điều kiện môi trường.

– Hàm lượng kim loại nặng rò rỉ từ hỗn hợp HVFC ở mức rất thấp và nằm dưới đáng kể so với các giới hạn quy định trong QCVN 07:2009/BTNMT (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2009), điều này chứng minh tính an toàn, thân thiện môi trường của sản phẩm và khả năng ứng dụng trong các hạng mục xây

dựng bền vững như vỉa hè và công trình giao thông nông thôn.

– Về phương diện xã hội, kết quả khảo sát cho thấy người dân đã có sự thay đổi tích cực trong nhận thức đối với các sản phẩm được sản xuất từ tro bay và xỉ đáy của NMNĐ than. Sản phẩm được đánh giá là an toàn, có chi phí thấp và được chấp nhận đưa vào sử dụng trong đời sống.

– Các kết quả phân tích kinh tế cho thấy việc sử dụng tro bay thay thế tỷ lệ lớn xỉ măng trong hỗn hợp HVFC giúp giảm khoảng 25% chi phí vật liệu so với bê tông thương mại truyền thống, khẳng định tính hiệu quả và tiềm năng ứng dụng rộng rãi của HVFC trong các công trình xây dựng.

Cần lưu ý rằng các kết quả thu được trong nghiên cứu này mang ý nghĩa trong phạm vi điều kiện nghiên cứu cụ thể, bao gồm khu vực triển khai tại ĐBSCL, đặc điểm nguồn tro bay và xỉ đáy sử dụng, quy mô công trình thử nghiệm và thời điểm thực hiện nghiên cứu. Do sự khác biệt về nguồn nguyên liệu, điều kiện khí hậu, công nghệ sản xuất và bối cảnh xã hội giữa các khu vực, việc suy rộng trực tiếp các kết quả này cho các điều kiện khác cần được xem xét thận trọng và cần có thêm các nghiên cứu kiểm chứng bổ sung.

Cả hai loại sản phẩm đều được kiểm chứng thông qua quá trình thử nghiệm sử dụng trong điều kiện thực tế và nhận được mức độ chấp thuận cũng như hài lòng cao từ người dân tại khu vực triển khai mô hình. Tuy nhiên, việc đánh giá hiệu quả xã hội trong nghiên cứu này được thực hiện theo hướng mô tả, với đối tượng và cỡ mẫu khảo sát giới hạn trong phạm vi khu vực triển khai mô hình. Do đó, các kết quả khảo sát chưa đại diện cho toàn bộ cộng đồng

và cần được mở rộng về phạm vi, cỡ mẫu và cơ sở lý thuyết trong các nghiên cứu tiếp theo. Nghiên cứu này vẫn tồn tại một số giới hạn, cụ thể: các chỉ tiêu môi trường như pH đất, độ kiềm và sự biến động theo mùa trong điều kiện khí hậu đặc thù của khu vực ĐBSCL (đặc biệt là mùa mưa) chưa được đánh giá chi tiết trong khuôn khổ nghiên cứu hiện tại. Các nội dung này cần được xem xét trong các nghiên cứu dài hạn tiếp theo nhằm đánh giá toàn diện hơn tác động môi trường của sản phẩm trong điều kiện sử dụng thực tế. Kết quả nghiên cứu cho thấy các sản phẩm bê tông và gạch lát bê tông sử dụng tro bay – xỉ đáy không chỉ đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn hiện hành mà còn thể hiện tính ổn định, an toàn môi trường và khả năng chấp nhận xã hội khi triển khai trong điều kiện thực tế tại khu vực ĐBSCL. Các kết quả thực nghiệm ở quy mô công trình là cơ sở khoa học quan trọng để đề xuất mở rộng ứng dụng các sản phẩm này trong các công trình hạ tầng nông thôn tại các địa phương có điều kiện tương tự.

Đóng góp quan trọng của nghiên cứu này không chỉ nằm ở việc đánh giá các chỉ tiêu kỹ thuật và kinh tế, mà còn ở việc cung cấp bằng chứng thực nghiệm thu được từ quá trình ứng dụng thực tế về tính an toàn môi trường và mức độ chấp nhận xã hội của các sản phẩm bê tông và gạch lát bê tông sử dụng tro bay – xỉ đáy. Các kết quả đánh giá kim loại nặng sau thời gian khai thác và khảo sát người dân sử dụng sản phẩm cho thấy vật liệu không gây rủi ro môi trường đáng kể và được cộng đồng địa phương chấp nhận ở mức cao. Đây là những khía cạnh còn hạn chế trong nhiều nghiên cứu trước và có ý nghĩa quan trọng đối với việc xem xét khả năng nhân rộng các sản phẩm này trong thực tiễn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2009). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về ngưỡng chất thải nguy hại* (QCVN 07:2009/BTNMT).

Bộ Khoa học và Công nghệ. (2013). *Gạch terazo* (TCVN 7744:2013). <https://storethingiem.vn/tcvn-7744-2013-gach-terazo-354>

Bộ Giao thông Vận tải. (2022). *Thi công và nghiệm thu mặt đường bê tông xỉ măng trong xây dựng công trình giao thông* (TCCS 40:2022/TCĐBVN). <https://storethingiem.vn/tccs-40-2022-thi-cong-va-nghiem-thu-mat-duong-be-tong-xi-mang-trong-xay-dung-cong-trinh-giao-thong>

Estakhri, C. K., & Saylak, D. (2005). Reducing greenhouse gas emissions in Texas with high-volume fly ash concrete. *Transportation*

*Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1941, 167–174.

<https://doi.org/10.1177/0361198105194100122>  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107280>

Harwalkar, A. B., & Awanti, S. S. (2014).

Laboratory and field investigations on high-volume fly ash concrete for rigid pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2441, 121–127. <https://doi.org/10.3141/2441-16>

Koksal, F., Gencel, O., Sahin, Y., & Okur, O.

(2021). Recycling bottom ash in production of eco-friendly interlocking concrete paving blocks. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 985–1001.

<https://doi.org/10.1007/s10163-021-01186-8>

- Koehnken, L., Rintoul, M. S., Goichot, M., Tickner, D., Loftus, A. C., & Acreman, M. C. (2020). Impacts of riverine sand mining on freshwater ecosystems: A review of the scientific evidence and guidance for future research. *River Research and Applications*, 36, 362–370. <https://doi.org/10.1002/rra.3586> <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130576>
- Kumar, B., Tik, G. K., & Nanda, P. K. (2007). Evaluation of properties of high-volume fly-ash concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 906–911. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:10\(906\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:10(906))
- Naganathan, S., Subramaniam, N., & Mustapha, K. N. P. (2012). Development of brick using thermal power plant bottom ash and fly ash. *Asian Journal of Civil Engineering*, 13, 275–287. <https://irepository.uniten.edu.my/handle/123456789/29520>
- Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., & Mustapha, K. N. (2015). Performance of bricks made using fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*, 96, 576–580. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.068> <https://www.luatmoitruong.vn/qcvn-07-2009-btntm>
- Nassar, R. U. D., Soroushian, P., & Ghebrab, T. (2013). Field investigation of high-volume fly ash pavement concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.006>
- Nguyen, T. H., Pham, Q. V., Nguyen, T. P. M., Vu, V. T., Do, T. H., Hoang, M. T., Thi, N. T. T., & Minh, T. B. (2023). Distribution characteristics and ecological risks of heavy metals in bottom ash, fly ash, and particulate matter released from municipal solid waste incinerators in northern Vietnam. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 2579–2590. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01335-4>
- Nguyen, T. N., Phi, H. T., Bui, T. S. (2019). Utilizing coal bottom ash from thermal power plants in Vietnam as partial replacement of aggregates in concrete pavement. *Journal of Engineering*, 2019, e3903097. <https://doi.org/10.1155/2019/3903097>
- Nguyen, T. T. T., Hoang, A. Q., Nguyen, V. D., Nguyen, H. T., Vu, T. V., Vuong, X. T., & Tu, M. B. (2021). Concentrations, profiles, emission inventory, and risk assessment of chlorinated benzenes in bottom ash and fly ash of municipal and medical waste incinerators in northern Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 13340–13351. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11385-9>
- Rentier, E. S., & Cammeraat, L. H. (2022). The environmental impacts of river sand mining. *Science of The Total Environment*, 838, 155877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>
- Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.002>
- Tập đoàn Điện lực Việt Nam. (2018). *Vấn cần phát triển nhiệt điện than*. <https://evn.com.vn/d/vi-VN/news/Van-can-phat-trien-nhiet-dien-than--60-8-21161>
- Verma, S. K., Ashish, D. K., & Singh, J. (2016). Performance of bricks and brick masonry prism made using coal fly ash and coal bottom ash. *Advances in Concrete Construction*, 4, 231–242. <https://doi.org/10.12989/acc.2017.4.4.231>