

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG SỬ DỤNG TRO BAY THAY THẾ BỘT KHOÁNG TRONG SẢN XUẤT BÊ TÔNG NHỰA RỖNG

Nguyễn Văn Bích^a, Thái Hồng Nam^{a,*}

^a*Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 26/02/2025, Sửa xong 14/4/2025, Chấp nhận đăng 29/4/2025

Tóm tắt

Hệ thống mặt đường thấm nước (Permeable Pavement System – PPS) là một giải pháp hiệu quả trong kiểm soát ngập úng đô thị, với bê tông nhựa rỗng (BTNR) thường được sử dụng làm lớp mặt. Nghiên cứu này đánh giá tác động của việc thay thế bột khoáng bằng tro bay đến các đặc tính cơ lý của BTNR. Tổng cộng 18 mẫu BTNR được chế tạo, chia thành hai nhóm: sử dụng tro bay và bột khoáng. Các chỉ tiêu thí nghiệm bao gồm khối lượng thể tích, hệ số thấm, độ ổn định Marshall, cường độ kéo khi ép chẻ và tổn thất Cantabro. Kết quả cho thấy mẫu BTNR sử dụng tro bay có khối lượng thể tích cao hơn khoảng 2%, nhưng các chỉ tiêu còn lại thấp hơn so với mẫu đối chứng, với mức giảm lần lượt là 67%, 11%, 7% và 30%. Tuy nhiên, tất cả các chỉ tiêu của các mẫu BTNR đều đạt yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 13048. Kết luận cho thấy việc sử dụng tro bay trong BTNR là khả thi, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng vật liệu tái chế và thúc đẩy phát triển hạ tầng đô thị bền vững.

Từ khóa: ngập úng; hệ thống mặt đường thấm; bê tông nhựa rỗng; tro bay; bột khoáng.

RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF USING FLY ASH AS A REPLACEMENT FOR MINERAL FILLER IN THE PRODUCTION OF POROUS ASPHALT CONCRETE

Abstract

Permeable Pavement System (PPS) is an effective solution for urban flood control, with porous asphalt concrete (BTNR) commonly used as the surface layer. This study evaluates the impact of replacing mineral filler with fly ash on the mechanical properties of BTNR. A total of 18 BTNR samples were prepared, divided into two groups: fly ash and mineral filler. Experimental parameters included bulk density, permeability, Marshall stability, tensile strength, and Cantabro loss. Results showed that the fly ash BTNR had a bulk density approximately 2% higher, but other properties were lower than the control group, with reductions of 67%, 11%, 7%, and 30%, respectively. However, all properties of BTNR samples met the technical requirements outlined in TCVN 13048. The study concludes that using fly ash in BTNR is feasible, enhances the use of recycled materials, and contributes to sustainable urban infrastructure development.

Keywords: flooding; permeable pavement systems; porous asphalt concrete; fly ash; mineral filler.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(2V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(2V)-09) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Ngập úng là một vấn đề ngày càng nghiêm trọng và trở thành một thách thức lớn đối với các đô thị trong mùa mưa. Tình trạng này không chỉ xảy ra ở các thành phố lớn trên thế giới mà còn ảnh hưởng rõ rệt đến các đô thị ở Việt Nam, nơi mà hệ thống thoát nước chưa đáp ứng được nhu cầu gia tăng của đô thị hóa. Các tác động của ngập úng là rất đa dạng, từ việc gián đoạn giao thông, tăng nguy cơ tai nạn, đến việc làm suy giảm chất lượng cuộc sống của cư dân đô thị. Đặc biệt, ngập úng còn đẩy nhanh quá trình xuống cấp của cơ sở hạ tầng đô thị, dẫn đến việc tăng chi phí bảo trì và quản lý. Trước những tác hại nghiêm trọng này, việc nghiên cứu và áp dụng các giải pháp hiệu quả để giảm

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: namth@huce.edu.vn (Nam, T. H.)

thiếu ngập úng trở nên hết sức cần thiết. Một trong những giải pháp đáng chú ý và có tính bền vững là hệ thống mặt đường thấm nước (Permeable Pavement System – PPS). PPS được thiết kế với các lớp kết cấu sử dụng vật liệu có độ rỗng cao, cho phép nước mưa thấm nhanh vào lòng đất thay vì tồn đọng trên bề mặt, giúp giảm thiểu tình trạng ngập úng [1, 2]. Hệ thống này đã được triển khai thành công ở các quốc gia phát triển, đặc biệt là trên các tuyến đường có tải trọng nhẹ, bãi đỗ xe, vỉa hè và khu vực công cộng [3]. Tuy nhiên, tại nhiều quốc gia đang phát triển như Việt Nam, việc áp dụng PPS vẫn còn hạn chế và chưa được phổ biến rộng rãi.

Trong PPS, lớp mặt có thể được thi công bằng nhiều loại vật liệu khác nhau, chẳng hạn như bê tông rỗng, bê tông nhựa rỗng (BTNR) hoặc kết cấu gạch xếp. Trong phạm vi nghiên cứu này, BTNR được lựa chọn làm đối tượng chính để nghiên cứu và phân tích. Vật liệu này được sản xuất từ hỗn hợp cốt liệu có cấp phối hờ, cát, nhựa đường, bột khoáng và phụ gia (nếu có), thông qua quá trình trộn nóng ở nhiệt độ cao [4]. Trong cấu trúc của bê tông nhựa nói chung, cốt liệu lớn đóng vai trò khung chịu lực chính, trong khi nhựa đường đảm nhiệm chức năng kết dính. Đồng thời, cốt liệu nhỏ và bột khoáng kết hợp với nhựa đường tạo thành lớp vữa asphalt, giúp liên kết các hạt cốt liệu lớn, lấp đầy các lỗ rỗng giữa các cốt liệu lớn, từ đó tăng độ chặt của hỗn hợp [5]. Tuy nhiên, trong hỗn hợp BTNR, hàm lượng cốt liệu nhỏ và bột đá thường thấp hơn so với bê tông nhựa thông thường, để tạo ra độ rỗng cao. Có nhiều loại nhựa đường có thể được sử dụng làm chất kết dính trong bê tông nhựa nói chung, và BTNR nói riêng, như nhựa đường thông thường, nhựa đường polyme cải tiến. Trong đó, nhựa đường polyme cải tiến có độ nhớt động lực học cao hơn, khả năng chống biến dạng tốt hơn [6–8], nhưng giá thành lại cao hơn.

Trong bối cảnh thiếu hụt vật liệu xây dựng, Việt Nam đang tích cực nghiên cứu và áp dụng các loại vật liệu thay thế cho các vật liệu truyền thống, đặc biệt sử dụng các loại vật liệu tái chế. Trong lĩnh vực xây dựng đường, một số nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc sử dụng vật liệu tái chế từ chất thải xây dựng [9–13] để làm vật liệu cho các lớp móng đường. Cát biển, một nguồn vật liệu sẵn có nhưng ít được khai thác trong xây dựng đường, cũng đã được đưa vào nghiên cứu như một vật liệu thay thế cho cát sông, giúp giảm bớt áp lực lên nguồn tài nguyên cát tại các dòng sông [14, 15]. Tro bay – một sản phẩm phụ từ các nhà máy nhiệt điện – đã được nghiên cứu và ứng dụng như sử dụng làm vật liệu đắp nền đường [16, 17], sử dụng để gia cố, cải tạo đất [18, 19], sử dụng trong sản xuất bê tông [20, 21]. Tro bay thường có kích thước hạt từ 0,5 μm đến 300 μm , khối lượng thể tích ở trạng thái khô từ 450 kg/m^3 đến 700 kg/m^3 và trọng lượng riêng 1.800 kg/m^3 đến 2.300 kg/m^3 [17]. Tro bay có kích thước hạt khá tương đồng với kích thước hạt yêu cầu của bột khoáng, tro bay được dự đoán là có thể dùng như một loại vật liệu thay thế bột khoáng trong sản xuất bê tông nhựa. Trên thế giới, một số nghiên cứu trước đây đã sử dụng tro bay trong chế tạo bê tông nhựa thông thường [22, 23]. Tuy nhiên, tính đến nay, trên thế giới nói chung và tại Việt Nam nói riêng còn khá ít nghiên cứu sử dụng tro bay để thay thế bột khoáng trong sản xuất BTNR. Elmagarhe và cs. [24] sử dụng cốt liệu tự nhiên là đá granite và cốt liệu tái chế từ chất thải rắn xây dựng, 4% tro bay (loại C), sử dụng nhựa PG 76–22 để chế tạo các mẫu BTNR và chỉ ra được ảnh hưởng của hàm lượng cốt liệu tái chế ảnh hưởng tới các đặc tính của BTNR. Khowsnaw và Zebari [25] đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến các chỉ tiêu cơ lý của các mẫu BTNR được chế tạo từ đá dăm, tro bay, sử dụng nhựa đường 40/50. Khowsnaw và Zebari [25] đã chỉ ra rằng, hàm lượng tro bay tăng (từ 0% đến 8%) làm giảm độ rỗng và tăng độ ổn định của BTNR. Trong các nghiên cứu trước đây [24, 25] chưa có so sánh các chỉ tiêu cơ lý của các mẫu BTNR sử dụng tro bay và bột khoáng.

Từ những vấn đề nêu trên, bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu khả năng sử dụng tro bay để thay thế bột khoáng trong sản xuất BTNR. Qua đó, nghiên cứu này góp phần đẩy mạnh việc tái chế tro bay cũng như đẩy mạnh việc ứng dụng BTNR để giảm thiểu hiện tượng ngập úng trong đô thị tại

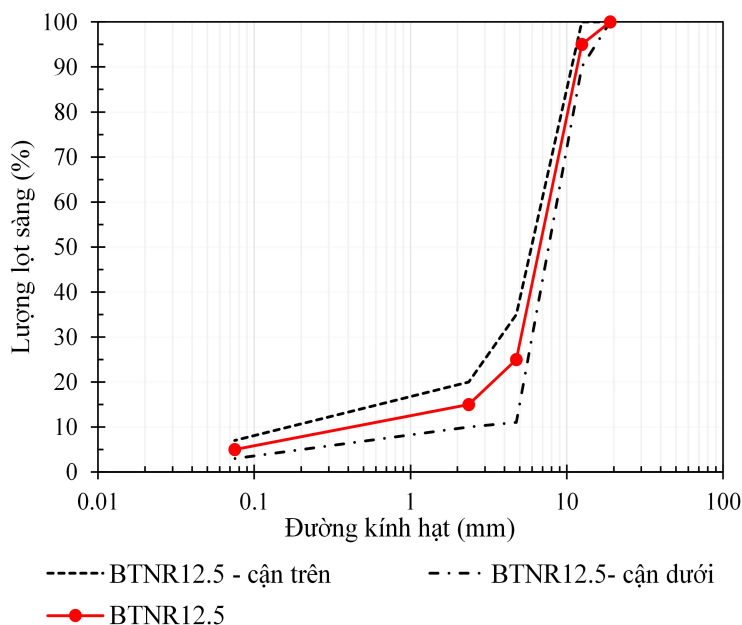
Việt Nam.

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

Trong nghiên cứu này vật liệu được chuẩn bị để chế tạo các mẫu BTNR loại BTNR12,5 [4]—loại vật liệu được sử dụng làm lớp mặt thoát nước của hệ thống mặt đường thấm nước. Các mẫu BTNR12,5 được chuẩn bị được chia làm 2 loại: (i) BTNR12,5 sử dụng tro bay, ký hiệu là BTNR-TB và (ii) BTNR12,5 sử dụng bột khoáng làm mẫu đối chứng, ký hiệu là BTNR-BK.

2.1. Vật liệu

Cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ sử dụng đá dăm (đá các-bô-nát) lấy tại mỏ đá Bắc Hà, Thanh Nghị - Thanh Liêm - Hà Nam. Đường cong cấp phối hỗn hợp cốt liệu được trình bày trong Hình 1, chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu trình bày trong Bảng 1. Cấp phối được lựa chọn để chế tạo các mẫu thí nghiệm được thể hiện là đường nét liền, màu đỏ trong Hình 1. Thành phần cấp phối hỗn hợp cốt liệu nằm hoàn toàn trong miền giới hạn quy định trong TCVN 13048 [4]. Trong đó, cốt liệu lớn (trên sàng 4,75 mm) chiếm 75% tổng khối lượng, cốt liệu nhỏ (cỡ hạt từ 0,075 mm đến 4,75 mm) chiếm 20%, hạt mịn (bột khoáng hoặc tro bay) chiếm 5%. Bảng 1 cho thấy chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu đều đáp ứng yêu cầu theo quy định của TCVN 13048 [4].



Hình 1. Đường cong cấp phối hỗn hợp vật liệu sử dụng cho BTNR12,5

Bột khoáng sử dụng trong nghiên cứu được mua tại Công ty TNHH Quang Vân - Hà Nam. Thành phần hạt và chỉ tiêu cơ lý của bột khoáng được trình bày trong Bảng 2, tất cả các chỉ tiêu cơ lý của bột khoáng đều đáp ứng yêu cầu theo quy định của TCVN 13048 [4].

Tro bay được lấy từ nhà máy nhiệt điện Quảng Ninh, Tp. Hạ Long, Quảng Ninh – nhà máy sử dụng công nghệ đốt than phun. Tro bay từ nhà máy nhiệt điện Quảng Ninh có hàm lượng CaO nhỏ hơn 10%, được phân loại thuộc loại tro bay axit (loại F) theo TCVN 10302 [26]. Thành phần hạt và chỉ tiêu cơ lý của tro bay được trình bày trong Bảng 2, tất cả các chỉ tiêu cơ lý của tro bay đều đáp ứng yêu cầu theo quy định của TCVN 13048 [4]. Có thể thấy tro bay sử dụng trong nghiên cứu có nhiều lượng hạt mịn (< 0,075 mm) hơn so với bột khoáng. Từ thành phần hạt của bột khoáng và tro

Bảng 1. Chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu lớn

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm	TCVN 13048	Phương pháp thử
Dung trọng hạt	g/cm ³	2,62	≥ 2,45	AASHTO T85
Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	6,22	≤ 10	TCVN 7572-13
Độ mài mòn Los Angeles (LA)	%	20,5	≤ 25	TCVN 7572-12
Độ hấp phụ nước	%	0,66	≤ 3	AASHTO T85
Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	0,71	≤ 2	TCVN 7572-8
Khả năng dính bám nhựa	-	Cấp 4	≥ 4	TCVN 7504
Giới hạn bền nén của đá gốc (đá trầm tích)	MPa	80	90-100	TCVN 7572-10

bay trong Bảng 2, có thể thấy trong bột khoáng và tro bay có hàm lượng cốt liệu nhỏ (> 0,075 mm) lần lượt là 20% và 12%. Bột khoáng/ Tro bay chiếm 5% tổng trọng lượng cốt liệu, nên hàm lượng cốt liệu nhỏ thực tế trong các mẫu BTNR-BK và BTNR-TB lần lượt là 21% và 20,6% và hàm lượng hạt mịn thực tế trong các mẫu lần lượt là 4% và 4,4%.

Bảng 2. Chỉ tiêu cơ lý của bột khoáng và tro bay

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm		TCVN 13048	Phương pháp thử
		Bột khoáng (BK)	Tro bay (TB)		
Thành phần hạt (lượng lọt sàng)					
0,600 mm	%	100	100	100	AASHTO T37
0,300 mm		99,9	100	95 - 100	
0,075 mm	80	88	70 - 100		
Độ ẩm	%	0,13	0,42	≤ 1,0	AASHTO T255
Chỉ số dẻo	%	1,20	-	≤ 4,0	TCVN 4197
Dung trọng hạt	g/cm ³	2,73	2,24	-	AASHTO T85

Nhựa đường sử dụng trong nghiên cứu này là nhựa đường Shell 60/70 Singapore, được xuất xưởng từ quy trình sản xuất và kiểm soát tại nhà máy lọc dầu Bukom, Singapore của tập đoàn Shell. Các chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Chỉ tiêu thí nghiệm của nhựa đường 60/70 (Shell-Singapore)

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm	Yêu cầu kỹ thuật	Phương pháp thử
1	Độ kim lún ở 25 °C, 0,1 mm, 5 giây	0,1 mm	64,2	60÷70	TCVN7495 (ASTM D5)
2	Chỉ số độ kim lún – PI	-	-1,04	-1,5÷1,0	TCVN 13567-1
3	Điểm hóa mềm (dụng cụ vòng và bi)	°C	49,0	Min 46	TCVN7497
4	Độ nhớt động lực ở 60 °C	Pa.s	266,54	Min 180	TCVN 8818-5 (ASTM D2171)

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm	Yêu cầu kỹ thuật	Phương pháp thử
5	Độ kéo dài ở 25 °C, 5cm/phút	cm	>100	Min 100	TCVN 7496 (ASTM D113)
6	Hàm lượng paraffin	%	1,61	Max 2,2	TCVN 7503 (DIN 52015)
7	Điểm chớp cháy (cốc mở Cleveland)	°C	266	Min 232	TCVN 7498 (ASTM D92)
8	Độ hòa tan trong Tricloetylen	%	99,75	Min 99	TCVN 7500 (ASTM D2042) (ASTM D36)
9	Khối lượng riêng ở 25 °C	g/cm ³	1,032	1,00÷1,05	TCVN 7501 (ASTM D70)
10	Các chỉ tiêu thí nghiệm trên mẫu nhựa sau khi thí nghiệm TFOT				
10.1	Tổn thất khối lượng sau gia nhiệt 5 giờ ở 163 °C	%	0,052	Max 0,8	TCVN 11711 (ASTM D1754)
10.2	Tỷ lệ độ kim lún còn lại so với độ kim lún ban đầu ở 25°C	%	69,61	Min 54	TCVN7495 (ASTM D5)
10.3	Độ kéo dài ở 25 °C, 5 cm/phút	cm	> 100	Min 50	TCVN7496 (ASTM D113)
11	Độ dính bám với đá	Cấp	4	≥ 4	TCVN 7504

2.2. Phương pháp thí nghiệm

Các mẫu BTNR12,5 được chuẩn bị được chia làm 2 loại: (i) BTNR12,5 sử dụng tro bay, ký hiệu là BTNR-TB và (ii) BTNR12,5 sử dụng bột khoáng làm mẫu đối chứng, ký hiệu là BTNR-BK. Thành phần cấp phối của các mẫu BTNR12,5 được chuẩn bị theo đường cong cấp phối trình bày trong Hình 1. Tổng cộng có 18 mẫu BTNR12,5 được chuẩn bị chia đều cho 2 loại BTNR. Các mẫu được chuẩn bị và sử dụng phương pháp đầm Marshall quy định trong TCVN 8860-1 [27], các mẫu được trộn với hàm lượng nhựa là 5% và đầm ở nhiệt độ 160 °C, đầm 50 chày/1 mặt. Sau khi được chuẩn bị, tất cả các mẫu được xác định khối lượng thể tích, độ rỗng dư, độ rỗng liên thông, hệ số thấm. Các thí nghiệm

Bảng 4. Các thí nghiệm được sử dụng trong nghiên cứu

STT	Chỉ tiêu	Phương pháp thử
1	Khối lượng thể tích, g/cm ³	TCVN 8860-5
2	Độ rỗng dư, %	TCVN 8860-9
3	Độ rỗng liên thông, %	Phụ lục C, TCVN 13048
4	Hệ số thấm nước trong phòng, cm/s	TCVN 11634-1
5	Độ ổn định Marshall ở 60 °C, kN	TCVN 8860-1
6	Cường độ kéo khi ép chẻ, MPa	TCVN 8862
7	Tổn thất Cantabro, %	TCVN 11415

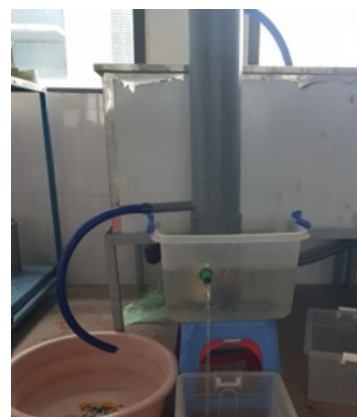
xác định độ ổn định Marshall (ở 60 °C), cường độ kéo khi ép chẻ (ở 30 °C) và tổn thất Cantabro được thực hiện với các tổ khác nhau, mỗi tổ gồm 3 mẫu. Các thí nghiệm xác định chỉ tiêu cơ lý của BTNR sử dụng trong nghiên cứu được tổng hợp trong Bảng 4, một số hình ảnh của quá trình thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2.



(a) Mẫu BTNR sau đầm nén



(b) Cân trong nước



(c) Xác định hệ số thấm trong phòng



(d) Xác định độ ổn định Marshall



(e) Xác định cường độ kéo khi ép chẻ



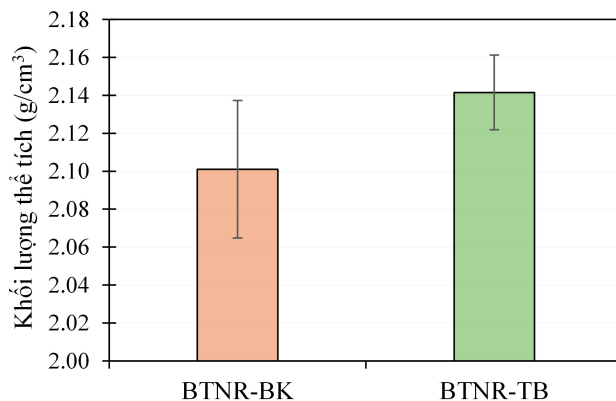
(f) Xác định tổn thất Cantabro

Hình 2. Một số hình ảnh của quá trình thí nghiệm

3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

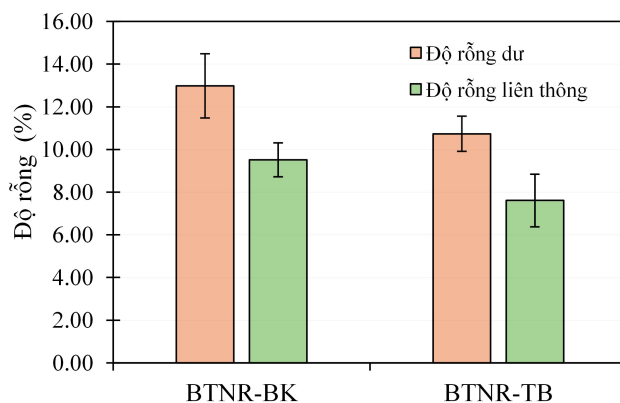
3.1. Khối lượng thể tích, độ rỗng

Kết quả xác định khối lượng thể tích được thể hiện trong Hình 3 cho thấy sự khác biệt đáng chú ý giữa các mẫu BTNR. Mặc dù tro bay có dung trọng hạt nhỏ hơn so với bột khoáng (theo Bảng 2), khối lượng thể tích của các mẫu BTNR-TB lại cao hơn so với các mẫu BTNR-BK. Điều này có thể được giải thích bởi trong nghiên cứu này tro bay và bột khoáng chỉ chiếm khoảng 5% khối lượng cốt liệu và chủ yếu đóng vai trò lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt cốt liệu lớn. Tro bay thường có dạng hình cầu [23, 28, 29], do đó ma sát giữa các hạt tro bay trong vữa asphalt thường nhỏ. Đồng thời, tro bay có nhiều hạt mịn hơn dẫn đến diện tích bề mặt được bao phủ nhựa tăng lên, qua đó làm tăng độ linh hoạt của hỗn hợp vữa asphalt [22, 23]. Vữa asphalt chứa tro bay có độ linh hoạt cao hơn tạo điều kiện thuận lợi cho các hạt cốt liệu lớn sắp xếp chặt chẽ hơn dưới tác động của lực đầm nén, so với các mẫu chứa bột khoáng, dẫn đến giá trị khối lượng thể tích cao hơn ở các mẫu BTNR-TB.



Hình 3. Khối lượng thể tích của các mẫu BTNR12.5

Hình 4 trình bày các giá trị độ rỗng dư và độ rỗng liên thông của các mẫu BTNR-BK và BTNR-TB. Kết quả cho thấy rằng, cả độ rỗng dư và độ rỗng liên thông của các mẫu BTNR-BK đều cao hơn đáng kể (khoảng 1,25 lần) so với các mẫu BTNR-TB. Sự khác biệt này hoàn toàn nhất quán với kết quả phân tích khối lượng thể tích đã được thảo luận ở phần trên. Cụ thể, trong các mẫu BTNR-TB, các hạt cốt liệu lớn có xu hướng sắp xếp chặt chẽ hơn dưới tác dụng của lực đầm nén, làm giảm thể tích lỗ rỗng giữa các hạt và giảm sự liên thông giữa các lỗ rỗng. Ngược lại, ở các mẫu BTNR-BK, sự sắp xếp ít chặt chẽ hơn của các hạt cốt liệu dẫn đến độ rỗng dư và độ rỗng liên thông cao hơn. Độ rỗng dư của các mẫu BTNR-TB sử dụng trong các nghiên cứu trước đây [24, 25] là khoảng từ 17,5% đến 19,0% với các mẫu có 4% tro bay, và khoảng 13% với các mẫu có chứa 8% tro bay- cao hơn đáng kể so với kết quả của nghiên cứu này (10,74%). Điều này có thể được dự đoán là do thành phần cấp phối sử dụng là khác nhau, cũng như do cường độ, hình dạng hạt của các loại cốt liệu sử dụng là khác nhau, dẫn đến sự sắp xếp các hạt do tác dụng của lực đầm nén là khác nhau. Đồng thời, các nghiên cứu trước đây sử dụng nhựa đường PG 76–22 và nhựa đường 40/50 là các loại nhựa có độ nhớt động lực cao hơn, khả năng chống biến dạng cao hơn so với nhựa đường 60/70 sử dụng trong nghiên cứu này.

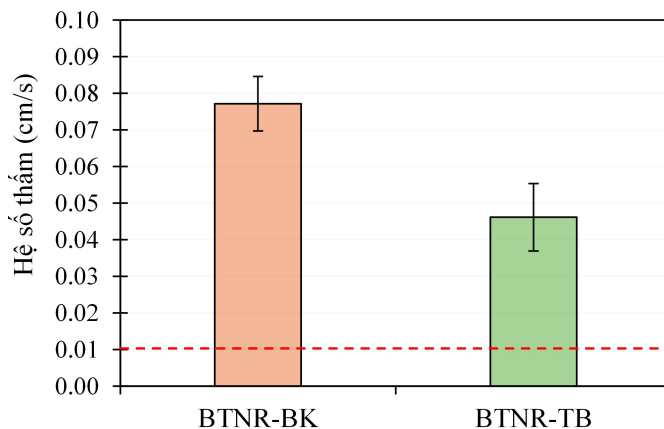


Hình 4. Độ rỗng dư và độ rỗng liên thông của các mẫu BTNR12.5

3.2. Hệ số thấm

Hệ số thấm của các mẫu BTNR-BK và BTNR-TB được thể hiện trong Hình 5. Kết quả thí nghiệm cho thấy hệ số thấm của các mẫu BTNR-BK cao hơn một cách đáng kể (1,67 lần) so với các mẫu BTNR-TB, điều này tương thích với kết quả phân tích về độ rỗng liên thông đã được trình bày ở trên.

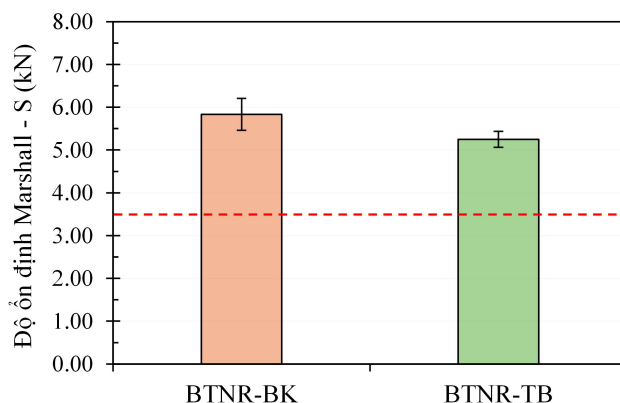
Các mẫu BTNR-BK có độ rỗng liên thông cao hơn, điều này chỉ ra rằng hệ thống các lỗ rỗng kết nối trong mẫu BTNR-BK dày đặc hơn, dẫn đến khả năng thấm nước vượt trội so với các mẫu BTNR-TB. Dù các mẫu BTNR-TB có hệ số thấm thấp hơn, nhưng giá trị này vẫn lớn hơn mức tối thiểu yêu cầu theo tiêu chuẩn TCVN 13048 [4], chứng minh rằng các mẫu BTNR-TB hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu sử dụng làm lớp mặt thoát nước trong PPS. Khi so sánh hệ số thấm với các nghiên cứu trước đây, các mẫu BTNR-TB sử dụng đá granite, 4% tro bay và nhựa PG 76–22 cho kết quả hệ số thấm cao hơn nhiều, cụ thể hệ số thấm của các mẫu này là 195 m/ngày, tương đương 0,23 cm/s [24]. Điều này được giải thích do độ rỗng của các mẫu BTNR-TB trong nghiên cứu trước đây cao hơn nhiều so với các mẫu BTNR-TB trong nghiên cứu này (như đã phân tích ở trên).



Hình 5. Hệ số thấm trong phòng của các mẫu BTNR12.5. Đường nét đứt thể hiện giá trị tối thiểu quy định trong tiêu chuẩn TCVN 13048

3.3. Độ ổn định Marshall

Hình 6 trình bày kết quả thí nghiệm xác định độ ổn định Marshall của các mẫu BTNR-BK và BTNR-TB. Độ ổn định trung bình của các mẫu BTNR-BK đạt khoảng 5,88 kN, giá trị này khá tương đồng với kết quả được công bố trong nghiên cứu trước đây [30]. Hình 6 cho thấy rằng các mẫu BTNR-BK có độ ổn định Marshall cao hơn so với các mẫu BTNR-TB, mặc dù các mẫu BTNR-BK có khối lượng thể tích thấp hơn so với BTNR-TB, như đã được chỉ ra ở phần trước. Kết quả này chỉ ra rằng

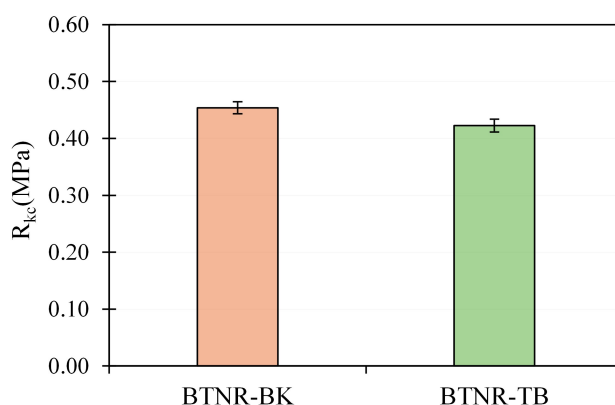


Hình 6. Độ ổn định Marshall của các mẫu BTNR12.5. Đường nét đứt thể hiện giá trị tối thiểu quy định trong tiêu chuẩn TCVN 13048

các mẫu BTNR-BK có khả năng chống lại sự biến dạng dẻo (như lún hoặc vết lõm) dưới tác động của tải trọng xe cộ tốt hơn so với các mẫu BTNR-TB. Điều này có thể được giải thích rằng vữa asphalt chứa tro bay có khả năng liên kết với cốt liệu không hiệu quả bằng vữa asphalt chứa bột khoáng. Tuy nhiên, độ ổn định Marshall của các mẫu BTNR-TB vẫn vượt quá giá trị tối thiểu yêu cầu theo tiêu chuẩn TCVN 13048 [4], cho thấy các mẫu này vẫn hoàn toàn có thể sử dụng cho các lớp mặt đường. Với BTNR sử dụng cốt liệu từ đá có cường độ cao hơn, sử dụng loại nhựa có khả năng chống biến dạng tốt hơn độ ổn định Marshall được cải thiện đáng kể. Ví dụ, trong nghiên cứu của Elmagarhe và cs. [24] BTNR-TB sử dụng cốt liệu đá granite, 4% tro bay và nhựa PG 76–22 có độ ổn định Marshall lên tới 30 kN.

3.4. Cường độ kéo khi ép chẻ

Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ của các mẫu BTNR-BK và BTNR-TB được trình bày trong Hình 7. Các mẫu BTNR-BK có cường độ kéo khi ép chẻ cao hơn một chút so với các mẫu BTNR-TB. Điều này có thể được giải thích do vữa asphalt chứa tro bay có khả năng liên kết với cốt liệu không hiệu quả bằng vữa asphalt chứa bột khoáng. Các giá trị cường độ kéo khi ép chẻ của các mẫu BTNR khoảng 0,42 – 0,45 MPa, giá trị này là nhỏ hơn so với cường độ kéo khi ép chẻ của các mẫu bê tông nhựa chặt (0,5 – 1,5 MPa). Các mẫu BTNR được chế tạo từ cốt liệu có cấp phối hở, độ rỗng sau đầm nén cao dẫn đến sự tương tác giữa các hạt cốt liệu sẽ không được chặt chẽ như các mẫu bê tông nhựa chặt, đây có thể là nguyên nhân dẫn đến cường độ kéo khi ép chẻ của các mẫu BTNR nhỏ hơn. Vì lý do này, các mẫu BTNR thường áp dụng làm tầng mặt của các kết cấu áo đường sử dụng cho đường chịu tải trọng nhỏ. Để cải thiện cường độ kéo khi ép chẻ của các mẫu BTNR, các nghiên cứu trước đây đã sử dụng cốt liệu có cường độ cao, loại nhựa có khả năng chống biến dạng tốt như nhựa đường PG 76–22 và nhựa đường 40/50. BTNR-TB sử dụng cốt liệu đá granite, 4% tro bay và nhựa PG 76–22 độ kéo khi ép chẻ khoảng 1,04 MPa [24].

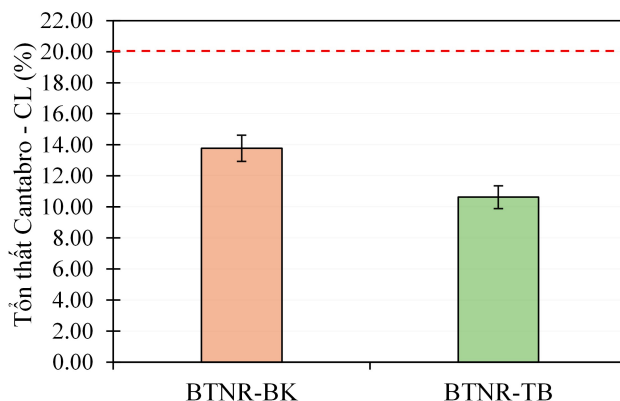


Hình 7. Cường độ kéo khi ép chẻ của các mẫu BTNR12.5

3.5. Tổn thất Cantabro

Hình 8 trình bày kết quả thí nghiệm tổn thất Cantabro của hai loại mẫu BTNR-BK và BTNR-TB. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng tất cả các mẫu BTNR đều có giá trị tổn thất Cantabro nằm trong giới hạn cho phép theo quy định tại TCVN 13048 [4]. Điều này cho thấy cả BTNR-BK và BTNR-TB đều đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật về khả năng chịu mài mòn và va đập, phù hợp với tiêu chuẩn áp dụng cho mặt đường rỗng thoát nước. Tính chất này có thể được giải thích bởi việc sử dụng cốt liệu có cường độ cao và khả năng dính bám nhựa hiệu quả trong quá trình chế tạo hỗn hợp. Khi so sánh giá trị tổn thất Cantabro giữa hai loại mẫu, các mẫu BTNR-TB cho thấy tổn thất thấp hơn so với BTNR-BK

(khoảng 30%). Sự khác biệt này có thể được lý giải bằng đặc điểm của hỗn hợp vữa asphalt. Theo đó, hỗn hợp vữa asphalt chứa tro bay có độ linh hoạt cao hơn, tạo ra lớp màng bao bọc cốt liệu dày hơn so với hỗn hợp chứa bột khoáng, dẫn đến khả năng chống mài mòn và chịu va đập được cải thiện đáng kể.



Hình 8. Tổn thất Cantabro của các mẫu BTNR12.5. Đường nét đứt thể hiện giá trị tối đa quy định trong tiêu chuẩn TCVN 13048

4. Kết luận

Nghiên cứu này đánh giá khả năng sử dụng tro bay thay thế bột khoáng trong sản xuất BTNR. Các mẫu BTNR 12,5 được chế tạo từ cốt liệu đá dăm và nhựa đường 60/70, chia thành hai nhóm: BTNR sử dụng tro bay (BTNR-TB) và BTNR sử dụng bột khoáng (BTNR-BK) làm mẫu đối chứng. Kết quả thí nghiệm cho thấy các mẫu BTNR-TB đáp ứng đầy đủ yêu cầu kỹ thuật của TCVN 13048, chứng minh việc sử dụng tro bay là khả thi. Tro bay làm tăng độ linh hoạt của vữa asphalt, giúp các hạt cốt liệu trong BTNR-TB được sắp xếp tốt hơn, dẫn đến khối lượng thể tích cao hơn và tổn thất Cantabro thấp hơn so với BTNR-BK. Tuy nhiên, độ rỗng dư và độ rỗng liên thông của BTNR-BK cao hơn, khiến hệ số thấm của mẫu này cũng cao hơn, mặc dù các mẫu BTNR-TB vẫn đáp ứng yêu cầu thấm theo TCVN 13048. Ngoài ra, vữa asphalt chứa tro bay liên kết với cốt liệu kém hơn, dẫn đến độ ổn định Marshall và cường độ kéo khi ép chế của BTNR-TB thấp hơn. Để cải thiện các chỉ tiêu này, các nghiên cứu trong tương lai cần tiếp tục với các loại nhựa có khả năng chống biến dạng tốt hơn, như nhựa đường polyme cải tiến.

Tài liệu tham khảo

- [1] Rahman, M. A., Imteaz, M. A., Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M. (2015). [Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics](#). *Journal of Cleaner Production*, 90:183–194.
- [2] Phương, N. V., Nam, T. H., Hải, P. T., Cần, K. V., Ngọc, N. T. (2019). [Nghiên cứu giải pháp thiết kế thoát nước mưa trên đường phố theo hướng bền vững](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCHXD) - ĐHXD*, 13(2V):73–85.
- [3] Chen, Y., Zhou, Y. (2019). [The contents and release behavior of heavy metals in construction and demolition waste used in freeway construction](#). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1): 1078–1086.
- [4] TCVN 13048:2024. *Lớp mặt bê tông nhựa rỗng thoát nước - Yêu cầu thi công và nghiệm thu*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [5] Bích, N. V., Anh, T. Đ., Doanh, B. P. (2025). [Nghiên cứu xác định ứng suất cắt lớn nhất ở tầng mặt bê tông nhựa trong kết cấu áo đường mềm bằng phương pháp phần tử hữu hạn](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCHXD) - ĐHXDHN*, 19(1V):24–33.

- [6] Nguyen, V. B., Thom, N. (2020). [Using a beam wheel tracker fatigue test to evaluate fatigue performance of asphalt mixtures](#). *Road Materials and Pavement Design*, 22(12):2801–2817.
- [7] Nguyen, V. B. (2024). Evaluation of fatigue behaviour of bituminous mixtures using a 4-point bending test. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 11:223–232.
- [8] Bích, N. V. (2025). [Characterisation of polymer-modified asphalt binders using the dynamic shear rheometer](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 19(1):1–9.
- [9] Thai, H. N., Kato, A., Nguyen, H. G., Nguyen, T. D., Tong, T. K., Nguyen, V. T., Uchimura, T., Maki, T., Kawamoto, K. (2021). [Effects of Particle Size and Type of Aggregate on Mechanical Properties and Environmental Safety of Unbound Road Base and Subbase Materials: A Literature Review](#). *International Journal of GEOMATE*, 20(78):148–157.
- [10] Thai, H. N., Kato, A., Nguyen, H. G., Nguyen, T. D., Tong, T. K., Nguyen, V. T., Uchimura, T., Maki, T., Kawamoto, K. (2021). [Effects of fines content and maximum particle size on mechanical properties and saturated hydraulic conductivity of recycled concrete aggregates for unbound roadbed materials in Vietnam](#). *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 9(6):239–244.
- [11] Thai, H. N., Kawamoto, K., Nguyen, H. G., Sakaki, T., Komatsu, T., Moldrup, P. (2022). [Measurements and Modeling of Thermal Conductivity of Recycled Aggregates from Concrete, Clay Brick, and Their Mixtures with Autoclaved Aerated Concrete Grains](#). *Sustainability*, 14(4):2417.
- [12] Thai, H. N., Nguyen, T. D., Nguyen, V. T., Nguyen, H. G., Kawamoto, K. (2021). [Characterization of compaction and CBR properties of recycled concrete aggregates for unbound road base and subbase materials in Vietnam](#). *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(1):34–48.
- [13] Thai, H. N., Kawamoto, K., Nguyen, H. G., Komatsu, T., Moldrup, P. (2024). [Diffusive and convective transport properties and pore-network characteristics of recycled, compacted concrete aggregates for use as road pavement materials](#). *Construction and Building Materials*, 457(April):139460.
- [14] Nam, T. H., Phương, N. V., Trụ, V. N., Tùng, H. (2023). [Khả năng áp dụng cát biển trong xây dựng nền đường ô tô với các chiều cao đắp nền khác nhau](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 17(4V):1–10.
- [15] Văn, V. T. A., Nguyễn, V. P., Bùi, P. D., Hoàng, T. (2022). Vật liệu đắp nền đường và khả năng sử dụng cát nhiễm mặn để đắp nền đường ô tô tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học & Công nghệ - Đại học Kiến trúc*, 45:29–33.
- [16] Hoang, T., Nguyen, V. P., Thai, H. N. (2019). [Use of Coal Ash of Thermal Power Plant for Highway Embankment Construction](#). Ha-Minh, C., Dao, D., Benboudjema, F., Derible, S., Huynh, D., Tang, A., editors, *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure, Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Singapore, 54:433–439.
- [17] Dân, Đ. Q., Tường, Đ. T., Sơn, Đ. N. (2019). Sử dụng tro xỉ nhiệt điện làm vật liệu san lấp. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 1:35–43.
- [18] Kolay, P. K., Puri, V. K., Lama Tamang, R., Regmi, G., Kumar, S. (2019). [Effects of Fly Ash on Liquefaction Characteristics of Ottawa Sand](#). *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(2).
- [19] Azaiez, H., Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Belkhatir, M. (2021). [Shear characteristics of fly ash improved sand as an embankment material for road infrastructure purpose](#). *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3):1–14.
- [20] Zhang, S., Chen, B., Tian, B., Lu, X., Xiong, B. (2022). [Effect of Fly Ash Content on the Microstructure and Strength of Concrete under Freeze–Thaw Condition](#). *Buildings*, 12(12):2113.
- [21] Gnanaraj, S. C., Chokkalingam, R. B., Thankam, G. L., Pothinathan, S. K. M. (2021). [Influence of Steatite and Fly Ash on the Fresh and Hardened Properties and Micromorphology of Self-Compacting Concrete](#). *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1).
- [22] Likitlersuang, S., Chompoorat, T. (2016). [Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures](#). *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(5):337–344.
- [23] Bohara, N. (2018). [Study of the Influence of Fly Ash and Its Content in Marshall Properties of Asphalt Concrete](#). *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 3(3):261–270.

- [24] Elmagarhe, A., Lu, Q., Alamri, M., Alharthai, M., Elnihum, A. (2024). [Laboratory performance evaluation of porous asphalt mixture containing recycled concrete aggregate and fly ash](#). *Case Studies in Construction Materials*, 20(December 2023):e02849.
- [25] Khowshnaw, G. J. M., Zebari, S. M. S. (2019). [Evaluation and Performance of Fly Ash in Porous Asphalt by Using Two Sources of Asphalt Binder](#). *Eurasian Journal of Science and Engineering*, 4(4).
- [26] TCVN 10302:2014. *Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [27] TCVN 8860-1:2011. *Bê tông nhựa – Phương pháp thử - Phần 1: Xác định độ ổn định, độ dẻo Marshall*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [28] Huy, N. S., Thi Thanh Tam, M. (2017). Effect of Fly Ash Content on the Compressive Strength Development of Concrete. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 2:31–36.
- [29] Nizar, K., Kamarudin, H., Idris, M. S. (2007). Physical, Chemical & Mineralogical Properties of Fly-ash. *Journal of Nuclear and Related Technology*, 4:47–51.
- [30] Thành, N. V., Chính, V. Đ. (2016). Đánh giá ảnh hưởng và thiết lập tương quan thực nghiệm giữa loại nhựa, độ rỗng dư, nhiệt độ với một số chỉ tiêu cơ học của bê tông nhựa rỗng thoát nước. *Tạp chí Giao thông Vận tải*, 11:42–44.