



## A STUDY ON THE EFFECT OF SLOPE AND POROSITY ON THE DRAINAGE OF POROUS ASPHALT MATERIALS BASED ON RAINFALL SIMULATION TEST IN THE LABORATORY

Van Hiep Huynh<sup>1</sup>, Thi My Dung Huynh<sup>1</sup>, Tan Hung Nguyen<sup>2\*</sup>, Minh Triet Pham<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, School of Engineering and Technology, Tra Vinh University, Tra Vinh, Vietnam

<sup>2</sup>Faculty of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Nam Can Tho University, Can Tho, Vietnam

<sup>3</sup>Company Akselos S.A., Ho Chi Minh city, Vietnam.

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 15/11/2024

Revised: 07/02/2025

Accepted: 10/02/2025

Published online: 15/02/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.2.4>

\*Corresponding author

Email: nguyentanhung@nctu.edu.vn ; Tel: +84866147457

**Abstract.** Porous asphalt material (PAM) has been used widely to increase the water drainage of the roads. The drainage function depends on many factors such as rainfall intensity, slope, and porosity. Hence, this study was adopted to observe the drainage capability of PAM in the considerations of slope and porosity. The rainfall simulation experiments were conducted for the PAM samples with porosity as 10% and 15% at different rainfall intensities. The results showed that the subsurface drainage of the PAM had a reverse trend with the slope and a similar trend with the porosity. In addition, this study also found that at the high rainfall intensity, PAM samples with different slopes and porosities resulted a similar drainage capability. The results from this study help us to overview the drainage behaviour of PAM. It is noted that the results in this study were based on the laboratory experiment. In the future, the field experiment should be conducted to help engineers and researchers to better understand the mechanical and hydrological performance of PAM. Thus, PAM could be used widely and effectively in flooding resistance for urbans.

**Keywords:** porous asphalt material, designed slope, porosity, drainage capability.

@ 2025 University of Transport and Communications



## NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ DỐC VÀ ĐỘ RỘNG ĐẾN KHẢ NĂNG THOÁT NƯỚC CỦA BÊ TÔNG NHỰA RỖNG BẰNG THÍ NGHIỆM MÔ PHÒNG MƯA TRONG PHÒNG

Huỳnh Văn Hiệp<sup>1</sup>, Huỳnh Thị Mỹ Dung<sup>1</sup>, Nguyễn Tấn Hưng<sup>2\*</sup>, Phạm Minh Triết<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bộ môn Xây dựng, Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Trà Vinh, Trà Vinh, Việt Nam

<sup>2</sup>Khoa Kiến trúc - Xây dựng và Môi trường, Trường Đại học Nam Cần Thơ, Cần Thơ, Việt Nam.

<sup>3</sup>Công ty Akselos S.A, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam.

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 15/11/2024

Ngày nhận bài sửa: 07/02/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/02/2025

Ngày xuất bản Online: 15/02/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.2.4>

\* Tác giả liên hệ

Email: nguyentanhung@nctu.edu.vn; Tel: +84866147457

**Tóm tắt.** Bê tông nhựa rỗng (BTNR) đã được sử dụng phổ biến để gia tăng khả năng thoát nước của mặt đường. Sự thoát nước này phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau như lưu lượng mưa, độ dốc thiết kế và độ rộng của vật liệu. Nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu đánh giá khả năng thoát nước BTNR có xét đến ảnh hưởng của độ dốc và độ rộng khác nhau. Thí nghiệm mô phỏng mưa được thực hiện cho mẫu BTNR có độ rộng là 10% và 15% trong điều kiện lưu lượng mưa khác nhau. Kết quả thí nghiệm cho thấy khả năng thoát nước qua thân của mẫu BTNR tỷ lệ nghịch với độ dốc và tỷ lệ thuận với độ rộng. Thêm vào đó, nghiên cứu này còn chỉ ra rằng ở cường độ mưa lớn, mẫu BTNR. Nghiên cứu còn cho thấy rằng, tại điều kiện cường độ mưa lớn, các mẫu BTNR có độ rộng và độ dốc khác nhau cho kết quả tương tự như nhau về khả năng thoát nước. Kết quả trong nghiên cứu này giúp chúng ta hiểu rõ hơn về ứng xử thoát nước của BTNR. Trong tương lai, các thí nghiệm hiện trường cần được triển khai thực hiện để giúp các kỹ sư và các nhà khoa học hiểu rõ hơn về ứng xử cơ học và thoát nước của mẫu BTNR. Từ đó, vật liệu BTNR có thể được ứng dụng rộng rãi và hiệu quả góp phần chống ngập trong đô thị.

**Từ khóa:** bê tông nhựa rỗng, ngập lụt, độ dốc, độ rộng, mô phỏng mưa,

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. GIỚI THIỆU

Quá trình đô thị hóa diễn ra với tốc độ nhanh nhằm đáp ứng nhu cầu thực tiễn phát triển kinh tế - xã hội của Việt Nam. Điều đó đòi hỏi các vùng đô thị lớn cần có cơ sở hạ tầng – giao thông phát triển đồng bộ để đáp ứng yêu cầu cần thiết [1]. Tuy nhiên, ở một số vùng đô thị, hệ thống thoát nước chưa đảm bảo yêu cầu. Mỗi khi có mưa lớn, nhiều khu vực thường xuyên bị ngập nước cục bộ, gây ảnh hưởng nhiều đến đời sống, kinh tế - xã hội của người dân. Trong bối cảnh này, việc tìm kiếm các giải pháp chống ngập kết hợp với phát triển hạ tầng là cần thiết. Đây được xem là quá trình phát triển đô thị bền vững. Một trong những giải pháp đã được sử dụng phổ biến và mang lại hiệu quả cao là tăng cường khả năng thoát nước mặt. Các hạng mục công trình tăng cường khả năng thoát nước mặt của đô thị như: nền đường bê tông nhựa rỗng, vườn thu nước mưa, mái nhà xanh, ô trữ nước sinh học ... [2]. Trong các hạng mục kể trên, bê tông nhựa rỗng (BTNR) là vật liệu được ứng dụng rộng rãi cho lớp mặt của nền đường rỗng hoặc lớp mặt của nền đường truyền thống. Vì có cấu tạo đặc biệt có độ rỗng lớn nên BTNR cho phép nước có thể thấm thấu qua [3]. Từ đó, có thể tăng cường khả năng thoát nước mặt góp phần giảm thiểu ngập lụt trong đô thị. Tại Việt Nam, việc nghiên cứu và áp dụng BTNR vào thực tiễn đang được các nhà khoa học và các chuyên gia đặc biệt quan tâm [4].

BTNR có độ nhám cao đã trở thành một lựa chọn ưu việt trong thi công mặt đường cho các tuyến cao tốc [5]. Đồng thời, khả năng thoát nước hiệu quả của BTNR có thể giải quyết được tình trạng ngập úng, một vấn đề thường xuyên xảy ra và gây hư hỏng mặt đường ở các khu đô thị lớn [6]. Để đánh giá khả năng thoát nước mặt của vật liệu BTNR trong điều kiện mưa, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện.

Trong một nghiên cứu của Roseen và các cộng sự (2012), các tác giả đã thí nghiệm để khảo sát ứng xử thoát nước của BTNR trong điều kiện mưa bão [7]. Nghiên cứu được thực hiện ở vùng New Hampshire của Mỹ trong giai đoạn từ năm 2004 – 2008. Vật liệu BTNR trong nghiên cứu này được sử dụng để làm bãi đỗ xe. Các tác giả thí nghiệm và kết luận rằng khả năng thoát nước mặt của nền đường BTNR có giá trị từ 1.490 đến 2.690 cm/h. Đồng thời, khi sử dụng BTNR, đỉnh nước mặt trong vùng giảm 90%. Điều này chứng tỏ rằng, BTNR đạt hiệu quả cao trong việc giảm ngập lụt trong đô thị khi được ứng dụng thực tiễn. Bên cạnh đó, nghiên cứu còn cho kết quả rằng BTNR có khả năng lọc sạch đáng kể các chất ô nhiễm như photpho, kẽm, chất rắn lơ lửng khoáng 42%. Nghiên cứu còn kết luận rằng, hiệu quả sử dụng BTNR còn có thể kéo dài theo thời gian trong điều kiện thời tiết khắc nghiệt.

Trong một nghiên cứu khác của Knappengerger và các cộng sự (2017), ba loại nền đường BTNR khác nhau đã được sử dụng để thí nghiệm hiệu quả của việc bảo trì bảo dưỡng công trình bằng phương pháp thổi khí và quét. Kết quả thí nghiệm cho thấy vận tốc thoát nước mặt của nền đường BTNR trong giai đoạn (2011 ÷ 2015) từ giảm đáng kể từ 118 ÷ 39 mm/phút cho mẫu BTNR có bảo trì bảo dưỡng, và giảm từ 134 ÷ 54 mm/phút cho mẫu không bảo dưỡng. Ngoài ra, kết quả thí nghiệm còn cho thấy rằng, việc bảo trì bảo dưỡng hằng năm bằng thổi khí và quét mang lại hiệu quả không đáng kể cho BTNR. Nghiên cứu còn kết luận rằng, khả năng thoát nước của nền đường BTNR bị giảm theo thời gian chủ yếu do độ lún dưới tác dụng của tải trọng giao thông [8].

Từ các nghiên cứu trên cho thấy rằng khả năng thoát nước của vật liệu BTNR mang lại nhiều hiệu quả đáng kể trong việc giảm ngập lụt và giảm ô nhiễm nguồn nước trong đô thị. Cho đến nay, các nghiên cứu về khả năng thoát nước mặt của nền đường BTNR có xét đến ảnh hưởng của độ dốc và độ rỗng của vật liệu còn hạn chế. Vì vậy, mục tiêu của nghiên cứu

này được nhóm tác giả thực hiện để đánh giá khả năng thoát nước của BTNR bằng thiết bị thí nghiệm trong phòng. Dựa trên kết quả thí nghiệm, ảnh hưởng của độ dốc thiết kế, độ rỗng và cường độ mưa đến ứng xử thoát nước mặt của nền đường BTNR được thảo luận và so sánh.

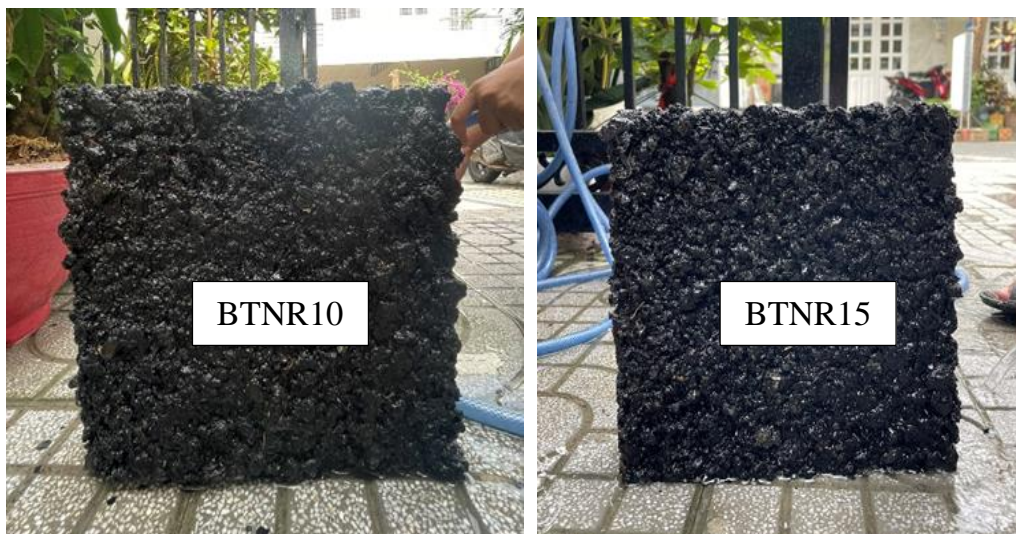
## 2. THÍ NGHIỆM ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG THOÁT NƯỚC MẶT CỦA BTNR

### 2.1 Mẫu vật liệu bê tông nhựa rỗng

Với nghiên cứu này, các thí nghiệm mô phỏng lượng mưa được thực hiện với mẫu BTNR đáp ứng các yêu cầu trong tiêu chuẩn Việt Nam về vật liệu nhựa đường TCVN 13567-2022 [9]. Cốt liệu hỗn hợp có nguồn gốc từ tỉnh An Giang. Các mẫu được chế tạo với độ rỗng lần lượt là 10% và 15%, được đặt tên là BTNR10 và BTNR15. Mẫu được chế tạo có kích thước là 30 x 30 x 5 cm. Hỗn hợp mẫu sử dụng chất kết dính PG60-70 và kích thước cốt liệu danh nghĩa lớn nhất là 19 mm. Thành phần cấp phối mẫu trong nghiên cứu được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hỗn hợp của mẫu BTNR.

Hỗn hợp	Phần trăm theo khối lượng (%)
Phần trăm của Bin1, (19x22)	9,5
Phần trăm của Bin2, (12x19)	21,84
Phần trăm của Bin3, (5x12)	25,84
Phần trăm của Bin4, (0x5)	33,24
Phụ gia INSEE	4,75
Nhựa đường	5,04



Hình 1. BTNR trong nghiên cứu.

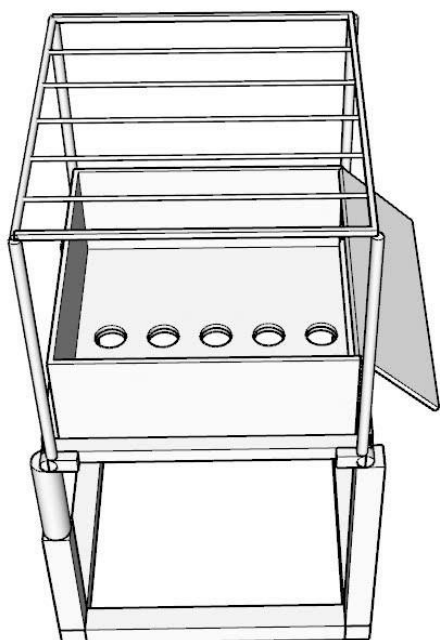
Tính chất cơ học của hỗn hợp BTNR trong nghiên cứu được thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Tính chất cơ lý và cơ học của BTNR trong nghiên cứu.

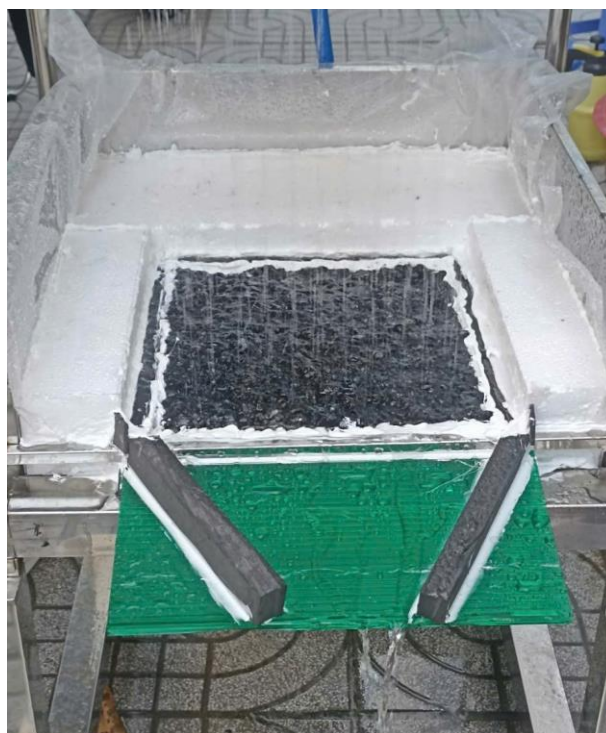
BTNR	Giá trị
Độ ổn định, kN	13,30
Độ dẻo, mm	21,84
Độ rỗng lấp đầy, %	68,16
Khối lượng thể tích, g/cm <sup>3</sup>	2,37

## 2.2 Thiết bị và dụng cụ thí nghiệm

Thiết bị thí nghiệm mô phỏng mưa được thiết kế dựa trên nghiên cứu của Castro-Fresno [10]. Thiết bị bao gồm các thành phần chính: hệ thống phun mưa được nối trực tiếp với nguồn cấp nước với tác dụng mô phỏng mưa lên mẫu, khung chủ yếu để chứa mẫu và hệ thống thu nước thoát ra. Hộp chứa mẫu được làm bằng thép và inox, có diện tích 0,5 x 0,5 m và chiều cao 3,6 m và có thể điều chỉnh góc dốc của mặt đường từ 0 đến 30 độ. Trong suốt quá trình thí nghiệm, lưu lượng nước được ghi nhận liên tục theo thời gian. Mô hình thí nghiệm và mẫu trong quá trình thí nghiệm được trình bày ở Hình 2 và Hình 3.



Hình 2. Mô hình thiết bị thí nghiệm.



Hình 3. Mẫu thí nghiệm BTNR.

### 2.3 Trường hợp thí nghiệm

Các tài liệu đã chỉ ra rằng khả năng thoát nước của BTNR phụ thuộc rất nhiều vào độ dốc và độ rỗng cấu tạo của BTNR. Bài báo này khảo sát lưu lượng thoát nước của mẫu BTNR với độ rỗng 10% và 15% tương ứng với lưu lượng mưa khác nhau. Giá trị lưu lượng mưa này được lựa chọn dựa vào nghiên cứu trước đây của Kenneth và các cộng sự (2016) [11]. Chi tiết về các trường hợp thí nghiệm được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Các trường hợp thử nghiệm.

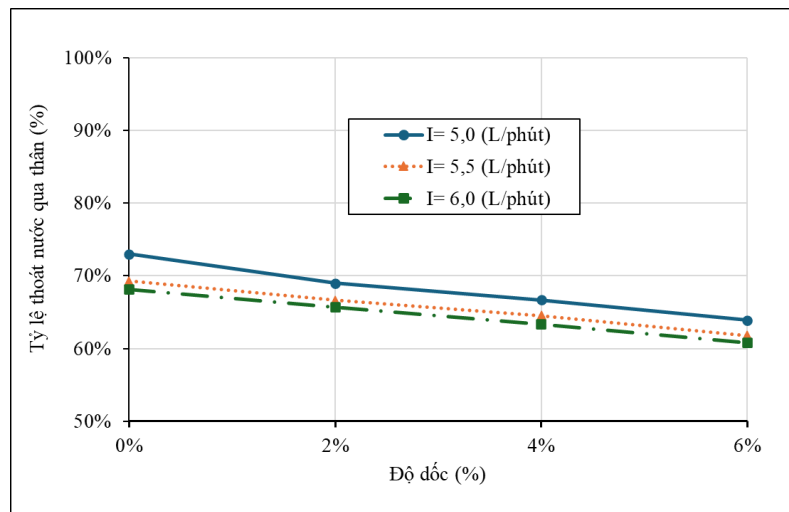
Cường độ mưa (L/phút)	Độ dốc (%)
5,0; 5,5; 6,0	0; 2; 4; 6

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

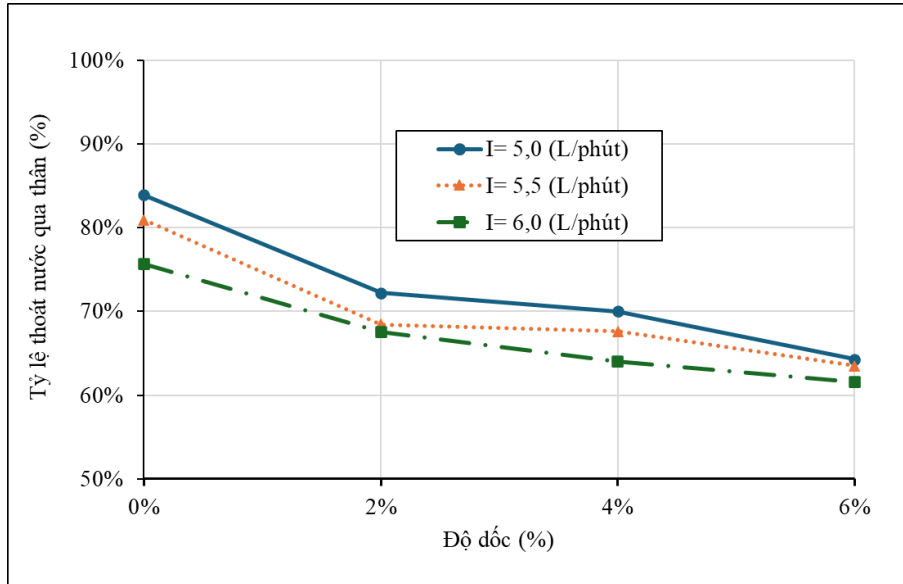
BTNR10 và BTNR15 đã được thử nghiệm bằng thiết bị mô phỏng mưa. Trong suốt quá trình thí nghiệm, thể tích nước chảy tràn trên bề mặt và nước thấm thấu qua thân của mẫu BTNR được ghi nhận. Kết quả ghi nhận giúp hiểu rõ hơn về khả năng thoát nước của từng mẫu. Sau khoảng 2 phút, tốc độ thoát nước trên bề mặt và nước thấm qua mẫu bắt đầu ổn định, cho thấy các mẫu đã đạt đến trạng thái bão hòa. Do đó, thể tích nước thoát ra của BTNR sau 2 phút được chọn làm thời điểm để báo cáo kết quả cuối cùng. Từ kết quả thí nghiệm mô phỏng mưa, nghiên cứu đã đánh giá và thảo luận chi tiết về ảnh hưởng của hai yếu tố quan trọng là độ dốc và độ rỗng đối với khả năng thoát nước của BTNR.

#### 3.1 Ảnh hưởng của độ dốc đến khả năng thoát nước của BTNR

Ảnh hưởng của độ dốc đến khả năng thoát nước qua thân của BTNR được minh họa chi tiết ở Hình 3 và Hình 4. Từ biểu đồ, mối quan hệ giữa độ dốc và tỷ lệ lưu lượng nước thoát qua thân được nhận xét và đánh giá.



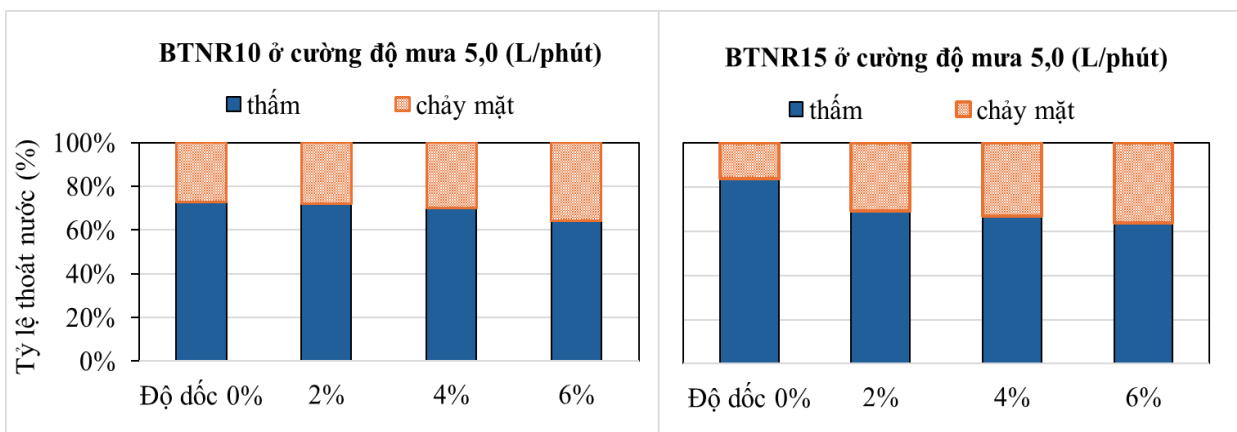
Hình 4. Tỷ lệ lưu lượng nước thoát qua thân của mẫu BTNR10.



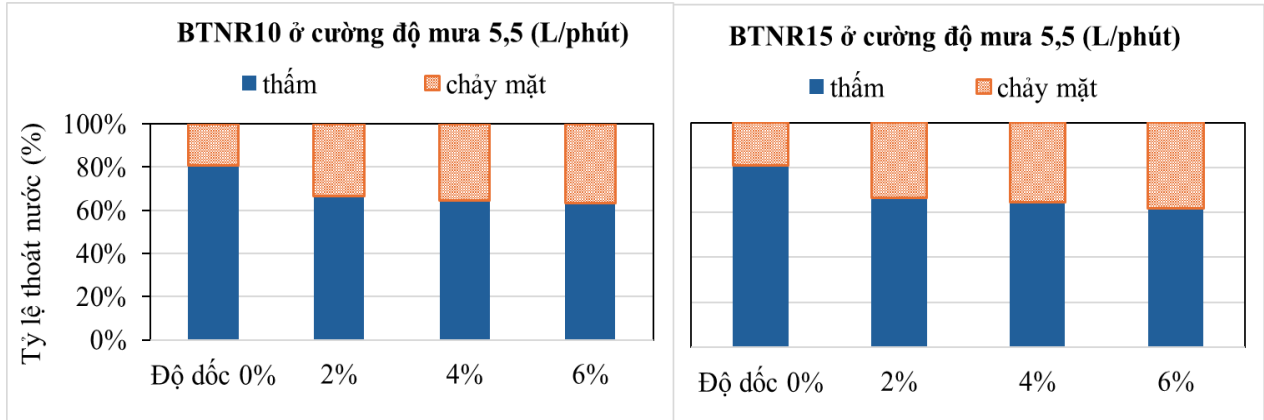
Hình 5. Tỷ lệ lưu lượng nước thoát qua thân của mẫu BTNR15.

Hình 3 và 4 trình bày mối quan hệ giữa độ dốc và tỷ lệ lưu lượng nước thoát qua thân của mẫu BTNR trong điều kiện cường độ mưa khác nhau. Xu hướng của biểu đồ cho thấy rằng khi độ dốc tăng, lượng nước thoát thân giảm, điều này có nghĩa rằng lưu lượng nước chảy tràn trên bề mặt tăng lên. Cụ thể là, mẫu BTNR10, cường độ mưa là 5,5 L/phút, ở độ dốc là 2% thì lưu lượng nước thoát qua thân chiếm 67%. Ở điều kiện tương tự, ở độ dốc là 6% thì lưu lượng nước thoát qua thân chiếm 62%. Sự suy giảm lưu lượng thoát thân này có thể được giải thích rằng ở mẫu BTNR có độ dốc lớn, dưới tác dụng của trọng lực, tốc độ nước chảy mặt nhanh hơn [12]. Vì vậy ở độ dốc lớn, BTNR cho kết quả lưu lượng thoát thân giảm đáng kể. Điều này cho thấy rằng khi thiết kế BTNR cần lựa chọn độ dốc thiết kế phù hợp để nước chảy mặt không xuất hiện gây ngập lụt trong đô thị.

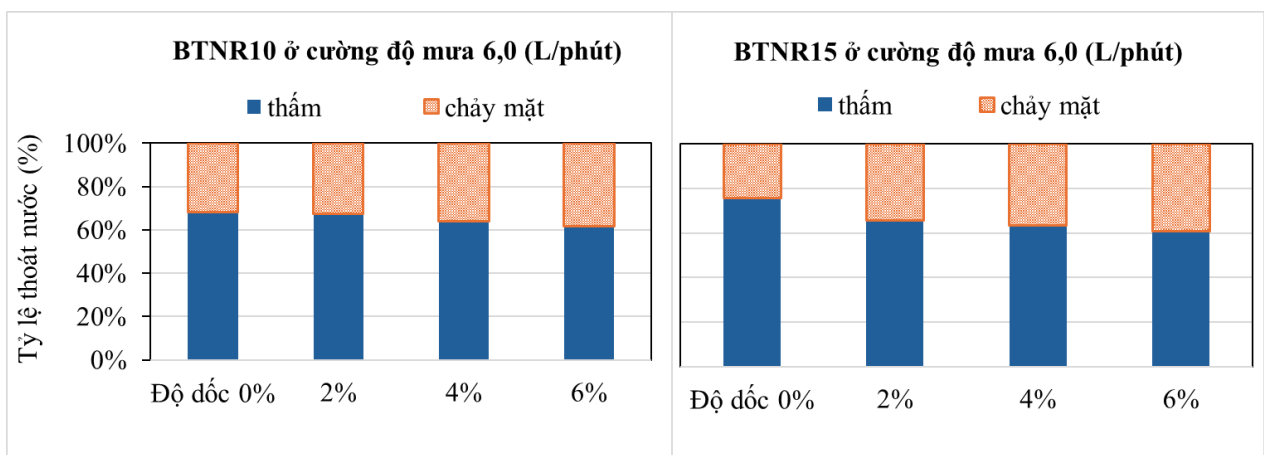
### 3.2 Ảnh hưởng của độ rỗng đến khả năng thoát nước của BTNR



Hình 6. So sánh lưu lượng chảy của BTNR10 và BTNR15 ở cường độ mưa 5,0 L/phút.



Hình 7. So sánh lưu lượng chảy của BTNR10 và BTNR15 ở cường độ mưa 5,5 L/phút.



Hình 8. So sánh lưu lượng chảy của BTNR10 và BTNR15 ở cường độ mưa 6,0 L/phút.

Từ hình 6, 7, 8 ta thấy độ rỗng có ảnh hưởng đáng kể đến sự thoát nước của BTNR. Cụ thể là, mẫu BTNR có độ rỗng lớn hơn cho khả năng thoát nước thân tốt hơn. Ở độ dốc là 4%, lưu lượng mưa 5,0 L/phút, mẫu BTNR10 cho kết quả tỷ lệ lưu lượng thoát thân là 70%. Ở điều kiện tương tự, BTNR15 cho kết quả là 67%. Điều này được giải thích bằng BTNR có độ rỗng lớn hơn thì cho nước thấm thấu qua bề mặt nhanh hơn. Vì vậy, tỷ lệ lưu lượng nước chảy thấm của BTNR có độ rỗng lớn luôn cao hơn BTNR có độ rỗng nhỏ. Tuy nhiên, có thể thấy rằng sự sai khác giữa 2 mẫu là không nhiều khi ở điều kiện lưu lượng mưa lớn như 6,0 L/phút.

Kết quả thí nghiệm cho thấy ảnh hưởng của độ rỗng có ảnh hưởng không đáng kể đến khả năng thoát nước của mẫu BTNR trong điều kiện thí nghiệm như nghiên cứu này. Cụ thể là, trong điều kiện cường độ mưa lớn, kết quả thoát nước của BTNR cho thấy sự tương đồng, bất kể độ rỗng của mẫu. Điều này nhấn mạnh rằng, cường độ mưa là yếu tố quan trọng quyết định khả năng thoát nước của BTNR. Phần thí nghiệm trên phù hợp với các nghiên cứu trước đây của Nguyễn và Ahn (2021) [13] và Huỳnh và các cộng sự (2023) [14], trong đó cũng nhấn mạnh ở điều kiện cường độ mưa lớn, ảnh hưởng của các tính chất vật liệu như độ rỗng trong việc thoát nước là không đáng kể.



#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của độ dốc thiết kế và độ rỗng đến khả năng thoát nước của vật liệu BTNR bằng thí nghiệm mô phỏng mưa trong phòng. Mẫu BTNR có độ rỗng 10% và 15% được bố trí độ dốc là 0%, 2%, 4% và 6% được thí nghiệm trong điều kiện cường độ mưa khác nhau. Trong quá trình thí nghiệm lưu lượng nước thoát thân và chảy tràn được ghi nhận và phân tích. Dựa vào kết quả phân tích, ta rút ra kết luận cụ thể như sau:

Khả năng thoát nước của BTNR phụ thuộc đáng kể vào độ dốc thiết kế. Khi độ dốc tăng, tỷ lệ lưu lượng nước thoát qua thân của mẫu giảm, điều này có nghĩa rằng lưu lượng nước chảy tràn trên bề mặt tăng lên. Tuy nhiên, khi độ dốc tăng lên đáng kể thì tỷ lệ lưu lượng thoát nước qua thân lại không chênh lệch nhiều.

Độ rỗng của mẫu BTNR có ảnh hưởng đáng kể đến sự thoát nước của BTNR. Mẫu BTNR có độ rỗng lớn hơn cho khả năng thoát nước thân tốt hơn bởi vì BTNR có độ rỗng lớn hơn thì cho nước thấm thấu qua bề mặt nhanh hơn. Vì vậy, tỷ lệ lưu lượng nước chảy thấm của BTNR có độ rỗng lớn luôn cao hơn BTNR có độ rỗng nhỏ. Tuy nhiên, có thể thấy rằng sự sai khác giữa 2 mẫu là không nhiều khi ở điều kiện cường độ mưa lớn. Điều này nhấn mạnh rằng, cường độ mưa là yếu tố quan trọng quyết định khả năng thoát nước của BTNR.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Trà Vinh theo hợp đồng số: 15/2024/HĐ.HĐKH&ĐT-ĐHTV.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. C.M. Hà, Hồ đô thị và vai trò điều tiết nước mưa trong hệ thống thoát nước đô thị, Khoa học và Công nghệ, 28 (2017) 141-144.
- [2]. B.J. Eck, Drainage hydraulics of porous pavement: Coupling surface and subsurface flow, in Dissertation, The University of Texas at Austin, 2010.
- [3]. N.H.T. Thanh, T.N. Quang, Nghiên cứu thực nghiệm đặc tính cơ lý và mô phỏng khả năng thoát nước của bê tông nhựa rỗng, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 72 (2021) 1057-1068.
- [4]. N.T.M. Tra, A. Kato, Study and propose the layer coefficient of porous asphalt concrete for asphalt pavement structure design according to AASHTO 93, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 71 (2020) 1039-1046.
- [5]. H. Iwata, T. Watanabe, T. Saito, Study on the performance of porous asphalt pavement in winter road surface conditions, in Proceedings of the XIth PIARC International Winter Road Congress, Sapporo, Japan, 2002.
- [6]. G. Hammes, L.P. Thives, Porous asphalt mixture with improved fatigue resistance and stormwater pollutant reduction in urban road pavement, Water, 15 (2023) 2962.
- [7]. R.M. Roseen T.P. Ballester, J.J. Houle, J.F. Briggs, K.M. Houle, Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate, Journal of Environmental Engineering, 138 (2012) 81-89. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000459](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000459)
- [8]. T. Knappenberger, A.D. Jayakaran, J.D. Stark, C.H. Hinman, Monitoring porous asphalt stormwater infiltration and outflow, Journal of Irrigation Drainage Engineering, 143 (2017) 04017027.
- [9]. Bộ Giao thông Vận Tải, TCVN 13567 : 2022 Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu, Hanoi, Vietnam, 2022.

- [10]. D.Castro-Fresno, V.C. Andrés-Valeri, L.A. Sañudo-Fontaneda, J. Rodriguez-Hernandez, Sustainable drainage practices in Spain, specially focused on pervious pavements, *Water*, 5 (2013) 67-93.
- [11]. K.C. Schiff, L.L. Tiefenthaler, S.M. Bay, D.J.J.W. Greenstein, Effects of rainfall intensity and duration on the first flush from parking lots, *Water*, 8 (2016) 320.
- [12]. Y. Huang, X. Chen, F. Li, J. Zhang, T. Lei, J. Li, P. Chen, X.J.J.o.H. Wang, Velocity of water flow along saturated loess slopes under erosion effects, 561 (2018) 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.070>
- [13]. T.H. Nguyen, J. Ahn, Numerical study on the hydrologic characteristic of permeable friction course pavement, *Water*, 13 (2021) 843.
- [14]. T.M.D.Huynh, V.H. Huynh, M.T. Pham, K.K.A. Toledo, T.H. Nguyen, Numerical Modelling Study of Subsurface Drainage of Permeable Friction Course Considering Road Geometric Designs, *Applied Sciences*, 13 (2023) 12428.