

# HỆ THỐNG KẾT HỢP CỬA THU NƯỚC – BÓ VỈA BẰNG BÊ TÔNG NHỰA RỖNG THẨM NƯỚC NÂNG CAO HIỆU QUẢ THOÁT NƯỚC MẶT ĐƯỜNG ĐÔ THỊ

A PERMEABLE POROUS ASPHALT CURB – INLET SYSTEM FOR IMPROVING URBAN ROAD SURFACE DRAINAGE EFFICIENCY

➔ **Phạm Thị Thảo, Tống Anh Tuấn\*** Trường Đại học Giao thông vận tải - Email: [tatuan@utc.edu.vn](mailto:tatuan@utc.edu.vn)

**Tóm tắt:** Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh làm gia tăng bề mặt không thấm và áp lực cho hệ thống thoát nước mặt, việc nâng cao hiệu quả thu nước mưa mặt đường là yêu cầu cấp thiết. Bài báo nghiên cứu thiết kế bố trí tấm bó vỉa bê tông nhựa rỗng thấm nước kết hợp với tấm đan thu nước nhằm tăng cường khả năng thu và dẫn nước mưa mặt đường đô thị. Trên cơ sở phân tích cơ chế dòng chảy mặt và yếu tố hình học của mặt đường, giải pháp kết hợp bó vỉa bê tông nhựa rỗng thấm nước với tấm đan thu nước được đề xuất. Kết quả phân tích và tính toán thủy lực kết hợp với mô hình số SEEP/W về thấm qua bó vỉa rỗng cho thấy giải pháp đề xuất có tiềm năng nâng cao hiệu quả thu nước, giảm nguy cơ đọng nước cục bộ trên mặt đường và góp phần giảm tải cho hệ thống thoát nước đô thị, đặc biệt trong các trận mưa cường độ lớn.

**Từ khóa:** Thoát nước đô thị; Bê tông nhựa rỗng; Bó vỉa; Đô thị hóa; SEEP/W.

**Abstract:** Rapid urbanization increases impervious surfaces and places growing pressure on urban drainage systems, making improved roadway stormwater collection efficiency essential. This paper investigates the design and arrangement of pervious porous asphalt concrete curb elements combined with stormwater inlet grates to enhance the collection and conveyance of roadway runoff in urban areas. Based on an analysis of surface runoff mechanisms and roadway geometric characteristics, an integrated solution employing porous asphalt concrete curbs and inlet grates is proposed. The results of hydraulic analysis and calculations, combined with SEEP/W numerical modeling of infiltration through the porous curb, indicate that the proposed solution has strong potential to enhance stormwater collection efficiency, reduce the risk of localized surface ponding, and alleviate the load on urban drainage systems, particularly during high-intensity rainfall events.

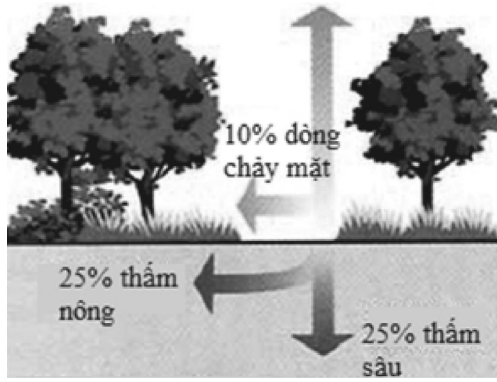
**Keywords:** Urban drainage; Porous asphalt concrete; Curb; Urbanization; SEEP/W.

## 1. GIỚI THIỆU

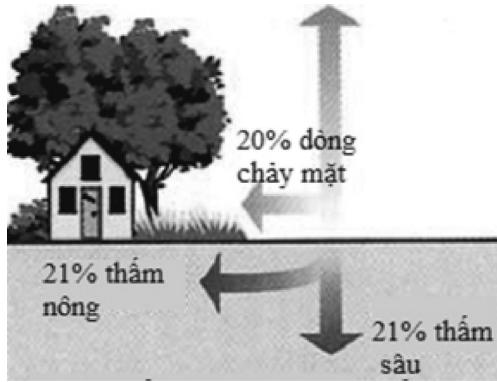
Đô thị hóa làm thay đổi mạnh mẽ đặc tính bề mặt tại các khu vực đô thị, khi các bề mặt thấm nước tự nhiên như đất phủ cây xanh bị thay thế/bị bao phủ bởi các bề mặt không thấm nước (bê tông, asphalt). Hệ quả là khả năng thấm nước suy giảm, trong khi lượng dòng chảy mặt dư thừa tăng nhanh trong thời gian ngắn, đặc biệt trong các trận mưa lớn, dẫn đến nguy cơ ngập úng đô thị ngày càng gia tăng [1]. Đô thị hóa làm gia tăng bề mặt không thấm, dẫn đến giảm mạnh lượng thấm và tăng dòng chảy mặt (Hình 1). Tỷ lệ thấm có thể giảm từ khoảng 50% ở bề mặt tự nhiên xuống còn 42% khi mức độ che phủ đạt 10 ÷ 20%, và chỉ còn khoảng 15% khi che phủ vượt quá 75%. Sự suy giảm này làm gia tăng lưu lượng đỉnh và áp lực cho hệ thống thoát nước đô thị, đòi hỏi các giải pháp kiểm soát dòng chảy tại nguồn [2]. Nước mưa có thể ứ đọng trên mặt đường và nhanh chóng gây ra ngập úng cục bộ. Để kiểm soát lượng nước mưa dư thừa, hệ thống thoát nước và kết cấu mặt đường cần được thiết kế nâng cấp hoặc tối ưu hóa nhằm giảm thiểu hiện tượng này. Tuy nhiên, dưới tác động của đô thị

hóa, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng các hệ thống thoát nước mặt đường hiện hữu thường không đủ khả năng tiếp nhận và vận chuyển dòng chảy lớn, dẫn đến tình trạng vượt quá công suất thiết kế và hoạt động kém hiệu quả [3].

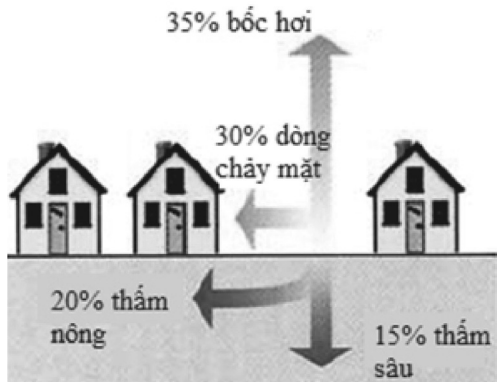
Bê tông thấm nước là vật liệu có cấu trúc rỗng, cho phép nước thấm qua dưới tác dụng của trọng lực. Với đặc tính này, bê tông mở rộng tiềm năng ứng dụng trong kết cấu mặt đường, vượt ra ngoài các công trình xây dựng truyền thống. Hiện nay, các ứng dụng đã được phát triển cho nhiều loại kết cấu áo đường, bao gồm cả bê tông xi măng thấm nước và bê tông nhựa thấm nước. Mặt đường giao thông thường tiếp nhận và giữ lại một lượng đáng kể dòng chảy mặt khi xảy ra mưa. Bê tông thấm nước có khả năng tiêu thoát lượng nước này vào hệ thống thoát nước khác, giúp bề mặt đường khô ráo và hạn chế ảnh hưởng đến giao thông. Trong trường hợp xuất hiện nước đọng, việc thay thế toàn bộ mặt đường nhựa bằng bê tông thấm nước là một giải pháp hiệu quả nhưng tốn kém chi phí. Do đó, phương án chỉ xem xét và ưu tiên áp dụng bê tông thấm nước tại các khu vực cục bộ để bị đọng nước được xem là



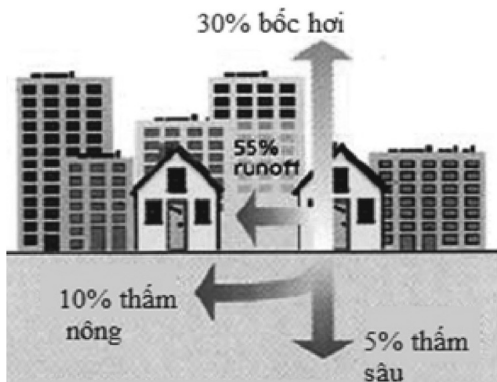
a) Bề mặt tự nhiên



b) Bề mặt tự nhiên bị phủ 10 – 20%



c) Bề mặt tự nhiên bị phủ 35 – 50%



d) Bề mặt tự nhiên bị phủ 75 – 100%

Hình 1. Diện tích bề mặt tự nhiên bị phủ tác động đến thấm và dòng chảy mặt [2]



a) Thu nước mưa kết hợp của thu nước kiểu hàm ếch với tấm đan/ghi thu



b) Thu nước mưa kiểu hàm ếch

Hình 2. Cửa thu nước truyền thống kiểu hàm ếch và hàm ếch kết hợp tấm đan/ghi thu

(nguồn: <https://www.superstock.com/>; <https://www.istockphoto.com/>)

giải pháp khả thi và kinh tế hơn (Hình 2).

Từ thực tiễn đó, nghiên cứu đề xuất ứng dụng bê tông thấm nước cho tấm bó vỉa mặt đường đô thị. Khác với việc thay thế toàn bộ bó vỉa truyền thống dọc tuyến đường, tấm bó vỉa bằng bê tông rỗng thoát nước được xem là phù hợp hơn khi áp dụng cục bộ tại các khu vực thường xuyên ngập nước, nơi cần thoát nước hiệu quả. Cách tiếp cận này cho phép thực hiện những cải tiến nhỏ trong hệ thống đường nhưng vẫn mang lại hiệu quả tối ưu về chi phí cho công tác bảo trì và sửa chữa. Ở góc độ kỹ thuật, độ rỗng của bê tông thấm nước được kiểm soát thông qua việc điều chỉnh hàm lượng xi măng, cốt liệu thô, nước và phụ gia. Khả năng thấm, quá trình di chuyển của nước trong vật liệu phụ thuộc trực tiếp vào các đặc tính của bê tông thấm nước. Các phương pháp thử nghiệm hiện nay chủ yếu đánh giá khả năng thấm theo phương thẳng đứng. Tuy nhiên, trong bối cảnh ứng dụng cho tấm bó vỉa rỗng, nghiên cứu này xem xét hành vi của dòng chảy mưa trên mặt đường. Loại dòng chảy vừa chịu tác động của trọng lực vừa của dòng chảy ngang tập trung về mép bó vỉa, trong đó hình học và độ dốc mặt đường đóng vai trò chi phối [4, 11].

Bài báo phân tích thủy lực dòng chảy mưa qua

cơ chế thấm ngang và thấm đứng của tấm bó vỉa bê tông rỗng thấm nước, trên cơ sở thí nghiệm và mô hình số SEEP/W.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

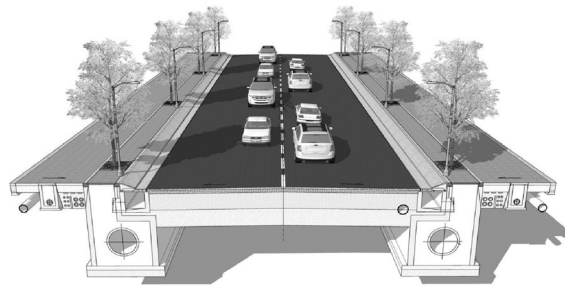
### 2.1. Bê tông nhựa rỗng thoát nước mặt

Phần lớn các nghiên cứu về bê tông nhựa rỗng tập trung vào việc nâng cao cường độ và hiệu quả của bê tông rỗng, đặc biệt về độ thấm và khả năng thân thiện môi trường. Các đặc tính cơ học của bê tông rỗng, bao gồm cường độ chịu nén, khả năng chống mài mòn, độ thấm nước và độ bền; các nghiên cứu cải tiến được ghi nhận khi sử dụng cốt liệu nhỏ hơn, tro bay và phụ gia siêu dẻo [5]. Các nghiên cứu về bê tông rỗng thấm nước sử dụng tro bay cho thấy việc thay thế một phần xi măng bằng tro bay giúp giảm co ngót khô, trong khi các tính chất vật lý khác hầu như không thay đổi so với bê tông xi măng truyền thống [6]. Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ nước/xi măng (W/C) và kích thước cốt liệu đến tính chất của bê tông thấm nước cho thấy cường độ chịu nén tăng khi tỷ lệ W/C tăng, với giá trị tối ưu là 0,3; hỗn hợp cấp phối đạt hiệu quả cao nhất khi sử dụng tỷ lệ 50% cốt liệu nhỏ và 50% cốt liệu lớn [7]. Bê tông thấm nước có khả năng cho phép nước thấm qua với lưu lượng điển hình từ 80 đến 720 l/m<sup>2</sup>/phút. Nhờ đặc tính này, vật liệu được ứng dụng rộng rãi trong mặt đường, bãi đỗ xe, vỉa hè, lối đi, các công trình thủy lợi và nhiều lĩnh vực khác. Về cơ bản, bê tông thấm nước được sử dụng trong kết cấu mặt đường tương tự bê tông thông thường, nhưng không chứa cốt liệu mịn [5, 8]. Bê tông mặt đường thấm nước được xem là một trong những giải pháp hiệu quả nhất để quản lý nước mưa dư thừa sau khi thấm, đồng thời mang lại lợi ích môi trường. Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (EPA) đã công nhận đây là một biện pháp quản lý nước mưa tốt. Tuy nhiên, việc áp dụng cho toàn bộ phạm vi/bề rộng của mặt đường thấm nước đòi hỏi sự cân nhắc và đánh giá thận trọng. Một số yêu cầu này đã được tích hợp vào tiêu chuẩn thiết kế đường, quy trình và phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông, thí nghiệm tiêu chuẩn, đánh giá hiệu quả thấm và phân tích chi phí vòng đời trong các điều kiện khác nhau. Tuy nhiên, sự thiếu hụt chuyên môn trong triển khai công nghệ mới này vẫn là một thách thức đáng kể [9].

### 2.2. Đặc trưng hình học của mặt đường

Mặt đường không chỉ phục vụ giao thông mà còn đóng vai trò như một hệ thống dẫn thoát nước mưa. Một hệ thống thoát nước mặt đường hiệu quả góp phần đảm bảo an toàn và khả năng khai thác. Hiệu quả này đạt được khi các thành phần của kết cấu mặt đường - bao gồm độ dốc dọc, độ dốc

ngang, lề đường, rãnh thoát nước và cửa thu nước mưa được thiết kế hợp lý. Thu nước mặt đường được thực hiện thông qua dốc ngang phần xe chạy, lề đường, hè đường và rãnh biên, dốc dọc. Dốc ngang mặt đường cần được thiết kế phù hợp với mặt cắt ngang nhằm đảm bảo thoát nước nhanh và an toàn giao thông; trong các trường hợp đặc thù như đoạn siêu cao hoặc nút giao, dốc ngang có thể giảm nhưng phải bố trí rãnh và giếng thu hợp lý để tránh đọng nước. Dốc dọc đóng vai trò dẫn nước theo phương tuyến vào hệ thống thu nước, trong đó rãnh biên thường có độ dốc song song với đường và cần đảm bảo độ dốc tối thiểu khoảng 0,3% để duy trì dòng chảy tự nhiên vào giếng thu [10]. Bó vỉa được xây dựng cao hơn so với cao độ mép ngoài phần xe chạy, bố trí dọc theo rãnh thoát nước mặt đường và đóng vai trò như vách ngăn giữa mặt đường và vỉa hè (Hình 3).



Hình 3. Minh họa mặt cắt ngang đường đô thị (<http://www.quan12.hochiminhcity.gov.vn/>)

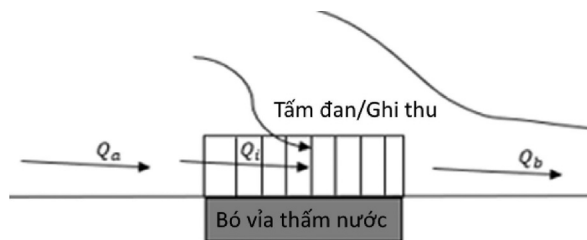
Bó vỉa có thể làm từ nhiều loại vật liệu như nhựa đường, đá hoặc khối xây, nhưng phổ biến nhất là bê tông xi măng Portland. Việc lựa chọn vật liệu phụ thuộc vào loại lát lề đường. Cửa thu nước mặt đường là cấu kiện thủy lực, có chức năng thu gom và dẫn nước mưa vào hệ thống thoát nước ngầm. Các dạng phổ biến bao gồm cửa thu dạng tấm đan (Hình 4a), cửa thu hờ cạnh lề, cửa thu kiểu kết hợp và rãnh có khe hở. Mỗi loại được thiết kế khác nhau về hình dạng, kích thước, diện tích hờ và cấu tạo thanh [11]. Nghiên cứu này tập trung vào cửa thu dạng tấm đan, được bố trí kết hợp với bó vỉa bê tông rỗng thấm nước để tăng cường thoát nước mặt đường.

Cửa thu trong Hình 4a là loại tấm đan đặt trong rãnh dọc, với nắp gồm các thanh/nan có thể bố trí song song hoặc vuông góc với hướng dòng chảy. Hiệu quả thủy lực của từng thiết kế phụ thuộc vào nhiều yếu tố, như lưu lượng và vận tốc dòng chảy qua khe hở, chiều rộng và chiều dài thanh, cũng như hình dạng cấu tạo. Cửa thu dạng tấm đan trên mặt đường được thiết kế để thu gom lượng nước mưa dư thừa từ khu vực lân cận. Lưu lượng trong rãnh

( $Q_a$ ) gồm phần được thu vào cửa thu ( $Q_i$ ) và phần còn lại chảy tiếp về hạ lưu ( $Q_b$ ). Khi cửa thu hoạt động kém hiệu quả, nước tích tụ trên mặt đường có thể gây ngập cục bộ. Để khắc phục, các giải pháp như điều chỉnh độ dốc mặt đường, cải tiến thiết kế cửa thu, hoặc tăng số lượng, kích thước và khoảng cách cửa thu đã được đề xuất [11] (Hình 4b).



a) Tấm đan thu nước đặt kết hợp cửa thu nước kiểu hàm ếch (<https://www.istockphoto.com/>)



b) Dòng chảy qua tấm đan [11]

Hình 4. Cửa thu nước kết hợp và phân tích dòng chảy qua tấm đan

Hai hướng tiếp cận chính được áp dụng: tối ưu hóa cấp phối bê tông thấm nước và phân tích thủy lực. Việc tối ưu hóa tập trung vào lựa chọn cấp phối dựa trên các nghiên cứu trước đây, với cải tiến nhỏ thay vì phát triển cấp phối hoàn toàn mới. Năm loại cấp phối được thử nghiệm phân tích thấm. Căn cứ tốc độ thấm của năm cấp phối bê tông thấm nước nhận từ mô hình thực nghiệm và phân tích thủy lực để lựa chọn cấp phối thấm tối ưu, ứng dụng thiết kế bó vỉa bê tông trong mô hình số.

### 2.3. Lựa chọn hỗn hợp bê tông bó vỉa thấm nước

Các hỗn hợp cấp phối cho bó vỉa bê tông thấm nước được thiết kế sử dụng vật liệu xanh và bền vững, trong đó có cao su tái chế nghiền nhỏ từ lốp xe thải bỏ [8]. Do ứng dụng cao su tái chế trong bê tông thấm nước vẫn còn mới, số lượng nghiên cứu hiện có còn hạn chế nên phạm vi của bài báo chỉ xem xét kết quả của nghiên cứu [12]. Trong tám cấp phối được khảo sát, hai cấp phối được chọn để phân tích thấm bao gồm: cấp phối A sử dụng cao su nghiền mịn và cấp phối B sử dụng cao su nghiền thô. Hỗn hợp cấp phối bao gồm xi măng Portland

loại I, nước, cốt liệu thô, phụ gia siêu dẻo, cao su nghiền mịn và cao su nghiền thô. Trong nghiên cứu này, cốt liệu mịn được lấy từ cát sông và cốt liệu thô là đá granite tự nhiên, với dải kích thước lần lượt từ  $2,36 \div 4,75\text{mm}$  và  $4,75 \div 9,50\text{mm}$ . Dung trọng riêng của cốt liệu mịn và thô lần lượt là 2,65 và 2,56. Cao su tái chế được sử dụng ở hai dạng: hạt mịn (lọt sàng 30 lỗ/inch) và hạt thô ( $1 \div 3\text{mm}$ ). Tuy nhiên, các nghiên cứu trước cho thấy cao su vụn giữ khí và đẩy nước, làm suy giảm liên kết và độ bền của bê tông. Hai hỗn hợp cải tiến bằng cách thay thế cao su vụn bằng cốt liệu mịn, được ký hiệu là hỗn hợp D và E [12] (Bảng 1).

Bảng 1. Cấp phối A, B, C, D và E của bê tông rỗng dùng cho bó vỉa mặt đường

Cấp phối	Cốt liệu thô (kg/m <sup>3</sup> )	Cốt liệu mịn (kg/m <sup>3</sup> )	Phụ gia siêu dẻo (kg/m <sup>3</sup> )	Cao su phế thải mịn (kg/m <sup>3</sup> )	Cao su phế thải thô (kg/m <sup>3</sup> )
A	1503	0	4	10	0
B	1503	0	4	0	10
C	1435	0	0	28	0
D	1503	10	4	0	0
E	1435	28	0	0	0

### 2.4. Phân tích mô hình vật lý và mô phỏng

Mô hình vật lý đo dòng thấm ổn định theo định luật Darcy, trong đó cột áp không đổi. Thí nghiệm đo kết hợp phân tích thủy lực của dòng thấm của nước mưa dọc rãnh biên tiếp giáp bó vỉa qua bó vỉa bê tông [11].

Bó vỉa bê tông thấm nước được đặt tại vị trí biên của mặt cắt ngang. Tốc độ thấm được tính toán từ lưu lượng thấm đo được theo thời gian:

$$\text{Tốc độ thấm} = V/A/t \quad (1)$$

Trong đó V là thể tích nước đo được (l), A là diện tích mặt cắt ngang thấm (m<sup>2</sup>), và t là thời gian thấm hoàn toàn (phút).

Để mô phỏng dòng chảy mưa trên mặt đường và trong rãnh, thí nghiệm thủy lực với dòng chảy liên tục đã được tiến hành. Nguồn dòng chảy được cung cấp bởi bơm, với lưu lượng tối đa 0,03m<sup>3</sup>/s. Hệ thống ba bể tràn (cung cấp, thu gom và chảy qua) được bố trí để đo lưu lượng trong rãnh dọc ( $Q_a$ ), lưu lượng vào cửa thu ( $Q_i$ ) và lưu lượng vượt qua ( $Q_b$ ) [11].

Ba loại cửa thu nước dạng tấm đan được sử dụng gồm loại 1, loại 2 và loại 3. Ở cửa thu loại 1 và 2, các thanh được bố trí theo phương ngang, trong khi cửa loại 3 có các thanh song song với hướng dòng chảy trong rãnh. Tất cả các cửa đều được chế tạo bằng thép và lắp đặt kết hợp với cả bó vỉa bê tông thấm nước và bó vỉa truyền thống. Trong thí nghiệm, các cửa thu được đặt cạnh bó vỉa và nằm

trong phần rãnh dọc.

Trong mỗi thí nghiệm thủy lực, nước chảy trong rãnh dọc đến cửa thu ( $Q_a$ ) được kiểm soát theo công thức của đập tràn chữ nhật:

$$Q_a = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} LH^{3/2} \quad (2)$$

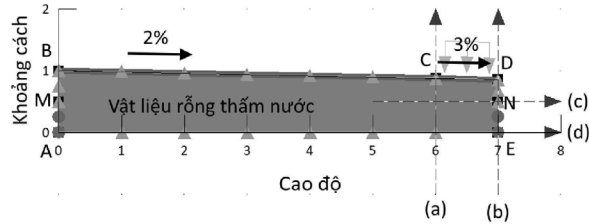
Ở đây,  $C_d$  là hệ số lưu lượng của cửa thu;  $g$  là gia tốc trọng trường ( $m/s^2$ );  $L$  là bề rộng cửa thu (m); và  $H$  là chiều cao cột nước tràn (m). Một phần lưu lượng nước  $Q_i$  đến cửa thu bị giữ lại bởi cửa thu/bó vỉa, phần còn lại chảy qua ( $Q_b$ ). Cả hai được xác định theo công thức đập tràn:

$$Q_i = Q_b = C_d \frac{8}{15} \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} H^{5/2} \quad (3)$$

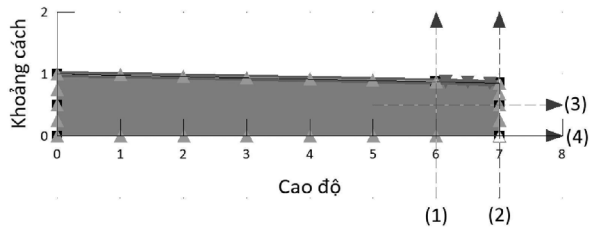
Trong đó:  $C_d$  là hệ số lưu lượng;  $H$  là chiều cao dòng chảy trên đỉnh đập; và  $\theta$  là góc mở của cửa thu ( $90^\circ$ ). Hiệu quả thu nước  $\eta$ , phản ánh khả năng chặn nước của cửa thu/bó vỉa, được xác định theo công thức sau:

$$\eta = \frac{Q_i}{Q_a} * 100 = \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} * 100 \quad (4)$$

Mô phỏng số dòng thấm qua mặt cắt ngang đường dốc một mái, bề rộng mặt đường 7,5m, độ dốc ngang mặt đường là 2%; lề đường/bó vỉa được khai báo ở mép ngoài phần mặt, có độ dốc là 3%; so với cao độ đáy (cạnh AE), cao độ tại mép bên trái là 1m (cạnh AB), trong khi cao độ mép lề đường/bên phải là 0,85m (cạnh DE); vật liệu cấu tạo kết cấu áo đường có hệ số thấm lấy từ thí nghiệm [11]. Các điều kiện biên của mô hình được khai báo tùy thuộc vào bài toán; (i) Ban đầu biên mực nước ngầm nằm ngang và có cao độ là 0,5m (đường nằm ngang MN), biên đáy (cạnh AE) và phần mặt đường (cạnh BC) trừ phần lề (cạnh CD) là các biên không thấm nước ( $Q = 0$ ) (bao gồm cả cạnh BM và DN), trong khi phần lề đường/bó vỉa (cạnh CD) là biên mưa/nơi cho phép dòng thấm đi vào vật liệu rỗng (Hình 5a); (ii) Sau đó, để kiểm soát dòng thấm trong vật liệu rỗng, một ống thoát nước được bố trí tại điểm E cho phép dòng thấm ra khỏi kết cấu áo đường, trong khi tất cả các biên còn lại (các cạnh AE và MBCDN) không cho phép thấm ( $Q = 0$ ) (Hình 5b). Để kiểm soát lưu lượng thấm (phương ngang và đứng) theo thời gian, các mặt cắt (1), (2), (3) và (4) được khai báo, trong đó các mặt cắt (3) và (4) cho phép kiểm soát thấm theo phương đứng, trong khi đó các mặt cắt còn lại (1) và (2) cho phép kiểm soát thấm theo phương ngang. Hơn nữa, hiệu lưu lượng thấm giữa mặt cắt (2) và (1) cho phép kiểm soát được lưu lượng thấm do nước mưa thấm vào kết cấu áo đường (Hình 5b).



a) Ban đầu



b) Thấm không ổn định theo thời gian

Hình 5. Mô hình kết cấu áo đường cấu tạo bằng vật liệu rỗng thấm nước và điều kiện biên

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Tốc độ thấm ngang của các hỗn hợp bê tông cho thấy thời gian thấm tối đa khác nhau giữa các mặt và giữa các loại hỗn hợp, chủ yếu do tỷ lệ vật liệu và độ rỗng khác nhau. Thời gian thấm dao động trong khoảng  $0,14 \div 0,31$  phút, tương ứng với lưu lượng  $971 \div 2246$   $l/m^2/phút$ . Thời gian thấm dài hơn (lâu hơn) đồng nghĩa với lưu lượng thấm nhỏ hơn.

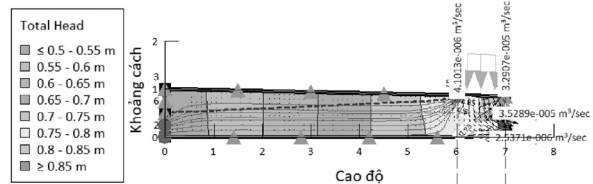
Lưu lượng thấm ngang của hỗn hợp loại D có lưu lượng thấm lớn nhất, tiếp theo là E, B, C và A. Các hỗn hợp E và D thấm tốt hơn do chứa một lượng nhỏ cốt liệu mịn thay cho cao su vụn. Ngược lại có lưu lượng thấm nhỏ hơn, cho thấy cốt liệu mịn cải thiện độ rỗng hiệu quả hơn cao su vụn. So sánh giữa hỗn hợp A và B cho thấy loại B thấm tốt hơn nhờ sử dụng cao su vụn hạt thô, trong khi loại A dùng cao su vụn mịn [12].

Mặc dù có sự khác biệt về cấp phối, hỗn hợp loại C cho thấy tốc độ thấm thấp nhất so với A và B. Nguyên nhân là do hàm lượng hạt thô ít hơn và cao su vụn mịn nhiều hơn, làm giảm độ rỗng. Kết quả cho thấy việc bổ sung vật liệu mịn trong thiết kế cấp phối có ảnh hưởng rõ rệt đến tốc độ thấm, trong đó vật liệu hạt thô hiệu quả hơn cao su vụn mịn trong việc tăng thấm ngang. Do đó, sự hiện diện của cao su vụn mịn làm giảm độ rỗng và lưu lượng thấm. Hỗn hợp loại D được ưu tiên và được lựa chọn để chế tạo mẫu bó vỉa bê tông thấm kích thước thực cho các thí nghiệm thủy lực tiếp theo.

Hiệu quả thủy lực, được xác định theo công thức (4). Kết quả phân tích cho thấy hiệu quả thu nước giảm khi lưu lượng đến tăng. Khi lưu lượng lớn, lực quán tính của dòng chảy quá mạnh khiến

nước chảy vượt qua cửa thu về phía hạ lưu mà không bị thu giữ lại. Trong điều kiện này, quan sát thấy hiện tượng bắn tóe khi nước va vào thanh ghi và một phần dòng chảy vượt qua cửa thu. Hiệu suất thu nước của cửa thu dạng tấm đan không có bó vỉa bê tông thấm nước trước tiên được phân tích. Với lưu lượng đến  $0,029\text{m}^3/\text{s}$ , ghi thu nước dạng 1 thu được 51% tổng lưu lượng, cao nhất trong ba loại, tiếp theo là ghi thu nước dạng 3 (45%) và ghi thu nước dạng 2 (44%). Kết quả này cho thấy ghi thu nước dạng 1 hiệu quả nhất. Hiệu quả thu nước của các ghi thu dạng 2 và 3 thấp hơn chủ yếu do chiều dài ngắn hơn, làm hạn chế khả năng thu nước dọc rãnh. Trong đó, ghi thu nước dạng 3 với thanh được bố trí dọc hoạt động tốt hơn ghi thu nước dạng 2 với thanh ngang, do giảm hiện tượng bắn nước khi dòng chảy va vào thanh ghi. Tuy vậy, cả hai loại có hiệu suất gần tương đương nhau; ghi thu dạng 3 có ưu thế hơn so với dạng 2 nhờ diện tích mở lớn hơn.

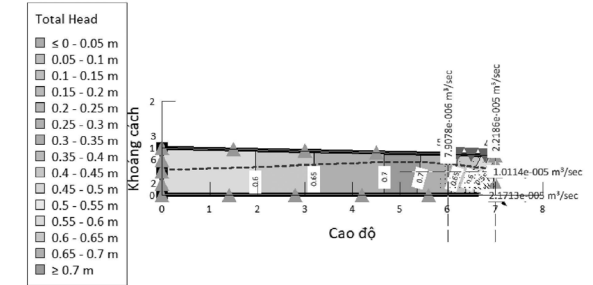
Khi bó vỉa hoạt động độc lập, hiệu quả thu nước rất thấp ( $11 \div 27\%$ ). Tuy nhiên, khi kết hợp với cửa thu dạng ghi, hiệu quả thu nước được cải thiện rõ rệt, vượt cả trường hợp cửa thu hoạt động riêng lẻ. Với lưu lượng đến  $0,015\text{m}^3/\text{s}$ , ghi thu nước dạng 1 đạt kết hợp với bó vỉa đạt hiệu quả thu nước 88%, so với 68% khi ghi thu dạng 1 này hoạt động độc lập. Như vậy, việc kết hợp của thu nước với bó vỉa bê tông thấm nước cho thấy tiềm năng đáng kể trong việc nâng cao hiệu quả kiểm soát và giảm thiểu ngập cục bộ đô thị.



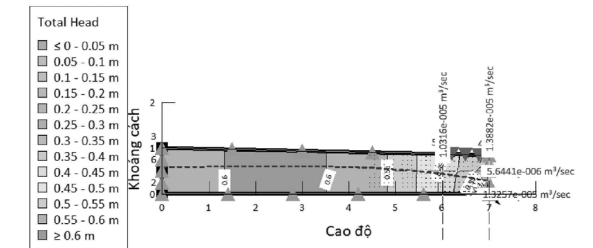
Hình 6. Trường vận tốc, cột áp, đường bão hòa, lưu lượng thấm ngang/đứng (ban đầu)

Kết quả nhận được từ mô hình số (Hình 6) cho thấy, ban đầu khi có mưa, dòng thấm thâm nhập vào khu vực bó vỉa/lề đường làm dâng mực nước ngầm so với trước khi có mưa; trường vận tốc cho thấy khu vực thấm tập trung chủ yếu ở khu vực lề đường. Kết quả kiểm soát lưu lượng thấm tại các mặt cắt (a) và (b) cho thấy, lưu lượng của mặt cắt (b) là  $3,29 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$  trong khi của mặt cắt (a) là  $4,01 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ . Điều này cho thấy, dòng thấm ngang xu hướng di chuyển ra bên ngoài lề đường với lưu lượng  $2,889 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ . Lưu lượng của mặt cắt (c) là  $3,53 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$  trong khi giá trị tại mặt cắt (d) là  $2,54 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ , điều này cho thấy một phần thấm đã di chuyển vào làm dâng mực nước ngầm khu vực bên trong kết cấu áo đường (Hình 6).

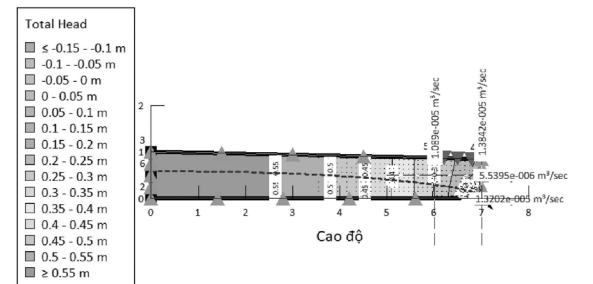
Kết quả nhận được từ mô phỏng dòng thấm không ổn định trên Hình 7 theo thời gian ở các mốc thời gian  $t = 12$  phút (Hình 7a),  $t = 1\text{h}$  (Hình 7b) và  $t = 2\text{h}$  (Hình 7c) cho thấy mực nước ngầm giảm dần. Điều này cho thấy, khi biên mưa CD không cho phép nước mưa thâm nhập vào, dòng thấm không ổn định bên trong vật liệu rỗng là do sự thay đổi độ dốc thủy lực theo thời gian. Trường giá trị cột nước tại các vị trí theo phương ngang tính từ tim đường (cạnh AB) ra đến lề đường (cạnh DE) phù hợp với đường bão hòa (áp suất dư = 0) của dòng thấm. Kết quả chênh lệch giá trị lưu lượng nhận được tại các mặt cắt (2) và (1), cũng như tại các mặt cắt (4) và (3) trên các Hình 7a, b, c đều cho thấy, dòng thấm tăng theo cả phương ngang và đứng và xu hướng tập trung tại điểm ra tại E.



a)  $t = 12$  phút



b)  $t = 1\text{h}$



c)  $t = 2\text{h}$

Hình 7. Trường vận tốc, cột áp, đường bão hòa, lưu lượng thấm ngang/đứng (ban đầu)

Phân tích thủy lực dòng thấm ngang trong bó vỉa bê tông rỗng đã được giới thiệu. Kế thừa cấp phối và kết hợp phân tích thủy lực để lựa chọn cấp phối thấm nước hiệu quả. Thiết kế mô hình thoát nước trong PTN, cấp phối tối ưu để xuất lựa chọn thiết kế bó vỉa thấm nước, bố trí hệ thống để quan

sát, đo đạc và phân tích, đánh giá hiệu quả thu nước. Kết hợp mô phỏng số để kiểm chứng mô hình. Bỏ vỉa thấm nước tăng hiệu quả thu nước, đặc biệt khi kết hợp cửa thu hiện hữu, xem xét phù hợp với một số khu vực ngập cục bộ.

### LỜI CẢM ƠN

**Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2025-CT-037.**

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kamarul Zaman, A. B., Z. Mustaffa, and L. D. L. Anak Giri (2019), Infiltration rate of pervious concrete on street curb application, *Int. J. Recent Technol. Eng.* 8 (2S2): 86–90. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1016.0782S219>.
- [2] Nguyễn Thị Hồng (2014), Xây dựng những mảng xanh nhân tạo để đảm bảo thoát nước mặt bền vững, *Tạp chí Kiến trúc*, số 232, 58–61.
- [3] Gómez, M., and B. Russo (2010), Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets, *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manage.* 164 (2): 81–90. <https://doi.org/10.1680/wama.900070>.
- [4] Zhang, W., H. Li, Y. Zhang, (2018) Effect of porosity on frost resistance of Portland cement pervious concrete, *Adv. Concr. Constr.* 6 (4): 363–373. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.4.363>.
- [5] Yang, J., G. Jiang (2003), Experimental study on properties of

pervious concrete pavement materials, *Cem. Concr. Res.* 33 (3): 381–386. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3).

- [6] Aoki, Y., R. Sri Ravindrarajah, H. Khabbaz (2012), Properties of pervious concrete containing fly ash, *Road Mater. Pavement Des.* 13 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.651834>.
- [7] Joshi, T., and U. Dave (2016), Evaluation of strength, permeability and void ratio of Pervious concrete with changing W/C ratio and aggregate size, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 7 (4): 276–284.
- [8] Mohammed, B. S., V. C. Khed, M. F. Nuruddin (2018), Rubbercrete mixture optimization using response surface methodology, *J. Cleaner Prod.* 171 (Jan): 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.102>.
- [9] Harvey, J., D. R. Smith (2018), Permeable pavement road map workshop and proposed road map for permeable pavement, Davis, CA: National Center for Sustainable Transportation.
- [10] Tiêu chuẩn quốc gia, TCVN 13592:2022 (2022), Đường đô thị – Yêu cầu thiết kế.
- [11] Brown, S. A., J. D. Schall, J. L. Morris, C. L. Doherty, S. M. Stein, and J. C. Warner (2013), *Urban drainage design manual: Hydraulic engineering circular no. 22*. 3rd ed. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- [12] Liu, H., G. Luo, Y. Gong, H. Wei (2018), Mechanical properties, permeability, and freeze–thaw resistance of pervious concrete modified by waste crumb rubbers, *Appl. Sci.* 8 (10): 1843. <https://doi.org/10.3390/app8101843>.

## KHẢO SÁT SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA MÔ HÌNH NỀN KHI TÍNH TOÁN TÍNH TOÁN ĐƯỜNG HẦM LẤP GHÉP...

Tiếp theo trang 38

trong các trường hợp đều thu được tại phase khi thi công lớp vỉa chèn khe (khi chất tải áp lực phun vỉa) và nhỏ hơn khi vào giai đoạn khai thác.

### 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày và phân tích một số thí dụ tính toán kết cấu công trình ngầm dạng lạp ghép thi công bằng công nghệ TBM trên đoạn tuyến Nhổn – Ga Hà Nội. Thông qua việc so sánh hai mô hình nền khác nhau là Hardening Soil (HS) và Mohr-Coulomb (MC), kết quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt về giá trị nội lực cực đại trong kết cấu vỏ hầm. Cụ thể, mô hình MC thường cho kết quả nội lực lớn hơn đáng kể so với mô hình HS, đặc biệt đối với mô men (dao động trung bình từ 38% đến 48%) và lực cắt (dao động trung bình từ 35% đến 43%), trong khi ảnh hưởng đến lực dọc là tương đối nhỏ (chỉ khoảng 8% đến 10%).

Ngoài ra, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng nội lực lớn nhất thường xuất hiện tại giai đoạn thi công lớp vỉa chèn khe, khi áp lực phun vỉa được chất tải, và có xu hướng giảm đáng kể trong giai đoạn khai thác. Điều này cho thấy quá trình thi công có ảnh hưởng trực tiếp và mạnh mẽ đến trạng thái ứng xử của kết cấu vỏ hầm, trong khi giai đoạn vận hành

lâu dài lại ít gây ra biến động lớn.

Từ các kết quả trên, có thể khẳng định rằng việc lựa chọn mô hình nền trong quá trình tính toán có tác động đáng kể đến giá trị nội lực xuất hiện trong kết cấu hầm lạp ghép. Do đó, việc sử dụng mô hình nền phù hợp không chỉ giúp nâng cao độ chính xác của kết quả tính toán mà còn góp phần đảm bảo an toàn, tối ưu hóa thiết kế và giảm thiểu rủi ro trong thi công. Đây là vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu chuyên sâu hơn, đặc biệt trong bối cảnh các công trình ngầm đô thị ngày càng phát triển và yêu cầu cao về độ tin cậy trong thiết kế. □

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hồ sơ Thiết kế sơ bộ tuyến Metro số 03, Ban quản lý Đường sắt đô thị Hà Nội, <https://mrb.hanoi.gov.vn/>
- [2] ITA-Working Group 2 (2019), Guidelines for the Design of segmental tunnel linings.
- [3] Teodor Iftimie (1996), Contributions to the concept and structural analysis of precast circular linings for shield driven tunnels, Technical university of civil engineering Bucharest, Rumania.
- [4] Sotirios Vardakos (2003), Distinct element modeling of Shimizu tunnel No.3 in Japan, Virginia Polytechnic Institute, the USA.
- [5] H. Mashimo (2003), Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel, Railway technical research Institute, Tokyo, Japan.
- [6] Brinkgreve R.B.J. and Broere W. (2006), Plaxis manual version 8, Delft University of technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- [7] Janssen, P., 1983. Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings, Load carrying behavior of segmented tunnel linings, (Ph.D. thesis). Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, (in German).
- [8] Xiaomin You (2007), An analytical solution of shield tunnel based