Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 115–124

ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ DẪN THỦY LỰC BÃO HÒA CỦA NỀN ĐƯỜNG ĐẾN KHẢ NĂNG GIẢM NGẬP ÚNG ĐÔ THỊ SỬ DỤNG MẶT ĐƯỜNG THẤM

Thái Hồng Nam[a], Nguyễn Văn Bích[a], Phạm Văn Nam[a,*]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 26/8/2026, Sửa xong 13/10/2026, Chấp nhận đăng 26/10/2026

Tóm tắt

Hệ thống mặt đường thấm (Permeable Pavement System – PPS) được xem là một giải pháp hiệu quả trong việc giảm ngập úng đô thị. Độ dẫn thủy lực bão hòa (K_s) của nền đường là một trong những thông số quan trọng quyết định thiết kế phù hợp của PPS. Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của K_s của nền đường đến khả năng giảm ngập úng, cụ thể là khả năng cắt giảm đỉnh dòng chảy bề mặt, trong cùng một điều kiện giả định về biểu đồ mưa. Cấu trúc PPS trong nghiên cứu này gồm lớp mặt bê tông rỗng dày 10 cm, lớp móng trên và lớp móng dưới sử dụng cốt liệu bê tông tái chế, có tổng chiều dày 30 cm. Trong nghiên cứu này, nền đường được đầm nén với các mức công đầm nén (E_c) khác nhau, bao gồm E_c = 100%, 60% và 30% so với E_c tiêu chuẩn. Với mỗi mức đầm nén, K_s tại độ ẩm tự nhiên được sử dụng làm đầu vào để đánh giá hiệu suất giảm ngập úng bằng mô hình PWRI (Public Works Research Institute, Nhật Bản). Kết quả cho thấy K_s không chỉ bị ảnh hưởng mạnh bởi độ ẩm ban đầu mà còn phụ thuộc vào E_c. Ở độ ẩm tự nhiên (~30%), khi E_c giảm bằng 100%, 60% và 30% E_c tiêu chuẩn, K_s tăng đáng kể, tương ứng đạt $2{,}1 \times 10^{-6}$; $2{,}3 \times 10^{-5}$; và $1{,}8 \times 10^{-4}$ cm/s. Hiệu suất giảm ngập úng rất nhạy với K_s của nền đường. Trong điều kiện mưa với tổng lượng mưa 24 giờ là 302 mm và cường độ mưa cực đại 215 mm/h, PPS có thể giảm tương ứng 10,0%; 10,5%; và 57,4% đỉnh dòng chảy bề mặt.

Từ khoá: cốt liệu bê tông tái chế; độ dẫn thủy lực bão hòa; ngập úng đô thị; hệ thống mặt đường thấm.

EFFECT OF SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SOIL SUBGRADE ON URBAN FLOOD MITIGATION PERFORMANCE USING PERMEABLE PAVEMENT SYSTEMS

Abstract

Permeable pavement systems (PPS) are considered an effective solution for mitigating urban flooding. The saturated hydraulic conductivity (K_s) of the subgrade is one of the key parameters governing the appropriate design of PPS. This study evaluates the influence of subgrade K_s on flood mitigation performance, specifically in terms of surface runoff peak reduction, under identical design hyetograph conditions. The PPS structure consists of a surface layer (10 cm in total), an upper base, and a lower base (30 cm) constructed using recycled concrete. First, the subgrade was compacted under different compaction energy (E_c), namely 100%, 60%, and 30% of the standard E_c. For each compaction condition, K_s at natural water content was used as an input parameter to assess flood mitigation performance using the PWRI model (Public Works Research Institute, Japan). The results indicate that K_s is strongly influenced not only by the initial moisture condition but also by E_c. At a natural water content of approximately 30%, as E_c decreased (100%, 60%, and 30% of the standard value), K_s increased significantly to 2.1×10^{-6}, 2.3×10^{-5}, and 1.8×10^{-4} cm/s, respectively. The flood mitigation performance is highly sensitive to the subgrade K_s. Under a rainfall event with a 24-hour cumulative precipitation of 302 mm and a peak intensity of 215 mm/h, the PPS reduced the surface runoff peak by 10.0%, 10.5%, and 57.4%, respectively.

Keywords: recycled concrete aggregates; saturated hydraulic conductivity; urban flooding; permeable pavement system.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-09 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, tình trạng ngập úng đô thị tại các thành phố lớn ở Việt Nam ngày càng trở nên nghiêm trọng, đặc biệt trong mùa mưa. Quá trình đô thị hóa nhanh, sự gia tăng bề mặt không thấm nước, cùng với áp lực lên hệ thống thoát nước hiện có khiến nhiều khu vực nội thành

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* nampv3@huce.edu.vn (Nam, P. V.)

thường xuyên xuất hiện ngập úng cục bộ. Ví dụ, thành phố Hà Nội, theo báo cáo [1] khi lượng mưa đạt 50–70 mm/h, Hà Nội dự báo còn tồn tại 11 điểm úng ngập; với mưa 70–100 mm/h, số điểm úng ngập cục bộ tăng lên 71 điểm trên địa bàn 30 xã, phường. Đặc biệt, trong trường hợp mưa rất lớn, trên 100 mm/h kéo dài nhiều giờ, thành phố dự báo có thể xuất hiện tới 220 điểm úng ngập cục bộ trên địa bàn 54 xã, phường. Điều này cho thấy hệ thống thoát nước đô thị Hà Nội vẫn chịu áp lực lớn đặc biệt khi gặp các trận mưa cực đoan.

Trên thế giới, các nước phát triển như Mỹ, Úc, Canada, Nhật Bản đã ban hành các tiêu chuẩn, sách hướng dẫn về việc thiết kế và thi công mặt đường thấm (ví dụ [2–4]) và coi hệ thống này là một giải pháp thoát nước bền vững. So với các giải pháp thoát nước bền vững khác chẳng hạn như hồ, ao điều hòa; kênh sinh thái, rãnh (mương) thấm,... thì giá thành xây dựng hệ thống mặt đường thấm (PPS) cũng có xu hướng thấp hơn [5]. Các nghiên cứu ở các nước phát triển chỉ ra rằng PPS có thể giảm từ 10% đến hơn 90%, phổ biến ở mức trên 50% đỉnh dòng chảy bề mặt ngập lụt cục bộ đô thị tùy thuộc vào điều kiện địa chất tự nhiên và thiết kế của PPS [6].

Ở Việt Nam, hướng dẫn kỹ thuật về mô hình thành phố bọt biển định hướng PPS như một giải pháp thoát nước đô thị bền vững [7]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về PPS ở Việt Nam chủ yếu vẫn dừng lại ở mức nghiên cứu trong phòng thí nghiệm, tập trung chủ yếu vào ứng xử cơ học [8, 9]. Có một số các nghiên cứu đánh giá về hiệu suất thủy lực, thủy văn [10] của PPS trong việc giảm ngập úng đô thị tuy nhiên vẫn còn hạn chế. PPS cho phép nước mưa thấm qua các lớp kết cấu áo đường; lưu trữ tạm thời ở lớp mặt, lớp móng và sau đó thấm xuống nền đường. Vì vậy, độ dẫn thủy lực bão hòa của nền đường (K_s) có thể ảnh hưởng tới hiệu suất giảm ngập úng (ví dụ giảm đỉnh dòng chảy bề mặt), đặc biệt trong các thiết kế mà việc sử dụng hệ thống thoát nước ngầm gặp nhiều khó khăn. Mô hình PWRI (Public Works Research Institute, Nhật Bản) được phát triển bởi nhóm nghiên cứu công nghệ đường bộ thuộc viện nghiên cứu công Nhật Bản được hiệp hội đường bộ Nhật Bản sử dụng để đánh giá nhanh hiệu suất giảm đỉnh dòng chảy bề mặt. Đây là một mô hình có thể chạy trên nền Excel do đó đơn giản và thân thiện với người dùng. Nhằm mục đích đánh giá nhanh việc lựa chọn và sử dụng loại PPS phù hợp khi có sẵn K_s, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng đất tự nhiên được đầm nén với các công đầm nén (E_c) khác nhau và vật liệu bê tông tái chế làm lớp móng đường của PPS; sau đó kết hợp với mô hình PWRI với mục tiêu chính đánh giá ảnh hưởng của K_s đến hiệu suất giảm đỉnh dòng chảy lũ và kiến nghị hệ số K_s tối thiểu dùng trong PPS.

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm/mô phỏng

2.1. Vật liệu

Trong nghiên cứu này, vật liệu nền đường là đất tự nhiên được sàng dưới sàng đường kính 2 mm. Vật liệu móng đường được làm từ bê tông tái chế. Bê tông tái chế được nghiền và sàng dưới cỡ sàng với đường kính danh định 37,5 mm. Lớp mặt là bê tông rỗng được thiết kế với độ rỗng 20% theo đề xuất của Ngô và cs. [8]. Do mục tiêu trong nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của K_s đến hiệu suất giảm đỉnh dòng chảy lũ của PPS đề xuất, nên các thông số cơ học của vật liệu không được trình bày trong nghiên cứu này.

2.2. Phương pháp thí nghiệm xác định các thông số đầu vào của kết cấu áo đường

Các thông số đầu vào cần thiết bao gồm K_s của vật liệu nền đường, độ rỗng tổng (Φ_T) của các lớp kết cấu áo đường, và tỷ lệ giữ nước ban đầu (θ_1). Dưới đây trình bày cách xác định các thông số này.

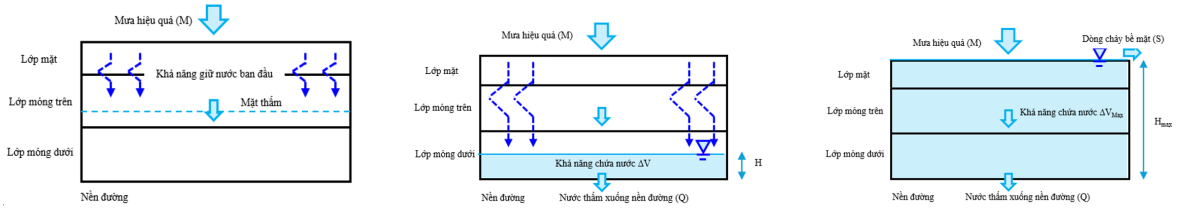
Đất tự nhiên đã sàng qua sàng 2 mm được chuẩn bị thành 5 mẫu tại các độ ẩm khác nhau từ khô cho tới gần đường cong bão hòa. Sau đó các mẫu được đầm nén sử dụng cối đầm nén tiêu chuẩn (Đường kính trong 10 cm, chiều cao 12 cm) theo TCVN 12790:2020 [11] với các E_c khác nhau bao gồm E_c = 592, 355 và 178 kN.m/m^3 (tương đương E_c = 100, 60 và 30% công đầm nén tiêu chuẩn).

Các mẫu tương ứng, sau đó, được sử dụng để đo K_s theo phương pháp cột nước giảm dần [12]. Việc đầm nén với nhiều E_c khác nhau nhằm xác định K_s trong điều kiện thực tế công lu lèn khác nhau.

Vật liệu móng đường là bê tông tái chế được nghiền và sàng dưới cỡ sàng với đường kính danh định 37,5 mm. Sau đó, vật liệu được đầm nén sử dụng cối đầm nén cải tiến (Đường kính trong 12 cm, chiều cao 12 cm) theo TCVN 12790:2020 [11] với công đầm nén cải tiến (E_c = 2700 kN.m/m^3). Sau đó, mẫu sẽ được ngâm bão hòa hoàn toàn trong nước để xác định Φ_T. Mẫu này sau đó cũng được để thoát nước tự nhiên trong điều kiện nhiệt độ 20 °C cho tới khi đạt trạng thái cân bằng nhằm xác định tỷ lệ giữ nước ban đầu θ_1.

2.3. Phương pháp mô phỏng xác định đỉnh dòng chảy bề mặt

Tổng quan quá trình tạo ra dòng chảy bề mặt trong mô hình PWRI như sau: Mưa tự nhiên (được thể hiện dưới dạng cường độ mưa hữu hiệu, M) rơi xuống bề mặt của PPS và bắt đầu ngấm xuống các lớp kết cấu áo đường (Hình 1(a)).



(a) Bước 1 (b) Bước 2 (c) Bước 3

Hình 1. Các bước mô tả quá trình tạo ra dòng chảy bề mặt trong mô hình sử dụng trong nghiên cứu này

Sau đó, nước mưa tiếp tục ngấm xuống sâu hơn nữa trong các lớp kết cấu áo đường cho tới khi gặp lớp nền đường. Lúc này, tùy thuộc vào K_s của nền đường mà tốc thấm xuống dưới nền đường khác nhau, kéo theo mực nước dâng lên (H), xem Hình 1(b), trong kết cấu áo đường cũng khác nhau. Khi nước trong kết cấu áo đường dâng lên đạt cao độ tối đa ($H_{\max}$), xem Hình 1(c), nước mưa không thể chứa thêm trong các lớp kết cấu áo đường và xuất hiện dòng chảy bề mặt (S). Phần tiếp theo trình bày cách xác định cường độ mưa hữu hiệu (M) và chi tiết mô tả chi tiết quá trình xảy ra trong Hình 1.

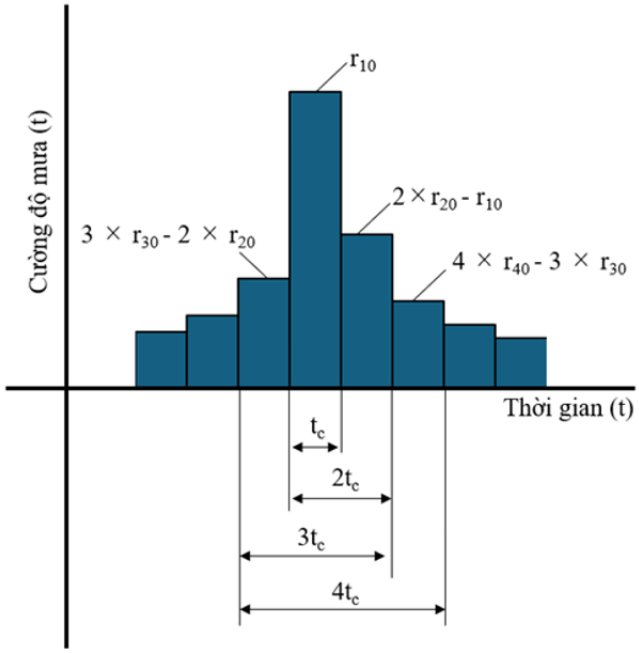
a. Cường độ mưa thiết kế

Trong nghiên cứu này đường cong cường độ mưa – thời đoạn – tần suất (Intensity - duration - frequency, IDF) được xác định từ dữ liệu khí tượng, thông thường, đường cong này được biểu diễn bằng công thức sau:

$$R_t = \frac{a}{t^n + b} \tag{1}$$

trong đó R_t (mm/h) là cường độ mưa trung bình lớn nhất tại thời đoạn mưa t (phút); a, n, b là hằng số. Giá trị n thường được lấy bằng 0,7 [2], trong khi đó a, b thường được xác định từ dữ liệu khí tượng. Trong nghiên cứu này, dữ liệu mưa thiết kế được lấy từ nghiên cứu xây dựng đường cong IDF cho trạm khí tượng Hà Đông, Hà Nội, dựa trên chuỗi quan trắc mưa giai đoạn từ 1973 đến 2023 [13]. Sử dụng dữ liệu tại thời đoạn 1440 phút và 60 phút, tương ứng với giá trị là r_{1440} và r_{60} bằng 12,6 mm/h và 94,3 mm/h [13] của chu kỳ lặp lại 10 năm, thay vào công thức (1) ta thu được giá trị a = 2108 và b = 4,8. Do đó, cường độ mưa thiết kế dùng trong nghiên cứu này được xác định bởi:

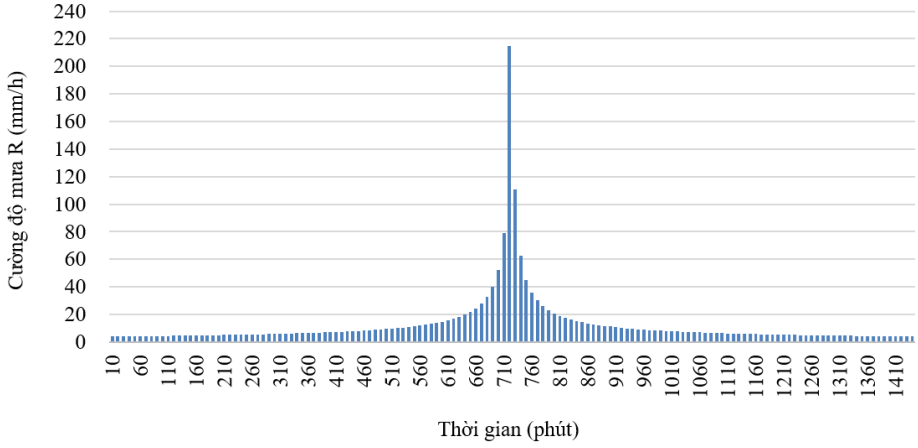
$$R_t = \frac{2108}{t^{0,7} + 4,8} \tag{2}$$



Hình 2. Phương pháp khối xen kẽ để xây dựng biểu đồ mưa

Trong thực tế, tuy nhiên, một trận mưa có những khoảng thời gian (t_c) mà cường độ mưa rất cao và chỉ tập trung trong một khoảng thời gian ngắn. Hơn thế nữa, mô hình PWRI mô phỏng rời rạc cho từng t_c. Vì vậy, cần xây dựng một biểu đồ mưa cho khoảng thời gian đủ ngắn để phản ánh cường độ mưa trong từng khoảng thời gian dựa trên dữ liệu IDF. Một phương pháp phổ biến được dùng là phương pháp khối xen kẽ như được thể hiện ở trong Hình 2.

Nguyên tắc khai triển trong Hình 2 có thể được hiểu như sau: Từ công thức (2) ta xác định được cường độ mưa trung bình lớn nhất tại từng thời đoạn mưa, chẳng hạn, tại các thời đoạn mưa kéo dài 10, 20, 30, và 40 phút, tương ứng ta có r_{10} = 215 mm/h, r_{20} = 163 mm/h, r_{30} = 135 mm/h, r_{40} = 117 mm/h.



Hình 3. Biểu đồ mưa theo thời gian sử dụng trong nghiên cứu này

Và do đó tổng lượng mưa trong từng thời đoạn nói trên tương ứng sẽ là $10 \times r_{10}$, $20 \times r_{20}$, $30 \times r_{30}$, $40 \times r_{40}$. Lưu ý, biểu đồ mưa thường được thể hiện dưới dạng cường độ mưa (mm/h). Do Hình 2, biểu

đồ mưa được xây dựng cho từng khoảng thời gian 10 phút, cường độ mưa tương ứng với các thời đoạn 10, 20, 30, 40 phút sẽ là $10/10 \times r_{10}$, $20/10 \times r_{10}$, $30/10 \times r_{10}$, $40/10 \times r_{10}$, chính là các hệ số của các hạng tử trong biểu thức ở Hình 2. Biểu đồ mưa sử dụng trong nghiên cứu này được thể hiện trong Hình 3.

b. Ba bước trong mô hình sử dụng để xác định dòng chảy bề mặt

Bước 1: Nước mưa thấm xuống các lớp kết cấu áo đường

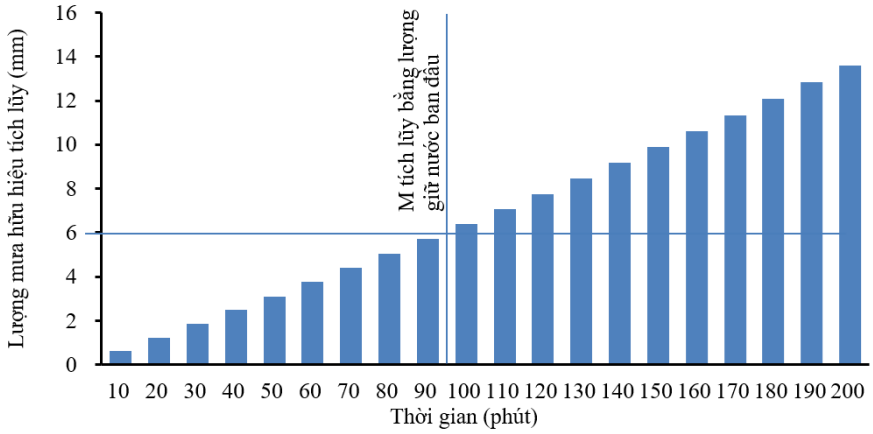
Cường độ mưa hữu hiệu (M) thường được lấy bằng

$$M = 0{,}9 \times R \tag{3}$$

trong đó R (mm/10 phút) là cường độ mưa thiết kế được thể hiện trong Hình 3 tính theo thời gian mỗi 10 phút (mm/10 phút), hệ số 0,9 [2] tính đến việc cường độ mưa thiết kế R bị tổn thất. Trong nghiên cứu này, cường độ mưa được tính toán cho thời gian 24 tiếng (1440 phút). Hình 4 thể hiện lượng mưa hữu hiệu tích lũy theo thời gian. Theo hình này, trong khoảng 90–100 phút kết cấu áo đường đạt giá trị bằng với lượng nước bị giữ trong Bước 1 (V_1 = 6,0 mm, xem Bảng 1). Phương trình cân bằng nước sẽ là:

$$M = V_1 \tag{4}$$

Dựa trên kết quả này Bước 2 sẽ được bắt đầu từ thời điểm 100 phút.



Hình 4. Thời điểm xảy ra lượng mưa hữu hiệu tích lũy cân bằng với khả năng giữ nước ban đầu trong Bước 1 của mô hình. Lưu ý hình này không vẽ cho toàn bộ thời gian 1440 phút

Bước 2: Nước mưa tiếp tục thấm xuống dưới và nước bắt đầu được trữ trong các lớp kết cấu áo đường

Lúc này M sẽ bằng lượng nước thấm xuống nền đường (Q, mm/10 phút) và lượng nước trữ trong kết cấu áo đường ΔV. Phương trình cân bằng nước sẽ là:

$$M = Q + \Delta V \tag{5}$$

trong đó Q (mm/10 phút) là lượng nước thấm xuống nền đường được xác định bằng công thức sau:

$$Q = 36 \times K_f \times K_s \tag{6}$$

$$K_f = 0{,}014 \times H + 1{,}287 \tag{7}$$

trong đó K_f (mm^2/mm^2) là hệ số thấm tương đối, H (m) là mực nước dâng. Giá trị của H liên tục thay đổi tùy thuộc vào lượng trữ nước của kết cấu áo đường. Nước sẽ bắt đầu dâng từ mặt nền đường cho tới khi tới mặt của lớp mặt. Khi nước mưa dâng tới lớp mặt, lúc này lượng trữ nước của kết cấu áo đường đạt tối đa (lượng trữ nước V_2 trong Bước 2, xem Bảng 1). Do tỉ lệ trữ nước của lớp móng trên và móng dưới giống nhau (16,7%; tương đương lượng trữ nước 25,1 mm; xem Bảng 1), chiều cao H được phân đoạn như sau:

$$0 \le H \le 300 \text{ mm}: \quad H = \frac{V}{0{,}167} \tag{8}$$

$$300 \le H \le 400 \text{ mm}: \quad H = 300 + 8 \times (V - 50{,}1) \tag{9}$$

trong đó V (mm) là lượng nước trữ trong kết cấu mặt đường theo từng bước tính toán 10 phút trong mô hình PWRI.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của các lớp trong PPS

Lớp kết cấu	Bề dày (mm) a	Độ rỗng tổng ϕ_T (%) b	Tỷ lệ trữ nước tổng ϕ (%) d	Lượng trữ nước tổng V (mm) $a \times d/100$	Tỷ lệ nước bị giữ ban đầu trong Bước 1 θ_1 (%) c	Lượng nước bị giữ ban đầu trong Bước 1 V_1 (mm) $a \times c/100$	Tỷ lệ trữ nước trong Bước 2 θ_2 (%)	Lượng trữ nước trong Bước 2 V_2 (mm)
Lớp mặt	100	20	14	14	1,5	1,50	12,5	12,5
Lớp móng trên	150	26	18	27	1,5	2,25	16,7	25,1
Lớp móng dưới	150	26	18	27	1,5	2,25	16,7	25,1
Tổng	400	–		69	–	6,00		62,6

Bước 3

Nếu H trong công thức (9) đạt tới $H_{\max}$, kết cấu áo đường không thể tiếp nhận thêm nước mưa, lúc này sẽ xuất hiện dòng chảy bề mặt (S). Phương trình cân bằng nước trở thành:

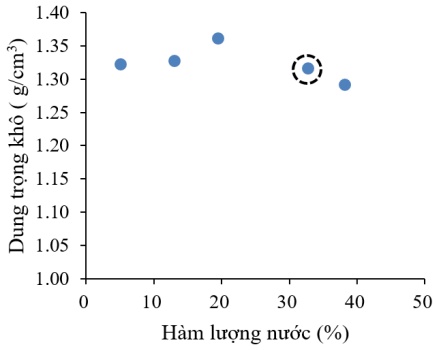
$$M = Q + S \tag{10}$$

Từ công thức (10), sẽ tính được lượng nước dòng chảy bề mặt.

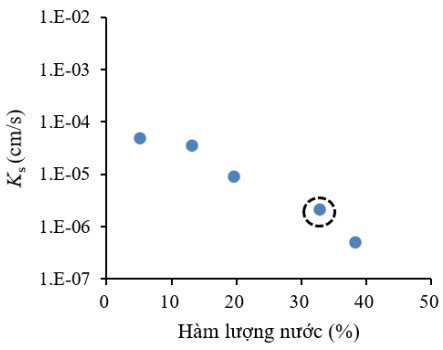
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả thí nghiệm đầm nén và độ dẫn thủy lực bão hòa của đất nền đường

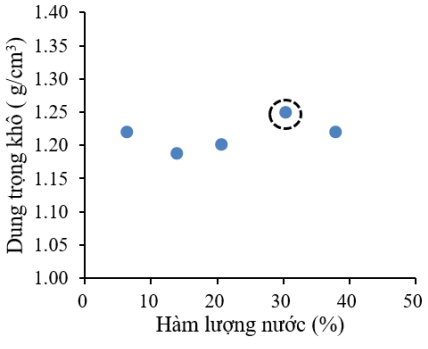
Kết quả thí nghiệm đầm nén và K_s được thể hiện trong Hình 5. Có thể thấy E_c cao hơn thường cho khối lượng riêng khô lớn hơn và K_s nhỏ hơn. Với E_c bằng 100%, 60%, và 30% E_c tiêu chuẩn, dung trọng khô biến thiên tương ứng trong khoảng từ 1,29 đến 1,36, từ 1,19 đến 1,25, và từ 1,10 đến 1,26 g/cm^3; và K_s biến thiên tương ứng trong khoảng từ $4{,}97 \times 10^{-7}$ đến $4{,}97 \times 10^{-5}$, từ $1{,}95 \times 10^{-5}$ đến $6{,}31 \times 10^{-4}$, từ $1{,}96 \times 10^{-5}$ đến $2{,}09 \times 10^{-4}$ cm/s. Đối với cả ba trường hợp đầm nén với các E_c khác nhau, điều thú vị là, tại điểm có dung trọng khô lớn nhất nhưng K_s lại không nhỏ nhất. Trong thực tế, điều này có nghĩa là trong điều kiện lu lèn để đạt trạng thái chặt nhất ở độ ẩm tối ưu, tuy nhiên có thể K_s không đạt giá trị nhỏ nhất. Ngoài ra, nhìn vào Hình 5, có thể thấy rằng đầm nén ở trạng thái độ ẩm ban đầu thấp thường mang lại K_s cao.



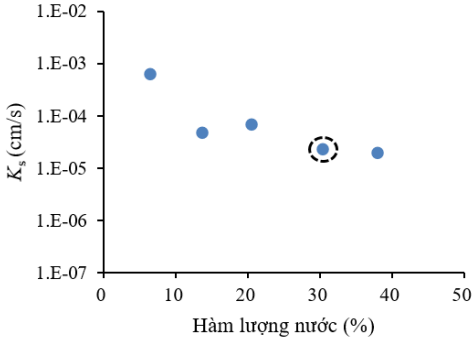
(a) Dung trọng khô với E_c = 100%



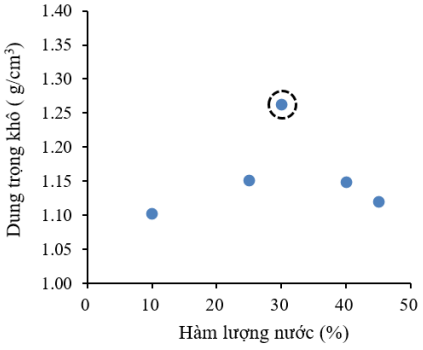
(d) K_s với E_c = 100%



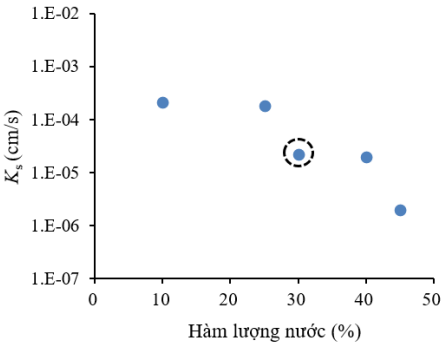
(b) Dung trọng khô với E_c = 60%



(e) K_s với E_c = 60%



(c) Dung trọng khô với E_c = 30%



(f) K_s với E_c = 30%

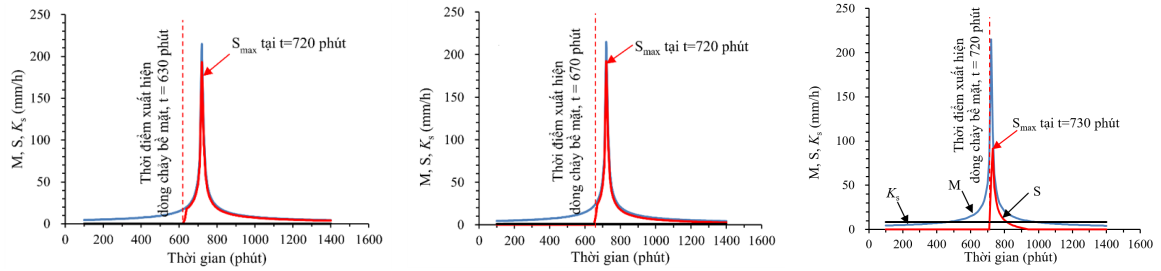
Hình 5. Kết quả thí nghiệm đầm nén và độ dẫn thủy lực bão hòa (K_s) với các công đầm nén (E_c) khác nhau của đất nền đường. Vòng tròn nét đứt thể hiện hàm lượng nước ở độ ẩm tự nhiên

3.2. Ảnh hưởng của độ dẫn thủy lực bão hòa đến hiệu quả giảm đỉnh dòng chảy bề mặt

Độ dẫn thủy lực bão hòa xác định từ thí nghiệm tại điều kiện độ ẩm tự nhiên của đất nền đường (hình tròn nét đứt màu đen trong Hình 5) được sử dụng để tích hợp vào trong mô hình sử dụng trong nghiên cứu này để đánh giá ảnh hưởng của K_s đến hiệu quả giảm đỉnh dòng chảy bề mặt. Kết quả về biểu đồ mưa, dòng chảy bề mặt, và K_s được thể hiện trong Hình 6. Kết quả trong Hình 6 được mô phỏng trong điều kiện mưa kéo dài trong 24 giờ (1440 phút), tổng lượng mưa tích lũy là 302 mm, và cường độ mưa thiết kế lớn nhất là 215 mm/h.

Ở cả ba trường hợp, cường độ mưa đạt đỉnh rất lớn tại khoảng thời gian gần 720 phút. Tuy nhiên, phản ứng của dòng chảy bề mặt khác nhau tùy thuộc vào khả năng thấm của đất nền. Khi K_s thấp,

khả năng thoát nước xuống nền bị hạn chế nhiều, nước mưa sau khi thấm qua các lớp kết cấu phía trên không thể tiếp tục thoát xuống đất nền với tốc độ đủ lớn, dòng chảy bề mặt bắt đầu xuất hiện sớm hơn. Trong Hình 6(a) khi $K_s = 2{,}1 \times 10^{-6}$ cm/s, dòng chảy bề mặt xuất hiện tại thời điểm 630 phút; trong khi đó khi $K_s = 2{,}3 \times 10^{-5}$ cm/s và $1{,}8 \times 10^{-4}$ cm/s, dòng chảy bề mặt xuất hiện tương ứng tại 670 và 720 phút (Hình 6(b) và (c)). Vì vậy, trong trường hợp K_s thấp, đỉnh dòng chảy bề mặt có xu hướng cao hơn. Khi K_s thấp như trong Hình 6(a) và (b), do dòng chảy bề mặt xuất hiện khá sớm trước khi đỉnh cường độ mưa được thiết lập; kết cấu áo đường đã chưa đầy nước trước đỉnh cường độ mưa khá lâu nên đỉnh của cường độ mưa trùng với đỉnh của dòng chảy bề mặt. Tuy nhiên, trong Hình 6(c), đỉnh dòng chảy bề mặt chậm hơn so với đỉnh cường độ mưa do K_s cao hơn dẫn tới kết cấu áo đường vẫn có khả năng chứa thêm nước và dòng chảy bề mặt xuất hiện sau. Đáng chú ý, mặc dù, trong Hình 6(b) khi $K_s \sim 10^{-5}$ cm/s gấp khoảng 10 lần $K_s \sim 10^{-6}$ cm/s trong Hình 6(a); nhưng hiệu quả giảm lũ trong trường hợp $K_s \sim 10^{-6}$ cm/s như trong Hình 6(c) lại cao hơn rất nhiều. Hiệu quả giảm lũ thông qua thông số giảm đỉnh dòng chảy bề mặt (tỷ lệ giữa trị số đỉnh dòng chảy bề mặt so với đỉnh cường độ mưa) trong trường hợp $K_s \sim 10^{-6}$ và 10^{-5} cm/s gần giống nhau cỡ khoảng 10%, trong khi đó khi $K_s \sim 10^{-4}$ cm/s thì lên tới gần 57%. Tạm bỏ qua các yếu tố khác về cấu tạo của kết cấu áo đường, nếu chỉ quan tâm tới K_s của nền đường khi đánh giá hiệu quả giảm đỉnh dòng chảy lũ thì một số các công bố chẳng hạn như Roseen và cs. [14] dựa vào quan trắc thực nghiệm đối với đất có $K_s = 6{,}94 \times 10^{-5}$ quan sát thấy hiệu suất giảm đỉnh dòng chảy từ 10–40% tùy thuộc vào cường độ mưa; Tipak và cs. [15] quan trắc thực nghiệm đối với đất có K_s từ $4{,}17 \times 10^{-5}$ đến $1{,}42 \times 10^{-4}$, thì hiệu suất giảm đỉnh dòng chảy báo cáo trung bình 75%. Như vậy có thể thấy K_s là một nhân tố ảnh hưởng tới hiệu suất giảm đỉnh dòng chảy lũ nhưng cũng có nhiều các yếu tố khác cần phải được xem xét tổng thể để thiết kế tối ưu PPS. Tùy thuộc vào mục tiêu mong muốn của người thiết kế, khi thiết kế mặt đường thấm dựa vào thoát nước tự nhiên của lớp nền, khuyến nghị đảm bảo tối thiểu K_s cỡ khoảng 10^{-4} cm/s.



(a) M, S, K_s cho trường hợp $K_s = 2{,}1 \times 10^{-6}$

(b) M, S, K_s cho trường hợp $K_s = 2{,}3 \times 10^{-5}$

(c) M, S, K_s cho trường hợp $K_s = 1{,}8 \times 10^{-4}$ cm/s

Hình 6. Biểu đồ mưa, dòng chảy bề mặt cho các trường hợp khác nhau của độ dẫn thủy lực bão hòa của đất nền đường

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã đánh giá ảnh hưởng của độ dẫn thủy lực bão hòa (K_s) của nền đường đến hiệu quả giảm lũ đô thị của hệ thống mặt đường thấm nước (PPS) sử dụng cốt liệu bê tông tái chế thông qua chỉ tiêu giảm đỉnh dòng chảy bề mặt. Kết quả cho thấy K_s của nền đất là một trong những yếu tố chi phối khả năng thoát nước và điều tiết dòng chảy của hệ thống PPS. Khi K_s của nền giảm, khả năng thấm nước từ kết cấu mặt đường xuống nền bị hạn chế, làm giảm đáng kể hiệu quả cắt giảm đỉnh dòng chảy trong các trận mưa lớn.

Từ kết quả nghiên cứu có thể thấy rằng, việc kiểm soát điều kiện đầm nén nền đường đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo hiệu quả làm việc của hệ thống PPS. Quá trình thi công nền đường nên được thực hiện trong điều kiện thời tiết khô ráo và vật liệu nền được lu lèn ở trạng thái có độ ẩm thấp hơn độ ẩm tối ưu, đồng thời vẫn phải đảm bảo các yêu cầu về sức chịu tải theo tiêu chuẩn thiết kế. Trong trường hợp sử dụng bê tông tái chế làm lớp móng kết cấu áo đường thấm, K_s lớn hơn làm tăng khả năng giảm đỉnh dòng chảy. Nếu không có kết quả thí nghiệm, khi hệ thống PPS được thiết kế có xét đến điều kiện thoát nước của nền đường, khuyến nghị K_s tối thiểu khoảng 10^{-4} cm/s. Lưu ý rằng kịch bản xây dựng trong bài báo này là một trận mưa cực đoan, do vậy khuyến nghị về K_s tối thiểu có thể được xem xét để thiết kế trong trường hợp một trận mưa thông thường. Đối với các khu vực có nền đất kém thấm ($K_s < 10^{-5}$ cm/s), việc kết hợp hệ thống PPS với các giải pháp thoát nước dưới mặt đường, chẳng hạn như bố trí ống thoát nước ở đáy kết cấu, được khuyến nghị nhằm tăng cường khả năng tiêu thoát nước và duy trì hiệu quả giảm lũ của hệ thống.

Nhìn chung, nghiên cứu đã cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn điều kiện nền đất và giải pháp thiết kế phù hợp nhằm nâng cao hiệu quả ứng dụng hệ thống PPS sử dụng cốt liệu bê tông tái chế trong kiểm soát dòng chảy đô thị. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần đánh giá hiệu quả của các phương án bố trí hệ thống thoát nước dưới mặt đường cũng như xem xét ứng xử của PPS dưới điều kiện mưa liên tiếp, khi dung tích trữ nước ban đầu của hệ thống đã bị suy giảm, để có cơ sở hoàn thiện hơn các giải pháp thiết kế phục vụ phát triển hạ tầng giao thông đô thị bền vững.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ thiết bị thí nghiệm đo độ dẫn thủy lực bão hòa và đường cong đầm nén từ trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Các tác giả xác nhận không sử dụng bất kỳ công cụ trí tuệ nhân tạo tạo sinh hoặc công nghệ hỗ trợ bởi AI nào trong quá trình chuẩn bị và hoàn thiện bản thảo.

Tài liệu tham khảo

[1] Ủy ban nhân dân Thành phố Hà Nội, Số QĐ 2280/QĐ-UBND (2026). *Phê duyệt kế hoạch bảo đảm thoát nước, chống úng ngập khu vực nội thành Thành phố mùa mưa năm 2026*.

[2] Japan Road Association (2007). *Permeable pavement handbook*. Japan Road Association.

[3] National Asphalt Pavement Association, Information Series 131 (2008). *Porous asphalt management for stormwater pavements, design, construction and maintenance guide*. 51 00 Forbes Blvd. Lanham, Maryl. 20706-4407.

[4] Eisenberg, B., Lindow, K. C., Smith, D. R. (2015). *Permeable pavements*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia, 20191-4382.

[5] Tota-Maharaj, K., Karunanayake, C., Kunwar, K., Chadee, A. A., Azamathulla, H. M., Rathnayake, U. (2024). Evaluation of permeable pavement systems (PPS) as best management practices for stormwater runoff control: A review. *Water Conservation Science and Engineering*, 9(1):1–37.

[6] Nam, P. V., Kawamoto, K., Dung, N. T., Kien, T. T., Giang, N. H. (2023). Review of water and heat balances and challenges to adoption of permeable pavement system in Vietnam. *International Journal of GEOMATE*, 103(24):84–95.

[7] Parkinson, J., Thành, N. C., Thục, N. Đ. (2025). *Hướng dẫn kỹ thuật áp dụng mô hình thành phố bọt biển trong thoát nước mưa đô thị ở Việt Nam*. Nhà xuất bản Xây dựng.

[8] Tuân, N. K., Minh, P. Q., Giang, N. H., Dũng, N. T. (2021). Nghiên cứu ảnh hưởng của cốt liệu tái chế từ phế thải xây dựng đến tính chất của bê tông rỗng thoát nước. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(6V):58–69.

[9] Nam, T. H., Khanh, M. N., Tu, V. A., Danh, T. A., Dong, T. D. (2025). Investigation of selected properties of porous asphalt using recycled concrete aggregates and fly ash. *Journal of Materials and Construction*, 15(2):19–25.

[10] Phương, N. V., Nam, H. T., Hải, P. T., Cẩn, K. V. (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 (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 13(2V):73–85.

[11] TCVN 12790:2020. *Đất, đá dăm dùng trong công trình giao thông-Đầm nén Proctor*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[12] ASTM D5856-15. *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[13] Anh, H. X. (2026). Thiết lập cường độ mưa – thời đoạn – tần suất theo hàm Gumbel cho thoát nước mưa khu vực Hà Nội. *Tạp chí Xây dựng*, 3:85–89.

[14] Roseen, R. M., Ballestero, T. P., Houle, J. J., Briggs, J. F., Houle, K. M. (2011). 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(1):81–89.

[15] Tirpak, R. A., Epps, T. H., Winston, R. J., Feliciano, M., Dorsey, J. D. (2021). Impacts of permeable interlocking concrete pavement on the runoff hydrograph: Volume reduction, peak flow mitigation, and extension of lag times. *Hydrological Processes*, 35(4):1–14.