



Nghiên cứu kỹ thuật lớp phủ quang xúc tác trên mặt đường đô thị ven biển nhằm kiểm soát ô nhiễm nước mưa chảy tràn

Technical Investigation of Photocatalytic Coatings on Coastal Urban Road Pavements for Stormwater Runoff Pollution Control

Nguyễn Phan Anh^{1,*}, Bùi Ngọc Dung²

¹Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Khoa Công nghệ và Kỹ thuật, Trường Đại học Hải Phòng

Từ khóa:

TÓM TẮT

Lớp phủ quang xúc tác;
TiO₂;
Ô nhiễm;
Chảy tràn đô thị.

Nước mưa chảy tràn từ mặt đường đô thị ven biển là nguồn ô nhiễm phi điểm quan trọng. Nghiên cứu này đánh giá tiềm năng của lớp phủ quang xúc tác TiO₂ trong kiểm soát ô nhiễm nước mưa chảy tràn tại tuyến Võ Nguyên Giáp, Hải Phòng. Một khung tính toán tích hợp giữa thủy học dòng chảy tràn và phân tích tải lượng ô nhiễm được xây dựng để lượng hóa hiệu quả môi trường của giải pháp. Dựa trên phương pháp Rational và nồng độ trung bình sự kiện, tải lượng ô nhiễm trước và sau xử lý được ước tính cho điều kiện trung bình năm và trận mưa cực đoan ngày 9/6/2024 (200 mm) kết hợp triều cường. Kết quả cho thấy COD, nitơ và photpho có thể giảm lần lượt khoảng 50%, 40% và 60%, trong khi kim loại nặng giảm khoảng 20%. Kết quả cho thấy lớp phủ TiO₂ có tiềm năng ứng dụng trong bảo trì mặt đường đô thị ven biển, tuy nhiên cần xem xét thêm độ bền và an toàn khai thác khi triển khai thực tế.

Keywords:

ABSTRACT

Photocatalytic coating;
TiO₂;
Pollution;
Urban runoff.

Stormwater runoff from coastal urban roads is an important non-point pollution source. This study evaluates the potential of TiO₂ photocatalytic coatings for stormwater pollution mitigation along Vo Nguyen Giap Road in Hai Phong. An integrated framework combining runoff hydrology and pollutant load analysis was developed to quantify the environmental benefits of this approach. Using the Rational method and event mean concentrations, pollutant loads before and after treatment were estimated for average annual conditions and an extreme rainfall event on 9 June 2024 (200 mm) combined with tidal influence. Results indicate reductions of about 50% for COD, 40% for nitrogen, and 60% for phosphorus, while heavy metals decrease by around 20%. The results suggest that TiO₂ coatings could be integrated into coastal urban pavement maintenance, although durability and traffic safety require further investigation.

* Nguyễn Phan Anh. Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Email: phananh.ctt@vmaru.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150202>

Ngày nhận bài: 16/10/2025; Ngày nhận bài sửa: 06/03/2026; Ngày chấp nhận đăng: 12/03/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/03/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Ô nhiễm nước mưa chảy tràn từ các bề mặt không thấm tại đô thị đã được ghi nhận như một trong những nguồn phát thải phi điểm quan trọng, có khả năng tác động tiêu cực đến chất lượng môi trường nước mặt và ven biển. Trên các tuyến đường nhựa, nước mưa khi rơi xuống không thấm qua nền đất mà cuốn trôi bụi đường, dầu khoáng, kim loại nặng, chất dinh dưỡng và vi sinh vật. Quá trình này đã tạo ra một dòng chảy chứa hỗn hợp phức tạp của các chất ô nhiễm, trong đó có nhiều hợp chất khó xử lý bằng các biện pháp truyền thống.

Trong nhiều nghiên cứu quốc tế, nước mưa chảy tràn đã được chứng minh là mang tải lượng ô nhiễm hữu cơ cao (COD từ 10-50 mg/L), kim loại nặng (Zn, Cu, Pb ở mức 10-500 µg/L), chất dinh dưỡng (N, P) cùng với các hợp chất mới nổi như PAHs, thuốc bảo vệ thực vật và vi nhựa [1], [2]. Đặc biệt, hiện tượng “rửa trôi ban đầu” đã được quan sát, khi nồng độ ô nhiễm trong 15-30 phút đầu của trận mưa có thể cao gấp 2-3 lần so với trung bình [3]. Các đặc tính này khiến dòng chảy tràn đô thị trở thành mối nguy đáng kể đối với sông, hồ và vùng ven biển tiếp nhận.

Tại Việt Nam, các đô thị ven biển như Hải Phòng, Đà Nẵng, Nha Trang đang đối mặt với áp lực lớn từ sự gia tăng diện tích bề mặt không thấm do quá trình đô thị hóa nhanh. Lượng mưa trung bình năm cao, điển hình như Hải Phòng với khoảng 1.839 mm [4], càng làm gia tăng dòng chảy tràn và tải lượng ô nhiễm, hình ảnh ngập lụt trên một tuyến phố tại trận mưa kỷ lục được thể hiện như trong Hình 1. Trong khi đó, hệ thống thoát nước mưa hiện nay chủ yếu có chức năng thoát nhanh, chưa tích hợp xử lý ô nhiễm. Do vậy, việc tìm kiếm các giải pháp công nghệ mới nhằm xử lý nước mưa chảy tràn ngay tại nguồn được xem là cần thiết để bảo vệ môi trường nước ven biển.

Công nghệ quang xúc tác dựa trên titan dioxide (TiO_2) đã được quan tâm đặc biệt trong hai thập kỷ gần đây [5]. Khi được chiếu sáng bằng tia UV, TiO_2 sinh ra các cặp electron - lỗ trống (e^-/h^+), tạo ra các gốc oxy hóa mạnh như $\bullet\text{OH}$ và O_2^- , có khả năng phân hủy các hợp chất hữu cơ, oxy hóa amoni và bất hoạt vi sinh vật [5], [6]. Nhiều nghiên cứu đã

chứng minh hiệu quả của TiO_2 trong xử lý không khí (giảm NO_x) và xử lý nước thải đô thị (giảm COD, N, P) [7]. Đặc biệt, lớp phủ quang xúc tác trên bề mặt vật liệu xây dựng có khả năng duy trì hoạt tính nhờ năng lượng ánh sáng tự nhiên, không yêu cầu năng lượng bổ sung, từ đó phù hợp với hạ tầng đô thị có diện tích bề mặt lớn.

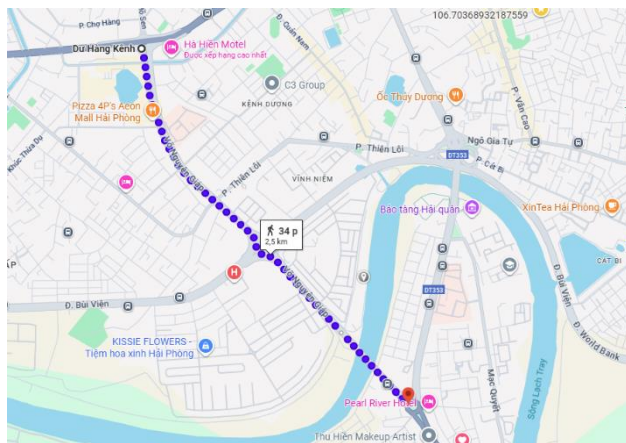


Hình 1. Ngập lụt tại đường Lê Hồng Phong, Hải Phòng.
(Nguồn: <https://cand.com.vn/Hoat-dong-LL-CAND/cong-an-hai-phong-xuong-duong-giup-dan-trong-mua-lut-ky-luc-i733810/>)

Trong lĩnh vực nước mưa chảy tràn, một thực nghiệm lớp phủ nano- TiO_2 trên bê tông xốp và đã ghi nhận giảm 50% COD, 60% photpho tổng và 40% amoni trong mô hình mưa giả lập [8]. Những kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng rộng rãi công nghệ quang xúc tác để giảm tải ô nhiễm phi điểm. So sánh với các nghiên cứu ở Bỉ [9] và Ý [10], hiệu quả xử lý tại khu vực nhiệt đới có thể cao hơn do cường độ bức xạ UV lớn, giúp duy trì hiệu suất xúc tác.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đã được thực hiện nhằm đánh giá hiệu quả tiềm năng của lớp phủ quang xúc tác trong xử lý ô nhiễm nước mưa chảy tràn từ mặt đường đô thị ven biển tại Việt Nam. Trường hợp nghiên cứu là tuyến Võ Nguyên Giáp, Hải Phòng - một tuyến đường ven biển có chiều dài 2.115 m, bề rộng 26 m, diện tích mặt đường 54.990 m^2 , được thể hiện như trong Hình 2. Với lượng mưa trung bình năm 1.839 mm, tuyến đường được ước tính tạo ra trên 90.000 m^3 dòng chảy tràn mỗi năm. Các tính toán tải lượng ô nhiễm (COD, N, P, Zn, Cu, Pb) trước và sau xử lý bằng lớp phủ TiO_2 đã được thực hiện dựa trên nồng độ

trung bình sự kiện điển hình và các hiệu suất xử lý được công bố trong các nghiên cứu thực nghiệm trước đây. Các thông số này được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho khung phân tích nhằm xác định tải lượng ô nhiễm cơ sở, tải lượng sau xử lý và mức giảm tải ô nhiễm trong các kịch bản thủy văn khác nhau.



Hình 2. Toàn tuyến đường Võ Nguyên Giáp, Hải Phòng.

(Nguồn: <https://www.google.com/maps/place/>)

Điểm đóng góp của nghiên cứu nằm ở việc xây dựng một khung tính toán tích hợp giữa thủy học dòng chảy tràn và tải lượng ô nhiễm để đánh giá hiệu quả môi trường của lớp phủ quang xúc tác ở quy mô tuyến đường đô thị thực tế. Khung phân tích này cho phép lượng hóa đồng thời tác động của các tham số thủy văn, diện tích phủ và sự suy giảm hiệu suất theo thời gian đối với hiệu quả xử lý. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm gia tăng tần suất các trận mưa cực đoan tại các đô thị ven biển, cách tiếp cận này góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc xem xét triển khai công nghệ quang xúc tác trong quản lý ô nhiễm nước mưa chảy tràn và bảo vệ chất lượng môi trường nước ven biển.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

Nước mưa chảy tràn từ bề mặt đô thị đã được xác định là một nguồn ô nhiễm phi điểm quan trọng, do bề mặt không thấm như nhựa asphalt và bê tông không cho phép thấm hút, dẫn đến dòng chảy cuốn theo bụi đường, dầu khoáng, kim loại nặng, chất dinh dưỡng và vi sinh vật. Đối với mặt đường giao thông, sự hình thành dòng chảy đã được chi phối bởi đặc tính bề mặt (độ thấm, độ dốc, vật liệu), cường độ - thời gian mưa và hệ số dòng chảy. Đặc biệt tại các đô thị ven biển có lượng mưa lớn như Hải Phòng, dòng chảy tràn có vai trò đáng

kể trong việc vận chuyển chất ô nhiễm ra sông và vịnh biển. Trong nghiên cứu này, khung tính toán thủy học - chất lượng nước được xây dựng hoàn toàn dựa trên các công thức chuẩn của USEPA và bộ nồng độ/hiệu suất được công bố bảo đảm khả năng kiểm chứng và tái lập.

2.1. Dòng chảy tràn

Thể tích dòng chảy tràn hàng năm V đã được xác định theo công thức Rational [11] cho lưu vực nhỏ tại bề mặt đô thị:

$$V = \psi \times A \times P_e \quad (1)$$

trong đó, ψ là hệ số dòng chảy (0,7–0,95 với mặt đường nhựa đô thị; A là diện tích bề mặt đường (m^2); P_e : lượng mưa hữu hiệu trung bình năm (m).

Tuyến Võ Nguyên Giáp có chiều dài 2.115 m và bề rộng 26 m, diện tích tính được:

$$A = 2.115 \times 26 = 54.990 m^2 \quad (2)$$

Theo số liệu khí tượng, lượng mưa trung bình năm tại Hải Phòng là 1.839 mm, tương ứng 1,839 m [4]. Khi thay vào Công thức (1) với $\psi = 0,9$, thể tích dòng chảy tràn hàng năm được tính:

$$V = 0,9 \times 54.990 \times 1,839 \approx 91.000 \text{ (m}^3/\text{năm)}$$

Ngoài ra, đối với một trận mưa lớn 100 mm, thể tích dòng chảy tràn đơn sự kiện được xác định:

$$V = 0,9 \times 54.990 \times 0,1 \approx 4.949 \text{ (m}^3/\text{năm)} \quad (3)$$

Như vậy, chỉ một trận mưa cường độ cao đã tạo ra gần 5.000 m^3 dòng chảy tràn, khẳng định tiềm năng tải ô nhiễm đáng kể.

Đối với kiểm tra lưu lượng đỉnh, công thức Rational truyền thống được dùng:

$$Q_p = C \times i \times A \quad (4)$$

trong đó: C là hệ số dòng chảy (tương đương ψ ; i là cường độ mưa thiết kế; A là diện tích lưu vực. Công thức này chủ yếu phục vụ đối chiếu thoát nước, không ảnh hưởng trực tiếp đến tải lượng ô nhiễm trong nghiên cứu.

2.2. Tải lượng ô nhiễm

Tải lượng chất ô nhiễm X trong một sự kiện mưa được xác định theo tích phân:

$$L_X^{\text{event}} = \int_0^T C_X(t)Q(t)dt \quad (5)$$

Nồng độ trung bình sự kiện (EMC) được định nghĩa:

$$C_{X,EMC} = \frac{\int_0^T C_X(t)Q(t)dt}{\int_0^T Q(t)dt} = \frac{L_X^{\text{event}}}{V_{\text{event}}} \quad (6)$$

Từ đó, tải lượng sự kiện có thể rút gọn thành:

$$L_X^{\text{event}} = C_{X,EMC} \times V_{\text{event}} \quad (7)$$

Trong nghiên cứu này, giá trị EMC điển hình được sử dụng: COD 15 mg/L, N tổng 1 mg/L, P tổng 0,01 mg/L, Zn 0,2 mg/L, Cu 0,05 mg/L, Pb 0,02 mg/L [2], [12].

2.3. Lớp phủ quang xúc tác TiO_2 trên mặt đường giao thông

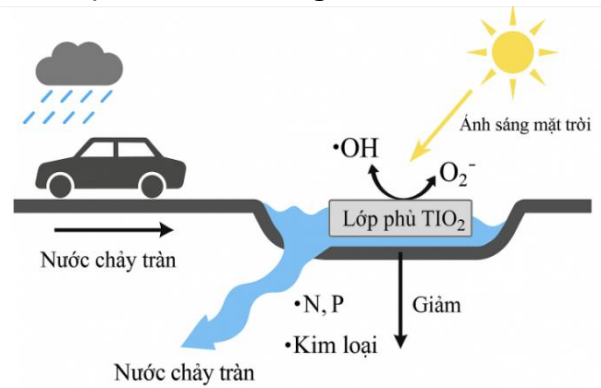
2.3.1. Thành phần vật liệu và công nghệ thi công lớp phủ quang xúc tác TiO_2

Trong nghiên cứu này, lớp phủ quang xúc tác TiO_2 được xem là một lớp vật liệu chức năng mỏng được bố trí trên bề mặt mặt đường nhằm xử lý các chất ô nhiễm trong nước mưa chảy tràn thông qua các phản ứng oxy hóa quang hóa. Lớp phủ này không tham gia vào cơ chế chịu lực của kết cấu áo đường mà chỉ đóng vai trò như một lớp bề mặt hoạt tính, cho phép tiếp xúc trực tiếp với ánh sáng mặt trời và dòng chảy bề mặt.

Về thành phần vật liệu, lớp phủ quang xúc tác thường sử dụng TiO_2 ở dạng nano, chủ yếu ở pha anatase hoặc hỗn hợp anatase-rutile, được phân tán trong hệ liên kết vô cơ hoặc hữu cơ. Trong thực hành kỹ thuật mặt đường, các cấu hình lớp phủ phổ biến bao gồm: (i) lớp phủ mỏng gốc xi măng có bổ sung TiO_2 ; (ii) lớp sơn hoặc dung dịch phủ chứa TiO_2 phun trực tiếp lên bề mặt bê tông xi măng hoặc bê tông nhựa; và (iii) lớp phủ dạng epoxy kết hợp với cốt liệu mịn có gắn TiO_2 (epoxy-bonded aggregate). Các cấu hình này đều nhằm mục tiêu tối đa hóa diện tích tiếp xúc của TiO_2 với môi trường, đồng thời đảm bảo khả năng bám dính với bề mặt mặt đường.

Công nghệ thi công lớp phủ quang xúc tác nhìn chung tương thích với các quy trình bảo trì bề mặt mặt đường hiện hành. Trình tự thi công điển hình

bao gồm các bước: chuẩn bị và làm sạch bề mặt mặt đường nhằm loại bỏ bụi bẩn, dầu mỡ và tạp chất; thi công lớp phủ bằng phương pháp phun hoặc rải tùy theo loại vật liệu; và dưỡng hộ trong thời gian ngắn để đảm bảo độ bám dính ban đầu. Do chiều dày lớp phủ rất nhỏ so với chiều dày kết cấu áo đường, quá trình thi công không làm thay đổi hình học mặt đường và không ảnh hưởng đến khả năng chịu tải của kết cấu, một sơ đồ tổng quan về dòng chảy và phương pháp xử lý lớp phủ bằng TiO_2 được mô tả như trong Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ tổng quan dòng chảy và xử lý bằng lớp phủ TiO_2 .

2.3.2. Cơ chế quang xúc tác của lớp phủ TiO_2

Cơ chế quang xúc tác dựa trên quá trình hình thành cặp e^-/h^+ dưới chiếu xạ UV, tạo gốc $\bullet\text{OH}$ và O_2^- có khả năng oxy hóa COD, N, P và khử một phần kim loại [6]. Động học phân hủy thường được biểu diễn dưới dạng bậc giả nhất:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = k_{\text{app}} \times t \quad (8)$$

Với k_{app} là hằng số tốc độ biểu kiến, hay còn được hiểu là đại lượng đặc trưng cho tốc độ phản ứng được quan sát trong những điều kiện cụ thể, khi các yếu tố ảnh hưởng khác (nồng độ, điều kiện môi trường, ánh sáng, xúc tác...) không được tách riêng hoàn toàn. Trong phạm vi nghiên cứu này, hiệu suất xử lý được áp dụng trực tiếp từ kết quả thực nghiệm: COD 50%, N 40%, P 60%, kim loại 20% [8], [13].

Tải lượng sau xử lý được xác định:

$$L_X^{(\text{PC})} = (1 - \eta_{\text{PC},X}) \times C_{X,EMC} \times V \quad (9)$$

trong đó $\eta_{\text{PC},X}$ là hiệu suất xử lý quang xúc tác đối với chất ô nhiễm X;

Trường hợp diện tích phủ một phần (θ) hoặc hiệu suất suy giảm do lão hóa (α) được biểu diễn:

$$L_X^{(PC,\theta)} = (1 - \theta \times \eta_{PC,X}) \times C_{X,EMC} \times V \quad (10)$$

$$L_X^{(PC,\theta)} = (1 - \alpha \times \eta_{PC,X}) \times C_{X,EMC} \times V \quad (11)$$

Đối với kịch bản rửa trôi ban đầu: khi mưa bắt đầu, các chất bẩn tích tụ lâu ngày trên mặt đường (bụi, dầu mỡ, kim loại, phân chim, rác hữu cơ...) sẽ bị cuốn trôi tập trung trong giai đoạn đầu. Do đó, trong 20-30% lượng nước mưa đầu tiên, nồng độ ô nhiễm thường cao gấp 2-3 lần nồng độ trung bình cả trận. Lúc này, hệ số tăng nồng độ ϕ_{FF} trong khoảng từ 2-3 được áp dụng (đây chính là hệ số nhân để phản ánh việc nồng độ tăng mạnh ở giai đoạn đầu mưa):

$$L_X^{event,FF} = \phi_{FF} \times C_{X,EMC} \times V_{event} \quad (12)$$

Với $L_X^{event,FF}$ là tải lượng chất ô nhiễm trong sự kiện mưa có xét đến hiệu ứng rửa trôi ban đầu.

Phân tích nhạy tham số: hệ số dòng chảy ψ thường dao động 0,7-0,95. Kết quả tính COD cơ sở và sau xử lý cho ba giá trị 0,8; 0,9 và 0,95 được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Phân tích nhạy theo hệ số dòng chảy ψ .

ψ	Thể tích (10^6 L/năm)	COD cơ sở (kg/năm)	COD sau xử lý 50% (kg/năm)
0,80	80,9	1.214	607
0,90	91,0	1.365	682,5
0,95	96,1	1.441	720,5

Khi ψ thay đổi trong khoảng này, COD sau xử lý chỉ dao động $\pm 10\%$, chứng tỏ kết quả ổn định và đáng tin cậy.

Tương tự, ảnh hưởng của tỷ phần diện tích phủ (θ) và suy giảm hiệu suất (α) được thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Phân tích nhạy theo tỷ phần diện tích phủ và lão hóa.

Kịch bản	COD cơ sở (kg/năm)	Hiệu suất (%)	COD sau xử lý (kg/năm)

Phủ toàn bộ, không lão hóa	1.365	50	682,5
Phủ 50% diện tích	1.365	25	1.024
Lão hóa 30%	1.365	35	887,3

Kết quả cho thấy diện tích phủ và sự suy giảm hiệu suất có ảnh hưởng mạnh hơn nhiều so với biến thiên của hệ số dòng chảy [14].

2.4. Quy trình tính

Quy trình nghiên cứu đã được thiết lập theo chuỗi logic gồm bốn bước chính:

(i) Thu thập dữ liệu đầu vào:

Hình học tuyến đường (dài 2.115 m, rộng 26 m, diện tích 54.990 m²).

Lượng mưa trung bình năm của Hải Phòng (1.839 mm).

Hệ số dòng chảy $\psi=0,9$, trong khoảng khuyến nghị 0,7-0,95.

Nồng độ EMC điển hình của COD, N, P và kim loại.

(ii) Tính toán thủy học:

Áp dụng Công thức (1) để tính thể tích dòng chảy năm và cho các kịch bản mưa 50, 100 và 200 mm.

Sử dụng Công thức (4) khi cần kiểm tra lưu lượng đỉnh phục vụ tham chiếu thoát nước.

(iii) Tính toán tải lượng ô nhiễm:

Tải lượng cơ sở là khối lượng chất bẩn gốc mà nước mưa rửa trôi từ mặt đường ra môi trường, chưa được xử lý được xác định theo Công thức (7) với bộ EMC đã chọn.

Các kịch bản biến đổi (rửa trôi ban đầu, hệ số dòng chảy, diện tích phủ, lão hóa) được mô phỏng theo Công thức (10-12).

(iv) Áp dụng hiệu suất xử lý và đối chiếu quy chuẩn:

Hiệu suất quang xúc tác của TiO₂ đối với COD, N, P và kim loại được lấy từ kết quả thực nghiệm.

Tải lượng sau xử lý được tính bằng Công thức (9) và so sánh với QCVN 08-MT:2015/BTNMT [15] để đánh giá khả năng đáp ứng tiêu chuẩn môi trường.

Với việc áp dụng chuẩn khung phương pháp này cho phép lượng hóa đầy đủ từ dữ liệu đầu vào → thủy học → tải lượng → hiệu suất xử lý, đảm bảo kết quả có tính nhất quán, logic và minh chứng khoa học.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Tải lượng cơ sở và sau xử lý

Thể tích nước mưa chảy tràn năm từ tuyến Võ Nguyên Giáp đã được xác định bằng Công thức (1), với diện tích bề mặt $A=54.990\text{ m}^2$, lượng mưa trung bình năm $P_e=1,839\text{ m}$ và hệ số dòng chảy $\psi=0,9$. Kết quả cho thấy tổng thể tích dòng chảy năm đạt khoảng $91 \times 10^6\text{ L}$. Trên cơ sở nồng độ trung bình sự kiện (EMC), tải lượng cơ sở của các chất ô nhiễm chính được xác định theo Công thức (7) và trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Tải lượng cơ sở năm từ nước mưa chảy tràn tuyến Võ Nguyên Giáp.

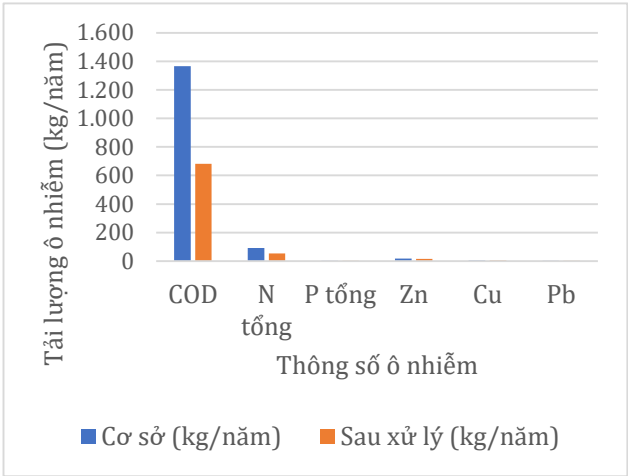
Thông số	Nồng độ (mg/L)	Cơ sở (kg/năm)
COD	15	1.365
N _{tổng}	1	91.0
P _{tổng}	0.01	0.91
Zn	0.2	18.2
Cu	0.05	4.55
Pb	0.02	1.82

Khi lớp phủ quang xúc tác TiO_2 được áp dụng, hiệu suất xử lý được đưa vào tính toán: COD giảm 50%, N giảm 40%, P giảm 60%, còn các kim loại giảm 20%. Kết quả tải lượng sau xử lý được xác định theo Công thức (9) và thể hiện tại Bảng 4 và biểu đồ so sánh kết quả được thể hiện trong Hình 4.

Bảng 4. Tải lượng sau xử lý bằng lớp phủ TiO_2 .

Thông số	Cơ sở (kg/năm)	Hiệu suất (%)	Sau xử lý (kg/năm)
COD	1.365	50	682,5

N tổng	91,0	40	54,6
P tổng	0,91	60	0,36
Zn	18,2	20	14,6
Cu	4,55	20	3,64
Pb	1,82	20	1,46



Hình 4. Biểu đồ so sánh kết quả sau xử lý.

Các kết quả cho thấy COD và nitơ chiếm tỷ trọng lớn nhất trong tải lượng ô nhiễm nước mưa chảy tràn, trong khi phốt pho và kim loại tuy có tải lượng nhỏ hơn nhưng lại gây tác động mạnh đến phú dưỡng và độc tính môi trường. Sau xử lý, COD và N giảm đáng kể, phốt pho giảm nhiều nhất (60 %), còn kim loại chỉ giảm ở mức 20 %. Như vậy, lớp phủ quang xúc tác chứng minh hiệu quả rõ rệt đối với các hợp chất hữu cơ và dinh dưỡng, trong khi cần kết hợp thêm biện pháp khác để xử lý kim loại.

3.2. Kích bản mưa cực đoan và biến thiên tham số

Trận mưa 200 mm ngày 9/6/2024 tại Hải Phòng vào lúc 3 giờ sáng ngày 9/6/2024, một trận mưa lớn dồn dập đã được ghi nhận tại Hải Phòng với tổng lượng mưa đo được lên tới 200 mm. Cùng thời điểm, triều cường đạt mức 3,8 m đã gây ra ngập lụt trên diện rộng, xem minh họa ở Hình 5. Đến khoảng 11 giờ trưa cùng ngày, triều cường đạt đỉnh, kết hợp với lũ về đã nâng mực nước tại các sông lên tới 4,2 m. Đây được xem là đợt ngập lụt nghiêm trọng nhất kể từ đầu mùa mưa bão năm 2024. Tuyến Võ Nguyên Giáp, với đặc điểm là đường ven biển và thấp trũng cục bộ, đã chịu tác động mạnh trong sự kiện này.



Hình 5. Sơ đồ minh họa tuyến đường khi có trận mưa cực đoan kết hợp với triều cường.

Tổng thể tích dòng chảy sự kiện được tính theo Công thức (1), đạt $9,9 \times 10^6$ L. Tải lượng cơ sở và sau xử lý được thể hiện tại Bảng 5.

Bảng 5. Tải lượng ô nhiễm trong trận mưa 200 mm ngày 9/6/2024.

Thông số	Cơ sở (kg)	Sau xử lý (kg)	Giảm (%)
COD	148,5	74,3	50
N tổng	9,9	5,9	40
P tổng	0,099	0,040	60
Zn	1,98	1,58	20
Cu	0,495	0,396	20
Pb	0,198	0,158	20

Kết quả cho thấy, ngay cả trong điều kiện mưa cực đoan kết hợp triều cường và lũ, lớp phủ quang xúc tác vẫn duy trì hiệu quả xử lý ổn định: COD giảm một nửa, N giảm gần 40 %, P giảm 60 %. Điều này khẳng định tính khả thi của giải pháp ngay trong các kịch bản bất lợi nhất. Kết quả so sánh hiệu quả xử lý COD và P giữa Hải Phòng và một số quốc gia được thể hiện như trong Bảng 6.

Bảng 6. So sánh hiệu quả xử lý COD và P giữa Hải Phòng và một số quốc gia.

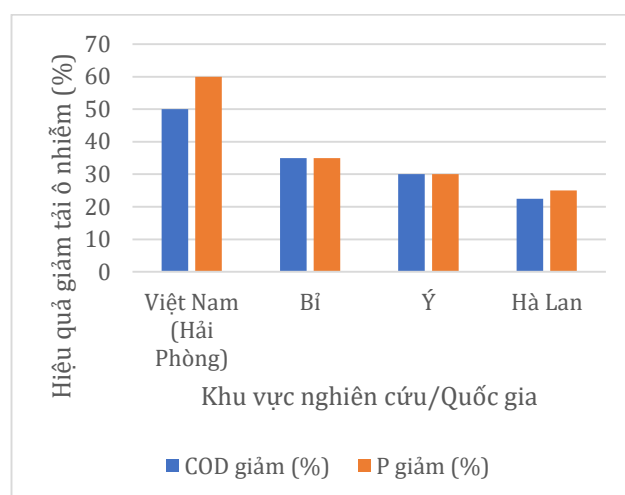
Quốc gia	COD giảm (%)	P giảm (%)	Ghi chú khí hậu
Việt Nam (Hải Phòng)	50	60	Nhiệt đới ẩm, UV cao
Bỉ	30-40	~35	Ôn đới ẩm, UV trung bình

Ý	25-35	~30	Địa Trung Hải, UV trung bình
Hà Lan	20-25	~25	Ôn đới hải dương, UV thấp

Để đánh giá độ ổn định của kết quả, phân tích nhạy đã được thực hiện đối với hệ số dòng chảy, diện tích phủ và sự lão hóa vật liệu. Kết quả cho thấy, khi hệ số dòng chảy ψ thay đổi từ 0,8 đến 0,95, tải lượng COD sau xử lý chỉ biến động khoảng $\pm 10\%$, chứng minh độ ổn định của mô hình tính toán. Trong khi đó, diện tích phủ chỉ đạt 50% hoặc hiệu suất suy giảm 30% do lão hóa làm tải lượng COD sau xử lý tăng đáng kể, lần lượt lên hơn 1.000 kg/năm và gần 890 kg/năm. Điều này khẳng định rằng các yếu tố kỹ thuật trong thi công và bảo trì có ảnh hưởng lớn hơn nhiều so với biến thiên tự nhiên của hệ số dòng chảy.

3.3. So sánh quốc tế và ý nghĩa ứng dụng

Khi so sánh với các nghiên cứu quốc tế, mức giảm COD (50%) và photpho (60%) tại Hải Phòng cao hơn nhiều so với mức 20-40 % thường được ghi nhận tại các đô thị châu Âu, được thể hiện kết quả như trong Hình 6.



Hình 6. Sơ đồ minh họa tuyến đường khi có trận mưa cực đoan kết hợp với triều cường.

Kết quả chứng minh rằng Việt Nam có lợi thế tự nhiên nhờ cường độ UV cao, giúp tăng hiệu quả quang xúc tác. Ý nghĩa ứng dụng được thể hiện rõ ở chỗ tải lượng COD giảm gần 0,7 tấn/năm chỉ với một tuyến đường dài 2,1 km. Nếu mở rộng ra nhiều tuyến đường ven biển, lợi ích cộng dồn có

thể đạt hàng chục tấn COD và hàng trăm kg dinh dưỡng mỗi năm.

Điều này cho thấy lớp phủ quang xúc tác không chỉ góp phần giảm thiểu ô nhiễm nguồn nước mà còn giúp tăng khả năng chống chịu của đô thị ven biển trước các hiện tượng thời tiết cực đoan như trận mưa 200 mm ngày 9/6/2024.

4. Đánh giá hiệu quả và tính khả thi kỹ thuật của lớp phủ quang xúc tác TiO_2

4.1. Hiệu quả giảm tải ô nhiễm và các yếu tố chi phối

Kết quả tính toán cho thấy lớp phủ quang xúc tác TiO_2 có khả năng làm giảm đáng kể tải lượng các chất ô nhiễm chính trong nước mưa chảy tràn từ mặt đường đô thị ven biển. Mức giảm đạt được đối với COD, nitơ và phốt pho lần lượt xấp xỉ 50%, 40% và 60%, trong khi các kim loại nặng giảm khoảng 20%. Hiệu quả xử lý vẫn được duy trì trong kịch bản mưa cực đoan kết hợp triều cường, cho thấy tính ổn định của giải pháp trong điều kiện thủy văn bất lợi. Bên cạnh việc xác nhận tiềm năng xử lý của lớp phủ quang xúc tác đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu này còn đề xuất một khung đánh giá định lượng cho phép chuyển các hiệu suất xử lý từ quy mô thí nghiệm sang quy mô hạ tầng giao thông thực tế, thông qua việc tích hợp mô hình thủy học dòng chảy tràn với phân tích tải lượng ô nhiễm.

So sánh với các kết quả thử nghiệm thực địa đã được công bố tại các đô thị ôn đới cho thấy mức giảm COD và phốt pho trong nghiên cứu này nằm ở ngưỡng cao của phổ giá trị được ghi nhận. Sự khác biệt này được lý giải chủ yếu bởi điều kiện bức xạ mặt trời cao và thời gian chiếu sáng kéo dài trong khí hậu nhiệt đới ẩm, tạo điều kiện thuận lợi cho các phản ứng quang xúc tác diễn ra liên tục và hiệu quả hơn. Điều này đặc biệt có ý nghĩa đối với các đô thị ven biển Việt Nam, nơi cường độ bức xạ trung bình năm cao hơn so với nhiều khu vực châu Âu.

Kết quả phân tích nhạy cho thấy các tham số liên quan đến đặc tính thủy học, điển hình là hệ số dòng chảy, chỉ gây ra biến thiên tương đối nhỏ đối với tải lượng sau xử lý. Ngược lại, các tham số gắn với bản thân lớp phủ, bao gồm diện tích phủ hữu hiệu và sự suy giảm hiệu suất theo thời gian, đóng

vai trò chi phối rõ rệt. Kết quả này khẳng định rằng hiệu quả môi trường của lớp phủ quang xúc tác phụ thuộc chủ yếu vào chất lượng vật liệu, mức độ bao phủ và điều kiện bảo trì, hơn là các dao động ngắn hạn của điều kiện mưa - dòng chảy. Cách tiếp cận này cung cấp một công cụ phân tích có thể được sử dụng để đánh giá nhanh tiềm năng giảm tải ô nhiễm của các giải pháp vật liệu chức năng trên hạ tầng giao thông trong các điều kiện khí hậu và thủy văn khác nhau.

4.2. Tính khả thi kỹ thuật, độ bền và an toàn khai thác

Dưới góc độ kỹ thuật giao thông, lớp phủ quang xúc tác TiO_2 được xem là một lớp chức năng bề mặt, không tham gia vào cơ chế chịu lực của kết cấu áo đường. Do đó, việc áp dụng lớp phủ không làm thay đổi khả năng chịu tải của mặt đường và có thể được tích hợp vào các hoạt động bảo trì bề mặt định kỳ, như sơn phủ hoặc xử lý bề mặt, mà không yêu cầu can thiệp vào kết cấu áo đường hiện hữu. Cách tiếp cận này phù hợp với điều kiện quản lý, khai thác và bảo trì đường đô thị tại Việt Nam, nơi nguồn lực cho cải tạo kết cấu còn hạn chế.

Tuy nhiên, hiệu quả xử lý của lớp phủ có xu hướng suy giảm theo thời gian do tác động tổng hợp của mài mòn cơ học dưới tải trọng giao thông, bụi bẩn che phủ bề mặt hoạt tính và môi trường xâm thực đặc thù của khu vực ven biển. Phân tích nhạy cho thấy sự suy giảm hiệu suất theo thời gian có ảnh hưởng đáng kể đến tải lượng sau xử lý, qua đó nhấn mạnh vai trò của công nghệ thi công, lựa chọn vật liệu và chế độ bảo trì định kỳ trong việc duy trì hiệu quả lâu dài của giải pháp.

Bên cạnh đó, việc bổ sung lớp phủ bề mặt có khả năng làm thay đổi các chỉ tiêu đặc trưng của bề mặt đường, đặc biệt là độ nhám vi mô trong điều kiện ẩm ướt. Mặc dù lớp phủ không ảnh hưởng đến kết cấu chịu lực, các yêu cầu về an toàn khai thác, nhất là khả năng chống trơn trượt, cần được xem xét đồng thời trong quá trình triển khai thực tế. Do đó, lớp phủ quang xúc tác TiO_2 được đánh giá là phù hợp nhất khi được áp dụng theo hình thức thí điểm có kiểm soát, kết hợp với theo dõi kỹ thuật về độ bền bề mặt và an toàn giao thông, nhằm bảo đảm cân bằng giữa hiệu quả môi trường và yêu cầu khai thác mặt đường.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đề xuất một khung đánh giá định lượng nhằm phân tích khả năng ứng dụng lớp phủ quang xúc tác TiO_2 trong giảm tải ô nhiễm nước mưa chảy tràn từ hạ tầng giao thông đô thị ven biển, thông qua trường hợp nghiên cứu tuyến Võ Nguyên Giáp, Hải Phòng. Khung tính toán tích hợp giữa thủy học dòng chảy tràn và phân tích tải lượng ô nhiễm cho phép lượng hóa hiệu quả môi trường của giải pháp dưới các kịch bản mưa trung bình năm và mưa cực đoan.

Kết quả cho thấy lớp phủ TiO_2 có thể làm giảm đáng kể tải lượng các chất ô nhiễm chính, với mức giảm khoảng 50% đối với COD, 40% đối với nitơ, 60% đối với phốt pho và khoảng 20% đối với kim loại nặng. Phân tích nhạy cho thấy hiệu quả giảm tải phụ thuộc chủ yếu vào diện tích phủ hữu hiệu và sự suy giảm hiệu suất theo thời gian, trong khi các biến thiên của tham số thủy học chỉ gây ảnh hưởng hạn chế.

Từ góc độ kỹ thuật giao thông, lớp phủ TiO_2 có thể được tích hợp vào các hoạt động bảo trì bề mặt mặt đường mà không ảnh hưởng đến kết cấu chịu lực. Tuy nhiên, các vấn đề liên quan đến độ bền mài mòn và an toàn khai thác cần được đánh giá trong các nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo. Khung phân tích được đề xuất có thể hỗ trợ đánh giá tiềm năng của các giải pháp vật liệu thông minh trong quản lý ô nhiễm nước mưa chảy tràn tại các đô thị ven biển.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Phan Anh: đề xuất ý tưởng nghiên cứu, xây dựng phương pháp, thực hiện phân tích và viết bản thảo bài báo. **Bùi Ngọc Dung:** tham gia hỗ trợ thu thập dữ liệu, đóng góp ý kiến và kết hợp thực hiện phân tích trong quá trình hoàn thiện bản thảo.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

1st Nguyen Phan Anh*. Faculty of Civil Engineering, Vietnam Maritime University.

2nd Bui Ngoc Dung. Faculty of Technology and Engineering, Hai Phong University

*Corresponding author:

phananh.ctt@vamaru.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Gasperi *et al.*, "Micropollutants in urban stormwater: Occurrence, concentrations, and atmospheric contributions," *Environmental Science & Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 20–29, 2014, doi:10.1021/es403757t.
- [2] J. H. Lee and K. W. Bang, "Characterization of urban stormwater runoff," *Water Research*, vol. 34, no. 6, pp. 1773–1780, 2000, doi:10.1016/S0043-1354(99)00325-5.
- [3] J. J. Sansalone and C. M. Cristina, "First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 130, no. 11, pp. 1301–1314, 2004, doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:11(1301).
- [4] Weather-and-Climate, "Hai Phong - monthly rainfall and precipitation," [Online]. Available: <https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine>, Haiphong, Vietnam, accessed: September 30, 2025.
- [5] A. Fujishima and X. Zhang, "Titanium dioxide photocatalysis: Present situation and future approaches," *Comptes Rendus Chimie*, vol. 9, no. 5–6, pp. 750–760, 2006, doi:10.1016/j.crci.2005.02.055.
- [6] X. Chen and S. S. Mao, "Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications," *Chemical Reviews*, vol. 107, no. 7, pp. 2891–2959, 2007, doi:10.1021/cr0500535.
- [7] E. Boonen and A. Beeldens, "Photocatalytic roads: From lab tests to real scale applications," *European Transport Research Review*, vol. 5, pp. 79–89, 2013, doi: 10.1007/s12544-012-0085-6.
- [8] X. Zhang *et al.*, "Purification effect on runoff pollution of porous concrete with nano- TiO_2 photocatalytic coating," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 101, Art. no. 103101, 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.103101.
- [9] G. L. Guerrini, "Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome: NO_x monitoring results," *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 165–175, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.065.
- [10] M. V. Diamanti *et al.*, "Long term self-cleaning and photocatalytic performance of anatase-added mortars exposed to urban environment," *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp.

- 270–278, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.028.
- [11] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), *Stormwater Best Management Practice Design Guide*, 2004.
[Online]. Available: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=99739, accessed: October 05, 2025.
- [12] World Health Organization (WHO), *Guidelines for Drinking-water Quality*, 2nd ed., vol. 1. Geneva, Switzerland: WHO, 1993.
- [13] M. R. Hosseini and M. Madanian, “Application of photocatalytic materials for stormwater treatment: A review,” *Environmental Technology & Innovation*, vol. 9, pp. 351–364, 2018, doi: 10.1016/j.eti.2018.02.002.
- [14] C. Han, N. Zhang, and Y. Xu, “Long-term performance of TiO₂ coatings for pollution mitigation in urban environments,” *Science of the Total Environment*, vol. 691, pp. 806–815, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.136.
- [15] Bộ Tài nguyên và Môi trường, *QCVN 08-MT:2015/BTNMT – Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt*, Hà Nội, Việt Nam, 2015.