



Ứng dụng công nghệ vi sóng nâng cao tuổi thọ mỏi và tối ưu chi phí vòng đời của mặt đường bê tông nhựa trong đô thị

Control Application of Microwave Technology to Enhance Fatigue Life and Optimize Life-Cycle Cost of Urban Asphalt Pavements

Nguyễn Phan Anh^{1,*}, Cao Thị Hồng Hạnh²

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

²Khoa Kinh tế và Quản trị kinh doanh, Trường Đại học Hải Phòng

Từ khóa:

TÓM TẮT

Bê tông nhựa tự hàn gắn

Công nghệ vi sóng

Chỉ số hàn gắn

Chi phí vòng đời

Chỉ số kéo dài tuổi thọ mỏi

Nghiên cứu này đánh giá tiềm năng ứng dụng công nghệ tự hàn gắn bằng vi sóng cho mặt đường bê tông nhựa đô thị chịu tải trọng nặng thông qua mô phỏng hiệu chỉnh theo điều kiện tuyến Nguyễn Trường Tộ (Hải Phòng). Các chỉ số HI, HL, MR và FER được sử dụng để xác định chỉ số tổng hợp FLE nhằm phản ánh mức kéo dài tuổi thọ mỏi. Kết quả cho thấy BTN thông thường chỉ đạt mức phục hồi hạn chế (HI 20–30%, FER khoảng 35%, FLE gần 1,0). Khi bổ sung 25% bột sợi các-bon, FLE đạt khoảng 2,61; còn với 80% xỉ thép, FLE đạt khoảng 2,93, thể hiện tiềm năng kéo dài chu kỳ can thiệp lên 21–26 năm và giảm chi phí vòng đời đáng kể. Các kết quả cho thấy xu hướng cải thiện tuổi thọ khi áp dụng gia nhiệt vi sóng trong điều kiện đô thị tải trọng lớn.

Keywords:

ABSTRACT

Self-healing asphalt

Microwave

technology

Healing index

Life cycle cost

Fatigue life

extension

This study evaluates the potential of microwave-assisted self-healing for asphalt concrete on heavy-duty urban roads through calibrated simulation under the conditions of Nguyen Truong To Street (Hai Phong). Performance indices HI, HL, MR and FER are employed to determine the composite fatigue life extension index (FLE). Results indicate that conventional asphalt achieves limited recovery (HI 20–30%, FER $\approx$ 35%, FLE $\approx$ 1.0). With 25% carbon fiber powder, the FLE rises to about 2.61, while using 80% steel slag yields an FLE of approximately 2.93, suggesting the potential to extend maintenance cycles to 21–26 years and significantly reduce life-cycle costs. These outcomes reflect the predictive trend of fatigue improvement when microwave heating is applied under heavy urban traffic conditions.

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

Email: phananh.ctt@vimar.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150201>

Ngày nhận bài: 16/10/2025; Ngày nhận bài sửa: 23/01/2026; Ngày chấp nhận đăng: 03/03/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/03/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

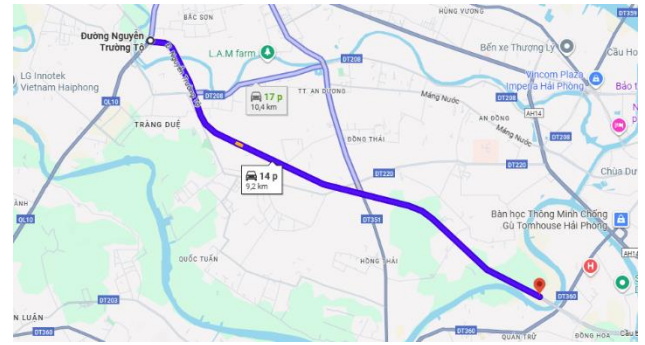
Trong những năm gần đây, hệ thống kết cấu áo đường bê tông nhựa (BTN) tại các đô thị Việt Nam chịu áp lực ngày càng lớn do sự gia tăng nhanh của lưu lượng phương tiện và tỷ trọng xe tải, xe buýt nặng. Dưới tác động lặp lại của tải trọng động, lớp nhựa mặt đường xuất hiện các vi nứt, sau đó lan truyền thành nứt lớn, bong tróc và hằn lún, làm suy giảm chất lượng phục vụ và rút ngắn tuổi thọ của kết cấu. Việc duy trì khả năng khai thác ổn định đòi hỏi không chỉ nâng cao hiệu năng kỹ thuật mà còn phải tối ưu chi phí vòng đời, đặc biệt trong điều kiện nguồn lực bảo trì còn hạn chế.

BTN vốn sở hữu khả năng tự hàn gắn tự nhiên thông qua sự khuếch tán và tái liên kết của bitum tại vùng vi nứt trong giai đoạn nghỉ không tải. Tuy nhiên, hiệu quả phục hồi này thường giới hạn ở mức 20-30 %, phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ, thời gian nghỉ và trạng thái ứng suất. Do đó, cơ chế tự nhiên không đủ để duy trì độ bền mỗi dài hạn trên các tuyến đường có lưu lượng tải trọng nặng cao, nhất là trong điều kiện khí hậu nóng ẩm và mưa nhiều tại Việt Nam.

Nhằm tăng cường khả năng phục hồi của BTN, nhiều công nghệ chủ động đã được phát triển, bao gồm vi nang chứa chất hàn gắn, gia nhiệt cảm ứng bằng sợi thép, gia nhiệt vi sóng bằng bột sợi carbon (CFP) hoặc xỉ thép, và các hệ hybrid kết hợp nhiều cơ chế. Các kết quả quốc tế cho thấy các vật liệu hấp thụ vi sóng, đặc biệt là CFP và xỉ thép, giúp cải thiện đáng kể quá trình phục hồi nứt mỗi: chỉ số kéo dài tuổi thọ mỗi (FLE) có thể tăng khoảng 2,6 đến gần 3 lần so với BTN thường [1], [2]. Những giá trị này phản ánh tiềm năng kỹ thuật của công nghệ, đồng thời gợi mở khả năng giảm chu kỳ can thiệp và chi phí vòng đời khi được áp dụng đúng điều kiện kết cấu và tải trọng. Tuy nhiên, ở Việt Nam, các nghiên cứu hiện có mới dừng lại ở mức tổng quan hoặc thí nghiệm quy mô nhỏ, chưa hình thành được phương pháp đánh giá định lượng có xét đến đặc trưng kết cấu, lưu lượng và khí hậu thực tế.

Xuất phát từ khoảng trống này, bài báo được triển khai nhằm đánh giá tiềm năng ứng dụng công nghệ gia nhiệt vi sóng trong phục hồi nứt mỗi BTN dưới điều kiện khai thác thực tế của đô thị. Tuyến

Nguyễn Trường Tộ (Hải Phòng) thể hiện ở Hình 1, được lựa chọn làm trường hợp nghiên cứu nhờ tỷ trọng xe tải và xe buýt cao, khiến mức độ suy giảm mỗi diễn ra nhanh hơn so với các tuyến đô thị thông thường. Đồng thời, tuyến đường có thông tin kết cấu rõ ràng với lớp BTN tổng cộng 12 cm (5 cm C12,5 + 7 cm C19), cùng số liệu lưu lượng thực tế được quy đổi theo TCVN 13592:2022.



Hình 1. Toàn tuyến đường Nguyễn Trường Tộ, Hải Phòng. (Nguồn: google.maps)

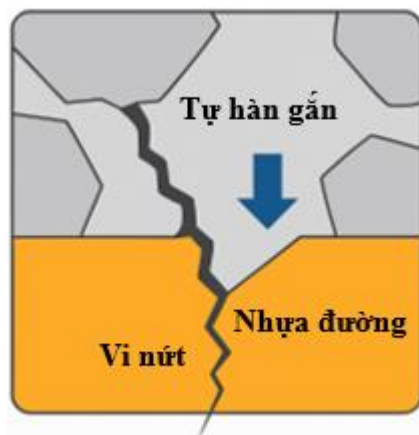
Trong khuôn khổ nghiên cứu, bài báo sử dụng phương pháp phân tích tổng hợp kết hợp mô phỏng định lượng. Các chỉ số bao gồm chỉ số hàn gắn (HI), chỉ số đồng đều nhiệt (HL), chỉ số mô đun phục hồi (MR), chỉ số phục hồi năng lượng gây nứt (FER) và FLE được kế thừa từ các công bố quốc tế có độ tin cậy, sau đó được chuẩn hóa và nội suy theo các tham số thực tế của tuyến đường, bao gồm chiều dày lớp BTN 12 cm, ứng suất đáy tương ứng, lưu lượng và tỷ trọng xe nặng. Nhờ đó, mô phỏng phản ánh được tương đối chính xác xu hướng cải thiện tuổi thọ mỗi khi áp dụng gia nhiệt vi sóng trong điều kiện BTN đô thị chịu tải trọng nặng, thay vì dựa trên các kịch bản giả định. Cách tiếp cận này phù hợp với bối cảnh Việt Nam khi chưa có thí nghiệm quy mô lớn, đồng thời cung cấp nền tảng định lượng quan trọng cho việc đề xuất thử nghiệm thực địa và xây dựng các hướng dẫn kỹ thuật trong tương lai.

2. Tổng quan công nghệ tự hàn gắn trong BTN

2.1. Khái quát cơ chế tự hàn gắn trong BTN

Cơ chế tự hàn gắn trong BTN thể hiện trong Hình 2, được xem là một quá trình vật liệu mang tính nhiệt - nhớt, xảy ra khi bitum có khả năng phục hồi liên kết tại vùng vi nứt trong điều kiện nghỉ không tải. Về bản chất, cơ chế này gồm hai giai đoạn chính: (i) chảy nhớt, khi bitum mềm hóa và

lan vào khe nứt nhờ ứng suất bề mặt; và (ii) khuếch tán phân tử, khi các chuỗi phân tử nhựa đường trao đổi vị trí qua mặt phân cách vết nứt, giúp tái thiết lập liên kết nội bộ. Hiệu quả của hai cơ chế phụ thuộc vào năng lượng hoạt hóa của bitum và điều kiện nhiệt độ, thời gian nghỉ, cũng như mức độ mở rộng của vết nứt.



Hình 2. Mô phỏng cơ chế tự hàn gắn của nhựa đường.

Quá trình tự hàn gắn chỉ được kích hoạt khi biên độ vi nứt đủ nhỏ để bitum có thể lấp đầy thông qua chuyển động phân tử. Các tham số vật liệu quan trọng chi phối mức độ hàn gắn gồm độ nhớt của nhựa đường, mức độ lão hóa, hàm lượng bột khoáng, cấu trúc vi mô của BTN và trạng thái ứng suất đáy lớp mặt. Nhiệt độ môi trường là yếu tố quyết định vì ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng dịch chuyển phân tử và tốc độ tái liên kết của bitum.

Để đánh giá định lượng quá trình phục hồi, nhiều chỉ số đã được phát triển trong các nghiên cứu quốc tế. HI biểu thị mức phục hồi cường độ; HL mô tả mức độ lan truyền nhiệt trong vùng xử lý; MR biểu thị khả năng khôi phục độ cứng sau kích hoạt; và FER phản ánh mức độ tái lập năng lượng phá hủy so với trạng thái ban đầu. Từ các chỉ số này, chỉ số tổng hợp FLE được xây dựng nhằm biểu diễn mức kéo dài tuổi thọ môi của BTN khi quá trình tự hàn gắn xảy ra ở mức tối ưu [3].

2.2. Công nghệ tự hàn gắn nội tại

Cơ chế tự hàn gắn nội tại được đặc trưng bởi khả năng phục hồi của nhựa đường dưới điều kiện nghỉ không tải, trong đó bitum có thể chảy và tái kết dính tại các vị trí vi nứt. Thí nghiệm mỗi ba điểm cho thấy, HI nội tại thường đạt mức 20-30%

sau 24-48 giờ ở nhiệt độ môi trường (20-25°C) [4]. Điều này đồng nghĩa, chỉ khoảng một phần ba cường độ ban đầu được phục hồi, và sự phục hồi này không ổn định nếu tải trọng được tái áp dụng liên tục. Hạn chế lớn nhất của cơ chế này là phụ thuộc mạnh vào điều kiện môi trường và thời gian nghỉ. Trong thực tế, BTN tại các tuyến đô thị hiếm khi được đặt trong điều kiện không tải đủ dài để cơ chế nội tại phát huy hiệu quả. Do đó, công nghệ nội tại chỉ được coi là nền tảng lý thuyết, không đủ để đảm bảo tuổi thọ dài hạn.

2.3. Công nghệ vi nang

Công nghệ vi nang được phát triển nhằm khắc phục hạn chế của cơ chế nội tại. Các vi nang chứa chất hàn gắn (như dầu, polymer, nhựa epoxy) được phân tán vào hỗn hợp BTN, khi vết nứt hình thành, vi nang vỡ ra và giải phóng chất hàn gắn vào khe nứt.

Thí nghiệm đã chứng minh, khi bổ sung 0,5% vi nang alginate, HI có thể tăng từ mức 45% (mẫu đối chứng) lên đến 62% [5]. Tuy nhiên, hiệu quả này giảm dần sau nhiều chu kỳ tải; các nghiên cứu chỉ ra vi nang đa lõi duy trì HI $\approx 60\%$ sau ba chu kỳ mỗi liên tiếp [6]. Điều này chứng minh khả năng cải thiện đáng kể nhưng vẫn có giới hạn về chu kỳ bền lâu. Về mặt ứng dụng, thách thức lớn nhất của công nghệ vi nang là chi phí sản xuất và khó khăn trong việc phân tán đều vi nang trong BTN mà không bị phá hủy trong quá trình trộn ở nhiệt độ cao (150-160°C). Ngoài ra, độ bền cơ học của vi nang cần được cân bằng: quá yếu sẽ vỡ sớm, quá bền sẽ không giải phóng được chất hàn gắn [7].

2.4. Công nghệ cảm ứng

Công nghệ cảm ứng hoạt động dựa trên nguyên lý trường điện từ cao tần, trong đó các sợi thép hoặc hạt kim loại dẫn điện được bổ sung vào BTN. Khi BTN được đặt trong trường cảm ứng, dòng điện xoáy sinh ra trong sợi thép sẽ tạo nhiệt cục bộ, làm mềm bitum và thúc đẩy quá trình tự hàn gắn.

Thực nghiệm đã chỉ ra rằng BTN chứa 4% sợi thép có thể phục hồi gần như hoàn toàn cường độ sau khi gia nhiệt 2-3 phút [8]. Thí nghiệm thực địa ở Hà Lan chứng minh tuổi thọ BTN tăng gấp 2-3 lần, tương ứng với FLE đạt mức 200-300% [9].

Ngoài ra, nghiên cứu về chu kỳ nhiều lần cũng cho thấy khả năng phục hồi ổn định, với HI duy trì >80% sau 5 chu kỳ gia nhiệt [10]. Hạn chế chính của công nghệ cảm ứng là yêu cầu thiết bị công suất cao, khó triển khai đồng bộ trên diện rộng, và chi phí bổ sung sợi thép. Ngoài ra, sự phân bố không đồng đều của sợi thép có thể tạo điểm nóng, ảnh hưởng đến chất lượng phục hồi.

2.5. Công nghệ vi sóng

Công nghệ vi sóng sử dụng các phụ gia hấp thụ sóng điện từ, như CFP hoặc xỉ thép, nhằm tạo nhiệt nhanh chóng và đồng đều trong BTN. Khi BTN chứa 25% CFP, tốc độ gia nhiệt được ghi nhận nhanh gấp 19 lần so với bột khoáng truyền thống, đồng thời khả năng đồng đều nhiệt (HL) đạt mức 55% [11].

Khi sử dụng 80% xỉ thép thay thế cốt liệu, các chỉ số HI = 92,8%, MR = 88%, FER = 90% và HL = 63,7% đã được ghi nhận [12]. Tuổi thọ mỗi được kéo dài khoảng 2,5 lần, khả năng chống hần lún tăng 60,7%, và độ bền nước tăng 5,97%. Các kết quả này chứng minh vi sóng là công nghệ hàn gắn hiệu quả nhất hiện nay, vừa mang lại lợi ích kỹ

thuật, vừa tận dụng phụ phẩm công nghiệp, phù hợp với định hướng phát triển bền vững. Hạn chế của công nghệ vi sóng là yêu cầu kiểm soát công suất để tránh quá nhiệt ($T_{bề\ mặt} > 90^{\circ}C$), đồng thời cần đánh giá sự ổn định của phụ gia hấp thụ sau nhiều chu kỳ gia nhiệt [13].

2.6. Hệ thống hybrid

Các nghiên cứu gần đây tập trung vào việc kết hợp nhiều cơ chế để tận dụng ưu điểm và giảm thiểu hạn chế, gọi là công nghệ hybrid. Ví dụ, sự kết hợp vi nang và sợi thép đã cho thấy HI duy trì >60% sau 8 chu kỳ gia nhiệt liên tiếp, trong khi BTN thường giảm xuống dưới 40% [14]. Ưu thế của hybrid là khả năng duy trì hiệu quả dài hạn, ngay cả khi một cơ chế giảm hiệu lực. Tuy nhiên, chi phí cao, quy trình chế tạo phức tạp, và khó kiểm soát sự phân bố đồng đều vẫn là rào cản lớn cho ứng dụng quy mô lớn.

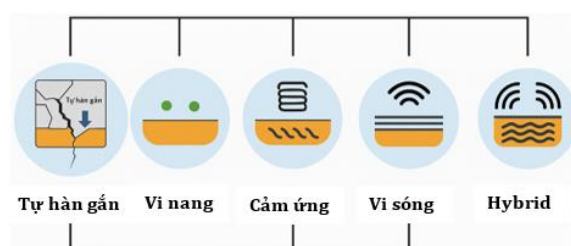
2.7. Phân tích tổng hợp và so sánh

Từ so sánh trong Bảng 1, có thể nhận định vi sóng và cảm ứng là hai công nghệ tiềm năng nhất cho ứng dụng quy mô lớn, trong khi vi nang và hybrid thích hợp cho nghiên cứu và thử nghiệm.

Bảng 1. So sánh các công nghệ tự hàn gắn BTN

Công nghệ	HI (%)	FER (%)	FLE	Ưu điểm	Hạn chế
Nội tại	20-30	-	≈1,0	Tự nhiên, không cần phụ gia	Hiệu quả thấp, phụ thuộc môi trường
Vi nang	~62	-	≈1,5	Cải thiện khả năng tự phục hồi	Chi phí cao, giới hạn chu kỳ
Cảm ứng	85-95	70-80	2-3,0	Phục hồi nhanh, hiệu quả cao	Yêu cầu thiết bị, chi phí cao
Vi sóng	90-93	90	2,5-3,0	Hiệu quả vượt trội, tận dụng phế thải	Cần kiểm soát nhiệt, ổn định phụ gia

Tổng hợp các công nghệ tự hàn gắn trong BTN hiện nay đang được nghiên cứu và ứng dụng được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Các công nghệ hàn gắn.

3. Cơ sở nghiên cứu

3.1. Hệ thống chỉ số đánh giá khả năng tự hàn gắn

Để định lượng mức độ tự hàn gắn trong BTN, một hệ thống chỉ số chuẩn đã được phát triển và áp dụng rộng rãi. Các chỉ số này bao gồm: HI, HL, MR và FER. Ngoài ra, chỉ số tổng hợp FLE được đề xuất để đánh giá mức độ kéo dài tuổi thọ môi nhờ hiệu ứng hàn gắn [15].

Công thức xác định:

$$HI = \frac{S_r}{S_0} \times 100 \quad (1)$$

với S_r là cường độ sau phục hồi, S_0 là cường độ ban đầu;

$$HL = \frac{A_r}{A_t} \times 100 \quad (2)$$

Với A_r là diện tích phục hồi đạt yêu cầu nhiệt, A_t là diện tích toàn bộ vùng;

$$MR = \frac{E_r}{E_0} \times 100 \quad (3)$$

Với E_r là mô đun đàn hồi sau phục hồi, E_0 là mô đun ban đầu;

$$FER = \frac{G_r}{G_0} \times 100 \quad (4)$$

Trong đó G_r là năng lượng gãy nứt sau phục hồi; G_0 là năng lượng gãy nứt ban đầu

Các công thức trên được áp dụng nhằm đảm bảo sự so sánh định lượng giữa các kịch bản công nghệ khác nhau.

3.2. Chỉ số tổng hợp FLE

Do mỗi chỉ số chỉ phản ánh một khía cạnh của khả năng hàn gắn, chỉ số tổng hợp FLE được xây dựng để đánh giá ảnh hưởng đến tuổi thọ môi. Công thức gộp được đề xuất [7]:

$$FLE = 0,7 \times \frac{HI}{HI_{ref}} + 0,3 \times \frac{FER}{FER_{ref}} \quad (5)$$

với $HI_{ref} = 30\%$; $FER_{ref} = 35\%$ là giá trị tham chiếu từ cơ chế tự hàn gắn nội tại (giá trị cơ sở); trọng số 0,7 và 0,3 phản ánh vai trò ưu tiên của HI

trong việc phục hồi khả năng chịu tải, trong khi FER đóng vai trò bổ sung trong đánh giá tổng thể;

3.3. Cơ sở phân tích chi phí vòng đời

Để lượng hóa lợi ích kinh tế, phân tích LCC được áp dụng. Công thức tổng quát được chuẩn hóa theo ISO 15686 [5]:

$$LCC = C_0 + \sum \frac{C_{bt,k}}{(1+r)^{t_k}} \times 100 \quad (6)$$

trong đó C_0 chi phí đầu tư ban đầu; $C_{bt,k}$ là chi phí bảo trì lần k ; t_k là năm can thiệp thứ k ; r là suất chiết khấu (có thể lấy 6%/năm).

Để tránh sai số do khác biệt đơn giá giữa các địa phương, LCC được báo cáo dưới dạng tỷ lệ tương đối so với giá trị cơ sở. Tham số nhạy cảm $\lambda = C_0/PV_{ht}$ được dùng để điều chỉnh tỷ trọng giữa chi phí đầu tư và chi phí bảo trì với PV_{ht} là giá trị hiện tại của tổng chi phí bảo trì trong suốt chu kỳ 30 năm đối với kịch bản BTN thường.

$$PV_{ht} = \sum \frac{C_{bt,k}}{(1+r)^{t_k}} \quad (7)$$

Đại lượng λ phản ánh tỷ lệ giữa chi phí đầu tư ban đầu và chi phí bảo trì của kịch bản chuẩn (giá trị cơ sở): nếu λ lớn $\rightarrow$ chi phí đầu tư ban đầu chiếm ưu thế, chi phí bảo trì nhỏ (ví dụ với kết cấu dày, tuổi thọ dài); nếu λ nhỏ $\rightarrow$ chi phí bảo trì chiếm ưu thế, chi phí đầu tư ban đầu ít quan trọng hơn (ví dụ với kết cấu mỏng, mau hư hỏng);

Trong phân tích nhạy cảm, λ thường được chọn trong khoảng 0,5-1,5, để xem kịch bản “công nghệ hàn gắn” còn lợi thế hay không khi tỷ trọng chi phí ban đầu và bảo trì thay đổi.

3.4. Minh họa tính toán các chỉ số

3.4.1. BTN thường (giá trị cơ sở)

Trong điều kiện khai thác thực tế, HI nội tại chỉ đạt 20-30% [6], $FER \approx 35\%$. Khi áp dụng công thức FLE:

$$FLE = 0,7 \times \frac{25}{30} + 0,3 \times \frac{35}{35} \approx 0,88 \quad (8)$$

Do đó, $FLE \approx 1,0$ (quy chuẩn giá trị cơ sở). Chu kỳ can thiệp giả định 8-9 năm.

3.4.2. BTN chứa vi nang (0,5%)

Thí nghiệm cho HI $\approx 62\%$ [9]. FER chưa cao, chỉ đạt 40%. Khi áp dụng:

$$FLE = 0,7 \times \frac{62}{30} + 0,3 \times \frac{40}{35} \approx 1,57 \quad (9)$$

Chu kỳ can thiệp có thể kéo dài 1,5 lần so với giá trị cơ sở.

3.4.3. BTN chứa sợi thép (4%) – công nghệ cảm ứng

HI phục hồi gần như 100% [10], FER $\approx 75\%$. Khi áp dụng công thức:

Tuổi thọ mỗi có thể tăng gần gấp 3 lần, khớp với kết quả thực địa [16].

3.4.4. BTN chứa (CFP-25%) – công nghệ vi sóng

HI $>90\%$, FER $\approx 60\%$ [1]. Khi áp dụng:

$$FLE = 0,7 \times \frac{90}{30} + 0,3 \times \frac{60}{35} \approx 2,61 \quad (10)$$

Chu kỳ can thiệp kéo dài gấp 2,6 lần giá trị cơ sở.

3.4.5. Cốt liệu xỉ thép cho BTN tự hàn gắn bằng vi sóng (SSAM-80%) – công nghệ vi sóng

HI = 92,8%, FER = 90% [2]. Khi áp dụng:

$$FLE = 0,7 \times \frac{92,8}{30} + 0,3 \times \frac{90}{35} \approx 2,93 \quad (11)$$

Chu kỳ can thiệp kéo dài gần gấp 3 lần giá trị cơ sở.

3.5. Phân tích so sánh

Từ kết quả tính toán, có thể so sánh hiệu quả tương đối:

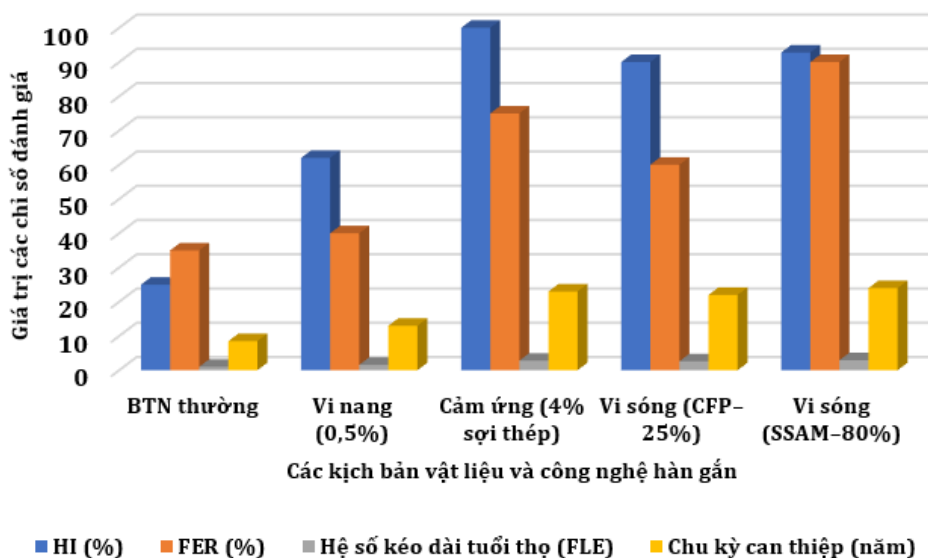
- Cơ chế nội tại: chỉ phục hồi 20-30% HI, FLE $\approx 1,0$ $\rightarrow$ không đủ duy trì dài hạn.

- Vi nang: cải thiện lên HI = 62%, FLE $\approx 1,5$ $\rightarrow$ tiềm năng nhưng chi phí cao.

- Cảm ứng: HI $\approx 100\%$, FER = 75%, FLE $\approx 2,8$ $\rightarrow$ hiệu quả cao, thực địa chứng minh.

- Vi sóng (CFP-25%): HI $>90\%$, FER = 60%, FLE = 2,61 $\rightarrow$ hiệu quả bền vững, chi phí hợp lý.

- Vi sóng (SSAM-80%): HI = 92,8%, FER = 90%, FLE = 2,93 $\rightarrow$ hiệu quả tối đa, kết hợp lợi ích môi trường.



Hình 4. Kết quả tính toán HI, FER, FLE cho 5 công nghệ.

Tổng hợp kết quả tính toán giữa các công nghệ như trong Hình 4 cho thấy, các công nghệ kích thích (cảm ứng, vi sóng) vượt trội hơn hẳn so với cơ chế nội tại và vi nang. Vi sóng đặc biệt nổi bật khi tận dụng phụ phẩm công nghiệp, vừa đạt HI $>90\%$, vừa kéo dài tuổi thọ mỗi gần gấp 3 lần. Điều

này khẳng định vi sóng và cảm ứng là hướng ứng dụng có tiềm năng lớn nhất tại các tuyến đường đô thị tải trọng nặng ở Việt Nam.

4. Trường hợp điển hình – Ứng dụng trên tuyến Nguyễn Trường Tộ (Hải Phòng)

4.1. Đặc điểm tuyến và kết cấu áo đường

Tuyến Nguyễn Trường Tộ là một trong những trục giao thông quan trọng thuộc hành lang Đông - Tây của thành phố Hải Phòng, tiếp nhận lưu lượng hỗn hợp lớn với tỷ trọng phương tiện nặng chiếm ưu thế. Điều kiện khí hậu khu vực Đông Bắc Bộ, với đặc trưng nhiệt độ mùa đông có thể xuống 8°C, trong khi nhiệt độ mặt đường mùa hè vượt 60°C; độ ẩm không khí phổ biến ở mức 85-100% và lượng mưa hàng năm cao. Sự kết hợp giữa biên độ nhiệt lớn và độ ẩm cao tạo ra môi trường khai thác bất lợi, thúc đẩy quá trình hình thành, mở rộng và liên kết vi nứt trong lớp bê tông nhựa.

Kết cấu áo đường của tuyến đang là cấp cao A1, với chiều dày lớp BTN 12 cm (gồm 5 cm C12,5 + 7 cm C19). Các thông số kết cấu này được sử dụng trực tiếp làm đầu vào cho mô phỏng nhằm phản ánh đúng khả năng phân bố ứng suất và mức độ nhay mỏi của BTN dưới tác động tải trọng lặp.

Lưu lượng xe thực tế [17] sau quy đổi sang xe con (PCU) cùng điều kiện khí hậu địa phương được

tích hợp vào mô hình tính toán để xác định các chỉ số hiệu năng tương ứng với từng kịch bản vật liệu hấp thụ vi sóng. Cách tiếp cận này cho phép mô phỏng được ảnh hưởng của tải trọng nặng và điều kiện môi trường đến sự suy giảm tuổi thọ mỏi của BTN khi áp dụng công nghệ gia nhiệt vi sóng.

4.2. Dữ liệu giao thông và quy đổi PCU

Để mô phỏng điều kiện tải trọng, số liệu lưu lượng trung bình ngày đêm (AADT) đã được thu thập và quy đổi sang xe con theo tiêu chuẩn TCVN 13592:2022, với tốc độ khai thác: xe máy <50 km/h, ô tô <60 km/h [18].

Công thức quy đổi được áp dụng:

$$PCU_{total} = \sum N_i \times f_i \quad (12)$$

Tỷ trọng của nhóm i :

$$p_i = 100 \times (N_i \times f_i) / PCU_{total} \quad (13)$$

Trong đó N_i là lưu lượng của nhóm i (xe/ngày) và f_i là hệ số quy đổi PCU.

Bảng 2. Quy đổi lưu lượng giao thông tuyến Nguyễn Trường Tộ theo TCVN 13592:2022.

Nhóm phương tiện	N (xe/ngđ)	f_i (PCU)	$N_i \times f_i$ (PCU/ngđ)	p_i (%)
Xe con	5.864	1,0	5.864,0	29,98
Xe tải nhỏ (2 trục, buýt nhỏ)	2.469	2,5	6.172,5	31,56
Xe tải lớn (≥ 3 trục, buýt lớn)	1.291	3,0	3.873,0	19,80
Xe buýt trung bình	654	2,5	1.635,0	8,36
Xe máy	4.882	0,3	1.464,6	7,49
Xe thô sơ	385	0,3	115,5	0,59
Xe khác	433	1,0	433,0	2,21
Tổng	15.978		19.557,6	100,00

Kết quả được thể hiện trong Bảng 2.

Kết quả cho thấy:

- Tổng PCU = 19.557,6 xe con/ngày đêm;
- Tỷ trọng phương tiện nặng (xe tải + xe buýt) = 59,72%.

Như vậy, tuyến Nguyễn Trường Tộ được xếp nhóm rủi ro mỗi cao, yêu cầu áp dụng công nghệ

hàn gắn có HI >90% và FLE >2,5 để đảm bảo tuổi thọ khai thác.

4.3. Giả định, chỉ số và phương pháp tính toán

Xây dựng kịch bản với các giả định và phương pháp tính toán đã được thiết lập như sau:

Lớp mặt BTN dày 12 cm (5 cm C12,5 + 7 cm C19), lớp dưới cấp phối đá dăm.

Chu kỳ giá trị cơ sở: 8-9 năm (BTN thường).

Chỉ số áp dụng: HI, HL, MR, FER, FLE, LCC.

Ràng buộc vận hành: $T_{\text{bề mặt}} < 90^{\circ}\text{C}$.

4.4. Kết quả tính toán và khuyến nghị vận hành

4.4.1. Kết quả chỉ số và FLE

Ba kịch bản được đánh giá bao gồm BTN thường, BTN + CFP-25% và BTN + SSAM-80%. Trong phạm vi nghiên cứu này, các chỉ số HI, FER và FLE được sử dụng dưới dạng các thước đo tương đối, nhằm so sánh xu hướng cải thiện hiệu năng giữa các kịch bản vật liệu trong cùng điều kiện kết cấu, lưu lượng và khí hậu của tuyến Nguyễn Trường Tộ.

Các giá trị HI và FER được kế thừa từ các nghiên cứu thực nghiệm quốc tế có độ tin cậy cao đối với từng loại vật liệu hấp thụ vi sóng, sau đó được tích hợp có kiểm soát trong cùng một khung điều kiện khai thác cụ thể của tuyến nghiên cứu, thay vì được diễn giải như các kết quả đo đặc trực tiếp tại hiện trường. Trên cơ sở đó, hệ số FLE được xác định như một chỉ số tổng hợp phản ánh mức độ kéo dài tuổi thọ mỗi tương đối so với kịch bản BTN thường, phù hợp cho phân tích trường hợp điển hình khi dữ liệu thí nghiệm quy mô lớn tại Việt Nam còn hạn chế.

Theo cách tiếp cận này, các kịch bản vật liệu cho thấy sự khác biệt rõ rệt về mức độ tiềm năng cải thiện khả năng hàn gắn và kéo dài tuổi thọ mỗi:

- Đối với BTN thường, các chỉ số hàn gắn ở mức thấp ($HI \approx 20\text{-}30\%$; $FER \approx 35\%$), tương ứng với hệ số FLE xấp xỉ 1,0, phản ánh khả năng tự phục hồi nội tại hạn chế của hỗn hợp không có cơ chế kích thích;

- Trường hợp BTN + CFP-25% thể hiện mức độ cải thiện đáng kể về khả năng hàn gắn, với HI vượt 90% và FER khoảng 60%, dẫn tới hệ số FLE khoảng 2,61, cho thấy tiềm năng kéo dài tuổi thọ mỗi ở mức hơn hai lần so với BTN thường trong cùng điều kiện khai thác;

- Kịch bản BTN + SSAM-80% đạt mức cải thiện cao nhất, với HI khoảng 92,8% và FER gần 90%, tương ứng hệ số FLE khoảng 2,93, phản ánh hiệu quả hàn gắn và khả năng kéo dài tuổi thọ mỗi vượt trội khi sử dụng vật liệu hấp thụ vi sóng có độ dẫn nhiệt và khả năng tích nhiệt cao.

Các giá trị này không được hiểu là kết quả đo trực tiếp tại hiện trường, mà là chỉ số tương đối phản ánh xu hướng và mức độ cải thiện hiệu năng giữa các kịch bản trong cùng điều kiện tuyến nghiên cứu, qua đó cung cấp cơ sở định lượng để đánh giá tiềm năng ứng dụng công nghệ gia nhiệt vi sóng cho mặt đường bê tông nhựa đô thị chịu tải trọng nặng.

Bảng tổng hợp kết quả các chỉ số được thể hiện như trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả chỉ số.

Hỗn hợp BTN	HI hiệu chỉnh	FER hiệu chỉnh	FLE hiệu chỉnh	Nhận xét
BTN thường	20–30%	$\approx 35\%$	$\approx 1,0$	Chỉ hồi phục rất thấp, không đủ duy trì tuổi thọ dài hạn
BTN + CFP-25%	$> 90\%$	$\approx 60\%$	2,61	Khả năng phục hồi tốt, hiệu quả kinh tế cao
BTN + SSAM-80%	92,8%	90%	2,93	Hiệu quả cao nhất, ổn định qua nhiều chu kỳ gia nhiệt

4.4.2. Chu kỳ can thiệp

$$t_{ct} = FLE \times t_{ch} \quad (14)$$

với t_{ct} là chu kỳ can thiệp dự kiến của kịch bản có áp dụng công nghệ hàn gắn (năm); t_{ch} là chu kỳ can thiệp chuẩn, tức là khoảng cách trung bình giữa hai lần duy tu của BTN thường (8-9 năm);

Do vậy:

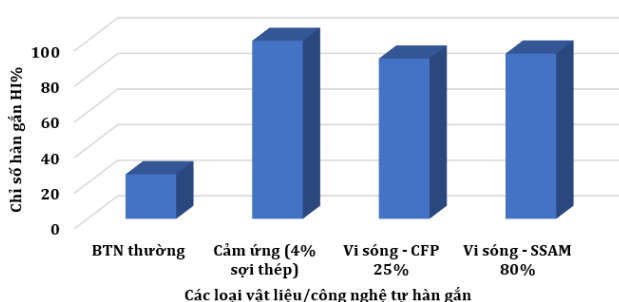
- CFP-25%: $2,61 \times (8\text{-}9) \approx 21\text{-}23$ năm;
- SSAM-80%: $2,93 \times (8\text{-}9) \approx 23\text{-}26$ năm.

Trong 30 năm: BTN thường tương ứng khoảng 3 lần can thiệp; hai kịch bản CFP-25% và SSAM-80% tương ứng ~ 1 lần can thiệp.

4.4.3. LCC tương đối

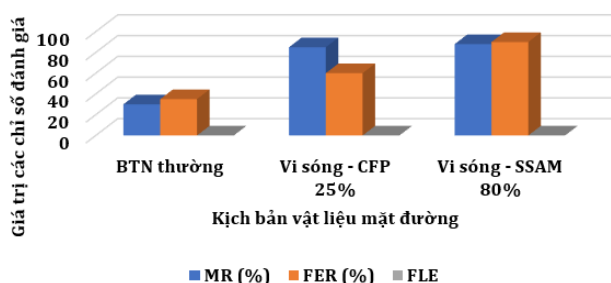
Chi phí vòng đời trong nghiên cứu này được hiểu theo nghĩa tương đối, phản ánh tác động của việc thay đổi số lần can thiệp bảo trì trong cùng khung thời gian phân tích, thay vì đại diện cho chi phí tuyệt đối của từng phương án. Chi phí vòng đời được so sánh dưới dạng tỷ lệ so với phương án BTN thường trong 30 năm, với giả thiết mốc can thiệp được quyết định chủ yếu bởi chu kỳ. Kết quả tương đối được giữ ở dạng khoảng:

- CFP-25%: LCC giảm khoảng 20–30% so với BTN thường:

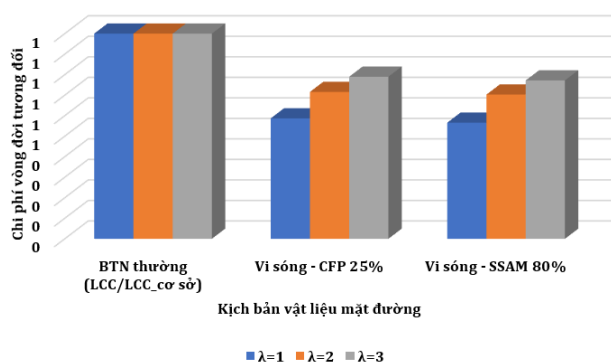


Hình 5. Biểu đồ so sánh HI theo công nghệ.

- SSAM-80%: LCC giảm đến khoảng 40% so với BTN thường:



Hình 6. Biểu đồ so sánh các chỉ số theo 3 kịch bản.



Hình 7. So sánh LCC theo tham số λ .

Các kết quả so sánh được thể hiện thông qua các giá trị từ Hình 5-7.

4.4.4. Khuyến nghị vận hành

Trên cơ sở các kết quả so sánh chỉ số hàn gắn, chu kỳ can thiệp và chi phí vòng đời, một số khuyến nghị vận hành được đề xuất cho mặt đường BTN đô thị chịu tải trọng nặng. Ở cấp quản lý mạng lưới, thời điểm can thiệp phù hợp được xác định vào khoảng nửa vòng đời khai thác, nhằm tận dụng hiệu quả hàn gắn trước khi hư hỏng phát triển mạnh. Ở cấp vị trí, can thiệp được khuyến nghị khi mức suy giảm cơ học của BTN tiệm cận ngưỡng tải đỉnh, nhằm tối ưu khả năng phục hồi mỗi tích lũy.

Việc theo dõi trạng thái mặt đường nên ưu tiên các phương pháp không phá hoại, như ảnh nhiệt để kiểm soát mức gia nhiệt và độ đồng đều nhiệt, kết hợp với đánh giá độ bằng phẳng và mật độ nứt nhằm xác định thời điểm kích hoạt phù hợp. Kết quả phân tích từ các biểu đồ so sánh thể hiện trong Hình 5-7, trong điều kiện lớp BTN dày 12 cm, CFP có ưu thế về tính kinh tế và khả năng gia nhiệt đồng đều, phù hợp cho triển khai sớm, trong khi SSAM đạt hiệu quả kỹ thuật cao hơn, thích hợp cho mục tiêu kéo dài tuổi thọ khai thác dài hạn.

4.5. Hạn chế và thách thức

Mặc dù các kết quả phân tích cho thấy tiềm năng rõ rệt của công nghệ gia nhiệt vi sóng, việc triển khai ngoài hiện trường vẫn tồn tại một số thách thức cần được xem xét. Hiệu quả gia nhiệt hiện chủ yếu tập trung ở lớp mặt, do đó khả năng phục hồi đối với các hư hỏng phát triển sâu trong kết cấu BTN còn cần được đánh giá bổ sung. Bên cạnh đó, việc gia nhiệt lặp lại nhiều chu kỳ có thể ảnh hưởng đến trạng thái lão hóa của bitum nếu không kiểm soát chặt chẽ nhiệt độ bề mặt và thời gian tác động.

Ngoài các yếu tố vật liệu, điều kiện tổ chức thi công trên tuyến đang khai thác, bao gồm an toàn giao thông và phạm vi vận hành thiết bị, cũng đặt ra những yêu cầu kỹ thuật và quản lý nhất định. Các hạn chế này cho thấy sự cần thiết của các nghiên cứu thực địa trong giai đoạn tiếp theo nhằm hiệu chỉnh tham số vận hành và hoàn thiện

quy trình áp dụng công nghệ vi sóng phù hợp với điều kiện Việt Nam.

5. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu đã xây dựng và áp dụng một khung đánh giá định lượng dựa trên hệ thống chỉ số hàn gắn (HI, FER) và hệ số kéo dài tuổi thọ mới (FLE) để phân tích tiềm năng ứng dụng công nghệ gia nhiệt vi sóng cho mặt đường bê tông nhựa đô thị chịu tải trọng nặng. Điểm mới của nghiên cứu không nằm ở việc đề xuất cơ chế hàn gắn, mà ở cách tích hợp có kiểm soát các chỉ số thực nghiệm quốc tế vào điều kiện khai thác cụ thể của tuyến Nguyễn Trường Tộ, thông qua các tham số kết cấu thực tế (BTN dày 12 cm), lưu lượng quy đổi PCU và đặc trưng khí hậu miền Bắc Việt Nam.

Kết quả phân tích cho thấy, trong cùng điều kiện tuyến, BTN thông thường chỉ đạt mức phục hồi hạn chế (HI khoảng 20-30%, FER gần 35%), tương ứng hệ số FLE xấp xỉ 1,0 và chu kỳ can thiệp khoảng 8-9 năm. Khi bổ sung vật liệu hấp thụ vi sóng, các chỉ số hàn gắn được cải thiện đáng kể, với kích bản CFP-25% đạt FLE khoảng 2,61 và kích bản SSAM-80% đạt FLE khoảng 2,93. Các giá trị này phản ánh xu hướng kéo dài tuổi thọ mặt tương đối của mặt đường khi áp dụng cơ chế gia nhiệt vi sóng, đồng thời cho thấy tiềm năng giảm chi phí vòng đời theo tỷ lệ trong các chiến lược bảo trì dài hạn.

Cần lưu ý rằng, mặc dù các giá trị chỉ số hàn gắn của từng loại vật liệu có thể tương đồng với các công bố trước, việc tích hợp các chỉ số này vào điều kiện kết cấu, lưu lượng và khí hậu cụ thể của tuyến nghiên cứu cho phép đánh giá sự khác biệt về mức độ cải thiện tương đối và hiệu quả khai thác, vốn không thể suy diễn trực tiếp từ các nghiên cứu độc lập trước đó.

Cần nhấn mạnh rằng, các hệ số FLE trong nghiên cứu được hiểu là chỉ số so sánh tương đối giữa các kích bản trong cùng điều kiện khai thác, thay vì các giá trị tuyệt đối đo trực tiếp tại hiện trường. Đây là hạn chế tất yếu trong bối cảnh Việt Nam hiện chưa có các dự án thí nghiệm quy mô lớn về bê tông nhựa tự hàn gắn bằng vi sóng, nhưng đồng thời cũng là lợi thế của cách tiếp cận nghiên cứu trường hợp điển hình, cho phép đánh giá định

hướng và sàng lọc công nghệ trước khi triển khai thực địa.

Từ các kết quả thu được, nghiên cứu kiến nghị cần triển khai các thử nghiệm thực địa có kiểm soát trên các tuyến đô thị chịu tải trọng nặng nhằm kiểm chứng xu hướng cải thiện tuổi thọ mặt, đồng thời hiệu chỉnh các tham số vận hành như công suất gia nhiệt, thời gian tác động và ngưỡng nhiệt độ bề mặt. Các nghiên cứu tiếp theo cũng cần mở rộng phân tích về ảnh hưởng của chiều sâu thẩm nhiệt và chu kỳ gia nhiệt lặp lại đến độ bền lâu dài của BTN, qua đó làm cơ sở xây dựng các hướng dẫn kỹ thuật cho ứng dụng công nghệ vi sóng trong bảo trì mặt đường bê tông nhựa tại Việt Nam.

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. **Cao Thị Hồng Hạnh:** 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 Cao Thi Hong Hanh. *Faculty of Economics & Business Administration, Haiphong University.*

*Corresponding author:

phananh.ctt@vimaru.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Li, A. Sha, Z. Wang, R. Song, and Y. Cao., "Investigation of the self-healing, road performance and cost-benefit effects of an iron tailing/asphalt mixture in pavement," *Construction and Building Materials*, 422, 135788, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135788
- [2] A. M.Rodríguez-Alloza, M.Sol-Sánchez, D.Garraín, and A.Jiménez del Barco Carrión, "Identification of the optimal implementation of the microwave self-healing technology for pavements based on

- sustainability assessment and technical parameters," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, Art. no. e03230, 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03230.
- [3] B. Shu, S. Wu, L. Dong, Q. Wang, and Q. Liu, "Microfluidic synthesis of Ca-Alginate microcapsules for self-healing of bituminous binder," *Materials*, vol. 11, no. 4, Art. no. 630, 2018, doi: 10.3390/ma11040630.
- [4] J. Su and E. Schlangen, "Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt," *Chemical Engineering Journal*, vols. 198–199, pp. 289–300, 2012, doi: 10.1016/j.cej.2012.05.094.
- [5] Á. García, J. Norambuena-Contreras, and M. N. Partl, "Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes," *Construction and Building Materials*, vol. 46, pp. 48–54, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.030.
- [6] A. Menozzi, Á. García, M. N. Partl, G. Tebaldi, and P. Schuetz, "Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples," *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 162–168, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.034.
- [7] Q. Liu, Á. García, E. Schlangen, and M. van de Ven, "Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 9, pp. 3746–3752, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.016.
- [8] E. Lizasoain-Arteaga, I. Indacoechea-Vega, P. Pascual-Muñoz, and D. Castro-Fresno, "Environmental impact assessment of induction-healed asphalt mixtures," *Journal of Cleaner Production*, vol. 208, pp. 1546–1556, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.223.
- [9] A. González, J. Norambuena-Contreras, L. Storey, and E. Schlangen, "Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating," *Journal of Environmental Management*, vol. 214, pp. 242–251, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.02.088.
- [10] B. Lou, A. Sha, D. M. Barbieri, Z. Liu, and W. Jiang, "Effect of metallic-waste aggregates on microwave self-healing performances of asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 246, Art. no. 118510, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118510.
- [11] M. Fakhri, B. B. Bahmai, S. Javadi, and M. Sharafi, "An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives," *Journal of Cleaner Production*, vol. 253, Art. no. 119963, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.119963.
- [12] U. A. Mannan, M. Ahmad, and R. A. Tarefder, "Influence of moisture conditioning on healing of asphalt binders," *Construction and Building Materials*, vol. 146, pp. 360–369, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.087.
- [13] B. Gómez-Meijide, H. Ajam, P. Lastra-González, and Á. García, "Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating," *Construction and Building Materials*, vol. 126, pp. 957–966, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.115.
- [14] M. Vila-Cortavitarte, D. Jato-Espino, D. Castro-Fresno, and M. Calzada-Pérez, "Self-healing capacity of asphalt mixtures including by-products both as aggregates and heating inductors," *Materials*, vol. 11, no. 5, Art. no. 800, 2018, doi: 10.3390/ma11050800.
- [15] S. Xu, Q. Liu, and H. Wang, "Indicators for evaluating self-healing capacity of asphalt materials," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. sup1, pp. S421–S435, 2019, doi: 10.1080/14680629.2019.1582710.
- [16] M. A. Franesqui, J. Yepes, and C. García-González, "Top-down cracking self-healing of asphalt pavements with steel filler from industrial waste applying microwaves," *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 612–620, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.161.
- [17] Sở Xây dựng Hải Phòng, "Báo cáo kết quả đếm xe Quý III năm 2025 tại Km 5+200, đường Nguyễn Trường Tộ, Hải Phòng," Hải Phòng, Việt Nam, 2025.
- [18] Bộ Khoa học và Công nghệ, *TCVN 13592:2022, Đường đô thị: Yêu cầu thiết kế*, Hà Nội, Việt Nam, 2022.