

ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG TỰ HÀN GẮN TRONG BÊ TÔNG NHỰA THÔNG QUA HỆ THỐNG CHỈ SỐ VÀ XU THẾ ỨNG DỤNG

EVALUATION OF SELF-HEALING CAPABILITY IN ASPHALT CONCRETE THROUGH PERFORMANCE INDEX SYSTEM AND APPLICATION TRENDS

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

*Email liên hệ: phananh.ctt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.2025.i84.903>

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày đánh giá khả năng tự hàn gắn của bê tông nhựa thông qua tổng quan công nghệ hiện tại và trường hợp điển hình tại tuyến Nguyễn Trường Tộ, Hải Phòng. Bốn hướng tiếp cận chính - “tự phục hồi nội tại, vi nang, gia nhiệt cảm ứng và gia nhiệt vi sóng” - được so sánh dựa trên các chỉ số như chỉ số hàn gắn (HI), mức độ hàn gắn (HL), khả năng kháng hằn lún và độ bền nước. Kết quả cho thấy cơ chế nội tại chỉ đạt HI 20-30%, trong khi vi nang cải thiện lên khoảng 62% nhưng giảm dần sau nhiều chu kỳ. Công nghệ cảm ứng và vi sóng thể hiện hiệu quả vượt trội, với HI đạt 85-100% và 92,8%. Phân tích giao thông xác định tổng lưu lượng 19.558 PCU/ngày, trong đó phương tiện nặng chiếm 59,72%, phản ánh nguy cơ mỏi cao. Ứng dụng công nghệ vi sóng với 25% bột sợi carbon (CFP) hoặc 80% xỉ thép (SSAM) cho thấy HI >90%, khả năng kháng hằn lún tăng 60,7% và độ bền nước cải thiện 5,97%. Khuyến nghị vận hành bao gồm can thiệp tại mốc nửa vòng đời hoặc gần ngưỡng SCB-P90, kết hợp theo dõi không phá hoại để duy trì hiệu quả hàn gắn. Các kết quả này khẳng định công nghệ vi sóng là giải pháp khả thi và bền vững cho mặt đường đô thị chịu tải trọng nặng ở Việt Nam.

Từ khóa: Bê tông nhựa tự hàn gắn, Chỉ số hàn gắn (HI), Gia nhiệt cảm ứng, Xi thép, Bột sợi carbon, Lưu lượng quy đổi PCU.

Abstract

The study presents an evaluation of self-healing asphalt mixtures through a review of current technologies and a case study on Nguyen Truong To Street in Hai Phong. Four main approaches—*intrinsic healing, microcapsules, induction heating, and microwave heating*—were compared using indicators such as *Healing Index (HI), Healing*

Level (HL), rutting resistance, and moisture resistance. Intrinsic healing showed limited effectiveness with HI of 20-30%, while microcapsules improved recovery up to ~62% but decreased after repeated cycles. Induction and microwave heating demonstrated superior results, with HI reaching 85-100% and 92.8%, respectively. Traffic analysis indicated a total of 19,558 PCU/day, with heavy vehicles accounting for 59.72%, confirming a high fatigue risk. Application of microwave heating with 25% carbon fiber powder (CFP) or 80% steel slag (SSAM) was shown to achieve HI >90%, improved rutting resistance by up to 60.7%, and enhanced moisture resistance by 5.97%. Operational recommendations suggested intervention at mid-life or near the SCB-P90 threshold, combined with non-destructive monitoring to sustain recovery efficiency. These findings highlight microwave heating as a technically feasible and sustainable solution for urban roads with heavy traffic conditions in Vietnam.

Keywords: Self-healing asphalt, Healing Index (HI), Induction heating, Steel slag, Carbon fiber powder, PCU traffic.

1. Mở đầu

Trong hơn nửa thế kỷ qua, bê tông nhựa (BTN) đã được sử dụng rộng rãi như vật liệu chủ yếu cho mặt đường mềm tại hầu hết các quốc gia. Đặc tính nổi bật của BTN nằm ở khả năng thi công thuận lợi, tính êm thuận khi khai thác, cũng như chi phí đầu tư ban đầu tương đối hợp lý. Tuy nhiên, BTN luôn chịu tác động đồng thời của tải trọng giao thông lặp lại và môi trường khí hậu khắc nghiệt. Các tác nhân đó gây ra nứt mỏi, hằn lún, bong bật bề mặt và sự suy giảm dần của mô đun đàn hồi, từ đó làm giảm đáng kể tuổi thọ công trình giao thông. Chi phí duy tu bảo trì BTN do

vậy chiếm tỷ trọng lớn trong vòng đời dự án, đặc biệt tại các nước đang phát triển, nơi điều kiện khai thác khắc nghiệt nhưng nguồn lực hạn chế.

Cơ chế hình thành hư hỏng của BTN đã được phân tích theo nhiều nghiên cứu. Nứt mỏi được xác định là hậu quả của ứng suất lặp lại vượt quá khả năng chống chịu vì cấu trúc của bitum. Sự xuất hiện vết nứt ban đầu thường khó quan sát, nhưng dưới tác động tải trọng và môi trường, vết nứt lan rộng và hợp nhất thành hư hỏng bề mặt. Các biện pháp bảo trì truyền thống như cào bóc, rải BTN hoặc vá cục bộ có thể phục hồi chức năng mặt đường, song lại gây gián đoạn giao thông và phát sinh lượng lớn khí thải, chất thải xây dựng. Do đó, một giải pháp vật liệu mới nhằm tự động phục hồi các hư hỏng nhỏ được xem là hướng đi đột phá trong lĩnh vực công nghệ mặt đường.

Khái niệm tự hàn gắn (self-healing) trong BTN được hình thành dựa trên cơ sở tính chất lưu biến của nhựa đường. Khi vết nứt kích thước nhỏ xuất hiện, khả năng chảy nhớt của bitum ở điều kiện nhiệt độ thích hợp cho phép hai bề mặt nứt dần dần dính lại [1]. Đây được gọi là cơ chế tự hàn gắn nội tại (intrinsic self-healing). Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, trong điều kiện nhiệt độ cao và tải trọng gián đoạn, chỉ số phục hồi cường độ uốn có thể đạt mức 20-30% so với ban đầu [2]. Tuy nhiên, mức độ này được xem là hạn chế và không đủ ngăn chặn sự phát triển của các hư hỏng nghiêm trọng [3]. Chính vì vậy, hướng nghiên cứu tăng cường cơ chế tự phục hồi bằng các công nghệ ngoại vi (extrinsic) đã được thúc đẩy mạnh mẽ trong hai thập kỷ gần đây.

Các công nghệ bổ sung được phát triển chủ yếu gồm ba nhóm. Thứ nhất, vi nang (microcapsule) chứa tác nhân phục hồi được trộn trực tiếp vào BTN. Khi vết nứt hình thành và phá vỡ vi nang, chất lỏng phục hồi (dầu tái sinh, polyme) sẽ được giải phóng, thấm vào vùng nứt và khôi phục tính liên kết [4]. Thứ hai, gia nhiệt bằng cảm ứng (induction heating) sử dụng các hạt hoặc sợi thép phân tán trong BTN. Khi đặt dưới trường điện từ xoay chiều, các phần tử này sinh nhiệt và làm mềm chảy bitum, từ đó hàn gắn khe nứt [5]. Thứ ba, gia nhiệt vi sóng (microwave heating) tận dụng khả năng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu dẫn điện (ví dụ xi thép, sợi carbon). Dưới bức xạ vi sóng, vật liệu nóng lên nhanh chóng và kích hoạt quá trình phục hồi [6]. Ngoài ra, còn có các nghiên cứu về hệ thống lai ghép (hybrid) kết hợp vi nang và gia nhiệt để tận dụng ưu điểm của cả hai phương pháp [7].

Để đánh giá hiệu quả phục hồi, nhiều chỉ số định lượng đã được phát triển. Chỉ số hàn gắn (Healing Index - HI) được định nghĩa thông qua tỷ lệ cường độ

hoặc mô đun sau phục hồi so với trước khi hư hỏng [8]. Trong thí nghiệm uốn 3 điểm, cường độ uốn ở chu kỳ thứ hai chia cho chu kỳ thứ nhất phản ánh trực tiếp HI. Ngoài ra, các chỉ tiêu khác như năng lượng phá hủy phục hồi, mô đun đàn hồi, hay tỷ lệ kéo dài tuổi thọ mỏi cũng được sử dụng [9]. Việc tiêu chuẩn hóa các chỉ số này đóng vai trò quan trọng để so sánh công nghệ và xác định liều lượng tối ưu.

Các công trình quốc tế đã báo cáo nhiều kết quả khả quan cho thấy mẫu BTN chứa 0,5% vi nang đạt $HI \approx 62\%$ ở 40°C sau 72 giờ nghỉ, trong khi mẫu đối chứng chỉ đạt $\approx 45\%$ [4] hay BTN trộn sợi thép có thể phục hồi gần như hoàn toàn độ cứng sau gia nhiệt cảm ứng 2-3 phút, và tuổi thọ mỏi kéo dài gấp đôi [5], ghi nhận BTN chứa 80% xi thép có $HI \approx 92,8\%$ khi gia nhiệt vi sóng 700 W trong 60 giây, đồng thời cải thiện đáng kể khả năng kháng hằn lún [6]. Những số liệu này cho thấy khả năng phục hồi có thể đạt tới 60-95% tùy công nghệ, vượt xa cơ chế tự nhiên vốn chỉ đạt 20-30%.

Mặc dù tiềm năng lớn, việc ứng dụng công nghệ BTN tự hàn gắn tại Việt Nam vẫn còn bỏ ngỏ. Các nghiên cứu trong nước chủ yếu dừng ở mức vật liệu tái chế, chưa có công trình nào triển khai vi nang hay gia nhiệt cảm ứng trên thực địa. Khoảng trống này đặc biệt đáng chú ý khi xét đến điều kiện Việt Nam: Khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa, lưu lượng xe tải nặng lớn tại các tuyến hành lang cảng biển, và ngân sách bảo trì hạn chế. Việc kéo dài tuổi thọ BTN thêm 5-10 năm thông qua công nghệ tự hàn gắn sẽ mang lại giá trị kinh tế và xã hội to lớn, giảm ùn tắc, tiết kiệm chi phí duy tu và giảm phát thải CO_2 từ sản xuất vật liệu mới.

Từ bối cảnh trên, nghiên cứu này được thực hiện theo phương pháp phân tích tổng hợp, chuẩn hóa chỉ số HI-FER-FLE, tính toán dựa trên mô hình quy đổi PCU theo TCVN 13592:2022 và mô phỏng chu kỳ can thiệp - chi phí vòng đời cho tuyến Nguyễn Trường Tộ để đánh giá định lượng theo chỉ số hàn gắn, và đề xuất khả năng ứng dụng tại Việt Nam. Cấu trúc nghiên cứu bao gồm: (i) tổng quan công nghệ theo từng nhóm chính; (ii) so sánh định lượng hiệu quả; (iii) nghiên cứu trường hợp áp dụng cho tuyến đường đô thị trọng điểm tại Hải Phòng; (iv) kết luận và kiến nghị chính sách. Bằng cách đó, bài viết nhằm cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn để khuyến nghị triển khai công nghệ BTN tự phục hồi tại Việt Nam trong thập kỷ tới.

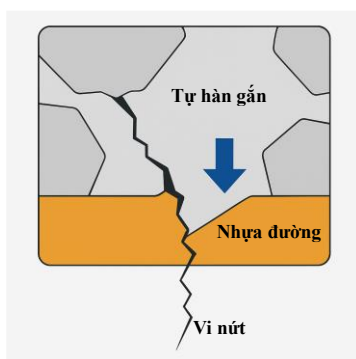
2. Tổng quan công nghệ tự hàn gắn trong bê tông nhựa

Khả năng tự hàn gắn trong bê tông nhựa được hiểu là quá trình phục hồi tính chất cơ học của vật liệu sau

Kỹ thuật và Công nghệ Hàng hải

khi hình thành vi nứt. Cơ chế này có thể diễn ra tự nhiên do bitum mềm hóa dưới tác động nhiệt hoặc được hỗ trợ bởi các giải pháp ngoại vi. Các nghiên cứu tổng quan gần đây đã cho thấy tự hàn gắn là một hướng tiếp cận bền vững nhằm kéo dài tuổi thọ và giảm chi phí vòng đời của kết cấu mặt đường.

Cơ chế nội tại như trong Hình 1, thường bị giới hạn do phụ thuộc vào độ nhớt của bitum. Thí nghiệm nghi mẫu 72 giờ ở 25-30°C cho thấy chỉ số HI chỉ đạt 20-30%, tức là vật liệu chỉ phục hồi được một phần nhỏ cường độ, không đủ để ngăn chặn nứt mới [8].



Hình 1. Sơ đồ cơ chế tự hàn gắn nội tại của nhựa đường

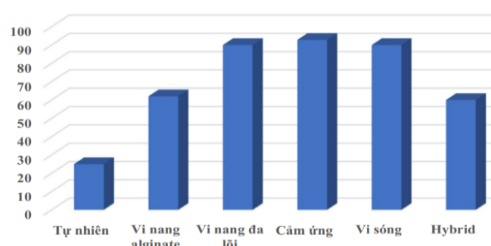
Một trong những công nghệ ngoại vi được nghiên cứu nhiều là vi nang chứa dầu tái sinh. Khi trộn 0,5% vi nang alginate vào BTN, HI có thể tăng từ 45% lên 62%, tức là cải thiện khoảng 15-20% so với mẫu đối chứng [3]. Với các thiết kế đa lõi, hiệu quả được duy trì ổn định hơn, khi HI vẫn đạt 58-61% sau ba chu kỳ thử nghiệm SCB ở 20°C [4]. Tuy nhiên, hiệu quả giảm nhanh nếu số chu kỳ vượt quá năm và nguy cơ tăng độ rỗng có thể ảnh hưởng đến độ bền nước.

Công nghệ gia nhiệt cảm ứng sử dụng sợi thép hoặc hạt dẫn từ trộn vào BTN. Khi chịu tác động từ trường xoay chiều, vật liệu dẫn sinh nhiệt cục bộ, làm mềm bitum và hàn gắn khe nứt. Thử nghiệm thực địa

đã cho thấy HI đạt 85-100% sau 2-3 phút gia nhiệt, trong khi tuổi thọ môi được kéo dài gấp 2-3 lần (FLE=200-300%) [8], với FLE là hệ số kéo dài tuổi thọ môi. Mặc dù hiệu quả cao, chi phí tăng thêm khoảng 25% và yêu cầu thiết bị chuyên dụng vẫn là rào cản chính.

Công nghệ gia nhiệt vi sóng tận dụng khả năng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu. Khi thay thế 80% cốt liệu bằng xi thép, HI đạt 92,8%, HL đạt 63,7%, khả năng chống hằn lún tăng 60,7% và độ bền nước cải thiện 5,97% [9]. Trong khi đó, việc thay thế 25% filler (filler - bột khoáng mịn trong hỗn hợp BTN) bằng bột sợi carbon (CFP) đã chứng minh tốc độ gia nhiệt cao gấp 19 lần so với filler truyền thống, đồng thời HI cải thiện rõ ở điều kiện nhiệt độ thấp [10]. Phương pháp này đặc biệt có ý nghĩa khi gắn với việc tận dụng phụ phẩm công nghiệp và giảm phát thải CO₂ vòng đời.

Các hệ thống lai ghép giữa vi nang và gia nhiệt cảm ứng hoặc vi sóng cũng đã được thử nghiệm. Kết quả cho thấy HI vẫn duy trì trên 60% sau tám chu kỳ SCB, trong khi BTN thường giảm xuống dưới 40% [11], kết quả so sánh thể hiện ở Hình 2. Mặc dù còn phức tạp và chi phí cao, hướng tiếp cận này mở ra triển vọng trong bảo trì dài hạn.



Hình 2. Đồ thị so sánh HI% giữa 4 công nghệ chính [8-10]

Các số liệu so sánh trong Bảng 1 đã khẳng định: Cơ chế nội tại chỉ mang tính bổ trợ; vi nang thích hợp cho các nghiên cứu thí điểm; cảm ứng và vi sóng

Bảng 1. So sánh các công nghệ tự hàn gắn trong bê tông nhựa

Công nghệ	HI (%)	Đặc trưng nổi bật	Hạn chế chính
Nội tại	20-30	Dựa vào dòng chảy bitum ở nhiệt độ môi trường	Hiệu quả rất thấp
Vi nang	~62	Tự giải phóng dầu tái sinh, cải thiện HI	Giảm hiệu quả sau nhiều chu kỳ
Cảm ứng	85-100	Gia nhiệt nhanh, tăng tuổi thọ môi 2-3 lần	Chi phí cao, thiết bị chuyên dụng
Vi sóng (xi thép)	92,8	HI cao, HL 63,7%, khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe ↑ 60,7%, khả năng kháng ẩm của BTN ↑ 5,97%	Kiểm soát phân bố nhiệt
Vi sóng (CFP)	>90	Tốc độ gia nhiệt gấp 19 lần, chống nứt nhiệt độ thấp	Nghiên cứu mới, cần tối ưu
Hybrid	>60 (sau 8 chu kỳ)	Duy trì hiệu quả dài hạn nhiều chu kỳ	Chế tạo phức tạp, chi phí

chứng minh hiệu quả vượt trội về cơ học và vòng đời; còn hệ thống lai ghép mở ra hướng phát triển bền vững trong tương lai.

3. So sánh định lượng hiệu quả các công nghệ tự hàn gắn

3.1. Các công thức cơ bản đánh giá khả năng tự hàn gắn

Trong nghiên cứu về khả năng tự hàn gắn của bê tông nhựa, nhiều công thức đã được thiết lập nhằm định lượng mức độ phục hồi cơ học của vật liệu. Các công thức cơ bản được sử dụng phổ biến gồm:

(i) Chỉ số hàn gắn (Healing Index - HI):

$$HI = (\sigma_h / \sigma_0) \times 100\% \quad (1)$$

Với σ_h là cường độ chịu uốn hoặc chịu kéo sau khi vật liệu trải qua một chu kỳ tự hàn gắn; σ_0 : cường độ ban đầu trước khi xảy ra hư hỏng; HI: tỷ lệ phần trăm khả năng phục hồi cường độ;

(ii) Tỷ lệ phục hồi mô đun (Modulus Recovery Ratio - MR):

$$MR = (E_h / E_0) \times 100\% \quad (2)$$

Trong đó, E_h là mô đun đàn hồi sau khi hàn gắn; E_0 : mô đun đàn hồi ban đầu;

(iii) Chỉ số phục hồi năng lượng phá hủy (Fracture Energy Recovery Index - FER):

$$FER = (U_h / U_0) \times 100\% \quad (3)$$

Với U_h là năng lượng phá hủy được hấp thụ bởi mẫu sau khi hàn gắn; U_0 là năng lượng phá hủy ban đầu.

(iv) Tỷ lệ kéo dài tuổi thọ mỏi (Fatigue Life Extension - FLE):

$$FLE = (N_h / N_0) \times 100\% \quad (4)$$

Với N_h là số chu kỳ chịu tải đến phá hủy sau khi có cơ chế hàn gắn; N_0 là số chu kỳ chịu tải đến phá hủy đối với vật liệu không có cơ chế hàn gắn.

Các công thức từ (1) đến (4) trên cho phép đánh giá khả năng tự phục hồi của bê tông nhựa từ nhiều góc độ: Cường độ, độ cứng, năng lượng và tuổi thọ mỏi. Trong nhiều nghiên cứu, HI được coi là chỉ số cơ bản nhất và được áp dụng rộng rãi [1, 2, 12].

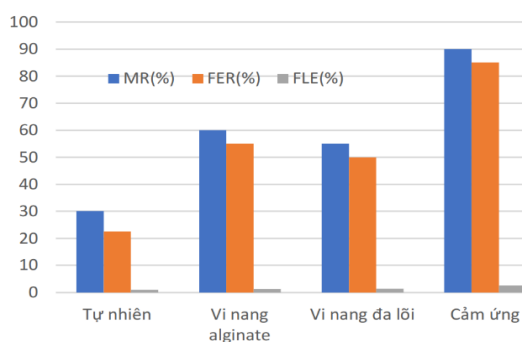
3.2. Phân tích so sánh

Khi đối chiếu các công nghệ tự hàn gắn, có thể nhận thấy cơ chế nội tại chỉ mang lại hiệu quả hạn chế với HI đạt 20-30% sau thời gian nghỉ trong điều kiện môi trường, tức là vật liệu chỉ phục hồi được một phần nhỏ cường độ và không đủ để duy trì tuổi thọ dài hạn. Việc bổ sung vi nang chứa dầu tái sinh giúp cải thiện rõ rệt, với HI tăng từ 45% lên 62% khi sử dụng 0,5% alginate, tương ứng mức phục hồi cao hơn 15-20% so với mẫu đối chứng; tuy nhiên, hiệu quả này giảm dần khi lặp lại nhiều chu kỳ, mặc dù vi nang đa lõi vẫn có thể duy trì HI ở khoảng 60% sau ba chu kỳ [6,7]. Trong khi đó, công nghệ cảm ứng cho thấy khả năng phục hồi gần như toàn phần khi trộn 4% sợi thép, với HI đạt 85-100% chỉ sau 2-3 phút gia nhiệt, đồng thời tuổi thọ mỏi tăng gấp 2-3 lần ($FLE = 200-300\%$), minh chứng cho hiệu quả vượt trội trong điều kiện thực địa [8]. Tương tự, gia nhiệt vi sóng với hàm lượng xi thép tới 80% đã đạt HI 92,8%, MR 88% và FER 90% sau 60 giây ở công suất 700 W, qua đó kéo dài tuổi thọ mỏi khoảng 2,5 lần; ngoài ra, khả năng chống hàn lún được cải thiện 60,7% và độ bền nước tăng thêm 5,97% [9], số liệu và biểu đồ so sánh giữa các công nghệ được thể hiện ở Bảng 2 và Hình 3. Đáng chú ý, các hệ thống lai ghép giữa vi nang và cảm ứng hay vi sóng cho thấy ưu thế duy trì hiệu quả dài hạn, khi HI vẫn đạt trên 60% sau tám chu kỳ SCB trong khi mẫu BTN thường giảm xuống dưới 40% [11].

Từ các kết quả trên có thể khẳng định rằng cơ chế nội tại chỉ giữ vai trò bổ trợ, vi nang cải thiện nhưng hiệu quả giới hạn, trong khi cảm ứng và vi sóng đạt hiệu quả vượt trội cả về HI lẫn tuổi thọ mỏi, đồng thời hệ thống lai ghép cho thấy triển vọng trong bảo trì

Bảng 2. So sánh các chỉ tiêu tự hàn gắn theo công nghệ

Công nghệ	Điều kiện thí nghiệm	MR (%)	FER (%)	FLE (%)	Ghi chú
Tự nhiên (nội tại)	Mẫu đầm uốn, 25-30 °C, nghỉ 72 h	25-35	20-25	1,0×	Chỉ phục hồi một phần
Vi nang alginate (0,5%)	Uốn 3 điểm, 40°C, 72 h	60	55	1,2×	Cải thiện 15-20%
Vi nang đa lõi (1,0%)	SCB test, 20°C, 3 chu kỳ	55	50	1,3×	Duy trì sau 3 chu kỳ
Cảm ứng (sợi thép 4%)	Hà Lan, máy cảm ứng, 2-3 phút	80-95	85	2,0-3,0×	Thực địa
Vi sóng (xi thép 80%)	Marshall, 700 W, 60 s	88	90	2,5×	Cải thiện cơ học rõ rệt
Hybrid (vi nang + cảm ứng)	SCB test, 8 chu kỳ	65	62	1,8×	Duy trì nhiều chu kỳ



Hình 3. Biểu đồ so sánh MR, FER và FLE của các công nghệ [8-10]

nhiều chu kỳ. Về khía cạnh kinh tế, cảm ứng làm tăng chi phí ban đầu khoảng 25% nhưng đổi lại tuổi thọ mặt đường kéo dài 2-3 lần, vi sóng tận dụng xi thép rẻ và mang lại lợi ích bền vững hơn, trong khi vi nang hiện còn đắt đỏ và khó thương mại hóa. Như vậy, so sánh định lượng đã chỉ ra rằng cảm ứng và vi sóng là hai công nghệ khả thi nhất cho ứng dụng quy mô lớn, còn vi nang và hybrid phù hợp cho nghiên cứu và các thử nghiệm bước đầu.

4. Trường hợp điển hình - ứng dụng trên tuyến Nguyễn Trường Tộ (Hải Phòng)

4.1. Bối cảnh và điều kiện tuyến đường

Nghiên cứu được thực hiện dưới dạng phân tích tổng hợp kết hợp mô phỏng định lượng, không tiến hành thí nghiệm trực tiếp. Phạm vi tập trung vào việc đánh giá tiềm năng ứng dụng công nghệ hàn gắn bằng vi sóng đối với mặt đường bê tông nhựa đô thị tại Việt Nam, thông qua việc hiệu chỉnh và áp dụng các chỉ số hiệu năng (HI, MR, FER, FLE) từ cơ sở dữ liệu quốc tế vào điều kiện thực tế trong nước.

Tuyến Nguyễn Trường Tộ (Hải Phòng) được lựa chọn làm trường hợp điển hình do có đặc trưng lưu lượng nặng, tỷ trọng xe tải và xe buýt cao (59,72%),

cùng kết cấu áo đường cấp cao A1 tương đồng với nhiều tuyến đô thị ven biển. Mặc dù Việt Nam chưa có công trình thí nghiệm quy mô lớn về bê tông nhựa tự hàn gắn hoặc tái sử dụng xi thép làm vật liệu hấp thụ vi sóng, việc sử dụng dữ liệu thực tế của tuyến kết hợp với số liệu chuẩn hóa từ các nghiên cứu quốc tế cho phép xây dựng một mô hình mô phỏng định lượng phản ánh tương đối chính xác điều kiện vận hành tại Việt Nam.

Các giá trị HI, FER và FLE được tính toán bằng mô hình tỷ lệ hóa theo các thông số trung bình của BTN trong điều kiện nhiệt đới ẩm. Cách tiếp cận này giúp định lượng được hiệu quả tiềm năng của công nghệ vi sóng khi ứng dụng ở Việt Nam, đồng thời xác định những khoảng trống nghiên cứu cần được kiểm chứng trong giai đoạn tiếp theo.

4.2. Dữ liệu giao thông và quy đổi PCU

Số liệu điều tra tại vị trí Km5+200 [13] đã được tổng hợp theo trung bình ngày, gồm bảy nhóm phương tiện: xe con, xe tải nhỏ, xe tải lớn, xe buýt, xe máy, xe thô sơ và nhóm khác; tổng lưu lượng đạt 15.978 xe/ngày. Để biểu diễn tương đương về tác động lưu lượng đến điều kiện khai thác, dữ liệu đã được quy đổi sang đơn vị xe con (PCU) bằng công thức:

Tổng PCU/ngày:

$$PCU_{total} = \sum N_i \times f_i \quad (5)$$

Tỷ trọng của nhóm i :

$$p_i = 100 \times (N_i \times f_i) / PCU_{total} \quad (6)$$

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

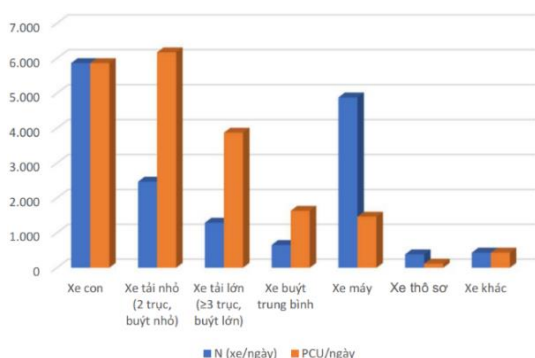
Theo TCVN 13592:2022 đối với tốc độ thiết kế <60 km/h, các hệ số đã được dùng như sau: xe con = 1,0; xe tải 2 trục và buýt nhỏ = 2,5; xe tải ≥3 trục và buýt lớn = 3,0; buýt trung bình = 2,5; xe máy = 0,3; xe thô sơ = 0,3; nhóm khác = 1,0 (xem Bảng 3).

Kết quả cho thấy tổng PCU/ngày ≈ 19.557,6. Khi

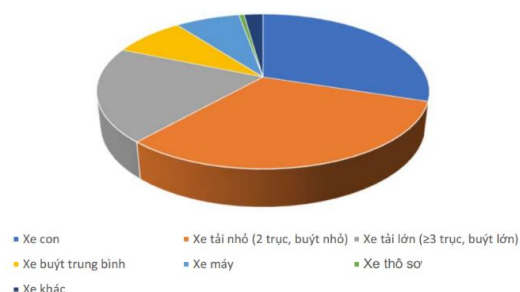
Bảng 3. Quy đổi lưu lượng sang PCU/ngày và cơ cấu PCU

Nhóm phương tiện	N (xe/ngày)	PCU	PCU/ngày	Tỷ trọng PCU (%)
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

gộp phương tiện nặng (xe tải 2 trục + xe tải ≥ 3 trục + buýt), tỷ trọng PCU đạt 59,72% ($= 31,56 + 19,80 + 8,36$), cao hơn đáng kể so với ngưỡng 50% thường dùng để nhận diện tuyến có rủi ro môi cao. Tỷ trọng xe con chiếm 29,98% và xe máy chiếm 7,49%, cho thấy ảnh hưởng chi phối của nhóm nặng tới trạng thái ứng suất kéo lặp ở đáy lớp BTN mặt. Trong bối cảnh này, giải pháp phục hồi chủ động dựa trên kích hoạt nhiệt của BTN được xem là phù hợp để làm chậm quá trình suy giảm, giảm tần suất duy tu và hạn chế nhu cầu cào bóc-rải mới. Phân bố lưu lượng và tỷ trọng PCU của từng loại phương tiện được thể hiện tương ứng trong Hình 4 và Hình 5.



Hình 4. Biểu đồ lưu lượng của từng loại xe



Hình 5. Tỷ trọng PCU% của từng loại xe

4.3. Ảnh hưởng khí hậu và đặc điểm kết cấu áo đường

Các đặc trưng khí hậu điển hình của Hải Phòng (nhiệt độ trung bình năm khoảng $23,7^{\circ}\text{C}$, lượng mưa năm $\sim 1.840-1.850$ mm) đã được ghi nhận ổn định trong nhiều năm gần đây. Dưới tác động của độ ẩm cao và số ngày mưa lớn, các cơ chế mất dính bám nhựa-cốt liệu, thấm ướt-hút nước và lão hóa nhiệt-oxi hóa của bitum có xu hướng tăng tốc. Đối với áo đường A1, ứng suất kéo lặp tại đáy lớp mặt BTN do nhóm phương tiện nặng gây ra, khi kết hợp với khả năng suy giảm mô đun do ẩm-nhiệt, sẽ làm rút ngắn thời gian xuất hiện mạng nứt môi và thúc đẩy hằn lún vệt bánh. Vì vậy, công nghệ tự hàn gắn nếu được áp dụng cần

đáp ứng đồng thời ba yêu cầu: (i) phục hồi cơ học với HI cao, (ii) gia nhiệt có kiểm soát để tránh lão hóa, và (iii) cải thiện tính bền nước & kháng hằn lún để thích ứng khí hậu.

Trên cơ sở các chỉ số đã chuẩn hóa (HI, FER, FLE) và phân tích chi phí vòng đời (LCC), quá trình lựa chọn công nghệ tối ưu được thực hiện nhằm xác định phương án có hiệu quả tổng hợp cao nhất về kỹ thuật và kinh tế. Kết quả so sánh cho thấy, nhóm công nghệ cảm ứng và vi sóng đạt hiệu quả kỹ thuật vượt trội, với FLE dao động từ 2,0 đến 3,0, cao hơn đáng kể so với cơ chế tự nhiên ($FLE \approx 1,0$) và công nghệ vi nang ($FLE \approx 1,3$). Tuy nhiên, xét trên khía cạnh chi phí đầu tư, khả năng thương mại hóa và tính sẵn có vật liệu, công nghệ vi sóng thể hiện ưu thế hơn nhờ tận dụng phụ phẩm công nghiệp trong nước như xỉ thép và bột sợi các-bon.

Cụ thể, cấu hình BTN có bổ sung 80% xỉ thép đạt $FLE=2,93$, tương ứng chu kỳ can thiệp kéo dài thêm 17 năm so với BTN thường, trong khi chi phí vòng đời giảm khoảng 40%. Khi thay thế 25% bột khoáng bằng bột sợi các-bon, FLE đạt 2,61 và chi phí vòng đời giảm 20-30%. Hai cấu hình này được xem là phương án tối ưu kỹ thuật - kinh tế, đặc biệt phù hợp với điều kiện khai thác đường đô thị tải trọng nặng tại Việt Nam.

4.4. Đề xuất công nghệ và kết quả ứng dụng (dựa trên chỉ số)

Với cơ cấu PCU và điều kiện khí hậu nêu trên, gia nhiệt vi sóng đã được chọn làm hướng ứng dụng, vì khả năng đạt HI rất cao và có tiềm năng tận dụng phụ phẩm. Hai cấu hình vật liệu đã được xem xét:

(a) Cấu hình filler hấp thụ MW - CFP 25%

Trong cấu hình này, 25% bột đá được thay bằng bột sợi carbon - CFP. Từ kết quả thử nghiệm đã công bố, tốc độ gia nhiệt khi dùng CFP cao gấp ~ 19 lần so với filler khoáng, còn khả năng phục hồi thể hiện bằng HI vượt 90%; tính chống nứt ở nhiệt độ thấp cũng được cải thiện rõ. Với tuyến Nguyễn Trường Tộ, cấu hình này cho phép gia nhiệt đồng đều trên bề mặt, để hiệu chuẩn thời gian-nhiệt độ để khống chế $T_{\text{surface}} < 90^{\circ}\text{C}$, phù hợp quy tắc tránh lão hóa nhựa (T_{surface} là nhiệt độ bề mặt BTN khi gia nhiệt, đo bằng ảnh nhiệt, yêu cầu không vượt quá 90°C để tránh lão hóa nhựa). Về vận hành, vùng can thiệp được lựa chọn tại các điểm có PCU nặng cao (gần nút giao, vị trí dừng - khởi động của buýt). Chu trình can thiệp được đề xuất gồm: Làm sạch-giảm ẩm bề mặt $\rightarrow$ gia nhiệt $2,45$ GHz đến $< 90^{\circ}\text{C}$ (dẫn hướng bằng ảnh nhiệt) $\rightarrow$ nghi nhiệt để hoàn tất quá trình lan-khuếch tán nhựa. Với

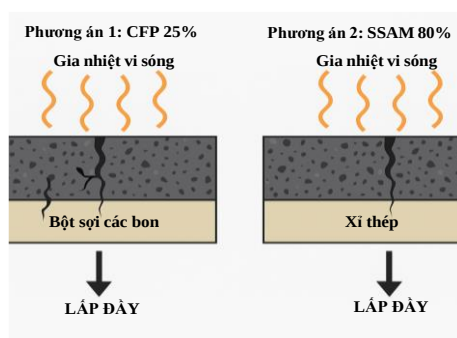
Bảng 4. Tóm tắt chỉ số hiệu quả dự kiến theo cấu hình MW

Cấu hình	Thành phần thay thế	HI sau kích hoạt	HL (phần diện tích đạt ngưỡng)	Kháng hần lún	Bền nước	Ghi chú vận hành
CFP-25% filler	25% filler → CFP	> 90%	~55% (đồng đều)	cải thiện	~+5%	Gia nhiệt nhanh, nhiệt bề mặt dễ khống chế < 90 °C; đồng đều nhiệt tốt
SSAM-80% xi thép	80% cốt liệu → xi thép	92,8%	63,7%	+60,7%	+5,97%	Cần kiểm soát đồng đều nhiệt; lợi ích môi trường cao, tận dụng phụ phẩm

HI > 90% đã được báo cáo, kỳ vọng thời gian lắp can thiệp có thể giãn dài so với duy tu lạnh truyền thống; đồng thời, lợi ích vòng đời được dự đoán tích cực nhờ giảm vật liệu mới và giảm phát thải trong khâu bảo trì.

(b) Cấu hình cốt liệu hấp thụ MW - SSAM 80% xi thép

Trong cấu hình này, 80% cốt liệu được thay bằng xi thép. Kết quả thí nghiệm đã ghi nhận HI=92,8% và HL=63,7% khi gia nhiệt, kèm theo tăng kháng hần lún 60,7% và tăng bền nước 5,97%. Với Nguyễn Trường Tộ - nơi PCU nặng chiếm 59,72%, các thông số này cho thấy khả năng phục hồi gần đầy đủ sau mỗi chu trình kích hoạt, đồng thời tăng ổn định nhiệt ở nhiệt độ cao và giảm nhạy ẩm - những yếu tố quan trọng dưới khí hậu mưa nhiều. Về triển khai, cần lưu ý độ đồng đều nhiệt thường bị ảnh hưởng bởi phân bố hạt xi; vì vậy, việc phối hợp filler hấp thụ (ví dụ ferrite/CFP ở hàm lượng thấp) hoặc điều khiển công suất-thời gian theo ảnh nhiệt được khuyến nghị để giảm điểm nóng cục bộ. Các chỉ số hiệu quả dự kiến theo cấu hình MW được tổng hợp trong Bảng 4. Các phương án gia nhiệt vi sóng tương ứng được minh họa trong Hình 6.



Hình 6. Phương án gia nhiệt vi sóng trong BTN tự hàn gắn [8-10]

4.5. Khuyến nghị vận hành

Từ kết quả phân tích cơ cấu PCU với tỷ trọng

phương tiện nặng chiếm 59,72% và các chỉ số phục hồi HI > 90% của hai cấu hình CFP-25% và SSAM-80%, có thể khẳng định rằng công nghệ gia nhiệt vi sóng hoàn toàn phù hợp cho tuyến Nguyễn Trường Tộ. Để bảo đảm hiệu quả trong thực tế, việc can thiệp được khuyến nghị tiến hành tại mốc nửa vòng đời kết cấu hoặc khi mức suy giảm tiệm cận ngưỡng SCB-P90, nhằm duy trì khả năng phục hồi cường độ và tối đa hóa tổng tuổi thọ môi tích lũy. Trong quá trình khai thác, hiệu quả hàn gắn nên được theo dõi thông qua các phép đo kiểm không phá hoại như ảnh nhiệt, chỉ số IRI và mật độ nứt bề mặt, qua đó xác nhận tính đồng đều của quá trình gia nhiệt và quyết định thời điểm kích hoạt lại.

4. Kết luận

Các phân tích định lượng cho thấy khả năng tự phục hồi tự nhiên của bê tông nhựa chỉ đạt 20-30% HI, trong khi công nghệ ngoại vi có thể nâng hiệu quả lên mức 60-95%. Vi nang giúp tăng HI lên khoảng 62% nhưng giảm dần sau nhiều chu kỳ; cảm ứng với 4% sợi thép đạt HI 85-100% và kéo dài tuổi thọ môi gấp 2-3 lần; gia nhiệt vi sóng với 80% xi thép đạt HI 92,8%, HL 63,7%, cải thiện khả năng chống hần lún 60,7% và độ bền nước 5,97%. Hệ thống lai ghép duy trì HI trên 60% sau 8 chu kỳ, chứng minh tiềm năng trong kịch bản bảo trì nhiều lần.

Trường hợp áp dụng tại tuyến Nguyễn Trường Tộ đã xác định lưu lượng quy đổi ≈ 19.558 PCU/ngày, trong đó xe tải và xe buýt chiếm 59,72%. Điều kiện khí hậu ẩm ướt, mưa nhiều làm tăng nguy cơ nứt mỏi - lão hóa. Trên cơ sở đó, hai cấu hình MW-healing được khuyến nghị: Thay thế 25% filler bằng bột sợi carbon để gia nhiệt đồng đều và giảm chi phí vòng đời; và thay thế 80% cốt liệu bằng xi thép, đạt HI gần 93% đồng thời tận dụng phụ phẩm công nghiệp. Thời điểm can thiệp được đề xuất tại mốc nửa vòng đời hoặc tương đương SCB-P90, nhằm tối đa hóa tuổi thọ tích lũy và giảm chi phí, phát thải CO₂ vòng đời.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc ứng dụng công nghệ BTN tự hàn gắn tại Việt Nam, đặc biệt trên các tuyến có lưu lượng tải trọng nặng cao, góp phần xây dựng hạ tầng giao thông bền vững và thích ứng với điều kiện khí hậu - kinh tế.

Trên cơ sở nghiên cứu này, một dự án thử nghiệm quy mô nhỏ nên được triển khai tại các đô thị có lưu lượng xe nặng cao nhằm kiểm chứng các chỉ số HI, FER và FLE; đồng thời xây dựng quy trình chuẩn cho gia nhiệt vi sóng (công suất, thời gian, giới hạn nhiệt độ bề mặt) để đảm bảo tính ổn định và khả năng áp dụng lâu dài tại nước ta.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Yu, X., et al. (2024). *Study on multiple effects of self-healing properties of asphalt pavement*. Buildings, Vol.14(5), 1313.
- [2] Xu, S., et al. (2022). *Review on self-healing asphalt pavements*. Construction and Building Materials, Vol.346, 128315.
- [3] Abadeen, A. Z. U., et al. (2022). *Comprehensive self-healing evaluation of asphalt concrete containing encapsulated rejuvenator*. Materials, Vol.15(10), 3672.
- [4] Ma, E., et al. (2023). *Self-healing of microcapsule-based materials for highway construction*. Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol.10(3), pp.368-384.
- [5] Garcia, A., Schlangen, E. (2017). *Induction healing of asphalt pavements in practice*. Proc. ISHM Conference.
- [6] Ma, E., et al. (2023). *Self-healing of microcapsule-based materials for highway construction*. Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol.10(3), pp.368-384.
- [7] Abadeen, A. Z. U., et al. (2022). *Comprehensive self-healing evaluation of asphalt concrete containing encapsulated rejuvenator*. Materials, Vol.15(10), 3672.
- [8] Schlangen, E., & García, Á. (2011). *Self-healing of asphalt mastic*. Proc. ICE - Transport, Vol.164(2), pp.75-82.
- [9] Zhang, F., et al. (2025). *Self-healing properties of asphalt mixtures containing steel slag*. Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol.12(2), pp.288-300.
- [10] Ren, X., et al. (2024). *Carbon fiber powder in sustainable asphalt pavements*. Journal of Cleaner Production, Vol.440, 140828.
- [11] Li, Y., et al. (2025). *Hybrid self-healing asphalt systems*. Construction and Building Materials, Vol.412, 134221.
- [12] Li, C., et al. (2023). *Study on the factors affecting self-healing performance of asphalt mixture*. Theor. Appl. Fracture Mech., Vol.126, 103954.
- [13] Sở Giao thông Vận tải Hải Phòng (2025). *Báo cáo kết quả đếm xe quý III năm 2025 (đoạn Nguyễn Trường Tộ - Km5+200)*.

Ngày nhận bài:	24/09/2025
Ngày nhận bản sửa:	11/11/2025
Ngày duyệt đăng:	13/11/2025