



## COLD IN-PLACE RECYCLING OF ASPHALT PAVEMENT WITH FOAMED BITUMEN–CEMENT: EXPERIMENTAL EVALUATION ON SELECTED ROAD SECTIONS IN CENTRAL AND SOUTHERN VIETNAM

Nguyen Quang Phuc, Chu Tien Dung\*

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 14/07/2025

Revised: 24/09/2025

Accepted: 11/10/2025

Published online: 15/10/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.8.6>

\* *Corresponding author*

Email: dungchu@utc.edu.vn; Tel: 0912777219

**Abstract.** Cold in-place recycling (CIR) with foamed bitumen and cement has attracted attention thanks to its ability to save materials, reduce emissions, and align with the goal of sustainable infrastructure development. Although it has been applied in Vietnam, systematic studies evaluating its effectiveness under tropical monsoon conditions and heavy traffic overloading are still lacking. This paper presents experimental results on five national highways in Central and Southern Vietnam, including field surveys, laboratory tests, recycled mix design, and post-construction elastic modulus measurements. The results show that all recycled mixtures satisfied technical requirements, with post-construction elastic modulus values 10–58% higher than the design values, demonstrating the ability to enhance the durability and load-bearing capacity of the pavement structure. The novelties of this study are: (i) providing the first multi-project experimental dataset in Vietnam, (ii) verifying the effectiveness of the technology through comparison between mix design results and actual measurements, and (iii) adding scientific evidence from tropical and overloaded traffic conditions, thereby contributing to expanding international knowledge on CIR technology in the context of developing countries.

**Keywords:** Cold in-place recycling; foamed bitumen; cement; flexible pavement; RAP; sustainable development.

@ 2025 University of Transport and Communications



# TÁI CHẾ NGUỘI MẶT ĐƯỜNG BẰNG NHỰA ĐƯỜNG BỘT – XI MĂNG: ĐÁNH GIÁ THỰC NGHIỆM TẠI MỘT SỐ TUYẾN ĐƯỜNG KHU VỰC MIỀN TRUNG VÀ MIỀN NAM VIỆT NAM

Nguyễn Quang Phúc, Chu Tiến Dũng\*

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

## THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 14/07/2025

Ngày nhận bài sửa: 24/09/2025

Ngày chấp nhận đăng: 11/10/2025

Ngày xuất bản Online: 15/10/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.8.6>

\* Tác giả liên hệ

Email: dungchu@utc.edu.vn; Tel: 0912777219

**Tóm tắt.** Công nghệ tái chế nguội tại chỗ bằng nhựa đường bột và xi măng đang được quan tâm nhờ khả năng tiết kiệm vật liệu, giảm phát thải và phù hợp với mục tiêu phát triển hạ tầng bền vững. Tuy đã được áp dụng tại Việt Nam, vẫn thiếu các nghiên cứu hệ thống đánh giá hiệu quả công nghệ trong điều kiện nhiệt đới gió mùa và tình trạng xe quá tải. Bài báo này trình bày kết quả thực nghiệm trên năm tuyến quốc lộ ở miền Trung và miền Nam, bao gồm khảo sát hiện trường, thí nghiệm trong phòng, thiết kế hỗn hợp và đo mô đun đàn hồi sau thi công. Kết quả cho thấy tất cả hỗn hợp tái chế đều đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, trong đó mô đun đàn hồi sau thi công cao hơn 10–58% so với giá trị thiết kế, chứng minh khả năng nâng cao độ bền và sức chịu tải của kết cấu. Điểm mới của nghiên cứu là: (i) cung cấp bộ dữ liệu thực nghiệm đa dự án đầu tiên tại Việt Nam, (ii) xác nhận hiệu quả công nghệ qua so sánh kết quả thiết kế và số liệu thực tế, và (iii) bổ sung bằng chứng khoa học từ điều kiện nhiệt đới và xe quá tải, góp phần mở rộng tri thức quốc tế về công nghệ tái chế nguội trong bối cảnh các nước đang phát triển.

**Từ khóa:** Tái chế nguội tại chỗ; nhựa đường bột; xi măng; mặt đường mềm; RAP; phát triển bền vững.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh ô nhiễm môi trường ngày càng nghiêm trọng, việc giảm phát thải khí nhà kính trở thành mối quan tâm toàn cầu. Ngành xây dựng và bảo trì đường bộ vừa tiêu tốn nhiều tài nguyên tự nhiên (đá, cát, nhựa đường), vừa phát thải lượng lớn khí CO<sub>2</sub>, gây áp lực đến môi trường. Công nghệ tái chế nguội tại chỗ bằng nhựa đường bọt và xi măng nổi lên như một giải pháp phục hồi mặt đường hiệu quả và bền vững, phù hợp định hướng kinh tế tuần hoàn khi giúp giảm sử dụng vật liệu mới, tiết kiệm năng lượng và kéo dài tuổi thọ kết cấu [1–4].

Công nghệ này thực hiện trực tiếp tại hiện trường: lớp bê tông nhựa (BTN) cũ được cào bóc, trộn với nhựa đường bọt và xi măng, sau đó lu lên lại ở nhiệt độ thường. So với các phương pháp BTN nóng hoặc ẩm, công nghệ tái chế giúp rút ngắn thời gian thi công, giảm chi phí vận chuyển và tiết kiệm tới 95% năng lượng [1,2]. Cơ chế tạo bọt bằng phun nước lạnh vào nhựa đường nóng giúp giảm độ nhớt, tăng khả năng bao bọc RAP, rút ngắn thời gian đông rắn và hạn chế co ngót. Xi măng được bổ sung như chất kết dính phụ, tạo cường độ sớm và tăng độ bền chịu tải, từ đó hình thành vật liệu có tính cân bằng giữa độ cứng và tính đàn hồi [2,4–7]. Công nghệ này đã được nghiên cứu và áp dụng ở nhiều quốc gia như Úc, Đức, Mỹ, Anh, Trung Quốc, Ấn Độ [2].

Tại Việt Nam, công nghệ này đã được ban hành trong tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN 13150-2:2020 [8]) và triển khai ở một số dự án, song phần lớn chỉ dừng lại ở báo cáo kỹ thuật đơn lẻ. Chưa có nghiên cứu nào đánh giá có hệ thống hiệu quả công nghệ trên nhiều tuyến đường với các điều kiện giao thông và môi trường khác nhau. Trong khi đó, khí hậu nhiệt đới gió mùa, tình trạng xe quá tải và hằn lún bánh xe phổ biến tạo ra những thách thức khác biệt so với châu Âu, Mỹ hay Úc. Khoảng trống này vừa hạn chế khả năng tinh chỉnh tiêu chuẩn trong nước, vừa thiếu đóng góp cho tri thức quốc tế về công nghệ tái chế trong bối cảnh các nước đang phát triển.

Để đáp ứng nhu cầu cấp thiết đó, nghiên cứu này tập trung đánh giá hiệu quả thiết kế và thi công công nghệ tái chế nguội tại chỗ bằng nhựa đường bọt – xi măng trên năm dự án quốc lộ (QL) tiêu biểu ở miền Trung và miền Nam Việt Nam, nơi điều kiện khí hậu khắc nghiệt và vật liệu mới ngày càng khan hiếm.

Bài báo này có ba điểm mới: (1) cung cấp bộ dữ liệu thực nghiệm có hệ thống đầu tiên về tái chế nguội tại chỗ bằng nhựa đường bọt – xi măng trên năm tuyến QL, bao quát các điều kiện giao thông và môi trường khác nhau; (2) xác nhận hiệu quả công nghệ qua việc so sánh kết quả thiết kế trong phòng với mô đun đàn hồi sau thi công, cho thấy giá trị thực tế vượt xa yêu cầu thiết kế; (3) bổ sung bằng chứng khoa học từ điều kiện khí hậu nhiệt đới và tình trạng xe quá tải, từ đó mở rộng cơ sở tri thức quốc tế vốn chủ yếu dựa trên các nghiên cứu ở vùng ôn đới.

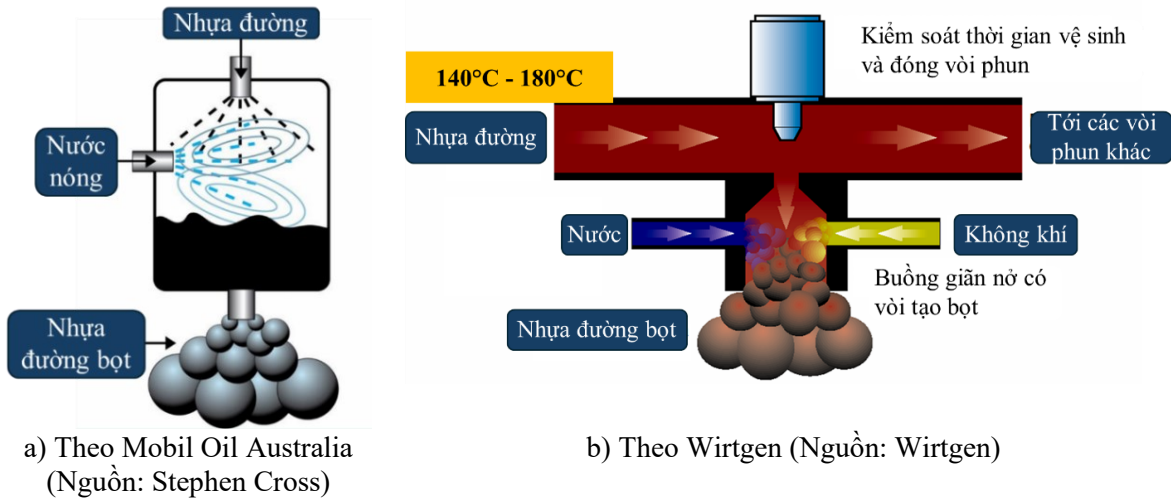
## 2. TỔNG QUAN CÔNG NGHỆ TÁI CHẾ MẶT ĐƯỜNG TẠI CHỖ BẰNG NHỰA ĐƯỜNG BỌT

### 2.1. Lịch sử phát triển của công nghệ nhựa đường bọt

Quy trình tạo bọt cho nhựa đường được phát triển từ năm 1957 trước bởi Csanyi thuộc Đại học Bang Iowa [9]. Việc thiếu hụt vật liệu đá chất lượng tốt và sự sẵn có của đá không phân loại tại bang Iowa là nguồn cảm hứng để ông phát minh ra công nghệ nhựa đường bọt. Csanyi đã nghiên cứu nhiều phương pháp khác nhau để tạo bọt từ nhựa đường và khả năng ứng dụng của nó vào vật liệu làm đường. Nghiên cứu của ông cho thấy việc tạo bọt bằng cách phun hơi nước vào nhựa đường là một công nghệ đơn giản và hiệu quả [10]. Tuy nhiên, phương pháp này (dùng hơi nước) được chứng minh là không thực tế khi áp dụng tại chỗ vì đòi hỏi thiết bị

đặc biệt như nôi hơi. Đến năm 1968, công ty Mobil Australia – đơn vị nắm quyền sở hữu bằng sáng chế của quy trình Csanyi – đã cải tiến quy trình ban đầu bằng cách phun nước lạnh thay vì hơi nước vào nhựa đường nóng. Nhờ vậy, công nghệ tạo bột nhựa đường trở nên thực tiễn và kinh tế hơn rất nhiều. Kể từ đó, công nghệ này ngày càng được ưa chuộng tại các quốc gia như Úc, Đức, New Zealand, Nam Phi và sau này là Mỹ và Anh [11].

## 2.2. Quy trình tạo bột nhựa đường



Hình 1. Quy trình tạo nhựa đường bột.

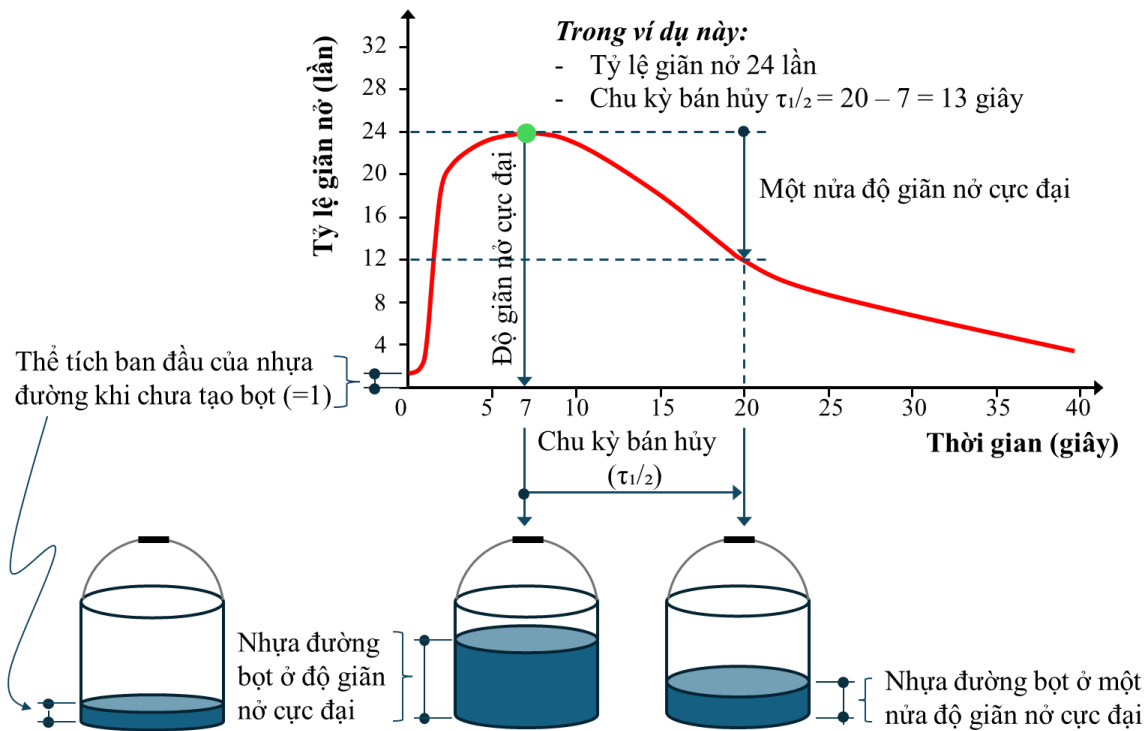
Hiện tượng tạo bột nhựa đường xảy ra khi nước được phun vào nhựa đường nóng, khiến nước nhanh chóng bốc hơi và tăng thể tích khoảng 1.500 lần ở áp suất khí quyển. Quá trình này tạo ra các bong bóng nhỏ có màng nhựa đường bao quanh hơi nước. Ban đầu, Csanyi đề xuất phương pháp phun hơi nước vào nhựa đường nóng qua vòi chuyên dụng để tạo bột tạm thời (Hình 1 a). Tuy nhiên, phương pháp này không phù hợp với thi công tại chỗ do yêu cầu thiết bị tạo hơi phức tạp. Về sau, Mobil Oil Australia cải tiến quy trình bằng cách phun trực tiếp nước lạnh vào nhựa đường nóng, giúp công nghệ trở nên đơn giản và hiệu quả hơn. Đến giữa những năm 1990, hãng Wirtgen phát triển thêm hệ thống mới, trong đó nước (1–5% khối lượng nhựa đường) và không khí nén được đồng thời phun vào nhựa đường ở  $140\text{--}180^{\circ}\text{C}$ , tạo thành hỗn hợp bột nhựa đường ổn định trong buồng giãn nở (Hình 1 b) [11].

## 2.3. Đặc tính của nhựa đường tạo bột

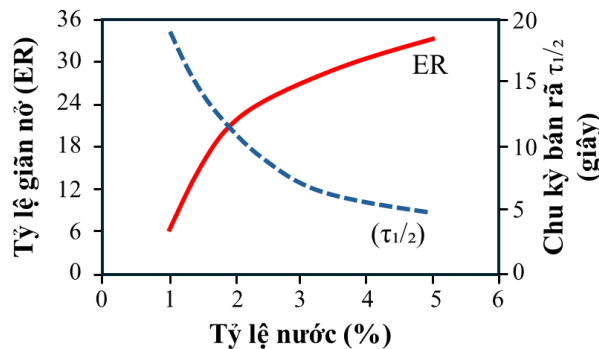
Khi nghiên cứu ứng dụng nhựa đường tạo bột trong tái chế nguội tại chỗ, cần xem xét hai yếu tố chính: khả năng tạo bột của nhựa đường và đặc tính của hỗn hợp nhựa đường tạo bột.

Khả năng tạo bột phản ánh mức độ tạo ra bột có chất lượng tốt, thông qua hai chỉ số cơ bản: tỷ số giãn nở cực đại (Expansion Ratio – ER) và chu kỳ bán rã (Half-life –  $\tau_{1/2}$ ). Trong quá trình tạo bột, thể tích nhựa đường tăng nhanh đến cực đại – tỷ số giữa thể tích bột tối đa và thể tích nhựa đường ban đầu chính là ER, phản ánh độ linh động và khả năng phân tán của nhựa đường trong hỗn hợp. HL là khoảng thời gian từ khi bột đạt thể tích cực đại đến khi giảm còn một nửa, cho thấy tính ổn định của bột (Hình 2).

Theo Brennan [12], ER và  $\tau_{1/2}$  bị ảnh hưởng bởi lượng bột tạo ra và nhiệt độ nhựa đường trong quá trình tạo bột. Tuy nhiên, nghiên cứu sau này cho thấy lượng nước phun vào buồng giãn nở là yếu tố có ảnh hưởng đáng kể. Tăng tỷ lệ nước phun sẽ làm tăng ER nhưng lại làm giảm HL do bột nhanh chóng sụp đổ (Hình 3).



Hình 2. Tính chất của nhựa đường bột (Nguồn: vẽ lại từ Wirtgen).



Hình 3. Mối quan hệ giữa ER và  $\tau_{1/2}$  (Nguồn: vẽ lại từ Wirtgen).

#### 2.4. Các nghiên cứu trên thế giới về tái chế nguội sử dụng nhựa đường bột và xi măng

Công nghệ tái chế nguội tại chỗ sử dụng nhựa đường bột và xi măng đang được công nhận là một giải pháp bền vững và hiệu quả trong công tác phục hồi mặt đường nhựa. Không giống như công nghệ tái chế nóng truyền thống yêu cầu nhiệt độ cao (120–160°C), phương pháp tái chế nguội được thực hiện trực tiếp tại hiện trường, không cần gia nhiệt vật liệu tái chế. Quá trình này bao gồm việc cào bóc lớp mặt đường cũ, trộn với chất ổn định như nhựa đường bột và xi măng, sau đó thi công lại ở nhiệt độ môi trường. Việc này giúp tiết kiệm năng lượng đáng kể — chỉ tiêu tốn khoảng 20% năng lượng so với BTN nóng [1,2].

Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra các ưu điểm vượt trội của công nghệ này như giảm phát thải khí nhà kính, rút ngắn thời gian thi công, cải thiện độ êm thuận, kéo dài tuổi thọ mặt đường và duy trì hình học tuyến đường gốc [1,2,4,13,14]. Đặc biệt, công nghệ tái chế nguội tại chỗ cho phép tái sử dụng gần như 100% vật liệu RAP tại chỗ, từ đó giảm nhu cầu vật liệu mới và chi phí vận chuyển. Tuy nhiên, hiệu quả của phương pháp này còn phụ thuộc vào chất lượng RAP, khả năng trộn đồng đều và kiểm soát thi công tại hiện trường [2,15].

Một cải tiến then chốt trong công nghệ tái chế nguội tại chỗ là việc sử dụng nhựa đường bột làm chất kết dính chính. Nhựa đường bột được tạo ra bằng cách phun một lượng nước lạnh (2–3%) vào nhựa đường nóng (170–180°C), làm tăng thể tích lên 10–20 lần và giảm đáng kể độ nhớt [2,3,16]. Các chỉ tiêu như tỷ số giãn nở (ER) và thời gian bán rã (HL) được dùng để xác định điều kiện tạo bột tối ưu [3,17,18]. Nhựa đường bột có ưu điểm vượt trội như rút ngắn thời gian đóng rắn, sớm mở lại tuyến đường, giảm nguy cơ co ngót và tăng cường tính thi công [3,5,19].

Tuy nhiên, do yêu cầu kỹ thuật và thiết bị đặc thù, công nghệ này hiện vẫn chưa được áp dụng rộng rãi như các phương pháp sử dụng nhũ tương [3]. Một số nghiên cứu cho thấy hỗn hợp tái chế bằng nhựa đường bột có độ cứng cao hơn, khả năng chống lún tốt hơn so với phương pháp dùng nhũ tương [20,21], trong khi nhũ tương có thể cho hiệu quả kháng ẩm tốt hơn trong một số điều kiện nhất định [22–24].

Bên cạnh nhựa đường bột, xi măng thường được sử dụng như một chất kết dính phụ để tăng cường cường độ sớm và độ bền lâu dài cho lớp tái chế. Xi măng giúp giảm độ thấm nước, tăng độ cứng, khả năng kháng môi và phân bố ứng suất hợp lý trong kết cấu [5,6,17,25–31]. Một số chất phụ gia như tro bay hay vôi hydrat cũng được nghiên cứu nhằm cải thiện độ bền và giảm thiểu rủi ro nứt [2,32].

Sự kết hợp giữa nhựa đường bột và xi măng tạo nên vật liệu gọi là vật liệu xử lý bằng xi măng – nhựa đường (Cement–Bitumen Treated Material - CBTM) — một giải pháp ổn định tích hợp mang lại sự cân bằng giữa độ cứng và độ dẻo, đang được ứng dụng rộng rãi trong công nghệ tái chế toàn phần mặt đường (tái chế sâu - full-depth reclamation - FDR) [5,33]. CBTM có khả năng kháng môi, kháng ẩm, kháng băng giá tốt trong khi vẫn duy trì được tính thi công và khả năng chịu tải lâu dài [19].

Thành phần chủ yếu trong công nghệ tái chế nguội tại chỗ là RAP, đóng vai trò quyết định đến chất lượng kết cấu tái chế. Chất lượng RAP chịu ảnh hưởng bởi độ ẩm, tỷ lệ nhựa đường còn lại, thành phần cấp phối và sự biến động nguồn vật liệu [1,2,6]. RAP thường được xem như “Black Rock” — phân cốt liệu cứng chứa nhựa đường lão hóa — tuy nhiên có thể cải thiện bằng cách sử dụng các chất hồi sinh [32,34]. Để đạt được cấp phối tối ưu, hỗn hợp thường được bổ sung cốt liệu mới [17,35]. Việc khảo sát kỹ cấu trúc mặt đường trước khi thi công có vai trò quan trọng trong việc xác định chiều sâu tái chế và tỷ lệ phối trộn phù hợp [3].

Công nghệ tái chế nguội tại chỗ bằng nhựa đường bột – xi măng được áp dụng chủ yếu cho các lớp móng trên và móng dưới nhằm tạo kết cấu ổn định, chịu tải cao [2,33], đồng thời có thể mở rộng cho lớp vật liệu liên kết và trong một số trường hợp lớp mặt trên các tuyến có lưu lượng giao thông thấp đến trung bình. Ngoài đường bộ, công nghệ này cũng được ứng dụng tại các sân bay để khắc phục hư hỏng nứt lớn. Về lưu lượng giao thông, công nghệ này được sử dụng phổ biến cho các tuyến có lưu lượng thấp và trung bình, nhưng thực tiễn ở nhiều quốc gia (Ấn Độ, Ý, Trung Quốc, Mỹ) đã chứng minh khả năng áp dụng thành công ngay cả với tuyến đường có lưu lượng cao, qua đó khẳng định tính linh hoạt và phạm vi ứng dụng rộng rãi của giải pháp [2].

## **2.5. Các nghiên cứu tại Việt Nam về tái chế nguội sử dụng nhựa đường bột và xi măng**

Tại Việt Nam, công nghệ tái chế nguội tại chỗ sử dụng nhựa đường bột và xi măng đã chứng minh được tính hiệu quả cả về mặt môi trường lẫn công nghệ thi công. Nghiên cứu của Phạm Thị Ly [36] tại khu vực thành phố Hải Phòng cho thấy phương pháp này giúp giảm đáng kể việc sử dụng vật liệu mới, góp phần bảo vệ tài nguyên thiên nhiên và hạn chế phát sinh chất thải xây dựng. Việc tận dụng hoàn toàn vật liệu cũ không chỉ giảm ô nhiễm tại bãi thải mà còn

loại bỏ nhu cầu khai thác, vận chuyển và nghiền sàng vật liệu thiên nhiên mới — từ đó giảm thiểu tác động môi trường trong toàn bộ chu trình xây dựng.

Không chỉ mang lại lợi ích môi trường, công nghệ này còn đem lại hiệu quả thi công rõ rệt. Việc tái chế tại chỗ giúp rút ngắn tiến độ và giảm chi phí xây lắp nhờ loại bỏ nhu cầu xử lý các lớp móng bên dưới. Đồng thời, lớp vật liệu tái chế có khả năng xử lý sâu tới 20 cm, giúp tăng mô-đun đàn hồi, cường độ kéo uốn và độ ổn định tổng thể của kết cấu áo đường. Nhờ đó, chất lượng mặt đường được cải thiện đáng kể, với tuổi thọ khai thác kéo dài từ 10 đến 12 năm. Bên cạnh đó, công nghệ này còn cho phép tối ưu hóa cao độ mặt đường, bảo đảm đồng bộ với quy hoạch hạ tầng hiện hữu và tạo điều kiện thuận lợi cho tổ chức thi công trên hiện trường [36].

Trên thực tế, công nghệ tái chế nguội đã được triển khai ở nhiều khu vực trên cả nước, góp phần khẳng định tính khả thi và hiệu quả của giải pháp trong điều kiện địa phương. Ở miền Bắc, công nghệ được áp dụng trong dự án cải tạo và khôi phục mặt đường QL 5 (gói thầu số 10, đoạn Km82+000–Km94+000). Tại miền Trung, công nghệ được sử dụng trong công trình sửa chữa đường hạ cát cánh tại Cảng hàng không quốc tế Phú Bài, cũng như trên QL1A đoạn qua địa bàn tỉnh Bình Định. Ở miền Nam, một số dự án như duy tu, sửa chữa QL1A, QL22 và tuyến đường Nguyễn Thị Định (Thành phố Hồ Chí Minh) cũng đã áp dụng thành công công nghệ này. Những ứng dụng đa dạng trên cho thấy tiềm năng mở rộng và tính thích nghi của công nghệ tái chế nguội trong công tác bảo trì và nâng cấp kết cấu hạ tầng giao thông tại Việt Nam [37,38].

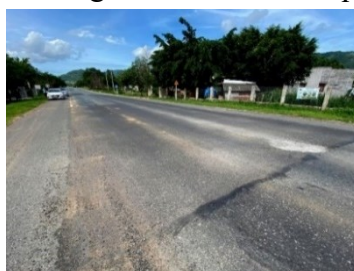
### 3. CÔNG TÁC KHẢO SÁT HIỆN TRƯỜNG VÀ THÍ NGHIỆM TRONG PHÒNG

#### 3.1. Tổng quát về hiện trạng dự án

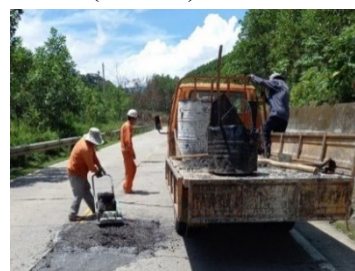
Trong nghiên cứu này, năm tuyến QL trọng điểm tại các vùng miền khác nhau của Việt Nam đã được lựa chọn để đánh giá hiệu quả ứng dụng công nghệ tái chế nguội bằng nhựa đường bột và xi măng trong cải tạo mặt đường bê tông nhựa. Đây đều là các tuyến có lưu lượng phương tiện lớn, đã khai thác trong thời gian dài và hiện đang xuống cấp nghiêm trọng với các dạng hư hỏng đặc trưng như rạn nứt, lún trôi, bong bật và đặc biệt là hằn lún vệt bánh xe – hiện tượng phổ biến tại các khu vực có khí hậu nóng ẩm và mật độ xe quá tải cao (Hình 4).



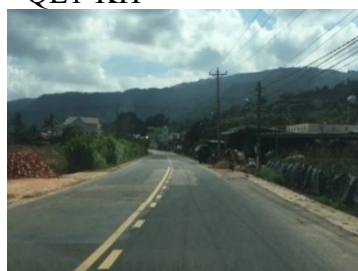
QL1-KH



QL55-VT



ĐHCM-QN



QL27-LĐ



QL1-ĐN

Hình 4. Tình trạng hư hỏng mặt đường tại 3 tuyến QL.

Cụ thể, tuyến QL1 đoạn qua Khánh Hòa (QL1-KH) dài 9,7 km xuất hiện nhiều hư hỏng phức tạp, đặc biệt nghiêm trọng tại khu vực dân cư, gần trường học và vùng thường xuyên ngập nước. QL55 tại Bà Rịa – Vũng Tàu (QL55-VT) có hơn 4,1 km bị hằn lún sâu, bong bật, xuất hiện ổ voi tái diễn do xe quá tải và hệ thống thoát nước kém hiệu quả. Tuyến đường Hồ Chí Minh đoạn qua Quảng Nam (ĐHCM-QN), dù đã sửa chữa cục bộ, vẫn phổ biến các dạng hư hỏng như nứt mai rùa, lún trôi. QL27 đoạn qua Lâm Đồng (QL27-LĐ) bị ảnh hưởng bởi điều kiện đồi dốc và thời tiết khắc nghiệt, xuất hiện sụt lún, bong bật và nứt vỡ mặt đường. Cuối cùng, QL1 đoạn qua Đồng Nai (QL1-ĐN), ghi nhận nhiều điểm lún vệt bánh xe và hư hỏng mặt đường do lưu lượng phương tiện rất cao. Việc lựa chọn các tuyến đường có điều kiện khai thác đa dạng giúp đánh giá toàn diện hơn về tính hiệu quả và khả năng thích ứng của công nghệ tái chế nguội trong thực tiễn.

### 3.2. Công tác khảo sát

Để thiết kế hỗn hợp tái chế nguội tại chỗ bằng nhựa đường bọt và xi măng, đồng thời lựa chọn giải pháp tái tạo mặt đường cũ một cách hiệu quả, cần thực hiện đầy đủ công tác khảo sát hiện trường và thí nghiệm trong phòng theo yêu cầu của TCVN 13150-2:2020 [8]. Trước tiên, tuyến đường cần được phân chia thành các đoạn tương đối đồng nhất về hiện trạng hư hỏng, loại vật liệu và chiều dày kết cấu áo đường. Sau đó, tại mỗi đoạn đồng nhất, tiến hành khoan hoặc đào hố để lấy mẫu đại diện cho từng lớp vật liệu trong phạm vi chiều sâu tái chế. Số lượng mẫu tối thiểu là ba mẫu trên mỗi đoạn, đảm bảo lấy tại các vị trí khác nhau nhằm phản ánh đúng điều kiện thực tế. Các lớp vật liệu được tách riêng để phục vụ thí nghiệm riêng biệt. Đối với các lớp vật liệu dạng rời, cần xác định khối lượng thể tích tự nhiên và độ ẩm hiện trường. Đồng thời, thí nghiệm hiện trường đo mô đun đàn hồi (bằng tấm ép cứng) cũng được thực hiện nhằm đánh giá độ cứng của lớp móng tại chiều sâu dự kiến tái chế, từ đó phân tích sự thay đổi mô đun theo chiều sâu để làm cơ sở xác định khả năng chịu lực sau tái chế. Song song đó, các mẫu vật liệu lấy từ hiện trường được đưa về phòng thí nghiệm để xác định các chỉ tiêu cơ lý của BTN cũ cũng như các lớp vật liệu trong phạm vi tái chế. Kết quả các thí nghiệm này là cơ sở quan trọng để thiết kế thành phần phối trộn hợp lý và dự báo hiệu quả ứng dụng của công nghệ tái chế nguội bằng nhựa đường bọt và xi măng trong thực tế.



Hình 5. Một số hình ảnh khảo sát hiện trường.

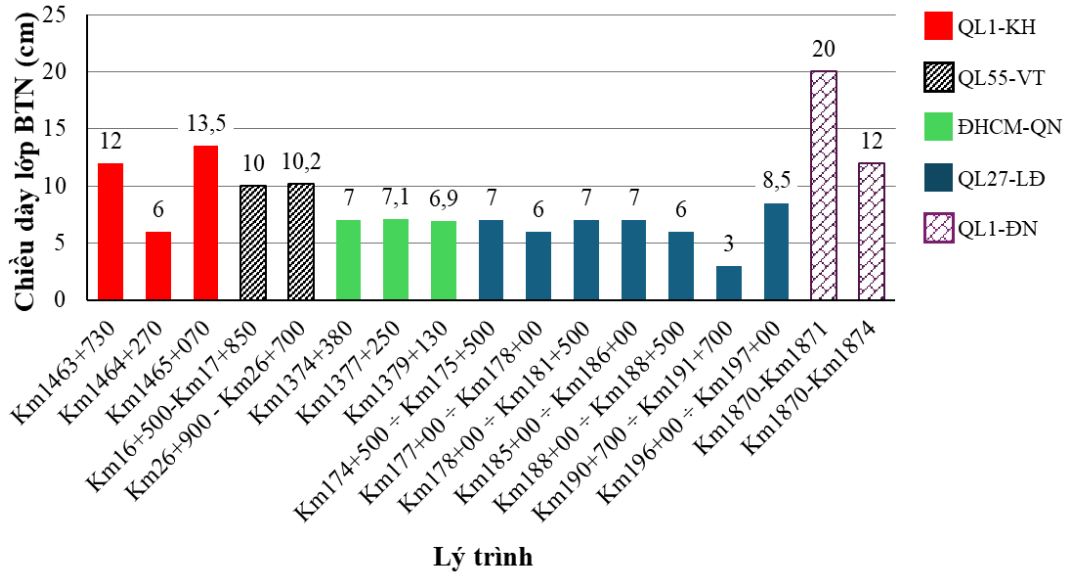
### 3.3. Kết quả khảo sát

Kết quả khảo sát chiều dày lớp BTN và mô đun đàn hồi tại đáy hố đào của năm tuyến QL được thể hiện lần lượt trong Hình 6 và Hình 7. Qua phân tích cho thấy mặt đường tại các tuyến QL này đã bị xuống cấp nghiêm trọng sau thời gian dài khai thác với lưu lượng phương tiện vượt xa thiết kế. Các đoạn tuyến đã nhiều lần được sửa chữa cục bộ, dẫn đến sự thay đổi lớn về chiều dày lớp BTN cũng như mô đun đàn hồi giữa các vị trí.

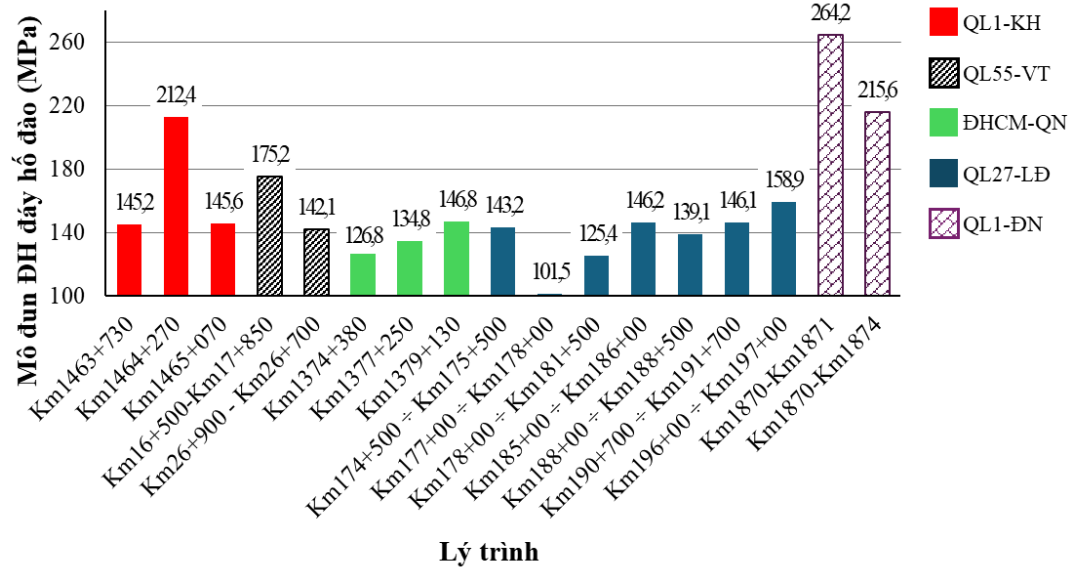
Cụ thể, chiều dày lớp BTN dao động từ 3 cm đến 20 cm, trong đó đoạn Km870–Km874 (QL1 – Đồng Nai) có lớp BTN dày nhất (20 cm), cho thấy đã được tăng cường nhiều lần; trong khi đoạn Km190+900–Km191+700 (QL1 – Lâm Đồng) chỉ dày 3 cm, tiềm ẩn nguy cơ hư hỏng



sớm nếu không được xử lý phù hợp. Mô đun đàn hồi tại đáy hố đào cũng có sự chênh lệch lớn, dao động từ 101,5 MPa đến 264,2 MPa. Giá trị cao nhất ghi nhận tại đoạn Km870–Km871, cho thấy chất lượng nền đường tương đối tốt; trong khi đoạn Km181+500 (QL27 – Lâm Đồng) có mô đun thấp nhất (101,5 MPa), cho thấy kết cấu yếu, cần thiết phải gia cố trong thiết kế tái chế.



Hình 6. Kết quả khảo sát chiều dày lớp BTN.



Hình 7. Kết quả khảo sát mô đun đàn hồi ở bề mặt lớp móng trên (đáy hố đào).

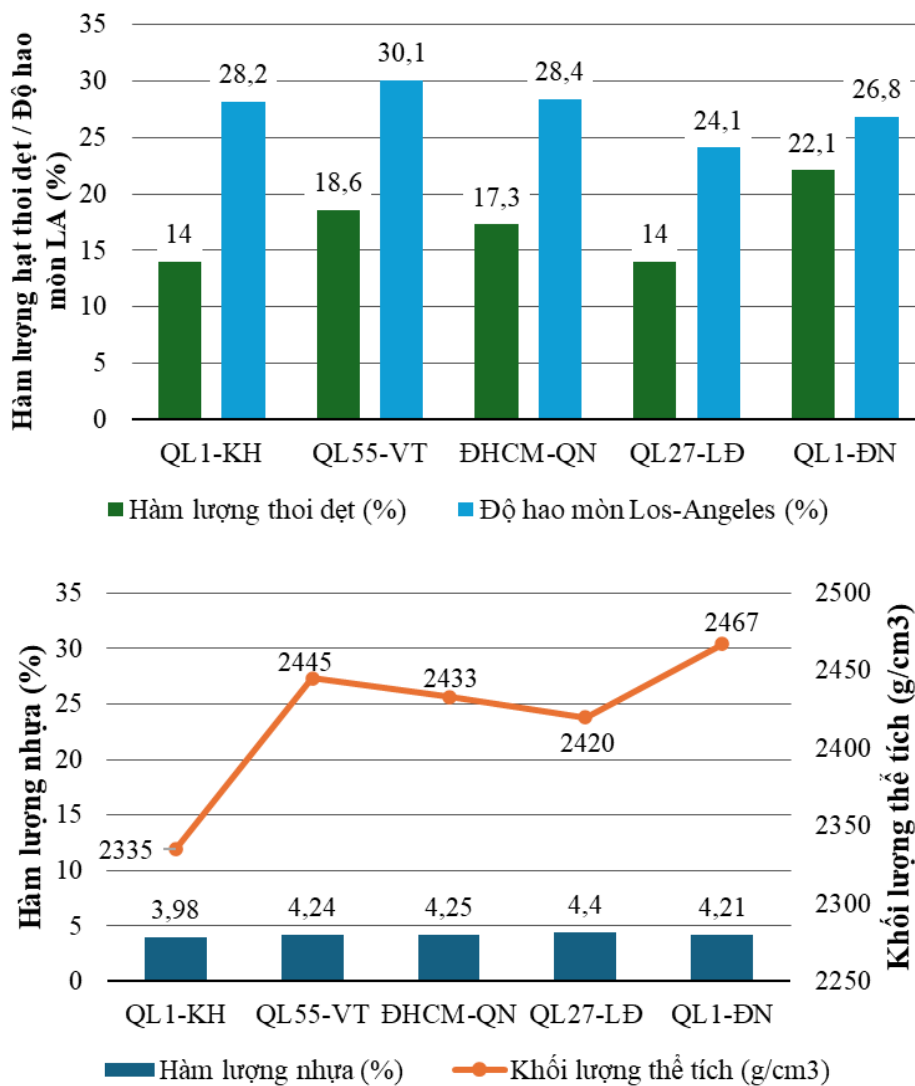
### 3.4. Kết quả thí nghiệm

Ngoài khảo sát hiện trường, các thí nghiệm trong phòng cũng được thực hiện nhằm đánh giá đặc tính vật liệu tái chế. Cụ thể, các chỉ tiêu như hàm lượng nhựa, khối lượng thể tích của BTN, hàm lượng hạt toai dẹt và độ hao mòn Los Angeles của cấp phối đá dăm được xác định (Hình 8). Đồng thời, thành phần hạt của BTN và cấp phối đá dăm cũng được phân tích để xây dựng cấp phối hỗn hợp. Hình 9 thể hiện đường cấp phối hạt của hỗn hợp RAP (gồm 65% BTN và 35% cấp phối đá dăm), cho thấy kết quả nằm trong giới hạn đường bao tiêu chuẩn, đảm bảo yêu cầu kỹ thuật cho vật liệu tái chế.

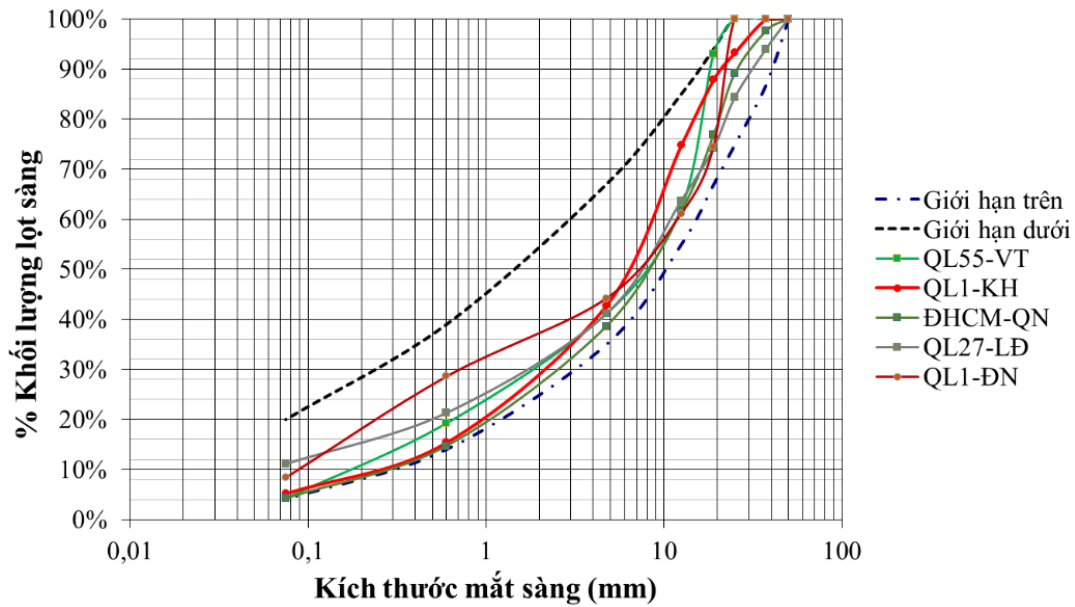
#### 4. THIẾT KẾ THÀNH PHẦN HỖN HỢP BTN TÁI CHẾ NGUỘI SỬ DỤNG NHỰA ĐƯỜNG BỌT

Thiết kế thành phần hỗn hợp tái chế nguội bằng nhựa đường bột và xi măng nhằm xác định tỷ lệ phối trộn hợp lý giữa vật liệu cào bóc, nhựa đường bột, xi măng và nước theo TCVN 13150-2:2020 [8]. Vật liệu được nghiền, xác định độ ẩm, khối lượng thể tích, thành phần hạt (TCVN 7572-2:2006 [39]), và chỉ số dẻo (TCVN 4197:2012 [40]), sau đó phối trộn theo chiều sâu và khối lượng lớp để tạo mẫu đại diện.

Thiết kế hỗn hợp gồm: (1) Bổ sung 1–1,5% xi măng Pooclăng để điều chỉnh hạt mịn và tăng cường cơ học; (2) Bổ sung cốt liệu nếu cần để hiệu chỉnh cấp phối và tính chất cơ học; (3) Xác định độ ẩm tối ưu ( $W_{tr}$ ) và khối lượng thể tích khô lớn nhất ( $\gamma_{max}$ ); (4) Tạo bột nhựa đường ở 160–180°C, xác định ER và  $\tau_{1/2}$ . Các kết quả thí nghiệm chỉ tiêu kỹ thuật của nhựa đường bột đều đáp ứng yêu cầu nêu tại Điều 5 của TCVN 13150-2:2020 [8]; (5) Chế tạo mẫu Marshall, đánh giá khối lượng thể tích, cường độ kéo gián tiếp khô – ướt và còn lại; (6) Xác định hàm lượng nhựa tối ưu và mô đun đàn hồi.



Hình 8. Kết quả thí nghiệm hàm lượng hạt thoi dẹt và độ hao mòn Los-Angeles của cấp phối đá dăm / hàm lượng nhựa và khối lượng thể tích của BTN.



Hình 9. Biểu đồ so sánh đánh giá thành phần hạt của hỗn hợp RAP tại 05 tuyến QL.



Hình 10. Một số hình ảnh thí nghiệm.

Kết quả thiết kế hỗn hợp vật liệu tái chế được trình bày trong Bảng 1 cho thấy sự phù hợp với yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 13150-2:2020 [8]. Chiều dày cào bóc tái chế dao động từ 10–22 cm, trong đó mẫu QL1-KH có giá trị lớn nhất (22 cm), phản ánh mức độ hư hỏng của kết cấu mặt đường cũ. Hàm lượng nhựa đường bột sử dụng trong các mẫu nằm trong khoảng 2,5–2,7%, còn hàm lượng xi măng dao động từ 1,0–1,5%, phù hợp với khuyến nghị nhằm tăng cường khả năng liên kết và ổn định hỗn hợp. Tất cả các mẫu đều đạt yêu cầu về thành phần hạt, đảm bảo tiêu chuẩn kích thước cốt liệu trong hỗn hợp tái chế (Hình 9).

Về các chỉ tiêu cơ lý, phần lớn mẫu đều thỏa mãn giới hạn cho phép. Cường độ kéo khi ép chẻ ở 25°C trong trạng thái khô ( $R_{kc}^k$ ) của các mẫu dao động từ 0,17–0,40 MPa, trong đó mẫu QL1-KH không đạt yêu cầu tối thiểu 0,25 MPa. Tuy nhiên, các mẫu còn lại đều đạt, với mẫu ĐHCM-QN có giá trị cao nhất (0,40 MPa). Cường độ kéo khi ép chẻ trong trạng thái ướt ( $R_{kc}^u$ ) đạt từ 0,13–0,34 MPa. Tỷ số TSR ( $R_{kc}^u / R_{kc}^k$ ) của các mẫu dao động từ 0,80–0,89, nằm trong giới hạn yêu cầu từ 0,8–1,0, phản ánh khả năng kháng ẩm của hỗn hợp. Về cường độ nén không

hạn chế nở hông ( $R_n$ ), mẫu QL1-KH đạt giá trị 1,16 MPa, vượt mức yêu cầu tối thiểu (0,70 MPa).

Tổng thể, các hỗn hợp vật liệu tái chế đều đảm bảo các chỉ tiêu cơ lý thiết yếu, cho thấy tính khả thi của việc sử dụng RAP kết hợp với nhựa đường bột và xi măng trong công tác tái chế nguội tại chỗ mặt đường mềm. Tuy nhiên, cần lưu ý kiểm soát một số yếu tố kỹ thuật trong quá trình thiết kế và thi công để tránh hiện tượng giảm cường độ kéo trong điều kiện khô, như đã quan sát ở mẫu QL1-KH.

Bảng 1. Kết quả thiết kế hỗn hợp.

TT	Các chỉ tiêu	Đơn vị	QL1-KH	QL55-VT	ĐHCM-QN	QL27-LB	QL1-ĐN
1	Chiều dày cào bóc tái chế	cm	22	10	18	16	16
2	Hàm lượng nhựa đường bột	%	2,6	2,7	2,5	2,7	2,5
3	Hàm lượng xi măng	%	1,0	1,3	1,5	1,5	1,0
4	Thí nghiệm thành phần hạt		Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt
5	Độ ẩm tối ưu ( $W_{tu}$ )	%	4,49	4,45	4,52	4,58	4,55
6	Khối lượng thể tích khô lớn nhất ( $\gamma_{max}$ )	(g/cm <sup>3</sup> )	2,396	2,412	2,257	2,311	2,343
7	$R_{kc}^k$	MPa	0,17	0,33	0,4	0,38	0,29
8	$R_{kc}^u$	MPa	0,13	0,29	0,34	0,32	0,26
9	$TSR = R_{kc}^u / R_{kc}^k$		0,80	0,89	0,85	0,87	0,89
10	$R_n$	MPa	1,16	-	-	-	-

## 5. ĐÁNH GIÁ MẶT ĐƯỜNG TÁI CHẾ SAU KHI THI CÔNG

Công tác kiểm tra, đánh giá chất lượng mặt đường sau thi công đối với lớp cào bóc tái chế được thực hiện theo các yêu cầu về kích thước hình học, độ chặt, thành phần cấp phối và chỉ tiêu cơ lý của hỗn hợp. Cụ thể, các thông số hình học như bề rộng, độ dốc ngang, chiều sâu cào bóc và cao độ được kiểm tra bằng thước thép, máy thủy bình và khoan lõi tại mật độ quy định, với sai số cho phép dao động từ  $\pm 5$  cm đến  $\pm 10$  mm hoặc  $\pm 5\%$  chiều dày. Độ chặt lu lèn yêu cầu đạt hệ số  $K \geq 0,98$ , kiểm tra theo phương pháp Proctor với mật độ 2.500 m<sup>2</sup>/1 vị trí. Ngoài ra, thành phần cấp phối hỗn hợp và các chỉ tiêu cơ lý (khối lượng thể tích, cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ khô/ướt) cũng được kiểm soát chặt chẽ. Kết quả kiểm tra cho thấy tất cả các chỉ tiêu này đều đạt yêu cầu theo TCVN 13150-2:2020 [8].

Bảng 2. Kết quả kiểm tra mô đun đàn hồi sau khi sửa chữa

STT	Dự án	Mô đun đàn hồi (MPa)		Đánh giá
		Thực tế	Yêu cầu	
1	QL1 - Khánh Hòa	178,5	160	Đạt
2	QL55-Vũng Tàu	163,4	145	Đạt
3	ĐHCM-Quảng Nam	179,8	160	Đạt
4	QL27-Lâm Đồng	164,2	145	Đạt
5	QL1-Đồng Nai	252,2	160	Đạt

Kết quả kiểm tra mô đun đàn hồi sau sửa chữa tại các dự án ở khu vực miền Trung và miền Nam được tổng hợp trong Bảng 2. Tất cả 5 dự án đều có mô đun đàn hồi thực tế vượt yêu cầu thiết kế, dao động từ 163,4 MPa đến 252,2 MPa, trong khi yêu cầu kỹ thuật chỉ ở mức 145–160 MPa. Cụ thể, mô đun đàn hồi cao nhất ghi nhận tại dự án QL1 – Đồng Nai (252,2 MPa), cao

hơn gần 58% so với yêu cầu (160 MPa). Điều này cho thấy hiệu quả của giải pháp tái chế nguội tại chỗ, đặc biệt trong việc phục hồi và nâng cao khả năng chịu tải của lớp kết cấu mặt đường. Mô đun đàn hồi cao góp phần tăng tuổi thọ khai thác, giảm biến dạng dư dưới tác động tải trọng trùng phục, đồng thời phản ánh chất lượng đồng đều của quá trình thi công và kiểm soát vật liệu. Kết quả này khẳng định tính phù hợp của công nghệ trong điều kiện khai thác thực tế tại khu vực miền Trung và miền Nam.

## 6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã làm rõ tiềm năng ứng dụng của công nghệ tái chế nguội tại chỗ sử dụng nhựa đường bọt và xi măng trong cải tạo và nâng cấp mặt đường bê tông nhựa tại một số tuyến QL trọng điểm ở miền Trung và miền Nam Việt Nam. Kết quả khảo sát hiện trường, thí nghiệm trong phòng và đánh giá sau thi công cho thấy các hỗn hợp tái chế đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật về thành phần cấp phối, chỉ tiêu cơ lý cũng như mô đun đàn hồi. Việc áp dụng công nghệ đã giúp cải thiện đáng kể khả năng chịu lực của kết cấu mặt đường, với mô đun đàn hồi sau thi công đều vượt mức yêu cầu thiết kế. Ngoài ra, công nghệ này còn mang lại nhiều lợi ích thi công như rút ngắn thời gian, giảm chi phí vận chuyển, tiết kiệm vật liệu mới, phù hợp với định hướng phát triển bền vững của ngành giao thông.

Điểm mới của nghiên cứu là: (i) cung cấp bộ dữ liệu thực nghiệm có hệ thống đầu tiên trên năm tuyến QL với các điều kiện khai thác khác nhau ở Việt Nam; (ii) chứng minh hiệu quả công nghệ bằng so sánh trực tiếp giữa kết quả thiết kế trong phòng và mô đun đàn hồi sau thi công, cho thấy sự cải thiện vượt xa yêu cầu thiết kế; và (iii) bổ sung bằng chứng khoa học từ điều kiện khí hậu nhiệt đới và tình trạng xe quá tải, đóng góp mở rộng cơ sở tri thức quốc tế vốn chủ yếu tập trung vào vùng ôn đới.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế. Thứ nhất, chưa có chương trình theo dõi dài hạn để kiểm chứng độ bền và ổn định của lớp tái chế trong khai thác thực tế. Thứ hai, chưa thực hiện phân tích định lượng chi tiết hiệu quả môi trường (giảm phát thải khí nhà kính, tiết kiệm vật liệu tự nhiên, phân tích vòng đời). Do đó, các nghiên cứu tiếp theo nên tập trung vào việc xây dựng chương trình quan trắc dài hạn và mở rộng phân tích định lượng lợi ích môi trường – kinh tế – xã hội, nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc triển khai rộng rãi công nghệ tái chế nguội tại Việt Nam.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Jain, B. Singh, Cold mix asphalt: An overview, *Journal of Cleaner Production*, 280 (2021) 124378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>
- [2]. F. Xiao, S. Yao, J. Wang, X. Li, S. Amirkhanian, A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 180 (2018) 579–604.
- [3]. J. Oliveira, H. Silva, A. Martins, E. Correia, J. Pragosa, P. Mendes, A pavement full-depth reclamation case study using cold in situ recycling with foamed bitumen, *Transportation Research Procedia*, 72 (2023) 4183–4190. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.356>
- [4]. F. Castro, J. Carvalho, G. Henriques, A. Martins, J. Santos, P. Salvador, J. Almeida, H. Silva, J. Oliveira, Cold In-Plant Recycling with Foamed Bitumen for Road Rehabilitation: A Case Study on ER243 Road, in: P. Pereira, J. Pais (Eds.), *Proceedings of the 10th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*, Springer Nature Switzerland, Cham, 2024, pp. 587–598.
- [5]. M. Ben Yahya, S. Lamothe, É. Lachance-Tremblay, Effect of temperature and relative humidity on cement-bitumen treated materials produced in the laboratory using emulsion or foamed bitumen, *Construction and Building Materials*, 468 (2025) 140433.

- [6]. A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, Multivariate Optimization of Recycled Road Base Cold Mixtures with Foamed Bitumen, *Procedia Engineering*, 108 (2015) 436–444.
- [7]. W. Sheng, Y. Li, D. Chong, K. Zhao, Y. Wang, Integrated environmental, economic, and performance assessments of cold recycling technologies for asphalt pavements, *Resources, Conservation and Recycling*, 220 (2025) 108335. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108335>
- [8]. TCVN 13150-2: 2020, Phần 2: Tái chế sâu sử dụng nhựa đường bọt và xi măng, (2020).
- [9]. L.H. Csanyi, Foamed asphalt in bituminous paving mixtures, *Highway Research Board Bulletin*, 160 (1957) 108–122. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/160/160-002.pdf>
- [10]. L.H. Csanyi, Foamed Asphalt, *American Road Builder Association (ARBA)*, 240 (1959) 3–14.
- [11]. D. Jigar Shah, Expansion Ratio and Half Life of Foam Asphalt, *IJSR*, 14 (2025) 348–351.
- [12]. M. Brennan, A laboratory investigation on the use of framed asphalt for recycled bituminous pavements, *Interim Report Purdue Univ., West Lafayette, IN*, 1981.
- [13]. M.I. Giani, G. Dotelli, N. Brandini, L. Zampori, Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, 104 (2015) 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
- [14]. K.W. Lee, T.E. Brayton, M. Mueller, A. Singh, Rational Mix-Design Procedure for Cold In-Place Recycling Asphalt Mixtures and Performance Prediction, *J. Mater. Civ. Eng*, 28 (2016) 04016008.
- [15]. Y. Kim, H. “David” Lee, Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt, *J. Mater. Civ. Eng*, 18 (2006) 116–124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:1\(116\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(116))
- [16]. A. Loizos, C. Plati, V. Papavasiliou, Fiber optic sensors for assessing strains in cold in-place recycled pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 14 (2013) 125–133.
- [17]. A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, Performance and viscoelastic assessment of high-recycle rate cold foamed bitumen mixtures produced with different penetration binders for rehabilitation of deteriorated pavements, *Journal of Cleaner Production*, 258 (2020) 120517.
- [18]. M. Iwański, G. Mazurek, P. Buczyński, M.M. Iwański, Effects of hydraulic binder composition on the rheological characteristics of recycled mixtures with foamed bitumen for full depth reclamation, *Construction and Building Materials*, 330 (2022) 127274.
- [19]. L.P.F. Abreu, J.R.M. Oliveira, H.M.R.D. Silva, D. Palha, P.V. Fonseca, Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates, *Construction and Building Materials*, 142 (2017) 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.085>
- [20]. Y. Kim, H.D. Lee, Performance evaluation of Cold In-Place Recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time, and raveling loss, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16 (2012) 586–593. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1376-0>
- [21]. J. Yan, F. Ni, M. Yang, J. Li, An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 2151–2156.
- [22]. S. Arimilli, P.K. Jain, M.N. Nagabhushana, Optimization of Recycled Asphalt Pavement in Cold Emulsified Mixtures by Mechanistic Characterization, *J. Mater. Civ. Eng*, 28 (2016) 04015132.
- [23]. D. Daneshvar, A. Motamed, R. Imaninasab, Improving fracture and moisture resistance of cold mix asphalt (CMA) using crumb rubber and cement, *Road Materials and Pavement Design*, 23 (2022) 527–545. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1830152>
- [24]. A. Stimilli, G. Ferrotti, A. Graziani, F. Canestrari, Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 14 (2013) 149–161. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774752>
- [25]. W. Zhang, J. Yang, X. Fan, R. Yang, B. Yu, Life-Cycle Cost Analysis of Base Course Using Cold In-Place Recycling: Case Study, in: *Geo-Frontiers 2011*, American Society of Civil Engineers, Dallas, Texas, United States, 2011, pp. 4428–4437. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)453](https://doi.org/10.1061/41165(397)453)

- [26]. A. Almusawi, M.M. Jaleel, S. Shoman, A.P. Lupanov, Field and Laboratory Performance Evaluation of Cement Treated Cold Recycled Asphalt Pavement Mixtures, *J. Transp. Eng., Part B: Pavements*, 150 (2024) 04024026. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1373>
- [27]. F. Cardone, A. Grilli, M. Bocci, A. Graziani, Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials, *International Journal of Pavement Engineering*, 16 (2015) 868–880.
- [28]. H. Chu, J. Zhang, Y.H. Lu, Experimental Study on Pavement Performance of Emulsified Asphalt Cement Concrete, 357–360 (2013) 888–892.
- [29]. B. Dołżycki, P. Jaskuła, Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6 (2019) 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.02.002>
- [30]. Y. Wang, Z. Leng, X. Li, C. Hu, Cold recycling of reclaimed asphalt pavement towards improved engineering performance, *Journal of Cleaner Production*, 171 (2018) 1031–1038.
- [31]. J. Yan, F. Ni, J. Jia, Z. Tao, Investigation on the Bulk Performance and Microstructure of Emulsion-Based, Cold In-Place Recycling Mixtures, *Journal of Testing and Evaluation*, 37 (2009) 436–441. <https://doi.org/10.1520/JTE000344>
- [32]. C. Godenzoni, Multiscale Rheological and Mechanical characterization of Cold Mixtures, PhD Dissertation, Università Politecnica delle Marche, 2017. <https://iris.univpm.it/handle/11566/245296>
- [33]. I. Androjić, G. Kaluder, Cold recycling of asphalt pavements using foamed bitumen and cement, *Gradevinar* 65 (2013) 463–471. <http://dx.doi.org/10.14256/JCE.900.2012>
- [34]. W. Algraiti, A. Kavussi, The role of rejuvenating agents in cold recycled foam asphalt mixes, *Case Studies in Construction Materials*, 19 (2023) e02515. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02515>
- [35]. A. Kavussi, A. Modarres, Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 1920–1927.
- [36]. T.L. Phạm, Ứng dụng lớp tái sinh nguội tại chỗ bằng bitum bột và xi măng trong kết cấu áo đường ô tô để cải tạo, nâng cấp hệ thống đường nội đô TP. Hải Phòng, 08 (2024) 94–96.
- [37]. M.H. Nguyễn, N.L. Đinh, N.D. Nguyễn, Công nghệ tái chế nguội bitum bột kết hợp xi măng và giải pháp kỹ thuật sửa chữa khắc phục hư hỏng, lún trôi, hằn lún vệt bánh xe trên mặt đường bê tông nhựa, 2018.
- [38]. Infracol, Công nghệ tái sinh nguội tại chỗ mặt đường bằng bitum bột và xi măng, 2018.
- [39]. TCVN 7572-2:2006, Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử - Phần 2: Xác định thành phần hạt, 2006.
- [40]. TCVN 4197:2012, Đất xây dựng - Phương pháp xác định giới hạn dẻo và giới hạn chảy trong phòng thí nghiệm, 2012.