



## HOT IN-PLACE RECYCLING TECHNOLOGY FOR MAINTENANCE OF ASPHALT PAVEMENT

Tran Thi Cam Ha<sup>1</sup>, Thieu Duc Long<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup> Vietnam Road Administration, D20 Ton That Thuyet, Cau Giay Ward, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 22/10/2025

Revised: 26/11/2025

Accepted: 10/12/2025

Published online: 15/12/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.9.9>

\* *Corresponding author*

Email: Tranthcamha@utc.edu.vn; Tel: +84912067633

**Abstract.** Hot In-Place Recycling (HIR) is an advanced pavement maintenance technology that restores the performance of existing asphalt pavements without removing the old layer. This study reviews the main HIR technologies worldwide and evaluates their applicability in Vietnam through laboratory testing. The selected Remixing method was implemented on a trial section to investigate the technical characteristics of the recycled hot asphalt mixture (HMA). Three types of mixtures were analyzed: (1) original HMA, (2) recycled mixture with 20% new HMA, and (3) recycled mixture with 20% new HMA plus 0.25% virgin bitumen. The Marshall stability, flow, air voids, and residual stability were tested. Results show that the addition of new HMA and bitumen significantly improved both strength and flexibility, increasing stability by up to 22% and flow by 50%. The recycled mixtures met Vietnamese standard requirements (TCVN 13567 - 1 : 2022) and demonstrated good moisture resistance. Findings suggest that the HIR–Remixing method is technically feasible for asphalt pavement maintenance in Vietnam, provided that appropriate mix design and quality control are applied.

**Keywords:** Hot In-Place Recycling (HIR), asphalt pavement, Remixing, maintenance.

@ 2025 University of Transport and Communications



## CÔNG NGHỆ TÁI CHẾ NÓNG TẠI CHỖ DÙNG TRONG BẢO TRÌ MẶT ĐƯỜNG BÊ TÔNG NHỰA

Trần Thị Cẩm Hà<sup>1</sup>, Thiều Đức Long<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup> Cục Đường bộ Việt Nam, D20 Tôn Thất Thuyết, Phường Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 22/10/2025

Ngày nhận bài sửa: 26/11/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/12/2025

Ngày xuất bản Online: 15/12/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.9.9>

\* Tác giả liên hệ

Email: [Tranhticamha@utc.edu.vn](mailto:Tranhticamha@utc.edu.vn); Tel: +84912067633

**Tóm tắt.** Công nghệ tái chế nóng tại chỗ (Hot In-Place Recycling – HIR) là giải pháp tiên tiến trong bảo trì mặt đường, cho phép phục hồi khả năng khai thác của lớp bê tông nhựa (BTN) mà không cần bóc bỏ toàn bộ vật liệu cũ. Nghiên cứu này tổng quan các công nghệ HIR đang áp dụng trên thế giới, đồng thời đánh giá khả năng ứng dụng tại Việt Nam thông qua thí nghiệm thực tế và thí nghiệm trong phòng với phương pháp Remixing. Ba loại hỗn hợp được xem xét gồm: (1) BTN hiện trạng, (2) BTN tái chế có bổ sung 20% BTN mới, và (3) BTN tái chế có bổ sung 20% BTN mới cùng 0,25% nhựa 60/70. Kết quả thí nghiệm Marshall cho thấy độ ổn định tăng đến 22%, độ dẻo tăng 50%, và độ ổn định còn lại vượt 93%, đạt yêu cầu tiêu chuẩn TCVN 13567 - 1 : 2022. Hỗn hợp BTN tái chế đạt sự cân bằng tốt giữa độ bền và tính linh hoạt, chứng minh tính khả thi của công nghệ HIR trong điều kiện Việt Nam khi có quy trình thiết kế và kiểm soát chất lượng phù hợp.

**Từ khóa:** Tái chế nóng tại chỗ, bê tông nhựa, Remixing, bảo trì mặt đường.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh hạ tầng giao thông ngày càng chịu áp lực lớn từ lưu lượng xe gia tăng và biến đổi khí hậu, công tác bảo trì mặt đường đóng vai trò then chốt nhằm duy trì tuổi thọ và đảm bảo an toàn khai thác. Đặc biệt, mặt đường bê tông nhựa (BTN) – vốn phổ biến ở Việt Nam – thường xuyên đối mặt với các dạng hư hỏng như nứt nẻ, hằn lún vệt bánh xe, và bong tróc bề mặt, khiến nhu cầu sửa chữa kịp thời, hiệu quả càng trở nên cấp thiết. Tuy nhiên, các phương pháp sửa chữa truyền thống thường tốn kém về chi phí, tiêu tốn năng lượng và vật liệu mới, đồng thời

gây ảnh hưởng lớn đến môi trường. Điều này đặt ra yêu cầu phải ứng dụng các công nghệ sửa chữa tiên tiến, thân thiện với môi trường và hiệu quả về mặt kinh tế.

Trong số các phương pháp bảo trì, tái chế nóng tại chỗ (Hot In-Place Recycling – HIR) nổi lên như một công nghệ tiên tiến, giúp phục hồi mặt đường mà không cần bóc bỏ toàn bộ lớp BTN cũ. Công nghệ này tận dụng lớp vật liệu hiện hữu thông qua các bước gia nhiệt, xới trộn, bổ sung tái sinh (bitum, phụ gia) và lu lèn ngay tại hiện trường [1-3]. Tùy theo cấu hình thiết bị và mức độ hư hỏng, HIR được chia thành ba phương pháp chính gồm: Gia nhiệt bề mặt (Surface Heater), tái chế trộn lại (Remixing), tái chế đồng thời rải lớp mới (Repaving) [4, 5].

Công nghệ này đã được nghiên cứu và ứng dụng tại nhiều quốc gia như Hoa Kỳ, Trung Quốc, Đức, Phần Lan, Nhật Bản... [2, 4-9]. Tại Hoa Kỳ, công nghệ này được phát triển từ thập niên 1970 và từng đạt tỷ lệ tái chế lên đến 20 triệu m<sup>2</sup>/năm [1]. Các nghiên cứu quốc tế đã chứng minh hiệu quả của HIR trong việc giảm tiêu thụ vật liệu mới, tiết kiệm chi phí, rút ngắn thời gian thi công và kéo dài tuổi thọ mặt đường, đồng thời góp phần bảo vệ môi trường thông qua giảm phát thải CO<sub>2</sub> [2-12]. Shoenberger và Voller [5] nhận định rằng HIR giúp giảm tới 30–40% chi phí vật liệu, giảm từ 20–50% thời gian thi công so với phương pháp cào bóc truyền thống. Button và cộng sự [4,13] cũng khẳng định công nghệ này có thể phục hồi kết cấu và cải thiện độ nhám bề mặt một cách đáng kể, đặc biệt khi kết hợp với phụ gia polymer hoặc bitum bột. Sun và cộng sự [3] đánh giá đặc tính lu lèn và cấu trúc hỗn hợp tạo thành sau khi tái chế bằng công nghệ HIR, cho thấy hỗn hợp sau thi công đạt độ bền và tính bám dính cao, phù hợp với các tuyến đường có lưu lượng lớn.

Tại Việt Nam, công tác bảo trì mặt đường bê tông nhựa phổ biến áp dụng công nghệ tái chế nguội tại chỗ và các công nghệ truyền thống khác [14]. Việt Nam cũng chưa có các nghiên cứu chuyên sâu về hiệu quả cơ học, công nghệ thi công, điều kiện áp dụng, cũng như khả năng nội địa hóa thiết bị của công nghệ HIR. Sự thiếu hụt cơ sở dữ liệu về hiệu quả kỹ thuật, kinh tế và môi trường của công nghệ này trong điều kiện khai thác tại Việt Nam, cùng với việc chưa có hướng dẫn kỹ thuật đồng bộ và thiết bị chuyên dụng [15] đang là những rào cản lớn đối với việc triển khai công nghệ này. Xuất phát từ yêu cầu thực tiễn đó, nghiên cứu này nhằm phân tích, đánh giá khả năng ứng dụng công nghệ tái chế nóng tại chỗ trong công tác bảo trì mặt đường BTN tại Việt Nam, góp phần đề xuất các định hướng kỹ thuật và hoàn thiện cơ sở khoa học cho việc triển khai công nghệ HIR trong nước một cách hiệu quả, phù hợp với điều kiện kỹ thuật và kinh tế – xã hội hiện nay.

## **2. CÁC CÔNG NGHỆ HIR ĐANG ĐƯỢC ÁP DỤNG TRÊN THẾ GIỚI**

Hiện nay trên thế giới, công nghệ tái chế nóng tại chỗ đang được sử dụng gồm ba phương pháp chính được tổng hợp trong Bảng 1.

Theo Button và cộng sự [4], khi so sánh ba phương pháp tái chế nóng tại chỗ, phương pháp remixing – tức tái chế có bổ sung phụ gia và/hoặc bê tông nhựa mới và/hoặc chất kết dính – được đánh giá là phù hợp nhất để xử lý hư hỏng lớp mặt BTN mà chưa cần can thiệp sâu vào kết cấu bên dưới. Dựa trên cơ sở đó, nhóm tác giả đã chọn phương pháp Remixing – Tái chế trộn lại để triển khai cho đoạn thử nghiệm trong nghiên cứu.

## **3. THIẾT BỊ VÀ QUY TRÌNH THI CÔNG TÁI CHẾ NÓNG TẠI CHỖ (HIR) THEO PHƯƠNG PHÁP REMIXING**

### **3.1. Nguyên lý công nghệ HIR theo phương pháp Remixing**

Phương pháp Remixing trong công nghệ tái chế nóng tại chỗ (Hot In-Place Recycling – HIR) được thực hiện bằng cách gia nhiệt trực tiếp lớp bê tông nhựa (BTN) cũ trên mặt đường

đến nhiệt độ thích hợp, sau đó cào xới và trộn lại với phụ gia, chất kết dính hoặc một phần BTN mới nhằm cải thiện đặc tính hỗn hợp. Hỗn hợp tái chế sau khi được phối trộn đồng đều sẽ được rải và lu lên trở lại để hình thành lớp mặt đường mới.

So với các phương pháp HIR khác như Surface recycling (tái chế bề mặt) hoặc Repaving (tái chế kết hợp thảm phủ mới), Remixing có ưu thế ở chỗ vừa tận dụng vật liệu BTN cũ, vừa cho phép bổ sung vật liệu mới và phụ gia để nâng cao chất lượng. Nhờ đó, phương pháp này đặc biệt phù hợp cho công tác bảo trì các tuyến đường bị hư hỏng ở lớp trên cùng (nứt nẻ, hằn lún, bong tróc) nhưng chưa ảnh hưởng đến kết cấu nền áo đường bên dưới.

Bảng 1. Các phương pháp trong công nghệ tái chế nóng tại chỗ [4,5].

| Phương pháp                       | Mô tả quy trình chính                                                                                    | Độ sâu xử lý (ước tính) | Ưu điểm chính                                          | Một số hạn chế                                         | Phạm vi áp dụng                           |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Gia nhiệt bề mặt (Surface Heater) | Sử dụng nhiệt để làm mềm lớp BTN trên cùng, sau đó lu lên lại                                            | 10–20 mm                | Thi công nhanh, ít thiết bị, không làm thay đổi cao độ | Không cải thiện kết cấu tổng thể                       | Vá ổ gà nhỏ, vết nứt nông                 |
| Tái chế trộn lại (Remixing)       | Gia nhiệt, xới phá BTN cũ, trộn với phụ gia và/hoặc chất kết dính mới và/hoặc BTN mới, sau đó lu lên lại | 25–50 mm                | Cải thiện độ nhám, khả năng chịu tải của lớp cũ        | Cần kiểm soát nhiệt độ và chiều sâu gia nhiệt đồng đều | Sửa chữa lớp mặt trên diện rộng           |
| Tái chế + rải lớp mới (Repaving)  | Tái chế lớp cũ như Remixing, sau đó rải thêm một lớp BTN mới phía trên                                   | 40–60 mm                | Tăng tuổi thọ, bề mặt đồng nhất, tăng độ bền           | Chi phí cao hơn, yêu cầu đồng bộ máy móc               | Sửa chữa nâng cấp với kết cấu hai lớp BTN |

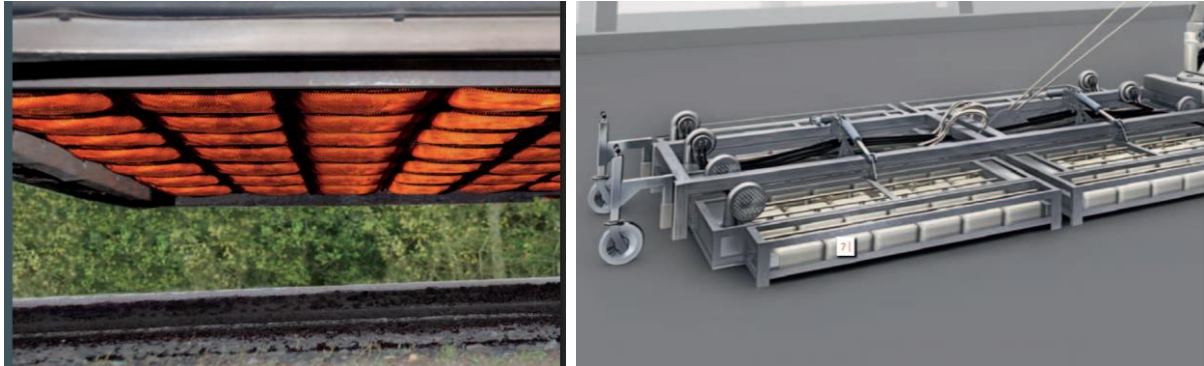
Bảng 2. Hệ thống thiết bị sử dụng trong công nghệ Remixing [4,5].

| TT | Thiết bị                              | Chức năng chính                                                                                                                                                               |
|----|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Máy sấy nóng mặt đường (Heater units) | Gia nhiệt lớp BTN cũ bằng khí gas hoặc hồng ngoại để làm mềm lớp BTN cũ, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình cào xới và trộn lại.                                           |
| 2  | Máy cào xới (Scarifying unit)         | Cào bóc lớp BTN cũ đã được nung nóng đến độ sâu thiết kế (thường từ 2–5 cm).                                                                                                  |
| 3  | Máy trộn (Mixer unit)                 | Phối trộn BTN cũ với phụ gia và/hoặc chất kết dính và/hoặc BTN mới nhằm cải thiện tính chất hỗn hợp.                                                                          |
| 4  | Máy rải (Paver)                       | Rải hỗn hợp tái chế đã được phối trộn lên bề mặt đường theo chiều dày yêu cầu.                                                                                                |
| 5  | Máy lu (Roller)                       | Lu lên hỗn hợp tái chế đạt độ chặt, độ bằng phẳng, độ nhám cần thiết.                                                                                                         |
| 6  | Thiết bị phụ trợ                      | Xe bồn cấp phụ gia, chất kết dính hoặc xe tải cấp BTN mới; các phương tiện phục vụ công tác vận hành, đảm bảo an toàn giao thông và môi trường trong suốt thời gian thi công. |

### 3.2. Hệ thống thiết bị sử dụng trong công nghệ Remixing

Công nghệ tái chế nóng tại chỗ theo phương pháp remixing được triển khai bằng một dây chuyền thiết bị chuyên dụng, hoạt động liên hoàn và đồng bộ. Hệ thống này thường bao gồm một số thiết bị thể hiện chi tiết trong Bảng 2:

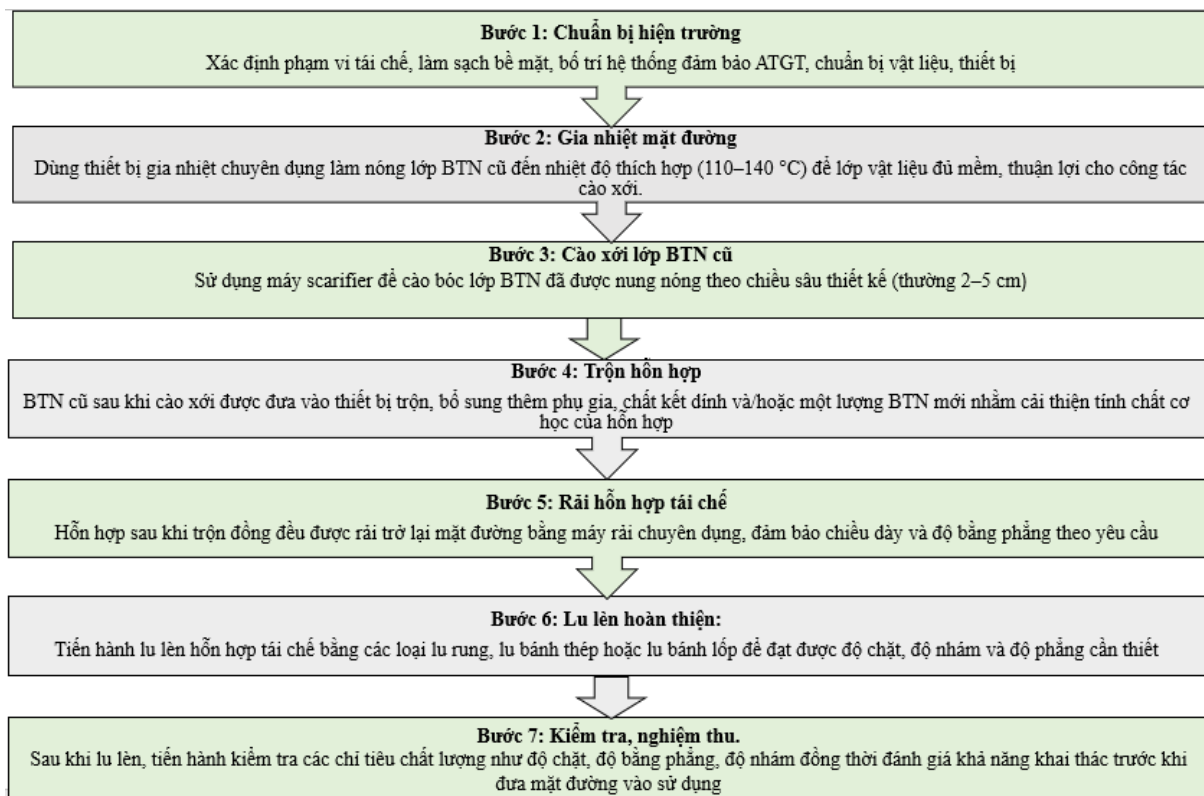
Việc tổ chức thiết bị thành một dây chuyền khép kín cho phép vừa tận dụng vật liệu cũ, vừa nâng cao chất lượng lớp mặt sau khi tái chế, đồng thời rút ngắn đáng kể thời gian thi công so với các phương pháp bảo trì truyền thống.



Hình 1. Hệ thống gia nhiệt hồng ngoại có thể điều chỉnh chiều rộng làm việc [16].

### 3.3. Quy trình thực hiện công nghệ HIR – Remixing

Quy trình thi công tái chế nóng tại chỗ theo phương pháp remixing được thực hiện theo các bước cơ bản sau (Hình 2):



Hình 2. Quy trình công nghệ HIR theo phương pháp Remixing.

Quy trình thi công khép kín này vừa đảm bảo tận dụng được nguồn vật liệu BTN cũ, vừa rút ngắn thời gian thi công, giảm thiểu ảnh hưởng đến giao thông so với các phương pháp sửa chữa, duy tu truyền thống.

#### 4. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM TRONG PHÒNG ĐÁNH GIÁ HỖN HỢP BTN TÁI CHẾ NÓNG TẠI CHỖ THEO PHƯƠNG PHÁP REMIXING

Ở Việt Nam hiện nay, ngoại trừ lớp tạo nhám trên các tuyến cao tốc và đường cấp cao, lớp mặt trên của kết cấu mặt đường bê tông nhựa (BTN) thông thường sử dụng cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5 mm (BTNC 12,5), với chiều dày phổ biến khoảng 5 cm (dao động từ 4 ÷ 6 cm). Công nghệ tái chế nóng tại chỗ chủ yếu được áp dụng cho các hư hỏng nhỏ có chiều dày xử lý từ 2 ÷ 5 cm, đòi hỏi thi công nhanh và bảo đảm chất lượng. Vì vậy, nghiên cứu này lựa chọn đánh giá các chỉ tiêu kỹ thuật của BTN tái chế nóng với cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5 mm. Loại BTN này có thể được sử dụng linh hoạt cho cả lớp mặt trên và lớp mặt dưới trong bảo dưỡng thường xuyên đường bộ.

Hỗn hợp BTN tái chế nóng tại chỗ cần đáp ứng các chỉ tiêu kỹ thuật tương đương với BTN theo tiêu chuẩn hiện hành. Do đặc thù và sửa thường có khối lượng nhỏ và yêu cầu thi công nhanh, các chỉ tiêu được lựa chọn phải đơn giản, dễ thực hiện nhưng vẫn đủ để kiểm soát thành phần và chất lượng vật liệu. Cụ thể, các chỉ tiêu chính gồm:

- Thí nghiệm Marshall để xác định độ ổn định, độ dẻo, độ rỗng dư và độ ổn định còn lại;
- Thí nghiệm chiết tách để xác định hàm lượng nhựa và thành phần hạt.

Các thí nghiệm được thực hiện tại Trung tâm KHCN – Trường Đại học GTVT. Thí nghiệm Marshall thực hiện theo AASHTO T245-2015. Hệ số biến sai  $C_v$  cho độ ổn định Marshall là 6% và cho độ dẻo là 9%; theo ASTM C670-2015, sai lệch tối đa của tổ 3 mẫu là 3,3 $C_v$ . Thực nghiệm hiện trường được tiến hành trên một đoạn tuyến quốc lộ thuộc tỉnh Nghệ An, mặt đường khai thác 7 năm. Mẫu BTNC 12,5 tái chế nóng được lấy tại vị trí hư hỏng, cách tim đường 2 m.

##### 4.1. Thí nghiệm đánh giá hỗn hợp BTN cũ (BTN hiện trạng - HT) trước khi tái chế

Mẫu bê tông nhựa cũ được lấy nguyên trạng từ hiện trường, đưa về phòng thí nghiệm để làm nhỏ, gia nhiệt, đúc mẫu và thí nghiệm các chỉ tiêu Marshall theo AASHTO T245-2015; hàm lượng nhựa xác định theo TCVN 8860-2:2011. Các kết quả thử nghiệm đảm bảo độ chụm theo ASTM C670-2015 và được trình bày chi tiết trong Bảng 3, Hình 4 và Hình 5.



a. Mẫu BTN cũ sau khi được làm nhỏ



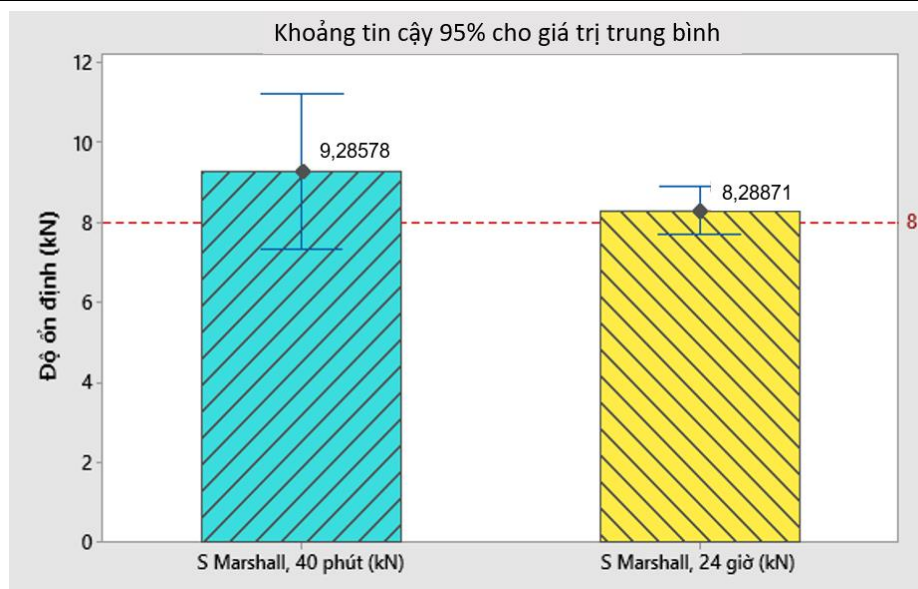
b. Thí nghiệm chiết tách nhựa

Hình 3. Một số hình ảnh thí nghiệm BTN cũ.

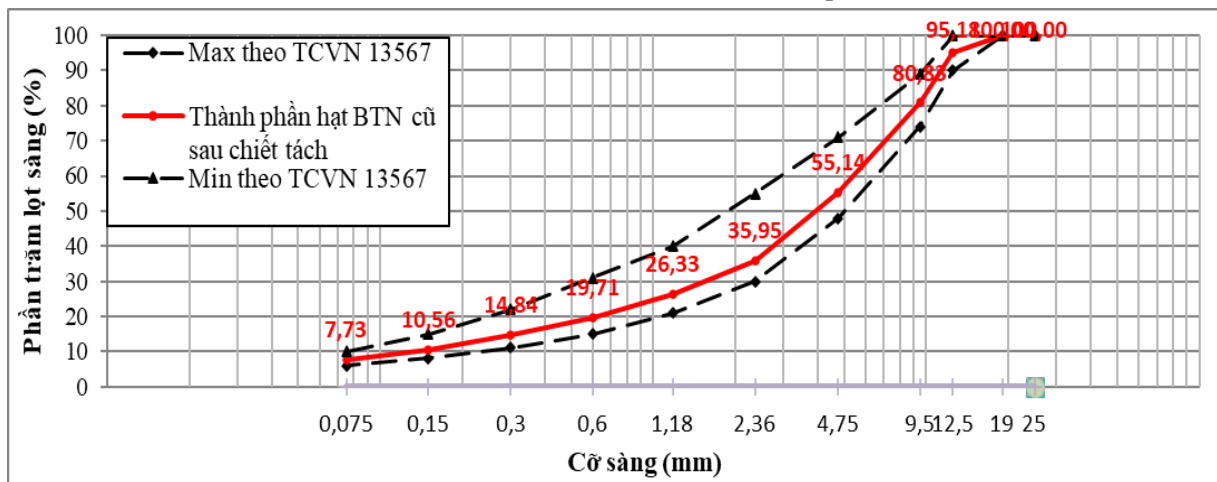


Bảng 3. Kết quả thí nghiệm xác định các chỉ tiêu Marshall và hàm lượng nhựa sau chiết tách của BTN cũ (HT) trước khi tái chế.

| Mẫu               | Tỷ trọng lớn nhất | Độ rỗng dư (%) | Độ ổn định ngâm 40 phút (kN) | Độ dẻo (mm) | Độ ổn định ngâm 24h (kN) | Tỷ lệ độ ổn định còn lại (%) | Hàm lượng nhựa sau chiết tách, (%) |
|-------------------|-------------------|----------------|------------------------------|-------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| M1                | 2,578             | 5,51           | 9,31                         | 1,99        | 8,48                     | 89,26                        | 4,31                               |
| M2                | 2,601             | 5,29           | 8,49                         | 2,52        | 8,02                     |                              | 4,24                               |
| M3                | 2,529             | 5,33           | 10,05                        | 2,26        | 8,37                     |                              | 4,20                               |
| <b>Trung bình</b> | <b>2,569</b>      | <b>5,38</b>    | <b>9,29</b>                  | <b>2,26</b> | <b>8,29</b>              |                              | <b>4,25</b>                        |



Hình 4. Độ ổn định Marshall của hỗn hợp BTN cũ.



Hình 5. Biểu đồ cấp phối hạt sau chiết tách của mẫu BTN cũ (HT).

Kết quả thí nghiệm (Bảng 3, Hình 4 và Hình 5) cho thấy các chỉ tiêu độ ổn định, độ dẻo và độ rỗng dư của bê tông nhựa hiện trạng (BTN cũ) vẫn đáp ứng yêu cầu theo tiêu chuẩn hiện hành [17]. Tuy nhiên, hàm lượng nhựa trong BTN cũ chỉ đạt 4,25% theo khối lượng hỗn hợp –

thấp hơn đáng kể so với khoảng giá trị tham khảo trong TCVN 8819:2011 (5,0–6,0%) cũng như so với mức điển hình của BTNC 12,5 sử dụng làm lớp mặt trong thực tế ở Việt Nam (4,5–5,2%). Hàm lượng nhựa thấp là nguyên nhân làm giảm khả năng dính bám giữa cốt liệu và nhựa, dễ dẫn đến hiện tượng bong tách màng nhựa, nứt rạn và thấm nước. Bên cạnh đó, nhựa trong BTN cũ đã bị lão hóa do tác động của oxy hóa, nhiệt độ và tải trọng trong quá trình khai thác, làm thay đổi tính chất cơ lý của nhựa và hỗn hợp. Do đó, cần bổ sung BTN mới và/hoặc nhựa đường mới để khôi phục hàm lượng nhựa tối ưu trong hỗn hợp tái chế.

#### 4.2. Thực nghiệm đánh giá hỗn hợp BTN tái chế có bổ sung thêm hỗn hợp BTN mới và nhựa đường

##### 4.2.1. Thực nghiệm đánh giá hỗn hợp BTN tái chế có bổ sung thêm hỗn hợp BTN mới

Nghiên cứu tiến hành tại Km13+125 vị trí cách tim 2 m phía trái tuyến (ký hiệu VT1), hỗn hợp BTN tái chế gồm 80% BTN cũ và 20% BTN 12,5 mới (thiết kế theo TCVN 13567:2022, hàm lượng nhựa tối ưu 4,7%). Hỗn hợp tái chế không bổ sung nhựa mới. Hỗn hợp BTN tái chế được trộn bằng máy và thi công trực tiếp tại hiện trường. Mẫu hỗn hợp BTN tái chế lấy từ vị trí thi công được đưa về phòng thí nghiệm, gia nhiệt, đúc mẫu và thí nghiệm xác định các chỉ tiêu Marshall và hàm lượng nhựa. Các kết quả thử nghiệm đảm bảo độ chụm theo ASTM C670-2015 và được trình bày ở Bảng 4, Hình 7.

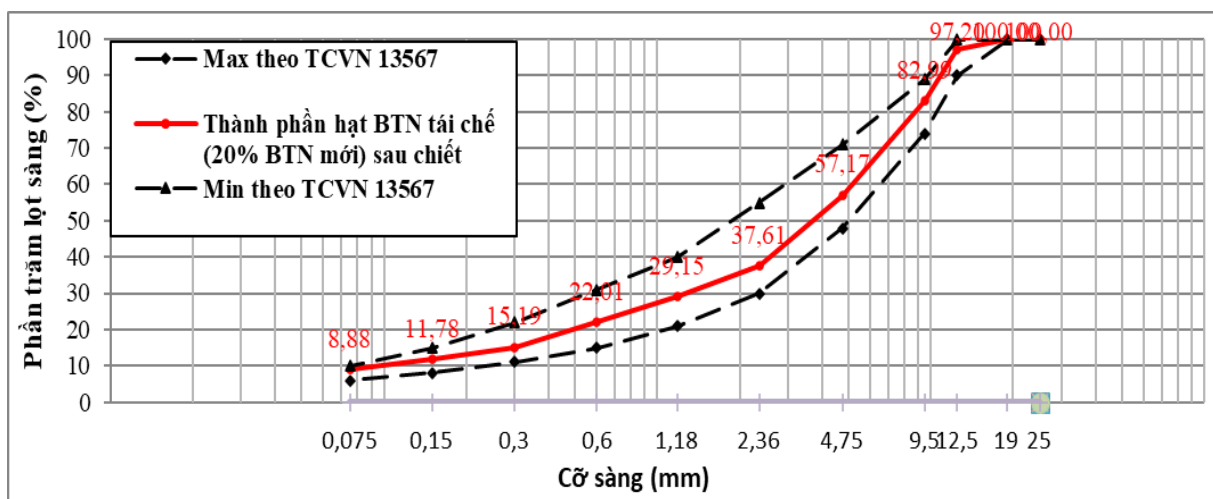


Hình 6. Một số hình ảnh thí nghiệm Marshall.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm xác định các chỉ tiêu Marshall và hàm lượng nhựa sau chiết tách của BTN tái chế có bổ sung BTN mới (VT1).

| STT        | Tỷ trọng lớn nhất | Độ rỗng dư (%) | Độ ổn định ngâm 40' (kN) | Độ dẻo (mm) | Độ ổn định ngâm 24h (kN) | Tỷ lệ độ ổn định còn lại (%) | Hàm lượng nhựa sau chiết tách, % |
|------------|-------------------|----------------|--------------------------|-------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| M1         | 2,572             | 4,50           | 10,19                    | 2,35        | 10,03                    | 93,64                        | 4,33                             |
| M2         | 2,595             | 4,67           | 9,70                     | 3,16        | 9,07                     |                              | 4,40                             |
| M3         | 2,499             | 4,27           | 10,90                    | 2,47        | 9,72                     |                              | 4,32                             |
| Trung bình | 2,555             | 4,48           | 10,26                    | 2,66        | 9,61                     |                              | 4,35                             |



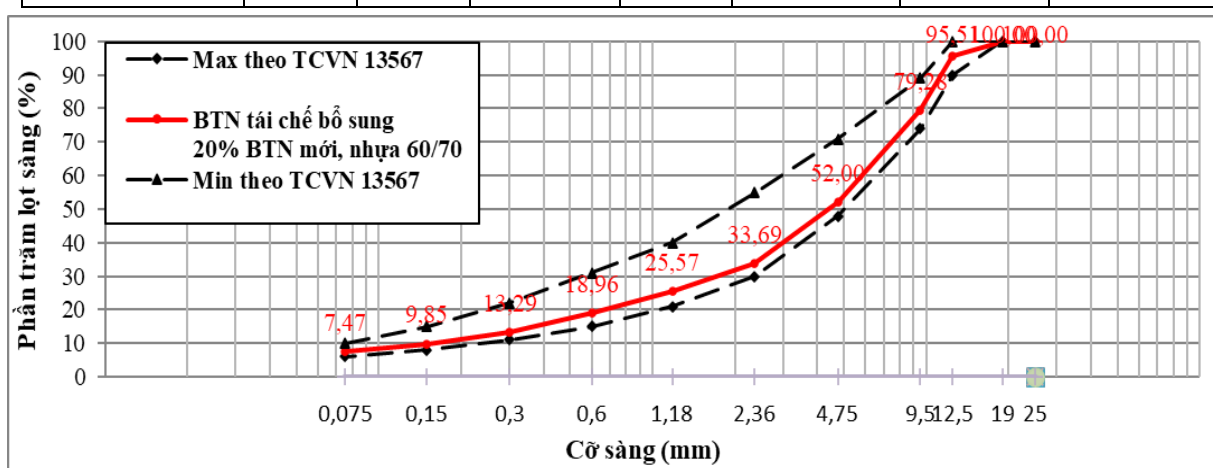


Hình 7. Biểu đồ cấp phối hạt sau chiết tách của BTN tái chế bổ sung thêm 20% BTN mới (VT1).

#### 4.2.2 Thực nghiệm đánh giá hỗn hợp BTN tái chế có bổ sung thêm hỗn hợp BTN mới và nhựa đường.

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm xác định các chỉ tiêu Marshall và hàm lượng nhựa sau chiết tách của BTN tái chế có bổ sung BTN mới và nhựa 60/70 (VT2).

| STT        | Tỷ trọng lớn nhất | Độ rỗng dư (%) | Độ ổn định ngâm 40' (kN) | Độ dẻo (mm) | Độ ổn định ngâm 24h (kN) | Tỷ lệ độ ổn định còn lại (%) | Hàm lượng nhựa sau chiết tách, % |
|------------|-------------------|----------------|--------------------------|-------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| M1         | 2,561             | 5,05           | 11,48                    | 3,25        | 11,35                    | 93,38                        | 4,52                             |
| M2         | 2,537             | 4,82           | 10,86                    | 3,16        | 10,23                    |                              | 4,60                             |
| M3         | 2,493             | 4,97           | 11,56                    | 3,72        | 10,07                    |                              | 4,50                             |
| Trung bình | 2,530             | 4,95           | 11,30                    | 3,38        | 10,55                    |                              | 4,54                             |



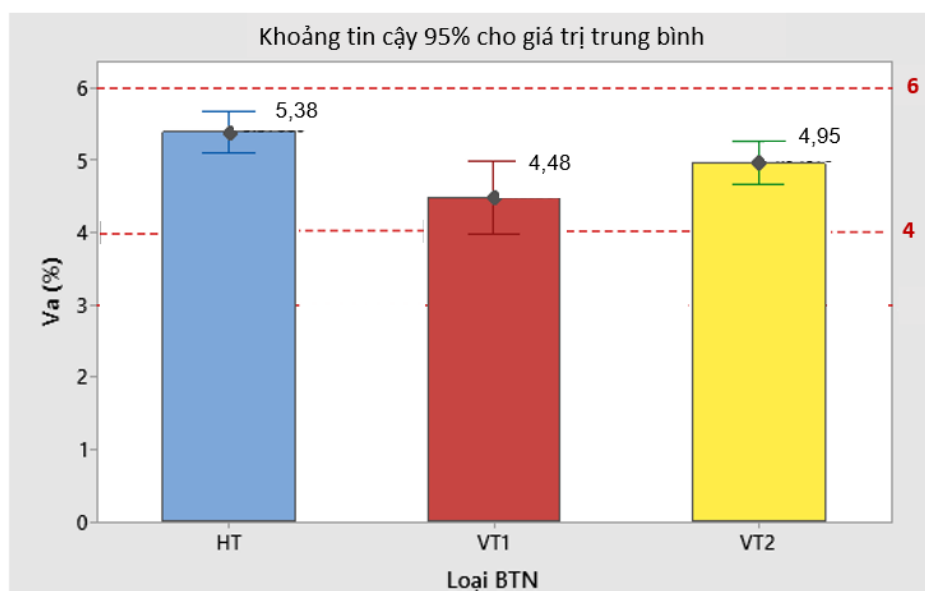
Hình 8. Biểu đồ cấp phối hạt sau chiết tách của mẫu BTN tái chế bổ sung thêm 20% BTN mới và 0,25% nhựa 60/70 (VT2).

Tại vị trí cách tim đường 1,75 m, phía trái tuyến, Km13+110 (ký hiệu VT2), hỗn hợp BTN tái chế được tạo từ 80% BTN cũ và 20% BTN 12,5 mới (theo TCVN 13567:2022, hàm lượng nhựa tối ưu 4,7%), bổ sung thêm 0,25% nhựa 60/70 so với khối lượng BTN cũ. Hỗn hợp được

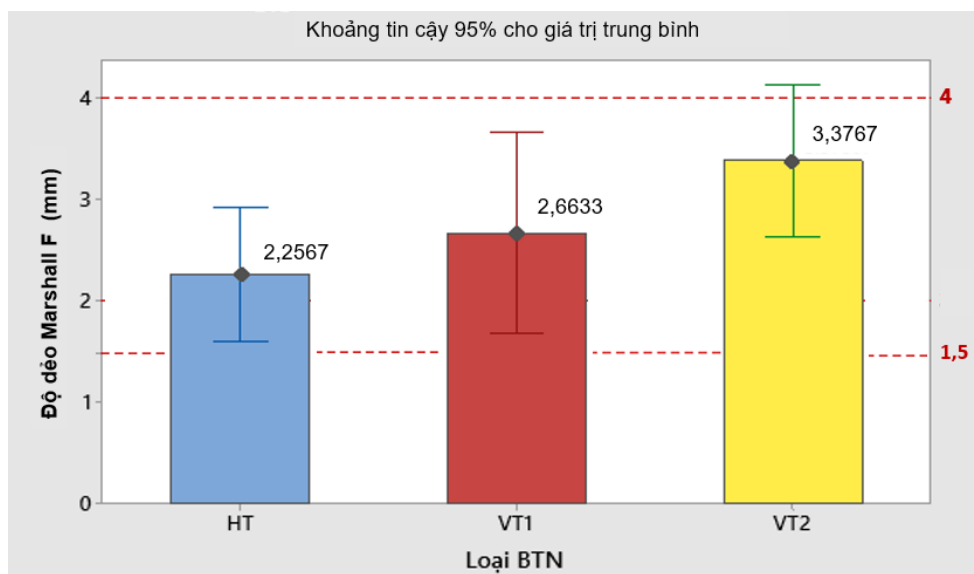
trộn bằng máy, thí công trực tiếp tại hiện trường và lấy mẫu về phòng thí nghiệm để gia nhiệt, đúc mẫu, thí nghiệm các chỉ tiêu Marshall và xác định hàm lượng nhựa. Kết quả thử nghiệm đảm bảo độ chụm theo ASTM C670-2015, thể hiện ở Bảng 5 và Hình 8.

#### 4.2.3 Phân tích đánh giá kết quả thử nghiệm với hỗn hợp BTN tái chế.

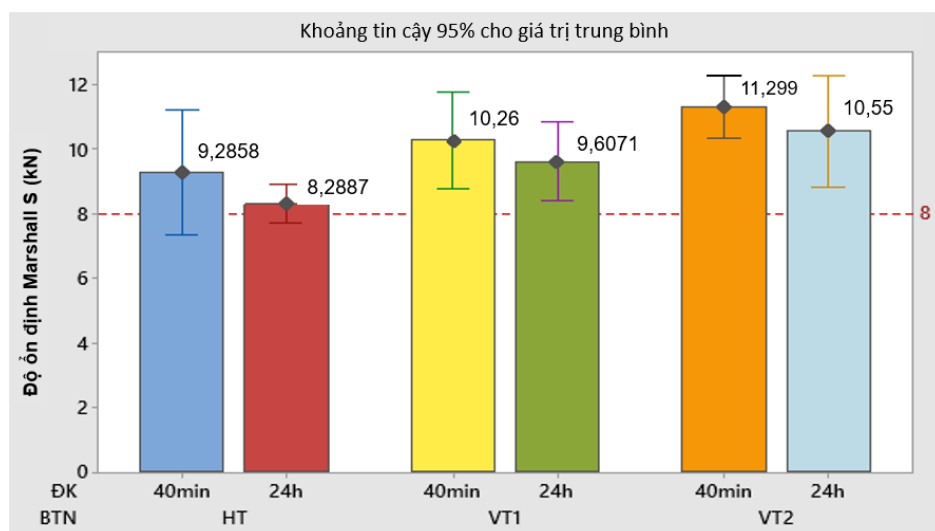
Tổng hợp kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu Marshall và hàm lượng nhựa (xác định bằng phương pháp chiết tách) của ba loại bê tông nhựa gồm BTN hiện trạng (BTN cũ – HT), BTN tái chế có bổ sung BTN mới (VT1) và BTN tái chế có bổ sung BTN mới cùng nhựa đường (VT2) được trình bày trong các Hình từ 9 đến Hình 13.



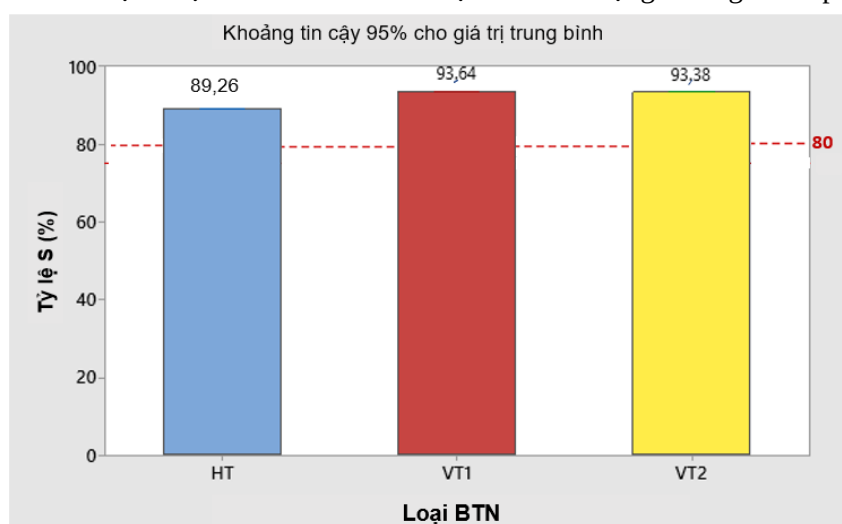
Hình 9. Kết quả xác định độ rỗng dư  $V_a$  của BTN.



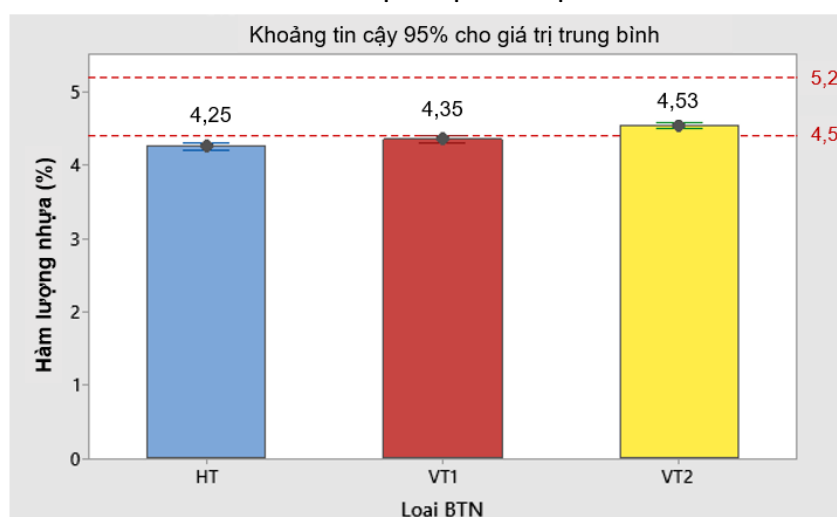
Hình 10. Biểu đồ độ dẻo Marshall của BTN ở trạng thái ngâm mẫu 40 phút.



Hình 11. Biểu đồ độ ổn định Marshall của 03 loại BTN ở 2 trạng thái ngâm 40 phút và 24h.



Hình 12. Biểu đồ độ ổn định còn lại của BTN.



Hình 13. Hàm lượng nhựa sau chiết tách của BTN.

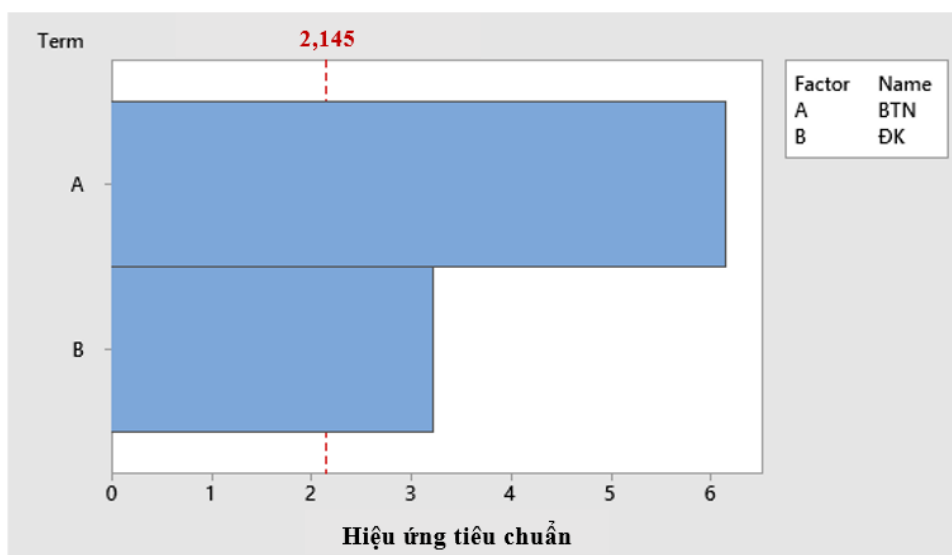
Kết quả trong Hình 10 cho thấy, giá trị độ dẻo Marshall tăng dần từ 2,26 mm (HT: BTN cũ) lên 2,66 mm (VT1: 80% BTN cũ + 20% BTN mới) và 3,38 mm (VT2: 80% BTN cũ + 20% BTN mới + 0,25% nhựa mới), thể hiện khả năng biến dạng dẻo của BTN được phục hồi rõ rệt sau khi tái chế. Mẫu BTN cũ có độ dẻo thấp cho thấy hỗn hợp giòn, dễ nứt, trong khi hỗn hợp BTN tái chế VT1, VT2 đạt độ dẻo cao hơn, phản ánh tính linh hoạt và khả năng chịu biến dạng (chống nứt giòn) tốt hơn. Như vậy việc bổ sung BTN mới và nhựa đường mới đã giúp phục hồi một phần tính chất dẻo và khả năng biến dạng đàn hồi của hỗn hợp BTN tái chế. Đồng thời kết quả thí nghiệm (Hình 11) cho thấy độ ổn định Marshall tăng đáng kể khi thực hiện cải thiện: Từ 9,28 kN (HT) lên 10,26 kN (VT1) và 11,299 kN (VT2); tương ứng mức tăng khoảng +10,6% cho VT1 và +21,8% cho VT2 so với BTN cũ. Độ ổn định cao hơn phản ánh khả năng chống chịu tải tĩnh và chống lún tốt hơn, còn độ dẻo lớn hơn phản ánh hỗn hợp linh hoạt hơn, ít giòn và có khả năng chịu biến dạng vĩnh viễn theo kiểu dẻo trước khi kết cấu bị phá hoại. Việc cả hai chỉ tiêu đều tăng ở VT2 cho thấy bổ sung BTN mới kết hợp thêm 0,25% nhựa đường mới đã vừa tăng cường độ chịu tải vừa phục hồi tính dẻo - nghĩa là hỗn hợp đạt được cân bằng tốt giữa độ bền và tính linh hoạt.

Độ ổn định còn lại của các mẫu BTN đều vượt 80% – giá trị yêu cầu tối thiểu [17] (Hình 12). Trong đó BTN tái chế (VT1 và VT2) đạt trên 93%, cao hơn so với BTN cũ (89%), chứng tỏ khả năng kháng ẩm của hỗn hợp tái chế được cải thiện rõ rệt so với BTN cũ.

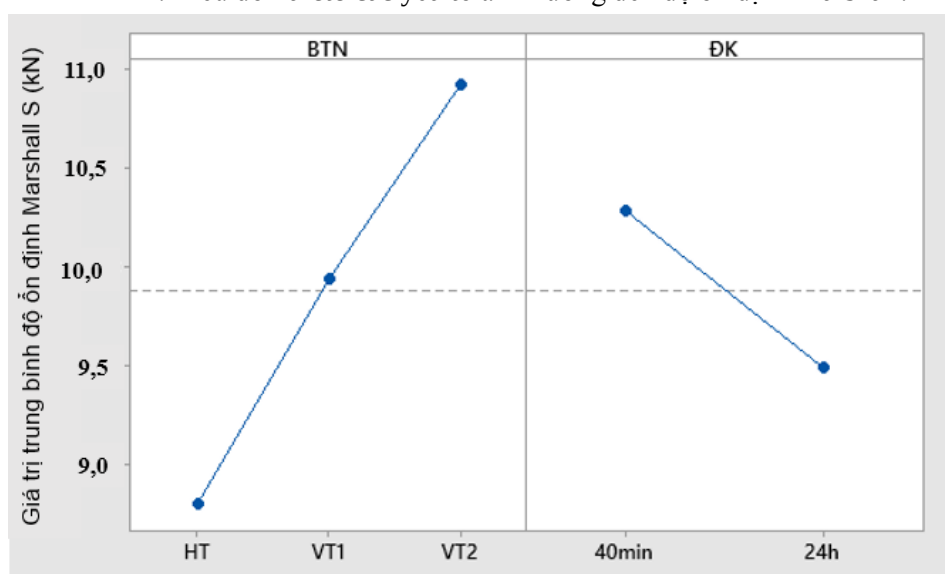
Hàm lượng nhựa đường xác định bằng phương pháp chiết tách tăng nhẹ qua các cấp phối: 4,25% (HT) đến 4,35% (VT1) và 4,53% (VT2) (Hình 13). Việc tăng hàm lượng nhựa này góp phần lý giải cho xu hướng cải thiện các chỉ tiêu Marshall nêu trên, do nhựa mới giúp phục hồi tính dẻo và độ dính bám của hỗn hợp. Hàm lượng nhựa của BTN tái chế VT2 là phù hợp với khoảng hàm lượng nhựa thường thấy cho lớp mặt BTNC 12,5 (4,5–5,2%) trong các dự án thực tế ở Việt Nam.

Độ rỗng dư ( $V_a$ ) của BTN hiện trạng (HT) đạt 5,38%, tuy vẫn nằm trong giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn (4–6%) [17] nhưng ở mức tương đối cao, phản ánh cấu trúc hỗn hợp còn xốp và dễ thấm nước. Khi bổ sung BTN mới (VT1, VT2), giá trị  $V_a$  giảm xuống lần lượt còn 4,48% và 4,95% (Hình 9), thuộc nửa dưới của giới hạn cho phép. Kết quả này cho thấy việc phối trộn BTN mới và nhựa đường mới đã góp phần làm tăng độ đặc chắc và giảm nguy cơ thấm nước của hỗn hợp tái chế.

Các nghiên cứu trên thế giới cũng ghi nhận xu hướng tương tự về sự thay đổi của các chỉ tiêu cơ học khi áp dụng công nghệ tái chế nóng tại chỗ. Theo Shoenberger & Voller [5], việc bổ sung một tỷ lệ hợp lý nhựa đường hoặc hỗn hợp bê tông nhựa mới giúp cải thiện đáng kể độ ổn định Marshall và tính linh hoạt của hỗn hợp tái chế so với vật liệu hiện trạng. Nghiên cứu của McDaniel & Anderson (FHWA, 2001) [1] cũng cho thấy bổ sung RAP kết hợp với nhựa mới hoặc phụ gia tái sinh giúp tăng độ dẻo và giảm độ rỗng dư của hỗn hợp, qua đó hạn chế nguy cơ nứt và tăng khả năng chống hằn lún. Gần đây hơn, các nghiên cứu tại Trung Quốc (Zhang et al [3]; Liu et al., [7]) chỉ ra rằng HIR sau khi bổ sung vật liệu mới có xu hướng tăng độ ổn định động, cải thiện độ bền ẩm và nâng cao khả năng chống biến dạng vĩnh cửu. Các kết quả này cho thấy xu hướng cải thiện tính chất cơ học của BTN sau tái chế là tương đồng giữa Việt Nam và các nghiên cứu quốc tế, qua đó khẳng định tính cần thiết của việc bổ sung BTN mới và/hoặc nhựa đường mới nhằm phục hồi các đặc tính kỹ thuật của hỗn hợp.



Hình 14. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến độ ổn định Marshall.



Hình 15. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến độ ổn định Marshall.

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy cả loại bê tông nhựa (HT, VT1, VT2) và điều kiện thí nghiệm (ngâm nước 40 phút, 24 giờ) đều ảnh hưởng có ý nghĩa đến độ ổn định Marshall. Tuy nhiên, kết quả trong Hình 14 và Hình 15 phản ánh rất rõ ảnh hưởng của loại bê tông nhựa lớn hơn hẳn so với điều kiện thí nghiệm. Điều này khẳng định rằng, đối với mỗi công trình hoặc nguồn vật liệu tái chế cụ thể, cần tiến hành thiết kế, thí nghiệm xác định tỷ lệ phối trộn thích hợp giữa BTN cũ, BTN mới và lượng nhựa đường bổ sung để đạt được các chỉ tiêu cơ lý tối ưu cho hỗn hợp tái chế.

Công tác thiết kế, kiểm soát chất lượng vật liệu có thể thực hiện trước hoặc sau khi vá sửa xong. Phương pháp thiết kế hỗn hợp trước thi công gồm: Thu thập hồ sơ BTN, lấy mẫu BTN cũ thí nghiệm, bổ sung vật liệu mới để tạo hỗn hợp tái chế, kiểm tra các chỉ tiêu kỹ thuật trong phòng và thi công theo công thức thiết kế. Ưu điểm là dễ kiểm soát chất lượng và khối lượng vật liệu, nhưng nhược điểm là mất nhiều thời gian và khó khả thi với các hư hỏng nhỏ, phân tán. Phương pháp thiết kế hỗn hợp ngay tại hiện trường phù hợp với khối lượng vá sửa nhỏ, giúp khắc phục hạn chế của thiết kế trước. Quy trình gồm: Thu thập hồ sơ BTN, cắt và cào bóc



vật liệu cũ, trộn bổ sung với vật liệu mới theo kinh nghiệm, lấy mẫu kiểm tra chỉ tiêu kỹ thuật và thi công vá sửa. Nếu kết quả chưa đạt, cần theo dõi vết vá và điều chỉnh tỷ lệ vật liệu ở các lần sau.

## 5. KẾT LUẬN

- Nghiên cứu đã tổng quan và phân tích các công nghệ tái chế nóng tại chỗ (Hot In-Place Recycling – HIR) đang được áp dụng trên thế giới, từ đó xác định phương pháp Remixing là hướng tiếp cận phù hợp nhất cho điều kiện bảo trì mặt đường ở Việt Nam.
- Công nghệ tái chế nóng tại chỗ (HIR) theo phương pháp Remixing cho phép phục hồi kết cấu lớp BTN mặt đường một cách hiệu quả, tận dụng vật liệu cũ, rút ngắn thời gian thi công và giảm phát thải môi trường, phù hợp với yêu cầu bảo trì đường bộ hiện nay.
- Việc bổ sung hỗn hợp BTN mới và một lượng nhựa đường mới giúp cải thiện đáng kể các chỉ tiêu cơ lý của hỗn hợp tái chế. Mẫu VT2 đạt giá trị độ ổn định và độ dẻo Marshall cao hơn so với BTN hiện trạng, đồng thời duy trì độ rỗng và hàm lượng nhựa ở mức hợp lý. Điều này chứng tỏ khả năng phục hồi tính linh hoạt và độ bền của hỗn hợp, khẳng định hiệu quả kỹ thuật của phương án tái chế có bổ sung nhựa đường mới.
- Kết quả thực nghiệm chứng minh loại hỗn hợp BTN là yếu tố ảnh hưởng chính đến độ ổn định Marshall, khẳng định cần tiến hành thiết kế và thí nghiệm xác định tỷ lệ phối trộn phù hợp cho từng nguồn vật liệu tái chế.
- Nên mở rộng thí điểm công nghệ HIR trên các tuyến quốc lộ và cao tốc có điều kiện khai thác khác nhau để hoàn thiện cơ sở dữ liệu về hiệu quả kỹ thuật và kinh tế.
- Cần thực hiện nghiên cứu đánh giá vòng đời (LCA) và phân tích hiệu quả môi trường nhằm chứng minh tính bền vững của công nghệ này so với các giải pháp bảo trì truyền thống. Mở rộng phân tích theo hướng đánh giá chi phí vòng đời (LCCA) nhằm lượng hóa đầy đủ hiệu quả kinh tế của công nghệ HIR trong suốt thời gian khai thác.
- Cần xây dựng quy trình và tiêu chuẩn kỹ thuật riêng cho công nghệ tái chế nóng tại chỗ, bao gồm các yêu cầu về vật liệu, thiết bị, kiểm soát nhiệt độ và đánh giá chất lượng. Cần có lộ trình nội địa hóa thiết bị và đào tạo nhân lực chuyên sâu để chủ động triển khai HIR trong hệ thống bảo trì đường bộ Việt Nam.

## LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin chân thành cảm ơn trung tâm KHCN trường ĐH GTVT đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu thực nghiệm.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Federal Highway Administration (FHWA), Hot In-Place Recycling, Chapters 9–10, U.S. Department of Transportation, 2001. <https://www.yumpu.com/en/document/view/12964838/chapter-9-hot-in-place-recycling>
- [2]. Florida Department of Transportation (FDOT), Hot In-Place Recycling Literature Review, Technical Report, 2011.
- [3]. Y. Sun, Z. Zhang, X. Li, Compaction characteristics of a foam asphalt hot in-place recycling asphalt mixture, Buildings, 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/buildings14010058>
- [4]. J. Button, C.K. Estakhri, D.N. Little, Overview of Hot In-Place Recycling of Bituminous Pavements, Transportation Research Record, 1684 (1999) 21–27. <https://doi.org/10.3141/1684-21>
- [5]. J. Shoenberger, G. Voller, Hot In-Place Recycling of Asphalt Pavements, U.S. Army Corps of Engineers, 1990. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015086540856&seq=6>

- [6]. M. Zaumanis, R. B. Mallick, Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art, *International Journal of Pavement Engineering*, 16 (2015) 39-55. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>
- [7]. Q. Shi, C. Liu, Y. Xue, Y. Xue, C. Zhang, W. Lu, Y. Wen, S. Lv, The Early Performance Development of Hot In-Place Recycled Asphalt Mixture, *Coatings*, 14 (2024) 175. <https://doi.org/10.3390/coatings14020175>
- [8]. T. Wang, X. Zhao, L. Zheng, C. Mao, L. Wang, A. C. Falchetto, D. Guo, Hot In-Place Recycled Asphalt Mixtures, RAP Analysis, Compaction Characteristics and Field Evaluation, *Sustainability*, 16 (2024) 1064. <https://doi.org/10.3390/su16031064>
- [9]. M. Zaumanis, R. B. Mallick, Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements, State of the art, *International Journal of Pavement Engineering*, 16 (2015) 39–55. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>
- [10]. Ministry of Transport of the People's Republic of China, Technical Specifications for Preventive Maintenance of Highway Asphalt Pavement, JTG/T 5142-01, 2021.
- [11]. J. J. Emery, J. A. Gurowka, T. Hiramane, Asphalt technology for in-place surface recycling using the heat reforming process, *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association*, XXXIV (1989).
- [12]. A. J. T. Hand, T. B. Aschenbrener, Cold asphalt and hot in-place asphalt recycling technologies, *Pavement Engineering & Science Program*, University of Nevada, Reno, 2023. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25866.64964>
- [13]. W. Button, D. N. Little, C. K. Estakhri, Hot in-place recycling of asphalt concrete, *in* *Synthesis of Highway Practice*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 193 (1994).
- [14]. Doãn Minh Tâm, Tổng kết thí điểm ứng dụng công nghệ tái chế nguội tại chỗ gia cố nhũ tương nhựa đường cải tiến (EE FDR) tại Dự án cải tạo mặt đường QL5 và khả năng ứng dụng rộng rãi trong cải tạo, sửa chữa và nâng cấp mặt đường cũ tại Việt Nam, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 11 (96) (2015) 170-173.
- [15]. Nguyễn Văn Dũng, Nghiên cứu xác định các thông số làm việc hợp lý của máy đốt nóng mặt đường Bê tông nhựa cỡ nhỏ khi sửa chữa đường ô tô ở Việt Nam, *Luận án tiến sĩ kỹ thuật*, Trường Đại học GTVT, Việt Nam, 2024.
- [16]. Wirtgen: Efficient hot recycling - the internationally recognized method. <https://5.imimg.com/data5/IG/OT/TY/SELLER-2940905/wirtgen-rx-4500-47-900-kg-hot-recyclers-system.pdf> (truy cập ngày 12 tháng 12 năm 2025).
- [17]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 13567 - 1, Lốp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng – Thi công và nghiệm thu – Bê tông nhựa chặt sử dụng nhựa đường thông thường, 2022.