Transport and Communications Science Journal, Vol 77, Issue 5 (06/2026), 645-658

Transport and Communications Science Journal

CREEP–RECOVERY CHARACTERISTICS OF MODIFIED ASPHALT BINDER USING TOUGH FLEX–R ADDITIVE

Tran Danh Hoi, Tran Thi Cam Ha*, Nguyen Quang Tuan

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article
Received: 13/03/2026
Revised: 08/06/2026
Accepted: 12/06/2026
Published online: 15/06/2026
https://doi.org/10.47869/tcsj.77.5.3

* *Corresponding author*
Email: tranthicamha@utc.edu.vn; Tel: +84912067633

Abstract. Wheel rutting and cracking induced by high temperatures and traffic loading are among the most common forms of distress that reduce the service life of flexible pavements. Therefore, the development of asphalt modifiers capable of enhancing deformation resistance and elastic recovery is of significant importance for advancing durable and sustainable pavement materials. This study evaluates the creep–recovery behavior of a 60/70 penetration grade asphalt binder modified with Tough Flex-R (TFR) and compares its performance with that of a polymer-modified binder (PMB III) using the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test. Short-term aged binder samples prepared using the Rolling Thin Film Oven (RTFO) were tested at various temperatures under two stress levels of 0,1 kPa and 3,2 kPa to determine the non-recoverable creep compliance (J_{nr}) and percent recovery (R). The results indicate that increasing temperature and stress level led to higher J_{nr} values and lower R values for all binders, reflecting reduced elastic response and increased viscous behavior. Compared with the unmodified 60/70 binder, TFR-modified binders exhibited improved elastic recovery and lower non-recoverable deformation. Among the investigated TFR contents, the 25% content provided the best overall performance, characterized by higher R values and lower Jnr values, approaching the behavior of PMB III. The findings demonstrate that TFR is a promising modifier for enhancing rutting resistance and improving the elastic properties of asphalt binders under high-temperature service conditions.

Keywords: Modified asphalt binder, Tough Flex – R (TFR), MSCR, non-recoverable creep compliance (J_{nr}), percent recovery (R), rutting resistance.

@ 2026 University of Transport and Communications

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, Tập 77, Số 5 (06/2026), 645-658

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải

ĐẶC TÍNH TỪ BIẾN - PHỤC HỒI CỦA NHỰA CẢI TIẾN SỬ DỤNG PHỤ GIA TOUGH FLEX – R

Trần Danh Hợi, Trần Thị Cẩm Hà*, Nguyễn Quang Tuấn

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: 13/03/2026
Ngày nhận bài sửa: 08/06/2026
Ngày chấp nhận đăng: 12/06/2026
Ngày xuất bản Online: 15/06/2026
https://doi.org/10.47869/tcsj.77.5.3

* Tác giả liên hệ
Email: tranthicamha@utc.edu.vn; Tel: +84912067633

Tóm tắt. Hằn lún vệt bánh xe và nứt dưới tác động của nhiệt độ cao và tải trọng giao thông là những dạng hư hỏng phổ biến làm suy giảm tuổi thọ khai thác của mặt đường mềm. Do đó, việc nghiên cứu các phụ gia cải tiến nhằm nâng cao khả năng kháng biến dạng và phục hồi đàn hồi của nhựa đường có ý nghĩa quan trọng đối với việc phát triển các giải pháp vật liệu bền vững cho kết cấu mặt đường. Bài báo này đánh giá đặc tính từ biến – phục hồi của nhựa đường 60/70 cải tiến bằng phụ gia Tough Flex-R (TFR) và so sánh với nhựa đường polymer (PMB III) thông qua thí nghiệm từ biến – phục hồi ứng suất lặp (MSCR). Các mẫu nhựa đường sau hóa già ngắn hạn bằng thiết bị lò xoay màng mỏng (RTFO) được thí nghiệm tại nhiều mức nhiệt độ và hai cấp ứng suất 0,1 kPa và 3,2 kPa nhằm xác định độ tuân thủ từ biến không phục hồi (J_{nr}) và phần trăm phục hồi (R). Kết quả cho thấy nhiệt độ và ứng suất làm tăng giá trị J_{nr} và giảm giá trị R đối với tất cả các loại nhựa đường, phản ánh sự suy giảm tính đàn hồi và gia tăng ứng xử nhớt. So với nhựa đường 60/70, các mẫu sử dụng TFR thể hiện khả năng phục hồi đàn hồi cao hơn và biến dạng không phục hồi thấp hơn. Trong phạm vi nghiên cứu, hàm lượng 25% TFR cho hiệu quả tốt nhất với giá trị R cao và J_{nr} thấp, tiệm cận đặc tính của PMB III. Kết quả nghiên cứu cho thấy TFR là phụ gia tiềm năng nhằm nâng cao khả năng kháng hằn lún và cải thiện tính đàn hồi của nhựa đường trong điều kiện nhiệt độ khai thác cao.

Từ khóa: Nhựa đường cải tiến, phụ gia Tough Flex – R (TFR), thí nghiệm MSCR, độ tuân thủ từ biến không phục hồi (J_{nr}), phần trăm phục hồi (R), khả năng kháng hằn lún.

@2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hằn lún vệt bánh xe được xem là một trong những dạng hư hỏng nguy hiểm nhất đối với mặt đường bê tông nhựa, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nóng ẩm và quy mô giao thông lớn. Sự phát triển của hư hỏng này không chỉ làm suy giảm tuổi thọ kết cấu áo đường mà còn tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn giao thông. Trong thành phần hỗn hợp bê tông nhựa (BTN), nhựa đường giữ vai trò là chất dính kết chủ đạo, chi phối đáng kể khả năng chống lại biến dạng vĩnh cửu của kết cấu, nhất là ở điều kiện nhiệt độ khai thác cao [1].

Theo hệ thống phân cấp Superpave truyền thống theo tiêu chuẩn AASHTO M320 [2], khả năng kháng hằn lún của nhựa đường được đánh giá thông qua chỉ tiêu mô đun cắt động $|G^*|/\sin\delta$. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng thông số này chỉ phản ánh ứng xử của nhựa đường trong miền biến dạng nhỏ và chưa đại diện đầy đủ cho điều kiện chịu tải lặp phi tuyến xảy ra trong thực tế. Đối với nhựa đường biến tính bằng phụ gia hoặc polyme, chỉ tiêu $|G^*|/\sin\delta$ xác định theo tiêu chuẩn AASHTO T 315 [3] thường cho thấy mức độ tương quan hạn chế với hằn lún quan trắc trên hiện trường, do không thể tách biệt rõ ràng giữa thành phần biến dạng đàn hồi và biến dạng không phục hồi tích lũy theo thời gian [4−5].

Nhằm khắc phục những hạn chế này, thí nghiệm từ biến – phục hồi ứng suất lặp (Multiple stress creep recovery – MSCR), được quy định trong tiêu chuẩn AASHTO T350 [6] và tích hợp trong hệ thống phân cấp theo đặc tính làm việc AASHTO M332 [7], đã được phát triển và ứng dụng ngày càng rộng rãi ở Mỹ. Phương pháp thí nghiệm MSCR mô phỏng tốt hơn cơ chế làm việc của nhựa đường thông qua các chu kỳ gia tải – dỡ tải ở nhiều mức ứng suất khác nhau, cho phép xác định độ tuân thủ từ biến không phục hồi (J_{nr}) và phần trăm phục hồi (R) [7−12]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng thông số J_{nr} có mối tương quan chặt chẽ hơn với chiều sâu vệt hằn của hỗn hợp bê tông nhựa so với các chỉ tiêu đánh giá truyền thống [13-17]. So với tham số $|G^*|/\sin\delta$ trong hệ thống AASHTO M320, thí nghiệm MSCR cho phép đánh giá trực tiếp thành phần biến dạng không phục hồi – yếu tố quyết định sự tích lũy hằn lún dưới tải trọng lặp [4, 6, 14]. Giá trị J_{nr}, đặc biệt tại mức ứng suất 3,2 kPa hoặc cao hơn, cho thấy mức độ tương quan cao với kết quả thí nghiệm vệt hằn bánh xe Hamburg (HWTT), thí nghiệm biến dạng vĩnh cửu lặp (RLPD), cũng như dữ liệu thực địa từ các cơ sở thử nghiệm quy mô lớn như Cơ quan quản lý đường cao tốc liên bang Hoa Kỳ (Federal Highway Administration) và Trung tâm nghiên cứu và thử nghiệm mặt đường quy mô thực tế của bang Minnesota (MnROAD) của Mỹ [11, 13, 14]. Bên cạnh đó, MSCR còn cho phép định lượng hiệu quả cải thiện của các loại phụ gia (TPP, mực thải, dầu thải) và vật liệu asphalt tái chế RAP thông qua xu hướng giảm J_{nr} và gia tăng R, đồng thời phản ánh rõ độ nhạy ứng suất và nhiệt độ của nhựa đường [4, 12, 15, 18, 19]. Những bằng chứng thực nghiệm này là cơ sở khoa học cho việc áp dụng hệ thống phân cấp theo hiệu năng trong AASHTO M332, góp phần nâng cao độ chính xác trong lựa chọn nhựa đường phù hợp với điều kiện giao thông và khai thác thực tế [4].

Trong bối cảnh nhu cầu vận tải tại Việt Nam không ngừng gia tăng, việc sử dụng các phụ gia biến tính như SBS, TPP và TPS nhằm nâng cao khả năng kháng hằn lún và kháng nứt của BTN dưới điều kiện nhiệt độ cao và tải trọng lớn ngày càng được quan tâm. Tough Flex – R (TFR) được bổ sung trực tiếp vào cốt liệu nóng tại trạm trộn, có khả năng phân tán nhanh, tương thích với các loại nhựa đường 60/70 và 80/100, đồng thời đã được ứng dụng trong lớp phủ mỏng chống nứt phản ánh và bê tông nhựa tái chế nóng (RAP 20–50%) [20]. Tuy nhiên, các nghiên cứu chuyên sâu về đặc tính lưu biến của nhựa đường khi trộn trực tiếp với phụ gia TFR, đặc biệt thông qua các chỉ tiêu đánh giá bằng thí nghiệm MSCR, hiện vẫn còn hạn chế và chủ yếu mới dừng lại ở một số nghiên cứu quy mô nhỏ tại Việt Nam [4, 21]. Do đó, nghiên cứu này

tập trung phân tích sự thay đổi của các thông số J_{nr} và R theo hàm lượng TFR, nhằm đánh giá mức độ cải thiện độ ổn định nhiệt và độ nhạy ứng suất của nhựa đường cải tiến.

2. CHUẨN BỊ MẪU THÍ NGHIỆM

2.1. Quy trình cải tiến nhựa đường 60/70 bằng phụ gia TFR

Nhựa đường 60/70 được sử dụng làm nhựa đường nền để trộn thêm phụ gia TFR. Nhựa đường 60/70 do Công ty TNHH Nhựa đường Petrolimex cung cấp, có các chỉ tiêu thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật quy định tại phụ lục A TCVN 13567-1: 2022.

Phụ gia Tough Flex–R (TFR), do Taiyu Co., Ltd. phát triển [20], là phụ gia polymer dạng hạt, kích thước đặc trưng khoảng 5 mm, màu nâu hổ phách. TFR có nhiệt độ hóa mềm khoảng 114°C và khối lượng riêng xấp xỉ 0,95 g/cm³. Phụ gia TFR có khả năng hòa tan và phân tán hiệu quả trong nhựa đường và hỗn hợp bê tông nhựa nóng theo phương pháp trộn tại trạm. Sau khi phân tán, TFR hình thành mạng lưới đàn hồi trong chất liên kết, qua đó cải thiện khả năng phục hồi biến dạng và hạn chế tích lũy biến dạng dư dưới tác dụng của tải trọng lặp.

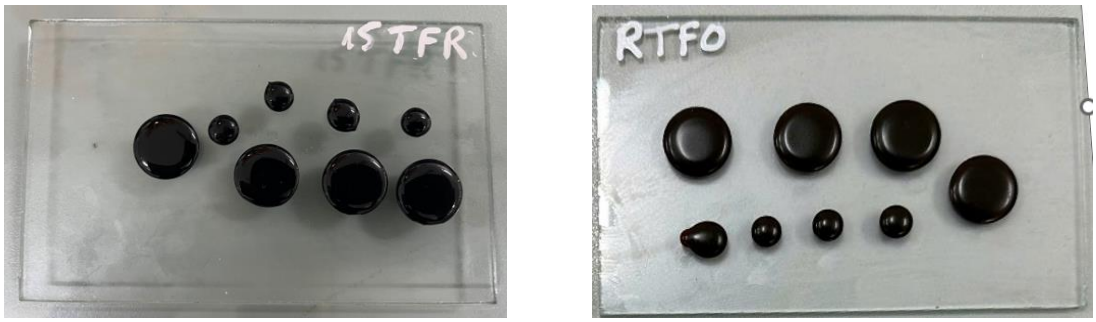
Nhựa đường 60/70 được gia nhiệt đến 170 – 200 °C, sau đó bổ sung phụ gia TFR với hàm lượng thiết kế lần lượt là 15%, 25% và 35% khối lượng nhựa đường. Hỗn hợp được khuấy đều bằng thiết bị chuyên dụng với tốc độ trộn 2000 vòng/phút trong khoảng 20 phút để phụ gia phân tán đồng đều (Hình 1).

a) Phụ gia TFR b) Máy khuấy trộn nhựa đường

Hình 1. Hệ thống phối trộn nhựa đường và phụ gia.

2.2. Chuẩn bị các mẫu nhựa đường

Trong nghiên cứu này, năm loại nhựa đường được sử dụng bao gồm nhựa đường 60/70, nhựa đường polymer PMB III và nhựa đường 60/70 được cải tiến bằng phụ gia TFR với các hàm lượng lần lượt là 15%, 25% và 35% theo khối lượng nhựa đường. Toàn bộ các mẫu nhựa đường được đưa vào thiết bị lò quay màng mỏng (RTFO) theo AASHTO T 240 nhằm mô phỏng điều kiện lão hóa của nhựa đường trong quá trình trộn và thi công. Sau đó, nhựa đường lần lượt được rót vào các khuôn silicon để tạo các mẫu thí nghiệm có đường kính 25 mm (Hình 2).

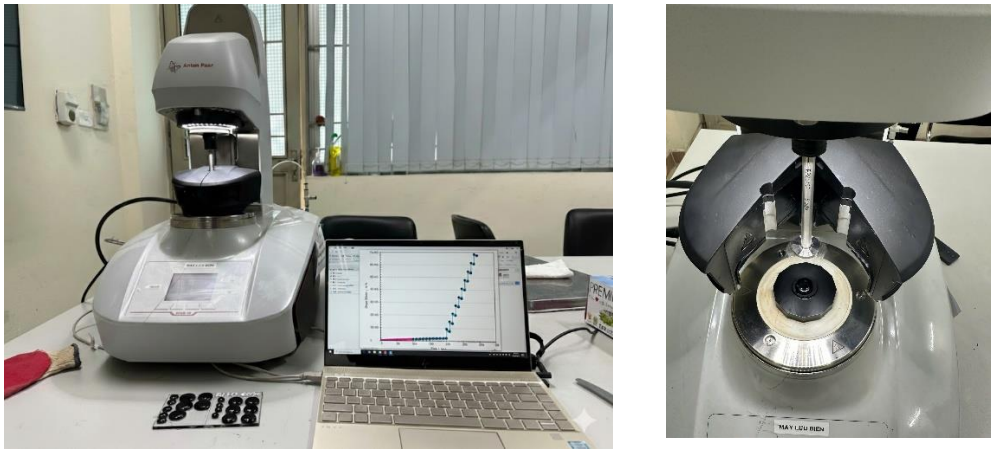


a) Mẫu nhựa đường 60/70 + TFR ở trạng thái gốc b) Mẫu nhựa 60/70 + TFR sau RTFO

Hình 2. Chuẩn bị các mẫu nhựa đường thí nghiệm.

3. THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

Thí nghiệm MSCR được thực hiện theo quy định của AASHTO T 350 [6] trên thiết bị lưu biến cắt động SmartPave 92 của Tập đoàn Anton Paar (Hình 3). Thiết bị này sử dụng hệ điều khiển nhiệt độ Peltier hai phía với độ chính xác cao (sai lệch < 0,1°C), đảm bảo điều kiện nhiệt ổn định trong suốt quá trình thí nghiệm. Dải nhiệt độ làm việc của thiết bị từ −10°C đến 200°C, phù hợp với toàn bộ phạm vi nhiệt độ khảo sát trong nghiên cứu. Về khả năng cơ học, thiết bị hoạt động trong dải tần số góc rộng từ 10^{-4} đến 628 rad/s và momen xoắn từ 1 µNm đến 125 mNm, cho phép đánh giá đầy đủ các đặc trưng lưu biến của nhựa đường từ trạng thái đàn hồi tuyến tính đến phi tuyến.



Hình 3. Thiết bị SmartPave 92 sử dụng cho thí nghiệm MSCR.

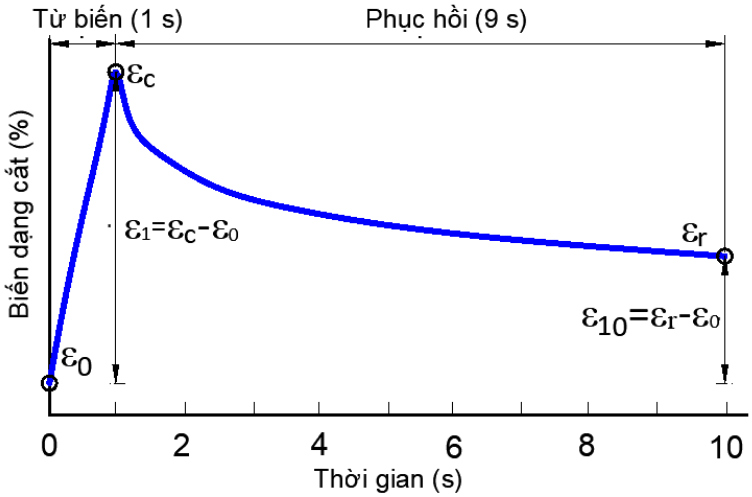
Lựa chọn dải nhiệt độ thí nghiệm MSCR cho từng loại nhựa đường trong phạm vi vật liệu thể hiện rõ đặc tính làm việc đàn – nhớt. Khi nhiệt độ tăng cao, thành phần nhớt chiếm ưu thế và xu hướng biến dạng không phục hồi gia tăng. Lựa chọn nhiệt độ thí nghiệm cho từng loại nhựa đường sau RTFO được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Chương trình thí nghiệm MSCR.

TT	Loại nhựa đường	Trạng thái hóa già	Nhiệt độ thí nghiệm
1	60/70	Sau RTFO	52, 58, 64, 70
2	PMB III	Sau RTFO	70, 76, 82, 88

3	60/70 + 15%TFR	Sau RTFO	58, 64, 70, 76
4	60/70 + 25%TFR	Sau RTFO	76, 82, 88, 94
5	60/70 + 35%TFR	Sau RTFO	70, 76, 82, 88

Mẫu thí nghiệm có đường kính 25 mm, chiều cao 1,0 mm được đặt giữa khe hở của 2 đĩa phẳng. Gia tải cho mẫu thí nghiệm với 20 chu kỳ ở mức 0,1 kPa (trong đó 10 chu kỳ đầu dùng để ổn định trạng thái của mẫu thử và không sử dụng cho phân tích), tiếp theo là 10 chu kỳ ở mức 3,2 kPa. Mỗi chu kỳ bao gồm 1 giây gia tải dưới ứng suất không đổi (giai đoạn từ biến) và 9 giây dỡ tải (giai đoạn phục hồi) (xem Hình 4), với tổng thời gian thực hiện phép thử là 300 giây. Thông qua quá trình này, J_{nr} và R được xác định để đánh giá khả năng kháng biến dạng vĩnh cửu của nhựa đường.



Hình 4. Sơ đồ mô tả quá trình từ biến – phục hồi của nhựa đường trong một chu kỳ.

Phần trăm phục hồi (R) của nhựa đường được xác định tại hai mức ứng suất 0,1 kPa và 3,2 kPa theo quy trình thí nghiệm MSCR. Tại mức ứng suất σ áp dụng (0,1 kPa hoặc 3,2 kPa), phần trăm phục hồi trung bình R_σ (%) được tính theo công thức:

$$R_\sigma = \frac{1}{10}\sum_{N=1}^{10} \varepsilon_r\,(\sigma, N) \tag{1}$$

Với ε_r (σ, N) là phần trăm biến dạng hồi phục ở cuối mỗi chu kỳ tải và σ là mức ứng suất áp dụng (0,1 kPa hoặc 3,2 kPa), được tính theo công thức sau:

$$\varepsilon_r(\sigma, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \times 100}{\varepsilon_1} \tag{2}$$

Độ tuân thủ từ biến không hồi phục (J_{nr}) được xác định trên cơ sở tỷ số giữa biến dạng không hồi phục sau giai đoạn phục hồi và ứng suất tác dụng:

$$J_{nr}(\sigma, N) = \frac{\varepsilon_{10}(\sigma, N)}{\sigma} \tag{3}$$

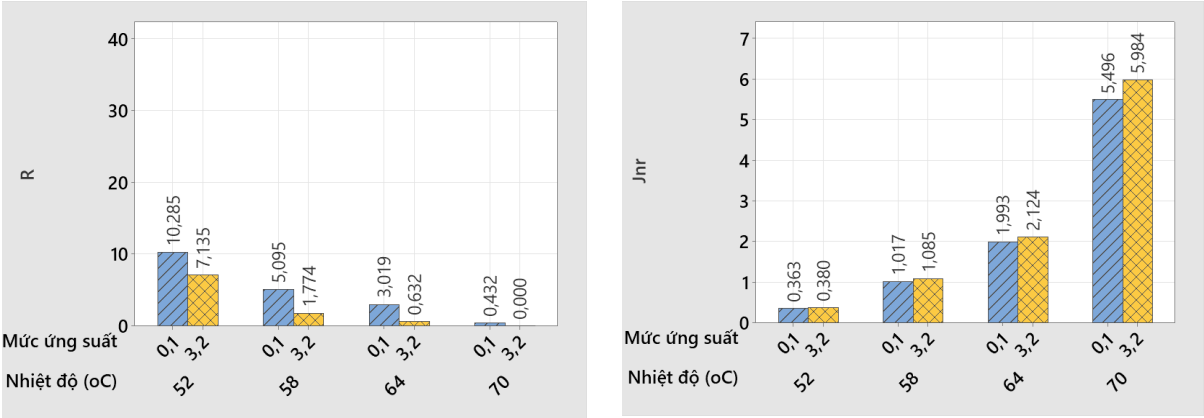
Với ε_{10} (σ, N) là biến dạng không hồi phục ở cuối mỗi chu kỳ tải và σ là mức ứng suất áp dụng (0,1 kPa hoặc 3,2 kPa).

Giá trị trung bình của độ tuân thủ từ biến không hồi phục ($J_{nr,\sigma}$) trong 10 chu kỳ xác định theo công thức:

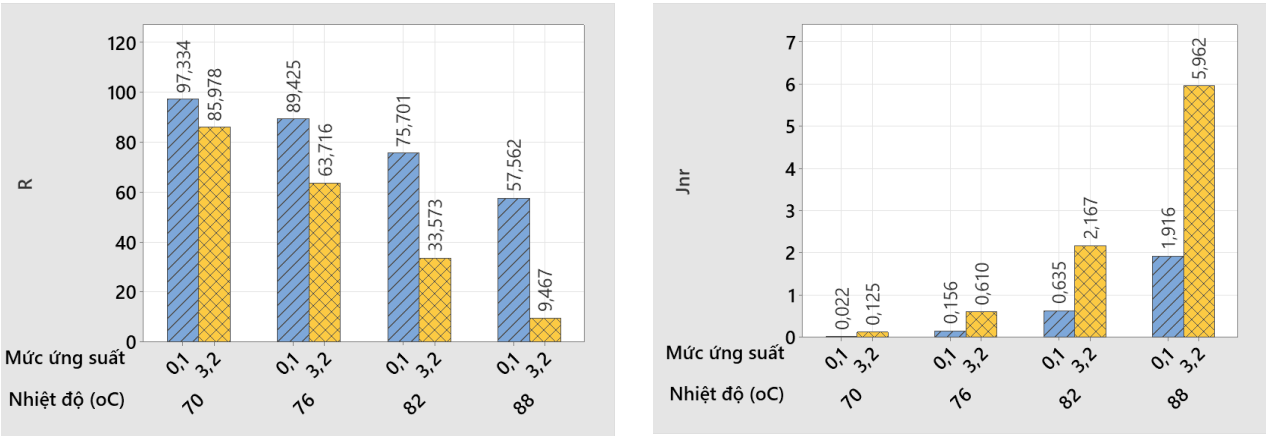
$$J_{nr,\sigma} = \frac{1}{10}\sum_{N=1}^{10} J_{nr}\,(\sigma; N) \tag{4}$$

4. PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH TỪ BIẾN – PHỤC HỒI CỦA NHỰA ĐƯỜNG BIẾN TÍNH TFR

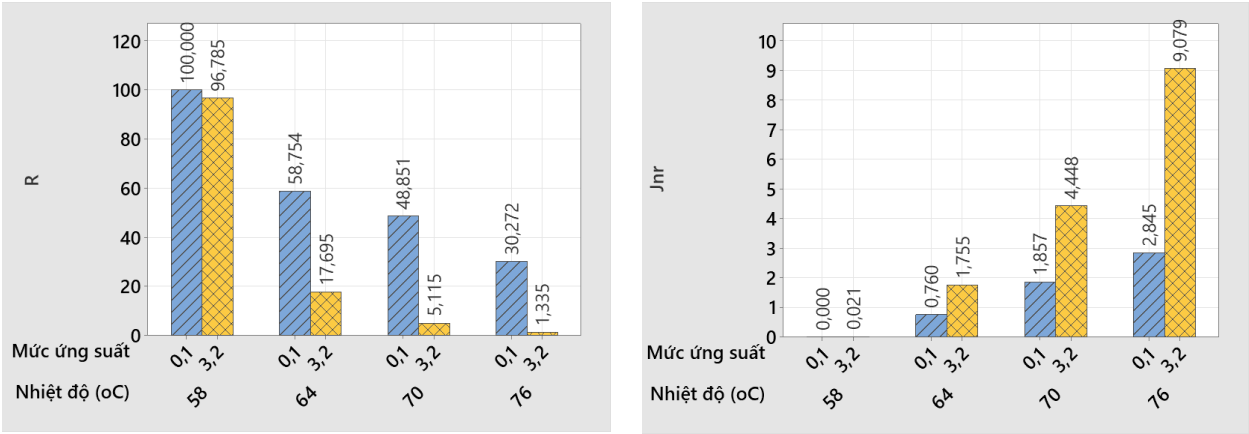
Tính toán J_{nr} và R ở các nhiệt độ thí nghiệm tương ứng với 2 mức ứng suất (0,1 kPa và 3,2 kPa) theo các công thức (1), (2), (4) và (5). Tổng hợp các kết quả tính toán được thể hiện trên các biểu đồ Hình 5, Hình 6, Hình 7, Hình 8 và Hình 9 tương ứng với các loại nhựa đường 60/70, nhựa đường PMB III, nhựa đường 60/70 + 15% TFR, nhựa đường 60/70 + 25% TFR và nhựa đường 60/70 + 35% TFR.



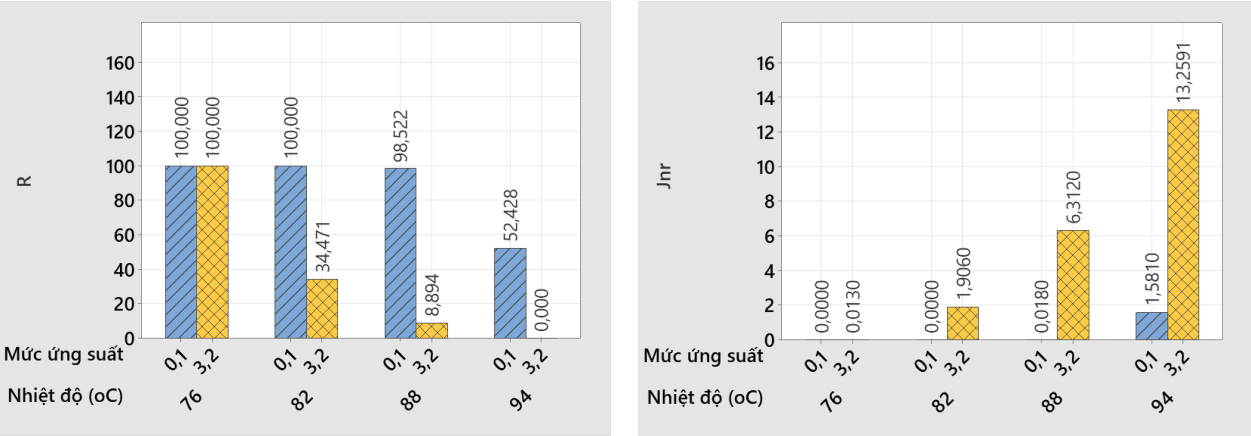
Hình 5. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường 60/70.



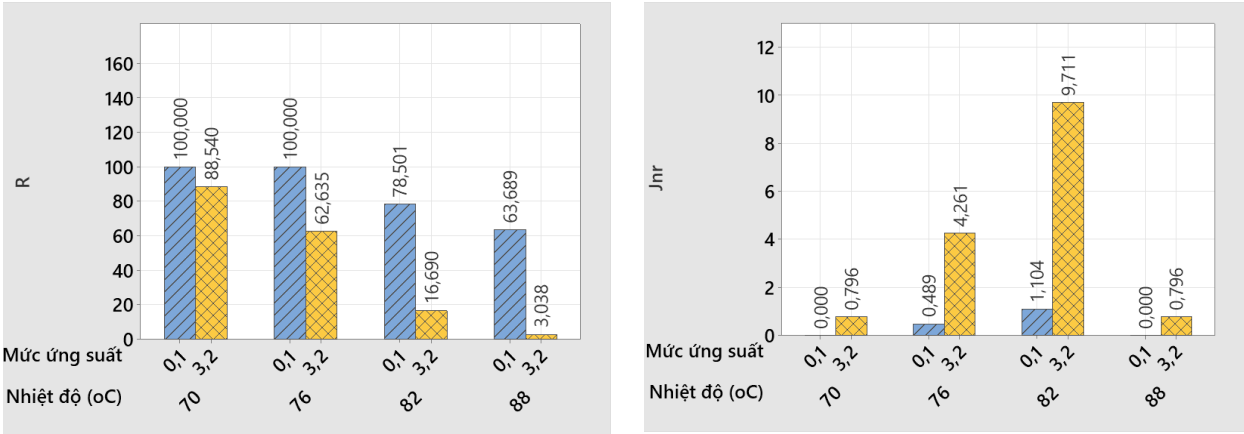
Hình 6. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường PMB III.



Hình 7. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường 60/70 + 15% TFR.



Hình 8. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường 60/70 + 25% TFR.

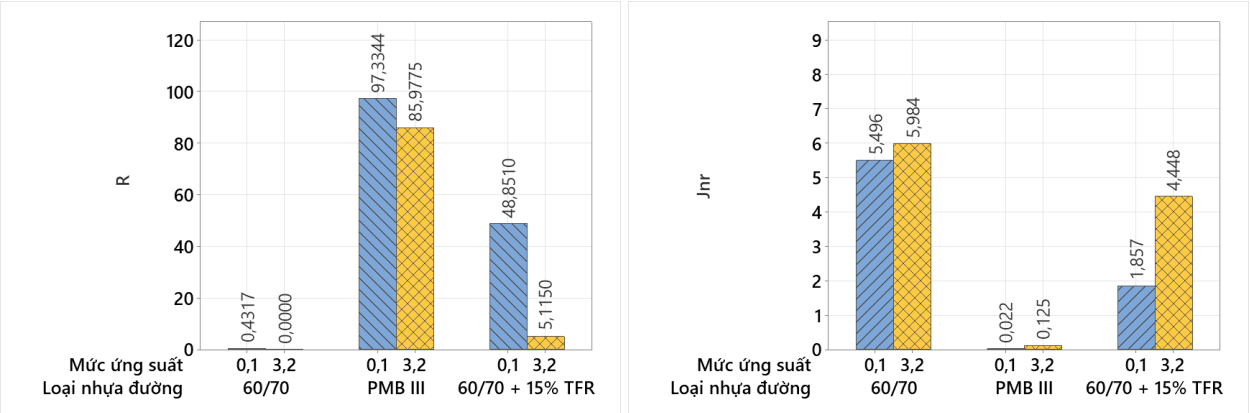


Hình 9. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường 60/70 + 35% TFR.

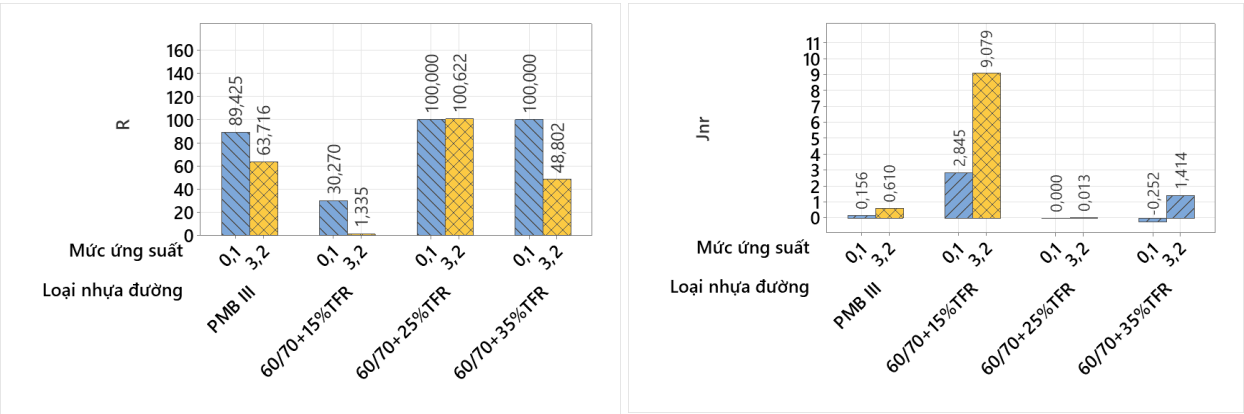
Kết quả tính toán các tham số J_{nr} và R của các loại nhựa đường cho thấy đặc tính từ biến – phục hồi của các loại nhựa đường chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ, mức ứng suất và hàm

lượng phụ gia TFR. Khi nhiệt độ tăng thì R giảm, trong khi J_{nr} tăng đối với tất cả các loại nhựa đường thí nghiệm. Đồng thời, ở mức ứng suất 3,2 kPa, R luôn thấp hơn và J_{nr} luôn cao hơn so với 0,1 kPa, phản ánh độ nhạy với ứng suất của vật liệu. Đặc điểm này thể hiện sự chuyển dịch cơ chế ứng xử từ đàn nhớt sang đàn dẻo nhớt khi nhiệt độ cao và ứng suất cắt lớn. Nhiệt độ cao và ứng suất cắt lớn làm tăng biến dạng của nhựa đường trong các thí nghiệm MSCR và đẩy mạnh ứng xử phi tuyến của vật liệu. Ứng xử phi tuyến cùng với các biến dạng dẻo không phục hồi xuất hiện khiến chỉ số R giảm và chỉ số J_{nr} tăng lên.

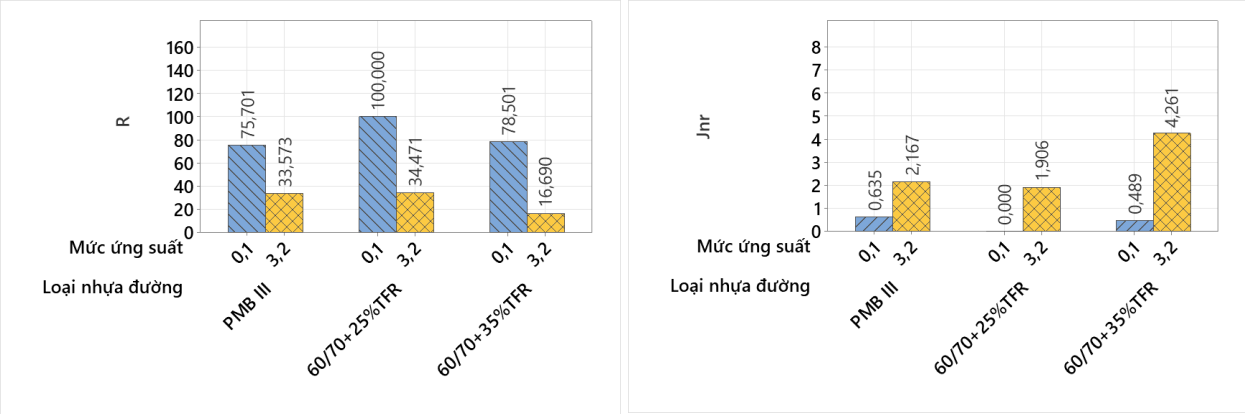
Xét ảnh hưởng của nhiệt độ, cả R và J_{nr} đều biến đổi theo xu hướng đặc trưng của nhựa đường: khi nhiệt độ tăng, R giảm và J_{nr} tăng. Điều này phản ánh sự suy giảm đặc tính đàn hồi và tăng đặc tính nhớt trong điều kiện nhiệt độ cao. Tuy nhiên, mức độ biến thiên phụ thuộc vào loại nhựa đường. Đối với nhựa đường 60/70, trong khoảng 52 – 70°C, R(0,1 kPa) giảm khoảng 96% (10,29% xuống 0,43%), trong khi J_{nr} tăng hơn 15 lần, cho thấy sự suy giảm đáng kể khả năng phục hồi ở nhiệt độ cao. Ngược lại, PMB III thể hiện mức suy giảm R(0,1 kPa) thấp hơn đáng kể (41% trong khoảng 70 – 88°C) và duy trì giá trị R trên 50% ở 82°C, chứng tỏ độ ổn định cấu trúc ở nhiệt độ cao vượt trội. Các mẫu nhựa đường trộn phụ gia TFR cũng cải thiện rõ rệt khả năng kháng biến dạng so với 60/70, đặc biệt ở hàm lượng cao: nhựa đường 60/70 trộn 25% TFR chỉ giảm khoảng 38% R(0,1 kPa) khi nhiệt độ tăng từ 76°C lên 88°C và duy trì R > 95% và J_{nr}(0,1 kPa) chỉ khoảng 0,016 kPa^{-1} ở 88°C.



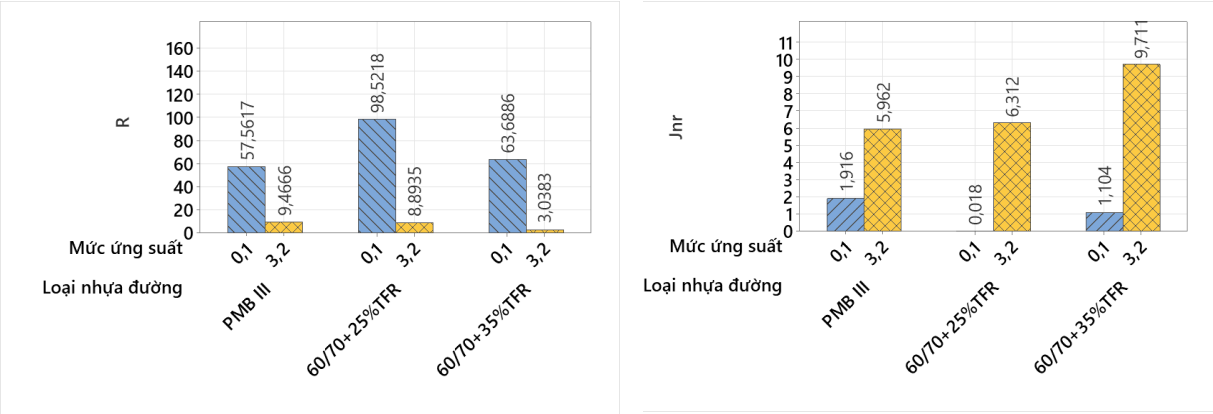
Hình 10. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường tại 70°C.



Hình 11. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường tại 76°C.



Hình 12. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường tại 82°C.



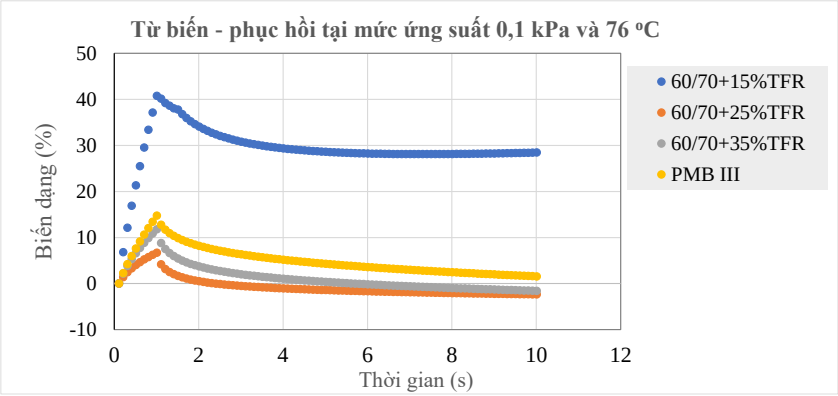
Hình 13. So sánh các tham số MSCR của nhựa đường tại 88°C.

Đối với nhựa đường 60/70 cải tiến bằng phụ gia TFR, xét tại mức ứng suất 3,2 kPa, việc bổ sung phụ gia vẫn làm tăng đáng kể R và giảm J_{nr} so với nhựa nền 60/70, qua đó thể hiện rõ hiệu quả cải thiện tính đàn hồi và khả năng kháng biến dạng. Cụ thể, tại 70°C và 3,2 kPa, nhựa 60/70 có R chỉ đạt khoảng 0% và J_{nr} khoảng 5,98 kPa^{-1}, trong khi nhựa 60/70 + 15% TFR nâng R lên khoảng 5,1% và giảm J_{nr} xuống 4,45 kPa^{-1} (giảm khoảng 26%). Trong các hàm lượng khảo sát, mức 25% TFR cho thấy hiệu quả nổi bật nhất; tại 76°C, R (3,2 kPa) đạt khoảng 1,01% và Jnr (3,2 kPa) chỉ khoảng 0,013 kPa^{-1}, thể hiện khả năng phục hồi vượt trội và tiệm cận đặc tính của PMB III trong dải nhiệt độ trung gian. Khi tăng hàm lượng lên 35%, mặc dù R (3,2 kPa) vẫn duy trì ở mức cao (48,8% tại 76°C), giá trị này thấp hơn đáng kể so với nhựa đường 60/70 + 25% TFR ở điều kiện tương đương và J_{nr} cũng tăng lên, cho thấy hiệu quả cải thiện không tăng tuyến tính theo hàm lượng TFR (xem Hình 10, Hình 11, Hình 12 và Hình 13). Điều này có thể do ảnh hưởng của sự phân tán phụ gia TFR hoặc tương tác trong hệ nhựa đường – phụ gia.

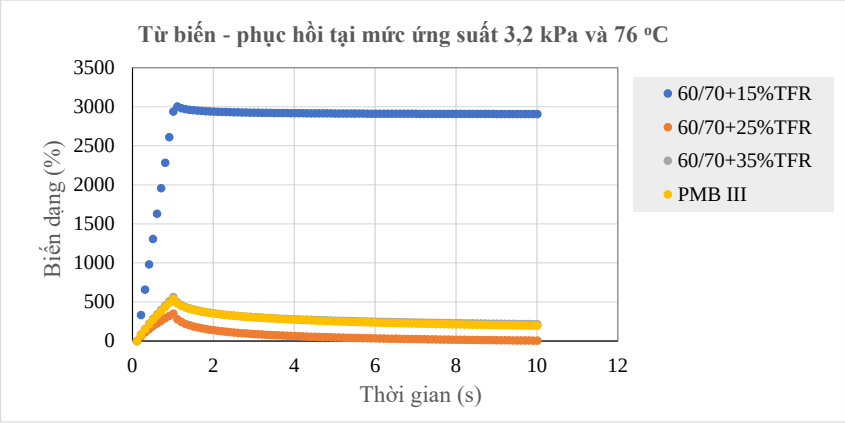
Nhựa đường 60/70 thể hiện giá trị R thấp và J_{nr} cao trong toàn bộ dải nhiệt độ khảo sát, phản ánh đặc trưng ứng xử nhớt và khả năng chống hằn lún hạn chế. Khi tăng nhiệt độ, R của nhựa 60/70 suy giảm nhanh, đồng thời Jnr tăng mạnh, đặc biệt ở vùng nhiệt độ cao (64 và 70°C), cho thấy vật liệu này có độ nhạy nhiệt cao. Ngược lại, nhựa đường PMB III duy trì giá trị R ở mức cao và J_{nr} thấp hơn đáng kể trong cùng nhiệt độ thí nghiệm 70 °C và thậm chí ở các nhiệt độ cao hơn (76°C, 82°C), chứng tỏ sự hiện diện của mạng lưới polyme đã cải thiện tính chất đàn hồi và hạn chế biến dạng dư dưới tải trọng lặp.

Về ảnh hưởng của mức ứng suất, tại mọi nhiệt độ khảo sát, R tại 3,2 kPa luôn thấp hơn so với 0,1 kPa, trong khi J_{nr} tăng tương ứng khi tăng ứng suất, phản ánh rõ đặc trưng phụ thuộc ứng suất của vật liệu. Nhựa 60/70 và nhựa 60/70 + 15% TFR thể hiện độ nhạy ứng suất cao hơn rõ rệt. Cụ thể, tại 70°C, đối với hệ 15% TFR, J_{nr} tăng từ 1,86 lên 4,45 kPa^{-1} khi ứng suất tăng từ 0,1 lên 3,2 kPa, đồng thời R giảm từ 48,9% xuống 5,1%, cho thấy sự suy giảm mạnh thành phần đàn hồi dưới tác dụng của tải trọng lớn. Trong khi đó, PMB III tại 70°C chỉ ghi nhận J_{nr} tăng từ khoảng 0,02 lên 0,13 kPa^{-1}, trong khi R giảm từ 97,3% xuống 86,0%. Nhựa 60/70 + 25% TFR cũng duy trì giá trị R cao hơn và biên độ biến thiên nhỏ hơn trong dải 76 – 88°C. Những kết quả này chứng tỏ PMB III và nhựa 60/70 + 25% TFR có khả năng bảo toàn cấu trúc có tính đàn hồi dưới tác dụng của ứng suất lớn tốt hơn so với nhựa 60/70 và nhựa đường cải tiến sử dụng phụ gia TFR hàm lượng thấp (15%).

Hình 14 và Hình 15 lần lượt trình bày đường cong từ biến – phục hồi của các mẫu nhựa đường tại hai mức ứng suất 0,1 kPa và 3,2 kPa, được thực hiện ở cùng nhiệt độ thí nghiệm 76 ºC. Kết quả thể hiện trong Hình 10 và Hình 11 tương ứng với một chu kỳ gia tải điển hình (10 s), được xác định bằng cách lấy giá trị trung bình của 10 chu kỳ đo.



Hình 14. Đặc tính từ biến – phục hồi của nhựa đường biến tính TFR tại 76 °C và ứng suất 0,1 kPa.



Hình 15. Đặc tính từ biến – phục hồi của nhựa đường biến tính TFR tại 76 °C và ứng suất 3,2 kPa.

Tại nhiệt độ 76°C và mức ứng suất 0,1 kPa, ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia TFR đến ứng xử từ biến – phục hồi thể hiện rõ rệt thông qua sự thay đổi biến dạng cực đại và biến dạng dư. Mẫu chứa 15% TFR ghi nhận biến dạng cực đại xấp xỉ 41%, trong khi các mẫu 25% và 35% TFR chỉ khoảng 6 – 8%, tương ứng mức giảm khoảng 80 – 85%. Nhựa đường PMB III có biến dạng cực đại khoảng 15%, vẫn cao hơn đáng kể so với hai mẫu có hàm lượng TFR $\geq$ 25%. Về biến dạng dư ở cuối của mỗi chu kỳ, mẫu nhựa đường + 15% TFR còn lại khoảng 28%,

trong khi các mẫu 25% và 35% TFR chỉ dao động trong khoảng 0 – 2%, tương đương mức giảm trên 90%. Kết quả này cho thấy khi hàm lượng TFR đạt từ 25% trở lên, nhựa đường chuyển sang trạng thái ứng xử đàn hồi dưới ứng suất thấp, với khả năng phục hồi gần như hoàn toàn.

Ở mức ứng suất 3,2 kPa, sự khác biệt giữa các hàm lượng phụ gia TFR càng trở nên rõ rệt. Mẫu nhựa đường 15% TFR xuất hiện biến dạng cực đại rất lớn, xấp xỉ 3000%. Khi tăng hàm lượng TFR lên 25%, biến dạng cực đại giảm mạnh xuống khoảng 300%, tương đương mức giảm gần 90%. Mẫu nhựa đường với 35% TFR có biến dạng cực đại khoảng 450 – 500%, thấp hơn đáng kể so với mẫu chứa 15% TFR nhưng cao hơn so với mẫu chứa 25% TFR. Xu hướng tương tự cũng quan sát được đối với biến dạng dư: mẫu nhựa đường 15% TFR duy trì biến dạng dư khoảng 2900% sau khi phục hồi, trong khi mẫu nhựa đường 25% TFR chỉ còn khoảng 50 – 80% (giảm 97 – 98%), và mẫu nhựa đường 35% TFR khoảng 150 – 200% (giảm 93 – 95%). Điều này chứng tỏ hàm lượng phụ gia 25% TFR là hàm lượng tối ưu trong phạm vi thí nghiệm này về khả năng hạn chế biến dạng không phục hồi.

5. KẾT LUẬN

Từ các kết quả thí nghiệm và phân tích về các tham số MSCR cũng như đường cong từ biến – phục hồi, có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Đặc tính từ biến – phục hồi của nhựa đường phụ thuộc chặt chẽ vào nhiệt độ và mức ứng suất; khi nhiệt độ và ứng suất tăng, giá trị R giảm và J_{nr} tăng đối với tất cả các loại nhựa đường, phản ánh sự chuyển đổi cơ chế làm việc từ ứng xử đàn – nhớt sang đàn - dẻo - nhớt. Nhựa đường 60/70 thể hiện độ nhạy nhiệt và nhạy ứng suất cao nhất, trong khi nhựa đường PMB III duy trì tính đàn hồi và khả năng kháng biến dạng tốt hơn trong toàn bộ dải nhiệt độ khảo sát.

- Việc bổ sung phụ gia TFR cải thiện rõ rệt khả năng phục hồi và giảm biến dạng không phục hồi của nhựa đường 60/70; trong đó hàm lượng 25% TFR cho hiệu quả tối nhất, với giá trị R cao và J_{nr} thấp, tiệm cận đặc tính của PMB III, trong khi tăng lên 35% không mang lại cải thiện tương ứng, cho thấy tồn tại hàm lượng phụ gia cho hiệu quả tốt nhất trong phạm vi nghiên cứu.

- Trong thí nghiệm MSCR, việc tăng hàm lượng TFR từ 15% lên 25% làm giảm mạnh cả biến dạng cực đại với mức giảm đạt 80 – 90% và biến dạng không phục hồi với mức giảm 90 – 98% ở 76°C, cho thấy tiềm năng cải thiện đáng kể khả năng kháng hằn lún ở nhiệt độ cao.

6. LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2026-CT-004.

7. TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Bùi Ngọc Hưng, Vũ Đức Chính, Trần Ngọc Huy, Nghiên cứu ảnh hưởng của nguồn gốc đá, cấp phối cốt liệu và loại nhựa đến khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe của bê tông nhựa, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 57 (2015).

[2]. AASHTO M320, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt, 2010.

[3]. AASHTO T 315, Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), 2013.

[4]. Trần Danh Hợi, Trần Thị Cẩm Hà, Lương Xuân Chiểu, Phân cấp nhựa đường theo đặc tính làm việc sử dụng thí nghiệm từ biến - phục hồi ứng suất lặp (MSCR) đối với một số loại nhựa đường cải tiến ở Việt Nam, Tạp chí Giao thông vận tải, 04 (2023) 24-27.

[5]. J. Zhang, L.F. Walubita, A.N. Faruk, P. Karki, G.S. Simate, Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance – A laboratory study, Construction and Building Materials, 94 (2015) 218-227

[6] AASHTO T350, Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), ASHTO: Washington, DC, USA, 2020.

[7]. AASHTO M332, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, 2014.

[8]. A.W. Ali, Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) characterization of polymer modified asphalt binder containing wax additives, Doctoral dissertation, Texas State University, 2018.

[9]. A. Behnood, A. Shah, R.S. McDaniel, J. Olek, Analysis of the multiple stress creep recovery asphalt binder test and specifications for use in Indiana (Joint Transportation Research Program Publication No. FHWA/IN/JTRP-2016/07), West Lafayette, IN: Purdue University, 2016 http://dx.doi.org/10.5703/1288284316330

[10] Z. Hossain, D. Ghosh, M. Zaman, K. Hobson, Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test method to characterize polymer-modified asphalt binders, Journal of Testing and Evaluation, 44 (2016) 507 – 520.

[11]. S.J. Lee, J.S. Lee, Evaluation of recovery rate of porous asphalt binder using MSCR test method, Journal of the Korean Asphalt Institute, 10 (2020) 75-82. https://doi.org/10.22702/jkai.2020.10.1.007

[12]. B. Tadele, E.T. Quezon, Multiple stress creep recovery (MSCR) test for determination of waste engine oil modified asphalt binder as pavement material, SSRN 3998451 (2022). https://doi.org/10.54392/irjmt2212

[13] J. Zhang, L.F. Walubita, A.N. Faruk, P. Karki, G.S. Simate, Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance – A laboratory study. Construction and Building Materials, 94 (2015) 218-227. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.044

[14]. H. Liu, W. Zeiada, G.G. Al-Khateeb, A. Shanableh, M. Samarai, Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: A literature review. Construction and Building Materials, 269 (2021). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121320

[15]. A.V. Kataware, D. Singh, A study on rutting susceptibility of asphalt binders at high stresses using MSCR test, Innovative Infrastructure Solutions, 2 (2017).

[16] G. Skronka, M. Jasso, O. Vacin, Determination of rutting distresses on hot mix asphalts by advanced techniques, In MATEC Web of Conferences, 276 (2019) 03004.

[17]. D. Wang, J. Zhu, L. Porot, A. Cannone Falchetto, S. Damen, Multiple stress creep and recovery test for bituminous binders–influence of several key experimental parameters. Road Materials and Pavement Design, 24 (2023) 290-308. https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2180992

[18]. S. Gowda, A.S. Niranjan, A. Gupta, G. Kavitha, Analysis of rutting behaviour of recycled asphalt binder and rejuvenated recycled asphalt binder by Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1326 (2024) 012065.

[19]. M.A. Notani, P. Hajikarimi, F.M. Nejad, A. Khodaii, Rutting resistance of toner-modified asphalt binder and mixture, International Journal of Pavement Research and Technology, 13 (2020) 1-9.

[20]. Công ty Cổ phần Xây dựng Taiyu, Tough Flex-R – phụ gia cải tiến khả năng kháng nứt của nhựa đường. https://www.taiyu.jp/product/toughflexr, (truy cập ngày 28 tháng 4 năm 2026). (in Japanese)

[21]. Bùi Văn Phú, Nguyễn Quang Tuấn, Thí nghiệm động xác định các đặc tính cơ học của nhựa đường 60/70, 35/50 và PMB3 sử dụng thiết bị DSR và Metravib DMA, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 71 (2020) 583-594. https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.10