



EFFECTS OF REJUVENATORS ON PENETRATION AND SOFTENING POINT OF BITUMEN BLENDS

Truong Van Quyet^{1*}, Nguyen Ngoc Lan¹, Dao Van Dong^{1,2}, Pham Minh Trang¹

¹University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

²Hoa Binh University, No 8 Bui Xuan Phai, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 13/12/2022

Revised: 29/01/2023

Accepted: 13/02/2023

Published online: 15/02/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.7>

* *Corresponding author*

Email: quyet.tv@utc.edu.vn; Tel: +84978452140

Abstract. The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) to produce asphalt concrete is becoming more and more popular in the world because of its technical, economic and environment. However, when a high RAP is used, causing a negative effect on the performances of the mixtures. Therefore, rejuvenators are used to improve the properties of bitumen and to recycle asphalt mixtures. This paper presents a study on the influence of the type and content of the rejuvenators on the penetration and the softening point of bitumen. The types of bitumen were evaluated including the virgin bitumen, aged bitumen recovered from RAP and bitumen blends (including virgin bitumen, RAP aged bitumen with the recycled binder ratio (RBR) of 0.3, and rejuvenator). Two rejuvenators used in the study are petroleum-based recycling agent (HS1 rejuvenator) and vegetable oil-based (Prephalt@FBK rejuvenator) with different contents from 0%, 4%, 8% and 12%. The obtained results have shown the effectiveness of rejuvenators in restoring the physical properties of bitumen. In order to meet the requirements of the penetration and softening point as bitumen 60/70, the rejuvenator content should be about 9.0% with HS1 and about 5.0% with Prephalt@FBK.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement (RAP), bitumen blends, rejuvenators, HS1, Prephalt@FBK, penetration, softening point.



ẢNH HƯỞNG CỦA PHỤ GIA TÁI SINH ĐẾN ĐỘ KIM LÚN VÀ NHIỆT ĐỘ HOÁ MỀM CỦA BITUM HỖN HỢP

Trương Văn Quyết^{1*}, Nguyễn Ngọc Lâm¹, Đào Văn Đông^{1,2}, Phạm Minh Trang¹

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

²Trường Đại học Hoà Bình, Số 8 Bùi Xuân Phái, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 13/12/2022

Ngày nhận bài sửa: 29/01/2023

Ngày chấp nhận đăng: 13/02/2023

Ngày xuất bản Online: 15/02/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.7>

* Tác giả liên hệ

Email: quyet.tv@utc.edu.vn; Tel: +84978452140

Tóm tắt. Xu hướng sử dụng vật liệu mặt đường bê tông asphalt tái chế (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) để sản xuất bê tông asphalt đang ngày càng trở nên phổ biến ở trên thế giới vì những lợi ích mang lại về kỹ thuật, kinh tế và môi trường. Tuy nhiên, khi hàm lượng RAP cao được sử dụng có thể gây ra những ảnh hưởng tiêu cực đến các tính năng của hỗn hợp. Do vậy, phụ gia tái sinh thường được sử dụng để cải thiện các tính chất của bitum và hỗn hợp bê tông asphalt tái chế. Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến chỉ tiêu độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum. Các loại bitum được đánh giá bao gồm bitum mới, bitum cũ thu hồi từ vật liệu bê tông asphalt tái chế -RAP) và bitum hỗn hợp (bao gồm bitum mới, bitum cũ thu hồi từ RAP với tỷ lệ bitum tái chế (Recycled Binder Ratio - RBR) là 0,3 và phụ gia tái sinh). Hai loại phụ gia tái sinh được sử dụng trong nghiên cứu là phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (HS1), và phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (Prephalt@FBK) với các hàm lượng dùng từ 0% ; 4,0% ; 8,0% và 12,0% theo khối lượng bitum cũ thu hồi từ RAP. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra hiệu quả của phụ gia tái sinh trong việc khôi phục lại các tính chất vật lý của bitum. Để đạt được yêu cầu về chỉ tiêu độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm như bitum mới 60/70, khoảng hàm lượng phụ gia tái sinh được xác định là khoảng 9,0% với phụ gia tái sinh HS1 và khoảng 5,0% với phụ gia tái sinh Prephalt@FBK.

Từ khóa: Vật liệu bê tông asphalt tái chế (RAP), bitum hỗn hợp, phụ gia tái sinh, HS1, Prephalt@FBK, độ kim lún, nhiệt độ hoá mềm.

© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng với hàm lượng RAP cao thường cứng và giòn hơn so với hỗn hợp bê tông asphalt nóng truyền thống, do đó hỗn hợp này thường khó đầm nén ngoài hiện trường, dễ bị nứt, và các đặc tính độ bền thường khác so với hỗn hợp bê tông asphalt không có vật liệu tái chế [1]. Do vậy, bên cạnh những lợi ích đạt được, thách thức đặt ra là sử dụng hàm lượng RAP cao trong hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nhưng vẫn đảm bảo được độ bền khai thác và tuổi thọ của mặt đường. Để giải quyết vấn đề này, phụ gia tái sinh thường được sử dụng để cải thiện các tính năng của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế.

Phụ gia tái sinh là sản phẩm có các đặc tính hóa học và vật lý được thiết kế để khôi phục các tính chất vật lý và đặc tính lưu biến của bitum cũ bằng cách cải thiện tỷ lệ nhóm asphalt/maltene. Điều này dẫn đến giảm độ cứng và làm tăng độ dẻo của bitum cũ [2]. Một số loại phụ gia tái sinh có sẵn trên thị trường, có thể được phân loại theo NCAT (2014) [3] là dầu parafinic, aromatic extracts - chiết xuất thơm, tall oils - dầu gỗ thông, dầu naphthenic, triglycerides and fatty acids - chất béo trung tính và các axit béo (từ dầu thực vật). Các nghiên cứu chỉ ra rằng phụ gia tái sinh có ảnh hưởng đáng kể đến các tính chất của bitum cũ thu hồi từ RAP và bitum hỗn hợp [4-8].

Ở Mỹ, Sở Giao thông vận tải các Bang (DOTs) cho phép sử dụng hàm lượng RAP tối đa trong hỗn hợp asphalt thông qua tỷ lệ bitum cũ RAP được tái chế (recycled binder ratio - RBR). RBR được định nghĩa là phần trăm bitum trong RAP, theo khối lượng, so với tổng hàm lượng bitum theo khối lượng hỗn hợp bê tông asphalt [4].

$$RBR = \frac{P_{bRAP} \times P_{RAP}}{100 \times P_b} \quad (1)$$

Trong đó, P_{bRAP} là hàm lượng bitum trong RAP, P_{RAP} là tỷ lệ RAP theo khối lượng hỗn hợp và P_b là hàm lượng bitum trong hỗn hợp.

Hiện nay, để xác định hàm lượng phụ gia tái sinh, một số nghiên cứu đã sử dụng phương pháp pha trộn giữa bitum mới, bitum cũ thu hồi từ RAP, và phụ gia tái sinh, từ đó thiết lập biểu đồ pha trộn. Trong biểu đồ pha trộn, những thay đổi về độ kim lún, độ nhớt hoặc cấp PG (Performance Grade) của bitum hỗn hợp với hàm lượng phụ gia tái sinh được đánh giá. Một số nghiên cứu đã sử dụng biểu đồ pha trộn dựa trên độ nhớt hoặc độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum hỗn hợp với các hàm lượng phụ gia tái sinh khác nhau để lựa chọn hàm lượng [9, 10]. Các nghiên cứu gần đây đã sử dụng cấp PG để lựa chọn hàm lượng phụ gia tái sinh trong đó hàm lượng tối thiểu để đảm bảo đủ khả năng chống nứt ở nhiệt độ thấp và hàm lượng tối đa để đảm bảo kháng hàn lún [11-13].

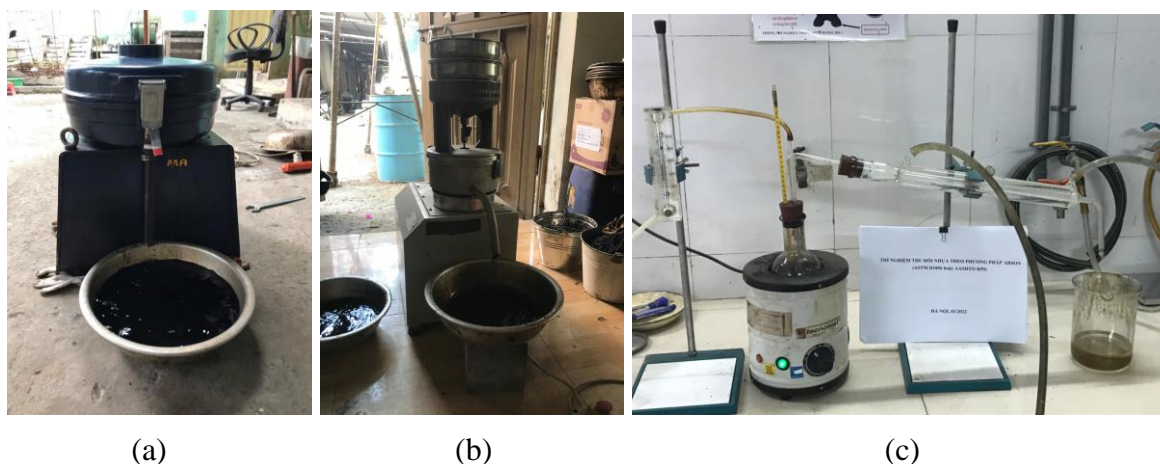
Trong phân loại mác bitum ở Việt Nam hiện nay, độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm là hai trong số các chỉ tiêu kỹ thuật quan trọng dùng để đánh giá chất lượng bitum. Bên cạnh đó, TCVN 13567-1:2022 [14] cũng đã đưa cách phân loại bitum theo cấp PG. Đối với hỗn hợp bê tông asphalt tái chế với hàm lượng RAP cao, có sự thay đổi các tính chất vật lý và cơ học của bitum hỗn hợp (bitum mới 60/70, bitum cũ thu hồi từ RAP và phụ gia tái sinh) do xét đến

bitum trong RAP được trộn lẫn trong hỗn hợp. Trong phạm vi nghiên cứu ở đây, nghiên cứu bước đầu đánh giá ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến chỉ tiêu độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum hỗn hợp. Trên cơ sở kết quả thí nghiệm, nghiên cứu tiến hành phân tích ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia khác nhau đến chỉ tiêu độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm. Từ đó, đưa ra khoảng hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu được lựa chọn để đạt được giá trị độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm tương đương với cấp bitum mới.

2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Chất kết dính bitum mới là loại bitum 60/70 của Công ty Nhựa đường Petrolimex được sử dụng trong nghiên cứu này. Hỗn hợp RAP sử dụng cho nghiên cứu là loại 12,5 (RAP 12,5) được lấy từ trạm trộn Tân Cang, Đồng Nai của Công ty Cổ phần Đầu tư xây dựng BMT. Bitum cũ (bitum RAP) được tách ra từ vật liệu RAP bằng phương pháp chiết ly tâm theo tiêu chuẩn AASHTO T164 [15]. Thiết bị quay ly tâm được sử dụng để tách phần dung dịch có chứa bitum và bột khoáng trong hỗn hợp RAP (Hình 1a). Tiếp theo, bột khoáng từ dung dịch đã chiết sẽ được chiết tách tiếp để tạo ra dung dịch chỉ chứa bitum sử dụng thiết bị quay ly tâm tốc độ cao (Hình 1b). Cuối cùng, bitum RAP được thu hồi theo phương pháp Abson theo tiêu chuẩn AASHTO R59 [16] (Hình 1c). Các chỉ tiêu kỹ thuật của bitum trong RAP và bitum mới 60/70 được thể hiện ở Bảng 1. Hai loại phụ gia tái sinh được sử dụng trong nghiên cứu là phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (HS1-rejuvenator), và phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (Prephalt@FBK-rejuvenator). Hai loại phụ gia tái sinh này đã được thương mại hoá và có sẵn trên thị trường. Bảng 2 đưa ra kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia tái sinh HS1 và Prephalt@FBK (P).



Hình 1. Quá trình chiết và thu hồi bitum trong RAP.

(a) Chiết bitum bằng thiết bị quay ly tâm, (b) Tách bột khoáng từ dung dịch chiết được bằng thiết bị quay ly tâm tốc độ cao, (c) Thu hồi bitum từ dung dịch theo phương pháp Abson

Bảng 1. Một số chỉ tiêu của bitum mới 60/70 và bitum cũ thu hồi RAP.

Chỉ tiêu	Bitum 60/70	Bitum RAP	Tiêu chuẩn thí nghiệm
Hàm lượng bitum trong RAP (%)	-	3,0	-
Độ kim lún ở 25 °C, 0,1 mm	64,2	25,4	ASTM D 5

Chỉ tiêu	Bitum 60/70	Bitum RAP	Tiêu chuẩn thí nghiệm
Nhiệt độ hoá mềm, °C	49,6	64,6	ASTM D 36
G*/sinδ ở 64 °C, kPa	2,02	-	AASHTO T315
G*/sinδ ở 82 °C, kPa	-	1,1	

Bảng 2. Các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia tái sinh HS1 và Prephalt@FBK.

Chỉ tiêu, đơn vị	HS1	Prephalt@FBK
Độ nhớt ở 25°C (cPs)	-	1500-2500
Độ nhớt ở 60°C (cSt)	67	-
Màu sắc	Nâu đen	Nâu đen
Điểm chớp cháy, °C	256	248



(a) phụ gia tái sinh HS1 (b) phụ gia tái sinh Prephalt@FBK (c) màu sắc

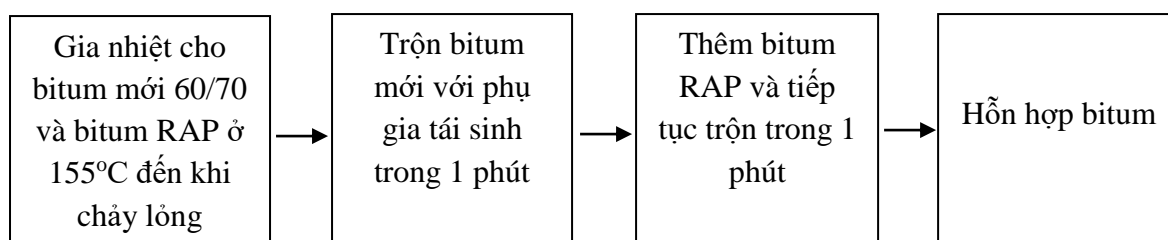
Hình 2. Phụ gia tái sinh đã thương mại hoá.

2.2. Kế hoạch và tiến hành thí nghiệm

Sau khi bitum cũ được thu hồi từ vật liệu RAP, tiến hành trộn bitum mới với bitum RAP và phụ gia tái sinh để tạo thành bitum hỗn hợp. Hai loại phụ gia tái sinh HS1 và Prephalt@FBK được sử dụng với hàm lượng từ 0-12% theo khối lượng bitum RAP. Trong nghiên cứu này, tỷ lệ bitum RAP được tái chế là 0,3 (RBR = 0,3), tương ứng với hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng 50%RAP. Kế hoạch thí nghiệm chi tiết của nghiên cứu được thể hiện trong Bảng 3. Trong quá trình trộn, nhiệt độ của hỗn hợp bitum luôn duy trì trong khoảng nhiệt độ 155°C. Chi tiết các bước trộn phụ gia tái sinh với bitum được thể hiện ở Hình 3. Phụ gia tái sinh được trộn với bitum bằng phương pháp cơ học sử dụng đĩa thủy tinh (Hình 4).

Bảng 3. Kế hoạch thí nghiệm.

TT	Ký hiệu	Mô tả
1	60/70	Bitum mới 60/70
2	R	Bitum cũ thu hồi từ RAP (bitum RAP)
3	B	70% bitum mới + 30% bitum RAP + không có phụ gia tái sinh
4	HS1-4	70% bitum mới + 30% bitum RAP + 4% phụ gia tái sinh HS1
5	HS1-8	70% bitum mới + 30% bitum RAP + 8% phụ gia tái sinh HS1
6	HS1-12	70% bitum mới + 30% bitum RAP + 12% phụ gia tái sinh HS1
7	P-4	70% bitum mới + 30% bitum RAP + 4% phụ gia tái sinh Prephalt@FBK
8	P-8	70% bitum mới + 30% bitum RAP + 8% phụ gia tái sinh Prephalt@FBK
9	P-12	70% bitum mới + 30% bitum RAP + 12% phụ gia tái sinh Prephalt@FBK

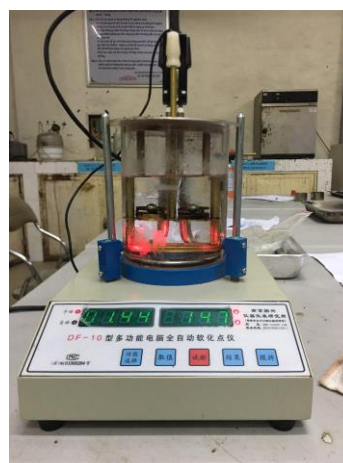


Hình 3. Các bước trộn phụ gia tái sinh với bitum.



Hình 4. Trộn cơ học dùng đũa thủy tinh.

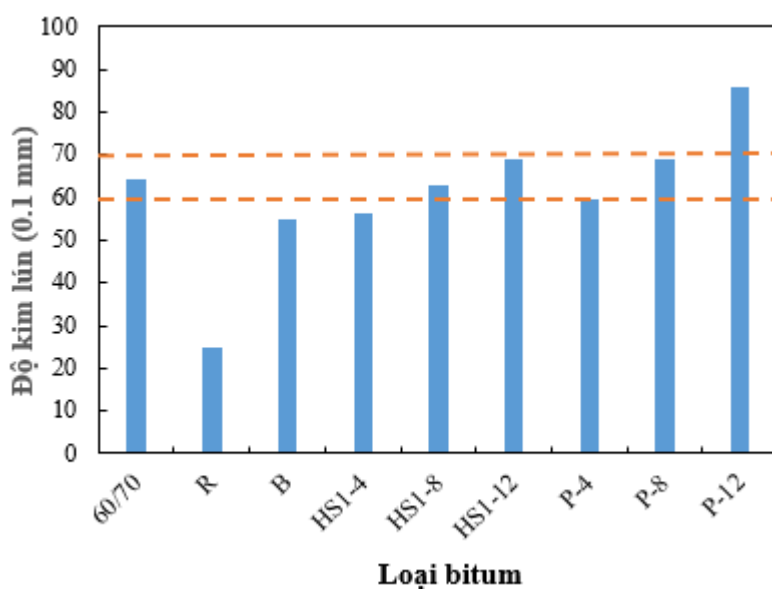
Để đánh giá sự thay đổi về các tính chất vật lý của bitum mới, bitum cũ thu hồi từ RAP và bitum hỗn hợp (bao gồm bitum mới, bitum cũ thu hồi từ RAP và phụ gia tái sinh), thí nghiệm xác định độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm được thực hiện. Độ kim lún là chỉ tiêu dùng để đánh giá tính quán của bitum và phân loại mác bitum ở Việt Nam hiện nay. Thí nghiệm đo độ kim lún được thực hiện ở nhiệt độ 25°C theo tiêu chuẩn ASTM D5 [17] (hoặc TCVN 7495-2005) (Hình 5). Nhiệt độ hoá mềm là chỉ tiêu dùng để đánh giá tính ổn định nhiệt của bitum khi nhiệt độ thay đổi. Trong nghiên cứu này, thí nghiệm nhiệt độ hoá mềm được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của việc sử dụng phụ gia tái sinh đến khả năng chịu nhiệt độ của bitum có phụ gia tái sinh theo tiêu chuẩn theo tiêu chuẩn ASTM D36 [18] (hoặc TCVN 7497-2005) (Hình 6).



Hình 5. Thí nghiệm đo độ kim lún. Hình 6. Thí nghiệm nhiệt độ hoá mềm.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

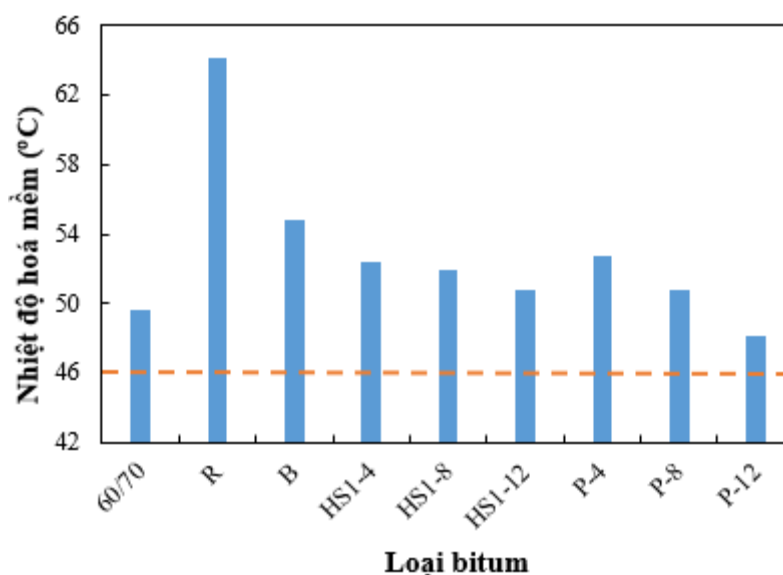
Hình 7 thể hiện kết quả thí nghiệm đo độ kim lún cho các mẫu bitum 60/70, bitum cũ thu hồi từ RAP, và bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh ở các hàm lượng khác nhau 0, 4, 8 và 12% (theo khối lượng bitum cũ thu hồi từ RAP). Dựa trên kết quả thí nghiệm độ kim lún, bitum cũ thu hồi từ RAP có sự suy giảm đáng kể về độ kim lún (độ kim lún là 25,4). Nguyên nhân dẫn đến sự suy giảm độ kim lún là do sự thay đổi thành phần các nhóm chất của bitum do vật liệu RAP bị hoá già theo thời gian, dẫn đến sự gia tăng của nhóm asphalt và sự bay hơi của nhóm matene (nhóm chất dầu) [19]. Độ kim lún của bitum hỗn hợp (bitum mới và bitum cũ thu hồi từ RAP) không đạt được mục tiêu cấp độ kim lún 60/70 khi 30% bitum RAP được thêm vào, giá trị độ kim lún đo được là 54,8. Tuy nhiên, khi thêm phụ gia tái sinh, giá trị độ kim lún của bitum tăng lên cùng với sự gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh từ 4 đến 12%. Bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh Prephalt@FBK cho giá trị độ kim lún cao hơn so với sử dụng phụ gia tái sinh HS1. Đối với phụ gia tái sinh HS1, độ kim lún của bitum hỗn hợp tăng từ 2,8% (56,3) đến 26,2% (69,1) và từ 9,1% (59,8) đến 56,7% (85,8) đối với phụ gia tái sinh Prephalt khi hàm lượng phụ gia tái sinh tăng từ 4% đến 12%. Như thể hiện trong Hình 7, các giá trị độ kim lún của bitum biến tính có chứa 8% HS1 và 8% Prephalt@FBK gần giống với giá trị của bitum mới 60/70.



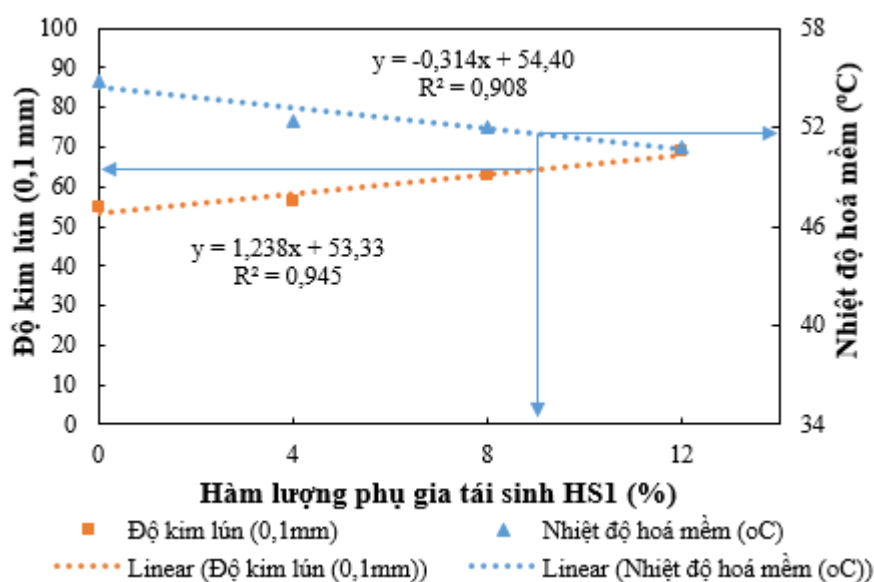
Hình 7. Kết quả thí nghiệm độ kim lún của các loại bitum.

Hình 8 thể hiện kết quả thí nghiệm nhiệt độ hoá mềm của bitum mới 60/70, bitum cũ thu hồi từ RAP và bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh. Như được thể hiện ở Hình 8, nhiệt độ hoá mềm của bitum mới 60/70 là 49,6°C (lớn hơn yêu cầu nhiệt độ hoá mềm tối thiểu) và của bitum RAP là 64,6°C. Với bitum hỗn hợp được thêm 30% bitum RAP cho thấy nhiệt độ hoá mềm cao nhất (54,9°C), trong khi bitum hỗn hợp có phụ gia tái sinh có sự giảm nhiệt độ hoá mềm, đặc biệt thể hiện rõ rệt khi sử dụng phụ gia tái sinh Prephalt@FBK. Khi hàm lượng phụ gia tái sinh tăng từ 4% đến 12%, nhiệt độ hóa mềm của bitum hỗn hợp có phụ gia tái sinh Prephalt@FBK giảm từ 52,8°C (3,7%) xuống 48,2°C (12,2%) và giảm từ 52,4°C (4,5%) xuống 50,8°C (7,4%) đối với phụ gia tái sinh HS1. Có thể thấy rằng, bitum hỗn hợp dùng phụ

gia tái sinh HS1 cho hiệu quả thấp hơn so với dùng phụ gia tái sinh Prephalt@FBK. Do đó các tính chất của bitum sử dụng phụ gia tái sinh HS1 thay đổi ít hơn so với sử dụng phụ gia tái sinh Prephalt@FBK.



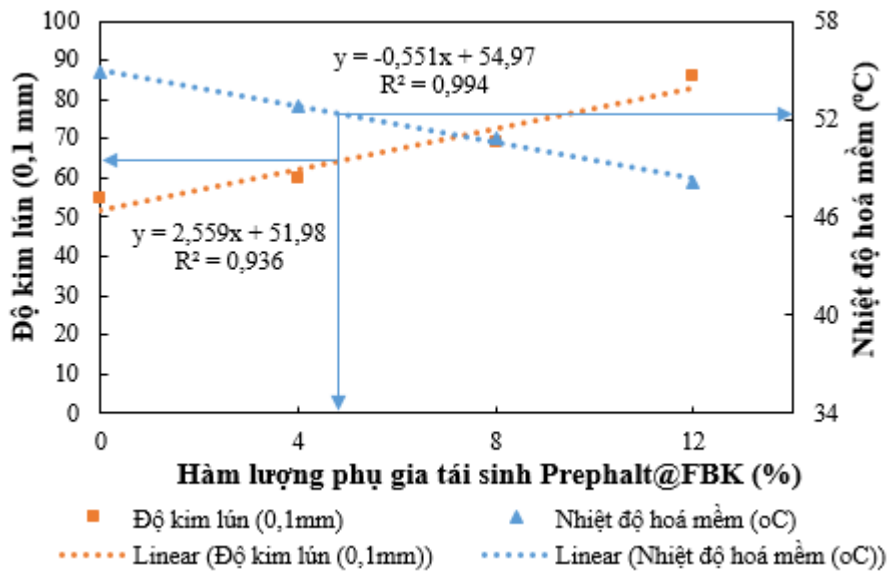
Hình 8. Kết quả thí nghiệm nhiệt độ hoá mềm của các loại bitum.



Hình 9. Biểu đồ xác định hàm lượng phụ gia tái sinh HS1 tối ưu.

Khoảng hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu có thể được xác định dựa trên kết quả thí nghiệm độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum. Trong nghiên cứu này, một biểu đồ pha trộn giữa hỗn hợp bitum (70% bitum mới 60/70 và 30% bitum cũ thu hồi từ RAP) với phụ gia tái sinh ở các hàm lượng khác nhau được thể hiện ở Hình 9, Hình 10. Hình 9 chỉ ra rằng, hàm lượng phụ gia tái sinh HS1 để đạt được yêu cầu về độ kim lún như bitum mới 60/70 nên khoảng 9,0% theo khối lượng bitum cũ thu hồi từ RAP. Đối với bitum sử dụng phụ gia tái sinh Prephalt@FBK, để đạt được độ kim lún như bitum 60/70 thì hàm lượng phụ gia tái sinh

nên khoảng 5,0% (Hình 10). Các hàm lượng phụ gia thử nghiệm đều cho kết quả nhiệt độ hoá mềm thoải mái và lớn hơn giá trị nhiệt độ hoá mềm yêu cầu của bitum 60/70. Để khẳng định hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu lựa chọn, nghiên cứu tiến hành thí nghiệm xác định độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm cho hai loại bitum hỗn hợp là HS1-9 và P-5. Bảng 4 thể hiện kết quả thí nghiệm độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum hỗn hợp với hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu. Kết quả chỉ ra rằng, giá trị độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum hỗn hợp ứng với hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu được lựa chọn đạt được tương đương với bitum mới 60/70.



Hình 10. Biểu đồ xác định hàm lượng phụ gia tái sinh Prephalt@FBK tối ưu.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum hỗn hợp với hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu.

Chỉ tiêu kỹ thuật	HS1-9	P-5
Độ kim lún (0,1mm)	63,5	64,0
Nhiệt độ hoá mềm (°C)	51,5	51,0

4. KẾT LUẬN

Dựa trên các kết quả nghiên cứu thực nghiệm, có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Phụ gia tái sinh khôi phục lại các tính chất vật lý (độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm) của bitum. Khi tăng hàm lượng phụ gia tái sinh, giá trị độ kim lún có xu hướng tăng và xu hướng giảm nhiệt độ hoá mềm.

- Khi so sánh với phụ gia tái sinh Prephalt@FBK, bitum hỗn hợp (70% bitum mới 60/70 và 30% bitum cũ thu hồi từ RAP) dùng phụ gia tái sinh HS1 cho hiệu quả thấp hơn. Các tính chất của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh HS1 thay đổi ít hơn so với sử dụng phụ gia tái sinh Prephalt@FBK.

- Đối với bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh, để đạt được yêu cầu về chỉ tiêu độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm tương ứng với bitum có mức 60/70, khoảng hàm lượng phụ gia

tái sinh tối ưu được xác định là khoảng 9,0% (theo khối lượng bitum cũ thu hồi từ RAP) đối với phụ gia HS1 và khoảng 5,0% với phụ gia tái sinh Prephalt@FBK.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2022-XD-006.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] F. Kaseer et al., Stiffness Characterization of Asphalt Mixtures with High Recycled Material Content and Recycling Agents, *J. Transp. Res. Board*, 2633 (2017) 58–68. <http://dx.doi.org/10.3141/2633-08>
- [2] F. Kaseer, A. Epps Martin, E. Arambula-Mercado, Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review, *Constr. Build. Mater.*, 211 (2019) 974–987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286>
- [3], NCAT report, Researchers Explore Multiple Uses of Rejuvenators. *Asphalt Technology News*, National Center for Asphalt Technology, 26 (2014). <http://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/info-pubs/newsletters/>. (As of July 2018).
- [4] NCHRP Research report 927, Evaluating the Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios, National Cooperative Highway Research Program, USA, 2020.
- [5]. M. Zaumanis, R. Mallick, R. Frank, Evaluation of Rejuvenator’s Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures, *SAGE Journals*, 2370 (2013) 17-25. <https://doi.org/10.3141/2370-03>
- [6]. M. Zaumanis, R. B. Mallick, R. Frank, Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications, *Constr. Build. Mater.*, 69 (2014) 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.035>
- [7]. P. H. Osmari, F. T. S. Aragao, L. F. M. Leite, R. A. Simão, L. M. G. da Motta, Y. R. Kim, Chemical, Microstructural, and Rheological Characterizations of Binders to Evaluate Aging and Rejuvenation, 2632 (2017) 14–24. <https://doi.org/10.3141/2632-02>
- [8]. P. Karki, F. Zhou, Effect of Rejuvenators on Rheological, Chemical, and Aging Properties of Asphalt Binders Containing Recycled Binders, *J. Transp. Res. Board*, 2574 (2016) 74–82. <https://doi.org/10.3141/2574-08>
- [9] A. Vaitkus, I. Palionyte, R. Kleiziene, Effect of rejuvenators on penetration and softening point of aged polymer-modified road bitumen, *Science – Future of Lithuania*, 13 (2021). <https://doi.org/10.3846/mla.2021.15173>
- [10] T. Koudelka, L. Porot, P. Coufalik, M. Varaus, The use of rejuvenators as an effective way to restore aged binder properties, *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018*, April 16-19, 2018, Vienna, Austria.
- [11] J. Yan, Z. Zhang, H. Zhu, F. Li, Q. Liu, Experimental study of Hot recycled asphalt mixtures with high percentages of Reclaimed Asphalt Pavement and different recycling agents, *J. Test. Eval.*, 42 (2014). <https://doi.org/10.1520/JTE20130251>
- [12] J. A. D.N. Little, R.J. Holmgreen, Effect of recycling agents on the structural performance of recycled asphalt concrete materials, *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*. <https://trid.trb.org/view/725854> (accessed Mar. 31, 2022)
- [13] E. Arambula-Mercado, F. Kaseer, A. Epps Martin, F. Yin, L. Garcia Cucional, Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents, *Constr. Build. Mater.*, 158 (2018) 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.088>

[10.1016/j.conbuildmat.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.024)

- [14] TCVN13567-1:2022, Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng – Thi công và nghiệm thu – Phần 1: Bê tông nhựa chặt sử dụng nhựa đường thông thường, Tiêu chuẩn Việt Nam, 2022.
- [15] AASHTO T164, Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA), American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018.
- [16] AASHTO R59, Recovery of Asphalt from solution by Abson method, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [17] ASTM D5, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM International - Standards, 2017.
- [18] ASTM D36, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), ASTM International - Standards, 2017.
- [19] M. A. Tarar, A. H. Khan, Z. Rehman, S. Qamar, M. N. Akhtar, Compatibility of sunflower oil with asphalt binders: a way toward materials derived from renewable resources, Material Structure Construction, 53 (2020). <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01506-8>