Transport and Communications Science Journal, Vol 77, Issue 5 (06/2026), 659-671

Transport and Communications Science Journal

STUDY ON DYNAMIC SHEAR PROPERTIES OF BITUCLAIR ES ASPHALT BINDER USED IN HOT MIX ASPHALT FOR ROAD PAVEMENT SURFACES

Nguyen Viet Dat[1,2], Tran Danh Hoi[1*]

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

[2]People's Committee of Tung Thien Ward, No. 66 Thanh My Street, Tung Thien Ward, Hanoi City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article
Received: 06/01/2026
Revised: 08/06/2026
Accepted: 12/06/2026
Published online: 15/06/2026
https://doi.org/10.47869/tcsj.77.5.4

[*] *Corresponding author*
Email: tdhoi@utc.edu.vn; Tel: +84989539246

Abstract. Conventional asphalt pavements are black in color and exhibit low solar reflectance, resulting in high heat absorption and storage capacity, which increases surface temperature and contributes to the urban heat island effect. Therefore, the research and development of light-colored pavement materials with enhanced solar reflectivity are necessary. Bituclair ES is a semi-transparent synthetic binder, free of asphaltenes and modified with polymer additives, possessing optical properties that improve pavement reflectance. Since the dynamic shear rheological behavior of asphalt binders is characterized by the complex shear modulus ($|G^*|$) and phase angle (δ), parameters associated with cracking and fatigue resistance, this study focuses on analyzing the rheological characteristics of Bituclair ES using Dynamic Shear Rheometer (DSR) test to clarify its mechanical response under dynamic loading. The experiments were conducted using a SmartPave 92 device (Anton Paar, Austria) over a wide range of frequencies and temperatures to construct master curves of $|G^*|$ and δ, with specific evaluation at a frequency of 10 Hz. The results indicate that Bituclair ES meets the PG 76 performance grade. Master curve analysis shows that Bituclair ES exhibits higher $|G^*|$ than conventional 60/70 penetration grade asphalt at high-temperature/low-frequency conditions, but lower $|G^*|$ at low-temperature/high-frequency conditions, suggesting potential improvement in rutting resistance and cracking resistance in asphalt mixtures incorporating Bituclair ES.

Keywords: Light-colored asphalt binder, Bituclair ES, dynamic shear modulus, phase angle, master curve.

@ 2026 University of Transport and Communications

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, Tập 77, Số 5 (06/2026), 659-671

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH CẮT ĐỘNG CỦA NHỰA ĐƯỜNG BITUCLAIR ES DÙNG TRONG HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA NÓNG LÀM LỚP MẶT ĐƯỜNG Ô TÔ

Nguyễn Viết Đạt[1,2], Trần Danh Hợi[1*]

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

[2]Ủy ban Nhân dân Phường Tùng Thiện, Số 66 đường Thanh Mỹ, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học
Ngày nhận bài: 06/01/2026
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.77.5.4

* Tác giả liên hệ
Email: tdhoi@utc.edu.vn; Tel: +84989539246

Tóm tắt. Mặt đường bê tông nhựa truyền thống có màu đen với hệ số phản xạ bức xạ mặt trời thấp, dẫn đến khả năng hấp thụ và tích nhiệt lớn, làm gia tăng nhiệt độ bề mặt và góp phần vào hiện tượng đảo nhiệt đô thị. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các vật liệu mặt đường sáng màu, có khả năng phản xạ bức xạ mặt trời tốt hơn, là cần thiết. Bituclair ES là nhựa đường tổng hợp bán trong suốt, không chứa asphaltene và được bổ sung phụ gia polymer, có đặc tính quang học giúp nâng cao khả năng phản xạ của mặt đường. Do ứng xử lưu biến cắt động của nhựa đường được đặc trưng bởi mô đun cắt động ($|G^*|$) và góc lệch pha (δ) – các thông số liên hệ với khả năng kháng nứt và kháng mỏi – nghiên cứu này tập trung phân tích đặc trưng lưu biến của Bituclair ES thông qua thí nghiệm cắt động lưu biến (DSR) nhằm làm rõ cơ chế làm việc của vật liệu dưới tải trọng động. Thí nghiệm được thực hiện trên thiết bị SmartPave 92 (Anton Paar, Áo) trong dải rộng tần số và nhiệt độ để xây dựng đường cong chủ của $|G^*|$ và δ, đồng thời xác định giá trị tại tần số 10 Hz. Kết quả cho thấy Bituclair ES đạt cấp PG 76. Phân tích đường cong chủ chỉ ra rằng vật liệu này có $|G^*|$ cao hơn nhựa đường 60/70 ở vùng nhiệt độ cao/tần số thấp nhưng thấp hơn ở vùng nhiệt độ thấp/tần số cao, cho thấy tiềm năng cải thiện khả năng chống hằn lún và kháng nứt của hỗn hợp bê tông nhựa khi sử dụng Bituclair ES.

Từ khóa: nhựa đường sáng màu, Bituclair ES, mô đun cắt động, góc lệch pha, đường cong chủ.

@2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

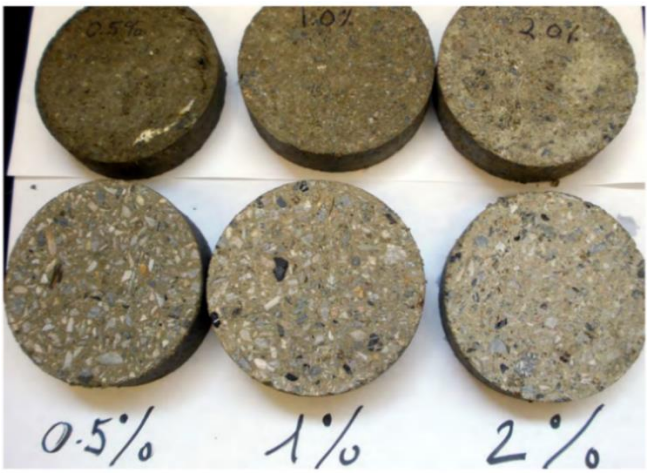
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mặt đường bê tông nhựa truyền thống màu đen có độ phản xạ rất thấp, khiến hấp thụ nhiều bức xạ mặt trời và tích tụ nhiệt, làm nhiệt độ bề mặt có thể đạt tới 65 °C vào mùa hè [1]. Điều này góp phần gia tăng hiệu ứng đảo nhiệt đô thị (Urban Heat Island – UHI), làm cho nhiệt độ bề mặt đường và nhiệt độ không khí tại các khu vực đô thị tăng cao [2, 3].

Công nghệ mặt đường mát (cool pavement) được phân thành ba nhóm cơ chế chính: hạn chế hấp thụ nhiệt, tăng cường hấp thụ – lưu trữ có kiểm soát, và thúc đẩy giải phóng nhiệt. Các giải pháp như lớp phủ phản xạ, vật liệu sáng màu hoặc che phủ bằng cây xanh làm tăng hệ số phản xạ bức xạ mặt trời (albedo), qua đó giảm lượng nhiệt xâm nhập vào kết cấu mặt đường. Bên cạnh đó, các hệ thống thu hồi năng lượng cho phép hấp thụ và chuyển hóa nhiệt tích tụ bên trong kết cấu. Ở cơ chế thứ ba, các công nghệ như mặt đường giữ nước, tăng cường dẫn nhiệt hoặc khuếch tán nhiệt được áp dụng nhằm đẩy nhanh quá trình trao đổi nhiệt với môi trường, qua đó thúc đẩy khả năng giải phóng nhiệt của kết cấu áo đường. Nhìn chung, các giải pháp này đã được ghi nhận có khả năng hạ nhiệt độ bề mặt áo đường từ vài độ đến hơn 20°C, góp phần nâng cao tuổi thọ khai thác và khả năng chống hằn lún của kết cấu [4 − 6].

Một trong những giải pháp mặt đường sáng màu là sử dụng chất dính kết bằng nhựa đường Bituclair ES, loại nhựa đường tổng hợp bán trong suốt, không chứa asphaltene và có tính chất quang học đặc trưng giúp tăng khả năng phản xạ của mặt đường. Tuy nhiên, để có thể áp dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng đường ô tô, cần có nghiên cứu chuyên sâu về đặc tính lưu biến của nhựa đường này, đặc biệt là chỉ tiêu mô đun cắt động, để đảm bảo vật liệu vừa tạo ra hiệu quả giảm nhiệt, vừa duy trì được tính năng cơ học dài hạn của kết cấu mặt đường trong điều kiện khí hậu và tải trọng thực tế [6].

Nghiên cứu của Strynadka và cộng sự (2009) [6] về bê tông nhựa sáng màu sử dụng Titanium Dioxide (TiO_2) cho thấy bột màu TiO_2 được phối trộn với cốt liệu và Bituclair® ở các hàm lượng 0,5%, 1,0% và 2,0% theo khối lượng nhựa đường nhằm cải thiện độ sáng của vật liệu. Quan sát mặt cắt mẫu (xem Hình 1) cho thấy độ sáng tăng rõ rệt khi hàm lượng tăng từ 0,5% lên 1,0%; tuy nhiên, sự khác biệt sắc độ giữa 1,0% và 2,0% là không đáng kể. Điều này cho thấy hiệu quả tăng độ phản xạ có xu hướng bão hòa khi hàm lượng TiO_2 vượt quá một ngưỡng nhất định, hàm ý rằng việc bổ sung thêm phụ gia không mang lại lợi ích quang học tương xứng với mức tăng hàm lượng. Phát hiện này đặt ra yêu cầu xác định hàm lượng tối ưu nhằm cân bằng giữa hiệu quả phản xạ và hiệu quả kinh tế trong thiết kế mặt đường sáng màu.



Hình 1. Vật liệu bê tông nhựa sáng màu sử dụng phụ gia Titanium Dioxide (TiO_2) [6].

Đặc tính cắt động của nhựa đường phản ánh đặc trưng ứng xử đàn - nhớt của nhựa đường dưới tác dụng đồng thời của nhiệt độ và tải trọng khác nhau. Tính chất lưu biến cắt động này của nhựa đường có mối liên hệ chặt chẽ với các chỉ tiêu cơ học quan trọng của hỗn hợp bê tông nhựa, bao gồm mô đun phức động, khả năng chống nứt và chống mỏi [7 − 14]. Từ thí nghiệm cắt động lưu biến (DSR), mô đun cắt động ($|G^*|$) và góc lệch pha (δ) của nhựa đường được xác định và sử dụng làm cơ sở phân cấp nhựa đường theo tiêu chuẩn AASHTO M320, thông qua chỉ tiêu $|G^*|/\sin(\delta)$. Chỉ tiêu này không những phản ánh mức độ ảnh hưởng của thành phần đàn hồi trong ứng xử lưu biến của nhựa đường ở nhiệt độ cao, mà còn được xem là thông số có mối liên hệ với khả năng chống vệt hằn lún bánh xe của bê tông nhựa trong điều kiện làm việc thực tế [11, 13].

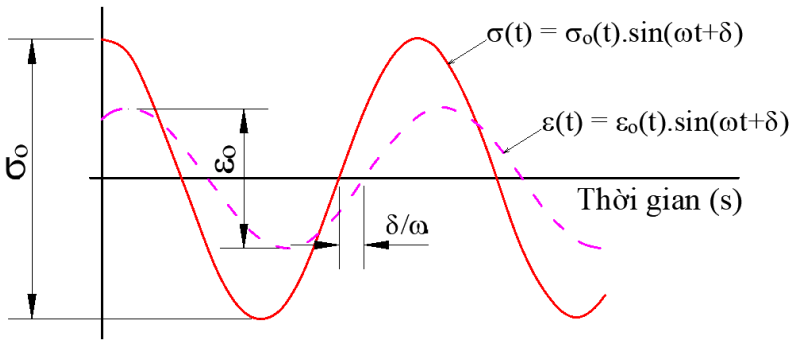
Mô hình hóa đã và đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi nhằm mô tả ứng xử đàn hồi - nhớt tuyến tính của nhựa đường và bê tông nhựa. Trong phạm vi ứng xử đàn – nhớt tuyến tính, nguyên lý tương quan thời gian – nhiệt độ (TTSP) cho phép hợp nhất các kết quả đo tại nhiều nhiệt độ khác nhau thông qua hệ số dịch chuyển nhiệt độ, từ đó hình thành đường cong chủ mô tả đặc tính mô đun động trên dải tần số mở rộng. Kết quả phân tích cho thấy mô hình 2S2P1D mô tả tốt đặc trưng biến đổi của đường cong chủ mô đun động của nhựa đường và bê tông nhựa, đồng thời đạt độ phù hợp cao với các số liệu thực nghiệm[7 − 10, 12].

Có thể thấy rằng, việc phát triển và ứng dụng các loại nhựa đường sáng màu như Bituclair ES, là cần thiết nhằm nâng cao suất phản xạ bức xạ mặt trời, qua đó góp phần giảm tích nhiệt bề mặt, đồng thời vẫn đáp ứng các yêu cầu về tính năng cơ học và độ bền khai thác. Trong số các chỉ tiêu đặc trưng, mô đun cắt động là thông số quan trọng phản ánh bản chất ứng xử lưu biến của nhựa đường dưới tác động đồng thời của nhiệt độ và tải trọng. Vì vậy, nghiên cứu đặc tính mô đun cắt động của nhựa đường Bituclair ES là cần thiết để làm rõ ứng xử lưu biến của vật liệu, qua đó đánh giá tiềm năng ứng dụng trong mặt đường ô tô và cung cấp cơ sở cho việc phát triển các giải pháp vật liệu mặt đường bền vững.

2. THIẾT BỊ THÍ NGHIỆM VÀ NHỰA ĐƯỜNG NGHIÊN CỨU

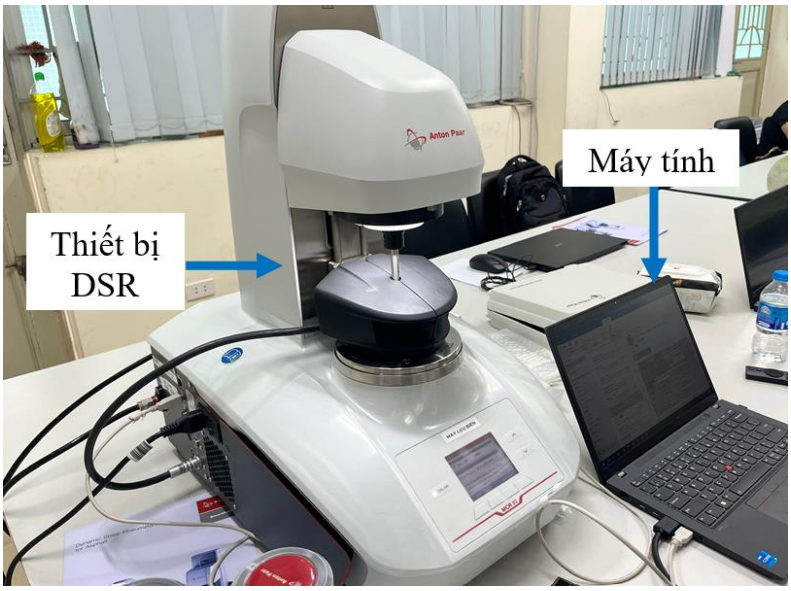
2.1.Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị DSR được sử dụng để xác định các đặc trưng lưu biến cắt động của nhựa đường thông qua việc áp dụng tải trọng cắt dao động và ghi nhận phản ứng biến dạng của mẫu thử được kẹp giữa hai đĩa phẳng song song. Dưới tác dụng của tải trọng dao động, ứng suất và biến dạng của nhựa đường biến thiên theo quy luật hình sin nhưng không đồng pha (xem Hình 2).



Hình 2. Góc lệch pha (δ) giữa ứng suất và biến dạng trong thí nghiệm DSR [11].

Thiết bị lưu biến cắt động SmartPave 92 (xem Hình 3) được sử dụng để khảo sát ứng xử lưu biến của nhựa đường dưới các tổ hợp nhiệt độ và tần số tải khác nhau. Thí nghiệm được tiến hành trong miền biến dạng nhỏ, bảo đảm vật liệu làm việc trong vùng đàn–nhớt tuyến tính. Thiết bị thí nghiệm cho phép đo đồng thời mô đun cắt động ($|G^*|$) và góc lệch pha (δ), đáp ứng yêu cầu xây dựng đường cong chủ tại nhiệt độ tham chiếu (T_r) và đánh giá mức độ đáp ứng của nhựa đường trong điều kiện làm việc khác nhau của kết cấu áo đường mềm.



Hình 3. Thiết bị SmartPave 92 đo cắt động lưu biến.

Thí nghiệm DSR sử dụng hai loại đĩa phẳng có đường kính 25 mm và 8 mm, phù hợp với các dải nhiệt độ và loại mẫu thí nghiệm khác nhau. Đĩa đường kính 25 mm với khe hở 1,0 mm được sử dụng cho các thí nghiệm ở vùng nhiệt độ trung bình và cao, trong khoảng từ +30 ^oC đến +70^oC. Trong khi đó, đĩa đường kính 8 mm với khe hở 2 mm được sử dụng để thí nghiệm nhựa đường ở vùng nhiệt độ thấp, trong dải từ −10 °C đến +30 °C.

2.2.Nhựa đường Bituclair ES

Vật liệu nhựa đường Bituclair ES do Colas (Pháp) sản xuất được lựa chọn cho nghiên cứu, với các đặc tính kỹ thuật chủ yếu được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số đặc trưng của nhựa đường Bituclair ES.

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Phương pháp thí nghiệm	Giá trị	Yêu cầu đối với nhựa đường PMB III
1	Độ kim lún ở 25 ^oC	0,1 mm	ASTM D5	40	40 ÷ 70
2	Điểm hóa mềm	°C	ASTM D36	80,6	≥ 80
3	Độ đàn hồi ở 25^oC	%	ASTM D6084	81	40 ÷ 70
4	Độ nhớt Brookfield ở 135 ^oC	Pa.s	ASTM D4420	1,6	≤ 3,0
5	Độ ổn định lưu trữ	^oC	ASTM D7173	2,2	≤ 3,0

6	Tổn thất khối lượng sau gia nhiệt 5 h ở 163 ºC	%	ASTM D6	0,28	≤ 0,6
7	Khối lượng riêng ở 25 ºC	g/cm^3	ASTM D70	1,004	1,00 ÷ 1,05
8	Độ nhớt Brookfield ở 135 ºC	Pa.s	ASTM D4420	1,6	≤ 3,0
9	Tỷ lệ độ kim lún sau gia nhiệt 5 h ở 163 ºC so với ban đầu	%	ASTM D175/D5	93,3	≥ 65
10	Độ hòa tan trong dung môi Trichloroethylene	cấp	ASTM D7553	99,62	≥ 99

Dựa trên kết quả thí nghiệm, nhựa đường Bituclair ES thể hiện các đặc tính kỹ thuật tương đương với nhựa đường polyme PMB III theo tiêu chuẩn TCVN 11193:2021.

Kế hoạch thí nghiệm xác định mô đun cắt động của nhựa đường Bituclair ES và nhựa đường 60/70 (mẫu đối chứng) được tổng hợp tại Bảng 2. Theo đó, cả hai loại nhựa đường đều được tiến hành thí nghiệm ở hai trạng thái vật liệu, bao gồm trạng thái chưa hóa già (nhựa gốc) và trạng thái sau hóa già ngắn hạn theo phương pháp RTFO, nhằm đánh giá ảnh hưởng của quá trình hóa già đến đặc trưng lưu biến của nhựa đường.

Bảng 2. Chương trình thí nghiệm xác định mô đun cắt động của nhựa đường.

TT	Loại nhựa đường	Điều kiện hóa già	Tần số (Hz)	Nhiệt độ (ºC)	Đường kính đĩa phẳng thí nghiệm
1	Bitulclair ES	Chưa hóa già	10	70; 76; 82	25 mm
2	Bitulclair ES	RTFO	10	70; 76; 82	25 mm
3	Bitulclair ES	Chưa hóa già	0,1 - 100	-10; 0; 10; 20; 30	25 mm
4	Bitulclair ES	Chưa hóa già	0,1 - 100	30; 40; 50; 60; 70	25 mm
5	RTFO	RTFO	0,1 - 100	-10; 0; 10; 20; 30	8 mm
6	Bitulclair ES	RTFO	0,1 - 100	30; 40; 50; 60; 70	8 mm
7	Nhựa đường 60/70	Chưa hóa già	0,1 - 100	-10; 0; 10; 20; 30	25 mm
8	Nhựa đường 60/70	Chưa hóa già	0,1 - 100	30; 40; 50; 60; 70	25 mm
9	Nhựa đường 60/70	RTFO	0,1 - 100	-10; 0; 10; 20; 30	8 mm
10	Nhựa đường 60/70	RTFO	0,1 - 100	30; 40; 50; 60; 70	8 mm

3. PHÂN CẤP BITUCLAIR ES THEO ĐẶC TÍNH LÀM VIỆC PG

Theo tiêu chuẩn AASHTO T315, các thí nghiệm xác định mô đun cắt động ($|G^*|$) và góc lệch pha (δ) được thực hiện trên nhựa đường gốc và nhựa đường sau hóa già ngắn hạn theo RTFO. Việc khảo sát ở nhiều mức nhiệt độ khác nhau nhằm làm rõ ảnh hưởng của nhiệt độ và hóa già ngắn hạn đến đặc tính lưu biến của vật liệu. Sự thay đổi của $|G^*|$ và δ theo điều kiện thí nghiệm được tổng hợp và trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả khảo sát đặc tính lưu biến của nhựa đường Bituclair ES thông qua thí nghiệm DSR.

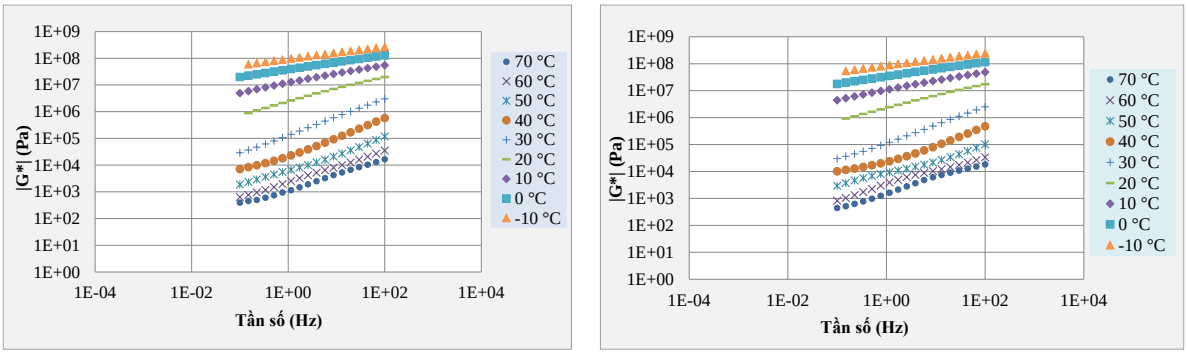
Nhiệt độ (°C)	$\|G^*\|/\sin\delta$ ở 10 Hz (kPa)		Phân cấp nhựa đường
	Nhựa đường gốc	Nhựa đường sau RTFO	
70	3,03	4,18	
76	**1,62**	**2,36**	**PG 76**
82	0,94	1,34	

Kết quả xác định $|G^*|$ và δ của Bituclair ES, được xác định ở trạng thái gốc và sau hóa già ngắn hạn, tại tần số 10 Hz và các mức nhiệt độ 70 °C, 76 °C và 82 °C, cho thấy tại nhiệt độ 76 °C, giá trị $|G^*|/\sin\delta$ đều lớn hơn ngưỡng giá trị yêu cầu so với tiêu chuẩn (lớn hơn 1,0 kPa đối với nhựa đường gốc và lớn hơn 2,2 kPa đối với nhựa đường sau hóa già ngắn hạn). Điều này cho thấy nhựa đường Bituclair ES vẫn duy trì được độ cứng nhất định và phát huy vai trò của thành phần đàn hồi khi làm việc ở nhiệt độ cao. Trên cơ sở các tiêu chí phân cấp nhựa đường theo tiêu chuẩn AASHTO M320, có thể kết luận rằng nhựa đường Bituclair ES đáp ứng yêu cầu và được phân cấp đạt cấp PG 76.

4. XÂY DỰNG VÀ PHÂN TÍCH ĐƯỜNG CONG CHỦ MÔ ĐUN CẮT ĐỘNG CỦA BITUCLAIR ES

4.1. Đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ và tần số đến đặc tính lưu biến của nhựa đường

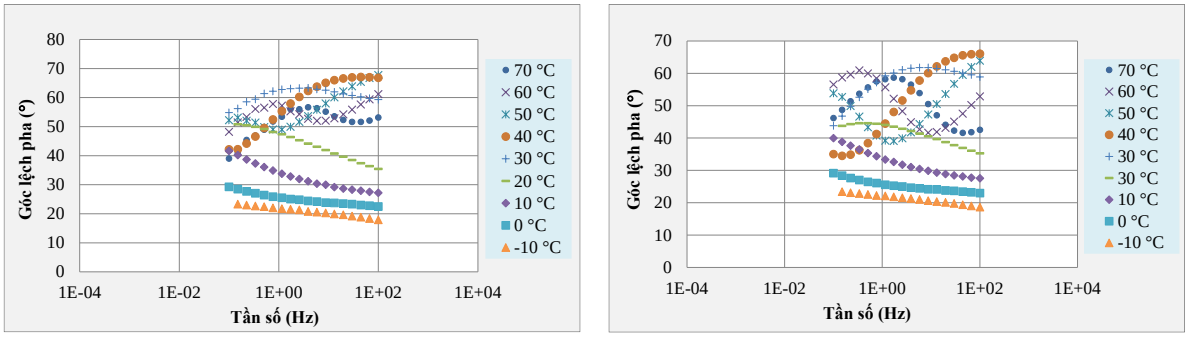
Thí nghiệm lưu biến cắt động đối với nhựa đường Bituclair ES được thực hiện trên cả mẫu chưa hóa già và mẫu sau hóa già ngắn hạn trong dải tần số từ 0,1 đến 100 Hz và dải nhiệt độ từ -10 °C đến 70 °C. Dữ liệu thu được cho phép đánh giá sự biến thiên của $|G^*|$ và δ theo tần số, nhiệt độ và trạng thái hóa già của vật liệu. Các kết quả tương ứng được trình bày trên Hình 4 và Hình 5. Đối với nhựa đường 60/70 sử dụng làm mẫu đối chứng, các đặc trưng lưu biến được thể hiện trên Hình 6 và Hình 7.



a) Chưa hóa già

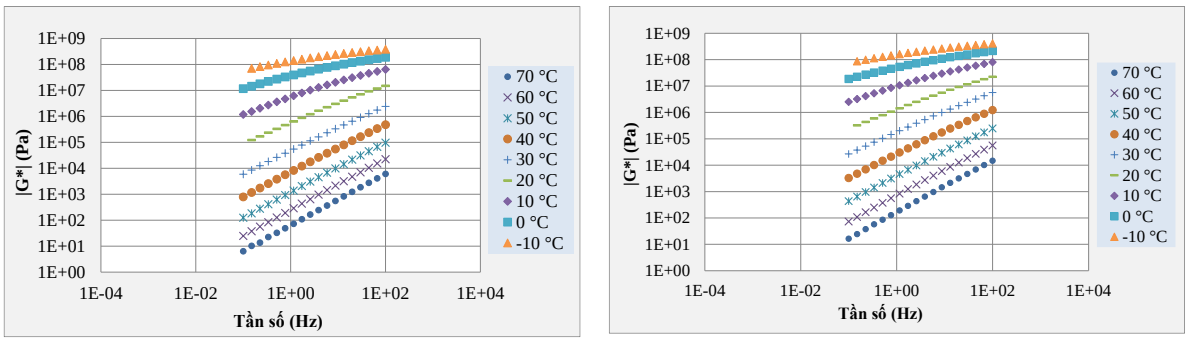
b) Hóa già ngắn hạn

Hình 4. Mô đun cắt động ($|G^*|$) của Bituclair ES.



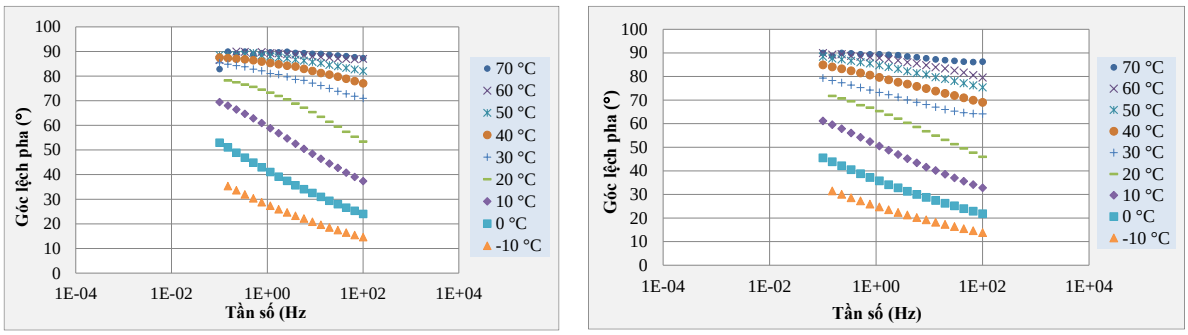
a) Chưa hóa già b) Hóa già ngắn hạn

Hình 5. Góc lệch pha (δ) của Bituclair ES.



a) Chưa hóa già b) Sau hóa già ngắn hạn

Hình 6. Mô đun cắt động (|G*|) của nhựa đường 60/70.



a) Chưa hóa già b) Sau hóa già ngắn hạn

Hình 7. Góc lệch pha (δ) của nhựa đường 60/70.

Kết quả thí nghiệm đối với nhựa đường Bituclair ES cho thấy |G*|tăng theo sự gia tăng của tần số tải trọng và giảm khi nhiệt độ thí nghiệm tăng, đối với cả trạng thái chưa hóa già và sau hóa già ngắn hạn. Quy luật biến thiên này phản ánh đặc trưng lưu biến điển hình của nhựa đường, đồng thời phù hợp với xu hướng thay đổi |G*| đối với nhựa đường 60/70.

Đối với góc lệch pha, nhựa đường 60/70 thể hiện xu hướng giảm khi tần số thí nghiệm tăng và khi nhiệt độ giảm. Tuy nhiên, nhựa đường Bituclair ES không hoàn toàn tuân theo quy luật này. Trong vùng nhiệt độ thấp từ −10 °C đến 20 °C, góc lệch pha của Bituclair ES có xu hướng biến thiên tương tự nhựa đường 60/70, trong khi ở vùng nhiệt độ trung bình đến cao (từ 30 °C

đến 70 °C), góc lệch pha không còn thay đổi theo một quy luật thống nhất mà có thể tăng hoặc giảm trong từng khoảng tần số thí nghiệm. Kết quả này cũng đã được ghi nhận trong một số nghiên cứu đối nhựa đường cải tiến dùng phụ gia polymer [15]. Do vậy, xu hướng quan sát được ở Bituclair ES là phù hợp với đặc trưng chung của nhựa đường cải tiến.

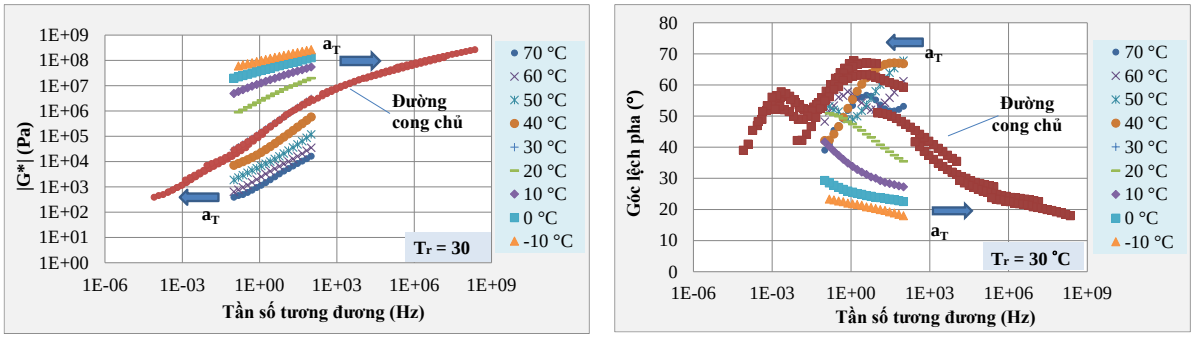
Trên toàn bộ dải tần số khảo sát, quá trình hóa già ngắn hạn RTFO làm dịch chuyển đường cong $|G^*|$ của tất cả các loại nhựa theo hướng tăng lên, cho thấy sự gia tăng độ cứng diễn ra trên toàn phổ ứng xử đàn hồi – nhớt. Hệ số hóa già trung bình của nhựa 60/70 dao động khoảng 2,8 – 3,2, cao hơn đáng kể so với Bitucliar ES (khoảng 1,2 – 1,5). Trong khi đó, góc lệch pha δ chỉ biến đổi nhẹ theo tần số sau RTFO, cho thấy quá trình hóa già chủ yếu làm tăng độ cứng cấu trúc mà không làm thay đổi căn bản cơ chế ứng xử lưu biến của vật liệu.

4.2. Thiết lập và phân tích đường cong chủ

Đường cong chủ của mô đun cắt động $|G^*|$ được thiết lập trên cơ sở áp dụng quy tắc tương đương thời gian – nhiệt độ [7, 11 – 13], từ các dữ liệu thí nghiệm thu được trong dải tần số và nhiệt độ rộng. Trong nghiên cứu này, nhiệt độ tham chiếu được lựa chọn để quy đổi và xây dựng đường cong chủ được lựa chọn là T_r = 30 °C. Trên biểu đồ, biểu diễn các giá trị $|G^*|$ tương ứng với những tần số khác nhau tại cùng một nhiệt độ thí nghiệm được nối lại để tạo thành các đường cong đẳng nhiệt. Các đường cong đẳng nhiệt này được dịch chuyển theo trục tần số, theo đó các đường cong tại các nhiệt độ cao hơn T_r được tịnh tiến về phía tần số nhỏ hơn, trong khi các đường cong tương ứng nhiệt độ thấp hơn được tịnh tiến theo chiều ngược lại. Mức độ dịch chuyển của từng đường cong được xác định bởi hệ số dịch chuyển a_T. Quá trình điều chỉnh được thực hiện lặp lại cho đến khi các đường cong đẳng nhiệt chồng khít và hợp nhất thành một đường cong liên tục, từ đó xác định được hệ số dịch chuyển (a_T) tương ứng với từng nhiệt độ thí nghiệm.

Tương tự như đối với mô đun cắt động, đường cong chủ của góc lệch pha (δ) được xây dựng trên cơ sở áp dụng cùng các hệ số dịch chuyển a_T đã xác định. Việc sử dụng chung hệ số a_T cho cả hai đại lượng nhằm duy trì tính nhất quán trong quá trình chồng ghép các đường cong đẳng nhiệt và cho phép đánh giá mức độ tuân thủ quy tắc tương đương thời gian – nhiệt độ của góc lệch pha.

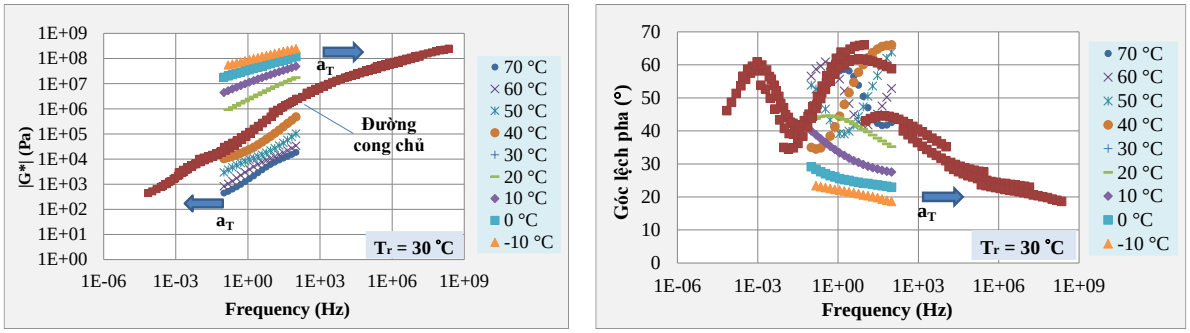
Kết quả xây dựng đường cong chủ $|G^*|$ và δ đối với Bituclair ES, được xác định cho cả trạng thái chưa hóa già và sau hóa già ngắn hạn, được thể hiện ở Hình 8 và Hình 9. Các đường cong này phản ánh sự biến thiên của các thông số lưu biến trong toàn bộ dải tần số quy đổi.



a) Mô đun cắt động

b) Góc lệch pha

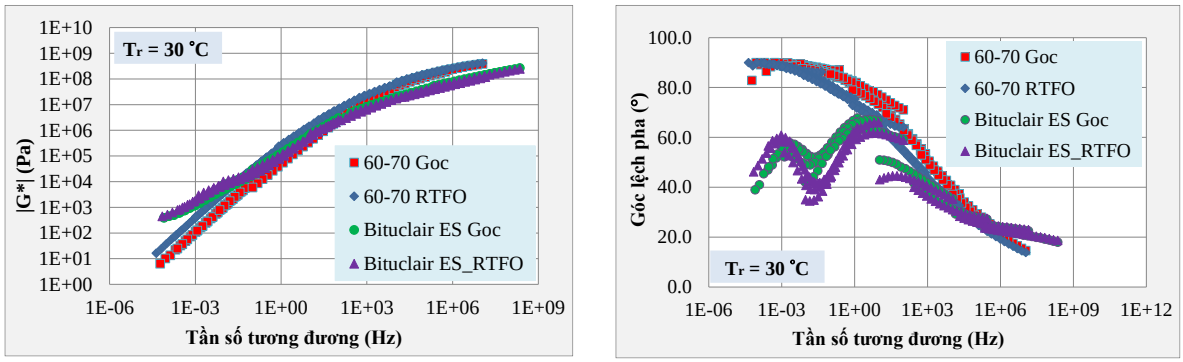
Hình 8. Xây dựng đường cong chủ đối với Bituclair ES chưa hóa già.



a) Mô đun cắt động b) Góc lệch pha

Hình 9. Xây dựng đường cong chủ đối với Bituclair ES sau hóa già ngắn hạn.

Tổng hợp đường cong chủ $|G^*|$ và δ của Bituclair ES, đồng thời so sánh với các đường cong tương ứng của nhựa đường 60/70 được trình bày trong Hình 10.



a) Mô đun cắt động b) Góc lệch pha

Hình 10. So sánh đường cong chủ của Bituclair ES và nhựa đường 60/70.

Kết quả xây dựng đường cong chủ $|G^*|$ đối với Bituclair ES ở cả trạng thái chưa hóa già và sau hóa già ngắn hạn, khi so sánh với nhựa đường 60/70, cho thấy sự khác biệt đáng kể về đặc tính lưu biến cũng như mức độ tuân thủ nguyên lý tương đương thời gian – nhiệt độ. Đối với nhựa đường 60/70, đường cong chủ $|G^*|$ và δ đều có thể được thiết lập bằng cách sử dụng cùng hệ số a_T tại mỗi nhiệt độ thí nghiệm. Kết quả này cho thấy cả $|G^*|$ và δ của nhựa đường 60/70 đều tuân thủ tốt nguyên lý tương đương thời gian – nhiệt độ, thể hiện qua khả năng chồng ghép các đường cong đẳng nhiệt để hình thành các đường cong liên tục và nhất quán (Hình 10a và Hình 10b).

Ngược lại, đối với Bituclair ES ở cả hai trạng thái chưa hóa già và sau hóa già ngắn hạn, mô đun cắt động vẫn tuân theo quy tắc tương quan thời gian – nhiệt độ (xem Hình 8a, Hình 9a và Hình 10a), trong khi góc lệch pha không còn đáp ứng đầy đủ quy tắc này (xem Hình 8b, Hình 9b và Hình 10b). Đường cong chủ của góc lệch pha ở vùng tần số tải cao/nhiệt độ thấp vẫn đảm bảo tính liên tục và giảm dần khi tần số tăng, tuy nhiên ở vùng tần số tải thấp/nhiệt độ cao, sự biến thiên của góc lệch pha không còn theo quy luật như đối với nhựa đường 60/70 (xem Hình 8b, Hình 9b và Hình 10b). Sự không tuân thủ hoàn toàn quy tắc tương quan tthời gian – nhiệt độ của đường cong chủ góc lệch pha ở Bituclair ES bắt nguồn từ bản chất nhiệt – lưu biến phức tạp của hệ đa pha. Sự thay đổi cấu trúc thành phần (đặc biệt thành phần

asphaltene) và sự hiện diện của polymer tạo ra các pha đàn hồi – nhớt có độ nhạy nhiệt khác nhau, khiến các đường đẳng nhiệt không thể chồng khít chỉ bằng một hệ số dịch chuyển duy nhất.

Bên cạnh đó, kết quả phân tích đường cong chủ cho thấy $|G^*|$ của Bituclair ES cao hơn so với nhựa đường 60/70 trong vùng tần số quy đổi thấp, tương ứng với điều kiện nhiệt độ cao. Đặc điểm này phản ánh khả năng kháng biến dạng vĩnh cửu của Bituclair ES được cải thiện, đặc biệt trong các điều kiện khai thác dễ xảy ra hiện tượng hằn lún vệt bánh xe. Ngược lại, tại vùng tần số quy đổi cao, tương ứng với điều kiện nhiệt độ thấp, mô đun cắt động của Bituclair ES thấp hơn so với nhựa đường 60/70. Kết quả này cho thấy vật liệu có xu hướng duy trì độ mềm dẻo tốt hơn ở nhiệt độ thấp, qua đó có tiềm năng cải thiện khả năng chống nứt do nhiệt.

Mối quan hệ giữa hệ số dịch chuyển a_T và nhiệt độ thí nghiệm được xác định bằng phương trình Williams–Landel–Ferry (WLF) [7, 11, 12], được thể hiện trong công thức (1). Đây là mô hình được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu lưu biến của vật liệu nhựa đường nhằm biểu diễn sự phụ thuộc của tính chất cơ học vào nhiệt độ. Các hệ số đặc trưng C_1 và C_2 của phương trình WLF được xác định thông qua quá trình hiệu chỉnh mô hình theo phương pháp bình phương nhỏ nhất, nhằm bảo đảm mức độ phù hợp tốt nhất giữa kết quả tính toán và dữ liệu thực nghiệm.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \quad (1)$$

Các hệ số C_1, C_2 của phương trình (1) được xác định và tổng hợp ở Bảng 4 cho Bituclair ES. Đồng thời, các hệ số tương ứng của nhựa đường 60/70 cũng được xác định để so sánh.

Bảng 4. Các tham số của phương trình WLF và mức độ phù hợp của mô hình.

TT	Loại nhựa đường	Trạng thái	Hệ số C_1	Hệ số C_2	R^2
1	Bituclair ES	Chưa hóa già	29,58	120,38	0,988
2	Bituclair ES	Hóa già ngắn hạn	30,01	121,56	0,989
3	Nhựa đường 60/70	Chưa hóa già	46,74	199,52	0,993
4	Nhựa đường 60/70	Hóa già ngắn hạn	44,92	193,44	0,996

Phương trình WLF thể hiện mức độ phù hợp rất cao với dữ liệu thực nghiệm, với R^2 dao động từ 0,988 đến 0,996. Điều này chứng tỏ phương trình WLF mô tả tốt sự phụ thuộc của hệ số dịch chuyển a_T theo nhiệt độ trong khoảng khảo sát.

5. KẾT LUẬN

Trên cơ sở các kết quả thí nghiệm và phân tích mô hình hóa đặc tính lưu biến của nhựa đường Bituclair ES thông qua mô đun cắt động, nghiên cứu đã rút ra một số kết luận chính như sau:

- Kết quả đánh giá theo tiêu chuẩn AASHTO M320 cho thấy nhựa đường Bituclair ES đạt cấp PG 76, chứng tỏ vật liệu đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật đối với nhựa đường chất

lượng cao và có tiềm năng ứng dụng trong sản xuất hỗn hợp bê tông nhựa cho lớp mặt đường ô tô.

- Mô đun cắt động của Bituclair ES lớn hơn so với nhựa đường 60/70 trong điều kiện nhiệt độ cao và tần số tải thấp, cho thấy xu hướng cải thiện khả năng kháng lún ở vùng nhiệt độ cao. Ngược lại, trong điều kiện nhiệt độ thấp và tần số tải cao, mô đun cắt động của Bituclair ES nhỏ hơn, thể hiện đặc tính mềm dẻo hơn so với nhựa đường 60/70.
- Nhựa đường 60/70 tuân thủ chặt chẽ nguyên lý tương đương thời gian – nhiệt độ đối với cả mô đun cắt động và góc lệch pha. Đối với Bituclair ES, mặc dù mô đun cắt động vẫn phù hợp với quy tắc này ở cả trạng thái chưa hóa già và sau hóa già ngắn hạn, nhưng góc lệch pha không còn tuân thủ quy tắc này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Nguyễn Thống Nhất, Trần Văn Thiện, Một số nguyên nhân hư hỏng mặt đường bê tông nhựa phổ biến ở Nam bộ và hướng giải quyết, Tạp chí Giao thông vận tải, 7 (2014) 2-10

[2]. J. J. Emery, P. Guo, D. F. E. Stolle, J. Hernandez, L. Zhang, Light-coloured grey asphalt pavements: from theory to practice, International Journal of Pavement Engineering, 15 (2014) 23-35. https://doi.org/10.1080/10298436.2013.782402

[3]. J. Chen, Z. Zhou, J. Wu, S. Hou, M. Liu, Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials, Construction and Building Materials, 202 (2019) 46-57. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.028

[4]. X. Gong, Q. Liu, Y. Lv, S. Chen, S. Wu, H. Ying, A systematic review on the strategies of reducing asphalt pavement temperature, Case Studies in Construction Materials, 18 (2023). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01852

[5]. I. H. Na, H. min Park, S. wan Son, H. hwan Kim, A study on material properties for application of color asphalt pavement, Journal of the Korean Asphalt Institute, 14 (2024) 156-165. https://doi.org/10.22702/jkai.2024.14.2.14

[6]. T. Strynadka, J. M. Croteau, P. Eng, A. St Albert, G. Doré, J. Jarvis, A Acheson, Performance Review of the Light-coloured Pavement of the 2009 Front Street Project in Dawson City Yukon, In: Proceedings of the 60th Annual Conference and Annual General Meeting of Canadian Technical Asphalt Association, 2015.

[7]. Q. T. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, N. Tapsoba, Time temperature superposition principle validation for bituminous mixes in the linear and nonlinear domains, Journal of Materials in Civil Engineering, 25 (2013) 1181-1188. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000658

[8]. F. Olard, H. Di Benedetto, General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes, Road materials and pavement design, 4 (2003) 185-224. https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946

[9]. D. A. Ramirez Cardona, S. Pouget, H. Di Benedetto, F. Olard, Viscoelastic behaviour characterization of a gap-graded asphalt mixture with SBS polymer modified bitumen, Materials Research, 18 (2015) 373-381. https://doi.org/10.1590/1516-1439.332214

[10]. Trần Danh Hợi, Nguyễn Quang Tuấn, Lương Xuân Chiểu, Nguyễn Quang Phúc, Mô phỏng mô đun cắt động của nhựa đường sử dụng mô hình 2S2P1D, Tạp chí Giao thông vận tải tháng, 8 (2017) 89-92.

[11]. D. H. Tran, Q. T. Nguyen, Analyzing the results of complex modulus tests on bitumens using dynamic shear rheometer, In International Conference on Sustainability in Civil Engineering, UTC, Hanoi, Vietnam, 2016.

[12]. T. C. H. Tran, D. H. Tran, A Study on Dynamic Modulus of Epoxy Asphalt Concrete: Experiment and Modeling, Journal of Materials and Engineering Structures, 11 (2024) 283-292.

[13]. Trương Văn Quyết, Nguyễn Ngọc Lân, Đào Văn, Đông, Phạm Duy Hữu, Lương Xuân Chiểu, Nghiên cứu một số đặc tính lưu biến của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ bằng thiết bị cắt động lưu biến, Tạp Chí Khoa Học Giao thông vận tải, 74 (2023) 655-670. https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.8

[14]. 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

[15]. Hernandez-Fernandez, Noe, Alexandra Ossa-Lopez, Validation of partial time-temperature superposition principle in thermorheologically complex asphalts, Construction and Building Materials 276 (2021). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122224