



## EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO THE COMPLEX SHEAR MODULUS AND CONVENTIONAL PROPERTIES OF ASPHALT BINDERS WITH VARIOUS SBS CONTENTS

Quang Tuan Nguyen<sup>1,\*</sup>

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

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 11/6/2019

Revised: 8/8/2019

Accepted: 28/8/2019

Published online: 15/11/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.2.34>

\* Corresponding author

Email: [quangtuan.nguyen@utc.edu.vn](mailto:quangtuan.nguyen@utc.edu.vn)

**Abstract.** In Vietnam, the increased traffic loading and traffic volumes require higher quality of road pavement materials. In recent years, the SBS (styrene–butadiene–styrene) modified asphalt mixtures are used largely in road pavement construction that achieved good results. This paper presents some experimental tests on the SBS polymer modified bitumens with various SBS additive contents. The conventional tests (penetration, softening point and elastic recovery tests) of asphalt binders were performed. In addition, the complex shear modulus and the performance grade (PG) tests were also carried out. The experimental results showed that the SBS additive enhances significantly the mechanical properties and the performance grade of the original bitumen. The effect of aging when mixing the binder can be considered to be negligible. The master curve of the complex shear modulus of the original and SBS polymer modified bitumens were built and helps to evaluate the linear viscoelastic behaviour of the tested materials. The effects of the SBS content and the SBS mixing time on the mechanical properties of the asphalt binder were clearly observed.

**Keywords:** SBS polymer modified bitumens, additive content, complex shear modulus, mechanical properties, linear viscoelasticity.

© 2019 University of Transport and Communications



## THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ MÔ ĐUN CẮT PHỨC VÀ CÁC CHỈ TIÊU CƠ LÝ CƠ BẢN CỦA NHỰA ĐƯỜNG VỚI HÀM LƯỢNG PHỤ GIA SBS KHÁC NHAU

Nguyễn Quang Tuấn<sup>1,\*</sup>

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

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 11/6/2019

Ngày nhận bài sửa: 8/8/2019

Ngày chấp nhận đăng: 28/8/2019

Ngày xuất bản Online: 15/11/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.2.34>

\* Tác giả liên hệ

Email: quangtuan.nguyen@utc.edu.vn

**Tóm tắt.** Ở Việt Nam, vấn đề gia tăng nhanh chóng về lưu lượng và tải trọng xe đòi hỏi sự nâng cao chất lượng của vật liệu xây dựng kết cấu áo đường. Hiện nay, bê tông nhựa sử dụng phụ gia SBS (styrene-butadiene-styrene) dạng hạt đang được sử dụng khá rộng rãi tại các công trình đường giao thông và mang lại những hiệu quả nhất định. Bài báo trình bày các nghiên cứu thực nghiệm trong phòng trên mẫu nhựa đường được trộn phụ gia SBS tại các hàm lượng khác nhau. Các thí nghiệm được thực hiện nhằm xác định các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của nhựa đường SBS bao gồm: độ kim lún, nhiệt hóa mềm và độ đàn hồi. Ngoài các thí nghiệm cơ bản, thí nghiệm mô đun cắt phức và xác định chỉ tiêu PG cũng được tiến hành. Kết quả thực nghiệm cho thấy phụ gia SBS cải thiện đáng kể đặc tính cơ học và phân cấp PG của nhựa đường gốc. Việc trộn phụ gia trong phòng không tác động nhiều đến độ hóa già của nhựa đường. Đường cong đặc trưng giá trị mô đun cắt phức của nhựa đường gốc và nhựa đường SBS được xây dựng giúp đánh giá đặc tính đàn nhót tuyến tính của vật liệu. Ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia và thời gian trộn mẫu đến từng tính chất của nhựa đường là rõ rệt.

**Từ khóa:** nhựa đường, hàm lượng phụ gia SBS, mô đun cắt phức, đặc tính cơ học, đàn nhót tuyến tính.

© 2019 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhựa đường là loại vật liệu được ứng dụng rộng rãi trong xây dựng như làm chất kết dính, keo, chất chống thấm và đặc biệt là bê tông nhựa trong kết cấu mặt đường. Tuy được sử dụng phổ biến từ rất lâu nhưng đặc tính cơ học của nhựa đường khá phức tạp. Đây là loại vật

liệu đàn nhót dẻo, trở nên cứng và giòn ở nhiệt độ thấp, mềm và chảy ở nhiệt độ môi trường cao [1]. Ở Việt Nam, hơn 90% kết cấu áo đường sử dụng chất kết dính nhựa đường. Trong những năm gần đây, việc lưu lượng và tải trọng xe ngày một tăng dẫn đến yêu cầu bắt buộc phải nâng cao chất lượng mặt đường. Hai giải pháp thường được đưa ra đối với lớp mặt đó là tăng chiều dày và cải thiện chất lượng vật liệu bê tông nhựa. Một số tác giả cho rằng giải pháp tăng chiều dày sẽ dẫn đến chi phí xây dựng tăng cao hơn so với giải pháp cải thiện chất lượng vật liệu [2].

Nhựa đường, thành phần đóng vai trò quan trọng đến chất lượng bê tông nhựa, được chế tạo chủ yếu thông qua quá trình lọc dầu. Lựa chọn nguồn dầu thô tốt và cải tiến quy trình lọc dầu là một trong những biện pháp tạo ra nguồn nhựa đường chất lượng cao. Tuy nhiên, các nguồn dầu thô tốt để chế tạo nhựa đường rất hạn chế. Thêm nữa, lợi ích kinh tế của việc cải tiến quy trình lọc hóa dầu để tạo ra nguồn nhựa đường có chất lượng là không nhiều. Do vậy, trên thế giới cũng như ở Việt Nam, việc cải thiện chất lượng nhựa sử dụng phụ gia được chú ý hơn [3]. Thuật ngữ nhựa đường polymer dùng để chỉ vật liệu nhựa đường được cải tiến bằng cách thêm các loại polymer vào trong nhựa thông qua việc trộn cơ học hoặc tương tác hóa học [4]. Rất nhiều loại polymer có thể sử dụng để cải thiện tính chất của nhựa đường như: polyethylene (PE), polypropylene (PP), ethylene-vinyl acetate (EVA), ethylene-butyl acrylate (EBA) thuộc dạng plastomer và styrene-butadiene-styrene (SBS), styrene-isoprene-styrene (SIS), styreneethylene/butylene-styrene (SEBS) thuộc dạng elastomer nhiệt dẻo [5-9]. Rất nhiều các nghiên cứu [10-12] chỉ ra rằng sử dụng phụ gia polymer cải thiện đáng kể các đặc tính cơ lý của nhựa đường và bê tông nhựa như độ cứng, khả năng chống hằn lún, chịu mài, chống nứt... Hàm lượng chất phụ gia là một trong các thông số quan trọng để vừa đảm bảo nâng cao đặc tính làm việc của vật liệu, không làm mất đi những tính chất cơ bản của nhựa đường cũng như có hiệu quả về kinh tế.

Ở Việt Nam hiện nay, SBS là phụ gia được sử dụng phổ biến cho nhiều công trình xây dựng. Bài báo này sẽ nghiên cứu tính chất cơ lý của nhựa đường trộn SBS ở các hàm lượng phụ gia khác nhau. Ngoài các thí nghiệm cơ bản (độ kim lún, nhiệt hóa mềm, độ đàn hồi), các thí nghiệm đo mô đun cắt phức của nhựa cũng được thực hiện trên máy DSR (Dynamic Shear Rheometer). Kết quả chỉ ra mối liên hệ giữa hàm lượng phụ gia và các đặc tính cơ học của nhựa đường SBS. Hơn thế nữa, sự phức thuộc của mô đun cắt phức vào tần số và nhiệt độ gia tải cũng như nguyên tắc tương quan tần số nhiệt độ [13-15] cũng sẽ được nghiên cứu trong bài báo này. Các kết quả về mô đun cắt phức và đường cong đặc trưng mô đun còn khá mới ở Việt Nam hiện nay.

## **2. VẬT LIỆU VÀ CÁC THÍ NGHIỆM**

### **2.1. Vật liệu**

Vật liệu sử dụng trong thí nghiệm bao gồm nhựa đường nguyên gốc và phụ gia SBS dạng hạt. Loại nhựa đường sử dụng là 60/70 thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật quy định tại thông tư 27/2014/TT-BGTVT ngày 28/7/2014 của Bộ Giao thông Vận tải và theo TCVN 7493: 2005 [16]. Phụ gia SBS sử dụng có dạng hạt màu trắng (xem hình 1) và thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật trong bảng 1.



**Hình 1.** Phụ gia SBS dạng hạt sử dụng trong nghiên cứu.

**Bảng 1.** Các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia SBS.

STT	Các chỉ tiêu	Quy định	Phương pháp thử
1	Hình dạng	Dạng hạt (Dạng bột)	Bằng mắt
2	Màu sắc	Màu trắng	Bằng mắt
3	Khối lượng thể tích, g/cm <sup>3</sup>	0.85 – 1	ASTM D792
4	Hàm lượng chất dễ bay hơi, %	≤ 0.5	ASTM D5668
5	Lượng tro còn lại sau khi nung, %	≤ 1	ASTM D5667
6	Độ nhớt (25% trọng lượng trong Toluene, cP)	4500 – 6000	ASTM D2196

## 2.2. Thiết bị và phương pháp trộn phụ gia SBS với nhựa 60/70

Thiết bị trộn phụ gia hãng IKA phiên bản phòng thí nghiệm (xem hình 2) được sử dụng trong nghiên cứu này có cấu tạo bao gồm 3 bộ phận chính: hệ thống dầu truyền nhiệt, hệ thống trộn phụ gia sơ bộ và hệ thống nghiền tuần hoàn. Trong đó hệ thống nghiền gồm có: máy nghiền, máy bơm tuần hoàn là bộ phận quan trọng của toàn bộ hệ thống.



**Hình 2.** Thiết bị trộn phụ gia của hãng IKA.

Quá trình trộn phụ gia theo hướng dẫn của nhà sản xuất thiết bị gồm các bước chính sau đây:

- Bước 1: Gia nhiệt nhựa đến khoảng 170°C và cho vào máy khuấy. Cho từ từ một nửa lượng SBS với các tỷ lệ định trước vào và khởi động hệ thống nghiền tuần hoàn để trộn trong 10-15 phút.

- Bước 2: Xả hoàn toàn hỗn hợp và cho hỗn hợp vừa xả vào lại hệ thống trộn và nghiền nhằm mục đích trộn đều hoàn toàn các hạt SBS bị nổi trên bề mặt. Cho từ từ tiếp một nửa lượng SBS còn lại vào trộn và nghiền trong vòng 10-15 phút.

- Bước 3: Lặp lại quá trình xả - cho lại - trộn nghiền để đạt được hỗn hợp đạt yêu cầu. Quá trình lặp này có thể thực hiện thêm nhiều lần nếu thấy cần thiết.

### 2.3. Số lượng mẫu và các thí nghiệm tiến hành

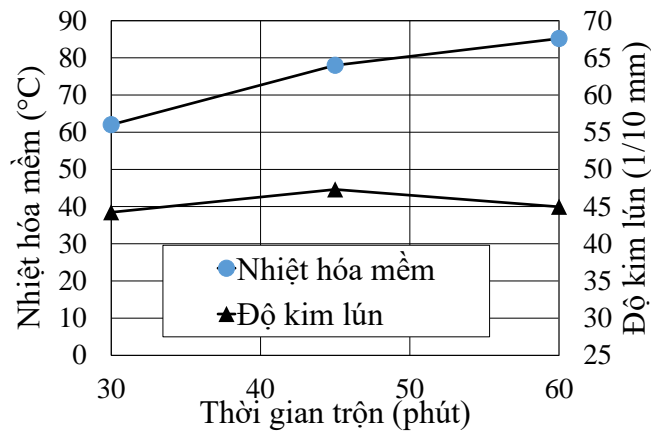
Các thí nghiệm được tiến hành trên mẫu nhựa đường nguyên chất và mẫu nhựa đường trộn SBS ở các tỉ lệ trộn và thời gian trộn khác nhau. Các thí nghiệm thực hiện bao gồm: độ kim lún, nhiệt hóa mềm, độ đàn hồi, mô đun cắt phức  $G^*$  và thí nghiệm xác định  $G^*/\sin\delta$  tại các nhiệt độ theo cấp đặc tính PG (gọi tắt là thí nghiệm xác định  $G^*/\sin\delta$ ). Bảng 2 tổng hợp số lượng mẫu và các thí nghiệm được thực hiện trong nghiên cứu. Trong đó, hàm lượng SBS trộn (theo khối lượng nhựa) gồm có 0% (đối chứng), 2.5%, 3.5%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6.5%, 7.5%. Với hàm lượng 5% SBS, hỗn hợp nhựa và phụ gia được chế tạo theo 3 thời gian trộn là 30 phút, 45 phút và 60 phút để nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian trộn đến chất lượng nhựa. Ở các hàm lượng SBS còn lại thì chỉ trộn hỗn hợp với thời gian là 60 phút. Ngoài ra, nhựa đường 60/70 gốc cũng sẽ được trộn 60 phút theo quy trình trộn nhưng không thêm phụ gia (0%) để đánh giá ảnh hưởng quá trình trộn đến sự hóa già của nhựa. Các thí nghiệm mô đun cắt phức và xác định PG được thực hiện trên máy DSR. Thí nghiệm xác định PG theo tiêu chuẩn AASHTO T315 [17] và phân cấp nhựa theo AASHTO M320 [18]. Thí nghiệm mô đun cắt phức được thực hiện ở 8 nhiệt độ: 5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 65°C, 75°C và 6 tần số: 0.05Hz, 0.1Hz, 0.5Hz, 1.5915Hz, 5Hz, 10Hz. Với nhiệt độ thí nghiệm từ 35°C trở lên dùng đĩa đường kính 25 mm, mẫu dày 1mm. Các nhiệt độ còn lại sử dụng đĩa đường kính 8 mm, mẫu dày 2mm. Thí nghiệm mô đun cắt phức được thực hiện rất phổ biến trên thế giới để xác định đặc trưng đàn nhót  $G^*$  của nhựa. Nguyên tắc và kết quả thí nghiệm này có thể tham khảo tại một vài nghiên cứu đã thực hiện tại Việt Nam [19-20].

**Bảng 2.** Bảng tổng hợp số lượng mẫu thí nghiệm.

Hàm lượng SBS (%)	Thời gian trộn (phút)	Các thí nghiệm				
		Kim lún	Hóa mềm	Độ đàn hồi	Mô đun cắt phức $G^*$	Thí nghiệm xác định $G^*/\sin\delta$
0	-	01	01	-	-	01
0	60	01	01	-	01	-
2.5	60	01	01	01	-	-
3.5	60	01	01	01	01	-
4.5	60	01	01	01	-	-
5.0	30	01	01	-	-	-
5.0	45	01	01	-	-	-
5.0	60	01	01	01	01	01
5.5	60	01	01	01	-	-
6.5	60	01	01	01	-	-
7.5	60	01	01	01	-	-

### 3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH

#### 3.1. Ảnh hưởng của thời gian trộn đến tính chất cơ lý của nhựa đường SBS

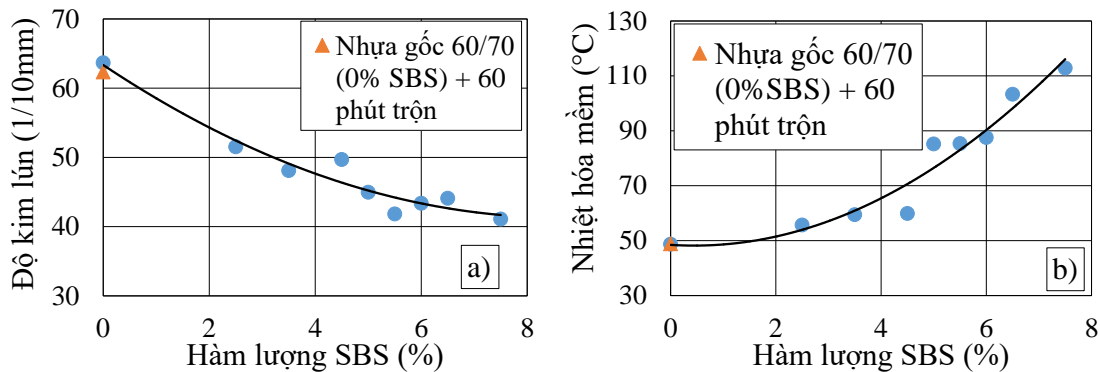


**Hình 3.** Ảnh hưởng của thời gian trộn đến nhiệt hóa mềm và độ kim lún của nhựa 5% SBS.

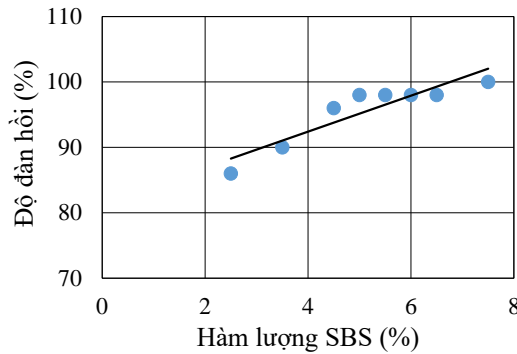
Để nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian trộn đến chất lượng nhựa đường SBS, nhựa đường 60/70 được trộn với SBS ở tỷ lệ 5.0% so với khối lượng nhựa tại các thời gian trộn lần lượt là 30 phút, 45 phút và 60 phút. Sản phẩm thu được tại các lần trộn sẽ được chế bị mẫu để tiến hành kiểm tra 2 chỉ tiêu là độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm. Hình 3 thể hiện ảnh hưởng của thời gian trộn đến các chỉ tiêu nhiệt hóa mềm và độ kim lún. Kết quả thí nghiệm cho thấy thời gian trộn càng tăng thì nhiệt hóa mềm càng tăng. Điều này có thể giải thích bởi thời gian trộn tăng làm cho mạng lưới polymer của SBS phân tán tốt hơn vào nhựa đường. Kết quả thực nghiệm cũng chỉ ra thời gian trộn không thể hiện sự ảnh hưởng rõ rệt đến độ kim lún của hỗn hợp nhựa trộn SBS.

#### 3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng SBS đến các chỉ tiêu cơ bản của nhựa đường

Để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng SBS đến chất lượng nhựa, nhựa 60/70 được trộn với SBS và tiến hành thí nghiệm 3 chỉ tiêu cơ bản được xem là quan trọng với nhựa đường polymer là độ kim lún, nhiệt độ hóa mềm và độ đàn hồi. Các hình 4 và 5 thể hiện ảnh hưởng của hàm lượng SBS đến các chỉ tiêu nhiệt độ hóa mềm, độ kim lún và độ đàn hồi.



**Hình 4.** Ảnh hưởng của hàm lượng SBS đến độ kim lún (a) và nhiệt hóa mềm (b).

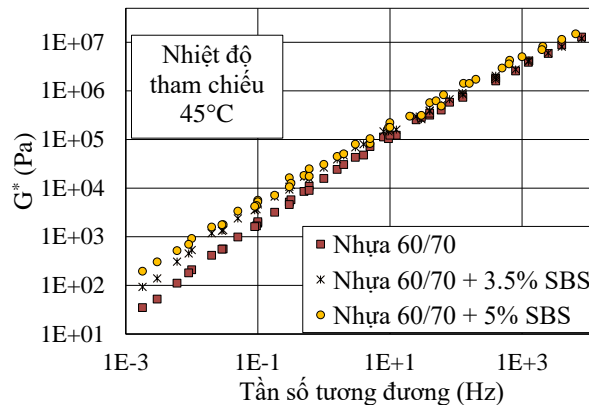


**Hình 5.** Ảnh hưởng của hàm lượng SBS đến độ đàn hồi.

Kết quả trên các Hình 4 và 5 cho thấy hàm lượng SBS sử dụng càng tăng thì chỉ tiêu nhiệt hóa mềm càng tăng, độ kim lún giảm và càng tăng khả năng đàn hồi của nhựa. Từ kết quả thí nghiệm nhựa 60/70 nguyên chất (hàm lượng SBS 0%) không khuấy và khuấy 60 phút qua máy trộn IKA cho thấy kết quả 2 chỉ tiêu độ kim lún và nhiệt hóa mềm không thay đổi nhiều (xem hình 4). Điều này chứng tỏ hai chỉ tiêu kim lún và hóa mềm của nhựa đường 60/70 không bị ảnh hưởng nhiều bởi quá trình hóa già khi khuấy. Kết quả thí nghiệm cũng cho thấy độ đàn hồi của hỗn hợp nhựa SBS tăng nhanh khi sử dụng từ 2.5 đến 5% hàm lượng SBS. Độ kim lún của nhựa trộn SBS giảm nhanh khi trộn thêm từ 0 đến 5% SBS. Khi tăng hàm lượng SBS trộn quá 5%, hai chỉ tiêu đàn hồi và kim lún có xu hướng tăng (hoặc giảm) chậm lại. Trong khi đó với nhiệt hóa mềm, hàm lượng SBS từ 5% trở lên mới cho thấy rõ sự khác biệt so với nhựa nguyên gốc 60/70. Do vậy, hàm lượng 5% SBS là tỉ lệ trộn khá hợp lý khi phân tích các chỉ tiêu về kim lún, hóa mềm và độ đàn hồi. Kết quả các chỉ tiêu của nhựa trộn với SBS ở hàm lượng 5% cũng đều thỏa mãn các yêu cầu của nhựa PMB III theo 22TCN 319:04 [21].

### 3.3. Kết quả thí nghiệm mô đun cắt phức $G^*$ và xác định PG

Thí nghiệm mô đun cắt phức  $G^*$  của nhựa 60/70, nhựa 60/70 + 3.5% SBS và nhựa 60/70 + 5% SBS được thực hiện tại 8 nhiệt độ và 6 tần số khác nhau. Như vậy mỗi loại nhựa thử nghiệm nhận được 48 giá trị mô đun cắt phức  $G^*$ . Từ các giá trị này, các đường đặc trưng  $G^*$  của từng loại vật liệu được xây dựng và thể hiện trên hình 6. So sánh các đường đặc trưng có thể nhận thấy tăng hàm lượng SBS sẽ làm tăng giá trị mô đun cắt phức của nhựa. Ở nhiệt độ cao (tần số thấp), ảnh hưởng của phụ gia SBS thể hiện rõ rệt hơn. Cũng cần lưu ý rằng, 3 đường đặc trưng  $G^*$  trên hình 6 được xây dựng với cùng hệ số dịch chuyển  $a_T$ . Điều này cho thấy, tính chất tương quan tần số nhiệt độ thông qua hệ số dịch chuyển  $a_T$  vẫn được giữ nguyên từ nhựa đường gốc đến nhựa đường polymer trộn SBS.



**Hình 6.** Đường đặc trưng  $G^*$  của các loại nhựa thí nghiệm.



Kết quả xác định  $G^*/\sin\delta$  của nhựa 5% SBS và nhựa 60/70 được thể hiện trong bảng 3. Có thể nhận thấy với chỉ tiêu  $G^*/\sin(\delta)$  đối với nhựa nguyên gốc (ngưỡng min 100 Pa theo AASHTO M320), nhựa đường 60/70 đạt PG 64, nhựa 60/70 trộn 5% vượt qua ngưỡng PG 82.

**Bảng 3.** Kết quả thí nghiệm xác định  $G^*/\sin\delta$  của nhựa 5% SBS và nhựa 60/70.

Nhiệt độ (°C)	Nhựa 60/70 trộn 5% SBS		Nhựa 60/70	
	$G^*$ (Pa)	$G^*/\sin(\delta)$ (Pa)	$G^*$ (Pa)	$G^*/\sin(\delta)$ (Pa)
46	24529.3	44090.6	16510.0	17077.2
52	18709.5	36375.9	7635.1	7873.2
58	13929.5	27652.0	3575.4	3664.3
64	10596.3	20452.4	1753.1	1781.3
70	8143.3	14982.1	929.7	937.8
76	6150.5	10457.7	502.6	504.2
82	4517.9	6961.4	282.5	282.6

#### 4. KẾT LUẬN

Thông qua các thí nghiệm đã thực hiện và phân tích kết quả, bài báo đã chỉ ra một số các kết luận chính như sau:

- Tăng thời gian trộn làm tăng nhiệt hóa mềm của hỗn hợp nhựa đường SBS. Khi tăng thời gian trộn từ 30 phút lên 60 phút, nhiệt hóa mềm tăng lên gần 25°C.

- Khi tăng hàm lượng SBS, độ kim lún của nhựa đường giảm, nhiệt hóa mềm và độ đàn hồi của nhựa đường tăng lên.

- Ảnh hưởng của quá trình khuấy trộn (sự hóa già khi trộn) đến độ kim lún và nhiệt hóa mềm của nhựa đường nguyên gốc là không đáng kể.

- Xây dựng được đường cong đặc trưng  $G^*$  của nhựa. Phụ gia SBS có ảnh hưởng rõ rệt và làm tăng  $G^*$  của nhựa đường đặc biệt tại nhiệt độ cao. Tuy nhiên, tính chất nhạy cảm nhiệt thông qua hệ số dịch chuyển  $a_T$  của nhựa SBS vẫn giữ nguyên so với nhựa gốc 60/70.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2019-CT-035

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. N. Hunter, A. Self, J. Read, The Shell Bitumen Handbook, sixth ed., ICE Publishing, London, 2015.

[2] M.Arabani, S.M.Mirabdolazimi, A.R.Sasani, The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 24 (2010) 1060-1068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.011>

[3] Y. Becker, M.P. Méndez, Y. Rodríguez, Polymer modified asphalt, Vision Tecnológica, 9 (2001)



39-50.

- [4] X. Lu, On polymer modified road bitumens [doctoral dissertation], Stockholm KTH Royal Institute of Technology, 1997.
- [5] G. Polacco, S. Berlincioni, D. Biondi, J. Stastna, L. Zanzotto, Asphalt modification with different polyethylene-based polymers, *European Polymer Journal*, 41 (2005) 2831-2844. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034>
- [6] C. Giavarini, P. De Filippis, M.L. Santarelli, M. Scarsella, Production of stable polypropylene-modified bitumens, *Fuel*, 75 (1996) 681-686. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00312-6](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00312-6)
- [7] M. Panda, M. Mazumdar, Engineering properties of EVA-modified bitumen binder for paving mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11 (1999) 131-137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:2(131))
- [8] B. Sengoz, A. Topal, G. Isikyakar, Morphology and image analysis of polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1986-1992. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.020>
- [9] Y. Becker, A.J. Müller, Y. Rodriguez, Use of rheological compatibility criteria to study SBS modified asphalts, *Journal of Applied Polymer Science*, 90 (2003) 1772-1782.
- [10] S. Tayfur, H. Ozen, A. Aksoy, Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 328-337.
- [11] U. Isacson, H. Zeng, Low-temperature cracking of polymer-modified asphalt, *Materials and Structures*, 31 (1998) 58-63.
- [12] T. Alataş, M. Yilmaz, Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures, *Construction and Building Materials*, 42 (2013) 161-167.
- [13] Q.T. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, Linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures, *Materials and Structures*, 48 (2015) 2339-2351.
- [14] 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.
- [15] Q.T. Nguyen et al., 3D complex modulus tests on bituminous mixture with sinusoidal loadings in tension and/or compression, *Materials and Structures*, 50 (2017) 8. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0970-x>
- [16] TCVN 7493: 2005, Bitum - Yêu cầu kỹ thuật, Tiêu chuẩn Việt Nam.
- [17] AASHTO T315, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).
- [18] AASHTO M320, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.
- [19] Nguyễn Mai Lâm, Nguyễn Quang Tuấn, Hoàng Thị Thanh Nhân, Nghiên cứu mô-đun phức động của nhựa đường 60/70 sử dụng tại Việt Nam bằng thí nghiệm trên máy DMA, *Tạp chí Giao thông vận tải*, 11 (2015) 38-41.
- [20] Trần Danh Hợi, Nguyễn Quang Tuấn, Analyzing the results of complex modulus tests on bitumens using dynamic shear rheometer, *Tạp chí Giao thông vận tải*, 11 (2016) 39-41.
- [21] 22TCN 319:04, Tiêu chuẩn nhựa đường polime, Tiêu chuẩn ngành.