

Mối quan hệ đàn nhớt tuyến tính giữa nhựa đường và mastic: Phân tích đường cong đặc trưng và hệ số dịch chuyển WLF

Bùi Văn Phú^{1*}, Nguyễn Thị Quỳnh Như¹

¹ Trường Đại học Giao Thông Vận Tải

TỪ KHOÁ

Nhựa đường
Mastic
Đàn nhớt tuyến tính
Mô đun phức động
Đường cong đặc trưng
Quy tắc WLF

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ứng xử đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường 35/50 và ba loại mastic tương ứng với ba hàm lượng bột khoáng theo thể tích khác nhau là 15%, 25% và 35%. Thí nghiệm mô đun động (complex modulus) được thực hiện trên dải nhiệt độ rộng từ -10°C đến 60°C và dải tần số từ 1 Hz đến 80 Hz. Kết quả cho thấy tất cả các vật liệu đều tuân theo nguyên tắc tương quan tần số – nhiệt độ (Time–Temperature Superposition Principle), cho phép xây dựng đường cong đặc trưng (Master Curve) của mô đun động và góc lệch pha. Đáng chú ý, các hệ số dịch chuyển a_{Ta} , TaT thu được từ mô hình Williams–Landel–Ferry (WLF) gần như đồng nhất đối với cả bốn loại vật liệu, bất kể sự khác biệt về hàm lượng bột khoáng. Điều này cho thấy việc gia tăng hàm lượng bột khoáng chủ yếu làm tăng độ cứng của vật liệu, trong khi hầu như không làm thay đổi bản chất đàn nhớt nội tại của hệ mastic. Bằng chứng thực nghiệm này khẳng định rằng mastic kế thừa tính chất đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường gốc, ngay cả khi hàm lượng bột khoáng tăng đến 35%.

KEYWORDS

Asphalt binder
Mastic
Linear viscoelasticity
Complex modulus
Master curve
WLF equation

ABSTRACT

This study evaluates the linear viscoelastic behavior of 35/50 asphalt binder and its three corresponding mastics containing different filler volume fractions of 15%, 25%, and 35%. Complex modulus tests were conducted over a wide temperature range from -10°C to 60°C and a frequency range from 1 Hz to 80 Hz. The results indicate that all materials comply with the Time–Temperature Superposition Principle, enabling the construction of master curves for both complex modulus and phase angle. Notably, the shift factors a_{Ta} , TaT obtained from the Williams–Landel–Ferry (WLF) model are nearly identical for all four materials, regardless of the differences in filler content. This finding suggests that increasing filler content primarily enhances material stiffness while having negligible influence on the intrinsic viscoelastic nature of the mastic system. The experimental evidence confirms that asphalt mastic inherits the linear viscoelastic characteristics of the base binder, even when the filler content increases up to 35%.

1. Đặt vấn đề

Tính chất đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường và mastic giữ vai trò quan trọng trong việc mô tả ứng xử cơ học của bê tông nhựa, từ quan hệ ứng suất – biến dạng phụ thuộc nhiệt độ và tần số đến sự suy giảm độ bền dưới tác dụng tải trọng lặp. Nhựa đường đóng vai trò là pha liên tục, là thành phần biến dạng chủ yếu trong hỗn hợp bê tông nhựa. Nó là thành phần quyết định phần lớn tới mức độ nhạy cảm với nhiệt độ và đặc tính đàn nhớt của bê tông nhựa. Tuy nhiên, trong hỗn hợp thực tế, nhựa đường không tồn tại độc lập mà trước hết nó kết hợp với bột khoáng để tạo thành mastic – một pha trung gian có ảnh hưởng trực tiếp đến ứng xử cơ học của vật liệu bê tông nhựa.

Nhiều nghiên cứu đã khẳng định rằng chính mastic, chứ không phải nhựa đường nguyên gốc, mới là pha chi phối các ứng xử cơ học của bê tông nhựa như lún ở nhiệt độ cao, nứt mỏi và giòn hóa ở nhiệt độ thấp [1, 2]. Tuy vậy, tính chất đàn nhớt tuyến tính của mastic vẫn

khó được xác định và mô tả chính xác như nhựa đường do sự tương tác phức tạp giữa nhựa đường nguyên gốc và bột khoáng.

Việc xác định đặc tính đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường và các loại mastic tương ứng là hết sức cần thiết cho các mô hình dự đoán và mô phỏng tính chất cơ học ở miền đàn nhớt tuyến tính của hỗn hợp bê tông nhựa. Câu hỏi quan trọng đặt ra là: Liệu mastic có duy trì cơ chế đàn nhớt nội tại giống nhựa đường nguyên gốc, hay nó tạo thành một hệ vật liệu mới với hành vi phụ thuộc nhiệt độ – tần số khác?

2. Vật liệu và thí nghiệm

2.1. Vật liệu

Nhựa đường nguyên gốc 35/50 được lựa chọn để nghiên cứu. Đây là một trong những loại nhựa đường được sử dụng rộng rãi ở Việt Nam. Nhựa đường này sẽ được sử dụng để chế tạo 3 loại mastic với tên gọi là mastic15, mastic25 và mastic35 tương ứng với 3 hàm lượng

*Liên hệ tác giả: buiphugt@utc.edu.vn

bột khoáng theo thể tích là 15 %, 25 % và 35 %. Khoảng hàm lượng này có thể bao phủ được khoảng hàm lượng bột khoáng cho phép trong hỗn hợp BTN được quy định trong tiêu chuẩn TCVN 12818:2019 – tiêu chuẩn thiết kế hỗn hợp BTN nóng theo Superpave [3]. Theo tiêu chuẩn này, tỉ lệ khối lượng bột khoáng trên hàm lượng nhựa có hiệu được khuyến cáo từ 0,6 đến 1,2 tương ứng với khoảng tỉ lệ 18 % đến 32 % theo thể tích. Quá trình chế tạo mastic được thực hiện bằng cách gia nhiệt nhựa đường đến trạng thái linh động và phối trộn với bột khoáng bằng máy khuấy tốc độ cao để đảm bảo sự phân tán đồng đều của các hạt khoáng trong môi trường nhựa. Bảng 1 giới thiệu loại nhựa đường và 3 loại mastic tương ứng.

Bảng 1. Vật liệu nghiên cứu.

Vật liệu	Mô tả	Hàm lượng bột khoáng theo thể tích
Nhựa đường 35/50	Nhựa đường nguyên gốc, độ kim lún 35/50	0 %
Mastic15	Hỗn hợp nhựa + 15 % bột khoáng	15 %
Mastic25	Hỗn hợp nhựa + 25 % bột khoáng	25 %
Mastic35	Hỗn hợp nhựa + 35 % bột khoáng	35 %

2.2. Thiết bị và thí nghiệm mô đun động

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm mô đun động được thực hiện bằng thiết bị MetraviB's DMA, một hệ thống có khả năng xác định chính xác quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu trong một dải rộng các nhiệt độ và tần số. Thiết bị được trang bị đầu đo lực tối đa 450 N và đầu đo biến dạng lên đến 500 μm , cho phép đánh giá hành vi đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường và mastic với độ chính xác cao. Tùy theo nhiệt độ thí nghiệm, hai cấu hình gá mẫu được sử dụng: cấu hình gá thực hiện thí nghiệm kéo-nén (K-N) cho các nhiệt độ thấp, khi vật liệu ở trạng thái tương đối cứng. Khi nhiệt độ trung bình và cao, vật liệu ở trạng thái không ổn định hình học, cấu hình gá thực hiện thí nghiệm cắt góc (CG) được sử dụng.

Thí nghiệm mô đun động được thực hiện bằng cách tác dụng một chuyển vị dạng hình sin:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (1)$$

Thí nghiệm được thực hiện trong miền biến dạng nhỏ để ứng xử của vật liệu là đàn nhớt tuyến tính. Ứng suất thu được cũng có dạng hình sin nhưng trễ pha một góc δ :

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

Trong đó: ω là tần số góc; ε_0 và σ_0 là biên độ biến dạng và ứng suất; φ là góc lệch pha (đặc trưng cho mức độ nhớt-đàn hồi của vật liệu); t là thời gian.

Công thức (1) và (2) có thể được viết dưới dạng số phức như sau:

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$\sigma^*(t) = \sigma_0 e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (4)$$

Mô đun phức động của vật liệu được tính theo công thức sau:

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0 e^{j(\omega t + \varphi)}}{\varepsilon_0 e^{j\omega t}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{j\varphi} \quad (5)$$

Suy ra:

$$E^* = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right) \cos \varphi_E + j \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right) \sin \varphi_E = E' + jE'' \quad (6)$$

Trong đó E' là phần thực của mô đun phức động và E'' là phần ảo của mô đun phức động.

Mô đun động $|E^*|$ được xác định như sau:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

Mỗi một mẫu được thực hiện trên một khoảng rộng các nhiệt độ từ -10°C đến 60°C nhằm bao phủ trạng thái cơ học của vật liệu từ trạng thái giòn, đàn hồi đến nhớt. Tại mỗi mức nhiệt độ, có 7 tần số tác dụng lực được sử dụng để đảm bảo thu được dữ liệu đủ dày. Kế hoạch thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Kế hoạch thí nghiệm.

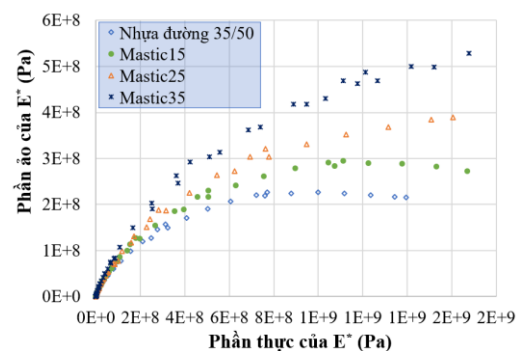
Loại mẫu	Số lượng mẫu	Nhiệt độ thí nghiệm ($^\circ\text{C}$)	Tần số thí nghiệm (Hz)
Nhựa đường 35/50	1	-10; 0; 10; 20; 25; 30; 40; 50; 60	1; 2; 5; 11; 25; 56; 80
Mastic15	1		
Mastic25	1		
Mastic35	1		

3. Kết quả thí nghiệm và nhận xét

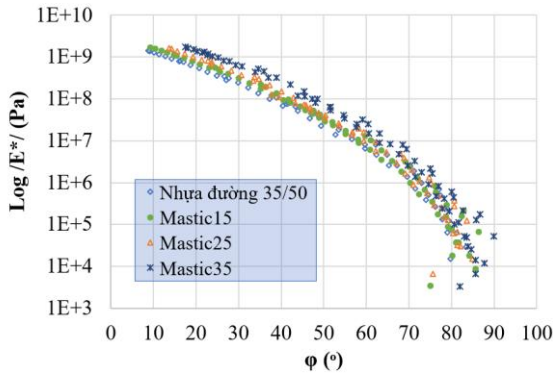
3.1. Biểu đồ Cole-Cole và biểu đồ Black

Nhằm xác thực nguyên tắc tương quan nhiệt độ tần số cho vật liệu, kết quả thí nghiệm được thể hiện dưới dạng biểu đồ Cole-Cole và biểu đồ Black. Trong đó, biểu đồ Cole-Cole thể hiện phần ảo E'' của mô đun phức động là hàm số theo phần thực E' . Biểu đồ Black hiển thị độ lớn mô đun động $|E^*|$ theo góc lệch pha δ [4].

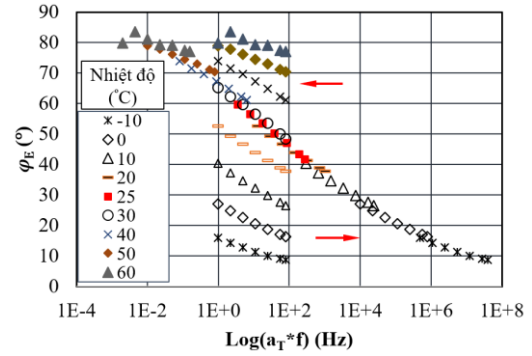
Từ Hình 1 và Hình 2 ta thấy rằng, đường cong Cole-Cole và đường cong Black là những đường liên tục và đơn trị không phụ thuộc vào tần số và nhiệt độ, điều đó chứng tỏ nguyên tắc tương quan tần số - nhiệt độ được xác thực cho các loại vật liệu nghiên cứu [5, 6]. Ngoài ra, biểu đồ Cole-Cole trên Hình 1 cũng cho thấy giá trị mô đun động của vật liệu tăng khi hàm lượng bột khoáng tăng lên.



Hình 1. Biểu đồ Cole-Cole.



Hình 2. Biểu đồ Black.



Hình 4. Quá trình dịch chuyển xây dựng đường cong đặc trưng góc lệch pha.

3.2. Đường cong đặc trưng

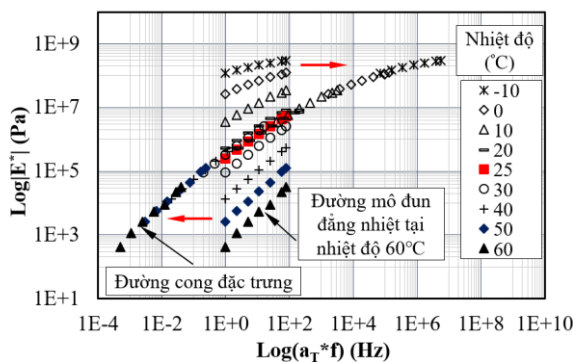
Kết quả thí nghiệm cho kết quả là giá trị mô đun động và góc lệch pha là hàm của nhiệt độ và tần số tác dụng lực. Khi nguyên tắc tương quan nhiệt độ - tần số được xác định là thỏa mãn cho vật liệu, có thể biểu diễn mô đun động và góc lệch pha là hàm của một biến duy nhất là “tần số nhiệt độ”: $E^*(\omega(T))$. Từ đó có thể xây dựng đường cong ($\log|E^*|$, $\log(f_{ref})$) duy nhất tại một nhiệt độ tham chiếu T_{ref} được lựa chọn bất kỳ. Đường cong này gọi là đường cong đặc trưng (master curve).

Hình 3 thể hiện cách xây dựng đường cong đặc trưng mô đun động. Đường cong đặc trưng được xây dựng bằng cách dịch chuyển đường mô đun đẳng nhiệt (đường cong các giá trị mô đun động thu được tại một nhiệt độ thí nghiệm) theo một hệ số dịch chuyển a_T về đường đẳng nhiệt ở nhiệt độ tham chiếu T_{ref} . Khi đó:

$$E^*(\omega, T) = E^*(a_T \omega, T_{ref}) \quad (8)$$

Hệ số dịch chuyển a_T định nghĩa như sau [1]:

$$a_T = \frac{f(T_{ref})}{f(T)} \text{ với } a_{T_{ref}} = 1 \quad (9)$$



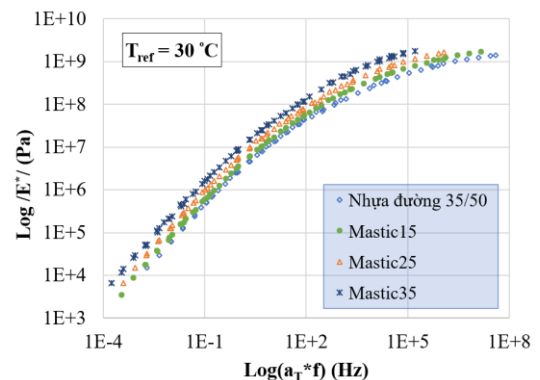
Hình 3. Quá trình dịch chuyển xây dựng đường cong đặc trưng mô đun động.

Hệ số dịch chuyển này cũng được sử dụng để xây dựng đường cong đặc trưng góc lệch pha như được thể hiện trên Hình 4.

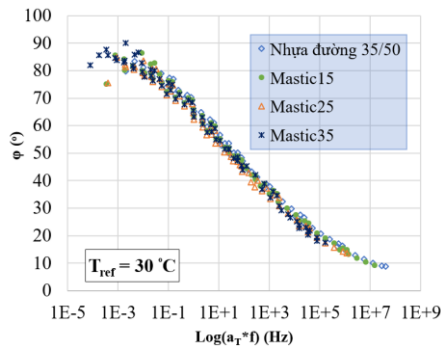
Đường cong đặc trưng cho phép mô tả toàn bộ ứng xử đàn nhớt tuyến tính của vật liệu trên một dải tần số mở rộng vượt xa giới hạn thí nghiệm thực tế. Từ Hình 3 và Hình 4 có thể thấy rằng, thay vì phải xét tại từng nhiệt độ thí nghiệm riêng rẽ, đường cong đặc trưng cho phép xác định các giá trị mô đun và góc pha tại các cặp tần số - nhiệt độ bất kỳ, kể cả những điểm không được thực hiện thí nghiệm. Điều đó không chỉ có thể giảm thiểu đáng kể khối lượng thí nghiệm mà còn mô tả được đầy đủ sự phụ thuộc vào tần số và nhiệt độ của mô đun động và góc lệch pha. Ngoài ra, việc biểu diễn mô đun và góc lệch pha là hàm của một biến số duy nhất (tần số tương đương) cũng tạo điều kiện thuận lợi cho các mô hình mô phỏng tính chất lưu biến của vật liệu và các phân tích dự báo hiệu suất của vật liệu.

Từ kết quả thí nghiệm, đường cong đặc trưng của các loại vật liệu được xây dựng tại nhiệt độ tham chiếu $T_{ref} = 30^\circ\text{C}$ như trên Hình 5 và Hình 6.

Từ đường cong đặc trưng của mô đun E^* trên Hình 5 cho thấy giá trị mô đun của mastic lớn hơn của nhựa đường và có xu hướng tăng khi hàm lượng bột khoáng tăng. Tuy nhiên, hình dạng đường cong gần như không thay đổi giữa các vật liệu. Điều này chứng tỏ rằng, bột khoáng làm tăng độ cứng của mastic nhưng không làm thay đổi tính chất đàn nhớt của hỗn hợp so với nhựa đường gốc.



Hình 5. Đường cong đặc trưng mô đun động của các vật liệu nghiên cứu.



Hình 6. Đường cong đặc trưng góc lệch pha của các vật liệu nghiên cứu.

Kết quả trên Hình 6 lại tiếp tục củng cố nhận định trên khi đường cong đặc trưng góc lệch pha của nhựa đường và mastic gần như chồng lên nhau trên toàn bộ dải tần số quy đổi. Vì δ phản ánh tỷ lệ giữa thành phần đàn hồi E' và thành phần nhớt E'' của mô đun phức động, sự đồng nhất này có ý nghĩa rằng bột khoáng không làm thay đổi đáng kể tỷ lệ giữa phần thực và phần ảo (E'/E''). Mastic không hình thành mối quan hệ ứng xử tần số-nhiệt độ mới mà chỉ làm tăng cường độ cứng. Đặc điểm này phản ánh rằng mặc dù độ cứng tổng thể tăng, cơ chế lưu biến của hỗn hợp vẫn do nhựa đường nguyên gốc chi phối.

3.3. Hệ số dịch chuyển

Hệ số dịch chuyển a_T là tham số chỉ phụ thuộc vào yếu tố nhiệt độ. Mối quan hệ giữa hệ số dịch chuyển a_T và nhiệt độ T thường được xác định theo quy tắc Williams, Landel và Ferry (WLF) [7].

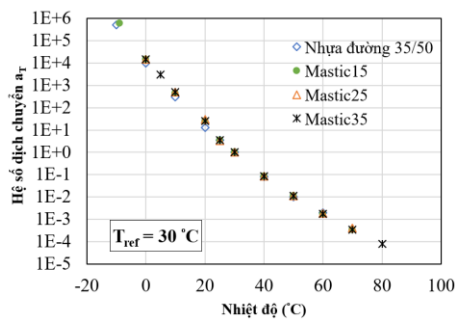
$$\log(a_T, T_{ref}) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (3)$$

Trong đó:

C_1 và C_2 là các hệ số của phương trình WLF;

T_{ref} là nhiệt độ tham chiếu.

Dạng phương trình (3) không phụ thuộc vào việc chọn nhiệt độ tham chiếu T_{ref} .



Hình 7. Hệ số dịch chuyển a_T của các vật liệu nghiên cứu.

Hình 7 biểu diễn hệ số a_T của các vật liệu nghiên cứu là hàm của nhiệt độ. Kết quả cho thấy rằng, hệ số a_T của các vật liệu từ nhựa đường đến các mastic gần như đồng nhất với nhau trên toàn bộ dải nhiệt độ được khảo sát và với bất kể tỉ lệ bột khoáng. Phân tích theo mô hình

WLF cho thấy, các cặp hằng số C_1 , C_2 rất sát nhau giữa nhựa đường và mastic (Bảng 3).

Bảng 3. Giá trị cặp hằng số C_1 , C_2 .

Vật liệu	C_1	C_2
Nhựa đường 35/50	16,5	155,2
Mastic15	16	145
Mastic25	15,6	142,2
Mastic35	14,9	135,4

Điều này cho thấy rằng hàm lượng bột khoáng không ảnh hưởng đến mức độ nhạy cảm nhiệt độ của vật liệu. Ứng xử nhạy cảm với nhiệt độ của mastic là sự kế thừa trực tiếp từ nhựa đường, do thành phần nhựa đường quyết định.

4. Kết luận

Từ các phân tích thực nghiệm và mô hình hóa, nghiên cứu rút ra các kết luận chính sau:

- Nhựa đường và các mastic tương ứng đều tuân theo nguyên tắc tương quan nhiệt độ-tần số (TTSP). Sự đồng nhất của biểu đồ Cole-Cole, Black cũng như khả năng xây dựng master curve liên tục xác nhận rằng cả hai dạng vật liệu đều là hệ đàn nhớt tuyến tính và có thể quy đổi về một trục thời gian tương đương, ngay cả khi hàm lượng khoáng lên đến 35 %.

- Mô đun động của mastic tăng rõ rệt khi hàm lượng bột khoáng tăng. Điều này phản ánh vai trò gia cường cơ học của bột khoáng đối với hệ vật liệu liên tục. Tuy nhiên, hình dạng đường cong đặc trưng là giống nhau.

- Góc lệch pha của các vật liệu gần như trùng nhau, phản ánh rằng bột khoáng không làm thay đổi bản chất đàn nhớt; tỷ lệ đàn hồi-nhớt được bảo toàn.

- Hệ số dịch chuyển a_T giữa nhựa đường và các mastic gần như trùng khớp, cho thấy sự bổ sung bột khoáng không làm thay đổi cơ chế đàn nhớt nội tại của chất kết dính. Nói cách khác, mastic kế thừa trực tiếp hành vi phụ thuộc nhiệt độ của nhựa đường và sự hiện diện của bột khoáng chỉ tạo ra sự dịch chuyển hướng tăng độ cứng, chứ không tạo ra cơ chế vật lý mới.

Ý nghĩa thực tiễn: Kết quả này chứng minh rằng tính chất đàn nhớt tuyến tính của mastic có thể được suy đoán, mô phỏng hoặc xây dựng trực tiếp từ tính chất của nhựa đường tương ứng, thay vì phải thực hiện toàn bộ chuỗi thí nghiệm cho từng hệ mastic riêng. Điều này giúp giảm thiểu khối lượng thí nghiệm, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho các mô hình dự báo và thiết kế vật liệu bê tông nhựa.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Chen J.-S., Kuo P.-H., Lin P.-S., Huang C.-C., Lin K.-Y (2008), "Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen

- mixed with mineral filler, *Materials and Structures*, *Materials and Structures*. 41(6), pp. 1015-1024.
- [2]. Wang H., Al-Qadi I. L., Faheem A., Bahia H., Yang S.-H., Reinke G (2011), "Effect of Mineral Filler Characteristics on Asphalt Mastic and Mixture Rutting Potential", *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2208, pp. 33-39.
- [3]. Bộ Khoa học Công nghệ (2019), TCVN 12818 : 2019 - Hỗn hợp bê tông nhựa nóng – Thiết kế theo đặc tính thể tích Superpave.
- [4]. Eurobitume. Rheology of Bituminous Binders Glossary of Rheological Terms: A Practical Summary of the Most Common Concepts, European Bitumen Association (1996).
- [5]. Nguyen M. L., Sauzéat C., Di Benedetto H., Tapsoba N (2013), "Validation of the time-temperature superposition principle for crack propagation in bituminous mixtures", *Materials and Structures*. 46(7), pp. 1075-1087.
- [6]. Nguyen Q. T., Di Benedetto H., Sauzéat C., Tapsoba N. (2013), "Time Temperature Superposition Principle Validation for Bituminous Mixes in the Linear and Nonlinear Domains", *Journal of Materials in Civil Engineering*. 25(9), pp. 1181-1188.
- [7]. Ferry, John D. (1980), "Viscoelastic properties of polymers. John Wiley and Sons", *New York*.