Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, Tập 72, Số 9 (12/2021), 1082-1096

Transport and Communications Science Journal

EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO THE COMPLEX POISSON'S RATIO OF ASPHALT MIXTURES IN VIETNAM

Bui Van Phu*, Nguyen Quang Tuan, Nguyen Quang Phuc

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article
Received: 18/09/2021
Revised: 02/11/2021
Accepted: 30/11/2021
Published online: 15/12/2021
https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.7

* *Corresponding author*
Email: buiphugt@utc.edu.vn

Abstract. Complex modulus and complex Poisson's ratio are two parameters which present the 3D linear viscoelastic properties of asphalt mixtures under cyclic loading. This paper presents experimental research to determine the complex Poisson's ratio of the asphalt mixtures using Cooper test equipment and high-precision strain gauges fixed at the surface of cylindrical specimens. The tests were performed at different temperatures and frequencies. Three types of asphalt mixture, including 2 asphalt mixtures prepared with the same original 60/70 bitumen and the third one prepared with polymer modified bitumen PMB3, were used for this study. To our best knowledgement, this is the first time in Vietnam, the measurements of complex Poisson's ratio of asphalt mixtures are performed in a wide range of temperatures and frequencies. The test results showed that complex Poisson's ratio is not a constant factor and that depends on the frequency and temperature. The complex Poisson's ratio increases with the increase of temperature or with the decrease of frequency and vice versa. The phase angle between the axial strain and the radial strain was also determined. The test results also indicated that there is a relationship between complex Poisson's ratio and the type of tested asphalt mixtures. The shift factor values of the two asphalt mixtures used the same type of bitumen are very close.

Keywords: Asphalt mixtures, complex Poisson's ratio, linear viscoelastic, time-temperature superposition principle, shift factor.

· *© 2021 University of Transport and Communications*

Transport and Communications Science Journal, Vol 72, Issue 9 (12/2021), 1082-1096

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM HỆ SỐ POÁT XÔNG PHỨC ĐỘNG CỦA MỘT SỐ LOẠI BÊ TÔNG NHỰA Ở VIỆT NAM

Bùi Văn Phú*, Nguyễn Quang Tuấn, Nguyễn Quang Phúc

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: 18/09/2021
Ngày nhận bài sửa: 02/11/2021
Ngày chấp nhận đăng: 30/11/2021
Ngày xuất bản Online: 15/12/2021
https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.7

* Tác giả liên hệ
Email: buiphugt@utc.edu.vn

Tóm tắt. Mô đun phức động (complex modulus) và hệ số Poát xông phức động (complex Poisson's ratio) là 2 tham số mô tả tính chất đàn nhớt tuyến tính 3 chiều của hỗn hợp bê tông nhựa (BTN) dưới tác dụng của tải trọng có tính chu kỳ (tải trọng động). Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm xác định hệ số Poát xông động của hỗn hợp bê tông nhựa bằng cách sử dụng thiết bị nén Cooper kết hợp với các đầu đo biến dạng gắn thêm có độ chính xác cao lắp đặt trên thân mẫu hình trụ tròn. Thí nghiệm được thực hiện tại nhiều tần số và nhiệt độ khác nhau. Ba loại BTN, trong đó có hai loại BTN sử dụng cùng một loại nhựa đường nguyên gốc 60/70 và một loại BTN sử dụng nhựa đường polyme PMB3 được sử dụng để nghiên cứu. Theo hiểu biết của chúng tôi, đây là nghiên cứu đầu tiên ở Việt Nam đo đạc hệ số Poát xông của bê tông nhựa trong khoảng rộng về tần số và nhiệt độ. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng hệ số Poát xông động không phải là một hằng số mà thay đổi phụ thuộc vào thời gian tác dụng lực và nhiệt độ. Hệ số Poát xông động tăng khi nhiệt độ tăng hoặc tần số tác dụng lực giảm và ngược lại. Góc lệch pha giữa biến dạng theo phương dọc trục và biến dạng theo phương ngang cũng được xác định. Kết quả thực nghiệm cũng cho thấy có sự liên hệ giữa hệ số Poát xông với loại bê tông nhựa thí nghiệm. Với 2 loại BTN sử dụng cùng loại nhựa đường 60/70, hệ số dịch chuyển a_T là xấp xỉ nhau.

Từ khóa: Bê tông nhựa, hệ số Poát xông phức động, đàn nhớt tuyến tính,tương quan tần số nhiệt độ, hệ số dịch chuyển.

· *© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trường ứng suất và biến dạng phát sinh trong kết cấu áo đường dưới tác dụng của tải trọng xe chạy và của điều kiện môi trường là không gian 3 chiều. Mô đun phức động và hệ số Poát xông phức động là 2 tham số cho phép mô tả tính chất đàn nhớt tuyến tính 3 chiều của vật liệu BTN trong kết cấu áo đường mềm. Trong các phương pháp thiết kế kết cấu áo đường mềm cũng như trong nhiều nghiên cứu trước đây, hệ số Poát xông của BTN thường được giả định là hằng số. Tuy nhiên, một số nghiên cứu đã cho thấy rằng hệ số Poát xông của BTN trong kết cấu áo đường dưới tác dụng của tải trọng xe là thông số thay đổi phụ thuộc vào nhiệt độ và thời gian tác dụng lực[1-3]. Mặt khác, các nghiên cứu của Maher [4] và Schwartz [5] đã sử dụng phần mềm tính toán của phương pháp thiết kế cơ học - thực nghiệm (Mechanistic Empirical Pavement Design Guider - MEPDG) để đánh giá ảnh hưởng của sự thay đổi hệ số Poát xông của các lớp BTN đến các dự báo hư hỏng của kết cấu áo đường mềm. Kết quả cho thấy rằng hệ số Poát xông của BTN được xếp vào danh sách những yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến việc dự đoán các ứng xử của kết cấu áo đường mềm. Đặc biệt, việc giảm hệ số Poát xông của lớp BTN ảnh hưởng tiêu cực tới dự đoán hằn lún mặt đường cũng như sự phát triển của vết nứt. Vì vậy, việc mô tả đúng tính chất của hệ số Poát xông của hỗn hợp BTN dưới tác dụng của tải trọng xe là rất cần thiết để cải thiện công tác dự đoán các hư hỏng của kết cấu áo đường mềm.

Trong phòng thí nghiệm, mô đun đàn hồi động và hệ số Poát xông động của hỗn hợp BTN được xác định bằng cách tác dụng tải trọng hình sin lên mẫu thí nghiệm BTN hình trụ. Việc đo đạc hệ số Poát xông của bê tông nhựa đòi hỏi thiết bị gia tải và thiết bị đo có độ chính xác cao, được lắp đặt và thiết kế tỉ mỉ. Do vậy, ngay cả trên thế giới cũng không có nhiều nhóm nghiên cứu công bố kết quả về hệ số Poát xông của bê tông nhựa. Ở Việt Nam, hiện chưa có nghiên cứu thực nghiệm nào xác định và đánh giá được hệ số Poát xông của bê tông nhựa cho một dải tần số và nhiệt độ khác nhau. Trong thí nghiệm đo đạc hệ số Poát xông, tải trọng tác dụng phải đảm bảo biên độ biến dạng dọc trục đủ bé để ứng xử của vật liệu nằm trong miền đàn hồi nhớt tuyến tính. Các nghiên cứu trước đây cho thấy nếu biên độ biến dạng dọc trục của mẫu BTN nhỏ hơn 10^{-4} m/m, ứng xử của mẫu BTN được coi là đàn nhớt tuyến tính [6-9]. Các nghiên cứu trước đây cũng đã cho thấy rằng, trong phạm vi đàn nhớt tuyến tính, nguyên tắc tương quan tần số nhiệt độ (Time-Temperature Superposition Principle) có thể được áp dụng cho cả mô đun động và hệ số Poát xông động của hỗn hợp BTN [1, 2, 10-12]. Trong quá trình gia tải, biến dạng dọc trục và biến dạng theo phương ngang được ghi lại nhờ các thiết bị đo có chính xác cao, từ đó cho phép tính toán mô đun động và hệ số Poát xông động của mẫu thí nghiệm. Tuy nhiên, bài báo này chỉ tập trung vào việc nghiên cứu về hệ số Poát xông động của hỗn hợp BTN, do đó mô đun động sẽ không được giới thiệu chi tiết. Các nghiên cứu thực nghiệm trong bài báo được tiến hành với ba loại bê tông nhựa khác nhau. Các thí nghiệm đo đạc hệ số Poát xông phức động của bê tông nhựa được thực hiện ở nhiều tần số và nhiệt độ khác nhau.

So với thí nghiệm xác định mô đun động, thí nghiệm xác định hệ số Poát xông động của BTN khó khăn và phức tạp hơn vì nó đòi hỏi thiết bị thí nghiệm có độ chính xác cao hơn. Bài báo là nghiên cứu đầu tiên về thực nghiệm xác định giá trị hệ số Poát xông phức động của BTN được thực hiện tại Việt Nam.

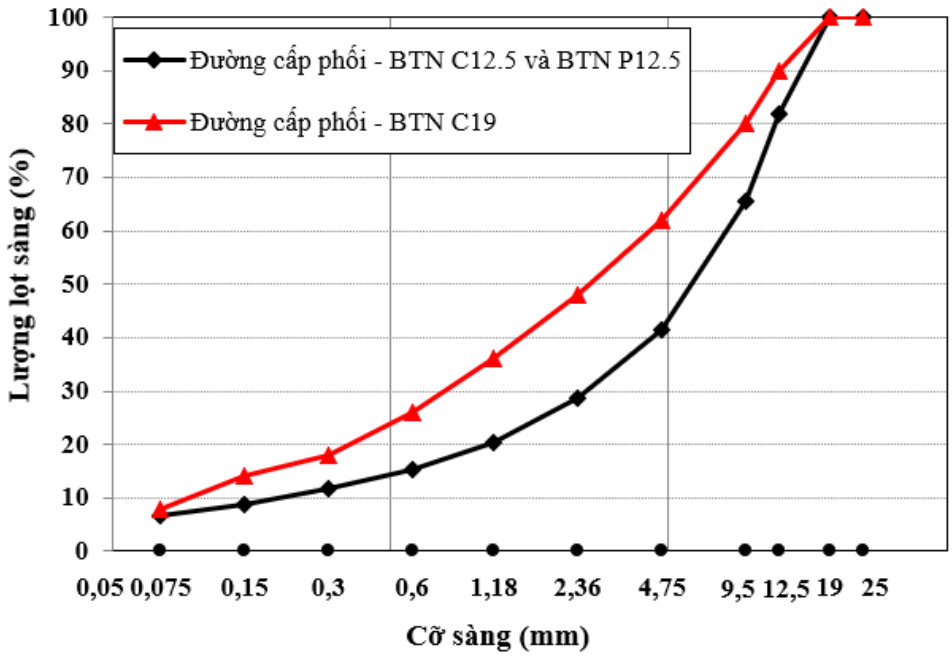
2. VẬT LIỆU VÀ THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Vật liệu sử dụng để nghiên cứu bao gồm 3 loại BTN được đặt tên lần lượt là: BTN C19, BTN C12.5 và BTN P12.5. Trong đó hỗn hợp BTN C19 và BTN C12.5 sử dụng cùng một loại nhựa đường nguyên gốc 60/70, BTN P12.5 sử dụng nhựa đường polyme PMB3. Đây là những loại BTN được sử dụng rộng rãi phổ biến ở Việt Nam. Thành phần hỗn hợp BTN được thiết kế theo phương pháp Marshall. Các thông số của hỗn hợp gồm đường kính danh định lớn nhất của cấp phối, loại nhựa đường, hàm lượng nhựa và độ rỗng dư của các mẫu BTN được thể hiện trong Bảng 1. Đường cong cấp phối của 3 loại bê tông nhựa được thể hiện trên Hình 1.

Bảng 1. Các loại BTN được sử dụng để thí nghiệm.

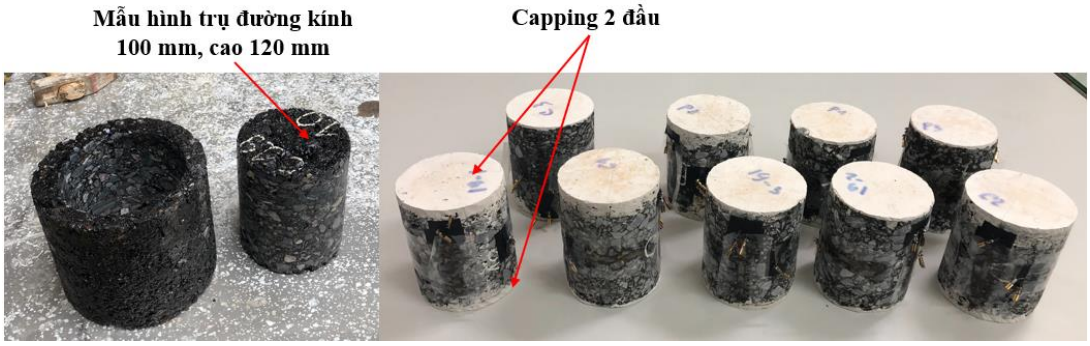
Loại BTN	Cỡ hạt danh định lớn nhất (mm)	Loại nhựa đường	Hàm lượng nhựa (%)	Độ rỗng dư (%)
BTN C19	19	Nhựa đường 60/70	4,3	4,83
BTN C12.5	12,5	Nhựa đường 60/70	4,4	5,11
BTN P12.5	12,5	Nhựa đường polyme PMB3	4,8	4,48



Hình 1. Đường cong cấp phối của các mẫu BTN thí nghiệm.

Các mẫu bê tông nhựa sử dụng trong thí nghiệm được chế tạo bằng đầm xoay với độ rỗng dư thiết kế. Các mẫu BTN được chế tạo với đường kính 150 mm và chiều cao 120 mm. Sau đó, các mẫu này được khoan lấy lõi với đường kính 100 mm và chiều cao 120 mm (Hình 2). Với việc khoan lấy lõi, bề mặt trụ tròn của mẫu trở nên nhẵn hơn thuận tiện cho việc dán các lá đo biến dạng và tăng độ chính xác kết quả đo. Các lá đo biến dạng sẽ được gắn trực tiếp

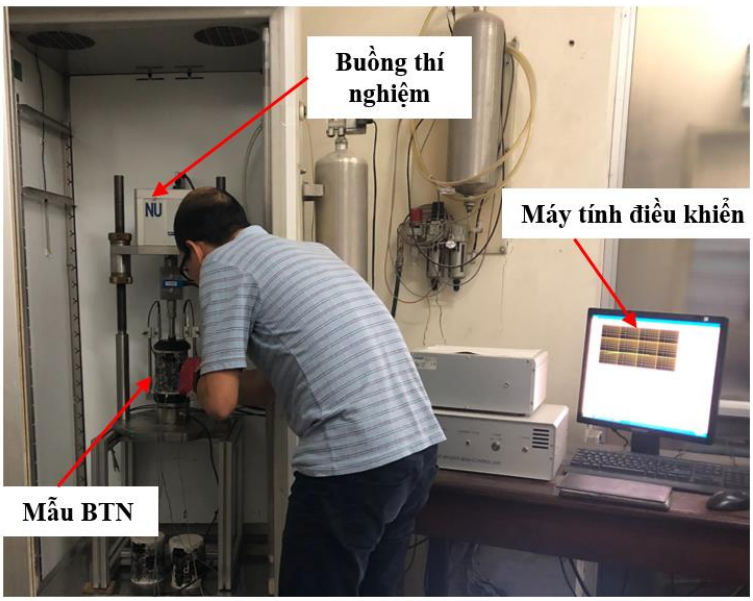
trên bề mặt xung quanh của mẫu (chi tiết xem phần 2.2). Mẫu sẽ được capping hai đầu để tạo mặt phẳng gia tải khi thí nghiệm.



Hình 2. Mẫu thí nghiệm hình trụ của các vật liệu nghiên cứu

2.2. Thiết bị thí nghiệm

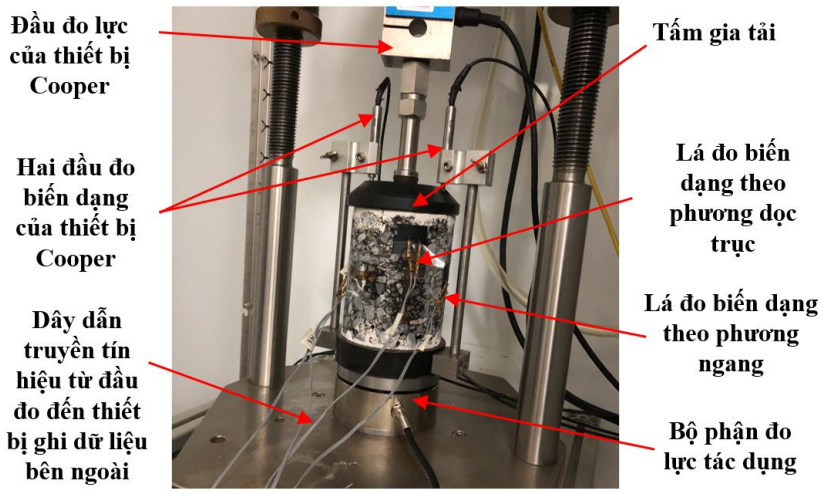
Nghiên cứu đã sử dụng thiết bị thí nghiệm nén mẫu dọc trục Cooper thuộc Phòng thí nghiệm Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải. Thiết bị Cooper cho phép thực hiện thí nghiệm trên một khoảng rộng các nhiệt độ và tần số theo tiêu chuẩn AASHTO TP 62. Hình 3 mô tả thiết bị Cooper với thí nghiệm nén dọc trục tải trọng động trên mẫu BTN. Thiết bị đã được sử dụng cho nhiều nghiên cứu đo đạc mô đun động của bê tông nhựa ở Việt Nam [13-15].



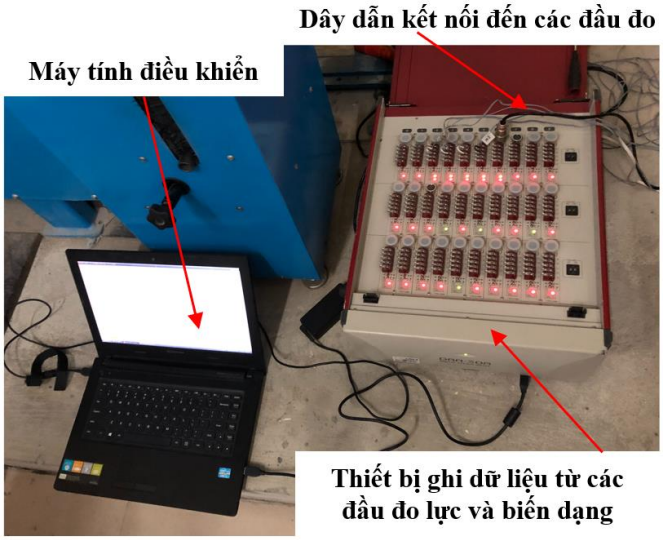
Hình 3. Thiết bị thí nghiệm Cooper.

Tuy nhiên, cấu hình mặc định của thiết bị Cooper chỉ cho phép đo đạc được độ lớn của mô đun động, không cho phép đo đạc được hệ số Poát xông cũng như các giá trị góc lệch pha của các tín hiệu. Đầu đo biến dạng mặc định của thiết bị được thiết kế đặt trên tấm gia tải mẫu làm giảm tính chính xác của kết quả đo. Để khắc phục các vấn đề này, cần chế tạo bộ gá, lắp thêm các đầu đo lực và biến dạng ngoài, đồng thời ghi lại dữ liệu theo thời gian thực. Nhằm thực hiện điều này, ngoài việc tận dụng lại các đầu đo cố định của thiết bị Cooper, bốn lá điện trở đo biến dạng được gắn trên bề mặt của mẫu thí nghiệm (xem Hình 4). Trong đó có 2 lá điện trở đo biến dạng theo phương dọc và 2 lá điện trở đo biến dạng theo phương nở hông.

Các lá đo biến dạng dọc trục và nở hông được dán tại vị trí giữa thân mẫu, đối xứng và xen kẽ nhau. Việc lắp đặt các lá biến dạng tại vị trí thân mẫu sẽ có tác dụng tăng độ chính xác khi đo biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông của mẫu. Trên thế giới, đã có một số nghiên cứu sử dụng phương pháp dán các đầu đo trực tiếp lên thân của mẫu thí nghiệm để đo biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông, như nghiên cứu của J. Blanc và các cộng sự năm 2015 [3] hay nghiên cứu của A. Graziani và các cộng sự năm 2014 [16]. Trong quá trình xử lý dữ liệu, biến dạng dọc trục hay nở hông của mẫu được lấy bằng giá trị trung bình của 2 đầu đo tương ứng. Ngoài ra, một đầu đo lực được bố trí thêm (ngoài đầu đo lực của máy Cooper) để có thể đồng bộ và lấy dữ liệu lực trong quá trình gia tải. Các số liệu thu được của quá trình thí nghiệm bao gồm lực tác dụng, biến dạng theo phương dọc và biến dạng theo phương ngang được ghi lại thông qua bộ ghi dữ liệu bên ngoài (xem Hình 5). Các bộ gá cũng được nhóm nghiên cứu chế tạo thêm để dễ dàng lắp đặt đầu đo lực vào hệ thống máy Cooper. Hình 4 thể hiện cách lắp đặt mẫu thí nghiệm lên bộ gá của thiết bị Cooper và các đầu đo gắn thêm trên thân mẫu.



Hình 4. Chi tiết bố trí các thiết bị đo và bộ gá của thiết bị Cooper.

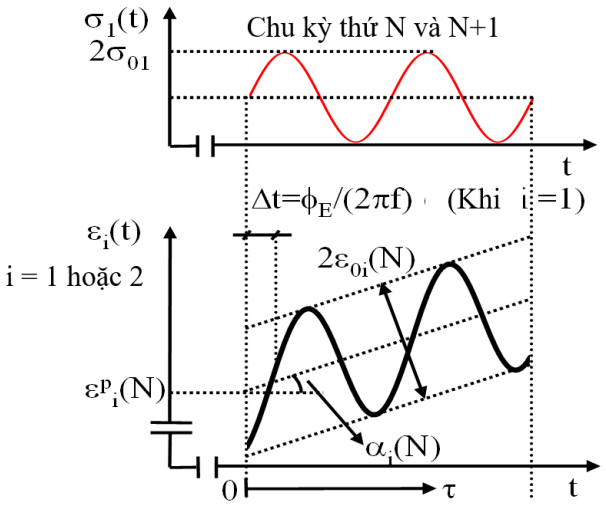


Hình 5. Thiết bị ghi dữ liệu bên ngoài.

2.3. Trình tự thí nghiệm

Tác dụng lên mẫu thí nghiệm một tải trọng hình sin tại các nhiệt độ khác nhau gồm 10 ^oC, 20 ^oC, 30 ^oC, 40 ^oC, 50 ^oC và 60 ^oC. Ứng với mỗi nhiệt độ thí nghiệm, các chu kỳ gia tải được đưa vào thí nghiệm gồm 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz và 0,1 Hz. Mỗi loại vật liệu bê tông nhựa tiến hành thí nghiệm với 1 tổ hợp gồm 3 mẫu. Tại mỗi tần số và nhiệt độ thí nghiệm, giá trị được sử dụng trong phân tích là giá trị trung bình của 3 mẫu thí nghiệm.

Biên độ lực tác dụng lên mẫu thay đổi theo nhiệt độ thí nghiệm, có giá trị từ 1,2 kN đến 7,9 kN (nhiệt độ càng cao, biên độ lực tác dụng càng bé) nhằm đảm bảo biên độ biến dạng theo phương dọc trục của mẫu đủ bé để ứng xử của vật liệu nằm trong miền đàn nhớt tuyến tính. Sự phát triển của ứng suất và biến dạng trong hai chu kỳ tác dụng lực hình sin liên tiếp được mô tả trên biểu đồ Hình 6.



Hình 6. Sự phát triển theo thời gian của ứng suất và biến dạng trong thí nghiệm nén dọc trục tải trọng hình sin [1, 9].

Khi đó tại mỗi nhiệt độ thí nghiệm, ứng suất theo phương dọc trục, biến dạng theo phương dọc trục và biến dạng theo phương ngang là hàm của thời gian được mô tả theo các công thức (1) (2) và (3) như sau [1, 9]:

$$\sigma_1(t) = \sigma_{01} + \sigma_{01}\sin(2\pi ft + \phi_{\sigma 1}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_1(N,\tau) = \alpha_1(N)\tau + \varepsilon^p{}_1(N) + \varepsilon_{01}(N)\sin(2\pi f\tau + \phi_{\varepsilon 1}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_2(t) = \varepsilon_2(N,\tau) = \alpha_2(N)\tau + \varepsilon^p{}_2(N) + \varepsilon_{02}(N)\sin(2\pi f\tau + \phi_{\varepsilon 2}) \quad (3)$$

Các thông số của các phương trình (1) (2) và (3) được giải thích trên Hình 6 trong đó: τ là khoảng thời gian của 2 chu kỳ liên tiếp N và N+1, có giá trị thay đổi từ 0 đến 2/f; $\varepsilon^p{}_i(N)$ (i = 1 (biến dạng dọc trục) hoặc 2 (biến dạng theo phương ngang)) là biến dạng tích lũy đến chu kỳ thứ N; $\alpha_i(N)$ là độ tăng biến dạng tại chu kỳ thứ N; σ_{01} là biên độ của ứng suất tác dụng; $\varepsilon_{01}(N)$ và $\varepsilon_{02}(N)$ tương ứng là biên độ của biến dạng dọc trục và biến dạng theo phương ngang tại chu kỳ thứ N; $\phi_{\sigma 1}$, $\phi_{\varepsilon 1}$ và $\phi_{\varepsilon 2}$ tương ứng là góc lệch pha của ứng suất dọc trục, biến dạng dọc trục và biến dạng theo phương ngang.

Mô đun phức động và hệ số Poát xông phức động được xác định theo các công thức (4) (5), trong đó chỉ sử dụng thành phần hàm sin của các công thức (1) (2) và (3) (số hạng thứ 2 của công thức (1) và số hạng thứ 3 của công thức (2) (3)). Phương pháp tính toán này giúp loại bỏ hoàn toàn thành phần biến dạng không hồi phục phát sinh trong quá trình thí nghiệm nén mẫu.

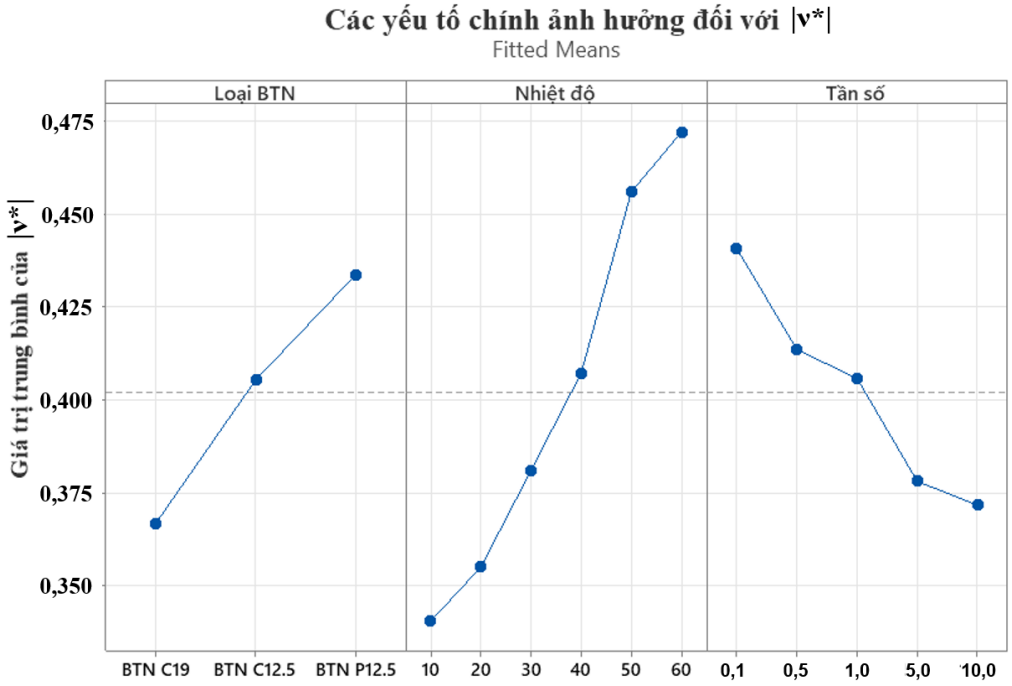
$$E^* = \frac{\sigma_{01}}{\varepsilon_{01}} e^{j(\phi_{\sigma 1} - \phi_{\varepsilon 1})} = |E^*| e^{j\phi_E}) \quad (4)$$

$$\nu^* = -\frac{\varepsilon_{02}}{\varepsilon_{01}} e^{j(\phi_{\varepsilon 2} - \phi_{\varepsilon 1})} = \frac{\varepsilon_{02}}{\varepsilon_{01}} e^{j(\phi_{\varepsilon 2} - \phi_{\varepsilon 1} - \pi)} = |\nu^*| e^{j\phi_\nu} \quad (5)$$

Trong đó: số phức j có $j^2 = -1$; $|E^*|$, ϕ_E là biên độ - mô đun động và góc lệch pha của mô đun phức động; $|\nu^*|$, ϕ_ν là biến độ - hệ số Poát xông động và góc lệch pha của hệ số Poát xông phức động.

3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

Kết quả thu được từ các thí nghiệm cho phép xác định được các giá trị mô đun động $|E^*|$, hệ số Poát xông động $|\nu^*|$ của các mẫu BTN nghiên cứu tại các cặp tần số và nhiệt độ khác nhau. Tuy nhiên, trong khuôn khổ của nghiên cứu, bài báo chỉ trình bày chủ yếu các kết quả về hệ số Poát xông động của các mẫu BTN.



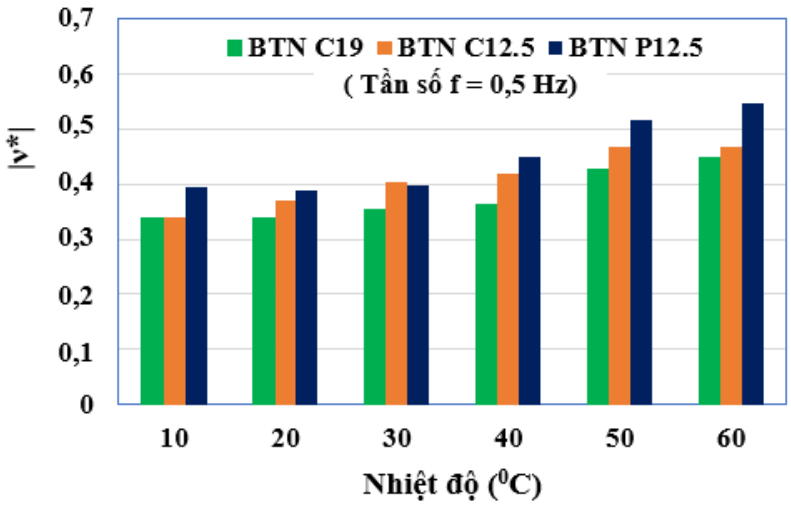
Hình 7. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến $|\nu^*|$.

Phân tích phương sai xử lý kết quả thí nghiệm được thực hiện để đánh giá mức độ phù hợp của mô hình thực nghiệm được sử dụng cho nghiên cứu với các biến đầu vào gồm: loại BTN (3 loại, mỗi loại 3 mẫu), nhiệt độ (6 nhiệt độ) và tần số (5 tần số); biến đầu ra là kết quả thí nghiệm $|E^*|$ và $|\nu^*|$. Như vậy tổng số thí nghiệm là 3 x 6 x 5 x 3 mẫu/1 loại BTN = 270 thí

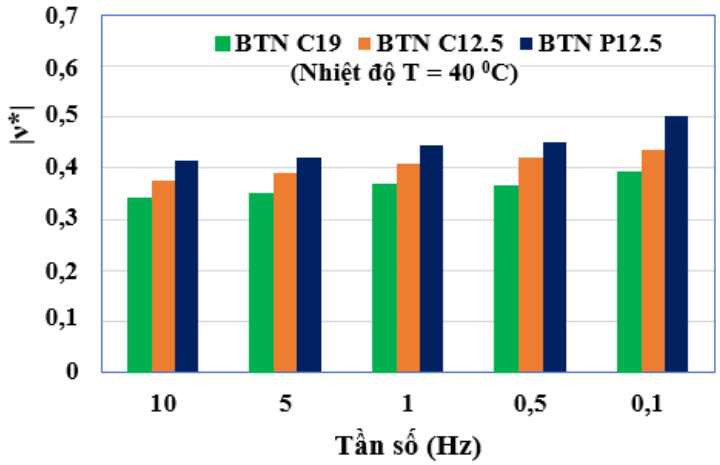
nghiệm. Đối với biến đầu ra là kết quả thí nghiệm hệ số Poát xông động $|v^*|$, kết quả phân tích sau khi đã loại các biến ảnh hưởng không có ý nghĩa thống kê (các biến có giá trị P-value > 0,005) có hệ số R^2 hiệu chỉnh = 70,69% và hệ số Lack - of - Fit = 1,00 > 0,05. Điều đó chứng tỏ rằng rằng mô hình thực nghiệm là phù hợp để xác định giá trị $|v^*|$. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến giá trị $|v^*|$ được thể hiện trên Hình 7.

Tượng tự, đối với biến đầu ra là giá trị mô đun động $|E^*|$, kết quả phân tích thống kê cũng cho thấy sự phù hợp tốt của mô hình thí nghiệm với hệ số R^2 điều chỉnh = 97,32% và hệ số Lack - of - Fit = 0,99 > 0,05. Cùng một mô hình thực nghiệm, biến đầu ra $|E^*|$ có hệ số R^2 điều chỉnh cao hơn so với hệ số R^2 điều chỉnh của biến $|v^*|$, do đó mô hình thể hiện sự phù hợp tốt hơn cho việc xác định giá trị của $|E^*|$ so với $|v^*|$. Nói cách khác, so với giá trị $|E^*|$ việc xác định giá trị $|v^*|$ là khó khăn hơn, đòi hỏi thiết bị thí nghiệm có độ chính xác cao hơn.

Biểu đồ trên Hình 8 là một ví dụ thể hiện sự biến thiên theo các nhiệt độ thí nghiệm khác nhau của giá trị hệ số Poát xông động $|v^*|$ của các mẫu BTN nghiên cứu khi tần số thí nghiệm không đổi (f = 0,5 Hz). Kết quả cho thấy nhiệt độ có ảnh hưởng rõ rệt đến hệ số Poát xông động, giá trị $|v^*|$ tăng khi nhiệt độ tăng. Tương tự, tần số tác dụng lực cũng thể hiện sự ảnh hưởng đáng kể đến hệ số Poát xông động. Trên Hình 9, giá trị của hệ số Poát xông động ở cùng một nhiệt độ thí nghiệm T = 40 ^oC thay đổi theo tần số tác dụng lực và có xu hướng tăng khi tần số tác dụng lực giảm. Tuy nhiên so với nhiệt độ, thì ảnh hưởng của tần số (trong phạm vi thí nghiệm) là nhỏ hơn. Từ kết quả thể hiện trên Hình 8 và Hình 9, sơ bộ có thể nhận thấy rằng tại cùng một điều kiện nhiệt độ - tần số thí nghiệm, mẫu BTN P12.5 có hệ số Poát xông lớn nhất trong khi giá trị hệ số Poát xông động của mẫu BTN C19 là bé nhất. Các xu hướng tăng giảm của hệ số Poát xông cũng tương tự khi tiến hành phân tích tại các tần số và nhiệt độ khác. Một số nghiên cứu [11] cho thấy rằng ở nhiệt độ cao (tần số thấp), khi chuyển dần sang thể lỏng, nhựa đường có hệ số Poát xông động tiệm cận 0,5. Khi giảm nhiệt độ và tăng tần số, nhựa đường cứng hơn và hệ số Poát xông động của nhựa đường giảm đi. Nhựa đường đóng vai trò chất liên kết trong hỗn hợp bê tông nhựa. Sự thay đổi đặc tính của nhựa sẽ ảnh hưởng đến tính chất của cả hỗn hợp. Chính sự thay đổi hệ số Poát xông động của nhựa đường theo tần số/nhiệt độ đã ảnh hưởng đến hệ số Poát xông của bê tông nhựa. Sự thay đổi hệ số Poát xông động của bê tông nhựa theo tần số và nhiệt độ trên Hình 8 và 9 cũng phù hợp với sự thay đổi hệ số Poát xông động của nhựa đường.



Hình 8. Giá trị hệ số Poát xông động của loại BTN tại tần số f = 0,5 Hz.



Hình 9. Giá trị hệ số Poát xông động của loại BTN tại nhiệt độ T = 40 °C.

Đường cong đặc trưng của hệ số Poát xông động được xây dựng dựa trên nguyên tắc dịch chuyển đường đẳng nhiệt của thông số này theo hệ trục tần số quy đổi. Việc xây dựng đường cong đặc trưng cho phép xác định hệ số Poát xông động của vật liệu tại các cặp tần số - nhiệt độ không được thực hiện thí nghiệm, từ đó giảm thiểu khối lượng thí nghiệm, tiết kiệm thời gian và kinh phí thực hiện nhiều thí nghiệm. Đường cong đặc trưng cũng thể hiện đầy đủ đặc tính biến đổi của bê tông nhựa theo tần số và nhiệt độ. Các nghiên cứu trước đây trên thế giới chỉ ra rằng, hệ số dịch chuyển a_T được sử dụng để xây dựng đường cong đặc trưng của mô đun động và hệ số Poát xông động là đồng nhất với nhau [1, 8, 10, 12]. Để xây dựng đường cong đặc trưng của $|\nu^*|$ và ϕ_ν, trước hết đường cong đặc trưng của mô đun đàn hồi động $|E^*|$ được xây dựng nhằm xác định các hệ số dịch chuyển a_T. Các đường cong đặc trưng của các vật liệu nghiên cứu được xây dựng tại cùng một nhiệt độ tham chiếu T_{ref}. Tại mỗi nhiệt độ thí nghiệm, lựa chọn các hệ số dịch chuyển a_T để dịch chuyển đường đẳng nhiệt tương ứng theo phương ngang. Các đường đẳng nhiệt ở nhiệt độ cao hơn nhiệt độ tham chiếu T_{ref} được dịch chuyển về phía bên trái, còn các đường đẳng nhiệt ở nhiệt độ thấp hơn T_{ref} được dịch chuyển về phía bên phải. Hình 10 là ví dụ thể hiện quá trình dịch chuyển các đường đẳng nhiệt mô đun động để xây dựng đường cong đặc trưng $|E^*|$ của BTN C19 tại nhiệt độ tham chiếu T_{ref} = 40 °C. Trong đó, hệ số a_T được xác định theo công thức (6):

$$a(T) = t / t_{ref} \quad (6)$$

Với: a(T) - hệ số dịch chuyển, là hàm số của nhiệt độ

t - Thời gian tác dụng của tải trọng ở nhiệt độ T;

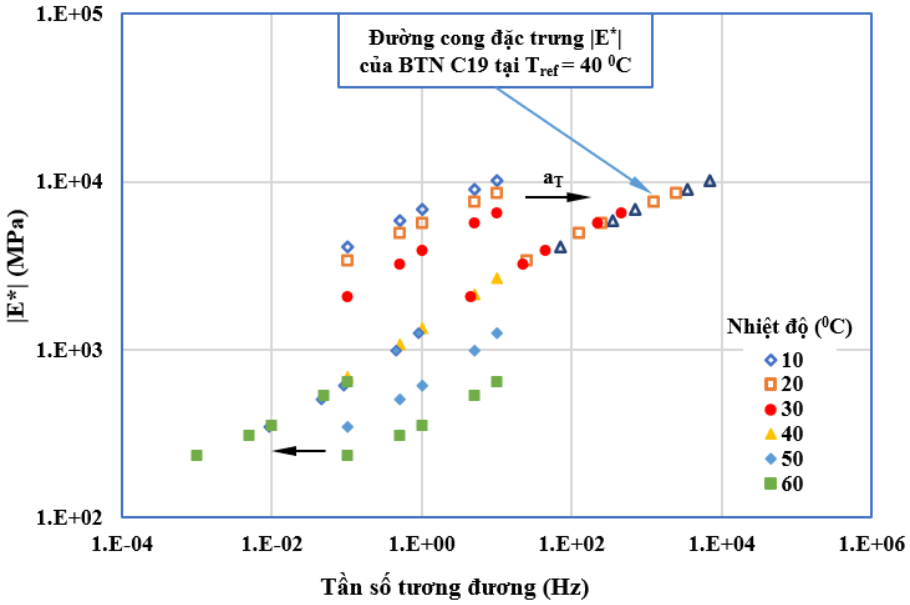
t_{ref} - Thời gian tác dụng tương đương tại nhiệt độ tham chiếu T_{ref}.

Khi đó, mô đun động $|E^*|$ được biểu diễn theo tần số tương đương f_t tính theo công thức (7).

$$f_t = a(T)f \quad (7)$$

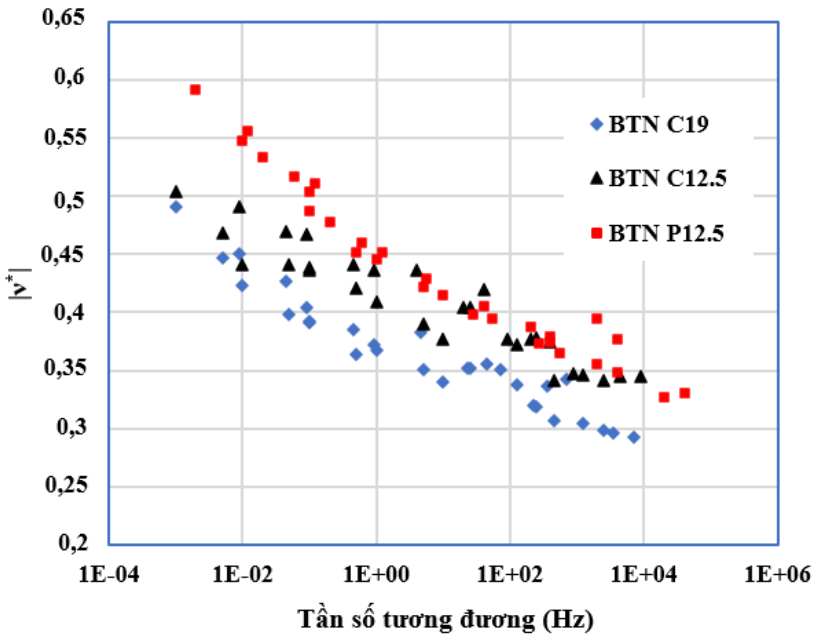
Trong đó: f_t – Tần số tương đương;

f – Tần số của lực tác dụng tại nhiệt độ T.

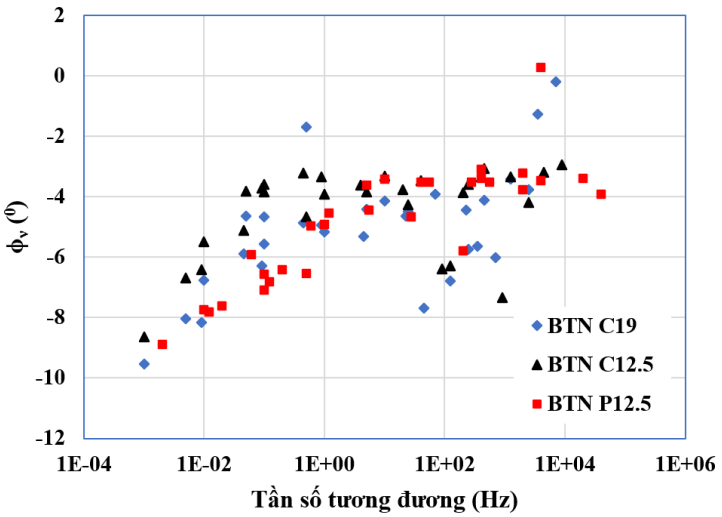


Hình 10. Đường cong đặc trưng mô đun động $|E^*|$ của BTN C19 tại T_{ref} = 40 °C.

Áp dụng hệ số a_T của các đường đẳng nhiệt của mô đun động $|E^*|$ cho đường đẳng nhiệt tương ứng của hệ số Poát xông động, đường cong đặc trưng của hệ số Poát xông động $|\nu^*|$ và góc lệch pha ϕ_ν của 3 loại BTN nghiên cứu tại nhiệt độ tham chiếu T_{ref} = 40 °C được xây dựng như trên Hình 11 và Hình 12. Kết quả cho thấy, hệ số Poát xông và góc lệch pha khá liên tục trên đường cong đặc trưng. Điều này cho thấy nguyên tắc tương quan tần số nhiệt độ hoàn toàn có thể áp dụng cho hệ số Poát xông.



Hình 11. Đường cong đặc trưng hệ số Poát xông động $|\nu^*|$ của 3 loại BTN thí nghiệm tại T_{ref} = 40 °C.



Hình 12. Đường cong đặc trưng góc lệch pha ϕ_v của 3 loại BTN thí nghiệm tại T_{ref} = 40 °C.

Kết quả trên Hình 11 cho thấy rằng giá trị hệ số Poát xông của BTN dưới tác dụng của tải trọng có tính động không phải là một hằng số mà là một tham số biến đổi phụ thuộc vào tần số tác dụng của lực và nhiệt độ. Ở cùng một nhiệt độ thí nghiệm, giá trị $|\nu^*|$ tăng khi tần số giảm và ở cùng một tần số thí nghiệm, giá trị $|\nu^*|$ tăng khi nhiệt độ tăng. Sự biến đổi này của hệ số Poát xông động ngược với giá trị mô đun động. Giá trị hệ số Poát xông động của các mẫu thí nghiệm thay đổi trong khoảng 0,29 đến 0,5. Kết quả này phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước đây trên thế giới [1-3]. Tại nhiệt độ cao, mẫu BTN nhựa có độ cứng rất thấp dẫn tới việc đo đạc ứng suất biến dạng gặp khó khăn hơn. Một số giá trị hệ số Poát xông đo đạc tại nhiệt độ cao có thể vượt qua 0,5 do bị ảnh hưởng bởi yếu tố này. Điều này cũng xảy ra tương tự với nhiều kết quả thực nghiệm khác trên thế giới [1, 2]. Giá trị hệ số Poát xông động của BTN P12.5 là lớn nhất trong khi BTN C19 có hệ số Poát xông động bé nhất ở hầu hết các cặp tần số - nhiệt độ.

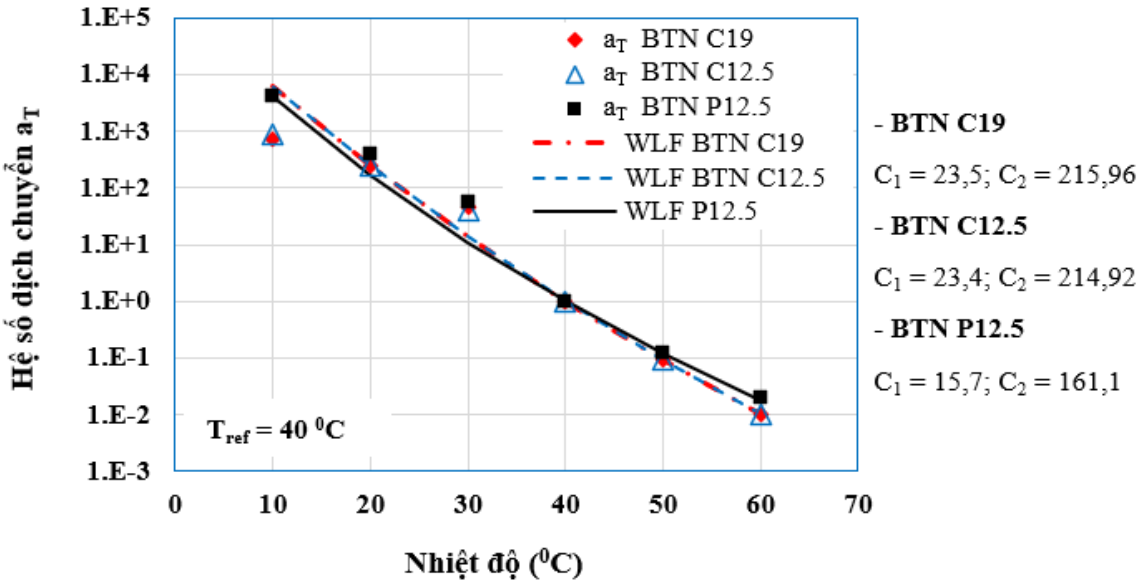
Từ Hình 12 ta thấy, giá trị góc pha ϕ_v khá bé và mang giá trị âm. Điều này chứng tỏ rằng biến dạng của theo các phương của các mẫu BTN không xảy ra đồng thời. Đối với vật liệu đàn nhớt tuyến tính như BTN, biến dạng theo phương ngang trễ pha so với biến dạng dọc trục. Tuy nhiên có thể nhận thấy, góc lệch pha này là rất nhỏ. Điều này cũng phù hợp với kết quả nghiên cứu được nhóm thành viên RILEM thực hiện [17].

Mối quan hệ giữa nhiệt độ thí nghiệm T và hệ số dịch chuyển a_T của các loại BTN nghiên cứu tuân theo quy tắc WLF (Williams, Landel và Ferry) [10, 18, 19].

$$\log(a_T, T_{ref}) = \frac{-C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (8)$$

Các hệ số C_1 và C_2 được xác định bằng cách tối ưu hóa theo phương pháp bình phương nhỏ nhất. Việc thiết lập được mối quan hệ giữa a_T và T cho phép tính toán và xây dựng được các đường cong đặc trưng của BTN tại nhiệt độ tham chiếu và tần số bất kì không thuộc các giá trị được thực hiện thí nghiệm. Hình 13 biểu diễn kết quả xây dựng mối quan hệ giữa hệ số dịch chuyển a_T với nhiệt độ T và thể hiện các thông số vật liệu C_1, C_2 của các loại BTN thí

nghiệm. Kết quả cho thấy rằng với hai loại BTN là BTN C19 và BTN C12.5 được sử dụng cùng một loại nhựa đường nguyên gốc 60/70, các giá trị a_T là xấp xỉ nhau.



Hình 13. Tương quan giữa hệ số dịch chuyển và nhiệt độ theo nguyên tắc WLF tại T_{ref} = 40 ^{o}C.

4. KẾT LUẬN

Từ phân tích kết quả thực nghiệm xác định hệ số Poát xông động của các mẫu BTN, một số kết luận được rút ra như sau:

- Hệ số Poát xông động của BTN là một tham số biến đổi phụ thuộc vào tần số tác dụng lực và nhiệt độ. Ngược lại với sự biến đổi của giá trị mô đun động, giá trị hệ số Poát xông động tăng khi nhiệt độ tăng hoặc tần số giảm và ngược lại.

- Giá trị hệ số Poát xông động của 3 loại BTN nhựa nghiên cứu thay đổi trong khoảng từ 0,29 đến 0,5. Ứng với mỗi cặp tần số nhiệt độ, hệ số Poát xông động của mẫu BTN P12.5 là lớn nhất trong khi mẫu BTN C19 có giá trị bé nhất.

- Góc lệch pha ϕ_ν của các mẫu thí nghiệm có giá trị khá bé và mang giá trị âm. Điều đó chứng tỏ biến dạng theo phương ngang không xảy ra đồng thời với biến dạng dọc trục mà có sự trễ pha so với biến dạng dọc trục.

- Hệ số dịch chuyển a_T được sử dụng để xây dựng đường cong đặc trưng $|E^*|$ và $|\nu^*|$ của 2 mẫu BTN sử dụng cùng một loại nhựa đường nguyên gốc 60/70 có giá trị xấp xỉ nhau.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2019-CT-03TĐ. Bùi Văn Phú được tài trợ bởi Tập đoàn Vingroup – Công ty CP và hỗ trợ bởi Chương trình học bổng thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn, mã số VINIF.2021.TS.148.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Q.T. Nguyen, H.D. Benedetto, Q.P. Nguyen, T.T.N. Hoang, V.P. Bui, Effect of time–temperature, strain level and cyclic loading on the complex Poisson's ratio of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 294 (2021). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123564.
[2]. D. Perraton, H.D. Benedetto, C. Sauzeat, Q.T. Nguyen, S. Pouget, Three-Dimensional Linear Viscoelastic Properties of Two Bituminous Mixtures Made with the Same Binder, Journal of Materials in Civil Engineering, 30 (2018). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002515.
[3]. J. Blanc, T. Gabet, P. Hornich, J.M. Piau, H.D. Benedetto, Cyclic triaxial tests on bituminous mixtures, Road Mater Pavement Des, 16 (2015) 46-69. https://10.1080/14680629.2014.964293.
[4]. A. Maher T. Bennert, Evaluationh of Poissons's ratio for use in the mechanistic empirical pavament design guide (MEPDG), Report submit to Federal Highway Administration U.S. Department of transportation, Washington, D.C., #FHWA-NJ-2008-004, (2008).
[5]. C.W. Schwartz, R. Li, H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, Global sensitivity analysis of mechanistic-empirical performance predictions for flexible pavements, In: Transportation Research Board (TRB) 92nd annual meeting Washington, DC, 2013, 13-17. https://doi.org/10.3141/2368-02.
[6]. G. Airey, B. Rahimzadeh, A. Collop, Viscoelastic linearity limits for bituminous materials, Materials and Structures, 36 (2003) 643-647. http://10.1007/BF02479495.
[7]. Q.T. Nguyen, M.L. Nguyen, H.D. Benedetto, C. Sauzeat, E. Chailleux, T.T.N. Hoang, Nonlinearity of bituminous materials for small amplitude cyclic loadings, Road Materials and Pavement Design, 20 (2019) 1571-1585. https://10.1080/14680629.2018.1465452.
[8]. Q.T. Nguyen, H.D. Benedetto, C. Sauzeat, Linear and nonlinear viscoelastic behavior of bituminous mixtures, Mater. Struct., 48 (2015) 2339 –2351. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0316-5.
[9]. Q.T. Nguyen, H.D. Benedetto, C. Sauzeat, M.L. Nguyen, T.T.N. Hoang, 3D complex modulus tests on bituminous mixture with sinusoidal loadings in tension and/or compression, Mater. Struct, 50 (2017) 98. https://doi.org/10.1617/s11527-016-0970-x.
[10]. Q.T. Nguyen, H.D. Benedetto, C. Sauzeat, 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.
[11]. H.D. Benedetto, B. Delaporte, C. Sauzeat, Three-dimensional linear behavior of bituminous materials: experiments and modeling, Int. J. Geomech, 7 (2007) 149–157. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(149).
[12]. D. Perraton, H.D. Benedetto, C. Sauzeat, B. Hofko, A. Graziani, Q.T. Nguyen, S. Pouget, L.D. Poulikakos, N. Tapsoba, J. Grenfell, 3Dim experimental investigation of linear viscoelastic properties of bituminous mixtures, Mater. Struct, 49 (2016) 4813–4829. https://doi.org/10.1617/s11527-016-0827-3.
[13]. D.H. Trần, Nghiên Cứu Hỗn Hợp Đá - Nhựa Nóng Cường Độ Cao Dùng Trong Kết Cấu Mặt Đường Ô Tô Cấp Cao Ở Việt Nam, Luận án Tiến sỹ Kỹ thuật, Đại học Giao thông Vận Tải, 2019.
[14]. N.H. Nguyễn, Nghiên Cứu ảnh hưởng tính chất của bitum đến mô đun động của bê tông nhựa chặt ở Việt Nam, Luận án Tiến sỹ Kỹ thuật, Đại học Giao thông Vận Tải, 2019.
[15]. T.C.H. Trần, Nghiên cứu thành phần, tính chất co học và khả năng sử dụng bitum epoxy làm chất kết dính cho hỗn hợp Asphalt tại Việt Nam, Luận án Tiến sỹ Kỹ thuật, Đại học Giao thông Vận Tải, 2020.
[16]. A. Graziani, M. Bocci, F. Canestrari, Complex Poisson's ratio of bituminous mixtures: Measurement and modeling, Materials and Structures, 47 (2014) 1131–1148. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0117-2
[17]. A. Graziani, H.D. Benedetto, D. Perraton, C. Sauzeat, B. Hofko, Q.T. Nguyen, S. Pouget, L.D. Poulikakos, N. Tapsoba, J. Grenfell, A.C. Falchetto, M. Wistuba, C. Petit, Chapter 3 "Three-Dimensional Characterisation of Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures" In Book:

Testing and Characterization of Sustainable Innovative Bituminous Materials and Systems, RILEM State-of-the-Art Reports, 2018.
[18]. D.A.R. Cardona, S. Pouget, H.D. 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
[19]. H.D. Benedetto, F. Olard, C. Sauzeat, B. Delaporte, Linear viscoelastic behavior of bituminous materials: from binders to mixes, Road Materials and Pavement Design, 5 (2004) 163-202. https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689992