

Ảnh hưởng của nhựa đường polime đến quan hệ mô đun phức động với tần số tải của bê tông nhựa chặt 9,5 và 12,5

Lê Thái Bình^{1*}

¹ Khoa Cơ khí – Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện lực

TỪ KHOÁ

Bê tông nhựa polime
Mô đun đàn hồi tĩnh
Mô đun phức động
Hồi quy log-log
Tần số tải

TÓM TẮT

Trong thiết kế áo đường mềm, mô đun đàn hồi của lớp bê tông nhựa là tham số đầu vào quan trọng chi phối phân bố ứng suất – biến dạng và dự báo tuổi thọ kết cấu. Tuy nhiên, mô đun đàn hồi tĩnh chưa phản ánh đầy đủ đặc tính đàn hồi–nhớt phụ thuộc thời gian của bê tông nhựa, đặc biệt đối với bê tông nhựa sử dụng nhựa đường cải tiến polime. Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của nhựa PMB1 đến mô đun đàn hồi tĩnh (E) và mô đun phức động (E*) của bê tông nhựa chặt (BTNC) và bê tông nhựa polime (BTNP) cỡ hạt 9,5 mm và 12,5 mm tại 25°C, với dải tần số tải 0,1–25 Hz. Kết quả cho thấy E của BTNP tăng 10–18% so với BTNC, trong khi E* tăng mạnh hơn (20–98%) tùy cấp phối và tần số. Quan hệ $\log_{10}(E^*) - \log_{10}(f)$ trong miền 0,1–10 Hz xấp xỉ tuyến tính với $R^2 \geq 0,96$, cho phép định lượng mức nhạy cảm tần số thông qua độ dốc b. BTNP 12,5 có hệ số cải thiện E* lớn nhất (đến ~1,99 lần tại 10 Hz). Nghiên cứu đề xuất sử dụng E* tại 10 Hz và 1 Hz (25°C) cùng tham số b làm chỉ tiêu thực hành phục vụ đánh giá và kiểm soát chất lượng bê tông nhựa polime trong điều kiện thí nghiệm tương ứng.

KEYWORDS

Polymer-modified asphalt
Static modulus
Complex modulus
Log-log regression
Loading frequency

ABSTRACT

In flexible pavement design, asphalt-layer modulus governs stress-strain distribution and performance prediction. Static modulus does not fully capture the time-dependent viscoelastic response of asphalt mixtures, particularly polymer-modified asphalt concrete. This study evaluates the effects of PMB1 on static modulus (E) and complex dynamic modulus (E*) of conventional dense-graded asphalt concrete (BTNC) and polymer-modified asphalt concrete (BTNP) with nominal maximum aggregate sizes of 9.5 mm and 12.5 mm at 25°C, across loading frequencies of 0.1–25 Hz. Results indicate that BTNP increases E by 10–18% relative to BTNC, while E* improves more substantially (20–98%), depending on gradation and frequency. The $\log_{10}(E^*) - \log_{10}(f)$ relationship within 0.1–10 Hz is well approximated by a linear model ($R^2 \geq 0.96$), enabling quantitative assessment of frequency sensitivity via slope b. BTNP 12.5 shows the highest improvement (up to ~1.99 at 10 Hz). The study recommends using E* at 10 Hz and 1 Hz (25°C), together with regression slope b, as practical indicators for quality control and classification of polymer-modified asphalt mixtures under comparable testing conditions.

1. Đặt vấn đề

Bê tông nhựa là vật liệu đàn hồi nhớt dẻo, có đặc tính cơ học phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ và thời gian tác dụng tải [1–3]. Trong khai thác mặt đường, tải trọng bánh xe là tải lặp, thời gian đặt tải thay đổi theo tốc độ xe và điều kiện dòng xe; đồng thời nhiệt độ lớp mặt biến thiên theo chu kỳ ngày đêm và mùa. Vì vậy, mô đun của bê tông nhựa không phải hằng số mà biến thiên theo điều kiện tải (tần số/chu kỳ) và nhiệt độ.

Ở Việt Nam, kiểm soát chất lượng bê tông nhựa trong thi công/nghiệm thu thường dựa trên các chỉ tiêu Marshall (ổn định, độ dẻo, độ rỗng...) và một số chỉ tiêu cơ học ở trạng thái gần tĩnh. Tuy nhiên, các chỉ tiêu này chưa phản ánh trực tiếp mức độ “cứng hóa theo thời gian tải” (time-loading effect) và khả năng duy trì độ cứng của hỗn hợp dưới

tải động. Trong khi đó, mô đun phức động E* (Complex Dynamic Modulus) theo AASHTO TP62 được xem là chỉ tiêu phù hợp hơn để mô phỏng điều kiện tải động và đặc trưng hóa tính đàn hồi–nhớt của vật liệu [4, 5].

Nhựa đường cải tiến polime (PMB) được sử dụng nhằm tăng tính đàn hồi hồi phục, giảm nhạy cảm nhiệt và cải thiện khả năng chống biến dạng dư. Tuy nhiên, trong thực hành kỹ thuật, vẫn cần định lượng rõ: (i) mức cải thiện mô đun của bê tông nhựa polime so với bê tông nhựa thường; (ii) mức cải thiện này phụ thuộc như thế nào vào tần số tải (tức thời gian tác dụng tải); và (iii) có thể xây dựng những chỉ tiêu thực dụng nào cho kiểm soát chất lượng.

Trên cơ sở số liệu thí nghiệm đại diện, bài báo này tập trung các nội dung sau:

- So sánh mô đun đàn hồi tĩnh E và mô đun phức động E* giữa

*Liên hệ tác giả: binhlt@epu.edu.vn

Nhận ngày 08/06/2026, sửa xong ngày 27/06/2026, chấp nhận đăng ngày 29/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1414>

BTNC và BTNP cho hai cấp phối 9,5 mm và 12,5 mm;

- Phân tích quan hệ $E^* - f$ và hồi quy $\log_{10}(E^*) - \log_{10}(f)$ để lượng hóa nhạy cảm tần số;

- Đề xuất chỉ tiêu phục vụ đánh giá/kiểm soát chất lượng bê tông nhựa polime trong điều kiện thí nghiệm tương ứng.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Hỗn hợp nghiên cứu và kế hoạch thí nghiệm

Nghiên cứu xem xét 4 loại hỗn hợp bê tông nhựa chặt thường và polime với hai cấp phối cỡ hạt danh định và được ký hiệu cụ thể như sau:

- BTNC 9,5 – nhựa 60/70
- BTNC 12,5 – nhựa 60/70
- BTNP 9,5 – nhựa PMB1
- BTNP 12,5 – nhựa PMB1

Mẫu thí nghiệm có dạng trụ Marshall (được sử dụng/điều chỉnh theo quy trình tương ứng), sau đó thực hiện thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh và mô đun phức động trên thiết bị chuyên dụng. Các số liệu E^* được thu ở 25 °C với dải tần số 0,1–25 Hz.

2.2. Thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

Mô đun đàn hồi tĩnh được xác định theo 22TCN 211-06 [6] trên mẫu hình trụ, gia tải nén dọc trục và đo biến dạng đàn hồi trong miền tuyến tính để xác định E (MPa). Đây là chỉ tiêu thường dùng trong thiết kế kết cấu áo đường mềm theo phương pháp đàn hồi nhiều lớp tại Việt Nam.

2.3. Thí nghiệm mô đun phức động

Mô đun phức động E^* xác định theo AASHTO TP62 [7] bằng thí nghiệm nén dọc trục với tải trọng hình sin, tại 25 °C. Dải tần số gồm: 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 25 Hz. Với vật liệu đàn hồi-nhớt, E^* có xu hướng tăng theo tần số do thời gian tải ngắn làm vật liệu biểu hiện “cứng” hơn.

2.4. Phân tích hồi quy $\log_{10}(E^*) - \log_{10}(f)$

Để lượng hóa nhạy cảm tần số, thực hiện biến đổi logarit cơ số 10 và xấp xỉ bằng mô hình tuyến tính:

$$\log_{10}(E^*) = a + b \cdot \log_{10}(f)$$

Trong đó: a là hệ số chặn, về mặt ý nghĩa, xấp xỉ $\log_{10}(E^*)$ tại $f = 1$ Hz; b là độ dốc, phản ánh mức nhạy cảm của E^* theo tần số (b càng lớn $\rightarrow E^*$ tăng nhanh hơn khi f tăng).

Do một số hỗn hợp có xu hướng không tăng tiếp hoặc “lệch xu thế” tại 25 Hz (có thể do đặc thù dữ liệu/tín hiệu ở tần số cao hoặc sai khác mức ứng suất/đo chuyển vị), hồi quy được thực hiện ưu tiên trong miền 0,1–10 Hz (miền đơn điệu, phù hợp hơn cho tuyến tính log–log với bộ dữ liệu hạn chế).

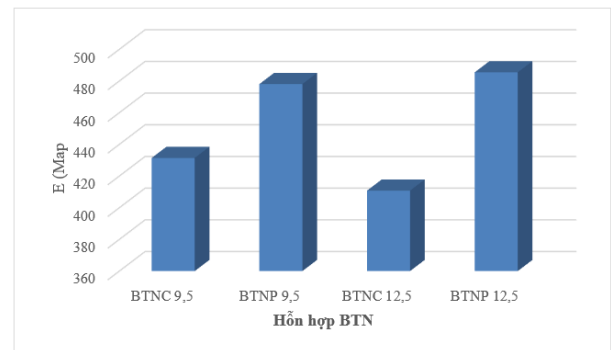
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả mô đun đàn hồi tĩnh và mức cải thiện do nhựa polime

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh của các hỗn hợp nghiên cứu được tổng hợp trong Bảng 1 và Hình 1 dưới đây.

Bảng 1. Mô đun đàn hồi tĩnh E và mức tăng khi dùng nhựa PMB1.

Hỗn hợp BTN	Mô đun đàn hồi tĩnh E (MPa)	Mức tăng so với BTNC (%)
BTNC 9,5	431,41	—
BTNP 9,5	478,04	+ 10,8 %
BTNC 12,5	410,78	—
BTNP 12,5	485,45	+ 18,2 %



Hình 1. So sánh mô đun đàn hồi tĩnh E khi dùng nhựa PMB1.

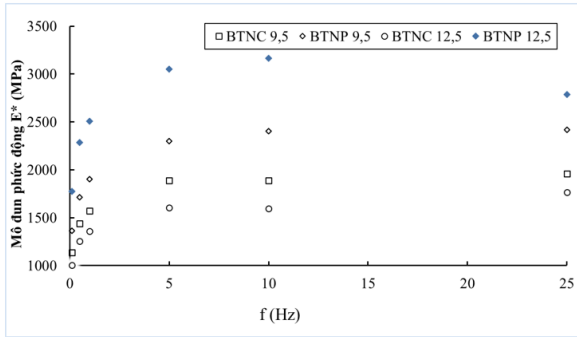
Kết quả cho thấy nhựa PMB1 làm tăng mô đun tĩnh ở cả hai cấp phối. Tuy nhiên, mức tăng chỉ khoảng 10 ÷ 18 %, một mức tăng có ý nghĩa nhưng chưa đủ lớn để mô đun tĩnh trở thành chỉ tiêu phân loại mạnh giữa bê tông nhựa thường và polime. Điều này phù hợp với bản chất của thí nghiệm tĩnh: tải tương đối chậm và trạng thái làm việc có thể chưa kích hoạt đầy đủ lợi thế đàn hồi hồi phục của polime. Vì vậy, cần xem xét mô đun phức động để đánh giá đúng hơn trong điều kiện gần khai thác.

3.2. Quan hệ mô đun phức động E^* với tần số tải

Kết quả thí nghiệm Mô đun phức động E^* theo tần số (25 °C) cho 4 hỗn hợp được thể hiện trong Bảng 2 và Hình 2.

Bảng 2. Mô đun phức động E^* (MPa) theo tần số f (Hz) tại 25 °C.

f (Hz)	BTNC 9,5	BTNP 9,5	BTNC 12,5	BTNP 12,5
25	1961,35	2416,52	1764,45	2787,21
10	1887,51	2403,85	1594,71	3165,19
5	1889,49	2298,77	1606,70	3051,58
1	1573,30	1904,24	1358,25	2508,34
0,5	1437,50	1716,10	1256,14	2283,83
0,1	1134,72	1362,61	1005,63	1773,25



Hình 2. Sự thay đổi Mô đun phức động E^* theo tần số f .

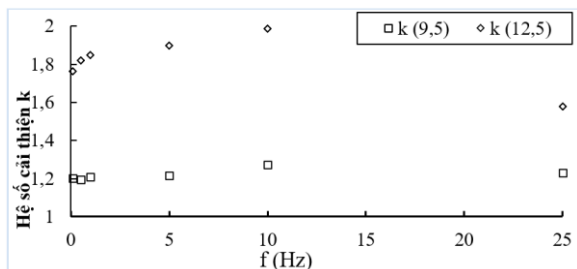
Từ đó có thể nhận xét xu thế là với cả bốn hỗn hợp, E^* nhìn chung tăng theo tần số: tần số cao $\rightarrow$ thời gian tải ngắn $\rightarrow$ hỗn hợp biểu hiện cứng hơn (đặc tính đàn hồi-nhớt). BTNP luôn có E^* lớn hơn BTNC tại cùng tần số, thể hiện lợi thế của nhựa polime dưới tải động.

3.3. Hệ số cải thiện E^* do nhựa PMB1 và ảnh hưởng cấp phối

Để lượng hóa hiệu quả của polime, xác định hệ số cải thiện $k(f) = E^*_{BTNP}(f) / E^*_{BTNC}(f)$. Kết quả tổng hợp được thể hiện trong Bảng 3 và Hình 3.

Bảng 3. Hệ số cải thiện $k(f) = BTNP/BTNC$ theo tần số (25 °C).

f (Hz)	$k(9,5)$	$k(12,5)$
25	1,232	1,580
10	1,273	1,985
5	1,216	1,899
1	1,210	1,847
0,5	1,194	1,818
0,1	1,201	1,763



Hình 3. Hệ số cải thiện k theo tần số f .

Từ đó có thể nhận xét:

- Cấp phối 9,5 mm: $k(f) \sim 1,19-1,27$ (tăng $\sim 20-27\%$) và khá ổn định theo tần số.

- Cấp phối 12,5 mm: $k(f)$ rất lớn, khoảng 1,58–1,99 (tăng $\sim 58-98\%$); đạt cực đại gần 2 lần tại 10 Hz. Điểm nổi bật là BTNP 12,5 cho mức cải thiện E^* vượt trội.

Về mặt cơ học vật liệu, sự ảnh hưởng vượt trội của nhựa PMB1 đến mô đun phức động E^* so với mô đun tĩnh E có thể được làm rõ thông qua cơ chế tương tác đàn hồi-nhớt của cấu trúc vi mô. Nhựa cải tiến PMB1 sở hữu mạng lưới cấu trúc không gian ba chiều từ các mạch polime, giúp cải thiện đáng kể độ nhớt ở nhiệt độ cao và tăng cường tính đàn hồi phục của pha vữa dưới tác dụng của tải trọng động ngắn hạn.

Trong hỗn hợp BTNP 12,5 (cấp phối hạt trung), nhờ khung cốt liệu đá dăm có cấu trúc chèn khóa tốt, đường truyền lực dưới tải trọng động diễn ra rõ rệt; khi đó, vữa nhựa PMB1 đóng vai trò như một lớp đệm đàn hồi có độ dính bám cao, ngăn ngừa sự dịch chuyển tương đối giữa các hạt cốt liệu và hấp thụ năng lượng biến dạng rất tốt, từ đó đẩy hệ số cải thiện $k(f)$ tăng mạnh đến gần 2 lần tại 10 Hz. Ngược lại, ở hỗn hợp BTNP 9,5 (cấp phối hạt mịn), do diện tích bề mặt cốt liệu lớn và cấu trúc hỗn hợp phụ thuộc nhiều vào pha vữa nhựa, khả năng chèn khóa của khung đá kém hơn, dẫn đến hiệu quả tăng cường mô đun động bị giới hạn hơn so với cấp phối hạt lớn.

3.4. Hồi quy $\log_{10}(E^*) - \log_{10}(f)$ trong miền 0,1–10 Hz

3.4.1. Cơ sở lựa chọn miền hồi quy

Trong dữ liệu hiện có, với một số hỗn hợp (đặc biệt BTNP 12,5), E^* tại 25 Hz không tăng tiếp so với 10 Hz (3165,19 MPa ở 10 Hz nhưng 2787,21 MPa ở 25 Hz). Nếu áp dụng hồi quy tuyến tính log-log toàn dải 0,1–25 Hz, độ phù hợp giảm do 25 Hz trở thành điểm “lệch xu thế”. Các nguyên nhân có thể gồm: (i) sai khác mức ứng suất động đặt trước ở mỗi tần số; (ii) giới hạn đo chuyển vị/độ ổn định tín hiệu ở tần số cao; (iii) vật liệu có thể chuyển vùng đáp ứng, khiến quan hệ log-log tuyến tính đơn giản không còn phù hợp ở tải rất ngắn. Vì vậy, để có mô hình thực hành ổn định với dữ liệu hạn chế, hồi quy được thực hiện trong miền 0,1–10 Hz.

3.4.2. Kết quả hồi quy

Kết quả tính toán được thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Hồi quy $\log_{10}(E^*) = a + b \cdot \log_{10}(f)$ trong miền 0,1–10 Hz.

Hỗn hợp	a	b	R^2	Phương trình hồi quy
BTNC 9,5	3,1832	0,1139	0,968	$\log_{10}(E^*) = 3,1832 + 0,1139 \cdot \log_{10}(f)$
BTNP 9,5	3,2683	0,1248	0,990	$\log_{10}(E^*) = 3,2683 + 0,1248 \cdot \log_{10}(f)$
BTNC 12,5	3,1204	0,1033	0,962	$\log_{10}(E^*) = 3,1204 + 0,1033 \cdot \log_{10}(f)$
BTNP 12,5	3,3882	0,1271	0,985	$\log_{10}(E^*) = 3,3882 + 0,1271 \cdot \log_{10}(f)$

Ảnh hưởng của các tham số:

- $R^2 \geq 0,96$ cho cả bốn hỗn hợp $\rightarrow$ quan hệ $\log(E^*)-\log(f)$ trong miền 0,1–10 Hz xấp xỉ tuyến tính tốt.

- a: phản ánh mức E^* nền tại $f \approx 1$ Hz (vì $\log_{10}(1) = 0$). Cụ thể khi $f = 1$ Hz thì $a = \log_{10}E^*$ với E^* tính bằng đơn vị MPa. Do đó, giá trị a cao hơn hàm ý E^* cao hơn trong điều kiện tải “trung bình”. BTNP 12,5 có $a = 3,3882$ lớn nhất $\rightarrow$ phù hợp với E^* lớn nhất tại 1 Hz (2508,34 MPa).

- b: phản ánh mức nhạy cảm theo tần số; b lớn $\rightarrow E^*$ tăng nhanh khi f tăng (tải ngắn hạn). BTNP đều có b lớn hơn BTNC. Đặc biệt, BTNP 12,5 có b = 0,1271 cao hơn BTNC 12,5 (b = 0,1033), cho thấy khi chuyển từ tải chậm sang tải nhanh, BTNP 12,5 “cứng hóa” mạnh hơn, thuận lợi cho chống biến dạng dưới tải ngắn hạn (xe chạy nhanh, gia tải xung ngắn).

3.4.3. Ý nghĩa kỹ thuật của hồi quy log-log

Với mục tiêu kiểm soát chất lượng/so sánh vật liệu, tham số b có thể dùng như một chỉ báo về độ nhạy theo thời gian tải. b cao: vật liệu tăng độ cứng nhanh khi giảm thời gian tải (tăng f), thường liên quan đến thành phần nhựa có tính đàn hồi tốt hơn. b thấp: vật liệu “ít thay đổi” theo f, có thể do cấu trúc vữa/khung cốt liệu chi phối hoặc do vật liệu có đặc trưng nhớt lớn hơn. Trong phạm vi dữ liệu (một mức nhiệt độ), hồi quy log-log cung cấp cách tiếp cận gọn để định lượng xu thế. Nếu hướng đến master curve chuẩn (sigmoidal) phục vụ mô hình hóa cơ học đường, cần mở rộng thí nghiệm nhiều nhiệt độ và dải tần số dày hơn.

Mặc dù mô hình hồi quy tuyến tính log-log trong phạm vi nghiên cứu này mới chỉ khảo sát tại một mức nhiệt độ tiêu chuẩn (25 °C) phục vụ cho mục đích thực hành kiểm soát chất lượng nhanh, kết quả đạt được đã bước đầu định lượng rõ rệt xu thế ứng xử của nhựa polime. Để có được các kết luận mang tính tổng quát và xây dựng đường cong chuẩn phục vụ mô hình hóa cơ học đường, việc mở rộng thí nghiệm ở dải nhiệt độ rộng hơn và tần số dày hơn là hướng nghiên cứu cần thiết tiếp theo của tác giả.

4. Đề xuất chỉ tiêu kiểm soát chất lượng

Từ kết quả E^* , hệ số cải thiện k(f) và hồi quy log-log, có thể đề xuất một bộ chỉ tiêu “thực hành” trong điều kiện thí nghiệm tương ứng (AASHTO TP62, 25 °C):

- E^* (10 Hz, 25 °C): mô phỏng tải ngắn hạn, gần điều kiện tốc độ khai thác cao.
- E^* (1 Hz, 25 °C): mô phỏng tải trung bình, gần xe tải chậm/đặt tải dài hạn.
- Tham số b: hồi quy $\log_{10}(E^*)-\log_{10}(f)$ trong miền 0,1–10 Hz nhằm định lượng nhạy cảm theo tần số.
- Hệ số cải thiện k(f) tại 10 Hz hoặc 1 Hz: để lượng hóa hiệu quả polime so với vật liệu tham chiếu.

Gợi ý áp dụng từ dữ liệu hiện có (mang tính định hướng, chưa

phải ngưỡng tiêu chuẩn):

- BTNP 12,5 đạt $E^*(10 \text{ Hz}) = 3165 \text{ MPa}$ và $k(10 \text{ Hz}) \approx 1,985 \rightarrow$ hiệu quả cải thiện rất rõ rệt.

- BTNP 9,5 đạt $E^*(10 \text{ Hz}) = 2404 \text{ MPa}$ và $k(10 \text{ Hz}) \approx 1,273 \rightarrow$ cải thiện mức trung bình.

Đối với công tác kiểm soát chất lượng thực tế thi công, khuyến nghị giá trị tham số độ dốc b đối với BTNP 12,5 nên định hướng đạt tối thiểu từ 0,115 đến 0,120 nhằm đảm bảo hỗn hợp có đủ độ nhạy và khả năng “cứng hóa” nhanh dưới tải trọng động ngắn hạn.

5. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu có thể đưa ra một số kết luận sau:

- Nhựa PMB1 làm tăng mô đun đàn hồi tĩnh của BTNP so với BTNC khoảng 10–18 % tùy cấp phối.
- Mô đun phức động E^* tăng rõ rệt khi sử dụng nhựa polime, với mức tăng 20–27 % cho cấp phối 9,5 mm và 58–98 % cho cấp phối 12,5 mm trong dải tần số khảo sát.
- Quan hệ $\log_{10}(E^*)-\log_{10}(f)$ trong miền 0,1–10 Hz xấp xỉ tuyến tính tốt với $R^2 \geq 0,96$. Tham số b cho phép định lượng nhạy cảm theo tần số; BTNP có b lớn hơn BTNC ở cả hai cấp phối.
- Điểm 25 Hz có thể gây sai lệch xu thế đối với một số hỗn hợp (đặc biệt BTNP 12,5); do đó, khi hồi quy tuyến tính log-log với bộ dữ liệu hạn chế, khuyến nghị sử dụng miền 0,1–10 Hz.
- Đề xuất sử dụng E^* tại 10 Hz và 1 Hz (25 °C) kết hợp tham số hồi quy b làm chỉ tiêu thực hành phục vụ kiểm soát chất lượng và phân loại bê tông nhựa polime trong điều kiện thí nghiệm tương ứng.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Nega, A., Gedafa, D., & Williams, D. (2024). *Effects of polymer modified binder on asphalt mixes of flexible pavement and its impacts on dynamic modulus*. International Conference on Transportation and Development, ASCE, 185-196. DOI: 10.1061/9780784485538.020.
- [2]. Wang, H., & Chang, L. (2022). *Viscoelastic Characterization and Dynamic Modulus Prediction of Polymer-Modified Asphalt Mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(5), 04022061.
- [3]. TCVN 13567-2:2022. *Bê tông nhựa chặt cốt liệu dựa trên phương pháp thiết kế Marshall – Phần 2: Bê tông nhựa chặt sử dụng nhựa đường Polyme – Thi công và nghiệm thu*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [4]. TCVN 11193:2021. *Nhựa đường polyme – Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [5]. Lê Thái Bình (2015). *Nghiên cứu thực nghiệm các thông số Marshall và mô đun đàn hồi tĩnh nhằm đánh giá chất lượng bê tông nhựa đường polime*. Tạp chí Khoa học Kiến trúc & Xây dựng.
- [6]. Bộ Giao thông Vận tải (2006). *22TCN 211-06: Quy trình thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi của bê tông nhựa*.
- [7]. AASHTO (2002). *TP62: Standard Test Method for Determining Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*.