



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2024.vn.4.4.85-93>

***Corresponding author:**

Email address:

hailt@utt.edu.vn

Received: 18/12/2024

Revised: 28/12/2024

Accepted: 30/12/2024

Experimental investigation on the effect of sasobit additive on the elastic modulus of Stone mastic asphalt

Thanh-Hai Le*, Hoang-Long Nguyen, Bao-Tan Lai

University of Transport Technology, Hanoi 100000, Vietnam

Abstract: This paper shows the results of an experimental study on the elastic modulus of Stone mastic asphalt 12.5 using sasobit additives with content of 1%, 2% and 3%. When using sasobit with increasing content, the $G^*/\sin(\delta)$ value increases correspondingly when compared at the same frequency and temperature; The mixing and compaction temperature of SMA using sasobit decreases compared to the mixing and compaction temperature of SMA without using sasobit. At temperatures of 15°C, 30°C and 60°C, the elastic modulus of the SMA mixture using sasobit with different contents is higher than the elastic modulus of the control SMA mixture (without sasobit). The elastic modulus of the SMA mixture using sasobit with a content of 3% when tested at 15°C reached the highest value. The SMA mixture without sasobit when tested at 60°C had the smallest elastic modulus.

Keywords: Asphalt mixtures, Stone mastic asphalt, elastic modulus, sasobit additive.



Thông tin bài viết

Dạng bài viết:

Bài báo nghiên cứu

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2024.vn.4.4.85-93>

Tác giả liên hệ:

Địa chỉ Email:

hailt@utt.edu.vn

Ngày nộp bài: 18/12/2024

Ngày nộp bài sửa: 28/12/2024

Ngày chấp nhận: 30/12/2024

Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của phụ gia sasobit đến mô đun đàn hồi tĩnh của hỗn hợp Stone Mastic Asphalt (SMA)

Lê Thanh Hải*, Nguyễn Hoàng Long, Lại Bảo Tân

Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt: Nghiên cứu trình bày các kết quả thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của phụ gia sasobit với các hàm lượng khác nhau (1%, 2% và 3%) đến mô đun đàn hồi tĩnh (E tĩnh) của hỗn hợp Stone Mastic Asphalt 12,5 (SMA). Khi sử dụng sasobit với hàm lượng tăng dần thì trị số $G^*/\sin(\delta)$ tăng lên tương ứng khi so sánh ở cùng tần số và nhiệt độ; Nhiệt độ trộn và đầm nén của SMA sử dụng sasobit giảm so với nhiệt độ trộn và đầm nén của SMA không sử dụng sasobit; Ở nhiệt độ 15°C, 30°C và 60°C, E tĩnh của SMA sử dụng sasobit với các hàm lượng khác nhau đều cao hơn E tĩnh của SMA đối chứng (không sử dụng sasobit). E tĩnh của SMA sử dụng sasobit với hàm lượng 3% khi thí nghiệm tại 15°C đạt giá trị lớn nhất. SMA không sử dụng sasobit khi thí nghiệm tại 60°C có E tĩnh đạt giá trị nhỏ nhất.

Từ khóa: Bê tông nhựa, Stone mastic asphalt (SMA), E tĩnh, phụ gia sasobit.

1. Đặt vấn đề

Stone Mastic Asphalt (SMA), hoặc “Stone Matrix Asphalt” do tiến sĩ Zichner phát minh vào năm 1968, và được Mỹ cấp bằng sáng chế số 3797951 - ngày 19 tháng 3 năm 1974 [1]. Trên thế giới, SMA thường được dùng làm lớp mặt cho đường ô tô cấp cao, chịu tải trọng lớn, mặt đường sân bay, mặt cầu. Năm 1984, tên gọi Splittmastixasphalt được đưa vào Quy chuẩn kỹ thuật ZTV bit-StB 1984 của Cộng hòa Liên Bang Đức. Các nước châu Âu khác cũng nghiên cứu và ban hành các tiêu chuẩn liên quan đến SMA. Năm 2006, tiêu chuẩn: European Standard EN 13108-5: Part 5 - Stone Mastic Asphalt được Châu Âu ban hành [2]. Hàm lượng cốt liệu thô của SMA chiếm 70%, cốt liệu mịn từ 12% đến 17%, bột khoáng từ 8% đến 13%. Hàm lượng bitum tối ưu cao hơn hỗn hợp bê tông nhựa chặt thông thường, chiếm từ 5,5% đến 7,5% theo khối lượng hỗn hợp. Để chống hiện tượng chảy nhựa, chất ổn định dạng sợi (như

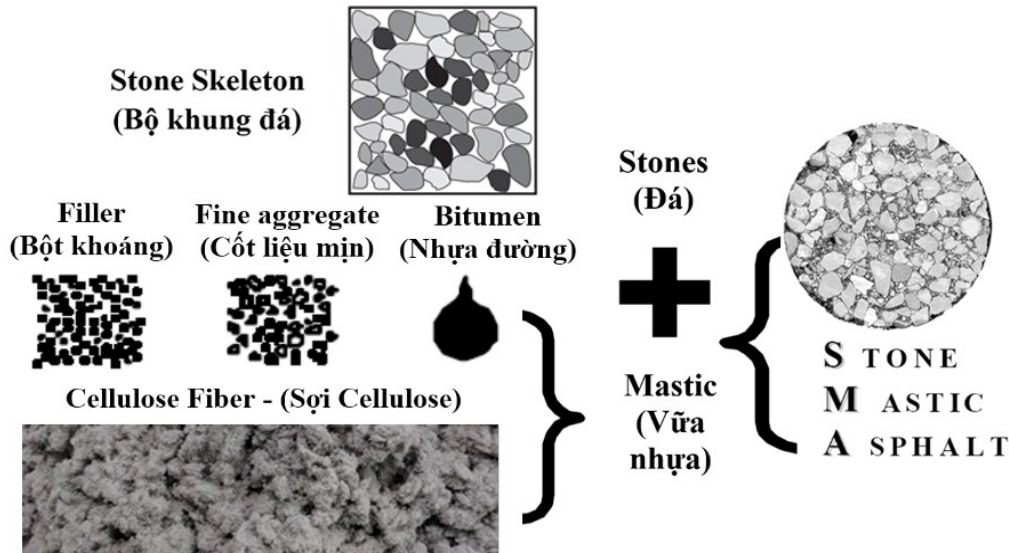
cellulose, bazan, lignin...) được sử dụng với hàm lượng từ 0,2 đến 0,4% (xem Hình 1) [1,3,4,5].

Với cấp phối gián đoạn (gap-graded), do vậy cấu trúc của SMA khác biệt so với cấu trúc của bê tông nhựa (BTN) cấp phối chặt (Dense Grade Asphalt) và BTN rỗng (Open Grade Asphalt). SMA có hàm lượng cốt liệu thô cao đan xen với cốt liệu nhỏ tạo nên bộ khung cấu trúc đá chèn đá (stone-on-stone) vững chắc (xem Hình 2).

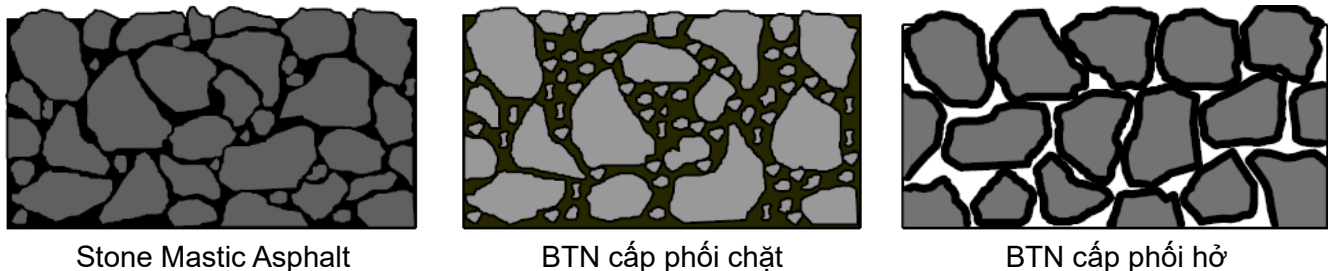
Lượng dư vữa asphalt (bitum, các hạt mịn và chất ổn định) có tác dụng lấp đầy phần rỗng giữa các hạt cốt liệu của SMA, do đó hỗn hợp có độ rỗng dư thấp ($V_a = 2\% - 4\%$). Với cấu trúc như vậy, SMA phù hợp làm lớp mặt đường quốc lộ, đường cao tốc, mặt đường sân bay, đường đua ô tô F1, bãi công-ten-nơ và đường dẫn vào các khu công nghiệp... SMA không những phù hợp với việc xây dựng mới mà còn thích hợp cho việc sửa chữa và nâng cấp để tạo ra lớp phủ mỏng và các lớp bề mặt có độ dày khác nhau [1,3].

Do có những ưu điểm so với công nghệ BTN nóng, BTN ẩm đã được sử dụng phổ biến ở nhiều nước trên thế giới, trong đó có Việt Nam. Các công nghệ BTN ẩm mới nhất có nhiệt độ chế tạo từ 79-140°C, thấp hơn 30-50°C so với BTN nóng thông thường. Công nghệ BTN ẩm có những ưu điểm như: Giảm tiêu thụ năng lượng từ 30%-40%; Giảm

khí thải tại các trạm trộn [Giảm khoảng 30% Carbon dioxide (CO₂)]; Giảm khói (khói dưới ngưỡng phát hiện); Kéo dài được quãng đường vận chuyển và vệt rải thi công khi được chế tạo tại cùng nhiệt độ của BTN nóng; Giảm sự hóa già của chất kết dính và đặc tính nứt ở lớp mặt; Giảm chi phí vòng đời trong một số trường hợp [6].



Hình 1. Cấu trúc của SMA



Hình 2. Cấu trúc ba loại hỗn hợp BTN điển hình [4]

Hiện nay, một số công nghệ BTN ẩm được sử dụng như: (i) bitum bột, (ii) phụ gia hữu cơ, (iii) phụ gia hóa học [6]. BTN ẩm dùng phụ gia hữu cơ sasobit đã được sử dụng tại nhiều quốc gia và tại một số nghiên cứu ở Việt Nam. Phụ gia Sasobit là một chất sáp tổng hợp được sản xuất từ phương pháp Fischer-Tropsch. Đây là loại chất hóa học dạng chuỗi carbon mạch dài với điểm đông tụ ở nhiệt độ lớn hơn 100°C và điểm hóa mềm từ 90-96°C. Hàm lượng phụ gia Sasobit thường được thêm vào ở khoảng 1,5% so với khối lượng bitum, nhưng lượng dùng được giới hạn khuyến cáo từ 0,8 đến 4,0%. Hình dạng phổ biến nhất của Sasobit là ở dạng tinh thể [7]. Sasobit giúp giảm nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp bê tông nhựa từ 30-50°

[8]. Trên thế giới đã có những nghiên cứu về ảnh hưởng của sasobit đến các tính năng của hỗn hợp SMA (Al-Qadi, 2012) [9], tuy nhiên chưa có nghiên cứu nào ở Việt Nam và trên thế giới đánh giá ảnh hưởng của sasobit đến E tĩnh của hỗn hợp SMA.

Nghiên cứu trình bày kết quả thí nghiệm trong phòng, phân tích và nhận xét ảnh hưởng của phụ gia sasobit với các hàm lượng khác nhau đến E tĩnh của SMA ở 3 mức nhiệt độ khác nhau.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

2.1. Vật liệu đầu vào

Nghiên cứu sử dụng cốt liệu thô và cốt liệu mịn được lấy tại Lạng Sơn. Bột khoáng lấy ở Hà Nam.

Nhựa đường PMB III do Công ty TNHH

Nhựa đường Petrolimex Việt Nam được lựa chọn sử dụng trong nghiên cứu.

Phụ gia sasobit được cung cấp bởi Công ty Sasol. Trong nghiên cứu này, PMB III pha cùng sasobit với hàm lượng 1%, 2% và 3% khối lượng của PMB III. Các chỉ tiêu cơ lý của PMB III và PMB III pha sasobit đáp ứng theo tiêu chuẩn 22TCN 319 : 2004 [10]. Kết quả được trình bày ở Bảng 1.

Chất ổn định được sử dụng là sợi cellulose - ARBOCEL ZZ 8/1, do công ty J. Rettenmaier & Söhne (Rosenberg, Đức) cung cấp (xem Hình 3).



Hình 3. Chất ổn định (sợi cellulose)

Các chỉ tiêu cơ bản của vật liệu đầu vào đáp ứng yêu cầu tiêu chuẩn hiện hành và các yêu cầu chung của hỗn hợp SMA.

Toàn bộ thí nghiệm được tiến hành tại phòng thí nghiệm LAS-XD72.

2.2. Thí nghiệm cắt động lưu biến

Mô đun cắt động và góc trễ pha được dùng để tính toán các chỉ tiêu của nhựa theo TCVN 11808:2017 và AASHTO M320.

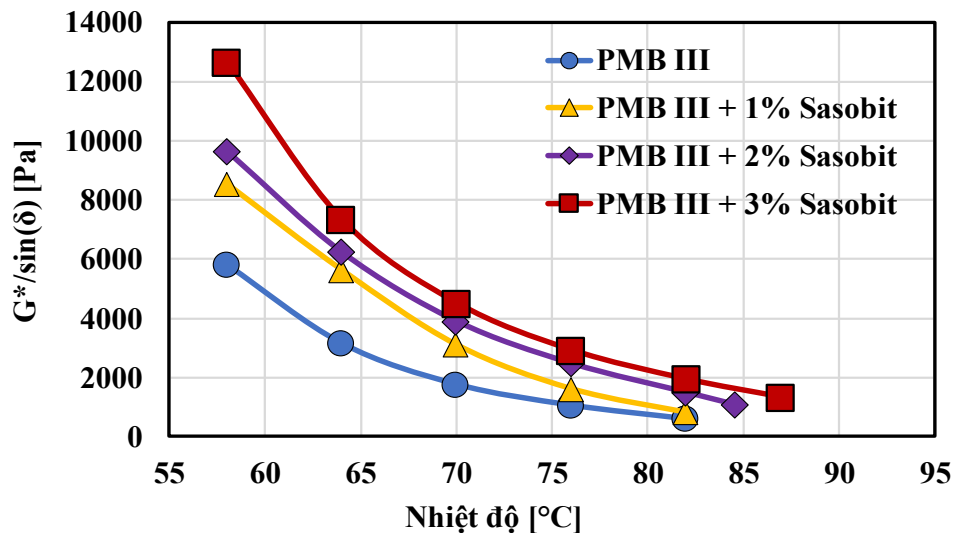
Kết quả tỉ số $G^*/\sin(\delta)$ (Rutting factor) với các mẫu nhựa gốc và nhựa pha sasobit theo nhiệt độ được thể hiện ở Hình 4.

Biểu đồ Hình 4 cho thấy khi sử dụng sasobit với hàm lượng tăng dần (1%, 2% và 3%), giá trị $G^*/\sin(\delta)$ cũng tăng lên (ở cùng tần số, nhiệt độ). PMB III pha phụ gia sasobit (hàm lượng 3%) có $G^*/\sin(\delta)$ lớn nhất ở tất cả các nhiệt độ, nhựa gốc không pha sasobit có giá trị $G^*/\sin(\delta)$ thấp nhất tại tất cả các nhiệt độ (58, 64, 70, 76, 82°C).

Kết quả thử nghiệm cắt động lưu biến của PMB III và PMB III pha sasobit (hàm lượng 1%) tương đương với cấp đặc tính khai thác là PG 76; PMB pha sasobit (hàm lượng 2% và 3%) tương đương với cấp đặc tính khai thác là PG 82. Kết quả thí nghiệm đã cho thấy nhựa gốc cấp PG 76 khi pha 2% và 3% sasobit sẽ tăng lên cấp PG 82. Các nghiên cứu của một số tác giả như Jamshidi, 2012 [11], Hurley, 2005 [12], Liu, 2010 [13] và Anderson, 2014 [14] cũng cho thấy sasobit có tác dụng tăng cấp PG của nhựa đường.

Bảng 1. Các chỉ tiêu cơ lý của nhựa gốc và nhựa pha sasobit với các hàm lượng 1%, 2% và 3%

TT	Chỉ tiêu	Nhựa gốc	Nhựa gốc pha 1% sasobit	Nhựa gốc pha 2% sasobit	Nhựa gốc pha 3% sasobit
1	Độ kim lún ở 25°C (0,1mm)	52	48	44	42
2	Nhiệt độ hoá mềm (°C)	88	90	94	96
3	Nhiệt độ bắt lửa (°C)	245	255	271	276
4	Lượng tổn thất sau khi đun nóng 163°C trong 5 giờ (%)	0,0041	0,0043	0,0045	0,0048
5	Khối lượng riêng ở 25°C (g/cm ³)	1,035	1,030	1,026	1,022
6	Độ dính bám đối với đá (cấp)	Cấp 5	Cấp 5	Cấp 5	Cấp 5
7	Độ đàn hồi ở 25°C (%)	84,2	80,2	76,1	74,1



Hình 4. Tỉ số $G^*/\sin\delta$ của nhựa gốc và nhựa pha phụ gia sasobit với hàm lượng 1%, 2% và 3%

2.3. Nhiệt độ trộn và đầm nén của SMA và SMA sử dụng sasobit

Thử nghiệm độ nhớt Brookfield ở nhiệt độ khác nhau, xây dựng đồ thị log quan hệ độ nhớt - nhiệt độ để lựa chọn nhiệt độ trộn, đầm nén khi sử dụng PMB III và PMB III pha sasobit với các hàm lượng khác nhau theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM 2493. Kết quả cho thấy: Nhiệt độ trộn, đầm nén của BTN sử dụng sasobit giảm so với nhiệt độ trộn, đầm nén của BTN không sử dụng sasobit từ 19-27°C. Có được kết quả này do độ nhớt của sasobit cao hơn so với độ nhớt của nhựa khi ở dưới nhiệt độ nóng chảy nhưng ở nhiệt độ cao độ nhớt lại thấp hơn so với độ nhớt của chất kết dính bitum. Sasobit sẽ phân tán trong bitum ở khoảng nhiệt độ

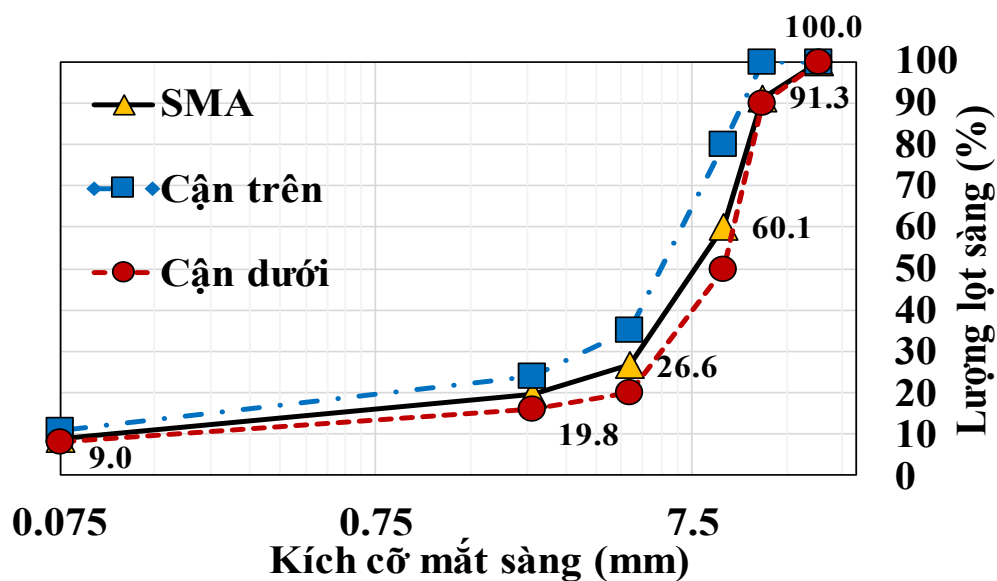
từ 65-115°C dưới dạng các tinh thể hình que.

3. Thành phần cấp phối và hàm lượng nhựa tối ưu

Cấp phối thiết kế hỗn hợp SMA (cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5mm) theo tiêu chuẩn AASHTO M325 [15] (xem Hình 5).

Hàm lượng bitum tối ưu của hỗn hợp được xác định theo phương pháp Marshall. SMA không sử dụng sasobit và hỗn hợp SMA sử dụng sasobit với hàm lượng 1%, 2%, 3% đều thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn AASHTO M325.

Tất cả hỗn hợp SMA sử dụng hàm lượng nhựa tối ưu là 6,6%. Chất ổn định cellulose được cho vào hỗn hợp trong quá trình trộn khô, với hàm lượng 0,3% theo khối lượng hỗn hợp.



Hình 5. Cấp phối thiết kế SMA theo AASHTO M325

4. Kế hoạch, phương pháp và quá trình thí nghiệm E tĩnh

E tĩnh của các loại BTN được thí nghiệm ở 3 mức nhiệt độ 15°C, 30°C và 60°C. Bảng 2 thể hiện số lượng mẫu được chế tạo trong nghiên cứu.

E tĩnh được thí nghiệm theo mô hình nén từ biến tĩnh theo phụ lục C của tiêu chuẩn cơ sở TCCS 38 : 2022 [16]. Mẫu thí nghiệm có hình trụ có kích thước 100x100 mm. Mẫu được chế bị bởi thiết bị đầm xoay. Sử dụng máy Universal Testing Machine để nén mẫu. Đặt mẫu trong buồng bảo ôn có nhiệt độ bằng nhiệt độ thí nghiệm trước 2 giờ. Sau đó tiến hành nén mẫu theo từng mức nhiệt độ. Gia tải cho mẫu và theo dõi biến dạng phát triển theo thời gian đến khi tốc độ tăng biến dạng không vượt quá 0,01 mm/phút, thì ghi nhận biến dạng của

mẫu H_1 . Dỡ tải, mẫu phục hồi biến dạng, ghi nhận biến dạng mẫu sau dỡ tải H_2 (xem Hình 6). Quá trình nén mẫu và thí nghiệm xác định E tĩnh được thể hiện trong Hình 7.

Công thức tính biến dạng đàn hồi tương đối:

$$\varepsilon_{dh} = \frac{H_2 - H_1}{H_0} \quad (1)$$

trong đó:

H_0 - chiều cao lúc đầu của mẫu;

H_1 - chiều cao của mẫu thí nghiệm khi chịu tải;

H_2 - chiều cao của mẫu thí nghiệm khi dỡ tải.

Công thức tính E tĩnh:

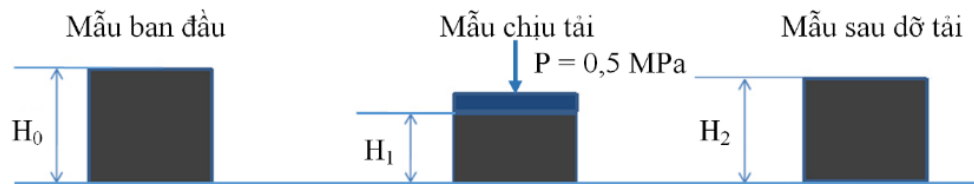
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

trong đó:

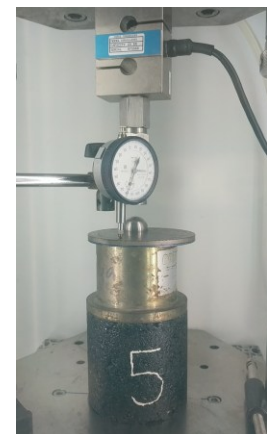
σ - ứng suất nén thí nghiệm, $\sigma = 0,5 \text{ MPa}$.

Bảng 2. Số mẫu thí nghiệm E tĩnh

Hỗn hợp	Ký hiệu	Loại chất kết dính/ phụ gia	Số mẫu thí nghiệm ở nhiệt độ			Tổng số mẫu
			15°C	30°C	60°C	
SMA đối chứng	SMA đối chứng	PMB III	3	3	3	9
SMA sử dụng nhựa PMB III pha phụ gia sasobit với hàm lượng 1%	SMA 1% sasobit	PMB III + 1% sasobit	3	3	3	9
SMA sử dụng nhựa PMB III pha phụ gia sasobit với hàm lượng 2%	SMA 2% sasobit	PMB III + 2% sasobit	3	3	3	9
SMA sử dụng nhựa PMB III pha phụ gia sasobit với hàm lượng 3%	SMA 3% sasobit	PMB III + 3% sasobit	3	3	3	9
TỔNG CỘNG			12	12	12	36



Hình 6. Thí nghiệm xác định E tĩnh



Hình 7. Quá trình thí nghiệm xác định E tĩnh

5. Kết quả thí nghiệm và phân tích

Từ các kết quả thí nghiệm, sử dụng phần mềm Minitab 19 thiết kế thí nghiệm tổng quát (General full factorial design). Số lần lặp thí nghiệm 3. Phân tích phương sai ANOVA và phân tích hậu định phát hiện sai khác theo chuẩn Tukey. Các biểu đồ phân tích được thể hiện trên Hình 8, 9 và 10.

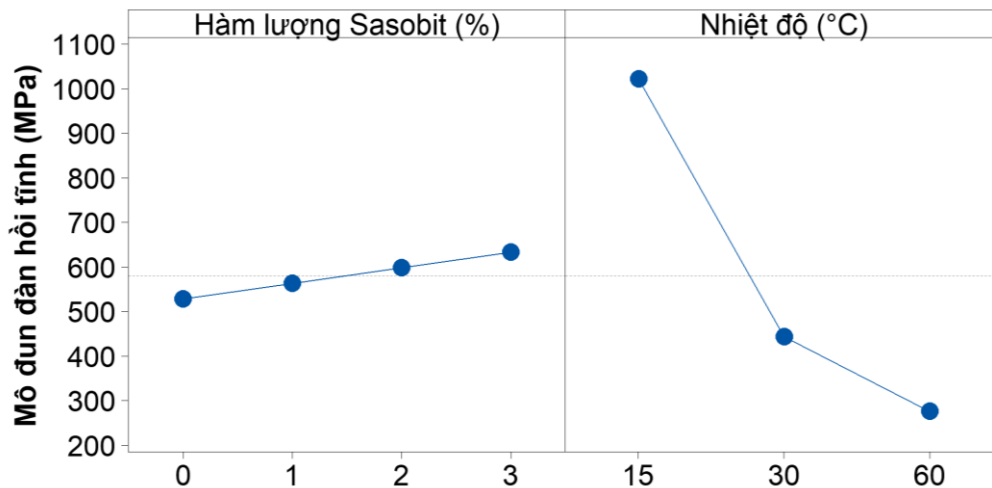
Kết quả so sánh các yếu tố ảnh hưởng chính đến E tĩnh được thể hiện trên Hình 8 cho thấy, nhiệt độ là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến E tĩnh tiếp theo đó là yếu tố hàm lượng sasobit.

Khi nhiệt độ tăng dần thì E tĩnh giảm dần. Ở 15°C, E tĩnh cao nhất, ở 60°C, E tĩnh nhỏ nhất. Đặc biệt, khi nhiệt độ tăng từ 15°C lên 30°C thì E tĩnh giảm mạnh (thể hiện bằng độ dốc đứng của đoạn thẳng). Khi nhiệt độ tăng từ 30°C lên 60°C, E tĩnh

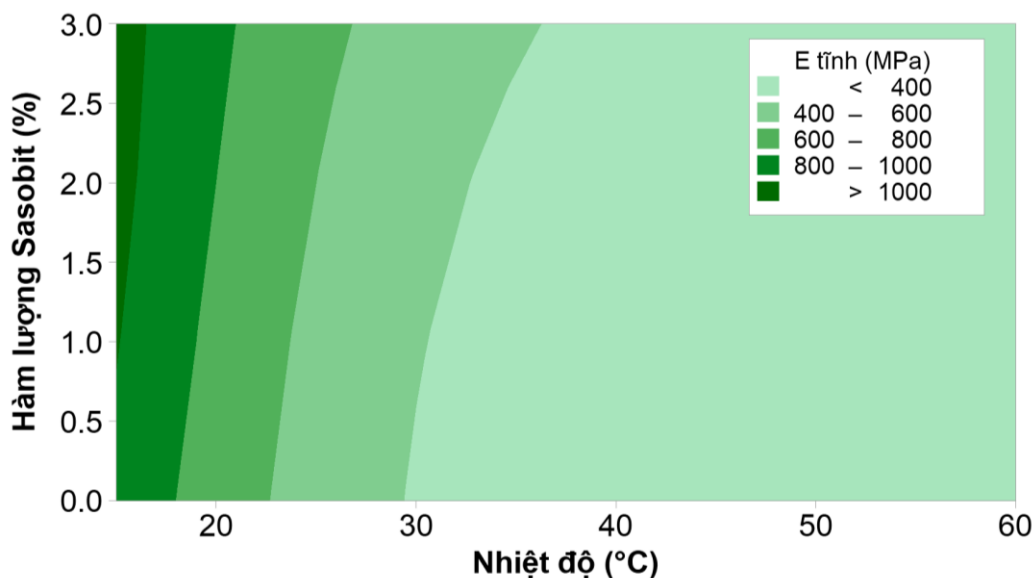
tiếp tục giảm, nhưng mức độ giảm ít hơn. Do chất dính kết của BTN là nhựa đường - là loại vật liệu rất nhạy cảm với nhiệt độ. Khi ở nhiệt độ cao, tính nhớt của nhựa đường suy giảm, do vậy, ảnh hưởng đáng kể đến E tĩnh của hỗn hợp BTN.

Biểu đồ ảnh hưởng hàm lượng sasobit đến E tĩnh có dạng tuyến tính, trong khi đó biểu đồ ảnh hưởng của nhiệt độ đến E tĩnh không phải là dạng tuyến tính mà là bậc 2 hoặc hàm logarit.

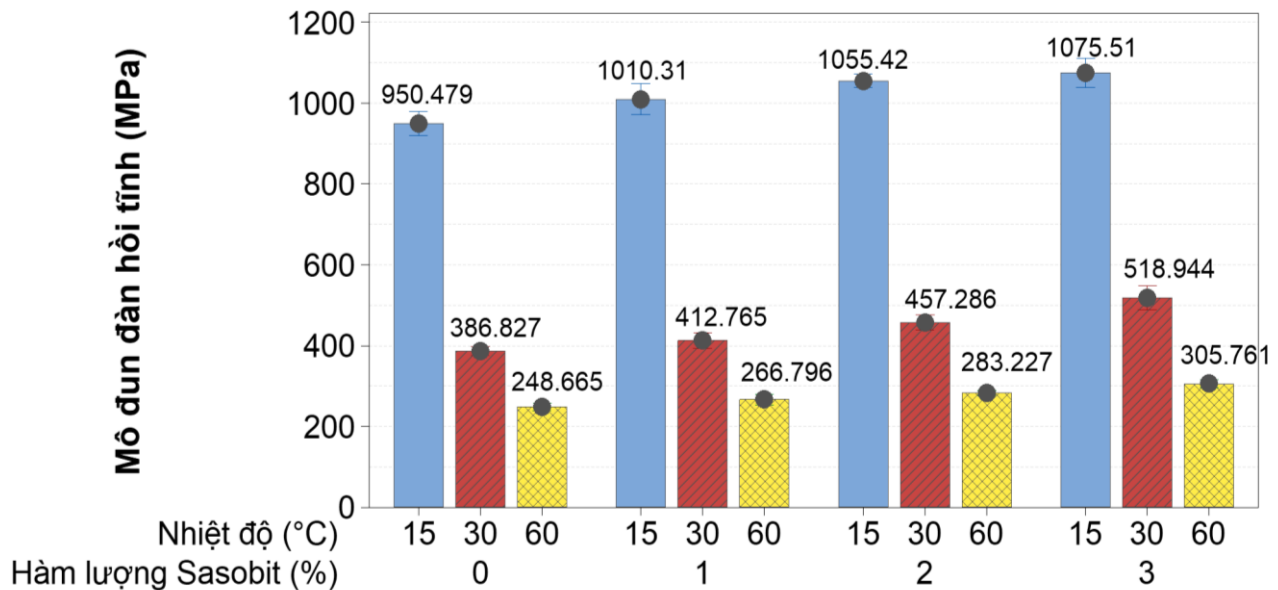
Biểu đồ đường đồng mức (Hình 9) cho thấy rõ hơn ảnh hưởng của hai yếu tố (nhiệt độ và hàm lượng sasobit) đến mô đun đàn hồi tĩnh của SMA. Khi nhiệt độ càng cao thì E tĩnh đạt giá trị càng nhỏ và ngược lại. Tuy nhiên, việc sử dụng phụ gia sasobit đã giúp cải thiện E tĩnh khi làm việc ở nhiệt độ cao.



Hình 8. Yếu tố ảnh hưởng chính đến E tĩnh



Hình 9. Biểu đồ đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của hàm lượng Sasobit và nhiệt độ đến E tĩnh



Hình 10. E tĩnh của 4 loại hỗn hợp BTN

Kết quả thí nghiệm ở Hình 10 cho thấy, ở 3 mức nhiệt độ thí nghiệm, cả 3 hỗn hợp khi sử dụng sasobit đều có E tĩnh lớn hơn hỗn hợp đối chứng (không dùng sasobit).

Khi sử dụng sasobit với hàm lượng 3%, E tĩnh của hỗn hợp SMA đạt giá trị lớn nhất là 1.075,51 MPa, 518,94 MPa và 305,76 MPa; Khi không sử dụng sasobit, E tĩnh của SMA đạt nhỏ nhất là 950,48 MPa, 386,83 MPa và 248,67 MPa tương ứng với 3 mức nhiệt độ 15°C, 30°C và 60°C.

Khi hàm lượng sasobit sử dụng tăng dần từ 1% lên 3%, giá trị E tĩnh của các hỗn hợp BTN tăng tương ứng (so với SMA không dùng sasobit) lần lượt là 6%, 11% và 13% (ở nhiệt độ 15°C); 7%, 18% và 34% (ở nhiệt độ 30°C); 7%, 14% và 23% (ở nhiệt độ 60°C).

Khi nhiệt độ thí nghiệm là 15°C, E tĩnh của SMA đối chứng đạt giá trị nhỏ nhất (950,48 MPa), E tĩnh của SMA sử dụng sasobit (hàm lượng 3%) đạt giá trị lớn nhất (1.075,51 MPa), tăng 13%. Tuy nhiên, khi thí nghiệm ở nhiệt độ 30°C và 60°C thì mức độ chênh lệch thể hiện rõ rệt, với mức tăng là tương ứng là 34% và 23%. Nguyên nhân là do nhựa đường sử dụng trong thí nghiệm được tăng cấp theo PG khi trộn thêm phụ gia sasobit.

6. Kết luận

Qua các kết quả nghiên cứu đánh giá E tĩnh

của 4 loại hỗn hợp SMA phụ gia sasobit với hàm lượng khác nhau 1%, 2%, 3% và hỗn hợp SMA đối chứng, một số kết luận sau được đưa ra:

- Ở cùng tần số và nhiệt độ, hỗn hợp sử dụng sasobit với hàm lượng tăng dần (1% đến 3%) thì giá trị $G^*/\sin(\delta)$ cũng tăng lên tương ứng.

- Sử dụng sasobit giúp giảm nhiệt độ trộn và đầm nén của hỗn hợp SMA so với mẫu đối chứng (không sử dụng sasobit) từ 19 - 27°C.

- Sử dụng sasobit với hàm lượng tăng dần từ 1% đến 3%, giúp tăng giá trị E tĩnh của hỗn hợp SMA lên tương ứng. SMA sử dụng sasobit với hàm lượng 3% khi thí nghiệm tại 15°C đạt giá trị lớn nhất (1.075,51 MPa).

References

- [1] K. Blazejowski. (2011). *Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [2] H. Erdlen, J. Rettenmaier & Söhne. (2018). *SMA: The History (presentation)*, 1st International Conference Stone Matrix Asphalt, Atlanta, Georgia, USA, 2018.
- [3] H. Erdlen, J. Yu. (2000). *Stone mastic asphalt: Pavement technology for the new millennium*. Road Engineering Association of Asia and Australasia (REAAA) Conference, 10th, 2000, Tokyo, Japan.

- [4] E.R. Brown, J.E. Haddock, R.B. Mallick, T.A. Lynn. (1997). Development of mixture design procedure for stone mastic asphalt. *National Center for Asphalt Technology*.
- [5] B.D. Prowell, D.E. Watson, G.C. Hurley, E.R. Brown. (2010). Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for airfield pavements. *2010 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Federal Aviation Administration, American Association of Airport Executives*.
- [6] S.D. Capitão, L.G. Picado-Santos, F. Martinho. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 1016-1024.
- [7] N.N. Lân, Đ.V. Đông, N.H. Long. (2019). Thực nghiệm đánh giá ứng xử lún vết hằn bánh xe và ứng xử nứt của hỗn hợp bê tông asphalt ẩm sử dụng vật liệu tái chế mặt đường asphalt và phụ gia Sasobit. *Tạp chí Giao thông vận tải*, số 3.
- [8] Đ.V. Đông. (2021). Nghiên cứu thiết kế, chế tạo bê tông asphalt tái chế ẩm và ứng dụng trong xây dựng đường ô tô, mã số KC.02.16/16-20. *Đề tài Nghiên cứu ứng dụng và phát triển công nghệ cấp quốc gia, Bộ Khoa học và Công nghệ*.
- [9] I.L. Al-Qadi, J. Baek, Z. Leng, H. Wang, M. Doyen, J. Kern, S.L. Gillen. (2012). Short-term performance of modified stone matrix asphalt (SMA) produced with warm mix additives. *Illinois Center for Transportation*.
- [10] Bộ Giao thông vận tải. (2004). 22 TCN 319-04 (2004), Tiêu chuẩn vật liệu nhựa đường polime (yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thí nghiệm). Tiêu chuẩn ngành Bộ GTVT 2004.
- [11] A. Jamshidi, M.O. Hamzah, M.Y. Aman. (2012). Effects of Sasobit® content on the rheological characteristics of unaged and aged asphalt binders at high and intermediate temperatures. *Materials Research*, 15(4), 628-638.
- [12] G.C. Hurley, B.D. Prowell. (2005). Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt. NCAT report. *National Center for Asphalt Technology*.
- [13] J. Liu. (2010). Evaluation of warm mix asphalt for Alaska conditions. *Alaska University Transportation Center*.
- [14] K. Anderson, M. Russell, J. Uhlmeier, J. Weston, J. Roseburg, T. Moomaw, J. De Vol. (2014). Warm Mix Asphalt Final Report (No. WA-RD 723.2). *Washington State Department of Transportation*.
- [15] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). AASHTO M325, Standard Specification for Stone Matrix Asphalt.
- [16] Bộ Giao thông vận tải. (2022). TCCS 38:2022/TCĐBVN, Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế.