



EVALUATION OF PERFORMANCE OF WARM MIX ASPHALT WITH COPOLYMER STYRENE-BUTADIENE-STYRENE (SBS)

Lan Ngoc Nguyen^{1*}, Nam Ngoc Nguyen²

¹University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.

²Tan Phong Construction and Consulting Company, No 156 Xa Dan 2 Lane, Ha Noi, Vietnam.

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 25/04/2024

Revised: 25/05/2024

Accepted: 30/05/2024

Published online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.11>

* Corresponding author

Email: nguyenngooclan@utc.edu.vn; Tel: +84902119278

Abstract. Warm mix asphalt (WMA) technology is increasingly being applied in many countries due to its technical and environmental benefits. This is a technological solution that can reduce the production and compaction temperature by 20-40°C compared hot mix asphalt (HMA). To reduce the mixing and compaction temperature of WMA, the technologies foamed bitumen, chemical additives or organic additives were often used in the past. Technology solutions for WMA additives based on Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) have recently been researched and applied widely because they can improve the hardness and toughness of WMA. This paper presents the results of experimental research evaluating the performance of WMA using SBS-based additives with the trade name Zero-M. The experimental results were compared with WMA using Sasobit additives and hot mix asphalt (HMA). The results showed that the mixtures using Zero-M and Sasobit additives had an average of 49,0% and 37,9 lower rutting, respectively, than the HMA. The Zero-M additive not only improves the hardness of the mixture but also improves the toughness through the $I_{75}/|m_{75}|$ ratio and CT_{Index} , compared to the HMA and the mixture using Sasobit, the WMA using Zero-M additive has the highest $I_{75}/|m_{75}|$ ratio and CT_{Index} . The aging ratio of the WMA using Zero-M and Sasobit additives is higher than HMA.

Keywords: Warm mix asphalt, copolymer Styrene-Butadiene-Styrene, rutting resistance, cracking resistance, cracking Tolerance Index, aging ratio.

@2024 University of Transport and Communications



ĐÁNH GIÁ TÍNH NĂNG CỦA BÊ TÔNG ASPHALT ẤM SỬ DỤNG PHỤ GIA GỐC COPOLYMER STYRENE-BUTADIENE-STYRENE (SBS)

Nguyễn Ngọc Lan^{1*}, Nguyễn Ngọc Nam²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

²Công ty Tư vấn và Xây dựng Tân Phong, Số 156 Ngõ Xã Đàn 2, Hà Nội, Việt Nam.

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 25/04/2024

Ngày nhận bài sửa: 25/05/2024

Ngày chấp nhận đăng: 30/05/2024

Ngày xuất bản Online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.11>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyennogoclan@utc.edu.vn; Tel: +84902119278

Tóm tắt. Công nghệ bê tông asphalt ấm đang ngày càng được ứng dụng phổ biến ở các nước do các hiệu quả đem lại về mặt kỹ thuật và môi trường. Đây là giải pháp công nghệ có thể giảm được nhiệt độ trộn và đầm nén từ 20-40°C so với công nghệ bê tông asphalt nóng truyền thống. Để có thể giảm được nhiệt độ sản xuất và thi công hỗn hợp bê tông asphalt, các công nghệ bitum bột, phụ gia hóa học hay các phụ gia hữu cơ gốc paraffin wax thường được sử dụng trước đây. Giải pháp công nghệ phụ gia cho bê tông asphalt ấm dựa trên gốc copolymer Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) gần đây được nghiên cứu và ứng dụng nhiều do có thể cải thiện được độ cứng và độ dẻo dai cho hỗn hợp. Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá tính năng của hỗn hợp bê tông asphalt ấm sử dụng phụ gia gốc SBS có tên thương mại là Zero-M. Các kết quả thực nghiệm được so sánh đối chứng với hỗn hợp bê tông asphalt ấm sử dụng phụ gia gốc paraffin wax có tên thương mại là Sasobit và hỗn hợp bê tông asphalt nóng truyền thống (Hot Mix Asphalt – HMA). Kết quả cho thấy rằng, hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M và Sasobit có độ lún vệt hằn bánh xe thấp hơn trung bình lần lượt 49,0% và 37,9 so với hỗn hợp HMA. Phụ gia Zero-M không những cải thiện độ cứng của hỗn hợp mà còn cải thiện cả độ dẻo dai và sức kháng nứt thông qua hệ số $I_{75}/|m_{75}|$ và chỉ số CT_{Index} , so với hỗn hợp HMA và hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit, hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M có hệ số $I_{75}/|m_{75}|$ và chỉ số CT_{Index} cao nhất. Hệ số lão hóa của hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M và Sasobit đều cao hơn so với hỗn hợp HMA.

Từ khóa: hỗn hợp bê tông asphalt ấm, copolymer Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), paraffin wax, sức kháng lún vệt bánh xe, chỉ số kháng nứt, hệ số lão hóa.

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhằm thực hiện các cam kết của của Hội nghị về biến đổi khí hậu của Liên hợp quốc, ngành công nghiệp mặt đường asphalt của các nước đang có những nỗ lực để hướng đến mức phát thải dòng CO₂ bằng không vào năm 2050. Nhiều giải pháp đã được nghiên cứu ứng dụng, trong đó giải pháp giảm nhiệt độ sản xuất và thi công hỗn hợp asphalt thấp hơn so với hỗn hợp asphalt truyền thống được nhiều công ty, nhà thầu áp dụng. Công nghệ bê tông asphalt ấm (Warm Mix Asphalt-WMA) thường được biết đến là giải pháp công nghệ có thể giảm được 20°C đến 40°C so với công nghệ asphalt nóng truyền thống [1]. Một số hiệu quả có thể đạt được của công nghệ bê tông asphalt ấm như hỗ trợ tối đa việc đầm nén hỗn hợp, giảm mức phát thải khí nhà kính có thể lên đến 40 %, giảm mức tiêu thụ năng lượng có thể lên đến 35 % so với công nghệ bê tông asphalt nóng truyền thống HMA [2-5].

Ba nhóm công nghệ WMA thường được ứng dụng là công nghệ phụ gia hữu cơ, công nghệ phụ gia hóa học và công nghệ bitum bột [6]. Liên quan đến chi phí giá thành của hỗn hợp, công nghệ bitum bột được sử dụng nhiều nhất nhưng hỗn hợp thường kém ổn định hơn so với công nghệ sử dụng phụ gia hữu cơ và hóa học, công nghệ phụ gia hữu cơ và phụ gia hóa học được sử dụng ít hơn vì có chi phí cao hơn so với công nghệ bitum bột [6]. Công nghệ WMA có thể kết hợp sử dụng các vật liệu như RAP, polymers, crumb rubber. Ứng dụng kết hợp phụ gia WMA với phụ gia polymer SBS hoặc crumb rubber đã được chứng minh không những giảm nhiệt độ hỗn hợp mà còn cải thiện được các tính năng ngắn hạn và dài hạn cho hỗn hợp WMA. Thêm phụ gia Sasobit vào chất kết dính asphalt biến tính SBS (PMA) đã giảm nhiệt độ sản xuất, thi công, tăng tính ổn định với nhiệt độ cao và độ bền của hỗn hợp [7]. Nghiên cứu của Mo và các cộng sự (2012) cho thấy rằng, kết hợp phụ gia WMA loại Rediset với phụ gia SBS đã cải thiện lớn khả năng đầm nén của hỗn hợp, nhưng tính năng kháng hằn lún vệt bánh xe không đạt được tương đương khi so sánh với hỗn hợp sử dụng chất kết dính không biến tính bởi phụ gia Rediset [8].

Một nghiên cứu để giảm nhiệt độ hỗn hợp asphalt sử dụng phụ gia Gilsonite, phụ gia Sasobit đã được ứng dụng kết hợp [9], kết quả cho thấy rằng kết hợp phụ gia Sasobit với Gilsonite không những giảm nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp mà còn cho phép sử dụng hàm lượng Gilsonite cao hơn. Ngoài ra, các tính năng biến dạng không hồi phục, giá trị IDT đã tăng lên. Kết quả cũng hoàn toàn tương tự khi kết hợp phụ gia Sasobit với graphene oxide [10-12]. Hỗn hợp asphalt sử dụng phụ gia crumb rubber cải thiện đáng kể khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe, kháng nứt mỏi, nứt nhiệt độ thấp [13, 14]. Tuy nhiên, sử dụng phụ gia crumb rubber sẽ làm tăng nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp bê tông asphalt biến tính. Các phụ gia WMA như Sasobit, Aspha-min, hay Evotherm 3G có thể sử dụng kết hợp với crumb rubber để giảm độ nhớt chất kết dính, tăng sức kháng hằn lún vệt bánh xe và sức kháng nứt [15-17]. Nghiên cứu được thực hiện bởi [18-20] kết luận rằng, để giảm nhiệt độ trộn và thi công, tính năng ở nhiệt độ thấp, hỗn hợp asphalt biến tính phụ gia crumb rubber nên kết hợp các loại phụ gia WMA như Evotherm 3G, Evotherm DAT, và Aspha-min. Quá trình trộn phụ gia biến tính với chất kết dính asphalt có thể ảnh hưởng đến tính chất của bitum biến tính nghiên cứu được thực hiện bởi [21], đã tiến hành ba phương pháp trộn phụ gia biến tính với chất kết dính asphalt: 1) chuẩn bị chất kết dính asphalt biến tính rubber trước sau đó trộn với phụ gia Evotherm DAT, 2) trộn phụ gia rubber với Evotherm DAT trước sau đó trộn với chất kết dính asphalt, 3) cho phụ gia Evotherm DAT trong quá trình biến tính chất kết dính asphalt với phụ gia rubber. Kết quả cho thấy rằng, phương pháp một và hai cho hiệu quả tiết kiệm năng lượng hơn so với phương pháp ba. Tuy nhiên, hai phương pháp này lại ảnh hưởng tiêu cực đến các tính chất lưu biến. Ứng dụng phụ gia Sasobit vào hỗn hợp asphalt có chứa phụ gia cao su lão

hóa theo phương pháp trộn khô đã giảm được 15°C, nhưng sức kháng hàn lún vệt bánh xe và sức kháng nứt giảm xuống do giảm nhiệt độ đầm nén [22].

Như vậy có thể thấy rằng, hầu hết các ứng dụng phụ gia WMA với các phụ gia polymer như SBS hay cao su lão hóa đều là kết hợp trong quá trình trộn, hoặc phụ gia WMA trộn vào chất kết dính asphalt đã được biến tính bởi phụ gia polymer. Công nghệ này có thể làm tăng chi phí trong quá trình sản xuất và khó kiểm soát chất lượng hỗn hợp. Giải pháp công nghệ WMA được nghiên cứu, đánh giá ở đây là sử dụng phụ gia WMA dạng hạt được chế tạo dựa trên gốc SBS kết hợp với các hợp chất để giảm nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp. Loại phụ gia này được nghiên cứu và phát triển bởi Công ty TNHH đường bộ Hansoo và có tên thương mại là Zero-M. Phụ gia Zero-M có thể trộn với hỗn hợp cốt liệu và bitum trong quá trình trộn hoặc trộn với bitum nguyên gốc trước sau đó trộn với cốt liệu. Trong phạm vi nghiên cứu ở đây, phụ gia Zero-M được trộn với hỗn hợp cốt liệu và chất kết dính bitum 60/70, sau đó tiến hành thực nghiệm đánh giá ứng xử lún vệt hàn bánh xe và ứng xử nứt của các hỗn hợp bê tông asphalt. Các kết quả thí nghiệm đánh giá tính năng được so sánh với hỗn hợp WMA sử dụng phụ gia gốc paraffin wax có tên thương mại là Sasobit và hỗn hợp bê tông asphalt nóng truyền thống.

2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu chế tạo

Bột khoáng. Bột khoáng sử dụng trong nghiên cứu là bột đá vôi có 95% khối lượng hạt lọt qua cỡ sàng 0,075 mm. Các chỉ tiêu thỏa mãn theo TCVN 13567-1: 2022.

Phụ gia. Hai loại phụ gia dùng cho hỗn hợp bê tông asphalt ấm là phụ gia copolymer gốc Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) có tên thương mại là Zero-M và phụ gia hữu cơ gốc paraffin wax có tên thương mại là Sasobit. Theo khuyến cáo của nhà sản xuất, tỷ lệ phụ gia Zero-M và Sasobit được lựa chọn đánh giá lần lượt là 14% và 20% theo khối lượng chất kết dính. Hình 1, Hình 2 và Bảng 1, Bảng 2 lần lượt thể hiện màu sắc, hình dạng và các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia Zero-M và Sasobit.

Chất kết dính bitum. Bitum được sử dụng trong nghiên cứu là loại bitum quánh mức 60/70. Các chỉ tiêu kỹ thuật của loại bitum này đều đáp ứng theo quy định của TCVN 13567-1: 2022.



Hình 1. Phụ gia Zero-M.



Hình 2. Phụ gia Sasobit.

Bảng 1. Các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia Zero-M.

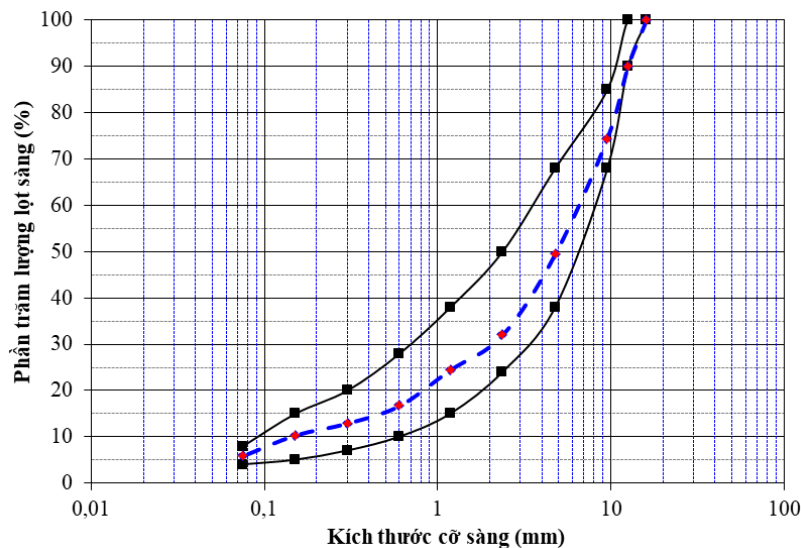
STT	Tên chỉ tiêu, đơn vị	Giá trị	Tiêu chuẩn thí nghiệm
1	Điểm nhiệt độ kết tinh, °C	≈ 100	DIN-ISO 2207
2	Điểm nhiệt độ hóa mềm, °C	150-160	ASTM D 3954
3	Điểm chớp cháy, °C	285	-
4	Tỷ trọng ở 25°C	0,95	DIN 51 757

Bảng 2. Các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia Sasobit [23].

STT	Tên chỉ tiêu, đơn vị	Giá trị	Tiêu chuẩn thí nghiệm
1	Điểm nhiệt độ kết tinh, °C	≈ 100	DIN-ISO 2207
2	Điểm nhiệt độ hóa mềm, °C	112-120	ASTM D 3954
3	Điểm chớp cháy, °C	285	-
4	Tỷ trọng ở 25°C	0,95	DIN 51 757
5	Tỷ trọng ở 140°C	0,75	DIN 51 757
6	Độ nhớt ở 135°C, mm ² /s	10-14	DIN 51 562

2.2. Thành phần hỗn hợp

Hỗn hợp cốt liệu được lấy từ các hotbin của trạm trộn, bao gồm các loại: Đá 12,5x16 (Bin 1), Đá 6x12,5 (Bin 2), Đá 0x6 (Bin 3) và Bột đá. Trên cơ sở thành phần hạt của các loại cốt liệu và bột đá, nghiên cứu tiến hành phối trộn các tỷ lệ thành phần. Hình 4 thể hiện thành phần hạt của hỗn hợp vật liệu khoáng sau khi phối trộn. Kết quả cho thấy rằng, thành phần hạt của hỗn hợp vật liệu khoáng đảm bảo theo quy định của TCVN 13567-1: 2022.



Hình 3. Thành phần hạt của các hỗn hợp vật liệu khoáng.

Trên cơ sở thành phần hạt của hỗn hợp vật liệu khoáng, nghiên cứu tiến hành xác định hàm lượng bitum tối ưu theo hướng dẫn của TCVN 8820: 2011. Bảng 4 thể hiện kết quả thí

nghiệm các chỉ tiêu của các hỗn hợp bê tông asphalt nóng (HMA), bê tông asphalt ấm sử dụng phụ gia Sasobit và Zero-M ứng với các hàm lượng bitum tối ưu.

Bảng 4. Nhiệt độ chế tạo và các chỉ tiêu kỹ thuật của hỗn hợp.

Chỉ tiêu	Loại hỗn hợp			Giới hạn tiêu chuẩn
	HMA 60/70	WMA Sasobit	WMA Zero-M	
Hàm lượng bitum tối ưu, %	4,7	4,6	4,4	-
Nhiệt độ trộn, °C	160	140	130	-
Nhiệt độ đầm, °C	145	125	115	-
Độ rỗng dư, V_a (%)	5,2	5,1	4,8	3 ÷ 6 %
Độ rỗng hỗn hợp VLK, VMA (%)	14,1	13,8	13,9	Min 13%
Độ rỗng lấp đầy bitum, VFA (%)	71,2	69,5	67,2	65 ÷ 75 %
Độ ổn định Marshall, kN	10,6	11,5	13,1	Min 8 kN
Độ dẻo Marshall, mm	3,5	3,1	3,6	2 ÷ 4 %

Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu của các hỗn hợp ứng với hàm lượng bitum tối ưu đều thỏa mãn theo TCVN 13567: 2022.

2.3. Thí nghiệm tính năng

2.3.1 Thí nghiệm hằn lún vết bánh xe

Các mẫu thí nghiệm Hamburg Wheel-Track test (HWTT) được chế bị trong phòng thí nghiệm với kích thước 320x260x50 mm, độ rỗng dư bằng $7 \pm 1,0$ %. Thí nghiệm HWTT được thực hiện trong nước ở 50°C, số lượt tác dụng của bánh xe tiêu chuẩn thí nghiệm là 20000 lượt [24]. Hình 4 (a) thể hiện thiết bị thí nghiệm và Hình 4(b) thể hiện mẫu sau khi thí nghiệm.



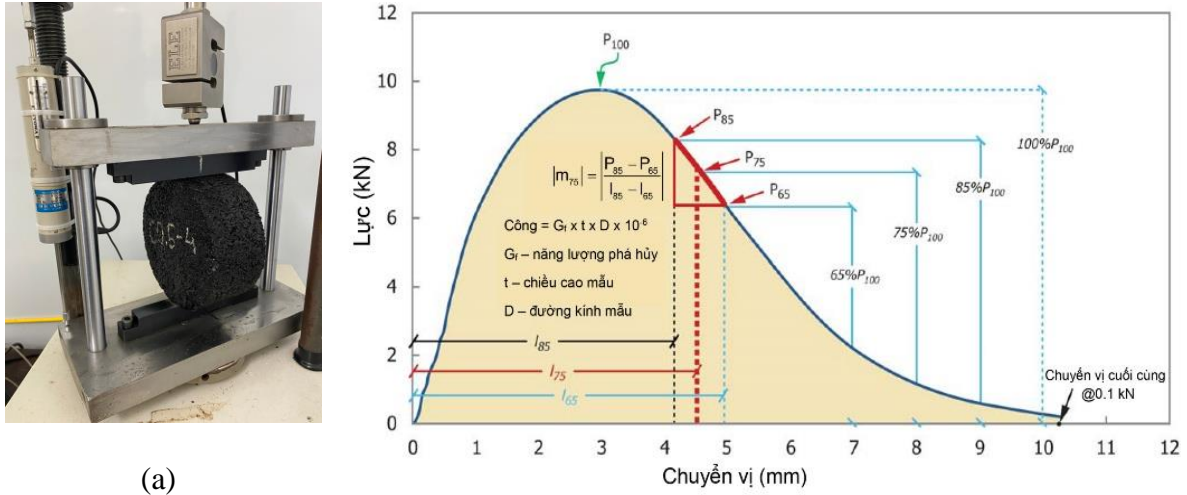
Hình 4. Thí nghiệm HWTT: (a) thiết bị thí nghiệm HWTT, (b) mẫu sau khi thí nghiệm.

Kết quả thí nghiệm HWTT được thể hiện bởi chiều sâu độ lún vết hằn bánh xe tương ứng với chu kỳ bánh xe tác dụng. Chiều sâu độ lún vết hằn bánh xe tối đa cho phép là 12,5 mm [24].

2.3.2 Thí nghiệm nứt

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm nén ép chế theo tiêu chuẩn ASTM D8225 [25] được sử dụng để đánh giá đặc tính nứt của các hỗn hợp bê tông asphalt như ở Hình 5. Thí nghiệm

được thực hiện với mẫu hình trụ tròn có đường kính bằng 150 ± 2 mm, chiều cao bằng 62 ± 1 mm và độ rỗng dư bằng $7 \pm 0,5\%$.



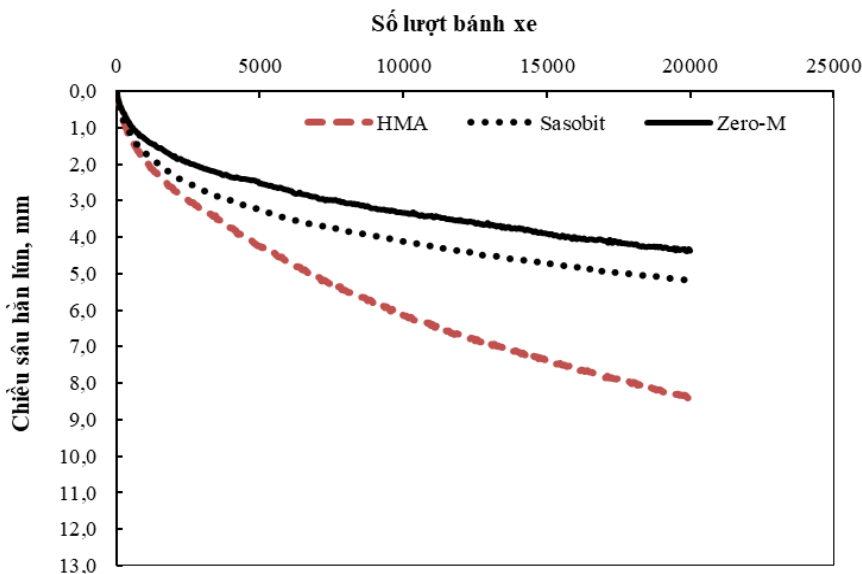
Hình 5. Thí nghiệm nén: (a) mô hình thí nghiệm; (b) Biểu đồ lực-chuyển vị.

Các mẫu được bảo ôn tối thiểu 3 giờ ở 25°C trước khi thí nghiệm sau đó tiến hành thí nghiệm nén ép chế trên máy nén Marshall với tốc độ tăng tải là 50 mm/phút, tốc độ ghi dữ liệu lực và chuyển vị khi thí nghiệm là 40-50Hz. Kết quả thí nghiệm thu được thể hiện bằng đường cong quan hệ lực-chuyển vị. Từ đường cong quan hệ giữa lực-chuyển vị như ở Hình 5 (b), các thông số đặc trưng cho đặc tính nứt của hỗn hợp bê tông asphalt được tính toán theo hướng dẫn của ASTM D8225 như: năng lượng phá hủy nứt (G_f , kN/mm), chuyển vị ứng với lực nén bằng 75% lực nén lớn nhất (l_{75} , mm), giá trị tuyệt đối của độ dốc đường cong lực-chuyển vị sau giá trị lực nén lớn nhất ($|m_{75}|$, N/m) và chỉ số kháng nứt (CT_{Index}).

2.4. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

2.4.1 Ảnh hưởng của phụ gia đến chiều sâu vết hằn bánh xe

Chiều sâu vết hằn bánh xe mẫu thử ở các lượt bánh xe tác dụng được thể hiện như ở Hình 6.



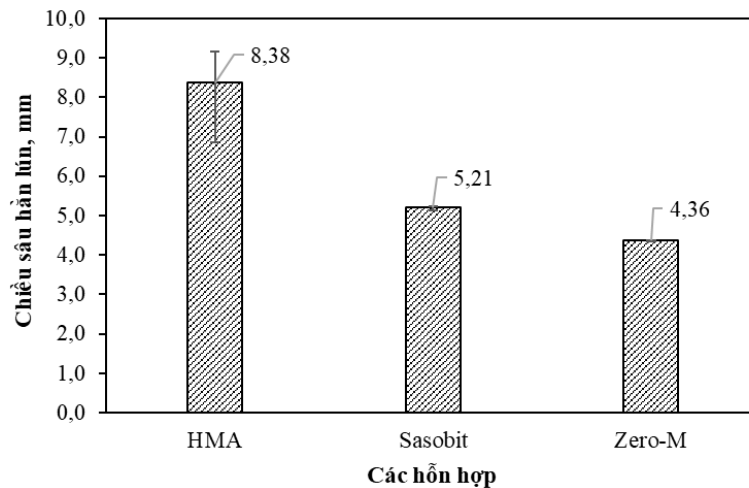
Hình 6. Chiều sâu vết hằn bánh xe của các mẫu thử.

Trên cơ sở các kết quả thí nghiệm chiều sâu vết hằn bánh xe của các mẫu hỗn hợp đối chứng HMA và các hỗn hợp bê tông asphalt ẩm sử dụng phụ gia Sasobit, phụ gia Zero-M, nghiên cứu tiên hành phân tích đánh giá độ chụm của các mẫu thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM C670 [26] với giá trị d_{2s} được lấy bằng 40%, kết quả được thể hiện như ở Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả đánh giá độ chụm của độ lún vết hằn bánh xe thí nghiệm.

Các thông số đánh giá	Hỗn hợp			
	Mẫu	HMA	Sasobit	Zero-M
1 Chiều sâu vết lún bánh xe, mm	1	8,64	5,73	4,57
	2	8,13	4,68	4,16
	TB	8,38	5,21	4,36
2 Khoảng chênh lệch R: max-min	mm	0,52	1,05	0,41
3 Khoảng chấp nhận cho phép, d _{2s}	%	40	40	40
4 Giá trị độ lệch cho phép: TB*(3)	mm	3,35	2,08	1,74
5 Đánh giá: So sánh (2) và (4)	-	Đạt	Đạt	Đạt

Kết quả thí nghiệm cho thấy độ chụm của các mẫu thí nghiệm đều đạt yêu cầu theo ASTM C670. Mức độ thay đổi độ lún vết hằn bánh xe thí nghiệm của các hỗn hợp với phạm vi sai số chuẩn bằng ±1,0σ được thể hiện như ở Hình 7. Kết quả thể hiện như ở Hình 7 cho thấy rằng, chiều sâu vết hằn bánh xe của hỗn hợp sử dụng phụ gia giảm đáng kể so với hỗn hợp đối chứng.



Hình 7. Ảnh hưởng của loại phụ gia đến kết quả thí nghiệm hằn lún vết bánh xe.

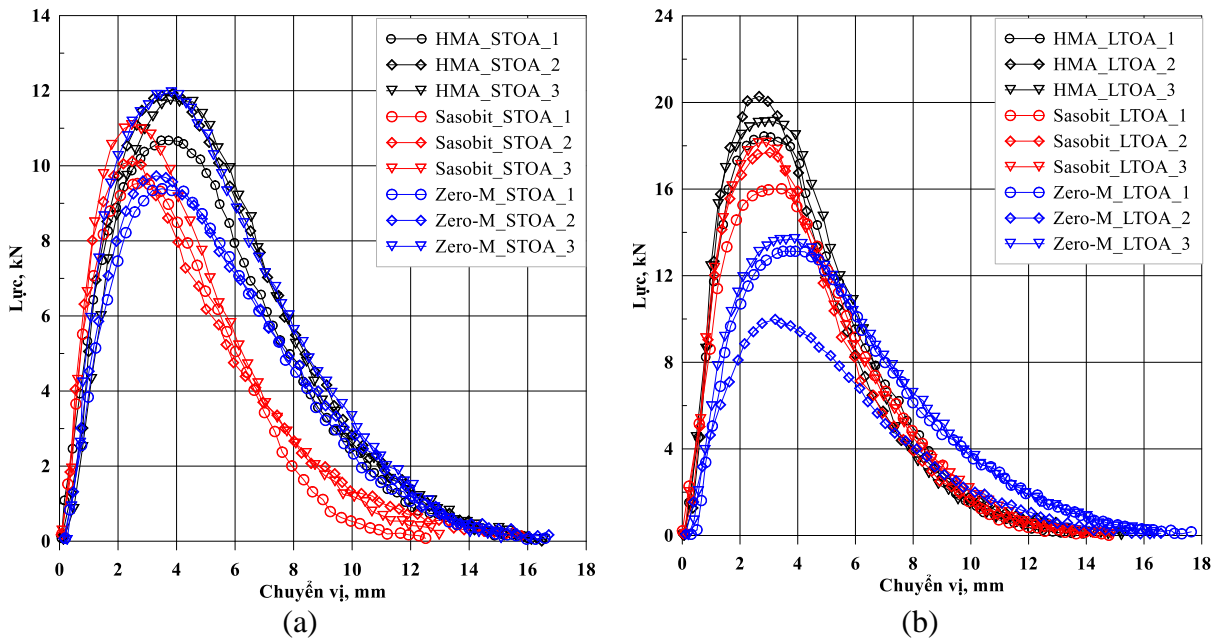
Cụ thể, hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit và Zero-M có độ lún thấp hơn trung bình lần lượt, 37,9 % và 49,0% so với với hỗn hợp HMA không sử dụng phụ gia.

2.4.2 Ảnh hưởng của phụ gia đến đặc tính nứt

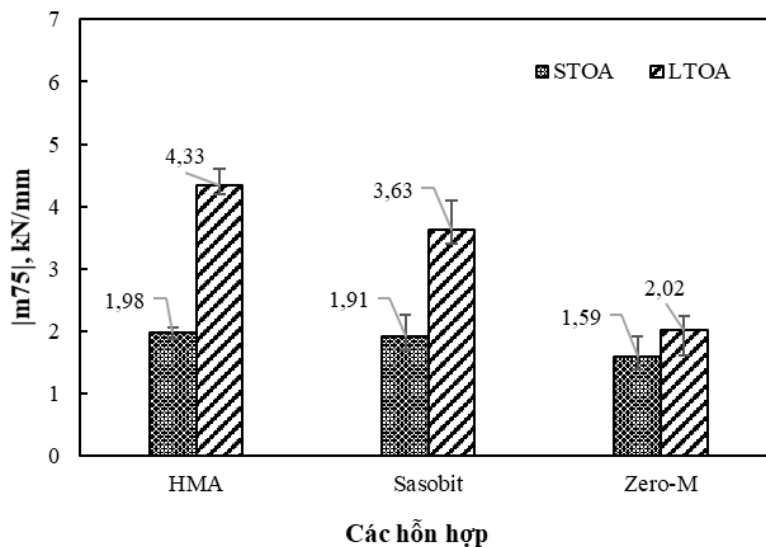
Kết quả thí nghiệm ép chế các mẫu hóa già ngắn hạn (STOA) và hóa già dài hạn (LTOA) được thể hiện bằng biểu đồ quan hệ giữa lực và chuyển vị thể hiện như ở Hình 8. Từ đường cong các kết quả lực – chuyển vị của các hỗn hợp, nghiên cứu tính được các thông số thể hiện đặc tính kháng nứt của bê tông asphalt theo ASTM D8225 như $|m_{75}|$, chỉ số $l_{75}/|m_{75}|$, chỉ số kháng nứt CT_{Index} và hệ số lão hóa. Kết quả tính toán giá trị $|m_{75}|$ được thể hiện như ở Hình 9. Thông số $|m_{75}|$ biểu thị độ dốc của đường cong lực - chuyển vị sau khi đạt giá trị lực lớn nhất. Hỗn hợp có độ cứng càng cao thì giá trị $|m_{75}|$ càng lớn và ngược lại. Kết quả ở Hình 10 cho

thấy rằng, có sự khác biệt đáng kể về giá trị $|m_{75}|$ giữa hỗn hợp STOA và LTOA. Trong cả hai điều kiện lão hóa, hỗn hợp sử dụng phụ gia có $|m_{75}|$ thấp hơn so với hỗn hợp nóng, hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M có giá trị $|m_{75}|$. Cũng từ đường cong lực - chuyển vị của hỗn hợp ở Hình 8, nghiên cứu xác định định được chuyển vị ở 75 % so với tải trọng lớn nhất (l_{75}).

Tỷ lệ $l_{75}/|m_{75}|$ thể hiện độ dẻo-giòn tương đối của hỗn hợp bê tông asphalt [28]. Tỷ lệ này càng cao thì hỗn hợp càng dẻo và ngược lại. Kết quả tính toán thông số này thể hiện như ở Hình 10 cho thấy rằng hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M có tỷ lệ $l_{75}/|m_{75}|$ cao nhất so với hỗn hợp HMA và hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit ở cả trường hợp STOA và LTOA. Kết quả này là do trong thành phần của phụ gia Zero-M có tỷ lệ SBS nên đã cải thiện được độ dẻo dai của hỗn hợp.

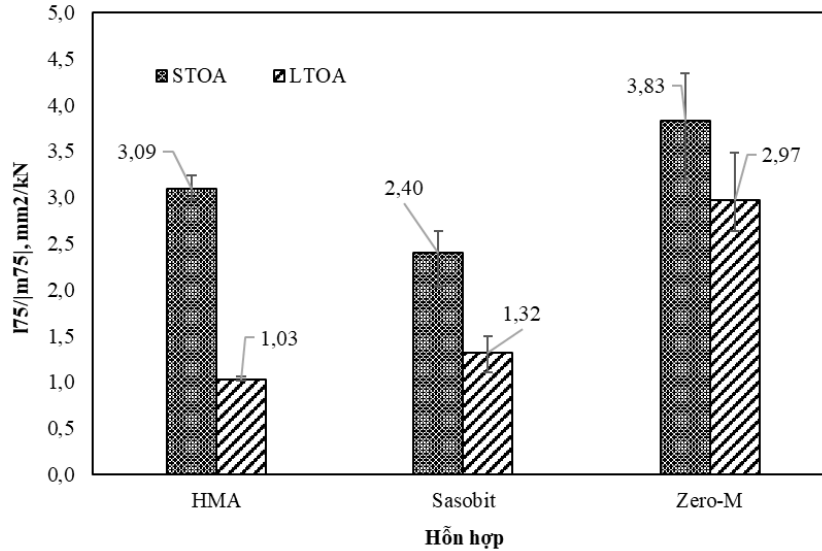


Hình 8. Đường cong quan hệ giữa Lực – chuyển vị của các hỗn hợp: (a) ở điều kiện hóa già ngắn hạn STOA, (b) ở điều kiện hóa già dài hạn LTOA.



Hình 9. Kết quả tính toán $|m_{75}|$ của các hỗn hợp.

Ngoài ra, kết quả thực nghiệm còn cho thấy rằng, do thành phần paraffin wax có trong phụ gia Sasobit nên ở điều kiện hóa già ngắn hạn STOA, hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit có tỷ số $|l_{75}/m_{75}|$ thấp nhất. Trong thí nghiệm IDT, CT_{Index} là thông số quan trọng nhất để đánh giá độ nhạy nứt của hỗn hợp bê tông asphalt.



Hình 10. Kết quả hệ số $|l_{75}/m_{75}|$ của các hỗn hợp.

Từ các kết quả tính toán giá trị CT_{Index} của các mẫu riêng lẻ, nghiên cứu tiến hành đánh giá độ chụm theo ASTM C670, kết quả được thể hiện như ở Bảng 6 cho thấy các tổ mẫu đều đảm bảo được độ chụm.

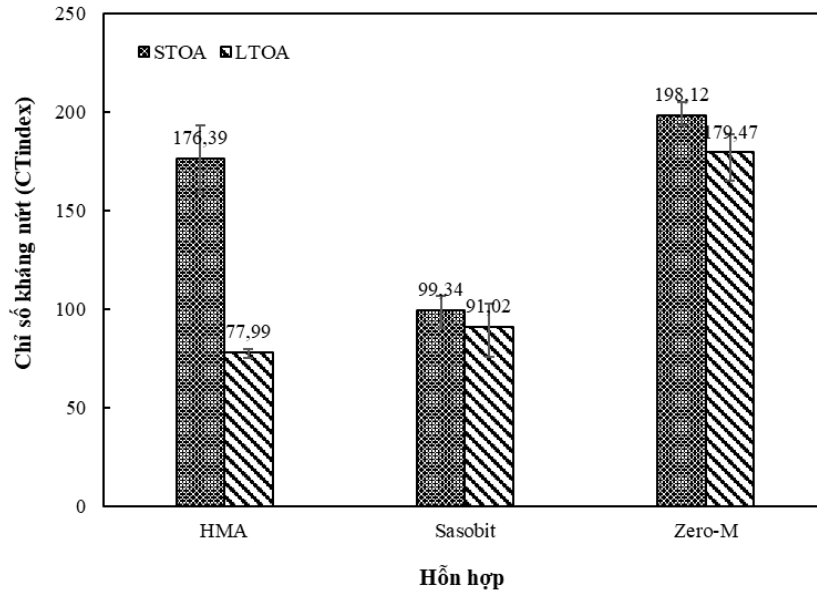
Bảng 6. Đánh giá độ chụm kết quả thí nghiệm CT_{Index} .

Hỗn hợp	Điều kiện hóa già	Mẫu	Chuyển vị l_{75} , mm.	Độ dốc đường cong sau khi phá hoại $ m_{75} $, N/m	Năng lượng phá hủy, G_f , kN/mm	Chỉ số kháng nứt, CT_{Index}
HMA	STOA	1	5,98	2,0109	0,0078	159,10
		2	6,06	1,8687	0,0087	192,93
		3	6,29	2,0575	0,0085	177,14
		TB				181,05
		S				16,68
		Khoảng chênh lệch R: max-min (1)				35,95
		Độ lệch chuẩn cho phép, 1s (2)				13,5
		Giá trị độ lệch cho phép: 3,3x1s (3)				44,55
		Đánh giá: So sánh (1) và (3)				Đạt
	LTOA	1	4,85	4,5952	0,0109	78,82
		2	4,27	4,1893	0,0108	75,12
		3	4,32	4,2195	0,0107	74,70
		TB				77,17
		S				2,65
Khoảng chênh lệch R: max-min (1)					5,31	

		Độ lệch chuẩn cho phép, 1s (2)				13,5
		Giá trị độ lệch cho phép: 3,3x1s (3)				44,55
		Đánh giá: So sánh (1) và (3)				Đạt
Sasobit	STOA	1	4,67	1,7732	0,0057	100,74
		2	4,29	1,6995	0,0063	106,70
		3	4,60	2,2576	0,0067	90,59
		TB				99,34
		S				8,14
		Khoảng chênh lệch R: max-min (1)				16,10
		Độ lệch chuẩn cho phép, 1s (2)				13,5
		Giá trị độ lệch cho phép: 3.3x1s (3)				44,55
		Đánh giá: So sánh (1) và (3)				Đạt
	LTOA	1	5,08	3,3919	0,0103	102,84
		2	4,54	4,0976	0,0103	75,88
		3	4,43	3,3930	0,0108	94,34
		TB				91,02
		S				13,78
		Khoảng chênh lệch R: max-min (1)				26,96
		Độ lệch chuẩn cho phép, 1s (2)				13,5
		Giá trị độ lệch cho phép: 3,3x1s (3)				44,55
		Đánh giá: So sánh (1) và (3)				Đạt
	Zero-M	STOA	1	5,98	1,3784	0,0071
2			6,08	1,9080	0,0087	193,04
3			5,86	1,4838	0,0075	196,31
TB						198,12
S						6,19
Khoảng chênh lệch R: max-min (1)						11,97
Độ lệch chuẩn cho phép, 1s (2)						13,5
Giá trị độ lệch cho phép: 3,3x1s (3)						44,55
Đánh giá: So sánh (1) và (3)						Đạt
LTOA		1	6,12	2,1936	0,0097	188,61
		2	5,90	2,2415	0,0101	184,38
		3	5,61	1,6116	0,0071	165,42
		TB				179,47
		S				12,35
		Khoảng chênh lệch R: max-min (1)				23,19
		Độ lệch chuẩn cho phép, 1s (2)				13,5
		Giá trị độ lệch cho phép: 3,3x1s (3)				44,55
		Đánh giá: So sánh (1) và (3)				Đạt

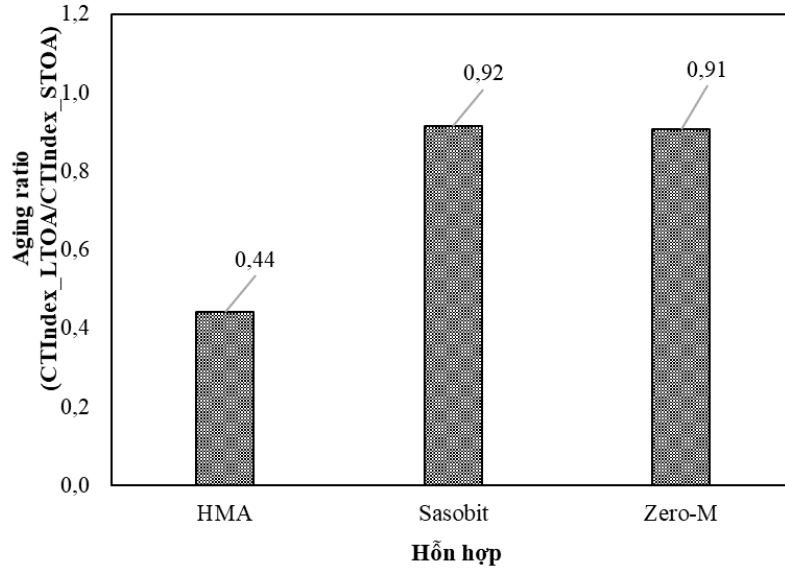
Hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit có kết quả CT_{Index} thấp nhất, kết quả này là do trong phụ gia Sasobit có thành phần paraffin wax nên đã làm cho hỗn hợp trở nên giòn hơn. Kết quả

CT_{Index} thể hiện như ở Hình 11 cho thấy rằng, hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M có chỉ số CT_{Index} cao nhất ở cả hai điều kiện STOA và LTOA.



Hình 11. Kết quả tính toán chỉ số CT_{Index} của các hỗn hợp.

Để đánh giá hiệu quả của phụ gia Zero-M và Sasobit theo LTOA, hệ số lão hóa được thiết lập theo tỷ lệ $CT_{Index_LTOA}/CT_{Index_STOA}$. Hệ số này càng cao thì hỗn hợp càng ổn định trong quá trình lão hóa dài hạn và ngược lại.



Hình 12. Hệ số lão hóa của các hỗn hợp.

Biểu đồ Hình 12 cho thấy rằng, hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M và Sasobit có hệ số lão hóa cao hơn hỗn hợp đối chứng HMA.

3. KẾT LUẬN

Từ những kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá tính năng của bê tông asphalt sử dụng phụ gia ẩm Zero-M và đối chứng với hỗn hợp HMA và hỗn hợp sử dụng phụ gia ẩm Sasobit, một số kết luận sau được đưa ra:

- Phụ gia Zero-M có nhiệt độ đầm nén thấp hơn 30°C so với hỗn hợp HMA và thấp hơn 10°C so với hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit.
- Hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M và Sasobit đã cải thiện đáng kể sức kháng hằn lún vết bánh xe. So với hỗn hợp HMA, hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit và Zero-M có độ lún thấp hơn trung bình lần lượt, 37,9 % và 49,0%.
- Phụ gia Zero-M không những cải thiện độ cứng của hỗn hợp mà còn cải thiện cả độ dẻo dai thông qua hệ số $I_{75/|m_{75}|}$, so với hỗn hợp HMA và hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit, hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M có hệ số $I_{75/|m_{75}|}$ cao nhất.
- Hỗn hợp Sử dụng phụ gia Zero-M cũng cho kết quả CT_{Index} cao hơn so với hỗn hợp HMA và hỗn hợp sử dụng phụ gia Sasobit.
- Hệ số lão hóa của hỗn hợp sử dụng phụ gia Zero-M và Sasobit đều cao hơn so với hỗn hợp đối chứng chỉ sử dụng bitum 60/70. Kết quả này cho thấy rằng, mức độ ổn định lâu dài của hỗn hợp Zero-M và Sasobit cao hơn so với hỗn hợp HMA.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. AASHTO R 35, Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures.
- [2]. B. Prowell, A. Kvasnak, G.Hurley, R.West, T.Kreich, L.Osborn, B. Frank, K.Peregrine, and D.Jones, Engineering properties, Emissions, and field performance of Warm Mix Asphalt Technologies – Draft Interim Report – State-of-the-practice, NCHRP 9-47A, 2009.
- [3]. J. Anthonissen, J. Braet, Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements, *Environ. Impact Assess. Rev.*, 60 (2016) 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.04.005>
- [4]. M.I. Giani, G. Dotelli, N. Brandini, L. Zampori, Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling, *Resour. Conserv. Recycl.*, 104 (2015) 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
- [5]. A. Almeida-Costa, A. Benta, Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt, *J. Clean. Prod.*, 112 (2016) 2308–2317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.077>
- [6]. B. A. Williams, J. R. Willis, J. Shacat, Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019, Sep. 2020, Accessed: Feb. 26, 2021. [Online]. [Available: https://trid.trb.org/view/1746439](https://trid.trb.org/view/1746439)
- [7]. X. Li, Z. Zhou, Z. You, Compaction temperatures of Sasobit produced warm mix asphalt mixtures modified with SBS, *Construct. Build. Mater.*, 123 (2016) 357e364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.015>
- [8]. L. Mo, X. Li, X. Fang, M. Huurman, S. Wu, Laboratory investigation of compaction characteristics and performance of warm mix asphalt containing chemical additives, *Construct. Build. Mater.*, 37 (2012) 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.074>
- [9]. S. Sobhi, A. Yousefi, A. Behnood, The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures, *Construct. Build. Mater.*, 238 (2020) 117676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117676>
- [10]. J. Liu, K. Yan, L. Jenny, Rheological properties of warm mix asphalt binders and warm mix asphalt binders containing polyphosphoric acid, *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 11 (2018) 481e487. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.03.005>

- [11]. K. Liu, J. Zhu, K. Zhang, J. Wu, J. Yin, X. Shi, Effects of mixing sequence on mechanical properties of graphene oxide and warm mix additive composite modified asphalt binder, *Construct. Build. Mater.*, 217 (2019) 301-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.073>
- [12]. J. Zhu, K. Zhang, K. Liu, X. Shi, Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide, *Construct. Build. Mater.*, 217 (2019) 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.054>
- [13]. A. Behnood, J. Olek, Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA), *Construct. Build. Mater.*, 151 (2017) 464-478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.115>
- [14]. J.R.M. Oliveira, H.M.R.D. Silva, L.P.F. Abreu, S.R.M. Fernandes, Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures, *J. Clean. Prod.*, 41 (2013) 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.047>
- [15]. C. Akisetty, F. Xiao, T. Gandhi, S. Amirkhanian, Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive, *Construct. Build. Mater.*, 25 (2011) 950-956. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.087>
- [16]. Z. Leng, H. Yu, Z. Zhang, Z. Tan, Optimizing the mixing procedure of warm asphalt rubber with wax-based additives through mechanism investigation and performance characterization, *Construct. Build. Mater.*, 144 (2017) 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.208>
- [17]. X. Yang, Z. You, M.R.M. Hasan, A. Diab, H. Shao, S. Chen, D. Ge, Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm, *J. Clean. Prod.*, 159 (2017) 346-358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.168>
- [18]. A.M. Rodríguez-Alloza, J. Gallego, F. Giuliani, Complex shear modulus and phase angle of crumb rubber modified binders containing organic warm mix asphalt additives, *Mater. Struct.*, 50 (2016) 77. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0950-1>
- [19]. A.M. Rodríguez-Alloza, J. Gallego, I. Perez, Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber, *Construct. Build. Mater.*, 43 (2013) 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.025>
- [20]. A.M. Rodríguez-Alloza, J. Gallego, I. Perez, A. Bonati, F. Giuliani, High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives, *Construct. Build. Mater.*, 53 (2014) 460-466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.026>
- [21]. H. Yu, Z. Leng, Z. Zhou, K. Shih, F. Xiao, Z. Gao, Optimization of preparation procedure of liquid warm mix additive modified asphalt rubber, *J. Clean. Prod.*, 141 (2017) 336-345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.043>
- [22]. H.I. Ozturk, F. Kamran, Laboratory evaluation of dry process crumb rubber modified mixtures containing Warm Mix Asphalt Additives, *Construct. Build. Mater.*, 229 (2019) 116940. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116940>
- [23]. Sasol Company (2013), Sasobit® - The Versatile Modifier for Asphalt.
- [24]. AASHTO T324, Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).
- [25]. ASTM D8225, Standard test method for determination of cracking tolerance index of asphalt mixture using the Indirect Tensile Cracking Test at intermediate temperature.
- [26]. ASTM C670, Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials.
- [27]. Haleh Azari, Precision Estimates of AASHTO T 324, Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA), NCHRP Project, 10-87.
- [28]. Y. Fan, C. Chen, M. Raquel, H. Andrew, H. Jacob, D. Knudtson, Impact of Polymer Modification on IDEAL-CT and I-FIT for Cracking Resistance Evaluation of Asphalt Mixtures, Minnesota, Department of Transportation. Office of Research & Innovation, 2023.