



Nghiên cứu thiết kế và lựa chọn cấp phối hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) sử dụng xỉ thép và phụ gia xơ dừa

Mix Design and Selection of Stone Mastic Asphalt Incorporating Steel Slag and Coconut Fiber

Võ Hồng Lâm¹, Lê Văn Phúc^{1*}, Lê Văn Bách¹, Trần Văn Tường²

¹Khoa Công trình, Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải

²Phòng Thí nghiệm trọng điểm Đường bộ III

Từ khóa:

TÓM TẮT

Hỗn hợp đá vữa nhựa
Xỉ thép
Phụ gia xơ dừa
Độ chảy nhựa
Ổn định Marshall

Hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) được đánh giá cao nhờ khả năng chịu tải trọng lớn, chống hằn lún và độ bền lâu dài. Trong bối cảnh nhu cầu sử dụng vật liệu xây dựng bền vững ngày càng tăng, xỉ thép – một phế thải công nghiệp – được xem là nguồn vật liệu tiềm năng để thay thế cốt liệu truyền thống trong sản xuất SMA. Nghiên cứu này tập trung thiết kế và so sánh ba phương án cấp phối SMA 16 sử dụng xỉ thép làm cốt liệu cùng với phụ gia ổn định xơ dừa. Các chỉ tiêu đánh giá bao gồm khả năng chống chảy nhựa, các đặc trưng thể tích (độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ lấp đầy nhựa), cũng như độ ổn định Marshall. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa ba cấp phối về độ chảy nhựa và các đặc trưng cơ học. Trên cơ sở phân tích tổng hợp các chỉ tiêu kỹ thuật theo yêu cầu của tiêu chuẩn, nghiên cứu đề xuất bước đầu lựa chọn cấp phối SMA 16 sử dụng xỉ thép và phụ gia xơ dừa đáp ứng yêu cầu về mặt cường độ cũng như tính ổn định của mặt đường.

Keywords:

ABSTRACT

Stone Mastic Asphalt
Steel Slag
Coconut Fiber
Drain-down
Marshall stability

Stone mastic asphalt (SMA) mixtures are highly regarded for their ability to withstand heavy traffic loads, good rutting resistance, and provide long-term durability. In the context of the growing demand for sustainable construction materials, steel slag—an industrial by-product—has been considered a promising alternative to conventional aggregates in SMA production. This study focuses on the design and comparison of three SMA 16 mixture gradations incorporating steel slag as aggregate and coconut fiber as a stabilizing additive. The evaluated performance indicators include draindown, volumetric properties (air voids, voids in mineral aggregate, and voids filled with asphalt), as well as Marshall stability. The results reveal clear differences among the three gradations in terms of draindown behavior and mechanical characteristics. On the basis of a comprehensive analysis of the technical indicators in accordance with standard requirements, this paper initially recommends the SMA 16 mixture using steel slag and coconut fiber as a suitable option in terms of strength and pavement stability.

* Lê Văn Phúc. Khoa Công trình, Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải.

Email: phuclv_ph@utc.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150205>

Ngày nhận bài: 01/01/2026; Ngày nhận bài sửa: 27/02/2026; Ngày chấp nhận đăng: 15/03/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/03/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

SMA là một hỗn hợp nhựa trộn nóng, rải nóng có thành phần cấp phối gián đoạn, nhiều cốt liệu thô tạo ra một cấu trúc đá chèn đá (giữa các hạt có lực ma sát lớn) được chèn đầy lỗ rỗng cốt liệu bằng vữa nhựa (cốt liệu mịn, bột khoáng, phụ gia ổn định và nhựa đường; với nhiều nhựa và nhiều bột khoáng) [1]. Nhờ các ưu điểm nổi bật như khả năng chống hằn lún cao, độ nhám bề mặt tốt và tuổi thọ khai thác dài ... , SMA đã được ứng dụng rộng rãi cho các tuyến đường có lưu lượng và tải trọng giao thông lớn.

Song song với xu hướng phát triển hạ tầng giao thông ngày càng bền vững, việc nghiên cứu sử dụng vật liệu thay thế nhằm giảm khai thác tài nguyên thiên nhiên và tận dụng phế thải công nghiệp, nông nghiệp đang nhận được nhiều sự quan tâm. Trong số đó, xỉ thép là vật liệu có cường độ cao, độ nhám bề mặt lớn và khả năng bám dính với nhựa đường tốt, cùng với xơ dừa là từ tự nhiên, là nguồn vật liệu tái tạo sẵn có và thân thiện với môi trường cho thấy tiềm năng ứng dụng để chế tạo hỗn hợp bê tông nhựa nói chung [2], [3] và SMA nói riêng.

Nhiều nghiên cứu trên thế giới và trong nước đã chỉ ra rằng việc sử dụng xỉ thép làm cốt liệu trong SMA có thể cải thiện khả năng chịu tải và chống biến dạng của hỗn hợp. Nghiên cứu của Wu Shao-peng và cộng sự [4], trên cơ sở các thí nghiệm đánh giá cường độ và khả năng kháng trượt của SMA sử dụng xỉ thép. Kết quả thực nghiệm cho thấy độ ổn định động là 5699 lần/mm lớn gấp đôi so với SMA sử dụng cốt liệu thông thường (khoảng 3000 lần/mm), cả độ ổn định còn lại và tỷ lệ cường độ tách đồng đều lớn hơn 80%; hệ số ma sát và chiều sâu cấu trúc lần lượt là 67.1% và 0.7 mm. Những kết quả này cho thấy SMA sử dụng xỉ thép vượt trội hơn so với bê tông nhựa thông thường [4]. Trong nghiên cứu về hàm lượng xỉ thép tối ưu của hỗn hợp SMA-13 của Wei Chen và cộng sự [5], kết quả cho thấy so với hàm lượng xỉ thép 0%, độ ổn định động của SMA-13 trộn với hàm lượng xỉ thép 25%, 50%, 75% và 100% tăng lần lượt 27.33%, 48.5%, 90.48% và 50.00%. Khi hàm lượng xỉ thép là 75%, độ sâu vết hằn bánh xe theo thử nghiệm của Trung Quốc và thử nghiệm của Hamburg đều đạt giá trị tối thiểu lần lượt là 1.19 mm và 2.25 mm. Điều này chứng tỏ, việc kết

hợp xỉ thép có thể cải thiện độ ổn định nhiệt độ cao của SMA-13, sự cải thiện tốt nhất đạt được khi hàm lượng xỉ thép là 75%. Tuy nhiên, hàm lượng xỉ thép tăng lên có thể dẫn đến giảm khả năng chống nứt ở nhiệt độ thấp của hỗn hợp nhựa đường. Nghiên cứu A. Behnood và cộng sự [6] về tính khả thi của việc sử dụng cốt liệu xỉ thép trong SMA, kết quả cho thấy rằng việc sử dụng xỉ thép làm cốt liệu thô có thể tăng cường độ ổn định Marshall, mô đun đàn hồi, cường độ chịu kéo, tăng khả năng chống lại sự phá hủy của độ ẩm và chống biến dạng của hỗn hợp SMA. Kết quả nghiên cứu từ Phúc và cộng sự [7] cho thấy rằng có thể sử dụng 50% xỉ thép để thay thế cốt liệu trong việc chế tạo SMA 12.5 làm mặt đường ô tô.

Tuy nhiên, do xỉ thép có khối lượng riêng lớn, bề mặt nhiều lỗ rỗng, nhám và độ hút nhựa cao hơn so với cốt liệu đá tự nhiên, nên khi sử dụng sản xuất SMA – loại hỗn hợp nhạy cảm với hiện tượng chảy nhựa – thì việc thiết kế cấp phối cần được kiểm soát chặt chẽ. Nếu cấp phối không hợp lý, SMA sử dụng xỉ thép có thể bị chảy nhựa trong quá trình vận chuyển và thi công, các đặc trưng thể tích không đạt yêu cầu hoặc suy giảm tính ổn định trong điều kiện khai thác thực tế.

Mặt khác, để giảm thiểu sự chảy nhựa trong hỗn hợp khi vận chuyển và thi công, các chất phụ gia ổn định đã được đưa vào SMA. Brown và Cooley [8] đã kết luận rằng, sợi có hiệu suất tốt hơn polymer trong việc ngăn chặn sự chảy nhựa. Ngoài ra, các sợi còn có tác dụng cải thiện tiếp xúc cốt liệu với cốt liệu và tăng cường liên kết giúp cải thiện tính năng hỗn hợp và làm chậm tốc độ phát triển của vết nứt. Phụ gia ổn định nhựa được sử dụng chủ yếu hiện nay là sợi cellulose. Tuy nhiên, việc sử dụng các loại sợi tự nhiên để thay thế các phụ gia truyền thống đang được quan tâm trong những năm gần đây. Đã có các nghiên cứu về ảnh hưởng của các chất phụ gia sợi từ tự nhiên như xơ dừa, sisal, sợi chuối đến đặc tính chống chảy nhựa và độ ổn định của SMA và các kết quả đều cho thấy phụ gia sợi xơ dừa là tốt nhất trong số các loại sợi được nghiên cứu. Hàm lượng sợi xơ dừa được sử dụng trong các nghiên cứu thường từ 0.3% – 0.7% [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15].

Xuất phát từ những yêu cầu trên, nghiên cứu này tiến hành trên hai phương án cấp phối SMA sử dụng xỉ thép và phụ gia xơ dừa, đánh giá và so sánh

thông qua các chỉ tiêu độ chảy nhựa, đặc trưng thể tích và độ ổn định Marshall. Trên cơ sở kết quả thí nghiệm, nghiên cứu đề xuất lựa chọn cấp phối SMA xỉ thép và phụ gia xơ dừa phù hợp, góp phần làm cơ sở khoa học cho việc ứng dụng vật liệu xỉ thép và xơ dừa trong xây dựng mặt đường ô tô theo hướng bền vững, thích ứng với biến đổi khí hậu.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

Các nghiên cứu cho thấy, việc kết hợp xỉ thép có thể cải thiện cường độ và độ ổn định của SMA khi hàm lượng xỉ thép thay thế là 50 đến 75% [5], [7], hàm lượng xỉ thép tăng lên có thể dẫn đến giảm khả năng chống nứt ở nhiệt độ thấp của hỗn hợp [5]. Chính vì vậy, nghiên cứu này sẽ thực hiện trên mẫu SMA 16 sử dụng xỉ thép (thay thế 50% cốt liệu lớn - hạt > 4.75 mm để dễ dàng điều chỉnh thành phần hạt mịn và bột khoáng, giúp kiểm soát hiện tượng chảy nhựa) và phụ gia xơ dừa.

2.1. Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

Cốt liệu lớn, cốt liệu mịn sử dụng vật liệu tại mỏ Antraco - An Giang, dùng loại ly tâm.

Xỉ thép nghiền lấy tại khu vực Bà Rịa - Vũng Tàu.

Bột khoáng sử dụng bột khoáng Hà Nam.

Nhựa đường PMB III sử dụng nhựa Singapore (Nhà cung cấp là Petrolimex).

Phụ gia xơ dừa: Sử dụng sợi xơ dừa lấy ở Bến Tre sản xuất từ vỏ trái dừa thông qua máy đánh toi để lấy phần sợi. Cắt sợi thành đoạn dài 3 - 5 mm để đưa vào trộn, hàm lượng sợi xơ dừa sử dụng là 0.5% (tổng khối lượng hỗn hợp) như Hình 1. Các chỉ tiêu của sợi xơ dừa dùng làm phụ gia ổn định trong SMA theo Bảng 1.



Hình 1. Sợi xơ dừa cắt ngắn (3 - 5 mm).

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu của sợi xơ dừa.

Chỉ tiêu	Kết quả thí nghiệm	TCCS36 : 2021/TCĐBVN [1]
Chiều dài sợi, mm	4.3	≤ 6.0
Hàm lượng tro, %	14.5	18 ± 5
Độ PH	7.2	7.5 ± 1.0
Độ hút dầu	5.2 lần khối lượng sợi	≥ 5 lần khối lượng sợi
Độ ẩm, %	1.7	≤ 5

2.2. Thiết kế cấp phối SMA 16 xỉ thép

Cấp phối SMA được thiết kế theo nguyên lý khung cốt liệu - vữa nhựa, trong đó cốt liệu thô tiếp xúc trực tiếp với nhau, hình thành khung chịu lực chính của hỗn hợp. Khi sử dụng xỉ thép làm cốt liệu, thành phần hạt gián đoạn được lựa chọn nhằm phát huy đặc tính cường độ cao và bề mặt nhám của xỉ thép, đồng thời duy trì sự tiếp xúc giữa đá với đá và khả năng chống biến dạng vĩnh cửu. Vữa nhựa gồm nhựa đường, cốt liệu mịn, bột khoáng và phụ gia ổn định có vai trò lấp đầy khe rỗng và tạo liên kết. Thiết kế cấp phối SMA xỉ thép yêu cầu sự phối hợp hợp lý giữa khung cốt liệu và vữa nhựa nhằm kiểm soát hiện tượng chảy nhựa, đảm bảo các đặc trưng thể tích và độ ổn định cơ học theo yêu cầu kỹ thuật.

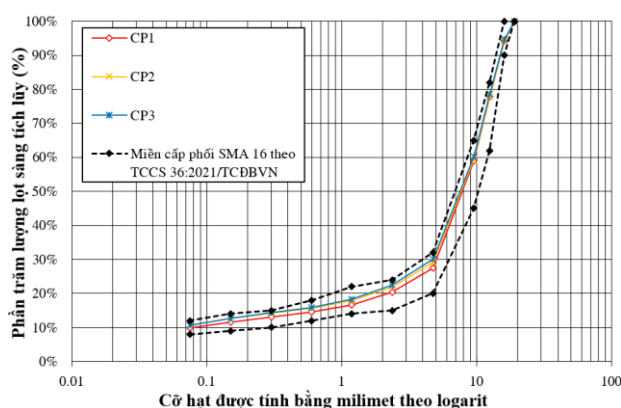
Xỉ thép có khối lượng riêng lớn và bề mặt nhiều lỗ rỗng, nhám hơn so với đá dăm, dẫn đến khả năng hút nhựa đường cao hơn. Khi thiết kế SMA, nếu giữ nguyên tỷ lệ hạt mịn như cấp phối truyền thống, một phần nhựa đường sẽ bị hấp thụ vào bề mặt và lỗ rỗng của xỉ thép, làm suy giảm lượng nhựa tự do trong vữa nhựa. Do đó, cần tăng tỷ lệ hạt mịn và bột khoáng nhằm bù đắp lại lượng nhựa bị hút bởi xỉ thép.

Trên cơ sở yêu cầu về cấu trúc khung cốt liệu của SMA và đặc tính của xỉ thép, nghiên cứu đề xuất ba phương án cấp phối SMA hạt 16mm (SMA 16), ký hiệu là CP1, CP2 và CP3 (CP2 và CP3 được điều chỉnh tăng dần tỷ lệ hạt mịn), nhằm đánh giá ảnh hưởng của thành phần cấp phối đến các đặc tính kỹ thuật của hỗn hợp.

Đường cong cấp phối của SMA 16 đạt được với thành phần cốt liệu phối trộn được thể hiện như trong Bảng 2 và Hình 2.

Bảng 2. Tỷ lệ % lọt sàng của các cấp phối thiết kế.

Cỡ sàng (mm)	% lọt sàng cấp phối thiết kế		
	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)
19	100.0	100.0	100.0
16	94.4	94.4	94.6
12.5	77.8	77.8	78.5
9.5	59.0	59.4	60.3
4.75	27.5	29.2	30.1
2.36	20.4	21.9	22.5
1.18	16.7	18.0	18.3
0.6	14.5	15.6	15.8
0.3	13.1	14.2	14.3
0.15	11.6	12.6	12.6
0.075	9.8	10.6	10.7



Hình 2. Đường cong cấp phối SMA 16.

2.3. Phương pháp thí nghiệm

Các thí nghiệm được thực hiện theo tiêu chuẩn hiện hành nhằm đánh giá các tính năng của SMA xỉ thép, bao gồm khả năng chống chảy nhựa, các đặc trưng thể tích và tính ổn định cơ học. Trong nghiên cứu này, lần lượt thí nghiệm kiểm tra các chỉ tiêu nêu trên tại các hàm lượng nhựa 5.9%; 6.2%; 6.5% theo khối lượng hỗn hợp.

Độ chảy nhựa của SMA được xác định theo TCVN 8860-6:2011 [16]. Thí nghiệm được tiến hành tại hai mức nhiệt độ: nhiệt độ trộn hỗn hợp (T) và nhiệt độ cao hơn 15 °C (T+15 °C) nhằm mô phỏng điều kiện thực tế tại trạm trộn. Ở mỗi nhiệt độ, chuẩn bị hai mẫu có khối lượng 1200 g ± 200 g. Mẫu, rọ thép và đĩa kim loại được sấy đến khối lượng không đổi, sau đó xác định khối lượng ban đầu và khối lượng nhựa chảy ra sau khi gia nhiệt

trong lò sấy trong 60 ± 5 phút (hoặc 70 ± 5 phút tùy điều kiện nhiệt độ ban đầu của mẫu) như Hình 3. Độ chảy nhựa của SMA được tính theo phần trăm khối lượng nhựa chảy ra so với khối lượng mẫu ban đầu.



Hình 3. Thí nghiệm độ chảy nhựa.

Các đặc trưng thể tích của SMA, bao gồm độ rỗng dư (Va), độ rỗng cốt liệu (VMA) và độ rỗng lấp đầy nhựa (VFA), được xác định theo các tiêu chuẩn TCVN 8860-9,10,11:2011 [17], [18], [19]. Thí nghiệm Marshall được thực hiện theo TCVN 8860-1:2011 [20] nhằm xác định độ ổn định và độ dẻo (Hình 4), qua đó đánh giá khả năng chịu tải và tính ổn định cơ học của SMA.

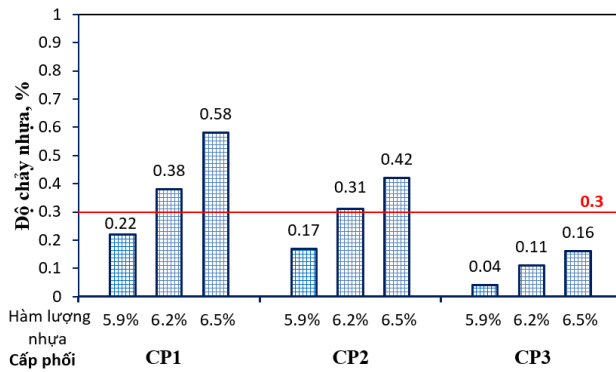


Hình 4. Các mẫu và thí nghiệm Marshall.

2.4. Kết quả thí nghiệm và phân tích đánh giá

2.4.1. Kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa

Kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa tại 3 hàm lượng nhựa thể hiện trong hình 5.



Hình 5. Kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa.

Theo kết quả Hình 5 cho thấy, khi hàm lượng nhựa tăng từ 5.9% lên 6.5%, SMA 16 xỉ thép theo CP3 thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo TCCS 36:2021/TCĐBVN [1]; trong khi độ chảy nhựa theo CP1 và CP2 không thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật tại hàm lượng nhựa 6.2% và 6.5%.

Nhìn chung, độ chảy nhựa của SMA 16 xỉ thép theo CP3 giảm nhiều hơn so với CP1 và CP2 khi tăng dần tỷ lệ hạt mịn. Việc tăng tỷ lệ hạt mịn đối với CP3 nhằm bù đắp lại các đặc tính của xỉ thép đó là khối lượng riêng lớn và độ hút nhựa cao. Hàm lượng hạt mịn và bột khoáng tăng giúp cải thiện khả năng giữ nhựa trong khung cốt liệu, từ đó hạn chế hiện tượng chảy nhựa của hỗn hợp, đặc biệt khi nhiệt độ cao.

2.4.2. Đặc trưng thể tích

Kết quả thí nghiệm các đặc trưng thể tích của ba cấp phối SMA 16 xỉ thép thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm các đặc trưng thể tích của SMA 16 xỉ thép.

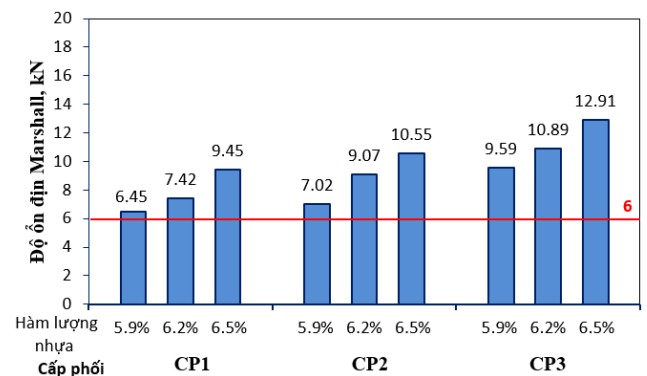
TT	Hàm lượng nhựa (%)	Độ rỗng dư (%)	Độ rỗng lấp đầy nhựa (%)	Độ rỗng cốt liệu (%)
SMA 16 xỉ thép - CP1	5.9	6.46	67.30	19.74
	6.2	4.56	75.31	18.47
	6.5	3.82	79.41	18.55
SMA 16 xỉ thép - CP2	5.9	6.10	66.78	18.36
	6.2	4.34	75.69	17.85
	6.5	3.72	78.72	17.48
	5.9	5.91	66.55	17.67

SMA 16 xỉ thép – CP3	6.2	4.23	75.98	17.61
	6.5	3.08	82.16	17.26
Yêu cầu kỹ thuật	3 ÷ 4	75 ÷ 85	≥ 17	

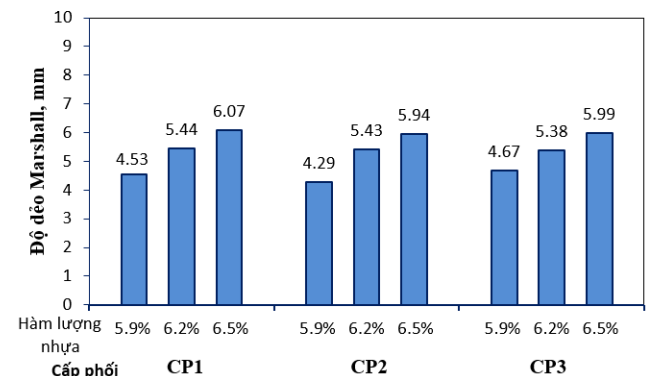
Từ Bảng 3 cho thấy sự thay đổi rõ rệt theo hàm lượng nhựa của các đặc trưng thể tích. Khi hàm lượng nhựa tăng từ 5.9% lên 6.5%, độ rỗng dư (Va) của cả ba cấp phối đều giảm; trong đó CP1, CP2 và CP3 đạt yêu cầu kỹ thuật tại hàm lượng nhựa 6.5%. VFA tăng theo hàm lượng nhựa và nằm trong khoảng cho phép tương ứng với các mức hàm lượng nhựa từ 6.2 – 6.5%, lưu ý rằng ở hàm lượng nhựa cao hơn VFA tiệm cận giới hạn trên, tiềm ẩn nguy cơ chảy nhựa. VMA của cả ba cấp phối đều lớn hơn 17%. Căn cứ vào kết quả trên đặc trưng thể tích thì cả ba cấp phối có thể được lựa chọn là cấp phối thiết kế với hàm lượng nhựa 6.5%.

2.4.3. Độ ổn định Marshall

Phân tích đánh giá về độ ổn định và độ dẻo Marshall ở điều kiện ngâm mẫu 60 °C trong 40 phút được thể hiện ở Hình 6 và Hình 7.



Hình 6. Độ ổn định Marshall của SMA 16 xỉ thép



Hình 7. Độ dẻo Marshall của SMA 16 xỉ thép.

Từ kết quả thí nghiệm độ ổn định và độ dẻo Marshall cho thấy: Khi hàm lượng nhựa tăng từ

5.9% - 6.5%, độ ổn định và độ dẻo Marshall của SMA 16 xỉ thép cũng tăng và đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn [1]. Tuy nhiên, SMA 16 xỉ thép theo CP1 có độ ổn định Marshall thấp hơn so với SMA 16 xỉ thép theo CP2 và CP3 (thấp hơn lần lượt khoảng 14% và 30%). Trong khi không có sự khác biệt đáng kể đối với độ dẻo Marshall.

CP3 có hàm lượng hạt mịn và bột khoáng cao hơn CP2 và CP1, nhờ đó làm tăng mức độ khóa chặt giữa các hạt cốt liệu, nâng cao khả năng truyền lực trong khung cốt liệu và dẫn đến độ ổn định Marshall cao hơn so với CP1 và CP2.

2.4.4. Phân tích lựa chọn cấp phối SMA 16

Hàm lượng nhựa đóng vai trò then chốt trong thiết kế cấp phối SMA, do đặc trưng cấu trúc khung đá chèn đá và hàm lượng mastic nhựa cao của loại hỗn hợp SMA so với bê tông nhựa thông thường. Nhựa đường không chỉ đảm nhiệm chức năng liên kết cốt liệu mà còn tạo thành lớp mastic lấp đầy các lỗ rỗng giữa khung cốt liệu thô, góp phần quyết định đến độ bền và tuổi thọ lâu dài của mặt đường. Hàm lượng nhựa không đủ sẽ làm cho lớp mastic mỏng, thiếu liên kết cấu trúc đá chèn đá dẫn đến giảm khả năng kháng nứt. Khi hàm lượng nhựa quá cao có thể gây hiện tượng chảy nhựa (drain-down) trong quá trình sản xuất, thi công và làm suy giảm khả năng chịu tải ở nhiệt độ cao. Do đó, việc lựa chọn hàm lượng nhựa tối ưu cần được cân nhắc đồng thời trên cơ sở các đặc trưng thể tích, khả năng chống chảy nhựa và các chỉ tiêu cơ học theo yêu cầu tiêu chuẩn, nhằm đảm bảo sự cân bằng giữa độ ổn định, tính bền vững và hiệu quả khai thác của kết cấu SMA. Do vậy, từ kết quả tổng hợp thí nghiệm trong nghiên cứu này cho thấy SMA 16 sử dụng xỉ thép và phụ gia xơ dừa theo CP3 không chỉ giảm đáng kể độ chảy nhựa mà còn có độ ổn định Marshall cao hơn so với CP1 và CP2, điều đó phản ánh khả năng chịu tải và mức độ hình thành khung cốt liệu đối với CP3 là tốt hơn. Do đó, xét tổng hợp giữa vấn đề ổn định trong sản xuất, thi công, ổn định cơ học và các đặc trưng thể tích thì CP3 được lựa chọn là phương án cấp phối phù hợp cho SMA 16 với hàm lượng nhựa 6.5% sử dụng xỉ thép và phụ gia xơ dừa trong nghiên cứu này.

3. Kết luận

Thông qua kết quả phân tích và đánh giá có thể rút ra các kết luận sau:

- Thành phần cấp phối có ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng chống chảy nhựa của SMA xỉ thép, trong đó cấp phối với tỷ lệ hạt mịn cao cho kết quả chảy nhựa thấp hơn;
- Độ ổn định Marshall của ba cấp phối đều đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, tuy nhiên cấp phối được lựa chọn thể hiện sự hợp lý hơn giữa độ ổn định và các đặc trưng thể tích;
- Trên cơ sở các chỉ tiêu kỹ thuật đánh giá, nghiên cứu đề xuất cấp phối phù hợp cho SMA xỉ thép và phụ gia xơ dừa là theo CP3 với hàm lượng nhựa 6.5%, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn hiện hành;
- Các nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung đánh giá khả năng kháng lún, kháng nứt, độ bền mỏi và khả năng kháng ẩm của SMA xỉ thép và phụ gia xơ dừa trong điều kiện khai thác thực tế.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Võ Hồng Lâm: Viết - bản thảo gốc, chỉnh sửa bản thảo, Phản hồi ý kiến phản biện. **Lê Văn Phúc:** Viết - bản thảo gốc, chỉnh sửa bản thảo. **Lê Văn Bách và Trần Văn Tường:** Chỉnh sửa bản thảo.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học GTVT trong đề tài mã số T2026-PHII_CT-010.

1st Hong Lam Vo. Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications

2nd* Van Phuc Le. Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications

3rd Van Bach Le. Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications

4th Van Tuong Tran. Road Laboratory 3

*Corresponding author: phuclv_ph@utc.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] Lớp mặt đường bằng hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) – Thi công và nghiệm thu, TCCS36:2021/TCĐBVN, 2021.
- [2] J. Wu, Z. Zhao, C. Jiang, C. Jiang, Z. Sun, J. Yuang, and F. Xiao, “Recent development and application of natural fiber in asphalt pavement”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 449, 141832, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141832>
- [3] N. Khan, M. H. Sutanto, I. Khan, S. H. Khahro, and M. A. Malik, “Optimizing coconut fiber-modified hot mix asphalt for enhanced mechanical performance using response surface methodology”, *Scientific Reports*, 15:15098, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98234-2>
- [4] W. Shao-peng, Y. Wen-feng, X. Yong-jie, and L. Zhen-hua, “Design and preparation of steel slag SMA”, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, volume 18, pp. 86–88, 2003.
- [5] W. Chen, J. Wei, X. Xu, X. Zhang, W. Han, X. Yan, G. Hu, and Z. Lu, “Study on the Optimum Steel Slag Content of SMA-13 Asphalt Mixes Based on Road Performance”, *Coatings*, 11, 1436, 2021.
- [6] A. Behnood and M. Ameri, “Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag”, *Scientia Iranica*, Volume 19, Issue 5, pp. 1214–1219, 2012.
- [7] L. V. Phúc; V. H. Lâm; P. Đức, và Đ. N. Khang, “Nghiên cứu khả năng sử dụng xỉ thép khu vực Bà Rịa – Vũng Tàu để chế tạo hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA)”, *Tạp chí Khoa học công nghệ GTVT*, Tập 12 – Số 4, tr. 42–48, 2023.
- [8] E. R. Brown and L. A. Cooley, “Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements”, *NCHRP Report 425*, Transportation Research Board, 1999.
- [9] C. Chin and N. Charoentham, “Laboratory investigation of stone mastic asphalt mixtures containing coconut fiber”, *Engineering and Applied Science Research*; 48(2):131–136, 2021, doi: 10.14456/easr.2021.15.
- [10] C. S. Bindu and K. S. Beena, “Influence of additives on the drain down characteristics of Stone Matrix asphalt mixtures”, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol.3, (No.7): 83–88, 2014, doi: 10.15623/ijret.2014.0307014.
- [11] M. Panda, A. Suchismita, and J. P. Giri, “Utilization of Ripe Coconut Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixes”, *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 289 – 302, 2013.
- [12] S. Dilkusha and K. V. Manikanta, “Laboratory Investigations of Stone Matrix Asphalt By Using Natural Fibres”, *IJSART*, Volume 4, Issue 8, 2018, ISSN [online]: 2395-1052.
- [13] A. C. do Vale, M. D. T Casagrande, and J. B Soares, “Behavior of natural fiber in stone matrix asphalt mixtures using two design methods”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (3), pp. 457 – 465, 2014.
- [14] C. V. Hùng, N. Q. Phúc, L. X. Chiêu, và T. D. Hoi, “Nghiên cứu thực nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của hỗn hợp đá - vữa nhựa (SMA) sử dụng phụ gia xơ dừa ở Việt Nam”, *Tạp chí GTVT*, Số tháng 3/2021, tr. 67–70, 2021.
- [15] N. M. Hùng và T. V. Tường, “Nghiên cứu thực nghiệm Stone Mastic Asphalt hạt 16 mm (SMA16) với nhựa PMB và sợi xơ dừa”, *Tạp chí GTVT*, Số tháng 3/2021, tr. 96–99, 2021.
- [16] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 6: Xác định độ chảy nhựa*, TCVN 8860-6:2011, 2011.
- [17] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 9: Xác định rỗng dư*, TCVN 8860-9:2011, 2011.
- [18] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 10: Xác định độ rỗng cốt liệu*, TCVN 8860-10:2011, 2011.
- [19] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 11: Xác định độ rỗng lấp đầy nhựa*, TCVN 8860-11:2011, 2011.
- [20] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 1: Xác định độ ổn định, độ dẻo Marshall*, TCVN 8860-1:2011, 2011.