



Đánh giá ảnh hưởng của quy trình chế tạo đến độ chảy nhựa của hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa

Evaluation of mixing procedure effects on draindown in stone mastic asphalt using steel slag and coconut fiber

Võ Hồng Lâm, Lê Văn Phúc*

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

Từ khóa:

Hỗn hợp đá vữa nhựa
Độ chảy nhựa
Xỉ thép
Phụ gia xơ dừa
Quy trình chế tạo

TÓM TẮT

Hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) có khả năng kháng hằn lún và độ bền cao, tuy nhiên dễ xảy ra hiện tượng chảy nhựa do hàm lượng nhựa sử dụng lớn. Nghiên cứu này nhằm đánh giá ảnh hưởng của quy trình chế tạo đến độ chảy nhựa của SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa. Nghiên cứu được thực hiện theo hai bước: trước hết đánh giá các phương án cấp sợi xơ dừa cho SMA cốt liệu đá dăm và lựa chọn quy trình phù hợp dựa trên kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa; trên cơ sở đó, tiếp tục điều chỉnh và đánh giá quy trình chế tạo SMA sử dụng xỉ thép so với quy trình SMA cốt liệu đá dăm dùng phụ gia cellulose theo TCCS 36:2021/TCĐBVN. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc tăng nhiệt độ sấy cốt liệu khoảng 10 °C, kéo dài thời gian trộn thêm 30 giây và cấp sợi xơ dừa theo phương pháp trộn khô với bột khoáng đồng thời với cấp nhựa đường giúp hạn chế hiện tượng chảy nhựa và cải thiện độ ổn định Marshall và các chỉ tiêu đặc tính thể tích của SMA. Kết quả nghiên cứu góp phần đề xuất quy trình chế tạo phù hợp cho SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa trong điều kiện sản xuất và thi công thực tế.

Keywords:

Stone Mastic Asphalt
Drain-down
Steel Slag
Coconut Fiber
Mixing procedure

ABSTRACT

Stone mastic asphalt (SMA) exhibits high rutting resistance and durability; however, it is prone to binder draindown due to its high asphalt content. This study aims to evaluate the effect of mixing production procedures on the draindown of SMA using steel slag and coconut fiber. The research was conducted in two steps: first, different coconut fiber addition methods for SMA with stone aggregates were evaluated, and an appropriate procedure was selected based on draindown test results; subsequently, the production procedure for SMA using steel slag was adjusted and evaluated in comparison with the conventional SMA production procedure using crushed stone aggregates and cellulose fiber in accordance with TCCS 36:2021/TCĐBVN. The study results indicate that increasing the aggregate heating temperature by approximately 10 °C, extending the mixing time by an additional 30 seconds, and introducing coconut fiber using the dry-mixing method together with mineral filler during asphalt binder addition help to mitigate asphalt drain-down and improve Marshall stability as well as the volumetric properties of SMA. The findings contribute to the proposal of a suitable production procedure for SMA using steel slag and coconut fiber under practical production and construction conditions.

* 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/JTST150303>

Ngày nhận bài: 21/01/2026; Ngày nhận bài sửa: 05/04/2026; Ngày chấp nhận đăng: 15/04/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/05/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

SMA là loại hỗn hợp nhựa trộn nóng có cấu trúc khung cốt liệu thô chiếm ưu thế, có khả năng kháng hàn lún và kháng nứt mỏi tốt, phù hợp với kết cấu áo đường chịu tải trọng lớn. Tuy nhiên, do hàm lượng nhựa lớn và cấu trúc cấp phối gián đoạn, SMA có nguy cơ xảy ra hiện tượng chảy nhựa trong quá trình sản xuất và thi công nếu không được kiểm soát hợp lý như Hình 1. Vì vậy, việc lựa chọn phụ gia ổn định nhựa và quy trình chế tạo phù hợp đóng vai trò quan trọng đối với chất lượng SMA.



Hình 1. Hiện tượng chảy nhựa của SMA [1]

Trong xu thế phát triển vật liệu bền vững, xi thép ngày càng được quan tâm sử dụng như cốt liệu thay thế trong bê tông nhựa. Mặc dù xi thép có khối lượng riêng lớn hơn đá dăm, có thể làm tăng khối lượng hỗn hợp và phát sinh chi phí vận chuyển, nhưng nó lại sở hữu nhiều đặc tính ưu việt như bề mặt nhám, hình dạng góc cạnh và khả năng tăng cường độ ma sát. Những đặc điểm này góp phần cải thiện đáng kể khả năng kháng trượt, độ ổn định và độ bền lâu của bê tông nhựa. Song song với đó, sợi xơ dừa – một loại phụ gia ổn định có nguồn gốc tự nhiên – được nghiên cứu như giải pháp thay thế sợi cellulose thương mại, góp phần giảm chi phí và tác động môi trường [2], [3], [4], [5]. Việc kết hợp xi thép và sợi xơ dừa để chế tạo SMA mang lại nhiều tiềm năng nhưng cũng đặt ra những thách thức đáng kể về mặt công nghệ.

Một trong những vấn đề nổi bật khi sử dụng sợi xơ dừa là quy trình cấp phụ gia và điều kiện trộn. Khác với sợi cellulose thương mại, xơ dừa có bản chất hữu cơ, nhạy cảm với nhiệt độ cao và dễ bị cháy sém khi tiếp xúc trực tiếp với cốt liệu quá nóng. Bên cạnh đó, xi thép có khả năng hấp thụ nhựa và tích nhiệt cao, làm tăng độ nhạy của hỗn hợp đối với nhiệt độ sấy và thời gian trộn. Do đó, trình tự cấp sợi xơ dừa, nhiệt độ cốt liệu tại thời

điểm cấp sợi và thời gian trộn trở thành các thông số công nghệ quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến mức độ chảy nhựa và tính đồng nhất của SMA.

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào việc tối ưu thành phần cấp phối và hàm lượng nhựa cho SMA sử dụng xi thép [6], [7], [8] hoặc phụ gia ổn định sợi [2], [3], [4], trong khi ảnh hưởng của quy trình chế tạo, đặc biệt là nhiệt độ sấy cốt liệu, thời gian trộn và quy trình cấp sợi đối với SMA sử dụng xi thép chưa được nghiên cứu đầy đủ. Trong thực tế sản xuất công nghiệp, đá dăm và xi thép thường được sấy chung trong trống sấy, do đó việc kiểm soát quy trình trộn có ý nghĩa quyết định đến hiện tượng chảy nhựa và chất lượng hỗn hợp.

Xuất phát từ thực tế trên, nghiên cứu này được thực hiện theo hai bước. Trước hết, SMA cốt liệu đá dăm sử dụng sợi xơ dừa được lựa chọn làm hỗn hợp đối chứng nhằm đánh giá và lựa chọn quy trình cấp phụ gia xơ dừa thông qua chỉ tiêu độ chảy nhựa. Việc sử dụng SMA cốt liệu đá dăm giúp giảm ảnh hưởng của đặc tính cốt liệu đặc thù, qua đó làm rõ vai trò của phương thức và thời điểm cấp sợi. Trên cơ sở quy trình cấp xơ dừa đã được lựa chọn, nghiên cứu tiếp tục nhằm đánh giá ảnh hưởng của việc điều chỉnh nhiệt độ sấy cốt liệu và thời gian trộn đối với SMA sử dụng xi thép. Trong nghiên cứu, hàm lượng nhựa được giữ cố định nhằm tách riêng ảnh hưởng của nhiệt độ sấy, thời gian trộn và quy trình cấp sợi xơ dừa, đồng thời làm rõ mối quan hệ giữa hiện tượng chảy nhựa, độ ổn định Marshall và các đặc trưng thể tích của hỗn hợp, từ đó đề xuất quy trình chế tạo hợp lý.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

2.1. Vật liệu sử dụng

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

Xi thép nghiền như Hình 2 được lấy tại khu vực Bà Rịa - Vũng Tàu. Các chỉ tiêu cơ lý chủ yếu của xi thép được kiểm tra nhằm bảo đảm khả năng áp dụng trong vật liệu SMA.



Hình 2. Xi thép nghiền.

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. 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 3. Do có nguồn gốc hữu cơ, sợi xơ dừa nhạy cảm với nhiệt độ cao, vì vậy hiện tượng cháy sém sợi được đặc biệt lưu ý trong quá trình thí nghiệm.

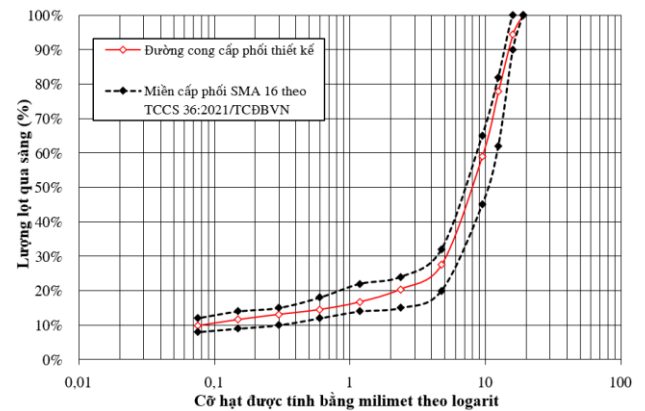


Hình 3. Sợi xơ dừa cắt ngắn (3 – 5 mm).

2.2. Thành phần hỗn hợp

Trên cơ sở yêu cầu về cấu trúc khung cốt liệu của SMA, nghiên cứu thực hiện trên hai loại mẫu: SMA 16 cốt liệu đá dăm và SMA 16 sử dụng xi thép (thay thế 50% cốt liệu lớn - hạt > 4.75 mm). Cấp phối SMA 16 được thiết kế theo đặc trưng của SMA đáp ứng tiêu chuẩn TCCS 36:2021/TCĐBVN [9] như Hình 4. Hàm lượng nhựa được cố định ở mức 6,2% theo khối lượng hỗn hợp, được lựa chọn dựa trên nghiên cứu từ [5], nhằm tách riêng ảnh hưởng

của nhiệt độ sấy, thời gian trộn và quy trình cấp phụ gia xơ dừa.



Hình 4. Đường cong cấp phối SMA 16 dùng trong nghiên cứu.

2.3. Trình tự tiến hành

Nghiên cứu được thực hiện theo hai bước:

- Bước 1: Đánh giá quy trình cấp sợi xơ dừa trên SMA cốt liệu đá dăm. Các phương án cấp sợi được xem xét bao gồm việc cấp sợi trộn khô với cốt liệu nóng trước và cấp sợi (trộn khô trước với bột khoáng) cùng lúc với cấp nhựa đường. Quá trình trộn được thực hiện trong điều kiện nhiệt độ sấy cốt liệu và thời gian trộn giữ không đổi. Thông qua kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa, lựa chọn quy trình cấp sợi phù hợp làm cơ sở cho bước nghiên cứu tiếp theo;

- Bước 2: Nghiên cứu quy trình chế tạo đối với SMA sử dụng xi thép trên cơ sở quy trình cấp sợi xơ dừa đã được lựa chọn ở Bước 1. So với quy trình chế tạo thông thường với SMA cốt liệu đá dăm và phụ gia cellulose được hướng dẫn trong TCCS 36:2021/TCĐBVN [9] (nhiệt độ sấy cốt liệu khoảng 190°C và thời gian trộn 60 giây), nhiệt độ sấy cốt liệu (thay thế 50% xi thép) được tăng thêm khoảng 10 °C đảm bảo vẫn nằm trong giới hạn cho phép, thời gian trộn được tăng thêm lần lượt 30 giây, 60 giây.

2.4. Thí nghiệm độ chảy nhựa, đặc trưng thể tích và độ ổn định Marshall của SMA

Chỉ tiêu chính được sử dụng để đánh giá hiệu quả của quy trình chế tạo SMA là độ chảy nhựa, phản ánh khả năng tách nhựa của hỗn hợp trong quá trình sản xuất và thi công. Thí nghiệm độ chảy nhựa được thực hiện theo TCVN 8860-6:2011 [10]

như Hình 5. Tiến hành thí nghiệm tại hai mức nhiệt độ: nhiệt độ trộn hỗn hợp (T) và nhiệt độ cao hơn 15°C ($T+15^{\circ}\text{C}$) nhằm mô phỏng điều kiện thực tế tại trạm trộn. Chuẩn bị hai mẫu có khối lượng $1200\text{ g} \pm 200\text{ g}$ ở mỗi nhiệt độ. Mẫu, đĩa kim loại và rọ thép được sấy đến khối lượng không đổi, sau đó cân xác định khối lượng ban đầu và khối lượng nhựa chảy ra sau khi gia nhiệt trong tủ sấy 60 ± 5 phút (hoặc 70 ± 5 phút tùy điều kiện nhiệt độ ban đầu của mẫu). Độ chảy nhựa của SMA được tính theo phần trăm khối lượng nhựa chảy ra so với khối lượng mẫu ban đầu.



Hình 5. Thí nghiệm độ chảy nhựa.

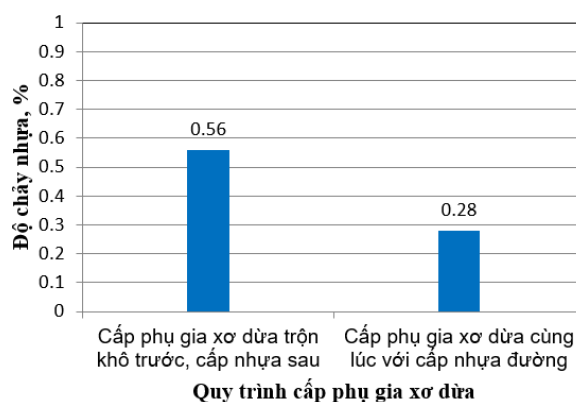
Ngoài độ chảy nhựa, tiến hành thí nghiệm đồng thời độ ổn định Marshall [11] và các đặc trưng thể tích [12], [13], [14] nhằm kiểm chứng, đánh giá ảnh hưởng của quy trình đề xuất đến các tính năng cơ bản của SMA.

3. Kết quả và phân tích, đánh giá

3.1. Ảnh hưởng của quy trình cấp sợi xơ dừa đến độ chảy nhựa

Kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa của SMA cốt liệu đá dăm trên Hình 6 cho thấy, quy trình cấp sợi xơ dừa có ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng ổn định vữa nhựa trong hỗn hợp. Quy trình cấp sợi xơ dừa (trộn khô trước với bột khoáng) cùng lúc với nhựa đường cho kết quả chống chảy nhựa tốt hơn so với phương án thông thường trộn khô với cốt liệu nóng trước. Cách làm này giúp sợi xơ dừa tiếp xúc trực tiếp với nhựa ở trạng thái chảy thích hợp, qua đó tăng cường tương tác giữa sợi và chất kết dính. Với cấu trúc sợi và khả năng hút thấm nhựa, xơ dừa có thể giữ một phần nhựa đường trong hỗn hợp, góp phần hạn chế hiện tượng chảy nhựa. Đồng thời, việc cấp sợi cùng lúc với nhựa giúp sợi được phân tán đều hơn trong quá trình trộn, nâng cao hiệu quả bao phủ và phân bố nhựa. Ngược lại, khi trộn khô sợi với cốt liệu ở nhiệt độ cao, sợi dễ bị cháy sém hoặc suy giảm tính chất, làm giảm khả

năng tương tác với nhựa và hiệu quả giữ nhựa. Do đó, phương án cấp sợi cùng lúc với nhựa đường không chỉ cải thiện khả năng phân bố mà còn tăng hiệu quả ổn định nhựa trong hỗn hợp.

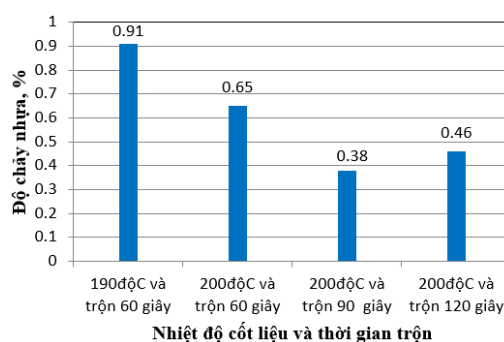


Hình 6. Độ chảy nhựa của SMA cốt liệu đá dăm khi thay đổi quy trình cấp phụ gia sợi.

Do SMA cốt liệu đá dăm có đặc tính bề mặt và khả năng hấp thụ nhựa tương đối ổn định, ảnh hưởng của quy trình cấp sợi được thể hiện rõ thông qua chỉ tiêu độ chảy nhựa. Trên cơ sở các kết quả thí nghiệm, phương án cấp sợi xơ dừa cùng lúc với nhựa đường được lựa chọn làm quy trình cấp phụ gia cho các bước nghiên cứu tiếp theo.

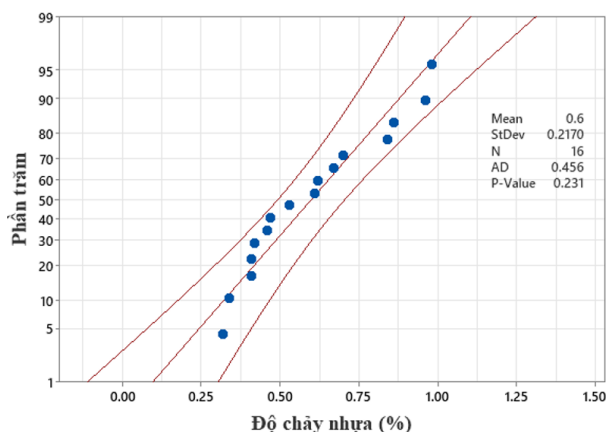
3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy và thời gian trộn đối với SMA sử dụng xỉ thép

Áp dụng quy trình cấp sợi xơ dừa đã được lựa chọn ở Bước 1, kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa của SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa khi thay đổi nhiệt độ sấy cốt liệu và thời gian trộn thể hiện trong Hình 7.



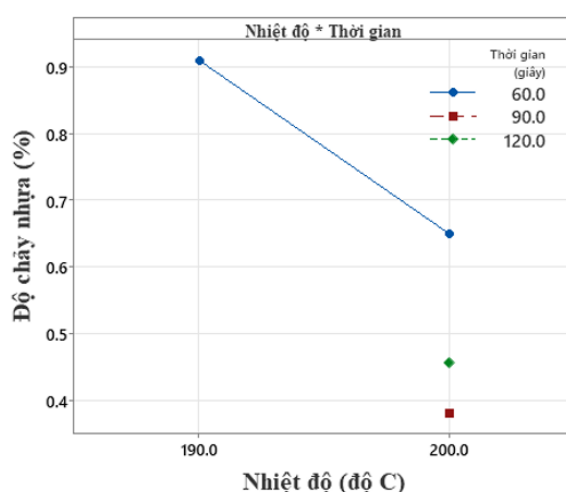
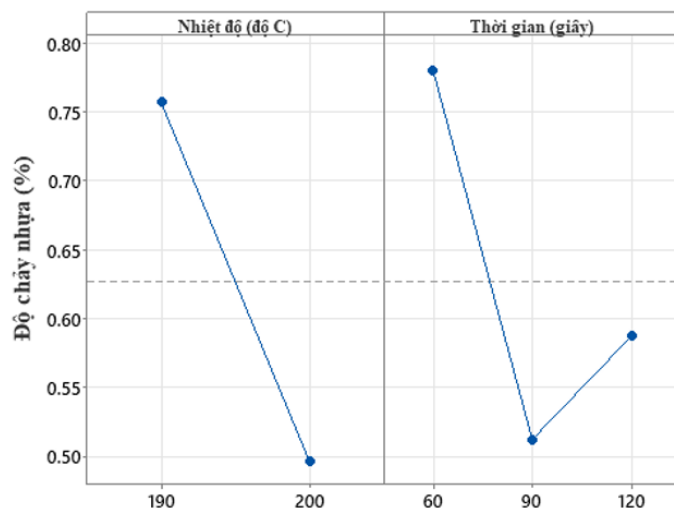
Hình 7. Kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa của SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa khi thay đổi nhiệt độ sấy cốt liệu và thời gian trộn.

Kiểm tra phân phối chuẩn của kết quả thí nghiệm độ chảy nhựa theo Hình 8 cho thấy $P\text{-Value} = 0.231 > \alpha = 0.05$ nên các kết quả tuân theo luật phân phối chuẩn.



Hình 8. Đồ thị xác suất của độ chảy nhựa.

Sử dụng phần mềm Minitab phân tích phương sai ANOVA (Analysis of Variance) kết quả thí



Hình 9. Biểu đồ phân tích ảnh hưởng và tương tác các biến đến độ chảy nhựa.

• Kết quả phân tích phương sai cho thấy có hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc} = 92.61\%$, các biến đều có hệ số p-value < 0.05 đảm bảo mức ý nghĩa 95%;

• Từ biểu đồ phân tích ảnh hưởng và tương tác các biến Hình 9 cho thấy, nhiệt độ sấy cốt liệu là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến độ chảy nhựa, tiếp theo là thời gian trộn. Độ chảy nhựa giảm đáng kể khi nhiệt độ sấy cốt liệu tăng từ 190 °C lên 200 °C. Đối với thời gian trộn, giá trị nhỏ nhất đạt được ở mức 90 giây, trong khi 60 giây và 120 giây cho độ chảy nhựa lớn hơn. Biểu đồ tương tác còn cho thấy tồn tại sự tương tác rõ rệt giữa nhiệt độ và thời gian trộn, chứng tỏ ảnh hưởng của mỗi yếu tố phụ thuộc vào mức của yếu tố còn lại.

Theo kết quả thí nghiệm Hình 7 cho thấy SMA sử dụng xỉ thép có xu hướng chảy nhựa cao hơn so

nghiệm độ chảy nhựa. Kết quả phân tích ANOVA cho tập mẫu giá trị độ chảy nhựa theo Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả phân tích ANOVA tập mẫu giá trị độ chảy nhựa.

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nhiệt độ (độ C)	1	0.1352	0.1352	38.86	0.000
Thời gian (giây)	2	0.1523	0.0762	21.89	0.000
Sai số	12	0.0418	0.0035		
Total	15	0.7066			
S					
		R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
		0.0589845	94.09%	92.61%	89.50%

với hỗn hợp dùng cốt liệu tự nhiên khi được chế tạo trong cùng điều kiện nhiệt độ và thời gian trộn. Nguyên nhân chủ yếu do đặc tính của xỉ thép với khối lượng riêng lớn, khả năng tích nhiệt cao và bề mặt phức tạp, làm cho quá trình gia nhiệt và phân bố nhiệt trong các hạt xỉ diễn ra chậm hơn. Trong điều kiện nhiệt độ và thời gian trộn chưa đủ, nhựa đường chưa đạt trạng thái lưu động tối ưu để bao phủ hoàn toàn bề mặt và thẩm nhập, bám dính vào các lỗ rỗng, dẫn đến giảm hiệu quả giữ nhựa trong mastic và làm tăng lượng nhựa tự do trong hỗn hợp. Do đó, việc tăng nhiệt độ và kéo dài thời gian trộn là cần thiết nhằm cải thiện khả năng bao phủ và tương tác của nhựa, qua đó nâng cao độ đồng nhất và giảm thiểu hiện tượng chảy nhựa của SMA.

Khi nhiệt độ sấy cốt liệu được tăng thêm khoảng 10 °C, độ chảy nhựa của hỗn hợp giảm rõ rệt. Điều này cho thấy việc tăng nhiệt độ sấy giúp ổn định

trạng thái nhiệt của hỗn hợp trong quá trình trộn, tạo điều kiện để nhựa đường phân bố đồng đều và bám dính tốt hơn lên bề mặt cốt liệu, từ đó hạn chế hiện tượng tập trung nhựa cục bộ. Do đó, hiệu ứng cải thiện phân bố và bám dính của nhựa chiếm ưu thế so với việc nhựa bị mềm dẫn đến chảy nhựa. Bên cạnh đó, tại cùng nhiệt độ trộn, khi tăng thời gian trộn, độ chảy nhựa có xu hướng giảm trong giai đoạn đầu do nhựa đường có đủ thời gian để phân bố và bao phủ đồng đều hơn trên bề mặt cốt liệu, đặc biệt đối với xi thép có cấu trúc vi rỗng. Tuy nhiên, khi thời gian trộn tiếp tục tăng, đặc biệt trong điều kiện nhiệt độ cao, có thể làm suy giảm tính chất của nhựa (như cắt mạch polymer hoặc giảm độ nhớt), dẫn đến xu hướng tăng độ chảy nhựa trở lại. Do đó, xu hướng giảm rồi tăng của độ chảy nhựa trong hỗn hợp phản ánh sự tồn tại của một khoảng thời gian trộn tối ưu, thay vì là kết quả ngẫu nhiên. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc tăng thời gian trộn thêm 30 giây giúp cải thiện rõ rệt đặc tính chảy nhựa của hỗn hợp.

Các nghiên cứu trước đã chỉ ra rằng thời gian trộn đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát mức độ bao phủ và phân bố nhựa trong hỗn hợp, đồng thời tồn tại một khoảng thời gian trộn tối ưu để đạt được trạng thái phân bố đồng đều của chất kết dính [15]. Đối với cốt liệu xi thép, do đặc tính bề mặt nhám và cấu trúc vi rỗng, khả năng tương tác và hấp phụ nhựa tăng lên so với cốt liệu tự nhiên. Do đó, hỗn hợp sử dụng xi thép đòi hỏi điều kiện trộn phù hợp hơn để đảm bảo nhựa được phân bố và bao phủ hiệu quả [16]. Vì vậy, xu hướng biến thiên của độ chảy nhựa theo nhiệt độ và thời gian trộn trong nghiên cứu này là nhất quán với các cơ chế đã được ghi nhận từ các nghiên cứu trước.

3.3. Ảnh hưởng của quy trình trộn đến độ ổn định Marshall và các đặc tính thể tích

Kết quả thí nghiệm Marshall và các đặc tính thể tích của SMA trong Bảng 2 cho thấy nhiệt độ sấy

cốt liệu và thời gian trộn ảnh hưởng rõ rệt đến tính ổn định của SMA sử dụng xi thép và phụ gia xơ dừa. Ở điều kiện 190 °C – 60 giây, độ chảy nhựa còn cao (0.91%). Khi tăng nhiệt độ sấy cốt liệu lên 200 °C, độ chảy nhựa giảm xuống giá trị 0.65% và độ ổn định Marshall bắt đầu tăng.

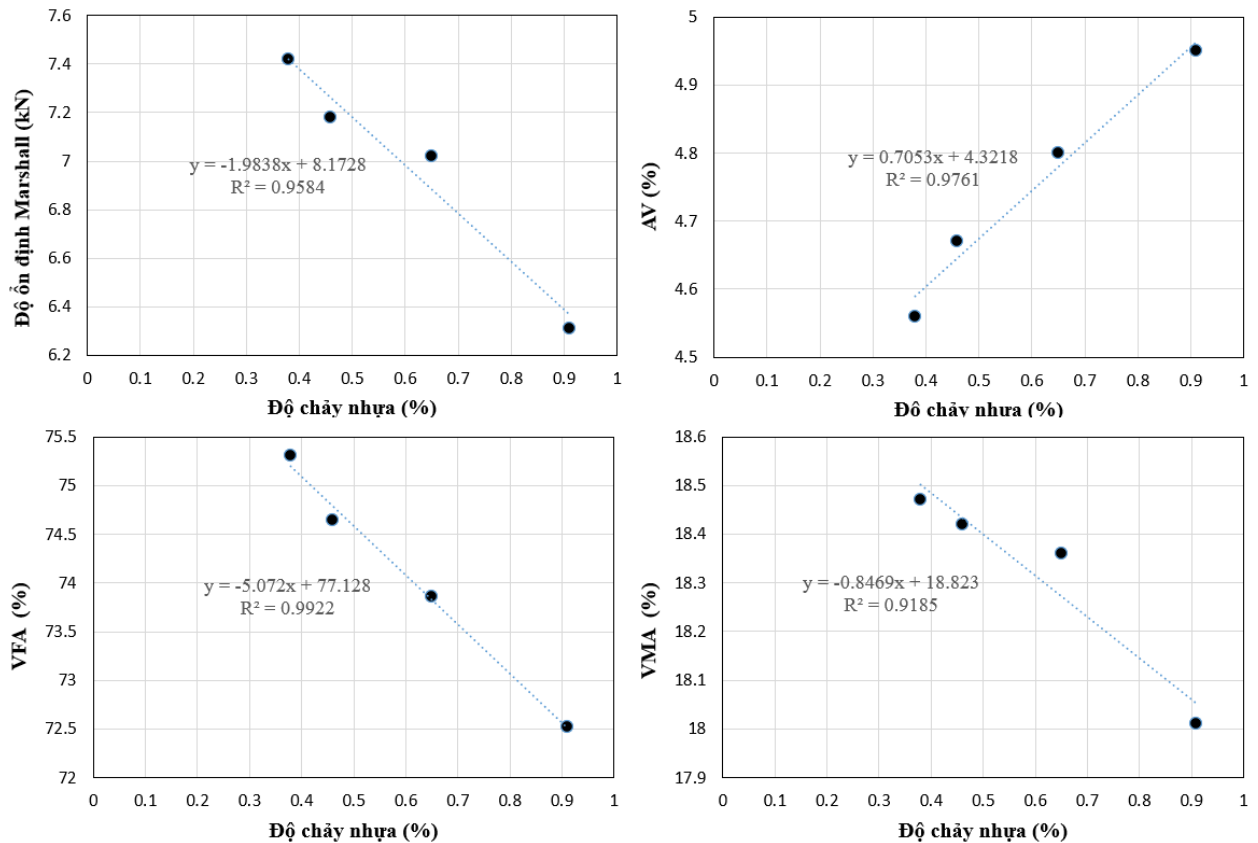
Bảng 2. Độ ổn định Marshall và các đặc tính thể tích của SMA 16 sử dụng xi thép và sợi xơ dừa.

Nhiệt độ cốt liệu	Thời gian trộn hỗn hợp	Độ ổn định Marshall	Độ rỗng dư (Va)	Độ rỗng lấp đầy nhựa (VFA)	Độ rỗng cốt liệu (VMA)	Độ chảy nhựa
°C	(giây)	(kN)	(%)	(%)	(%)	(%)
190	60	6.31	4.95	72.52	18.01	0.91
200	60	7.02	4.80	73.86	18.36	0.65
200	90	7.42	4.56	75.31	18.47	0.38
200	120	7.18	4.67	74.37	18.22	0.46

Việc tăng thời gian trộn tại 200 °C để tạo điều kiện cho nhựa đường bao bọc hoàn toàn và đồng đều xung quanh các hạt cốt liệu, làm giảm mạnh độ chảy nhựa xuống mức thấp nhất là 0.38% ở 90 giây, đồng thời độ ổn định Marshall tiếp tục tăng lên. Khi trộn quá lâu (120 giây), độ chảy nhựa tăng nhẹ và độ ổn định Marshall giảm tương ứng, điều này cho thấy có sự tồn tại của thời gian trộn hợp lý.

Các đặc trưng thể tích của SMA sử dụng xi thép và sợi xơ dừa chỉ biến động nhỏ khi thay đổi nhiệt độ sấy cốt liệu và thời gian trộn. Va giảm nhẹ từ 4.95% xuống khoảng 4.56–4.67%, trong khi VMA duy trì ổn định khoảng 18.01–18.47%, cho thấy cấu trúc cấp phối không thay đổi đáng kể. Như vậy, sự cải thiện độ chảy nhựa và độ ổn định Marshall chủ yếu là do chất lượng hình thành vữa nhựa và sự tương tác giữa nhựa, sợi xơ dừa và bề mặt hạt xi thép.

3.4. Mối quan hệ giữa độ chảy nhựa - độ ổn định Marshall - các đặc tính thể tích



Hình 10. Tương quan hồi quy giữa độ chảy nhựa với độ ổn định Marshall và các đặc trưng thể tích.

Hình 10 thể hiện mối quan hệ rõ ràng giữa độ chảy nhựa và độ ổn định Marshall và các đặc tính thể tích của SMA. Cụ thể, khi độ chảy nhựa tăng, độ ổn định Marshall có xu hướng giảm tuyến tính, thể hiện qua hệ số tương quan cao ($R^2 = 0.958$), điều này cho thấy hiện tượng chảy nhựa ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu tải của SMA. Ngược lại, chỉ tiêu độ rỗng dư (Va) tăng theo độ chảy nhựa, phản ánh sự mất ổn định cấu trúc và phân bố nhựa không đồng đều trong SMA. Đối với VFA và VMA, hai giá trị này giảm khi độ chảy nhựa tăng, chứng tỏ sự thiếu hụt nhựa hiệu dụng bao phủ và lấp kín trong khung cốt liệu. Đồng thời, cho thấy cấu trúc thể tích của SMA bị mất cân bằng, phản ánh khả năng giữ nhựa kém và nguy cơ suy giảm các đặc tính cơ học lâu dài của SMA. Các hệ số R^2 của các đường hồi quy đều lớn hơn 0.9, khẳng định mức độ tương quan chặt chẽ giữa độ chảy nhựa và các đặc tính thể tích trong SMA. Nhìn chung, sự gia tăng độ chảy nhựa không chỉ làm suy giảm độ ổn định Marshall mà còn ảnh hưởng bất lợi đến các đặc tính thể tích của hỗn hợp. Điều này cho thấy độ chảy nhựa là một thông số quan trọng cần được kiểm soát chặt

chẽ trong thiết kế và thi công SMA. Kết quả này phù hợp với bản chất của SMA có hàm lượng nhựa cao nhưng đòi hỏi phải được ổn định bằng sợi hoặc biện pháp công nghệ phù hợp. Do đó, việc kiểm soát độ chảy nhựa của SMA là yếu tố then chốt nhằm đảm bảo chất lượng và độ bền lâu dài của mặt đường.

3.5. Đề xuất quy trình chế tạo

Trên cơ sở tổng hợp các kết quả thí nghiệm, đề xuất quy trình chế tạo SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa với nhiệt độ sấy cốt liệu tăng thêm khoảng 10°C , thời gian trộn tăng thêm khoảng 30 giây và cấp sợi xơ dừa (trộn khô trước với bột khoáng) cùng lúc với cấp nhựa đường như minh họa trong Hình 11. Phương án này ngoài việc kiểm soát hiệu quả độ chảy nhựa, còn duy trì độ ổn định Marshall và không gây bất lợi đến các chỉ tiêu thể tích của hỗn hợp.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng việc làm giảm độ chảy nhựa cũng có thể đạt được thông qua việc thay đổi hàm lượng nhựa hoặc tăng hàm lượng hạt nhỏ trong cấp phối. Trong phạm vi nghiên cứu này, các

thông số thành phần được giữ không đổi nhằm tập trung làm rõ ảnh hưởng của quy trình chế tạo. Do đó, các kết quả thu được phản ánh vai trò của công nghệ chế tạo như một giải pháp kỹ thuật có thể góp phần hạn chế độ chảy nhựa của SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa, qua đó nâng cao tính ổn định của hỗn hợp trong quá trình sản xuất và thi công.



Hình 11. Quá trình chế tạo SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa.

4. Kết luận

Trên cơ sở phân tích kết quả thí nghiệm, nghiên cứu cho thấy quy trình cấp sợi xơ dừa theo phương pháp trộn khô với bột khoáng đồng thời với cấp nhựa đường giúp phát huy hiệu quả ổn định nhựa của sợi, đồng thời hạn chế hiện tượng cháy sém, qua đó làm giảm nguy cơ chảy nhựa. Đối với SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa, việc tăng nhiệt độ sấy cốt liệu thêm khoảng 10 °C kết hợp với kéo dài thời gian trộn thêm khoảng 30 giây là cần thiết để nhựa đường bao bọc đầy đủ và đồng đều bề mặt cốt liệu. Kết quả cũng chỉ ra rằng hiện tượng chảy nhựa gây suy giảm đáng kể độ ổn định Marshall, trong khi các chỉ tiêu thể tích hầu như không biến động khi hàm lượng nhựa được giữ cố định. Mỗi quan hệ chặt chẽ giữa độ chảy nhựa, độ ổn định Marshall và các đặc trưng thể tích khẳng định vai trò then chốt của việc kiểm soát độ chảy nhựa trong SMA. Nhìn chung, việc điều chỉnh hợp lý quy trình chế tạo được xem là giải pháp kỹ thuật khả thi và hiệu quả nhằm nâng cao chất lượng, tính ổn định và khả năng ứng dụng thực tế của SMA sử dụng xỉ thép và sợi xơ dừa.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học GTVT trong đề tài mã số T2026-PHII_CT-010

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.

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.

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*

*Corresponding author: phucv_ph@utc.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] F. Hauber, "Zugabe von Faserstoffen und deren Nutzen im Asphaltmischgut," *J. Rettenmaier & Söhne Group*, <https://asphaltsuisse.ch/wp-content/uploads/2019/09/Zugabe-von-Faserstoffen.pdf>, 2019.
- [2] 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.
- [3] C. V. Hùng, N. Q. Phúc, L. X. Chiêu, và T. D. Hợi , "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.
- [4] 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.
- [5] V. H. Lâm, L. V. Phúc, L. V. Bách, "Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá khả năng sử dụng xơ dừa thay thế Cellulose làm phụ gia để chế tạo hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA)", *Tạp chí Khoa học công nghệ GTVT*, Tập 13 – Số 4, tr. 56-60, 2024.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] *Lớp mặt đường bằng hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) – Thi công và nghiệm thu*, TCCS36:2021/TCĐBVN, 2021.
- [10] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 6: Xác định độ chảy nhựa*, TCVN 8860-6:2011, 2011.
- [11] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 1: Xác định độ ổn định, độ dẻo Marshall*, TCVN 8860-1:2011, 2011.
- [12] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 9: Xác định rỗng dư*, TCVN 8860-9:2011, 2011.
- [13] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 10: Xác định độ rỗng cốt liệu*, TCVN 8860-10:2011, 2011.
- [14] *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 11: Xác định độ rỗng lấp đầy nhựa*, TCVN 8860-11:2011, 2011.
- [15] M. Bérubé, S. Lamothe, K. Bilodeau, and A. Carter, "Laboratory Study of the Effects of the Mixer Type and Mixing Time on the Volumetric Properties and Performance of a HMA with 30 Percent Reclaimed Asphalt Pavement", *Materials (Basel)*, Feb.2023, doi:10.3390/ma16031300.
- [16] N. V. Hùng, N. V. Du, "Đánh giá khả năng sử dụng xỉ thép làm cốt liệu sản xuất bê tông nhựa ở Việt Nam", *Tạp chí GTVT*, Số tháng 6/2015, 2015.