



## STUDY THE EFFECT OF SULFUR CRYSTALLIZATION BY THE TIME IN ASPHALT CONCRETE STRUCTURE ON MARSHALL INDICATORS

Nguyen Thu Trang<sup>1\*</sup>, Tran Ngoc Hung<sup>1</sup>, Pham Huy Khang<sup>2</sup>, Bui Xuan Cay<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Transport Technology, No 54 Trieu Khuc Street, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 20/4/2020

Revised: 14/5/2020

Accepted: 15/5/2020

Published online: 28/6/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.6>

\* *Corresponding author*

Email: trangnt@utt.edu.vn

**Abstract.** The paper presents the research results of the effect of sulfur crystallization in asphalt concrete structure (BTA) on Marshall indicators. After mixing, compaction, the crystallization phenomenon changes the allotrope of sulfur to change the strength characteristics of sulfur asphalt concrete (BTAS). After 14 days of maintenance, the Marshall stability of BTAS increased significantly (from 20 % to 33 % depending on the amount of sulfur used) compared to BTA and 24 hours stability of BTAS samples also improved. The study results also showed that BTAS has a mixing temperature (135 °C) and compaction temperature (125 °C) lower than conventional BTA while ensuring the technical requirements of asphalt concrete.

**Keywords:** Bitum, sulfur, bitum-sulfur binder (SBB), hot mix asphalt – sulfur, sulfur crystallization.



## NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA QUÁ TRÌNH KẾT TINH LƯU HUỖNH TRONG CẤU TRÚC BÊ TÔNG ASPHALT ĐẾN CÁC CHỈ TIÊU MARSHALL

Nguyễn Thu Trang<sup>1\*</sup>, Trần Ngọc Hưng<sup>1</sup>, Phạm Huy Khang<sup>2</sup>, Bùi Xuân Cây<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, Số 54 Triều Khúc, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 20/4/2020

Ngày nhận bài sửa: 14/5/2020

Ngày chấp nhận đăng: 15/5/2020

Ngày xuất bản Online: 28/6/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.6>

\* Tác giả liên hệ

Email: trangnt@utt.edu.vn

**Tóm tắt.** Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu sự ảnh hưởng của quá trình kết tinh lưu huỳnh trong cấu trúc bê tông asphalt (BTA) đến các chỉ tiêu Marshall. Sau quá trình trộn, đầm chặt, hiện tượng kết tinh chuyển dạng thù hình của lưu huỳnh làm thay đổi khả năng chịu lực của bê tông asphalt lưu huỳnh (BTAS). Sau 14 ngày bảo dưỡng, độ ổn định Marshall của BTAS tăng đáng kể (tăng từ 20% đến 33% tùy theo lượng lưu huỳnh sử dụng) so với BTA đồng thời độ ổn định 24 giờ của mẫu BTAS cũng được cải thiện. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy BTAS có nhiệt độ trộn (135 °C) và nhiệt độ đầm nén (125 °C) thấp hơn so với BTA thông thường mà vẫn đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật của BTA.

**Từ khóa:** Bitum, chất kết dính bitum - lưu huỳnh, bê tông asphalt – lưu huỳnh (BTAS), lưu huỳnh kết tinh.

© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Lưu huỳnh (S) được sử dụng cho bê tông asphalt (BTA) được nghiên cứu từ những năm 1930, tiếp tục là xu hướng nghiên cứu trong những năm gần đây cho BTA rải nóng và BTA rải ấm [1-16]. Kết quả nghiên cứu từ các thử nghiệm toàn diện trong giai đoạn từ năm 2004 đến 2008 ở một số quốc gia như Hoa Kỳ, Canada, Trung Quốc, Qatar, Ả rập Saudi,... đã cho thấy lưu huỳnh có thể cải thiện độ ổn định Marshall, tăng độ cứng, tăng

khả năng chống biến dạng và kháng mọi của BTA [1, 4]. Tại Liên bang Nga, bê tông asphalt cải tiến bằng lưu huỳnh cũng đã được nghiên cứu và ứng dụng. Các kết quả nghiên cứu và ứng dụng BTAS tại Nga đã cho thấy ưu điểm vượt trội của BTAS. Thứ nhất, sự kết hợp của lưu huỳnh trong BTA số lượng lớn góp phần làm giảm ô nhiễm môi trường tại Liên bang Nga, nơi tích lũy lượng lớn lưu huỳnh. Thứ hai, thay thế một phần nhựa đường bằng lưu huỳnh sẽ cắt giảm chi phí xây dựng đường, tăng hiệu quả kinh tế do lượng lưu huỳnh sẵn có và chi phí rất thấp mặt khác sản xuất, thi công BTAS được thực hiện với thiết bị hiện có không làm phát sinh các chi phí cần thiết để điều chỉnh chu trình sản xuất và công nghệ thi công. Thứ ba, BTAS cải thiện đáng kể hiệu suất làm việc của mặt đường như tăng khả năng kháng lún vệt bánh xe, tăng độ bền kéo, cường độ chịu nén... , đặc biệt là ở các khu vực có sự thay đổi nhiệt độ lớn [12].

Tổng quan các nghiên cứu trên thế giới cho thấy lưu huỳnh là một vật liệu phù hợp thay thế một phần nhựa đường trong BTA sử dụng cho mặt đường cấp cao, mặt đường chịu áp lực lớn như mặt đường tải trọng giao thông nặng, nút giao thông lưu lượng cao, nhà ga hàng hóa và sân bay cũng như mặt đường toàn chiều sâu [4]. Bê tông asphalt lưu huỳnh (BTAS) sản xuất với quy trình công nghệ phù hợp (giới hạn nhiệt độ) không gây độc hại cho môi trường và con người, giảm được chi phí nhựa đường và tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải [3,10,12].

Tại Việt Nam, Nguyễn Văn Hùng và cộng sự đã thực hiện một số nghiên cứu về BTAS [16]. Với tiềm năng về nguyên liệu lưu huỳnh tại Việt Nam, nhóm tác giả sử dụng lưu huỳnh – sản phẩm của nhà máy lọc dầu Dung Quất, thực hiện các nghiên cứu đặc tính của chất kết dính bitum – lưu huỳnh [15]. Trong phạm vi bài báo này tác giả lựa chọn một số thí nghiệm điển hình đánh giá khả năng làm việc của BTAS ở nhiệt độ cao và theo ngày tuổi của mẫu. Kết quả nghiên cứu cụ thể hóa (lượng hóa) sự thay đổi đặc tính của bê tông asphalt – lưu huỳnh (BTAS) theo thời gian, theo quá trình kết tinh của lưu huỳnh.

## **2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM**

### **2.1. Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu**

Cốt liệu thô và cốt liệu mịn sử dụng được nghiền từ đá bazal mỏ đá Phú Mãn (Thanh Oai – Hà Nội), bột khoáng đá vôi Kiện Khê (Hà Nam). Các chỉ tiêu kỹ thuật của cốt liệu và bột khoáng sau khi thí nghiệm cho thấy đáp ứng yêu cầu sử dụng cho BTA theo TCVN 8819:2011 và Quyết định số 858/QĐ-BGTVT năm 2014. Bitum 60/70 do công ty TNHH Petrolimex cung cấp, được lấy mẫu và thử nghiệm kiểm tra chất lượng cho thấy đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của TCVN 7493:2005 và Thông tư 27/TT-BGTVT năm 2014.

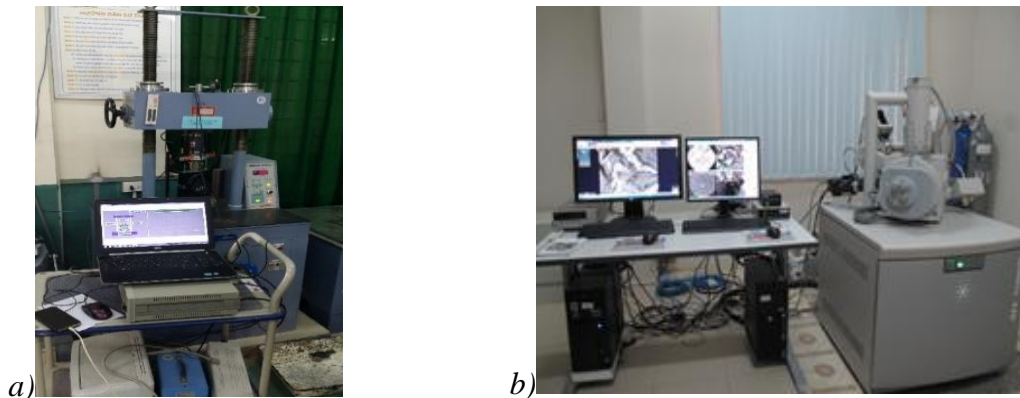
Lưu huỳnh sử dụng là sản phẩm của nhà máy lọc dầu Dung Quất, lấy mẫu tại công ty TNHH một thành viên lọc hóa dầu Bình Sơn. Ở nhiệt độ môi trường, lưu huỳnh ở dạng hạt rắn, màu vàng, đường kính 1-2mm, khối lượng riêng theo phân tích X-ray 2,067g/cm<sup>3</sup> [13].

## 2.2. Phương pháp nghiên cứu

Hỗn hợp BTAS và BTA (đối chứng) được thiết kế thành phần theo phương pháp Marshall. Thử nghiệm Marshall theo ASTM D6927 với thiết bị tự động Daiwa (Hình 1a) cho phép xây dựng biểu đồ lực - biến dạng khi xác định độ ổn định và độ dẻo Marshall.

Chất kết dính bitum-lưu huỳnh (SBB) được trộn ở nhiệt độ 135 °C với máy khuấy đĩa dạng cánh kép trong thời gian 5 phút trước khi sử dụng trộn BTAS.

Cấu trúc vi mô của BTAS, mức độ hình thành các tinh thể lưu huỳnh theo thời gian được đánh giá bằng thiết bị chụp hiển vi điện tử (Scanning Electron Microscope – SEM). Thiết bị SEM model Quanta 450 do hãng FEI (Mỹ) sản xuất có thể ghi nhận hình ảnh BTAS với độ phân giải cao khi quét chùm electron trên bề mặt (Hình 1b). Hình ảnh được xây dựng thông qua ghi nhận và phân tích các bức xạ phát ra sau tương tác của chùm electron với mẫu. Ghi nhận và phân tích phổ tia X phát ra cho thông tin về các nguyên tố hóa học có trong mẫu.



Hình 1. Thiết bị thí nghiệm Marshall tự động (a) và thiết bị chụp SEM (b).

## 2.3. Lựa chọn các thông số chế tạo mẫu BTAS

Hàm lượng lưu huỳnh trong SBB tùy thuộc vào nhiều yếu tố trong đó có đặc điểm vật liệu và mục tiêu sử dụng. Tỷ lệ lưu huỳnh/bitum (S/B) bằng 4:6 trong SBB được coi là tỷ lệ phù hợp khi sử dụng lưu huỳnh ở dạng phụ gia Thiopave [4]. Theo kết quả nghiên cứu của của Cục quản lý đường bộ liên bang Mỹ (FHWA) và Trung tâm NCAT (Đại học Auburn – Hoa Kỳ), tỷ lệ S/B thường sử dụng cho hiệu quả tốt dao động từ 30/70 đến 40/60. Với khoảng tỷ lệ này, BTAS sử dụng SBB nâng cao độ ổn định, tăng độ cứng và tăng khả năng kháng môi [5].

Nghiên cứu của Strickland và các cộng sự năm 2007 cho thấy sau khi chế tạo mẫu BTAS cần có khoảng thời gian bảo dưỡng trước khi thử nghiệm các đặc tính cơ học [11]. Nghiên cứu cho thấy, BTAS thường phát triển cường độ sau khoảng 10 đến 14 ngày bảo dưỡng. Theo kết quả các nghiên cứu [14,15], với tỷ lệ S/B khác nhau, các tính chất cơ lý

của SBB (nhiệt độ hóa mềm, độ kim lún, đặc tính lưu biến) thay đổi theo chiều hướng tăng khi tỉ lệ lưu huỳnh tăng, đồng thời, với 1 tỷ lệ S/B, các thông số này cũng tăng theo ngày bảo dưỡng do sự kết tinh của lưu huỳnh. Các đặc tính cơ lý của SBB tăng cao nhất sau 14 ngày bảo dưỡng và với hàm lượng S/B = 40/60 [15]. Các đặc tính của SBB được cải thiện dẫn đến cải thiện các chỉ tiêu Marshall và khả năng kháng vết hằn bánh xe của BTAS.

Trong phạm vi nghiên cứu nhóm tác giả lựa chọn 02 tỷ lệ S/B cho nghiên cứu là 30/70 và 40/60. Các hỗn hợp BTA sử dụng trong nghiên cứu được ký hiệu là BTA, BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 tương đương với BTA sử dụng nhựa đường 60/70, SBB với S/B=30/70 và SBB với S/B=40/60. Cỡ hạt danh định lớn nhất của các loại BTA là 12,5 mm. Lựa chọn khoảng thời gian nghiên cứu sự thay đổi đặc tính Marshall là: 1, 7, 14, 21 và 28 ngày.

Các kết quả nghiên cứu công bố trong các công trình [4, 5, 9, 15] cho thấy, nhiệt độ trộn hỗn hợp BTAS thường nằm trong khoảng 130°C – 140 °C do độ nhớt của bitum - lưu huỳnh (SSB) thấp hơn so với nhựa đường ban đầu. Kết quả thử nghiệm độ nhớt quay Brookfield trong nghiên cứu [15], đối chiếu với nghiên cứu của các tác giả trên thế giới, lựa chọn nhiệt độ trộn của hỗn hợp BTAS là 135 °C, nhiệt độ đầm nén mẫu BTAS là 125 °C. Hỗn hợp BTA đối chứng trộn ở 155 °C và đầm mẫu ở 145 °C.

Theo các kết quả nghiên cứu [4,5], trong quá trình thiết kế thành phần các hỗn hợp BTAS, để có cơ sở lựa chọn các hàm lượng SBB, tiến hành quy đổi tương đương về thể tích của SBB và bitum thông thường theo công thức sau:

$$SBB(\%) = \frac{100AR}{100R - P_s(R - G_a)} \quad (1)$$

Trong đó:

A: hàm lượng chất kết dính bitum thông thường, %;

R: Tỉ lệ khối lượng riêng của lưu huỳnh và bitum (R~2);

P<sub>s</sub>: hàm lượng lưu huỳnh trong chất kết dính SBB, %;

G<sub>s</sub>: Khối lượng riêng của lưu huỳnh ở nhiệt độ 25 °C, 2,067g/cm<sup>3</sup>;

G<sub>a</sub>: Khối lượng riêng của bitum ở nhiệt độ 25 °C, 1,035g/cm<sup>3</sup>.

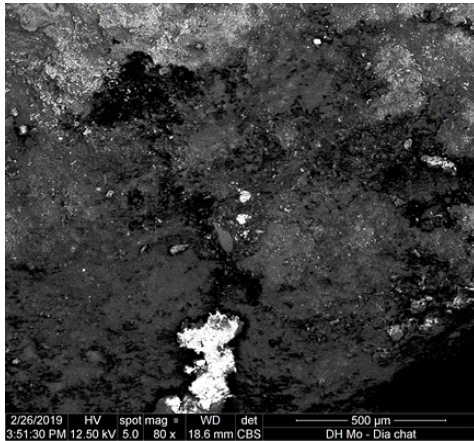
Để chế tạo hỗn hợp BTAS, tiến hành tính toán hàm lượng các cốt liệu đáp ứng đường cong cấp phối. Cốt liệu được gia nhiệt ở nhiệt độ 135 °C trong 12 giờ. Song song với quá trình gia nhiệt cốt liệu, tiến hành trộn hỗn hợp SBB với tỷ lệ S/B nghiên cứu theo quy trình thể hiện trong nghiên cứu [15]. Khi cốt liệu đảm bảo nhiệt độ, tiến hành quá trình "trộn khô" cốt liệu với bột khoáng trong thời gian 30s trong thùng trộn đã gia nhiệt đến 135 °C. Quá trình "trộn ướt" với chất kết dính SBB được tiến hành sau đó trong khoảng thời gian 60s, đảm bảo hỗn hợp đồng nhất. Hỗn hợp BTAS được bảo dưỡng duy trì ở nhiệt độ 125 °C trong 2 giờ trước khi tiến hành đầm chế bị mẫu

### 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

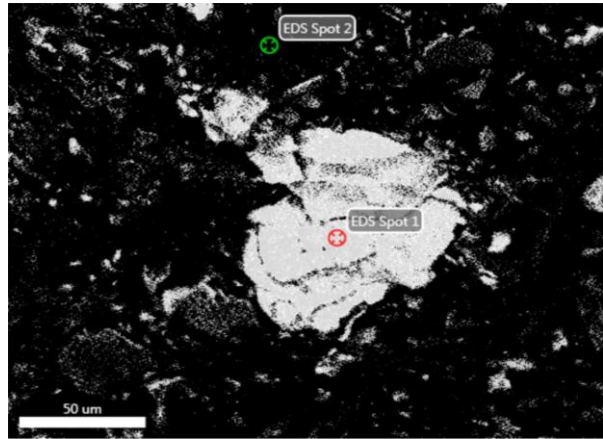
#### 3.1. Kết quả thí nghiệm

##### 3.1.1. Kết quả phân tích cấu trúc BTAS

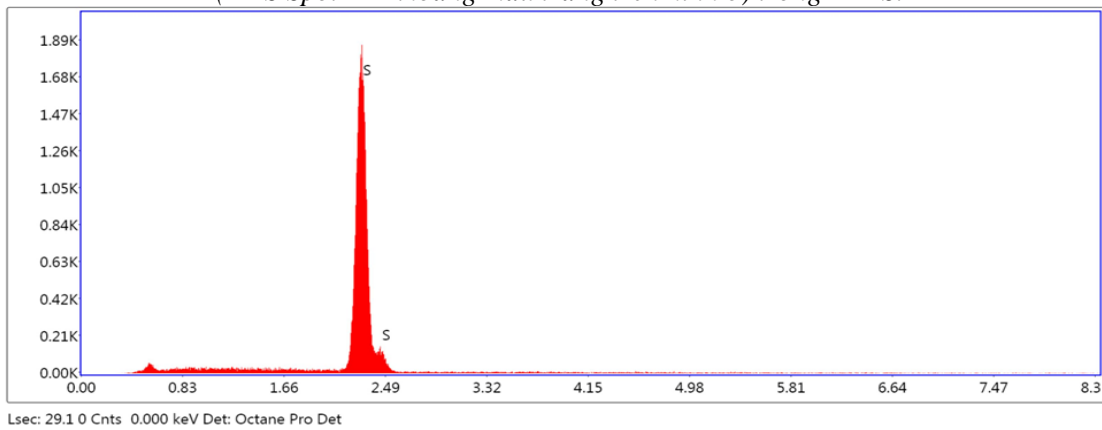
a) Kết quả chụp SEM mẫu BTAS ở 14 ngày.



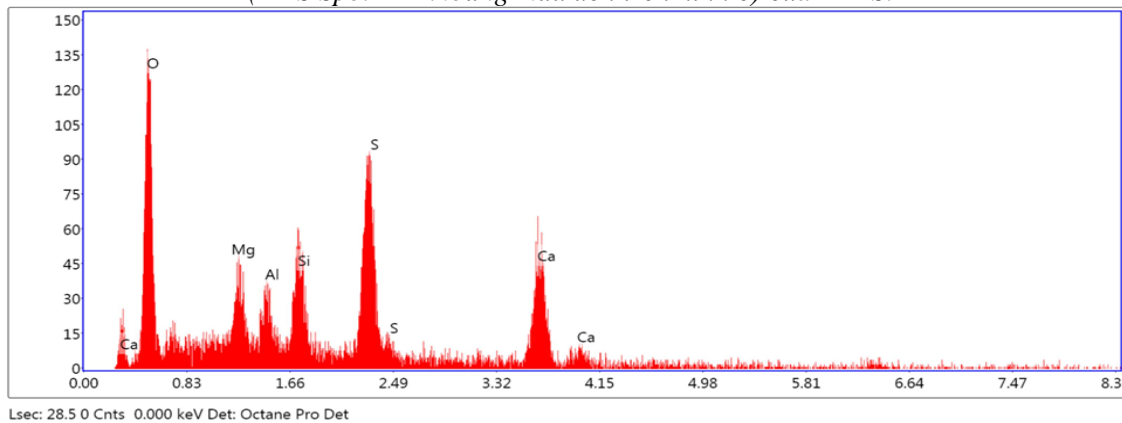
b) Kết quả chụp SEM và phân tích EDS mẫu BTAS mẫu 14 ngày.



c) Phân tích phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS Spot 1 – khoảng mẫu trắng trên hình b) trong BTAS.



d) Phân tích phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS Spot 2 – khoảng mẫu đen trên hình b) của BTAS.



Hình 2. Kết quả chụp SEM (a,b) và phân tích phổ tán xạ năng lượng tia X (c, d) mẫu BTAS sau 14 ngày.

Kết quả chụp cấu trúc mẫu bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) cho thấy trên mẫu BTAS tồn tại hai vùng có màu trắng và màu đen (hình 2a). Để chứng minh sự có mặt của các nguyên tố trong mẫu vật nhóm tác giả thực hiện phân tích phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS) của mẫu BTAS (Hình 2b, 2c, 2d). Hình 2c cho thấy vùng màu trắng trong mẫu BTAS có thành phần nguyên tố lưu huỳnh (S). Như vậy, sau 14 ngày bảo dưỡng lưu huỳnh tinh thể kết tinh rời rạc trong cấu trúc của mẫu BTAS. Kết quả phân tích EDS vùng màu đen trong mẫu BTAS (hình 2d) tồn tại nhiều nguyên tố (Mg, Ca, Si, S, Al) đây là thành phần nguyên tố có trong cốt liệu của bê tông asphalt.

Hình ảnh SEM và phân tích EDS cho thấy sau 14 ngày bảo dưỡng, các tinh thể lưu huỳnh kết tinh (màu trắng) thiết lập một mạng tinh thể trong các lỗ rỗng và chất kết dính, gia cường rời rạc cấu trúc, làm tăng độ cứng của các mẫu BTAS. Các tinh thể lưu huỳnh có nhiều trong các lỗ rỗng hơn trong chất kết dính, do đó, cấu trúc BTAS cần có đủ độ rỗng dư (khoảng trống) tạo điều kiện cho các tinh thể lưu huỳnh phát triển và phân bố [7].

Hình ảnh SEM cấu trúc mẫu BTAS cho thấy tinh thể lưu huỳnh có hình dạng tấm, với kích thước micron là tinh thể lưu huỳnh đơn xiên ở dạng beta ( $S\beta$ ) [2]. Cấu trúc vi mô cho thấy vai trò của bitum làm ức chế sự hình thành lưu huỳnh dạng trực giao ( $S\alpha$ ), sự tương tác giữa bitum và lưu huỳnh đã tạo ra hỗn hợp lưu huỳnh monoclinic. Sự lấp đầy các lỗ rỗng vi mô trong cấu trúc BTAS làm tăng khả năng chống nứt và giãn nở nhiệt của BTAS. Mặt khác lưu huỳnh biến đổi không trải qua quá trình biến đổi đẳng hướng (hình thành lưu huỳnh trực giao) khi hóa rắn sẽ có độ co rút ít hơn và do đó, phát triển ít ứng suất dư hơn khi giảm nhiệt độ, giảm khả năng nứt do nhiệt của BTAS ở những vùng có biên độ thay đổi nhiệt độ lớn [2].

### 3.1.2. Đặc tính thể tích của các loại BTA và BTAS

Kết quả thí nghiệm xác định hàm lượng chất kết dính (CKD) tối ưu cho các hỗn hợp BTA và BTAS được thể hiện trong Bảng 1. Độ rỗng dư của các mẫu nằm trong khoảng 4,5-:-5% (khuyến nghị trong Quyết định 858/QĐ-BGTVT). Kết quả cho thấy hàm lượng CKD tối ưu trong BTAS lớn hơn trong BTA thông thường. Hàm lượng bitum sử dụng trong hai loại BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 lần lượt là 3,94% và 3,65%, thấp hơn hàm lượng bitum sử dụng trong BTA thông thường (4,5%).

Bảng 1. Hàm lượng CKD tối ưu các mẫu BTA và BTAS.

Loại bê tông asphalt	Hàm lượng CKD tối ưu, %		
		Bitum	Lưu huỳnh
BTA	4,5	4,5	0
BTAS_30/70	5,62	3,94	1,68
BTAS_40/60	6,08	3,65	2,43

Kết quả thử nghiệm xác định các đặc tính thể tích các mẫu BTA, BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 được trình bày trong Bảng 2. Số lượng mẫu mỗi loại là 6 mẫu/loại. Với hàm lượng CKD tối ưu trong Bảng 1, khối lượng thể tích và độ rỗng dư các mẫu BTA, BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 tương đương nhau. Phân tích phương sai đánh giá sự khác biệt độ rỗng dư 3 loại BTA (mỗi loại 6 mẫu) với mức ý nghĩa  $\alpha=0.05$ , phân tích hậu định (post-hoc analysis) theo phương pháp Tukey's HSD với sai số toàn bộ các cặp so sánh 5%. Kết quả phân tích cho thấy không có sự khác biệt ý nghĩa thống kê độ rỗng dư của 3 loại BTA, xác suất xảy ra giả thuyết đảo  $p=0,686$  ( $p > \alpha$ ) với giá trị kiểm định F-value =0,39. Độ rỗng dư so sánh từng cặp không phát hiện sự khác biệt (Hình 3). Thực hiện phân tích



phương sai với độ rỗng cốt liệu (VMA) và độ rỗng lấp đầy nhựa (VFA) chỉ ra có sự khác biệt giữa từng loại BTA. Thông số p và F được thể hiện trong Bảng 3, giá trị p-value rất nhỏ, nhỏ hơn mức có nghĩa  $\alpha=0.05$ , do đó, loại bỏ giả thuyết đảo giả định không có sự khác biệt VMA và VFA các loại BTA.

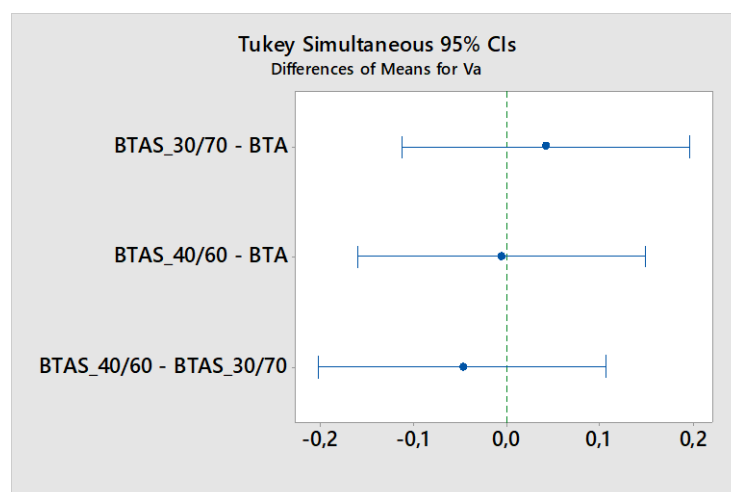
Bảng 2. Các đặc trưng thể tích của các loại BTA.

Loại bê tông asphalt	Giá trị trung bình các đặc trưng thể tích			
	Khối lượng thể tích, g/cm <sup>3</sup>	Độ rỗng dư, (Va) %	Độ rỗng cốt liệu (VMA), %	Độ rỗng lấp đầy nhựa (VFA), %
BTA	2,525	4,53	14,74	69,28
BTAS_30/70	2,529	4,57	15,59	70,68
BTAS_40/60	2,539	4,55	16,46	72,34

Phân tích thống kê số liệu thử nghiệm các đặc tính thể tích cho thấy, với độ rỗng dư tương đương (do mục tiêu khi lựa chọn hàm lượng CKD tối ưu), BTAS có độ rỗng cốt liệu (VMA) và độ rỗng lấp đầy nhựa (VFA) cao hơn so với BTA thông thường. Theo quan điểm của nhóm tác giả, nguyên nhân này là do nhiệt độ đầm nén của BTAS (125 °C) giảm so với thông thường (145 °C) nên hiệu quả đầm nén của BTAS không tương đương với BTA mặc dù nhiệt độ đầm nén đã chọn tương ứng với độ nhớt của chất kết dính. Chỉ số VFA cao chứng tỏ thể tích của SBB với hàm lượng tối ưu tính toán, cao hơn so với bitum thông thường

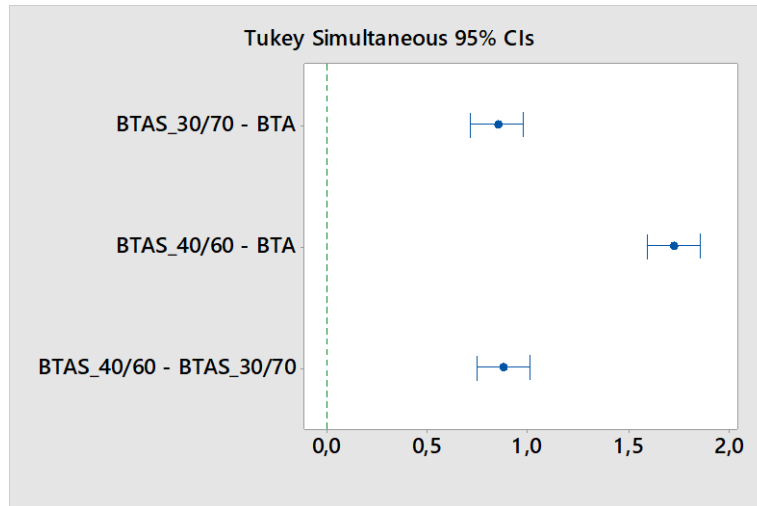
Bảng 3. Thông số phân tích phương sai với Va, VMA và VFA.

Phân tích phương sai các thông số thể tích	Độ rỗng dư, Va (%)	Độ rỗng cốt liệu (VMA), %	Độ rỗng lấp đầy nhựa (VFA), %
Tín hiệu, F-value	0,39	576,39	62,4
Xác xuất H <sub>0</sub> , p-value	0,686	0,000	0,000



Hình 3. Phân tích hậu định sự khác biệt độ rỗng dư các loại BTA.

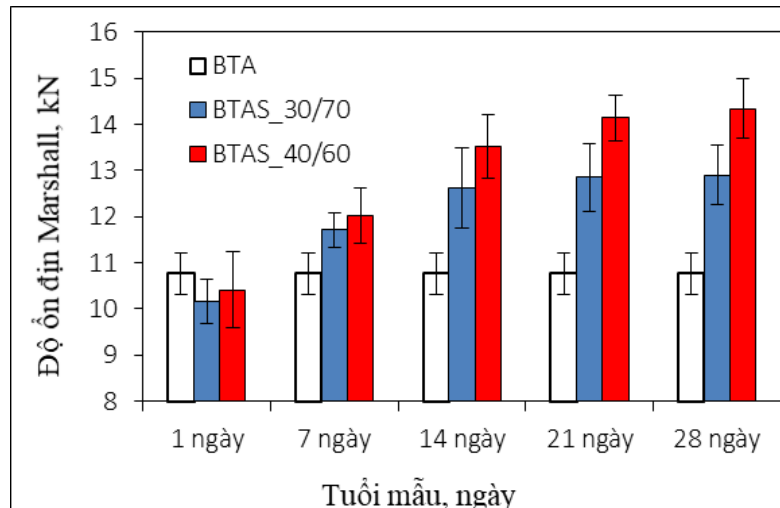




Hình 4. Phân tích hậu định sự khác biệt độ rỗng cốt liệu các loại BTA.

### 3.2.3. Đặc tính Marshall của các loại BTA và BTAS

Các mẫu BTA và BTAS sau khi chế bị đồng loạt, tiến hành bảo dưỡng ở nhiệt độ trong phòng và thử nghiệm các mẫu BTAS sau các khoảng thời gian bảo dưỡng: 1,7,14,21 và 28 ngày. Kết quả thử nghiệm các thông số Marshall các loại BTA theo các ngày bảo dưỡng được trình bày trong Bảng 4 và Bảng 5. Tương quan giá trị độ ổn định Marshall theo ngày bảo dưỡng được thể hiện trong Hình 5.



Hình 5. Biểu đồ thể hiện sự thay đổi độ ổn định Marshall các mẫu BTA theo thời gian.

Kết quả cho thấy, độ ổn định Marshall của BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 thử nghiệm sau 1 ngày bảo dưỡng có giá trị trung bình thấp hơn so với BTA thông thường, tuy nhiên, phân tích ANOVA chỉ ra sự khác biệt này không có ý nghĩa thống kê ( $F=1,44$ ;  $p=0,269 > \alpha=0,05$ ). Độ dẻo Marshall các mẫu BTA, BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 sau 1 ngày tuổi khác biệt có ý nghĩa thống kê. Phân tích phương sai chỉ ra, sử dụng SBB làm tăng độ dẻo của BTAS từ 12% đến 14%, BTAS với SBB có tỷ lệ S/B=30/70 và S/B=40/60 sau 1 ngày không có sự khác biệt về độ dẻo Marshall.

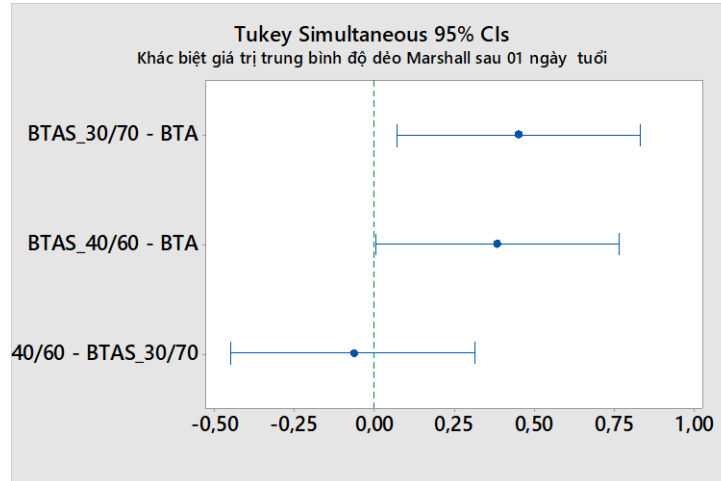
Bảng 4. Kết quả thử nghiệm độ ổn định Marshall.

Mẫu	BTA thông thường	Độ ổn định Marshall BTAS_30/70, kN					Độ ổn định Marshall BTAS_40/60, kN				
		1 ngày	7 ngày	14 ngày	21 ngày	28 ngày	1 ngày	7 ngày	14 ngày	21 ngày	28 ngày
Mẫu 1	11,13	9,89	12,10	11,64	13,48	13,8	9,53	12,88	13,23	14,97	15,53
Mẫu 2	9,94	9,65	11,29	11,96	13,71	12,86	9,99	11,63	12,49	13,98	14,01
Mẫu 3	10,91	10,28	11,57	12,30	12,4	13,57	9,61	12,04	13,27	13,87	13,72
Mẫu 4	10,55	10,51	12,00	13,50	13,24	12,29	10,63	11,19	13,98	13,6	14,57
Mẫu 5	11,05	9,80	11,29	12,50	12,39	12,7	11,25	12,48	13,71	14	14,28
Mẫu 6	10,98	10,89	12,00	13,80	11,85	12,2	11,43	11,87	14,49	14,39	13,94
<b>Trung bình</b>	<b>10,76</b>	<b>10,17</b>	<b>11,71</b>	<b>12,62</b>	<b>12,85</b>	<b>12,90</b>	<b>10,41</b>	<b>12,02</b>	<b>13,53</b>	<b>14,14</b>	<b>14,34</b>

Bảng 5. Kết quả thử nghiệm độ dẻo Marshall.

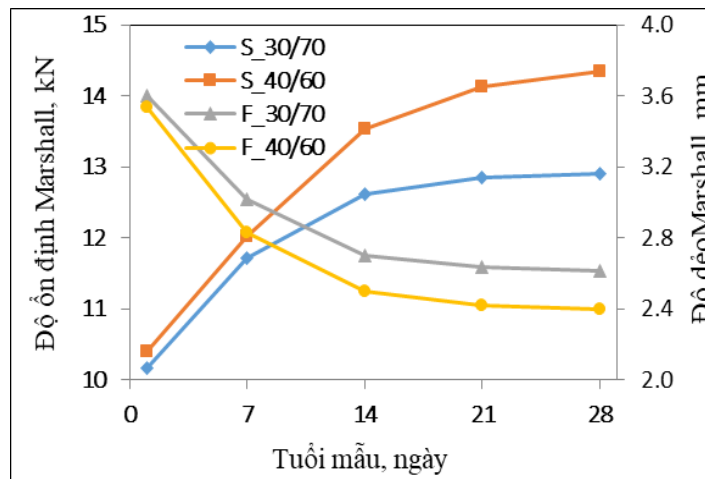
Mẫu	BTA thông thường	Độ dẻo Marshall BTAS_30/70, kN					Độ dẻo Marshall BTAS_40/60, kN				
		1 ngày	7 ngày	14 ngày	21 ngày	28 ngày	1 ngày	7 ngày	14 ngày	21 ngày	28 ngày
Mẫu 1	3,0	3,6	2,80	2,90	2,7	2,6	4,00	3,1	2,50	2,3	2,2
Mẫu 2	3,3	3,6	3,00	2,80	2,7	2,7	3,70	3	2,50	2,6	2,3
Mẫu 3	3,2	3,5	3,20	2,70	2,7	2,7	3,70	2,5	2,40	2,3	2,4
Mẫu 4	3,3	3,5	2,70	2,50	2,5	2,4	3,50	2,5	2,40	2,6	2,5
Mẫu 5	3,2	4,0	3,10	2,80	2,7	2,7	3,30	2,7	2,40	2,7	2,7
Mẫu 6	2,9	3,4	3,30	2,50	2,5	2,6	3,00	3,2	2,80	2,2	2,4
<b>Trung bình</b>	<b>3,15</b>	<b>3,60</b>	<b>3,02</b>	<b>2,70</b>	<b>2,63</b>	<b>2,62</b>	<b>3,53</b>	<b>2,83</b>	<b>2,50</b>	<b>2,45</b>	<b>2,42</b>

Khảo sát các đặc tính Marshall của BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 ở 28 ngày tuổi, so sánh với BTA cho thấy, BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 có độ ổn định cao hơn có ý nghĩa thống kê (Phân tích phương sai tính được tín hiệu khác biệt F-value = 55,2, xác suất giả thuyết đảo  $p \sim 0$ , nhỏ hơn mức ý nghĩa). Phân tích hậu định (post-hoc) phương pháp Tukey's HSD sai số các cặp so sánh 5% cho thấy độ ổn định 28 ngày tuổi của BTAS\_30/70, BTAS\_40/60 và BTA khác biệt từng cặp có ý nghĩa thống kê (Hình 6). Độ ổn định Marshall các mẫu BTAS sau 28 ngày bảo dưỡng cao hơn so với BTA thông thường từ 20% đến 33%. Tương tự, độ dẻo Marshall của BTAS sau 28 ngày bảo dưỡng thấp hơn so với BTA thông thường từ 17% đến 23%. Theo quan điểm của tác giả, sự kết tinh của lưu huỳnh trong cấu trúc của BTAS trong cấu trúc vữa nhựa và lỗ rỗng BTAS đã phát huy hiệu quả gia cường rời rạc BTAS, dẫn đến tăng khả năng chịu lực, tăng độ cứng và giảm biến dạng dưới tác dụng của ngoại lực.

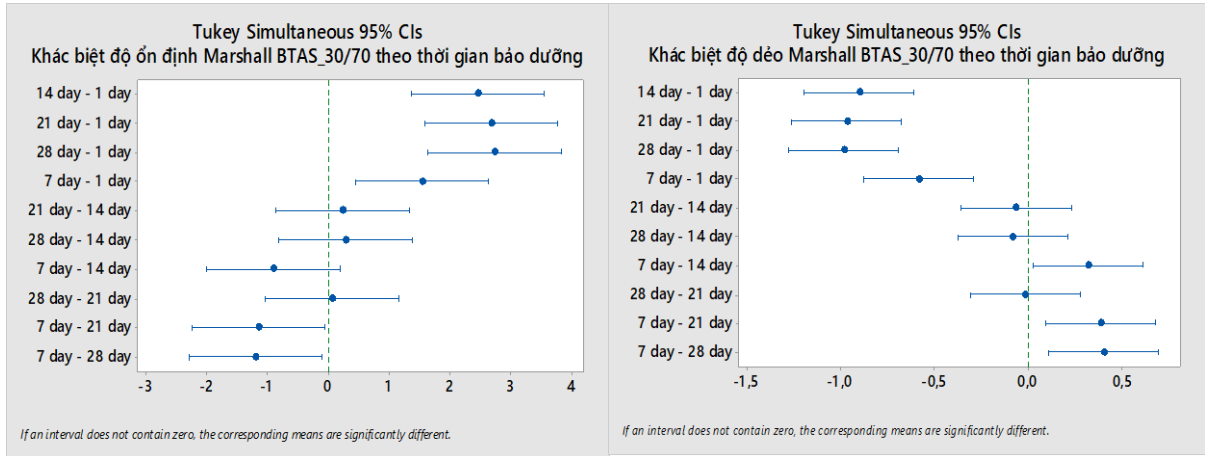


Hình 6. Phân tích hậu định sự khác biệt về độ ổn định Marshall của các BTA ở 28 ngày tuổi.

Khảo sát sự thay đổi các đặc tính Marshall của BTAS theo thời gian cho thấy, độ ổn định Marshall các mẫu BTAS tăng theo thời gian, tốc độ tăng trong thời gian 14 ngày đầu tiên sau chế bị, tăng đến ngưỡng ổn định từ 14 đến 28 ngày bảo dưỡng. Quy luật giảm của độ dẻo Marshall theo thời gian tương tự: giảm nhanh trong 14 ngày đầu tiên bảo dưỡng và dần ổn định từ 14 đến 28 ngày bảo dưỡng (Hình 7). Phân tích phương sai với  $\alpha=0.05$  và phân tích hậu định sử dụng phương pháp Tukey'sHSD sai số các cặp 5% cho thấy có sự khác biệt ý nghĩa thống kê độ ổn định Marshall mẫu BTAS\_30/70 sau 1 ngày tuổi với các mẫu ở 7, 14, 21 và 28 ngày; độ ổn định Marshall mẫu BTAS\_30/70 sau 7 ngày tuổi với các mẫu ở 1, 21 và 28 ngày. Cho thấy sau khoảng 7 đến 14 ngày, mẫu BTAS\_30/70 có các thông số Marshall phát triển đầy đủ. Độ dẻo Marshall mẫu BTAS\_30/70 giảm dần theo thời gian bảo dưỡng, ổn định sau mốc 14 ngày bảo dưỡng (Hình 8).

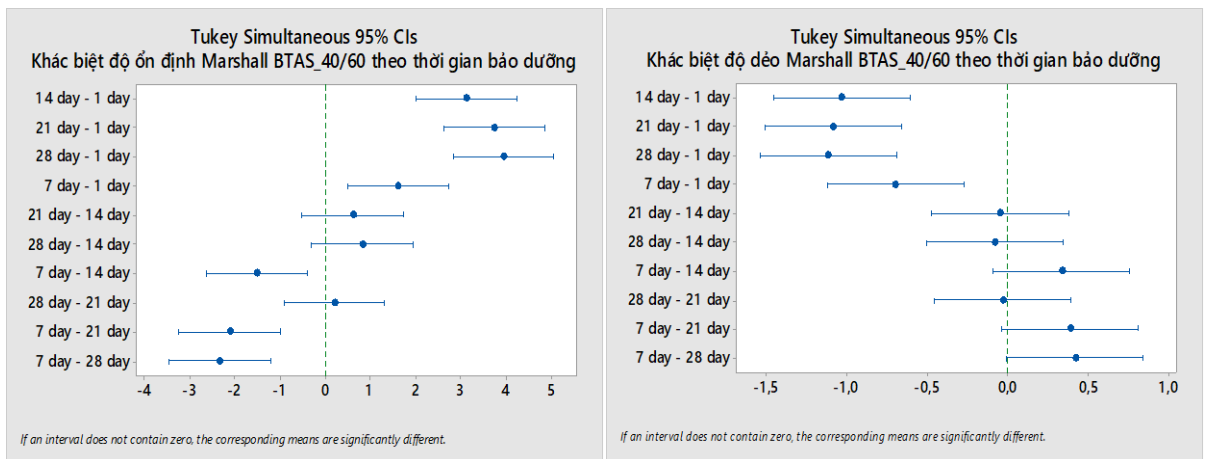


Hình 7. Biểu đồ thay đổi độ ổn định và độ dẻo Marshall theo thời gian.



Hình 8. Phân tích phương sai và hậu định các thông số Marshall mẫu BTAS\_30/70 theo thời gian.

Tương tự, phân tích phương sai và phân tích hậu định (phương pháp Tukey'sHSD) so sánh sự khác biệt giá trị độ ổn định Marshall, chỉ số dẻo Marshall các mẫu BTAS\_40/60 theo thời gian bảo dưỡng. Từ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê cho thấy, độ ổn định Marshall mẫu BTAS\_40/60 tăng theo thời gian và ổn định sau 14 ngày bảo dưỡng. Sau thời gian 14 ngày, giá trị độ ổn định Marshall tiếp tục có ghi nhận tăng về giá trị, tuy nhiên không có ý nghĩa thống kê. Độ dẻo Marshall mẫu BTAS\_40/60 giảm theo thời gian bảo dưỡng và đạt ổn định sau 7-14 ngày. Sau 14 ngày, thử nghiệm cho thấy độ dẻo tiếp tục giảm về mặt số học nhưng không có ý nghĩa thống kê (Hình 9). Theo quan điểm của tác giả, quá trình phát triển tinh thể lưu huỳnh trong cấu trúc bê tông asphalt chịu tác động của nhiều yếu tố dẫn đến sự tái cấu trúc lũy tiến của lưu huỳnh trong hỗn hợp diễn ra chậm, theo từng giai đoạn và phụ thuộc vào hàm lượng lưu huỳnh sử dụng.



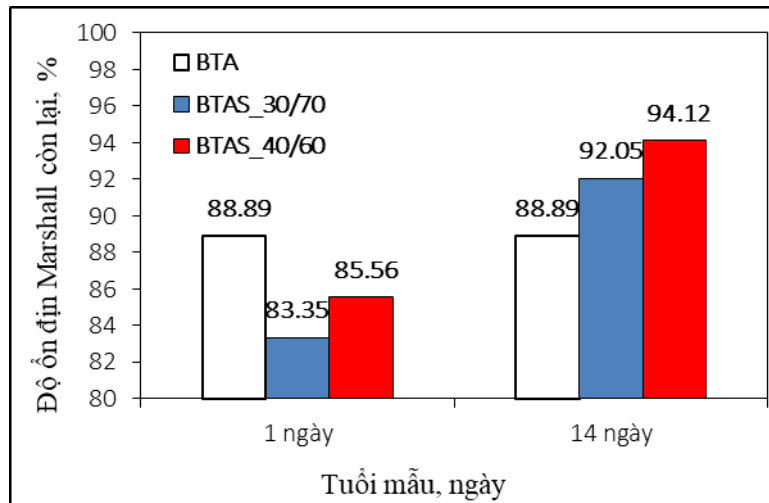
Hình 9. Phân tích phương sai và hậu định các thông số Marshall mẫu BTAS\_40/60 theo thời gian.

Độ ổn định Marshall còn lại của các mẫu BTA, BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 được thực hiện ở mốc 1 ngày và 14 ngày tuổi, kết quả thử nghiệm được trình bày trong Bảng 6. Độ ổn định Marshall còn lại của các mẫu BTAS được cải thiện rõ rệt sau thời gian bảo dưỡng (Hình 10). Kết quả thí nghiệm cho thấy, ở 1 ngày tuổi, độ ổn định Marshall còn lại các mẫu BTAS\_30/70 và BTAS\_40/60 thấp hơn rõ rệt so với BTA đối chứng (88,35% và

85,56% so với 88,89%). Thông số này chứng tỏ khả năng kháng ẩm của các mẫu BTAS sau khi đầm nén thấp hơn so với BTA. Tuy nhiên, sau thời gian bảo dưỡng 14 ngày, quá trình kết tinh của lưu huỳnh tinh thể tương đối hoàn thành, cấu trúc BTAS ổn định, độ ổn định Marshall còn lại của các mẫu BTAS cao hơn so với BTA đối chứng (92,05% và 94,12% so với 88,89%), có thể bước đầu đi đến kết luận khả năng kháng ẩm của BTAS khi đã ổn định cấu trúc. Để có thêm dữ liệu đánh giá đầy đủ về khả năng kháng ẩm, theo quan điểm tác giả cần có những thử nghiệm đối chứng, chuyên sâu hơn để khảo sát.

Bảng 6. Độ ổn định Marshall còn lại các mẫu BTA, BTAS.

Loại bê tông asphalt	Độ ổn định còn lại, %	
	1 ngày bảo dưỡng	14 ngày bảo dưỡng
BTA	88,89	88,89
BTAS_30/70	83,35	92,05
BTAS_40/60	85,56	94,12



Hình 10. Biểu đồ biểu diễn độ ổn định còn lại.

#### 4. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu lý thuyết kết hợp với nghiên cứu thí nghiệm trên một số mẫu được chế bị từ các nguyên vật liệu sẵn có tại Việt Nam, có thể đưa ra một số kết luận sau:

- Lưu huỳnh có nguồn gốc từ các nhà máy lọc hóa dầu có thể được sử dụng kết hợp với bitum để chế tạo hỗn hợp BTA có các đặc tính thể tích và Marshall tương đương BTA thông thường.

- Bê tông asphalt lưu huỳnh có nhiệt độ trộn và đầm nén thấp hơn so với BTA thông thường từ 20 °C đến 25 °C (trộn ở nhiệt độ 135 °C và đầm nén ở nhiệt độ 125 °C) mà vẫn đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật của bê tông asphalt.

- Quá trình hình thành các tinh thể lưu huỳnh trong cấu trúc BTAS làm cải thiện đáng kể các thông số Marshall của BTAS. BTAS khi ổn định cấu trúc có độ ổn định Marshall cao hơn BTA thông thường từ 20% đến 33% (tùy theo lượng lưu huỳnh sử dụng), độ dẻo Marshall của BTAS thấp hơn so với BTA thông thường từ 17% đến 23%. Các thông số Marshall thay đổi không đáng kể ở 21, 28 ngày tuổi cho thấy quá trình kết tinh của lưu huỳnh diễn ra nhanh ở 14 ngày đầu tiên sau đầm nén và ổn định.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Al-Mehthel et al., Sulfur extended asphalt as a major outlet for sulfur that outperformed other asphalt mixes in the Gulf, The Sulphur Institute's (TSI) Sulphur World Symposium, on April 12-15, 2010 in Doha, Qatar. <https://www.sulphurinstitute.org/pub/?id=a03b8cac-d39b-e0e4-e48e-7e6cc11e995c>
- [2]. A. M. O. Mohamed, M. M. El Gamal, Sulfur concrete for the construction industry, UAE University, Al Ain, United Arab Emirates, 2010.
- [3]. I. Gawel, Sulphur-Modified Asphalts, *Asphaltenes and Asphalts*, 2 (2000) 515–535. [https://doi.org/10.1016/S0376-7361\(09\)70290-0](https://doi.org/10.1016/S0376-7361(09)70290-0)
- [4]. J. C. Nicholls, Review of shell thiopave™ sulfur - extended asphalt modifier, TRL Report TRL672, 2009. <https://trl.co.uk/sites/default/files/TRL672.pdf>
- [5]. David Timm, Nam Tran, Adam Taylor, Mary Robbins, Buzz Powell, “Evaluation Of Mixture Performance and Structural Capacity of Pavements Using Shell Thiopave”, Report No. NCAT 09-05, 2009. <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep09-05.pdf>
- [6]. R. Djimasbe, V.B.Ivanov, A.F. Kemalov, R.A. Kemalov, T. F. Valeev, N. Ner- obov, Research of the technology for the production of modified sulfur bituminous binders, 2018. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-270-274>
- [7]. J.P. Mahoney, J.A. Lary, F. Balgunaim, Teh C. Lee, Sulfur Extended Asphalt Laboratory Investigation - Mixture Characterization, Report No WA-RD 53.2, June 1982. <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/053.2.pdf>
- [8]. G.D. Love, Sulfur: potential pavement binder of the future, *Journal of Transportation Engineering*, 105 (1979) 525-533. <https://trid.trb.org/view/147145>
- [9]. W.C. McBee, T.A. Sullivan, H.J. Fike, Sulfur construction materials, Bulletin 678. U.S. Bureau of Mines. 1985. <https://www.sulphurinstitute.org/pub/?id=A03B9EAE-FA18-01E3-61B2-43F161CD0D03>
- [10]. Federal Highway Administration, An Alternative Asphalt Binder, Sulfur Extended Asphalt (SEA), FHWA-HIF-12-037, May, 2012. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/pubs/hif12037.pdf>
- [11]. D. Strickland, J. Colange, M. Martin, I. Deme, Performance properties of sulphur-extended asphalt mixtures with SEAM, Permanent International Association of Road Congresses (PIARC) World Road Congress, Paris, France, 17–21 September, 2007. <https://www.piarc.org/en/activities/World-Road-Congresses-World-Road-Association/Congress-Proceedings>
- [12]. V.A. Gladkikh, E.V. Korolev, V Smirnov, Eco-friendly high-performance pavement materials, *IIOABJ*, 7 (2016) 453–458. [https://www.iioab.org/articles/IIOABJ\\_7.S1\\_453-458-1.pdf](https://www.iioab.org/articles/IIOABJ_7.S1_453-458-1.pdf)
- [13]. Phạm Huy Khang, Nguyễn Thu Trang, Một số kết quả nghiên cứu lý thuyết về ảnh hưởng của phụ gia lưu huỳnh đối với bitum và bitum cải tiến polymer dùng trong kết cấu áo đường, *Tạp chí giao thông vận tải*, số T.12 (2017). <http://www.tapchigiaothong.vn/tap-chi-giao-thong-thang-12-2017-i84.html>
- [14]. Nguyễn Thu Trang, Trần Ngọc Hưng, Phạm Huy Khang, Nghiên cứu thành phần hóa học và hình thái của chất kết dính nhựa đường – Lưu huỳnh sử dụng kỹ thuật chuyển đổi hồng ngoại Fourier (FTIR) và kính hiển vi điện tử quét (SEM), *tạp chí giao thông vận tải*, số T.12 (2018).

<http://www.tapchigiaothong.vn/tap-chi-giao-thong-thang-12-2018-i104.html>

[15]. Nguyễn Thu Trang, Vũ Thế Thuận, Phạm Huy Khang, Bùi Xuân Cây, Nghiên cứu một số chỉ tiêu kỹ thuật của chất kết dính bitum – lưu huỳnh (Sulfur bitum binder – SBB) sử dụng lưu huỳnh Dung Quất, Tạp chí giao thông vận tải, số T.10 (2019). <http://www.tapchigiaothong.vn/tap-chi-giao-thong-thang-10-2019-i114.html>

[16]. Nguyễn Văn Hùng, Lê Văn Phúc, Nguyễn Thanh Phong, Đánh giá hiệu quả sử dụng bê tông nhựa lưu huỳnh ở Việt Nam, tạp chí giao thông vận tải, số T.12 (2018). <http://www.tapchigiaothong.vn/tap-chi-giao-thong-thang-12-2018-i104.html>