



INVESTIGATION ON DEPENDENCE OF STONE AGGREGATE ORIGINATED FROM MAGMATIC ROCK ON CHARACTERISTICS OF SBS POLYMER ASPHALT MIXTURE

Tran Ngoc Hung, Tran Trung Hieu*

University of Transport Technology, No 54 Trieu Khuc Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 17/10/2022

Revised: 17/12/2022

Accepted: 30/01/2023

Published online: 15/02/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.4>

* *Corresponding author*

Email: trantrunghieu@utt.edu.vn; Tel: +84904681316

Abstract. Sunway-Quoc Oai quarry's aggregate has been known and widely used for polymer modified hot mix asphalt in Vietnam. Evaluating the difference as well as the efficiency of other types of stone aggregates to replace Sunway stone is necessary, especially to help in better understanding the chemical composition and mechanical properties of aggregates and asphalt mixtures. The article conducts experimental studies, showing the possibility of using stone aggregate at Khu Dem-Lang Son quarry to replace traditional stone aggregate Sunway-Quoc Oai quarry for the SBS (Styrene Butadiene Styrene) polymer modified hot mix asphalt. As a result from analyzing X-ray fluorescence spectroscopy, the mineral compositions of the two types of stone Khu Dem and Sunway have high similarities, both are strongly magmatic rock, with SiO₂ content of 43,17% and 45,24% respectively. When considering BTNP12,5-Sunway and BTNP12,5-Khu Dem, experimental results and statistical analysis showed that the Marshall parameters and rutting resistance were similar. Research results show that the high suitability of some igneous rocks used for polymer modified asphalt mixture in Vietnam.

Keywords: Aggregate, hot mix asphalt, polymer modified hot mix asphalt, Marshall properties, wheel track rutting.

© 2023 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ LOẠI CỐT LIỆU CÓ NGUỒN GỐC TỪ ĐÁ MÁCMA ĐẾN CÁC ĐẶC TÍNH CỦA BÊ TÔNG NHỰA POLYMER SBS

Trần Ngọc Hưng, Trần Trung Hiếu*

Trường Đại học Công nghệ giao thông vận tải, Số 54 Triều Khúc, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 17/10/2022

Ngày nhận bài sửa: 17/12/2022

Ngày chấp nhận đăng: 30/01/2023

Ngày xuất bản Online: 15/02/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.4>

* Tác giả liên hệ

Email: trantrunghieu@utt.edu.vn; Tel: +849046813116

Tóm tắt. Cốt liệu mỏ đá Sunway-Quốc Oai đã được biết đến và sử dụng rộng rãi cho bê tông nhựa polymer ở Việt Nam. Việc đánh giá sự khác biệt cũng như hiệu quả sử dụng các loại cốt liệu đá khác thay thế cho đá Sunway là cần thiết, đặc biệt là giúp hiểu rõ hơn về đặc tính thành phần hóa học và đặc tính cơ lý của cốt liệu cũng như của hỗn hợp bê tông nhựa. Bài báo tiến hành nghiên cứu thực nghiệm, chỉ ra khả năng sử dụng cốt liệu đá ở mỏ Khu Đầm-Lạng Sơn thay thế cho cốt liệu đá ở mỏ Sunway-Quốc Oai truyền thống cho sản xuất hỗn hợp bê tông nhựa polymer phụ gia Copolymer SBS. Thành phần khoáng vật của hai mẫu đá Khu Đầm và Sunway có sự tương đồng cao, đều là loại đá mácma có tính bazơ mạnh, với hàm lượng SiO₂ tương ứng 43,17% và 45,24% sau khi được phân tích bằng phương pháp phổ tán sắc năng lượng tia X (XRF). BTNP12,5-Sunway và BTNP12,5-Khu Đầm qua kết quả thí nghiệm và phân tích thống kê cho thấy sự tương đương nhau về các chỉ tiêu Marshall và khả năng kháng hàn vết bánh xe. Kết quả nghiên cứu cho thấy mức độ phù hợp cao của một số loại đá mácma sử dụng cho hỗn hợp bê tông nhựa polymer ở Việt Nam.

Từ khóa: Cốt liệu đá, bê tông asphalt, bê tông nhựa polymer SBS, chỉ tiêu Marshall, hàn vết bánh xe.

© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông nhựa (BTN) là vật liệu được sử dụng phổ biến làm các lớp kết cấu áo đường, sự gia tăng lưu lượng, tải trọng đòi hỏi áp dụng các giải pháp cải tiến nhựa đường cũng như thiết kế thành phần BTN. Hiện nay tại Việt Nam đang có hiệu lực song song các tiêu chuẩn kỹ

thuật, như TCVN 13567-1:2022 [1] quy định về thi công nghiệm thu mặt đường bê tông nhựa

nóng, 22TCN 356:2006 [2] quy định về thi công nghiệm thu mặt đường bê tông nhựa polymer và Quyết định số 858/QĐ-BGTVT năm 2014 [3] ban hành hướng dẫn một số điểm bổ sung về thành phần cấp phối, yêu cầu kỹ thuật, yêu cầu đối với vật liệu đầu vào sử dụng cho bê tông nhựa ứng dụng cho các tuyến đường có quy mô giao thông lớn. Ngoài ra, một số loại bê tông nhựa cấp phối gián đoạn sử dụng làm lớp tạo nhám cho mặt đường đã được ban hành Quy định kỹ thuật và đã áp dụng tại một số dự án đường cao tốc mang lại hiệu quả cao, như: lớp tạo nhám Novachip (đường cao tốc Hà Nội - Hải Phòng), lớp siêu mỏng tạo nhám (đường cao tốc Hạ Long - Vân Đồn, đường cao tốc Bắc Giang - Lạng Sơn), lớp bê tông nhựa rỗng thoát nước (đường cao tốc Pháp Vân - Cầu Giẽ). Bê tông nhựa polymer (BTNP) thường sử dụng thành phần cấp phối theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT với nhựa đường polymer đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của 22TCN319-2004. Đường cong cấp phối quy định đối với bê tông nhựa theo hướng dẫn kỹ thuật ban hành kèm theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT năm 2014 có xu hướng thô hơn so với đường cong cấp phối theo quy định của Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 13567-1:2022, đây là quan điểm nhằm củng cố khung cốt liệu chịu lực của bê tông nhựa, giúp bê tông nhựa có khả năng kháng hằn vệt bánh xe tốt hơn.

Nhựa đường cải tiến polymer là một giải pháp hiệu quả giúp cải tiến chất lượng nhựa đường thông thường và do đó cải thiện hiệu suất của hỗn hợp bê tông nhựa [4]. Hiện nay, các phụ gia polymer được sử dụng phổ biến nhất để cải tiến chất lượng nhựa đường và được công nhận hiệu quả là Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), Styrene-Butadiene Rubber (SBR), Elvaloy, cao su, Ethylene Vinyl Acetate (EVA), Polyethylene, và các loại polymer khác [5,6,7,8]. Trong số đó, SBS là một trong những polymer được sử dụng rộng rãi nhất cải thiện hiệu quả các tính chất cơ học của hỗn hợp bê tông nhựa [9], như các đặc tính: lão hóa [10], biến dạng dư [11,12], nứt ở nhiệt độ thấp [13], đặc tính kháng ẩm [14]... Các copolymer SBS có khả năng chịu kéo và có tính đàn hồi tốt hơn từ các liên kết chéo của các phân tử thành một mạng lưới ba chiều, các khối kết cấu polystyrene tạo ra khả năng chịu kéo cho polymer trong khi các khối trung gian cao su polybutadiene tạo ra độ đàn hồi, nên copolymer SBS được coi là loại polymer sử dụng phổ biến và hiệu quả nhất.

Cùng với nhựa đường, cốt liệu đóng vai trò quan trọng ảnh hưởng tới các đặc tính kỹ thuật cũng như khả năng làm việc của bê tông nhựa. Trong các loại đá thường sử dụng làm cốt liệu cho bê tông nhựa, silic dioxide (SiO_2) hoặc canxi oxide (CaO) là thành phần chủ yếu được tìm thấy, đá được tạo thành từ silic dioxide thường là có tính axit và từ canxi oxide thường là có tính bazơ [15]. Cốt liệu đá vôi thường có tính dính bám tốt với nhựa đường, trong quá khứ người ta thêm vôi vào nhựa đường để giảm thiểu hiện tượng bong tróc giữa đá với nhựa, và có thể hiểu rằng vôi bột có khả năng giúp gia tăng cường độ cho bê tông nhựa [16]. Mặt khác, cốt liệu có hàm lượng silic cao thường có tính dính bám thấp, có xu hướng kém dính bám với nhựa đường hơn so với các cốt liệu đá vôi hoặc đá dolomit [16,17]. Điều này là bởi vì trong các cốt liệu silic, các liên kết hydro được hình thành với các bề mặt hydroxyl hóa (nhóm silanol) dễ bị phân tách khi có sự hiện diện của nước, trong khi ở cốt liệu canxi, canxi tự do là điều kiện tiên quyết để hình thành các liên kết muối không hòa tan và không dễ bị phân tách bởi nước. Curtis và cộng sự [18,19] đã chỉ ra rằng các chất asphaltenes trong nhựa đường được hấp phụ trên đá vôi nhiều hơn so với đá gốc axit. Đối với nhựa đường thông thường, sự khác biệt lớn đã được quan sát thấy trong lượng nhựa đường được hấp thụ và giữ lại sau khi tiếp xúc với nước khi sử dụng cả cốt liệu silic và cốt liệu đá vôi [16]. Mức độ hấp thụ của nhựa đường trong trường hợp đá silic là 0,34 mg/g và trong trường hợp đá vôi là 1,1 mg/g. Tuy nhiên, dính bám axit-bazơ này của nhựa đường đến cốt liệu không phải là yếu

tổ quan trọng duy nhất gây hư hỏng do ẩm [16,17]. Các đặc tính vật lý của cốt liệu cũng rất quan trọng trong sự dính bám giữa cốt liệu và nhựa đường. Độ rỗng và cấu trúc bề mặt sẽ ảnh hưởng đến sự dính bám cơ học giữa nhựa đường và cốt liệu [19]. Các thành phần hóa học khác của cốt liệu như nhôm, sắt, magiê và canxi làm gia tăng sự dính bám trong khi natri và kali được chứng minh là có hại cho dính bám cốt liệu-nhựa đường.

Bài báo nghiên cứu khả năng sử dụng loại cốt liệu đá mácma lấy ở mỏ đá Khau Đêm cho bê tông nhựa polymer với phụ gia SBS, tiến hành thử nghiệm các đặc tính kỹ thuật của cốt liệu lấy từ mỏ đá Khau Đêm - Lạng Sơn, có đối chứng với cốt liệu đá ở mỏ Sunway - Quốc Oai - Hà Nội. Ngoài ra còn tiến hành thử nghiệm phân tích phổ XRF để xác định thành phần khoáng học của cốt liệu đá mỏ Khau Đêm và mỏ Sunway để có cơ sở so sánh. Tiến hành thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông nhựa polymer BTNP 12,5 sử dụng cốt liệu Khau Đêm, thử nghiệm các đặc tính Marshall, các chỉ tiêu cơ học phục vụ tính toán chiều dày áo đường, thử nghiệm hãm vệt bánh xe của BTNP 12,5.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đặc tính của các vật liệu thành phần

Để nghiên cứu khả năng sử dụng cốt liệu mỏ đá Khau Đêm - Lạng Sơn cho bê tông nhựa polymer, tiến hành thử nghiệm các đặc tính kỹ thuật của cốt liệu lấy từ mỏ đá Khau Đêm, có đối chứng với cốt liệu mỏ đá Sunway - Quốc Oai. Cường độ chịu nén của đá gốc lấy từ mỏ đá Khau Đêm có kết quả trung bình của 5 mẫu đá khoan từ mỏ đá Khau Đêm đạt mức 138,26 MPa, độ lệch chuẩn $\sigma = 4,5$ MPa, hệ số biến động thấp $C_v = 3,25\%$, chứng tỏ độ đồng đều của cường độ các mẫu đá. Các thông số kỹ thuật của cốt liệu thô và mịn Khau Đêm ($D_{max}19mm$, $D_{max}12,5$ và $D_{max}4,75$) đáp ứng hoàn toàn các chỉ tiêu kỹ thuật đối với cốt liệu sử dụng cho bê tông nhựa polymer theo quy định của 22TCN356:2006, được thể hiện trong các Bảng 1, Bảng 2 và Bảng 3. Hàm lượng hạt thoi dẹt trong mẫu cốt liệu $D_{max}12,5$ ở mức khá cao 17,6%, tuy nhiên đáp ứng yêu cầu (không vượt quá 18%). Độ góc cạnh của cốt liệu mịn $D_{max}4,75$ ở mức 50,1%, cao hơn so với giá trị giới hạn (45%) đảm bảo cho vữa nhựa, cấu trúc trung gian của bê tông nhựa có khả năng kháng biến dạng vĩnh cửu do góc nội ma sát được cải thiện.



Hình 1. Cốt liệu Khau Đêm sử dụng cho bê tông nhựa.

Bảng 1. Kết quả thử nghiệm các đặc tính cốt liệu Khau Đêm $D_{max}19$.

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thử	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
1	Cường độ nén của đá gốc	TCVN 7572 - 10	MPa	138,28	≥ 120

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thử	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
2	Tỷ trọng của mẫu ở trạng thái khô (OD)	AASHTO T85	-	2,841	---
3	Tỷ trọng của mẫu ở trạng thái bão hòa khô bề mặt (SSD)	AASHTO T85	-	2,861	---
4	Tỷ trọng biểu kiến	AASHTO T85	-	2,899	---
5	Độ hút nước	AASHTO T85	%	0,709	---
6	Khối lượng thể tích xốp	TCVN 7572- 6	kg/m ³	1436	---
7	Độ hồng giữa các hạt cốt liệu	TCVN 7572- 6	%	49,4	---
8	Độ hao mòn Los Angeles	TCVN 7572-12	%	9,7	≤ 25%
9	Hàm lượng hạt thoi dẹt trong cốt liệu ≥9,5mm	TCVN 7572-13	%	9,1	≤ 12%
10	Hàm lượng hạt thoi dẹt trong cốt liệu <9,5mm	TCVN 7572-13	%	0,0	≤ 18%
11	Hàm lượng mềm yếu phong hóa	TCVN 7572-17	%	0,0	≤ 3%
12	Hàm lượng chung bùn, bụi, sét	TCVN 7572-8	%	0,8	≤ 2%
13	Độ bám dính với nhựa đường	TCVN 7504	Cấp	Cấp 4	Cấp 4

 Bảng 2. Kết quả thử nghiệm các đặc tính cốt liệu Khau Đêm D_{max}12,5.

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thử	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
1	Cường độ nén của đá gốc	TCVN 7572-10	MPa	138,28	≥120
2	Tỷ trọng của mẫu ở trạng thái khô (OD)	AASHTO T85	-	2,826	---
3	Tỷ trọng của mẫu ở trạng thái bão hòa khô bề mặt (SSD)	AASHTO T85	-	2,853	---
4	Tỷ trọng biểu kiến	AASHTO T85	-	2,906	---
5	Độ hút nước	AASHTO T85	%	0,969	---
6	Khối lượng thể tích xốp	TCVN 7572- 6	kg/m ³	1424	---
7	Độ hồng giữa các hạt cốt liệu	TCVN 7572- 6	%	49,6	---
8	Độ hao mòn Los Angeles	TCVN 7572-12	%	12,4	≤ 25%
9	Hàm lượng hạt thoi dẹt trong cốt liệu ≥9,5mm	TCVN 7572-13	%	10,5	≤ 12%
10	Hàm lượng hạt thoi dẹt trong cốt liệu <9,5mm	TCVN 7572-13	%	17,6	≤ 18%
11	Hàm lượng hạt mềm yếu phong hóa	TCVN 7572-17	%	0,0	≤ 3%
12	Hàm lượng chung bùn, bụi, sét	TCVN 7572-8	%	1,3	≤ 2%
13	Độ dính bám với đá	TCVN 7504	Cấp	Cấp 4	Cấp 4

 Bảng 3. Kết quả thử nghiệm các đặc tính cốt liệu Khau Đêm D_{max}4,75.

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thử	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
1	Mô đun độ lớn Mk	TCVN 7572-2	-	3,6	≥ 2,0
2	Tỷ trọng của mẫu ở trạng thái khô (OD)	AASHTO T84	-	2,776	---
3	Tỷ trọng của mẫu ở trạng thái bão hòa khô bề mặt (SSD)	AASHTO T84	-	2,811	---
4	Tỷ trọng biểu kiến	AASHTO T84	-	2,876	---
5	Độ hút nước	AASHTO T84	%	1,258	---
6	Khối lượng thể tích xốp	TCVN 7572-6	kg/m ³	1572	---
7	Độ hồng giữa các hạt cốt liệu	TCVN 7572-6	%	43,4	---
8	Đương lượng cát - SE	AASHTO T176	%	86,0	≥ 50,0

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thử	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
9	Hàm lượng chung bụi, bùn, sét	TCVN 7572-8	%	2,2	≤ 3,0
10	Hàm lượng sét cục	TCVN 7572-8	%	0,0	≤ 0,5
11	Độ góc cạnh của cát	TCVN8860-7	%	50,1	≥ 45

Bột khoáng sử dụng cho nghiên cứu là loại bột khoáng tại mỏ Kiện Khê, tỉnh Hà Nam. Kết quả thử nghiệm các đặc tính kỹ thuật của bột khoáng được trình bày trong Bảng 4, đáp ứng yêu cầu sử dụng cho BTN polymer.

Bảng 4. Kết quả thử nghiệm các đặc tính của bột khoáng.

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Phương pháp thử	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
1	Thành phần cỡ hạt		TCVN7572:06		
	- Nhỏ hơn 0,60 mm	%		100,0	100
	- Nhỏ hơn 0,30 mm	%		95,7	95÷100
	- Nhỏ hơn 0,075 mm	%		73,5	70÷100
2	Độ ẩm	%	TCVN7572:06	0,25	max.1
3	Chỉ số dẻo bột khoáng	%	TCVN4197:95	Không dẻo	max.4

Loại nhựa đường sử dụng cho các nghiên cứu thực nghiệm là nhựa đường polymer SBS PMB-III do Petrolimex cung cấp, được thử nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật theo yêu cầu của 22TCN319:2004, kết quả thử nghiệm được trình bày trong Bảng 5. Nhựa đường PMB-III sử dụng đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật, nhiệt độ hóa mềm đạt mức 90,3° C, tuy nhiên độ nhớt ở 135 °C tương đối cao, ở mức 2,545 Pa.s (giới hạn cho phép 3,0 Pa.s). Đặc tính đàn hồi của nhựa đường PMB-III là một trong những đặc tính điển hình của nhựa đường polymer so với nhựa đường nguyên gốc, là nguyên lý đảm bảo cho khả năng phục hồi biến dạng sau khi dỡ tải, giảm nguy cơ xuất hiện hằn lún vệt bánh xe trên mặt đường.

Bảng 5. Kết quả thử nghiệm các đặc tính của nhựa đường polymer PMB-III.

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả	YCKT 22TCN 319-04
1	Độ kim lún ở 25°C, 5s, 100g	0.1mm	53	40 - 70
2	Nhiệt độ hóa mềm	°C	90,3	Min 80
3	Nhiệt độ bắt lửa	°C	302	Min 230
4	Lượng tổn thất sau khi đun nóng ở 163°C trong 5h	%	0,072	Max 0,6
5	Tỷ lệ độ kim lún sau gia nhiệt ở 5 giờ ở 163°C so với độ kim lún ở 25°C	%	81,3	Min 65
6	Độ đàn hồi (ở 25°C, mẫu kéo dài 10cm)	%	80,00	Min 70
7	Độ hòa tan trong Tricloetylen	%	99,43	Min 99
8	Khối lượng riêng ở 25°C	g/cm ³	1,030	1,00 – 1,05
9	Độ dính bám với đá	Cấp	4	Min cấp 4
10	Độ ổn định lưu trữ (gia nhiệt ở 163°C trong 48 giờ, khác nhiệt độ hóa mềm của phần trên và dưới mẫu)	°C	2,8	Max 3,0
11	Độ nhớt ở 135°C (con thoi 21, tốc độ cắt 18,6 s-1, nhớt kế Brookfield)	Pa.s	2,545	Max 3,0

2.2. Phương pháp thử nghiệm

Các phương pháp thử nghiệm sử dụng trong nghiên cứu tuân thủ theo các tiêu chuẩn Việt Nam, tiêu chuẩn ngành hiện hành và các tiêu chuẩn thử nghiệm quốc tế. Thành phần bê tông

nhựa được thiết kế theo phương pháp Marshall, tuân thủ quy trình hướng dẫn của TCVN 13567-1:2022. Thử nghiệm Marshall và các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông nhựa tuân thủ theo TCVN 8860:2011. Mô đun đàn hồi dưới tác dụng của tải trọng dài hạn được thử nghiệm theo Phụ lục C, 22TCN211:2006. Cường độ chịu kéo khi uốn được thử nghiệm gián tiếp thông qua cường độ ép chẻ, tuân thủ TCVN 8865:2011. Khả năng kháng hằn vết bánh xe được thử nghiệm với thiết bị HWTD (Hamburg Wheel Tracking Device), theo phương pháp A được quy định trong Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT năm 2014 tương đồng với phương pháp AASHTO T324, phương pháp này cho phép đánh giá khả năng kháng ẩm của BTN thông qua điểm bong màng nhựa (nếu có) xuất hiện trong quá trình thử nghiệm.

2.3. Phân tích thành phần khoáng của cốt liệu

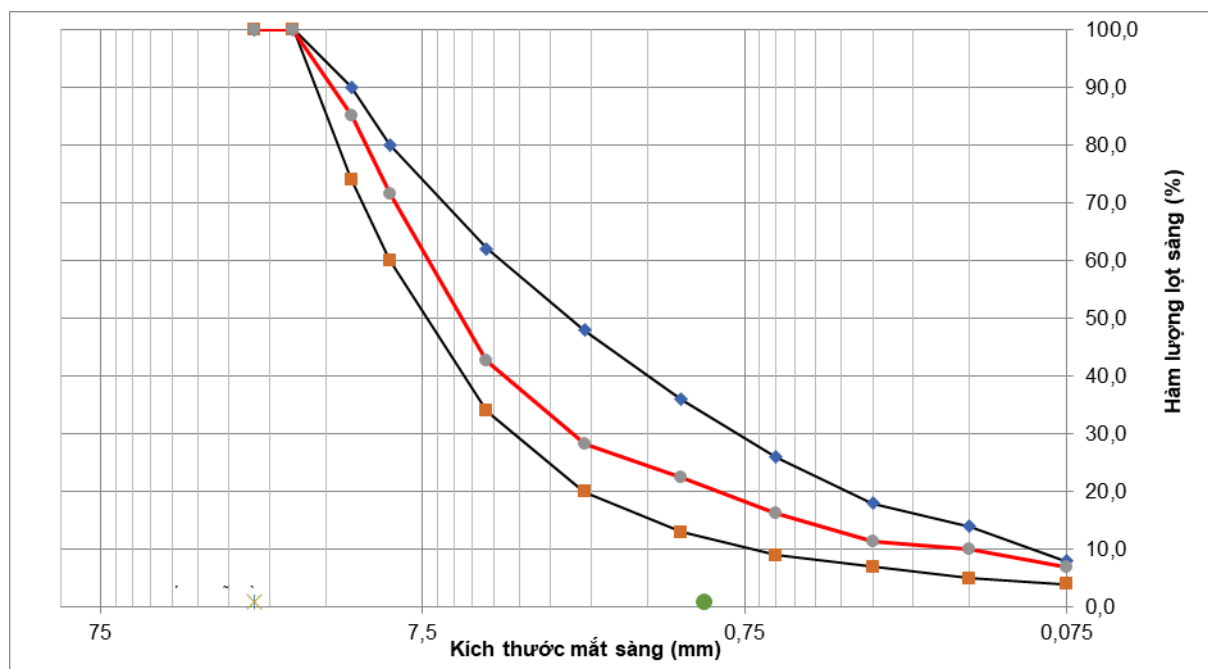
Kết quả phân tích thành phần khoáng của cốt liệu đá ở mỏ Khu Đêm và mỏ Sunway, sử dụng phương pháp phổ tán sắc năng lượng tia X (XRF), được thể hiện trong Bảng 6. Kết quả phân tích cho thấy, thành phần khoáng vật mẫu đá Khu Đêm và Sunway có sự tương đồng cao, hàm lượng SiO₂ tương ứng 43,17% và 45,24% chứng tỏ cốt liệu có tính bazơ mạnh, đảm bảo chắc chắn tính dính bám của cốt liệu với nhựa đường. Sự khác biệt các hàm lượng khoáng không nhiều, trong giới hạn độ nhiều số liệu của thử nghiệm, chứng tỏ tính tương đồng của tính chất đá lấy từ 2 mỏ (Khu Đêm và Sunway). Hàm lượng CaO trong cốt liệu Khu Đêm cao gần gấp đôi trong cốt liệu Sunway (13,46% so với 8,524%). Cốt liệu mỏ đá Khu Đêm và Sunway đều được xếp vào loại đá macsma và có các đặc tính kỹ thuật sơ bộ đáp ứng được các yêu cầu sử dụng cho bê tông nhựa polymer.

Bảng 6. Phân tích thành phần khoáng của cốt liệu đá.

TT	Chỉ tiêu phân tích	Hàm lượng (%)		Phương pháp thử (Test methods)
		Đá Khu Đêm	Đá Sunway	
1	SiO ₂	43,17	45,24	Máy huỳnh quang tia X S2 Ranger
2	TiO ₂	2,714	2,837	Như trên
3	Al ₂ O ₃	11,06	12,31	Như trên
4	Fe ₂ O ₃	16,07	17,49	Như trên
5	MnO	0,260	0,293	Như trên
6	MgO	7,726	8,324	Như trên
7	CaO	13,46	8,524	Như trên
8	Na ₂ O	3,51	3,33	Như trên
9	K ₂ O	1,62	1,31	Như trên
10	P ₂ O ₅	0,394	0,35	Như trên

2.4. Thiết kế thành phần bê tông nhựa polymer BTNP12,5

Tiến hành tính toán thiết kế thành phần cấp phối hỗn hợp BTNP12,5 sử dụng cốt liệu đá Khu Đêm theo yêu cầu về thành phần hạt theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT. Đảm bảo các yêu cầu về đường cong cấp phối, hàm lượng lọt sàng 2,36 mm không vượt quá 38%. Kết quả tính toán thành phần cấp phối BTNP12,5 sử dụng cốt liệu đá Khu Đêm như sau: 20% cốt liệu thô D_{max} 19 mm, 32% cốt liệu thô D_{max} 12,5 mm, 42% cốt liệu mịn D_{max} 4,75 mm, 6% bột khoáng (do hàm lượng lọt sàng 0,075 mm của bột khoáng sử dụng chỉ ở mức 73,5%, trên mức yêu cầu giới hạn là 70%). Kết quả đường cong cấp phối của thành phần cốt liệu đá Khu Đêm được thể hiện ở Hình 2.



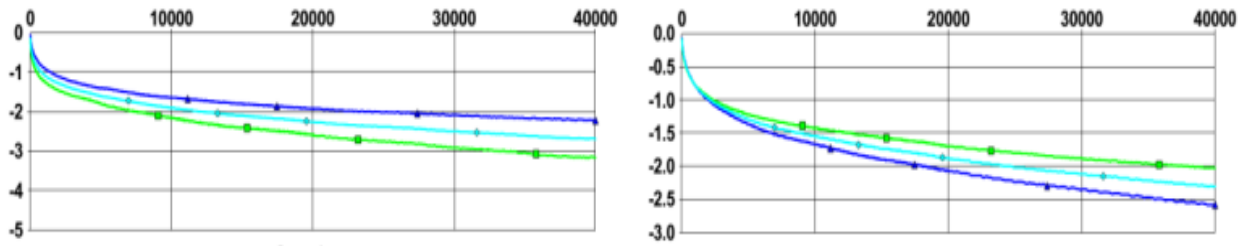
Hình 2. Đường cong cấp phối BTNP thiết kế.

Hàm lượng nhựa tối ưu đối với BTNP12,5 được lựa chọn với việc chế bị 05 tổ mẫu BTNP 12,5, mỗi tổ mẫu gồm 03 mẫu. Trộn hỗn hợp ở 170 °C và đầm mẫu Marshall ở 160 °C tương ứng với nhiệt độ đảm bảo độ nhớt của nhựa đường PMB III ở mức $0,17 \pm 0,2$ Pa.s và $0,28 \pm 0,3$ Pa.s. Kết quả xác định tỷ trọng khối, khối lượng thể tích, khối lượng riêng, độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu VMA, độ rỗng lấp đầy bitum VFA, độ ổn định Marshall, độ dẻo Marshall (ASTM D6927) của các tổ mẫu BTNP12,5 cho thấy, hàm lượng nhựa đường đáp ứng các yêu cầu chỉ tiêu kỹ thuật của BTNP12,5 nằm trong khoảng từ 4,6 % đến 5,4 % (theo hỗn hợp). Lựa chọn hàm lượng tối ưu cho hỗn hợp BTNP12,5 là giá trị trung bình của khoảng lựa chọn: 5,00% theo hỗn hợp (5,26% theo cốt liệu), đảm bảo độ rỗng dư trung bình ở mức 4,58%, độ ổn định Marshall trung bình 16,3 kN, độ dẻo Marshall trung bình 3,07 mm, độ rỗng cốt liệu VMA = 16,03 %, độ rỗng lấp đầy nhựa VFA = 72,53 %.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH KỸ THUẬT CỦA BTNP12,5 SỬ DỤNG CỐT LIỆU KHAU ĐÊM

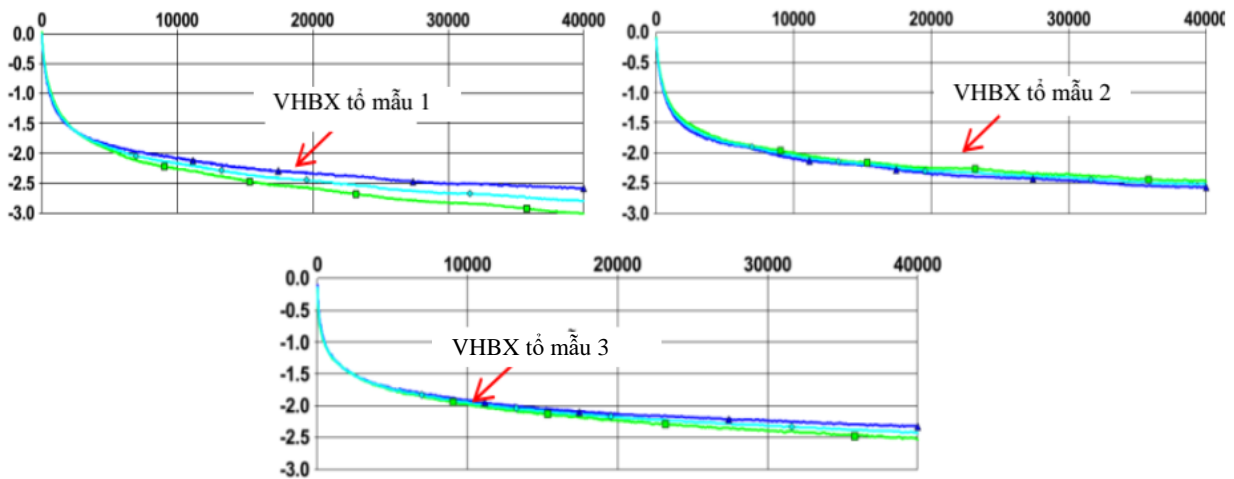
3.1. Khả năng kháng hằn lún vết bánh xe

Khả năng kháng hằn lún vết bánh xe của BTNP12,5 sử dụng cốt liệu Khau Đêm và Sunway được đánh giá bằng thử nghiệm mô phỏng chiều sâu vết hằn bánh xe (VHBX) trong phòng thí nghiệm, thực hiện theo phương pháp A, trong môi trường nước ở 50°C. Thử nghiệm được tiến hành với mẫu BTNP12,5-Khau Đêm chế bị trong phòng từ hỗn hợp BTN thiết kế và mẫu BTNP12,5-Khau Đêm khoan từ mặt đường đã thi công. Kết quả thử nghiệm với 02 tổ mẫu được trình bày trong Hình 3. Với tổ mẫu chế bị trong phòng, độ sâu VHBX là 2,22 mm và 3,16 mm sau 40.000 lượt bánh xe tác dụng. Tương tự, với tổ mẫu khoan từ mặt đường, độ sâu VHBX là 2,58 mm và 2,03 mm.



Hình 3. Kết quả thử nghiệm VHBX mẫu BTNP12.5-Khau Đêm chế bị trong phòng (trái) và mẫu BTNP12.5-Khau Đêm khoan từ mặt đường (phải).

Số liệu thử nghiệm khả năng kháng VHBX của BTNP12,5 sử dụng cốt liệu Sunway được lấy từ dự án đường cao tốc Hạ Long Vân Đồn, các mẫu thử nghiệm VHBX là mẫu được chế bị trong phòng phục vụ cho giai đoạn thiết kế của sự án. Kết quả thử nghiệm VHBX của 03 tổ mẫu BTNP12,5-Sunway được thể hiện trong Hình 4. Chiều sâu VHBX 3 tổ mẫu BTNP12,5-Sunway tương ứng: 2,58 mm và 3,00 mm; 2,47 mm và 2,57 mm; 2,33 mm và 2,53 mm.



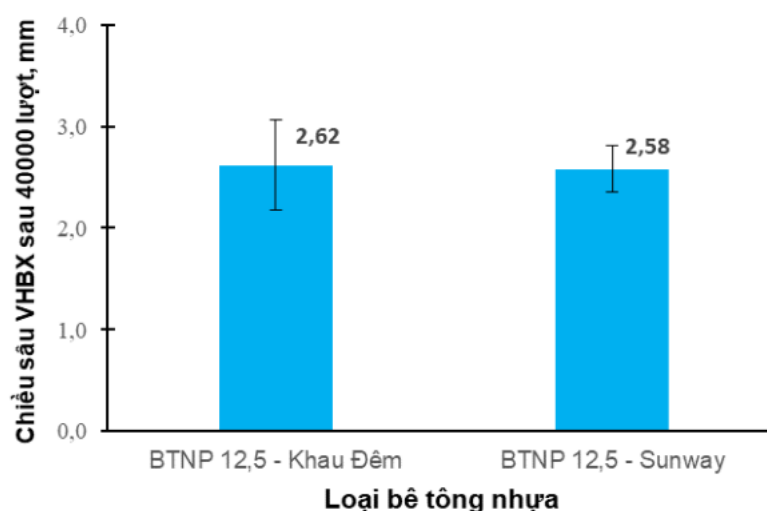
Hình 4. Kết quả thử nghiệm VHBX của 03 tổ mẫu BTNP12,5-Sunway chế bị trong phòng.

Tổng hợp so sánh kết quả thử nghiệm VHBX các mẫu BTNP12,5 sử dụng cốt liệu Khu Đêm và Sunway được trình bày trong Bảng 7.

Bảng 7. Tổng hợp kết quả VHBX mẫu BTNP12,5 cốt liệu Sunway và Khu Đêm.

TT mẫu	Chiều sâu VHBX, mm	
	BTNP12,5-Khau Đêm	BTNP12,5-Sunway
1	2,22	2,58
2	3,16	3,00
3	2,58	2,47
4	2,03	2,57
5	3,00	2,33
6	2,71	2,53
Trung bình	2,62	2,58
Độ lệch chuẩn	0,44	0,23

Phân tích thống kê kiểm định kiểm định T Test đánh giá sự khác biệt giá trị VHBX trung bình của hai nhóm mẫu BTNP12,5. Giả thuyết đảo giả định chiều sâu VHBX tổ mẫu BTNP12,5-Khau Đêm không khác biệt chiều sâu VHBX tổ mẫu BTNP12,5-Sunway. Xác suất xảy ra giả thuyết đảo $p=0,86$, lớn hơn mức ý nghĩa $\alpha=0,05$. Chứng tỏ, chiều sâu VHBX trung bình sau 40.000 lượt bánh xe của các mẫu BTNP12,5-Khau Đêm không có sự khác biệt với chiều sâu VHBX trung bình của các mẫu BTNP12,5-Sunway, và có ý nghĩa thống kê. Kết quả so sánh chiều sâu VHBX của hai nhóm mẫu BTNP12,5 được thể hiện trong Hình 5. Chiều sâu VHBX trung bình của mẫu BTNP12,5-Khau Đêm sau 40.000 chu kỳ tác dụng tải đạt 2,62 mm, có thể coi là tương đương với chiều sâu VHBX trung bình của mẫu BTNP12,5-Sunway là 2,58 mm. Như vậy có thể thấy BTNP12,5-Khau Đêm có khả năng kháng hằn lún vết bánh xe rất tốt.



Hình 5. Chiều sâu VHBX của các nhóm mẫu BTNP12,5 theo loại cốt liệu.

3.2. Khả năng chịu lực theo thông số Marshall

Tiêu chuẩn ngành 22TCN356:2006 quy định giá trị giới hạn của các thông số Marshall với BTN chất sử dụng nhựa đường cải tiến polymer SBS là: $S \geq 12,0$ kN (lớp mặt trên), $S \geq 10,0$ kN (lớp mặt dưới), F nằm trong khoảng từ 3,0 đến 6,0 mm.

Số liệu thử nghiệm Marshall của 24 mẫu BTNP12,5-Khau Đêm được trình bày trong Bảng 8, với độ rỗng dư trung bình 4,94%, độ ổn định Marshall trung bình đạt 15,73 kN, chỉ số dẻo Marshall đạt trung bình 4,47 mm, đều đáp ứng yêu cầu của 22TCN356:2006.

Chỉ tiêu kỹ thuật của BTNP12,5 cốt liệu Sunway, dữ liệu lấy từ dự án đường cao tốc Hạ Long – Vân Đồn được trình bày trong Bảng 9. Độ rỗng dư trung bình của các mẫu bê tông nhựa Sunway là 4,83%. Phân tích dựa trên 20 kết quả cho thấy độ ổn định Marshall trung bình đạt 15,9 kN, độ dẻo Marshall trung bình đạt 4,42 mm.

Bảng 8. Thông số Marshall các mẫu BTNP12,5-Khau Đêm.

TT	Chiều cao	Gmb	Gmb TB	Gmm	Độ rỗng dư	Độ ổn định Marshall	Chỉ số dẻo Marshall
	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(kN)	(mm)
1	63,5	2,486	2,484	2,61	4,74	15,6	4,6
2	64,5	2,484			4,84	16,48	4,3
3	64	2,483			4,85	16,95	4,2

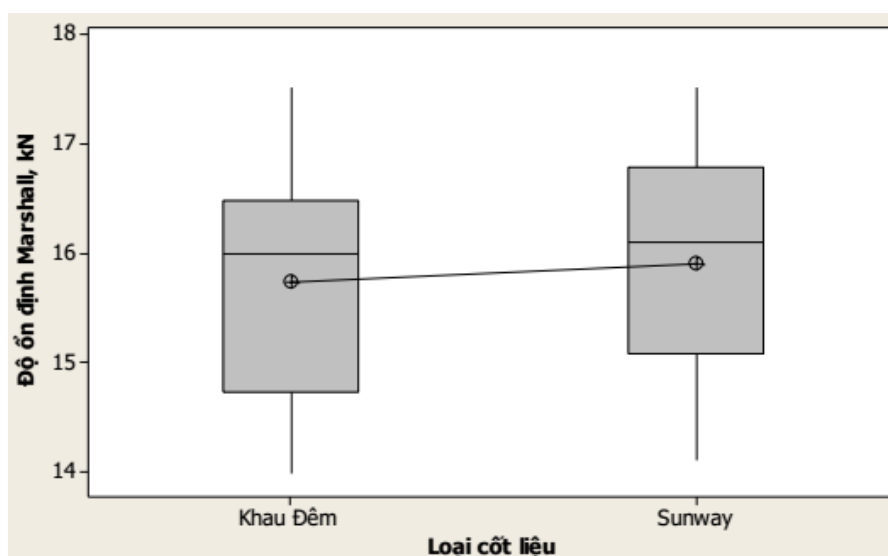
TT	Chiều cao	Gmb	Gmb TB	Gmm	Độ rỗng dư	Độ ổn định Marshall	Chỉ số dẻo Marshall
4	65	2,485	2,482	2,62	5,15	15,64	4,1
5	64	2,476			5,49	16,95	3,8
6	65	2,484			5,2	17,52	3,6
7	65,5	2,481	2,488	2,612	5,03	14,24	4
8	65	2,488			4,77	15,64	3,7
9	64	2,497			4,4	16,43	3,9
10	65	2,486	2,483	2,61	4,76	16,27	5,3
11	65,5	2,476			5,14	14,24	4,6
12	64	2,486			4,74	16,05	4,7
13	64,4	2,471	2,469	2,613	5,43	13,98	5,2
14	64	2,471			5,43	16,05	5
15	65	2,464			5,7	14,52	4,6
16	63,6	2,482	2,481	2,61	5	15,95	5,2
17	64,5	2,475			5,27	16,48	4,8
18	63,5	2,484			4,94	16,64	4,6
19	64	2,497	2,496	2,615	4,44	14,77	3,9
20	66	2,49			4,69	14,72	5,1
21	66	2,499			4,35	14,84	4,8
22	63	2,478	2,488	2,623	5,18	16,46	4,5
23	63	2,49			4,71	14,48	4
24	64	2,497			4,43	16,69	4,7
Trung bình:					4,94	15,73	4,47

Bảng 9. Thông số Marshall các mẫu BTNP12,5-Sunway.

TT	Chiều cao	Gmb	Độ rỗng dư	Độ ổn định Marshall	Chỉ số dẻo Marshall
	(mm)	(g/cm ³)	(%)	(kN)	(mm)
1	64,3	2,54	4,7	17,52	5,1
2	63,4	2,537	4,32	16,4	4,9
3	63,4	2,534	4,93	14,83	3,6
4	64,1	2,54	4,52	16,84	5
5	63,5	2,553	5,11	16,08	3,8
6	64,4	2,54	5,3	17,35	4,9
7	63,4	2,542	4,89	14,38	4,3
8	63,1	2,538	4,09	15,41	5,4
9	64,4	2,555	4,43	15,03	5
10	63	2,557	5,31	14,11	5
11	64,2	2,532	4,18	15,5	3,8
12	63,4	2,554	4,09	16,86	4,3
13	64,4	2,555	5,19	16,18	3,8
14	64,2	2,544	5,47	15,22	3,6
15	64,4	2,54	5,44	17,39	4,1
16	64,3	2,559	4,23	16,12	4,4
17	64	2,551	5,21	16,11	3,8
18	64	2,531	4,78	14,47	4,1
19	63,1	2,536	5,11	16,65	5
20	63	2,535	5,38	15,56	4,5
Trung bình:			4,83	15,9	4,42

Kiểm định T Test đánh giá sự khác biệt giá trị trung bình của 2 nhóm mẫu BTNP12,5. Giả thuyết đảo giả định độ ổn định Marshall của các mẫu BTNP12,5-Khau Đêm không khác biệt độ ổn định Marshall của các mẫu BTNP12,5-Sunway. Xác suất xảy ra giả thuyết đảo $p=0,593$, lớn hơn mức ý nghĩa $\alpha=0,05$. Chứng tỏ, độ ổn định Marshall các mẫu BTNP12,5-Khau Đêm tương đương độ ổn định Marshall các mẫu BTNP12,5-Sunway, có ý nghĩa thống kê. Đồ thị so sánh độ ổn định Marshall các mẫu BTNP với khoảng tin cậy 95% được thể hiện trong Hình 6.

Độ ổn định Marshall của bê tông nhựa polymer sử dụng cốt liệu mỏ đá Khu Đêm mặc dù có sự khác biệt về số học so với các đặc tính Marshall (15,73 kN so với 15,9 kN) của bê tông nhựa polymer sử dụng cốt liệu mỏ đá Sunway, tuy nhiên phân tích thống kê không chỉ ra sự khác biệt. Nói cách khác, BTNP12,5-Sunway và BTNP12,5-Khau Đêm tương đương nhau về chỉ tiêu độ ổn định Marshall. Giá trị độ ổn định Marshall của hai loại mẫu BTNP12,5 Khu Đêm và Sunway nhận được được cho là phù hợp với các kết quả thí nghiệm tương tự theo kinh nghiệm của nhóm tác giả, độ ổn định Marshall của BTNP12,5 với loại đá Sunway thường đạt xung quanh miền giá trị 15 kN.



Hình 6. Biểu đồ hộp độ ổn định Marshall các mẫu BTNP12,5.

Tương tự, phân tích T Test đánh giá sự khác biệt giá trị trung bình độ dẻo Marshall của hai nhóm mẫu BTNP12,5 cho thấy, không có ý nghĩa thống kê sự khác biệt với độ tin cậy 95%, với xác suất xảy ra giả thuyết đảo $p = 0,775$, lớn hơn mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$. Độ dẻo Marshall trung bình của các mẫu BTNP12,5 Khu Đêm và Sunway lần lượt là 4,47 và 4,42 mm nằm trong khoảng từ 3 mm đến 6 mm đảm bảo quy định trong tiêu chuẩn 22TCN356-06.

3.3. Khả năng chịu lực theo mô đun đàn hồi và cường độ ép chế

Thử nghiệm mô đun đàn hồi được thực hiện ở các nhiệt độ 10°C, 30°C và 60°C, tương ứng với các nhiệt độ kiểm toán kết cấu áo đường. Mẫu BTN được chế bị trên thiết bị đầm xoay Cooper với chế độ đầm nén mẫu theo độ rộng dư mục tiêu. Thử nghiệm xác định mô đun đàn hồi được thực hiện trên thiết bị UTM với chế độ thử nghiệm từ biến. Biên dạng theo thời gian trong quá trình chịu tác dụng của tải trọng và dỡ tải được theo dõi và xây dựng đồ thị tương quan, xác định chính xác thời điểm ghi nhận biên dạng ứng với tốc độ tăng/giảm biến dạng dưới 0,01mm/phút. Thời điểm ghi nhận sự ổn định biến dạng có ảnh hưởng tới kết quả tính toán mô đun đàn hồi theo hướng dẫn của 22TCN211:2006.

Kết quả thử nghiệm mô đun đàn hồi mẫu BTNP12,5-Khau Đêm ở các nhiệt độ yêu cầu của 22TCN211:2006 được thể hiện trong Bảng 10, cho thấy mô đun đàn hồi của các mẫu BTNP12,5-Khau Đêm có các thông số cơ học tương đối gần với các thông số cơ học khuyến cáo sử dụng khi tính toán chiều dày kết cấu áo đường theo 22TCN211:2006. Mô đun đàn hồi ở 10°C các mẫu BTNP12,5 chỉ đạt trung bình 1110,6 MPa, thấp hơn so với giá trị tra cứu tham khảo.

Bảng 10. Kết quả thử nghiệm mô đun đàn hồi của BTNP12,5-Khau Đêm.

TT	Mẫu thử nghiệm	Mô đun đàn hồi, MPa		
		ở 10 °C	ở 30 °C	ở 60 °C
1	Mẫu 1	1180,8	404,5	266,1
2	Mẫu 2	1213,1	384,1	275,8
3	Mẫu 3	1038,3	372,9	243,6
4	Mẫu 4	1068,1	432,8	260,5
5	Mẫu 5	1202,5	445,1	275,5
6	Mẫu 6	1133,2	449,4	239,2
7	Mẫu 7	1100,7	380	284,5
8	Mẫu 8	1009,8	390,2	250,5
9	Mẫu 9	1049	408,3	246,7
10	Giá trị trung bình, MPa	1110,6	407,5	260,3
11	Độ biến động Cv, %	6,79%	7,06%	6,22%
12	Cv cho phép (ASTM D6927, C670), %	37,20%	37,20%	37,20%
13	Khoảng chênh lệch cho phép	413,1	151,6	96,8
14	Khoảng chênh lệch R: max-min	203,3	76,5	45,3
15	Đánh giá (so sánh (14) và (13))	Chạm	Chạm	Chạm

Cường độ kéo uốn của các mẫu BTNP12,5 được xác định thông qua thử nghiệm cường độ ép chẻ (kéo gián tiếp của mẫu BTN) theo TCVN 8862:2011 với mẫu BTN đường kính 100mm, chiều cao tương đương các mẫu Marshall. Để đảm bảo độ chụm của kết quả thử nghiệm, sử dụng đầm xoay để chế bị các mẫu BTN. Nhiệt độ thử nghiệm cường độ ép chẻ ở 15°C. Kết quả thử nghiệm được trình bày trong Bảng 11. Thông số cường độ chịu kéo khi uốn của BTNP12,5 sử dụng đá Khu Đêm cao hơn giá trị tham khảo cường độ chịu kéo khi uốn giới thiệu trong 22TCN211:2006.

Bảng 11. Kết quả thử nghiệm cường độ chịu kéo khi uốn của BTNP12,5-Khau Đêm.

Bê tông nhựa	Chiều cao mẫu h, mm	Đường kính mẫu, d, mm	Tải trọng ép chẻ, P, N	Cường độ ép chẻ, R _c , MPa	Cường độ kéo uốn, R _{ku} , MPa	Hệ số biến động Cv, %	Giá trị trung bình, MPa
BTNP 12,5	63,8	101,6	26916	2,64	5,29	0,87%	5,31
	63,1		26839	2,67	5,33		
	63,3		27176	2,69	5,38		
	63		26563	2,64	5,29		
	63,4		26557	2,63	5,25		
	63,6		27045	2,67	5,33		

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong phòng các mẫu bê tông nhựa polymer sử dụng cốt liệu đá tại mỏ Khu Đêm được so sánh đối chứng với các mẫu sử dụng cốt liệu đá tại mỏ đá Sunway truyền thống khu vực phía Bắc Việt Nam nhằm mục đích đánh giá khả năng sử dụng

loại đá Khau Đêm để sản xuất hỗn hợp bê tông nhựa polymer SBS cho mặt đường cấp cao.

Kết quả thí nghiệm bài báo được phân tích thống kê với mức độ tin cậy 95%, một số kết luận và kiến nghị được đưa ra sau đây:

Cốt liệu đóng vai trò quan trọng ảnh hưởng tới các đặc tính kỹ thuật cũng như khả năng làm việc của bê tông nhựa. Cốt liệu sử dụng cho bê tông nhựa polymer tại các tỉnh miền Bắc Việt Nam thường là đá Phú Mãn, Quốc Oai, Hà Nội, làm phát sinh chi phí vật liệu, giảm khả năng ứng dụng bê tông nhựa polymer do giá thành cao rõ rệt so với bê tông nhựa thông thường. Qua nghiên cứu thực nghiệm cho thấy cốt liệu mỏ đá Khau Đêm tỉnh Lạng Sơn có các chỉ tiêu kỹ thuật đáp ứng yêu cầu của 22TCN356:2006, cốt liệu sử dụng cho bê tông nhựa polymer BTNP12,5 sử dụng đá Khau Đêm có hàm lượng nhựa tối ưu 5,00%.

Thành phần khoáng vật mẫu đá Khau Đêm và Sunway có sự tương đồng cao, hàm lượng SiO₂ tương ứng 43,17% và 45,24% chứng tỏ cốt liệu Khau Đêm và Sunway đều cùng là loại đá mácma có tính bazơ mạnh. Hàm lượng CaO trong cốt liệu Khau Đêm cao gần gấp đôi trong cốt liệu Sunway (13,46% so với 8,524%) là cơ sở của dính bám tốt giữa cốt liệu đá Khau Đêm với nhựa đường, đặc tính dính bám là đặc tính quan trọng và đáng lo ngại bậc nhất khi xem xét sử dụng một loại cốt liệu đá mới cho hỗn hợp bê tông nhựa, nhất là hỗn hợp bê tông nhựa polymer.

BTNP12,5-Sunway và BTNP12,5-Khau Đêm qua kết quả thí nghiệm và phân tích thống kê cho thấy sự tương đương nhau về các chỉ tiêu Marshall. Bê tông nhựa polymer sử dụng cốt liệu mỏ đá Khau Đêm đáp ứng được yêu cầu về khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe thông qua thử nghiệm mô phỏng trong phòng trên thiết bị HWTD. Phân tích số liệu thống kê cho thấy, chiều sâu HVBX của BTNP12,5-Sunway và BTNP12,5-Khau Đêm cũng là ở mức tương đương nhau và đạt kết quả tốt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. TCVN 13567-1:2022, Mặt đường bê tông nhựa nóng - Yêu cầu thi công và nghiệm thu.
- [2]. 22TCN 356:2006, Quy trình công nghệ thi công và nghiệm thu mặt đường bê tông nhựa sử dụng nhựa đường polime.
- [3]. Quyết định 858/QĐ-BGTVT 2014, Hướng dẫn áp dụng hệ thống tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành nhằm tăng cường quản lý chất lượng thiết kế và thi công mặt đường bê tông nhựa nóng đối với tuyến đường ô tô có quy mô giao thông lớn do bộ trưởng bộ giao thông vận tải ban hành.
- [4]. P. Morgan, A. Mulder, The Shell bitumen industrial handbook, Surrey: Shell Bitumen, 1995.
- [5]. O.-V. Laukkanen, Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens, Annual transactions of the nordic rheology society, 24 (2016) 53–57
- [6]. Ali Topal et al., Evaluation of Rheological and Image Properties of Styrene-Butadiene-Styrene and Ethylene-Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, Journal of Applied Polymer Science, 122 (2011) 3122–3132. <https://doi.org/10.1002/app.34282>
- [7]. Abdulrahman A. Al-Rabiah et al., Effect of styrene-butadiene-styrene copolymer modification on properties of Saudi bitumen, Petroleum Science and Technology, 34 (2016) 321-327. <https://doi:10.1080/10916466.2015.1129345>
- [8]. B.B. Teltayev et al., Evaluating the effect of asphalt binder modification on the low-temperature cracking resistance of hot mix asphalt, Case Studies in Construction Materials, 11 (2019) e00238. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00238>
- [9]. Y. Yildirim, Polymer modified asphalt binders, Constr. Build. Mater., 21 (2007) 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>

- [10]. M.S. Cortizo et al., Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts, *Polym. Degrad. Stab.*, 86 (2004) 275–82. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.05.006>
- [11]. S. Tayfur, H. Ozen, A. Aksoy, Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Constr. Build. Mater.*, 21 (2007) 328–337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.014>
- [12]. Z. Vlachovicova et al., Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene–butadiene–styrene copolymer, *Constr. Build. Mater.*, 21 (2007) 567–577.
- [13]. U. Isacsson, H.Y.Zeng, Relationships between bitumen chemistry and low temperature behavior of asphalt, *Constr. Build. Mater.*, 11 (1997) 83–91. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00008-1)
- [14]. S. Shuler, I. Douglas, Improving durability of open-graded friction courses, *Transp. Res. Rec.*, 1259 (1990) 35–41.
- [15]. S. Logaraj, Chemistry of Asphalt-Aggregate interaction – Influence of additives, Presentation at the Moisture Damage Symposium, Laramie, Wyo, 2002.
- [16]. P.E.Graf, Factors affecting moisture susceptibility of asphalt concrete mixes, Paper presented at the annual meeting of association of asphalt technologists, Clearwater, 17–19 February, 1986.
- [17]. Barton AF, Handbook of solubility parameters and other cohesion parameters, Boca Raton: CRC Press, Inc, 1983.
- [18]. Curtis CW, Jeon YW, Clapp DJ, *Fuel Sci Technol Int*, 7(9) (1989) 1125.
- [19]. Curtis CW, Jeon YW, Clapp DJ, *BM Transp Res Rec*, 112 (1989) 1228.