

# Hiệu quả của việc dùng phụ gia siêu dẻo Sika Plastiment - 88 để chế tạo bê tông xi măng có chứa cát nghiền trong xây dựng mặt đường ô tô

## Efficiency in using superplasticizer Sika Plastiment - 88 for producing concrete containing manufactured sand in road pavement construction

Nguyễn Đức Trọng<sup>1,\*</sup>, Phan Xuân Ý<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải

<sup>2</sup>Công ty Cổ phần Tư vấn thiết kế giao thông vận tải phía Nam

\*Tác giả liên hệ: trongnd\_ph@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/8/2023; Ngày chấp nhận đăng bài: 8/9/2023

### Tóm tắt:

Hiệu quả của việc dùng phụ gia siêu dẻo Sika Plastiment - 88 để chế tạo bê tông xi măng có chứa cát nghiền trong xây dựng mặt đường ô tô được trình bày trong nghiên cứu này. Do việc thiếu hụt nguồn cát sông tự nhiên hạt thô ngày càng trầm trọng nên việc nghiên cứu sử dụng cát nghiền thay thế một phần cát sông tự nhiên trong sản xuất bê tông xi măng là hết sức cấp thiết. Từ kết quả nghiên cứu ban đầu cho thấy khi sử dụng phụ gia Sika Plastiment - 88 sản xuất bê tông xi măng có chứa 60-80% cát nghiền trong xây dựng mặt đường tốt hơn dùng cát tự nhiên hạt thô: Tăng cường độ chịu kéo uốn và mô đun đàn hồi khi nén tĩnh, giảm giá thành xây dựng đáng kể.

**Từ khóa:** Hỗn hợp cát; Cát nghiền; Cát sông; Phụ gia Sika Plastiment - 88.

### Abstract:

Efficiency in using superplasticizer Sika Plastiment-88 for producing concrete containing manufactured sand in road pavement construction was presented in this research study. Due to the scarcity of coarse natural river sand more and more seriously, utilizing crushed sand to partially replace natural river sand in making concrete is essential. The initial study provided that the concrete containing 60-80% crushed sand with Sika Plastiment-88 was much better than the concrete containing river sand: Enhancing flexural strength and elastic modulus, reducing significantly construction costs.

**Keywords:** Hybrid sand; Crushed sand; River sand; Superplasticizer Sika Plastiment - 88.

### 1. Giới thiệu

Bê tông xi măng (BTXM) được sử dụng như một trong những vật liệu xây dựng phổ biến nhất do cường độ và tuổi thọ lớn, công nghệ thi công đơn giản, sử dụng được nguồn xi măng dồi dào ở Việt Nam. Trong bê tông, cát được coi là vật liệu có vai trò kỹ thuật chính cho việc cải thiện cường độ và tính công tác, hoàn thiện của bê tông. Nguồn cát tự nhiên tốt ngày càng khan

hiếm, việc khai thác cát sông có thể ảnh hưởng tới môi trường, sạt lở bờ sông, gây ô nhiễm nguồn nước,... Do đó, cần sử dụng vật liệu khác thay thế cát tự nhiên, xét thấy, việc sử dụng cát nghiền sản xuất BTXM là một lựa chọn hợp lý.

Tuy nhiên, để có được nguồn cát nghiền hợp chuẩn trong thực tế rất khó khăn do chi phí sản xuất rất cao, cần phải có giải pháp sử dụng phù hợp. Phối trộn giữa cát nghiền chưa hợp chuẩn

và cát tự nhiên sẵn có (thường là cát tự nhiên hạt mịn) làm cốt liệu nhỏ nhằm tạo ra sản phẩm bê tông đạt chất lượng theo yêu cầu được đề xuất. Hình dạng hạt, độ góc cạnh của cốt liệu nhỏ có ảnh hưởng lớn đến khả năng đầm chặt và tính chất của bê tông tươi cũng như bê tông đông cứng [1], [2]. Để cải thiện cường độ bê tông nhưng không tăng lượng xi măng sử dụng, có thể ứng dụng phụ gia siêu dẻo trong bê tông xi măng với cát nghiền, trở thành một giải pháp cần thiết.

Cốt liệu nhỏ là cát tự nhiên, với bề mặt nhẵn và hình dạng tròn, có thể tạo ra khả năng làm việc, tính công tác tốt hơn cát nghiền có bề mặt thô ráp và hình dạng góc cạnh, thô dài [2], [3]. Những đặc điểm này của cốt liệu nhân tạo đòi hỏi lượng nước cao hơn để bôi trơn hạt cốt liệu dưới dạng huyền phù, chúng tạo ra lực cản ma sát lớn hơn giữa cốt liệu và hồ xi măng xung quanh, dẫn đến cường độ bê tông tốt hơn. Một số nghiên cứu đề cập đến việc giảm khả năng làm việc của bê tông với sử dụng cát nghiền để thay thế một phần hoặc toàn bộ cát sông tự nhiên [4]–[7].

Tuy nhiên, theo Mudra và các cộng sự [8] khuyến nghị rằng cát nghiền được sử dụng không được vượt quá 50%. Hiện nay, sự phát triển ồ ạt của các công trình hạ tầng giao thông ngày càng đòi hỏi một lượng lớn cát xây dựng để sản xuất BTXM nên sử dụng cát nghiền để thay thế cát tự nhiên là một giải pháp có lợi.

Theo Quyết định 3230/QĐ-BGTVT, đối với BTXM mặt đường cao tốc, đường cấp I, cấp II và các đường có cấp quy mô giao thông nặng, rất nặng, cực nặng thì  $R_u \geq 5.0$  MPa, lượng xi măng khuyến cáo không quá  $400 \text{ kg/m}^3$  bê tông. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả trình bày đánh giá kết quả sử dụng phụ gia siêu dẻo Sika Plastiment-88 để sản xuất BTXM có chứa một phần cát nghiền thay thế cát tự nhiên trong xây dựng mặt đường ô tô.

## 2. Vật liệu chế tạo và kế hoạch thực nghiệm

### 2.1. Vật liệu thí nghiệm

#### • Cốt liệu lớn

Sử dụng loại đá dăm 5 x 20 mm được lấy từ khu vực Đông Nam Bộ (mỏ đá Kim Dinh, tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu) có các chỉ tiêu cơ lý đạt yêu cầu TCVN 7570-2006, gồm: Khối lượng thể tích xấp:  $1.432 \text{ g/cm}^3$ , khối lượng riêng:  $2.744 \text{ g/cm}^3$ , hàm lượng chung bụi, bùn, sét: 0.45%; độ mài mòn là 13.8%.

#### • Cốt liệu nhỏ

Sử dụng lần lượt 0%, 40%, 60%, 80% cát nghiền kết hợp với 100%, 60%, 40%, 20% cát tự nhiên hạt mịn làm cốt liệu nhỏ để chế tạo mẫu BTXM (kí hiệu lần lượt là: Cát mịn-100%, hỗn hợp 40/60, hỗn hợp 60/40, hỗn hợp 80/20), với mô đun độ lớn ( $M_{dl}$ ) của cốt liệu nhỏ lần lượt là: 1.24, 2.19, 2.67, 3.15. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu nhỏ như bảng 1.

**Bảng 1.** Các chỉ tiêu cơ lý của các loại cốt liệu nhỏ.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Cát nghiền	Cát tự nhiên hạt mịn	Cát tự nhiên hạt thô
Mô đun độ lớn ( $M_{dl}$ )	-	3.63	1.24	2.29
Khối lượng riêng	$\text{g/cm}^3$	2.682	2.645	2.653
Khối lượng thể tích xấp	$\text{g/cm}^3$	1.529	1.319	1.497
Hàm lượng chung bụi, bùn, sét	%	1.15	1.28	0.69
Độ hút nước	%	0.68	1.38	0.80

**Bảng 2.** Thành phần hạt và  $M_{dl}$  của các loại cốt liệu nhỏ dùng trong nghiên cứu.

Sàng (mm)	Cát tự nhiên hạt thô	Cát tự nhiên hạt mịn	Cát nghiền	Hỗn hợp 20/80	Hỗn hợp 40/60	Hỗn hợp 60/40
<b>Lượng tích lũy trên sàng (%)</b>						
<b>5.00</b>	0.51	0.00	4.91	3.93	2.95	1.96
<b>2.50</b>	4.34	0.70	37.90	30.46	23.02	15.58
<b>1.25</b>	17.76	1.63	59.81	48.18	36.54	24.90
<b>0.630</b>	38.46	3.84	78.11	63.25	48.40	33.55
<b>0.315</b>	75.92	31.98	91.22	79.38	67.53	55.68
<b>0.140</b>	92.58	85.59	95.75	93.72	91.69	89.65
<b>Mdl</b>	<b>2.29</b>	<b>1.24</b>	<b>3.63</b>	<b>3.15</b>	<b>2.67</b>	<b>2.19</b>

- Xi măng

Nghiên cứu này sử dụng loại xi măng Insee-PCB40 có cường độ chịu nén theo TCVN 6016:2011 tuổi 28 ngày là 43.81 MPa, khối lượng riêng của xi măng là  $3.10 \text{ g/cm}^3$ , lượng nước tiêu chuẩn là 32.5%.

- Phụ gia

Sika Plastiment-88 là một chất lỏng màu nâu:

(i) Tỷ trọng: 1.125 - 1.145 kg/lít (ở  $20^\circ\text{C}$ );

(ii) Liều dùng khuyến cáo: Từ 0.8 đến 1.4 lít/100 kg xi măng.

- Nước

Nước sử dụng cho bê tông là nước sạch, đạt tiêu chuẩn TCVN 4506:2012.

## 2.2. Thành phần cấp phối bê tông xi măng và kế hoạch thực nghiệm

Tính toán thành phần cấp phối bê tông xi măng có cường độ 42 MPa. Sau đó giữ nguyên thành

phần cốt liệu lớn (đá), xi măng, nước, phụ gia chỉ thay đổi thành phần cốt liệu nhỏ. Kết quả được trình bày tại bảng 3.

Với mỗi tổ hợp bê tông lấy giá trị trung bình của 03 mẫu để xác định một chỉ tiêu của BTXM cho mỗi ngày tuổi; mỗi cấp phối bê tông có 18 mẫu, gồm: 06 mẫu lập phương  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$  để xác định cường độ chịu nén ( $R_n$ ) ở tuổi 07, 28 ngày, 06 mẫu lăng trụ  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$  để xác định cường độ chịu kéo uốn ( $R_u$ ) ở tuổi 07, 28 ngày, 06 mẫu lăng trụ  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$  để xác định mô đun đàn hồi khi nén tĩnh ( $E_{dh}$ ). Tổng cộng 05 tổ hợp có tất cả 90 mẫu BTXM các loại được chế tạo, bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn theo TCVN 3105:2022 cho đến ngày tuổi thí nghiệm và được thử nghiệm tại phòng thí nghiệm hợp chuẩn (LAS-XD154). Trong đó sử dụng TCVN 3106:2022 để thử độ sụt, TCVN 3118:2022 để xác định  $R_n$ , TCVN 3119:2022 để xác định  $R_u$ , TCVN 5726:2022 để xác định  $E_{dh}$  của BTXM.

**Bảng 3.** Thành phần vật liệu chế tạo BTXM ( $1 \text{ m}^3$ ) cường độ chịu nén 42MPa.

Tên tổ hợp	Cốt liệu lớn (kg)	Cát nghiền (kg)	Cát tự nhiên hạt mịn (kg)	Cát tự nhiên hạt thô (kg)	Xi măng (kg)	Phụ gia (kg)	Nước (kg)
BT1 (HH20/80)	1102	674	169	0	395	3.95	155
BT2 (HH40/60)	1102	506	337	0	395	3.95	155
BT3 (HH60/40)	1102	337	506	0	395	3.95	155

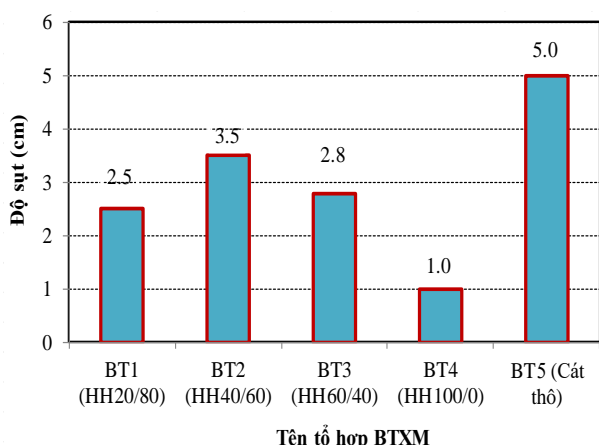
Tên tổ hợp	Cốt liệu lớn (kg)	Cát nghiền (kg)	Cát tự nhiên hạt mịn (kg)	Cát tự nhiên hạt thô (kg)	Xi măng (kg)	Phụ gia (kg)	Nước (kg)
BT4 (HH100/0)	1102	0	843	0	395	3.95	155
BT5 (Cát tự nhiên- hạt thô)	1102	0	0	843	395	3.95	155

### 3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Kết quả thí nghiệm: Độ sụt ( $S_n$ ), cường độ chịu nén ( $R_n$ ), cường độ chịu uốn ( $R_u$ ) và mô đun đàn hồi khi nén tĩnh ( $E_{dh}$ ) của bê tông xi măng cường độ 42 MPa khi sử dụng các loại cốt liệu nhỏ khác nhau. Kết quả nghiên cứu được tổng hợp và đánh giá như sau:

#### 3.1. Độ sụt của BTXM

Kết quả được thể hiện ở hình 1.



Hình 1. Độ sụt ( $S_n$ ) của BTXM.

Khi sử dụng một hàm lượng cát nghiền kết hợp với cát tự nhiên hạt mịn hợp lý, độ sụt của BTXM cải thiện đáng kể so với sử dụng hoàn toàn là cát tự nhiên hạt mịn. Cụ thể, khi dùng 20%, 40%, 60% cát tự nhiên hạt mịn trong hỗn hợp cốt liệu nhỏ, độ sụt BTXM tăng so với dùng hoàn toàn là cát tự nhiên hạt mịn (độ sụt 1.0 cm) lần lượt là 2.5, 3.5, 2.8 lần. Còn độ sụt giảm so với sử dụng hoàn toàn cát tự nhiên hạt thô lần lượt là 50%, 30%, 44%. Điều này có thể giải thích như sau: Lực ma sát giữa các hạt cốt liệu nhân tạo có góc cạnh lớn, dẹt dài vốn lớn hơn so với lực ma sát giữa các hạt tròn trơn, tỷ lệ diện tích bề mặt của hỗn hợp cốt liệu nhỏ có nhiều cát nghiền hoặc nhiều cát mịn tự nhiên

lớn hơn so với cát tự nhiên sông hạt thô nên cần lượng nước nhiều hơn [2].

Theo Cepuritis và các cộng sự [9], cốt liệu có các hạt nhỏ hơn thường tạo ra tính công tác thấp hơn trong bê tông do diện tích bề mặt lớn hơn. Trong khi lượng nước sử dụng cho các cấp phối là như nhau làm cho độ sụt của BTXM dùng nhiều cát nghiền hoặc nhiều cát mịn tự nhiên giảm.

Theo Hudson [10] cho rằng hỗn hợp bê tông kết hợp các hạt hình cầu có khả năng bơm và tính hoàn thiện tốt hơn so với cấp phối tập hợp các hạt góc cạnh. Kết quả thực nghiệm cho thấy khi tỷ lệ giữa cát nghiền và cát tự nhiên hạt mịn phối trộn hợp lý dẫn đến độ sụt BTXM được cải thiện hơn.

#### 3.2. Tính chất cơ học của BTXM

Bê tông sau khi được bảo dưỡng đến ngày tuổi, tiến hành thí nghiệm và thu được kết quả với các chỉ tiêu  $R_n$ ,  $R_u$ ,  $E_{dh}$ , được thể hiện ở các biểu đồ hình 4, 5 và 6.

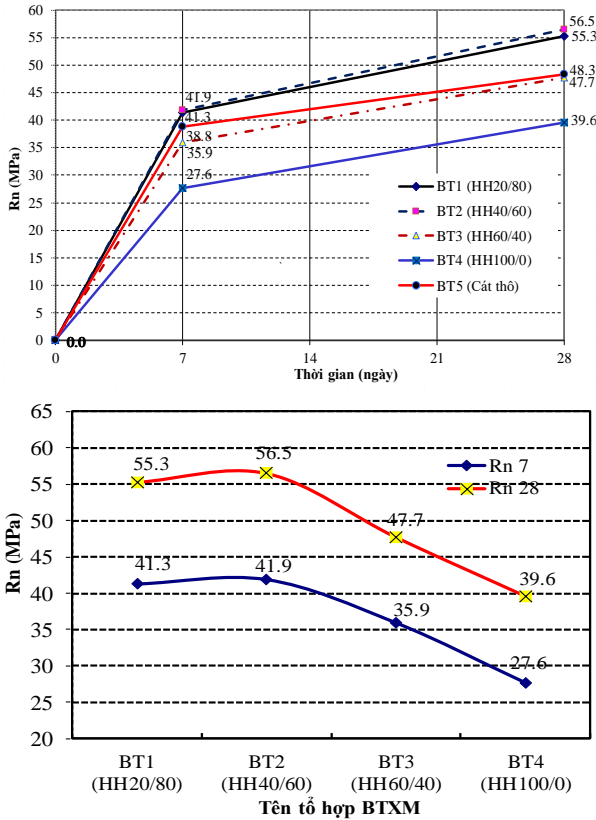


Hình 2. Thí nghiệm  $R_u$  của BTXM.



Hình 3. Thí nghiệm  $E_{dh}$  của BTXM.

• Cường độ chịu nén

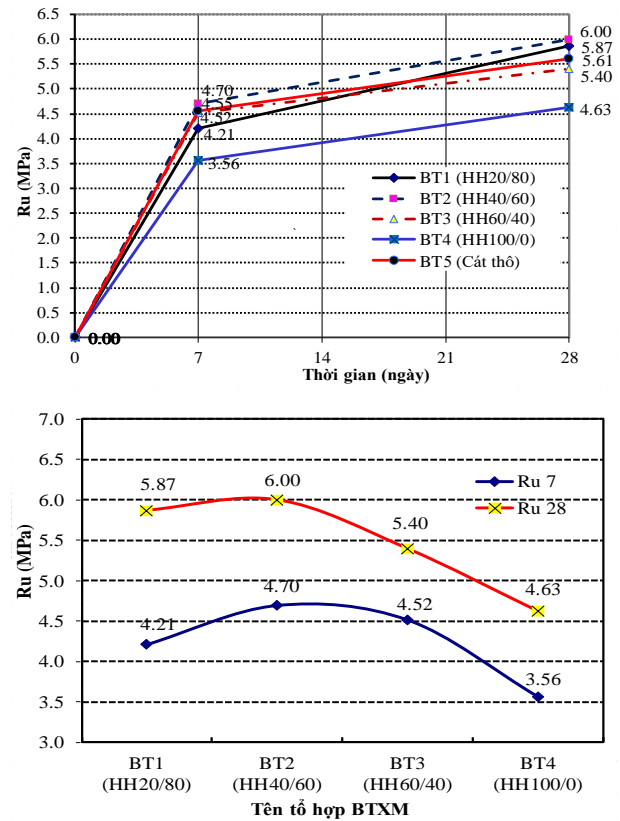


Hình 4. Biểu đồ  $R_n$  của BTXM.

Kết quả thí nghiệm ở hình 4 cho thấy tốc độ phát triển  $R_n$  của BTXM có chứa một phần cát nghiền dùng phụ gia siêu dẻo trong giai đoạn đầu (trước 07 ngày) tăng nhanh hơn so với sử dụng hoàn toàn là cát tự nhiên hạt mịn nhưng chậm hơn so với sử dụng cát tự nhiên tốt. Với tỷ lệ cát tự nhiên hạt mịn chiếm 20%, 40%, 60%,  $R_n$  của BTXM tuổi 07 ngày so với tuổi 28

ngày đạt lần lượt là: 74.7%, 74.2%, 75.3%. Bê tông chứa 40 - 80% cát nghiền trong thành phần cốt liệu nhỏ cho  $R_n$  tương đương hoặc tốt hơn so với dùng cát tự nhiên loại tốt. Với hàm lượng cát nghiền trong cốt liệu nhỏ chiếm 60%,  $R_n$  của BTXM đạt giá trị cao nhất. Cụ thể ở tuổi 07 ngày,  $R_n$  dùng hỗn hợp cát nghiền cao hơn cát tự nhiên hạt thô, cát tự nhiên hạt mịn lần lượt là 8.0%, 51.8%, ở tuổi 28 ngày tỷ lệ này là 17.0%, 42.7%.

• Cường độ chịu kéo uốn

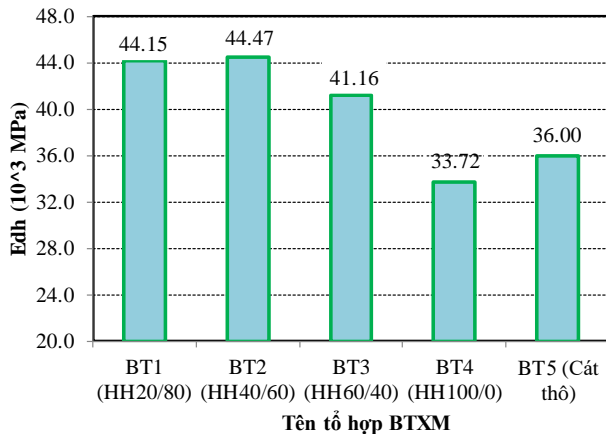


Hình 5. Biểu đồ  $R_u$  của BTXM.

Kết quả thí nghiệm ở hình 5 cho thấy, khi tỷ lệ cát tự nhiên hạt mịn chiếm 20%, 40%, 60% trong thành phần cốt liệu mịn,  $R_u$  của BTXM tuổi 07 ngày so với tuổi 28 ngày đạt lần lượt là 72%, 78%, 84%. Bê tông chứa 40 - 80% cát nghiền trong hỗn hợp cát cho  $R_u$  tương đương hoặc tốt hơn so với dùng cát tự nhiên loại tốt, trong đó, với bê tông có chứa 60 - 80% cát nghiền,  $R_u$  cao hơn dùng cát tự nhiên, đạt giá trị cao nhất khi dùng cốt liệu nhỏ có tỷ lệ cát nghiền/cát mịn tự nhiên là 60%/40%. Cụ thể ở tuổi 07 ngày,  $R_u$  dùng hỗn hợp cát nghiền cao hơn cát tự nhiên tốt, cát tự nhiên hạt mịn lần

lượt là 3.3%, 32.0%, còn ở tuổi 28 ngày tỷ lệ này là 7.0%, 29.6%.

- Mô đun đàn hồi khi nén tĩnh



**Hình 6.** Biểu đồ  $E_{dh}$  của BTXM ở 28 ngày

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi khi nén tĩnh ( $E_{dh}$ ) của BTXM cho thấy khi tỷ lệ cát tự nhiên hạt mịn chiếm 20%, 40%, 60% thì  $E_{dh}$  của BTXM lớn hơn so với dùng cát tự nhiên tốt. Với hàm lượng cát tự nhiên trong cốt liệu nhỏ chiếm 20%, 40%, 60%,  $E_{dh}$  của BTXM tuổi 28 ngày đạt giá trị lớn hơn so với khi dùng cát tự nhiên hạt thô và cát tự nhiên hạt mịn lần lượt là 22.6%, 23.5%, 14.3% và 30.9%, 31.9%, 22.1%.

### 3.3. Thảo luận và đánh giá

Sử dụng phụ gia Sika Plastiment - 88 với liều lượng 1 kg phụ gia/100 kg xi măng (tương ứng 1 m<sup>3</sup> bê tông là 3.95 kg phụ gia), xi măng dùng là 395 kg cho cường độ tương đương khi sử dụng phụ gia Sika - R4 cần 467 kg xi măng với liều lượng phụ gia là 4.67 kg. Theo kết quả nghiên cứu [1], khi sử dụng phụ gia Sika - R4 (liều lượng 1 kg phụ gia/100 kg xi măng) với lượng xi măng 467 kg/1 m<sup>3</sup> bê tông cho  $R_u = 6.03\text{MPa}$ ,  $E_{dh} = 42.8 \times 10^3 \text{Mpa}$ .

Cường độ của BTXM được cải thiện khi sử dụng cốt liệu nhỏ là cát nghiền giúp cải thiện các tính chất cơ học của BTXM [2], [3]. Với việc bổ sung một hàm lượng cát nghiền hợp lý trong thành phần cốt liệu nhỏ đã làm tăng liên kết cấu trúc, ma sát giữa các hạt tăng lên nên cải thiện khả năng chịu lực của BTXM và tăng hơn so với khi sử dụng cát tự nhiên.

### 3.4. Giá thành sản xuất BTXM

Chi phí vật tư (chưa bao gồm thuế giá trị gia tăng) của BTXM cường độ chịu nén 42 MPa làm mặt đường khi dùng các giải pháp cốt liệu nhỏ và phụ gia khác nhau được trình bày ở bảng 4.

**Bảng 4.** Giá thành 1m<sup>3</sup> bê tông khi sử dụng các giải pháp khác nhau.

STT	Giải pháp sử dụng	Giá thành 1m <sup>3</sup> bê tông (Chưa có VAT)
1	Dùng phụ gia Sika Plastiment - 88, cát trộn (cát nghiền/cát tự nhiên là 60%/40%)	1,212,068
2	Dùng phụ gia Sika - R4, cát trộn	1,313,048
3	Dùng phụ gia Sika Plastiment - 88, cát tự nhiên hạt thô	1,336,245

Như vậy, BTXM mặt đường dùng cốt liệu nhỏ chứa 60% cát nghiền có sử dụng phụ gia siêu dẻo Sika Plastiment - 88 với giá thành thấp hơn so với khi dùng phụ gia Sika-R4 và dùng hoàn toàn là cát tự nhiên tốt lần lượt là 100,980 đồng và 124,177 đồng cho 1m<sup>3</sup> bê tông.

### 4. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu, một số kết luận được rút ra như sau:

- Kết quả nghiên cứu cho thấy khi hàm lượng cát tự nhiên hạt mịn trong hỗn hợp cát chiếm 20 - 60%, cho các tính chất của BTXM dùng phụ gia siêu dẻo tương đương hoặc tốt hơn so với dùng cát tự nhiên. Tuy nhiên, tỷ lệ cát tự nhiên hạt mịn chiếm 20 - 40% trong hỗn hợp cát, cho các tính chất của BTXM làm mặt đường là tốt nhất. Ở tuổi 28 ngày với sử dụng hỗn hợp cát này thấy rằng  $R_u$  cao hơn khi dùng cát tự nhiên tốt, cát mịn tự nhiên lần lượt là: 4.6 - 7.0%, 26.8 - 29.6%,  $E_{dh}$  cao hơn tương ứng là 22.6 - 23.5%, 30.9 - 31.9%. Để đảm bảo tối ưu tính công tác, hoàn thiện và tính chất cơ học của bê tông, khuyến nghị tỷ lệ sử dụng cát

nghiên/cát tự nhiên hạt mịn trong thành phần cốt liệu nhỏ là 60%/40%.

- BTXM sử dụng phụ gia Sika Plastiment-88 cải thiện cường độ rất tốt, đặc biệt là  $R_u$ ,  $E_{dh}$ . Các chỉ tiêu này đáp ứng yêu cầu BTXM làm mặt đường cao tốc, đường cấp I, cấp II và các đường có cấp quy mô giao thông nặng, rất nặng, cực nặng với lượng xi măng dùng dưới 400 kg/1m<sup>3</sup> ( $R_u \geq 5$  MPa).

- Sử dụng phụ gia Sika Plastiment-88 giúp giảm giá thành sản xuất BTXM làm mặt đường so với khi dùng các giải pháp khác (bảng 4) được đề cập trong nghiên cứu này.

### Tài liệu tham khảo

- [1] N. Đ. Trọng, “Hiệu quả sử dụng phụ gia siêu dẻo trong bê tông xi măng dùng hỗn hợp cát nghiền và cát mịn tự nhiên tại khu vực Đông Nam Bộ,” *TC GTVT*, số tháng 7, tr. , 7. 2015.
- [2] N. Đ. Trọng, “Ảnh hưởng độ góc cạnh của cốt liệu nhỏ đến các tính chất của bê tông làm mặt đường ô tô,” *TC GTVT*, số tháng 9, tr. , 9. 2021.
- [3] D. -T. Nguyen, D. -L. Nguyen, M. N. -T. Lam, “An experimental investigation on the utilization of crushed sand in improving workability and mechanical resistance of concrete,” *Con. Build. Mat.*, vol. 326, Apr. 2022, Art. no. 126766, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126766.
- [4] M. M. Kiran, K. K. Dilip, A. J. Abhishek, “Strength and workability of concrete with manufactured sand,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 331–335, 2017.
- [5] D. Mamaru, “Suitability of crushed manufactured sand for replacement of natural river sand to produce C-25 concrete,” *J. Civ. Environ. Eng.*, vol. 10, no. 7, pp. 1-8, Nov. 2020.
- [6] T. Çelik, K. Marar, “Effects of crushed stone dust on some properties of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 7, pp. 1121–1130, Jul. 1996, doi: 10.1016/0008-8846(96)00078-6.
- [7] M. Pilegis, D. Gardner, R. Lark, “An investigation into the use of manufactured sand as a 100% replacement for fine aggregate in concrete,” *Materials*, vol. 9, no. 6, Jun. 2016, Art. no. 440, doi:10.3390/ma9060440.
- [8] S. Mundra, P. R. Sindhi, V. Chandwani, R. Nagar, V. Agrawal, “Crushed rock sand—An economical and ecological alternative to natural sand to optimize concrete mix,” *Perspect. Sci.*, vol. 8, pp. 345–347, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.pisc.2016.04.070.
- [9] R. Cepuritis, S. Jacobsen, B. Pedersen, E. Mørtzell, “Crushed sand in concrete –Effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 71, pp. 26–41, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.04.004.
- [10] B. P. Hudson, “Manufactured Sand for Concrete,” *Indian Con. J.*, pp.237-240, 1997.