

# CƯỜNG ĐỘ, KHẢ NĂNG KHÁNG NÚT DO CO NGÓT DÈO VÀ TÍNH THẨM NƯỚC CỦA BÊ TÔNG XI MĂNG MẶT ĐƯỜNG SỬ DỤNG CỐT LIỆU XỈ THÉP VÀ CAO SU

Phạm Ngọc Phương<sup>a,\*</sup>, Nguyễn Thanh Cường<sup>a</sup>, Đỗ Như Huỳnh Đức<sup>a</sup>,

Nguyễn Văn Phong Hào<sup>a</sup>, Lê Đức Châu<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng,  
54 Nguyễn Lương Bằng, quận Liên Chiểu, TP. Đà Nẵng, Việt Nam*

*Nhận ngày 01/02/2023, Sửa xong 13/3/2023, Chấp nhận đăng 13/3/2023*

## Tóm tắt

Cốt liệu cao su hoặc xỉ thép đã được nghiên cứu sử dụng trong bê tông xi măng. Bài báo trình bày kết quả thí nghiệm xác định các tính chất cơ học, tính thấm nước và khả năng kháng nứt do co ngót dẻo của bê tông xi măng mặt đường trong đó sử dụng 100% cốt liệu lớn bằng xỉ thép và cốt liệu mịn (cát) được thay thế bằng cốt liệu cao su 1-3 mm theo thể tích 0%, 5%, 15% và 30%. Kết quả nghiên cứu cho thấy kết hợp hai loại vật liệu phế thải trên làm giảm cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo uốn, độ mài mòn và tăng tính thấm. Tuy nhiên, tất cả các cấp phối bê tông xi măng đề xuất đều thỏa mãn yêu cầu về cường độ chịu kéo uốn tùy cấp đường ( $> 4$  MPa) và độ mài mòn đảm bảo cho tất cả các loại đường ( $< 0,3$  g/cm<sup>2</sup>). Bê tông xi măng mặt đường sử dụng 100% cốt liệu lớn xỉ thép có cường độ kéo uốn cao hơn và đặc biệt khả năng kháng nứt do co ngót dẻo tốt hơn. Cốt liệu cao su làm tăng thêm khả năng khả nứt này và hạn chế tính thấm nước của bê tông xỉ thép. Nghiên cứu góp phần đẩy mạnh sử dụng cốt liệu xỉ thép và cao su trong xây dựng đường, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn, hướng đến phát triển xanh và bền vững.

*Từ khóa:* bê tông xi măng mặt đường; cao su; xỉ thép; độ mài mòn; tính thấm nước; kháng nứt do co ngót dẻo.

MECHANICAL PROPERTIES, PLASTIC SHRINKAGE CRACKING RESISTANCE AND WATER ABSORPTION OF PAVING CONCRETE USING STEEL SLAG AND RUBBER AGGREGATES

## Abstract

Rubber and steel slag aggregates have been studied and used in cement concrete. The paper presents experimental results from mechanical property tests, water capillary absorption tests, and plastic shrinkage cracking resistance tests of different paving concretes incorporating the waste aggregates. Steel slag aggregates were used as a complete replacement for coarse aggregates, and rubber aggregates replaced fine aggregates (sand) at distinct contents of 0%, 5%, 15%, and 30% by volume. The findings showed that using the by-product-based aggregates was detrimental to compressive strength, flexural strength, abrasion, and water capillary absorption. However, all designed concrete mixtures still satisfied the requirements of flexure ( $> 4$  MPa) and abrasion ( $> 0.3$  g/cm<sup>2</sup>) for concrete pavement. The steel slag concrete exhibited an increased flexural strength and a highly improved cracking resistance to plastic shrinkage compared to the reference one. The rubber aggregates also helped for improved plastic shrinkage cracking resistance and increased water capillary absorption of the steel slag paving concrete. The study promotes applications of waste aggregates in road construction, contributing to the circular economy and sustainable development.

*Keywords:* paving concrete; rubber aggregates; steel slag aggregates; abrasion; water capillary absorption; plastic shrinkage cracking resistance.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(2V\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(2V)-12) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [pnphuong@dut.udn.vn](mailto:pnphuong@dut.udn.vn) (Phuong, P. N.)

## 1. Đặt vấn đề

Mặt đường bê tông xi măng (BTXM) có cường độ cao, phù hợp cho đường có quy mô giao thông nặng, yêu cầu chịu lực ngang lớn (nút giao thông, đường dốc, đường cong bán kính nhỏ, ...) và đường khai thác trong điều kiện chế độ thủy nhiệt bất lợi. Tuy nhiên, sau khi thi công, mặt đường BTXM có thể bị nứt do co ngót (dẻo, khô, hóa học, nhiệt, ...) liên quan đến vấn đề bảo dưỡng hay các yếu tố môi trường bên ngoài [1, 2]. Sự tồn tại của khe nối ở mặt đường BTXM thông thường cũng là nhược điểm vì nhiều hư hỏng xảy ra tại các khe nối ngang và dọc. Ngoài ra, vật liệu BTXM mặt đường có mô đun đàn hồi lớn và dễ dẫn đến nứt do co ngót [3]. Hơn nữa, so với các loại mặt đường khác, độ cứng mặt đường BTXM cao gây ra tiếng ồn nhiều hơn và tạo cảm giác khó chịu cho người tham gia giao thông. Tuy nhiên, điều này còn phụ thuộc vào tình trạng bằng phẳng và độ nhám của mặt đường. Do đó, mong muốn thiết kế được mặt đường BTXM thông thường có khả năng kháng nứt tốt, không có hoặc hạn chế khe nối, góp phần nâng cao chất lượng khai thác và tuổi thọ mặt đường BTXM.

Hiện tại, nhu cầu vật liệu trong xây dựng rất lớn, trong đó có yêu cầu cốt liệu cho BTXM nói chung và mặt đường BTXM nói riêng. Do đó các phế thải (cao su, xi thép, bùn thải, ...) đã được nghiên cứu sử dụng để thay thế một phần hoặc toàn bộ cốt liệu trong vật liệu xi măng (vữa, bê tông xi măng, cốt liệu gia cố xi măng) [4, 5]. Cốt liệu cao su đã được ứng dụng trong mặt đường BTXM, bê tông nhựa bán cứng, móng gia cố xi măng, gạch bê tông tự chèn [4]. Đối với BTXM cao su, cốt liệu cao su tuy làm giảm cường độ (chủ yếu cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi) nhưng giúp tăng khả năng chịu biến dạng cho BTXM; qua đó tăng khả năng kháng nứt do co ngót, duy trì được một phần cường độ sau nứt và ứng xử của BTXM cao su sau phá hoại tốt hơn [6]. Phạm Ngọc Phương và cs. [4] giải thích tính kháng nứt có được là do khả năng chịu biến dạng kéo cao của vật liệu xi măng cao su, cốt liệu cao su có khả năng hấp thụ năng lượng gây nứt, đóng vai trò như các lỗ rỗng và lò xo trong vật liệu xi măng cao su, giúp trì hoãn quá trình hình thành và mở rộng vết nứt. Do đó có thể sử dụng BTXM cao su để xây dựng mặt đường BTXM thông thường không có khe nối [7].

Trong khi đó, xi thép sử dụng thay thế cốt liệu trong vật liệu xi măng và hiện chủ yếu ứng dụng trong móng đường gia cố xi măng [2, 8, 9]. Nguyễn Thị Thúy Hằng và cs. [10] nghiên cứu cấp phối xi thép-cát mịn (tỷ lệ xi thép/cát mịn là 80%/20%) gia cố xi măng với hàm lượng 4%, 6%, 8% và nhận thấy đặc tính kỹ thuật của cấp phối xi thép-cát mịn gia cố xi măng được cải thiện đáng kể nên có thể dùng làm lớp móng trên kết cấu áo đường. Đối với BTXM xi thép, xi thép có xu hướng đảm bảo cường độ BTXM xi thép nếu tỷ lệ xi thép sử dụng phù hợp. Đối với mặt đường BTXM, Abd El-Hakim và cs. [11] đã thiết kế bê tông tính năng cao sử dụng xi thép để thay thế khối lượng cốt liệu lớn với các tỷ lệ 0%, 25%, 50%, 75% và 100%. Kết quả cho thấy bê tông tính năng cao sử dụng xi thép có cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi, cường độ ép chẻ, cường độ kéo uốn cao hơn so với loại BTXM đối chứng, trong đó loại BTXM sử dụng xi thép 50% cho các chỉ tiêu cường độ cao nhất.

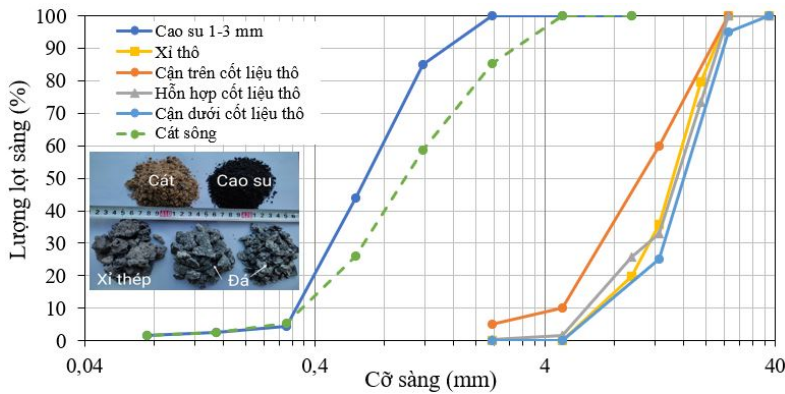
Từ tổng hợp các nghiên cứu có trước ở trên cho thấy cốt liệu cao su và xi thép hoàn toàn có thể sử dụng trong xây dựng đường [4, 12, 13]. Tuy nhiên hiện chưa có nghiên cứu sự kết hợp sử dụng cả 2 loại phế thải này trong BTXM mặt đường để tích hợp được ưu điểm của 2 loại cốt liệu. Đối với BTXM mặt đường, ngoài yêu cầu cơ bản về cường độ chịu uốn và độ mài mòn, các chỉ tiêu khác như khả năng kháng nứt do co ngót dẻo và tính thấm nước cần được quan tâm để đảm bảo độ bền của mặt đường BTXM. Do vậy, bài báo tập trung khảo sát các đặc tính này, đặc biệt khả năng kháng nứt do co ngót dẻo đối với BTXM mặt đường sử dụng 100% xi thép để thay thế cốt liệu lớn đối sánh với BTXM đối chứng (không sử dụng xi thép). Đồng thời, cốt liệu cao su cỡ hạt 1-3 mm cũng được sử dụng thay thế 1 phần cát theo thể tích 5%, 15%, 30% để đánh giá ảnh hưởng của cốt liệu cao su đến tính chất BTXM xi thép. Lưu ý rằng nứt do co ngót dẻo có thể không ảnh hưởng nhiều đến cường độ mặt đường BTXM nhưng nó là nguyên nhân dẫn đến nhiều hư hỏng nghiêm trọng như tăng độ mài mòn,

bong tróc mặt đường, làm giảm độ bền của mặt đường BTXM khi chịu các yếu tố xâm thực. Kết quả nghiên cứu giúp có thêm cơ sở để đẩy mạnh việc sử dụng cả 2 loại phế thải cao su và xỉ thép trong xây dựng mặt đường BTXM, góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn, hướng đến phát triển xanh và bền vững.

## 2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

### 2.1. Vật liệu

Các loại vật liệu chế tạo BTXM xỉ thép bao gồm cát sông, xỉ thép, xi măng, nước và phụ gia. Xi thép sử dụng thuộc loại EAF lấy từ công ty thép Đà Nẵng có kích thước 4,75-25 mm thông qua sàng phân loại ở phòng thí nghiệm. Hình 1 cho thấy thành phần hạt của xỉ thép thỏa mãn yêu cầu về kích cỡ của cấp phối cốt liệu lớn cho BTXM Dmax25 theo ASTM C33/33M-2018 [14]. Đối với BTXM đối chứng (không sử dụng xỉ thép), hai loại đá dăm 4,75 × 12,5 và 9,5 × 25 được phối trộn với nhau theo tỉ lệ 25/75 để có đường thành phần hạt tương tự xỉ thép (Hình 1). Cát sông sử dụng có cỡ hạt từ 0,075-4,75 mm, có mô đun độ lớn 3,2.



Hình 1. Thành phần hạt và hình ảnh cốt liệu

Bảng 1. Tính chất của các loại vật liệu chế tạo BTXM mặt đường

Tính chất vật liệu	Tiêu chuẩn thí nghiệm	Cốt liệu mịn		Cốt liệu thô		Xi thép thô	Xi măng
		Cát sông	Cao su	Đá dăm 4,75 × 12,5	Đá dăm 9,5 × 25		
Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	TCVN 7572-4:2006 [15]	2,64	1,2	2,76	2,79	3,29	3,10
Khối lượng thể tích (g/cm <sup>3</sup> )	TCVN 7572-4:2006 [15]	2,58	1,2	2,73	2,75	2,82	-
Độ hao mòn khi va đập LA (%)	TCVN 7572-12:2006 [15]	-	-	19,81	33,11	-	-
Mô đun độ lớn	TCVN 7572-2:2006 [15]	3,2	-	-	-	-	-
Độ hút nước (%)	TCVN 7572-2:2006 [15]	0,78	0	0,48	0,47	5,06	-
d (mm)	TCVN 7572-2:2006 [15]	0,075	1	4,75	9,5	4,75	-
D (mm)	TCVN 7572-2:2006 [15]	4,75	3	12,5	25	25	-
Cường độ nén 3 ngày (MPa)	TCVN 6016:2011 [16]	-	-	-	-	-	38,3

Đối với BTXT có sử dụng cốt liệu cao su, một phần thể tích cát (0%, 5%, 15% và 30%) đã được thay thế bằng cốt liệu cao su 1-3 mm nghiền từ lốp xe phế thải. Sự thay thế này tương đối phù hợp do xu hướng tương đồng về thành phần hạt của cát sông và cốt liệu cao su như Hình 1. Cát sông và

các loại đá dăm được lấy từ mỏ đá Phú Mỹ Hòa, Đà Nẵng, cốt liệu cao su được cung cấp bởi công ty Long Long Ruber Recycling, Việt Nam.

Xi măng Sông Gianh có cường độ chịu nén ở 3 ngày 38,3 MPa, thời gian bắt đầu ninh kết 140 phút, thời gian kết thúc ninh kết 185 phút, khối lượng riêng 3,1 g/cm<sup>3</sup>, lượng nước tiêu chuẩn 31% phù hợp với các quy định tại TCVN 6260:2020 [17]. Phụ gia sử dụng là loại phụ gia siêu hóa dẻo và giảm nước chất lượng cao MasterEase 3054. Tính chất của tất cả các loại vật liệu chế tạo BTXM được thí nghiệm theo các tiêu chuẩn tương ứng và được tổng hợp ở Bảng 1.

## 2.2. Cấp phối BTXM xi thép-cao su

BTXM mặt đường theo TCCS 39:2022 [18] không đề cập cường độ chịu nén, chỉ yêu cầu cường độ chịu kéo uốn ( $f_t$ ) tùy thuộc vào cấp đường, quy mô giao thông và tải trọng trục. Yêu cầu cường độ chịu kéo khi uốn tối thiểu 4 MPa cho các đường có quy mô giao thông cấp nhẹ và không có xe nặng với tải trọng trục đơn lớn hơn 100 kN lưu thông.

Cấp phối BTXM Dmax25 đối chứng không sử dụng xi thép và cao su (0XT-0CS) được thiết kế để đạt cường độ chịu kéo khi uốn yêu cầu với yêu cầu BTXM mặt đường (> 5 MPa). Sau đó tính toán các cấp phối BTXM sử dụng 100% cốt liệu xi thép để thay thế cốt liệu lớn và cấp phối BTXM xi thép có sử dụng cốt liệu cao su 1-3 mm để thay thế một phần thể tích cát (0%, 5%, 15% và 30%). Hàm lượng phụ gia siêu dẻo sử dụng được điều chỉnh để đảm bảo độ sụt của các hỗn hợp BTXM từ 2-4 cm. Khối lượng xi thép thay thế cốt liệu lớn hoặc khối lượng cốt liệu cao su thay thế cát theo thể tích được tính toán theo công thức (1). Từ đó có được thành phần 5 cấp phối BTXM nghiên cứu như Bảng 1.

$$m_{xt(cs)} = p_{cs(xt)} \frac{\gamma_{xt(cs)}}{\gamma_{d(c)}} m_{d(c)} \quad (1)$$

trong đó  $m_{xt(cs)}$  là khối lượng cốt liệu xi thép hoặc cao su thay thế lần lượt cốt liệu lớn và cát;  $p_{cs(xt)}$  là phần trăm xi thép (100% thay thế cốt liệu lớn) hoặc cao su thay thế cát theo các thể tích (0%, 5%, 15% và 30%);  $\gamma_{xt(cs)}$  và  $\gamma_{d(c)}$  lần lượt là dung trọng của xi thép (hoặc cao su) và đá (hoặc cát);  $m_{d(c)}$  là khối lượng đá hoặc cát ban đầu.

Bảng 2. Thành phần các loại cấp phối bê tông mặt đường (kg/m<sup>3</sup>)

Tên CP	Nước	Xi măng	Cát	Đá 4,75 × 25	Xi thép	Cao su	Phụ gia
0XT-0CS	166,1	437,2	643,6	1217,8	-	-	0,792
100XT-0CS	166,1	437,2	638,6	-	1506,9	-	0,881
100XT-5CS	166,1	437,2	611,4	-	1506,9	14,51	0,798
100XT-15CS	166,1	437,2	547,0	-	1506,9	43,54	0,496
100XT-30CS	166,1	437,2	450,5	-	1506,9	87,08	0,633

Ghi chú: 0XT-0CS (BTXM đối chứng); 100XT-0CS, 100XT-5CS, 100XT-15CS, 100XT-30CS là các BTXM sử dụng 100% xi thép làm cốt liệu lớn và cốt liệu mịn (cát sông) lần lượt được thay thế bằng 0%, 5%, 15%, 30% cốt liệu cao su tương ứng theo thể tích.

## 2.3. Chế bị mẫu và dưỡng hộ

Nghiên cứu thực hiện đánh giá cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo uốn lần lượt trên các mẫu trụ 10 cm × 20 cm và mẫu dầm 10 cm × 10 cm × 50 cm. Các mẫu thí nghiệm thấm nước được cắt ra từ mẫu trụ 10 cm × 20 cm. Các mẫu dầm sau khi thí nghiệm uốn được cắt ra thành các mẫu lập

phương có kích thước 7 cm × 7 cm × 7 cm để thí nghiệm độ mài mòn. Do đó, cần đúc các mẫu trụ 10 cm × 20 cm và mẫu dầm 10 cm × 10 cm × 50 cm. Số lượng mẫu chế bị tính toán đảm bảo mỗi thí nghiệm (nén, uốn và mài mòn) thực hiện 3 lần và lấy giá trị trung bình cho mỗi nội dung thí nghiệm.

Chuẩn bị vật liệu: Làm ẩm cát và các loại đá để cát và đá đạt trạng thái bão hòa bề mặt. Đối với xi thép, cần ngâm trong nước 24h, sau đó tiến hành rửa sạch bụi bẩn và làm khô bề mặt xi thép. Chuẩn bị máy trộn 50 lít, cân đo độ sụt, các dụng cụ khác phục vụ công tác đúc mẫu. Tiến hành kiểm tra độ ẩm của cốt liệu, tính toán hiệu chỉnh nước trộn theo độ ẩm thực tế của cốt liệu. Cho cốt liệu vào máy trộn theo thứ tự đá (xi thép), cát (cao su), xi măng. Tiến hành trộn khô 3 phút sau đó cho 70% nước (đã hòa một phần phụ gia) trộn ẩm trong 3-4 phút. Tiếp tục cho dần dần nước và phụ gia vào hỗn hợp kết hợp với quá trình đo độ sụt để xác định lượng phụ gia cần bổ sung cho hỗn hợp BTXM đạt được độ sụt yêu cầu 2-4 cm.

Đúc mẫu, bảo dưỡng và gia công mẫu: Cho bê tông tươi vào các khuôn làm 2 lớp. Rung lớp thứ nhất đến khi xuất hiện bọt khí đều trên toàn bề mặt thì ngừng rung và tiếp tục thực hiện cho lớp tiếp theo. Cuối cùng mẫu được làm phẳng và hoàn thiện bề mặt. Mẫu được dưỡng ẩm 1 ngày sau đó tháo khuôn và ngâm nước trong 27 ngày. Mẫu đủ thời gian dưỡng hộ sẽ được cắt bằng máy chuyên dụng để có kích thước phù hợp với các thí nghiệm đã nêu trên.

## 2.4. Các phương pháp thí nghiệm

### a. Thí nghiệm cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo uốn

Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén ( $f_c$ ) và cường độ chịu kéo uốn ( $f_t$ ) thực hiện lần lượt theo các tiêu chuẩn ASTM C39/C39M-20 [19] và ASTM C293/C293M-16 [20]. Máy nén có khả năng nén lớn nhất 50 tấn sử dụng cho thí nghiệm cường độ chịu nén với tốc độ gia tải 3 (kN/s). Trong khi đó, thí nghiệm cường độ chịu kéo uốn (Hình 2(a)) được thực hiện trên máy nén 3 tấn, tốc độ gia tải 1,27 (mm/phút). Các mẫu được nén và uốn cho đến khi phá hoại hoàn toàn. Lưu ý quan sát hình ảnh phá hoại trên các mẫu chịu nén và kéo uốn.



(a) Cường độ kéo uốn



(b) Độ mài mòn



(c) Tính thấm nước

Hình 2. Thí nghiệm các tính chất cơ bản và tính thấm nước của BTXM mặt đường

### b. Thí nghiệm độ mài mòn

Thí nghiệm mài mòn được thực hiện theo tiêu chuẩn TCVN 3114:2022 [21] sử dụng máy mài Hình 2(b) thao tác trên các mẫu lập phương 7 cm × 7 cm × 7 cm ở trạng thái khô tự nhiên (Hình 2(b)).



Trình tự thí nghiệm: (i) Lấy và cân khối lượng khô tự nhiên 2 viên mẫu cho mỗi cấp phối, (ii) Đưa 2 mẫu vào 2 vị trí mài sao cho mặt trên của mẫu tiếp xúc đều vào mặt mài. (iii) Đặt gối tựa của đòn bẩy vào tâm mẫu và dùng quả cân gia tải mẫu cho đủ áp lực 0,06 MPa. (iv) Bật cho đĩa quay với tốc độ 30 (vòng/phút) cùng với trái đều 20 g cát tiêu chuẩn trên 30 m đường mài. Thực hiện 5 lần như vậy thì được 1 chu kỳ mài 150 m. Sau mỗi chu kỳ, tiến hành xoay mẫu đi 90° cùng chiều với lần trước. Sau khi thực hiện 4 chu kỳ, vệ sinh mẫu rồi cân khối lượng còn lại. Độ mài mòn  $M_m$  (g/cm<sup>2</sup>) xác định theo công thức (2).

$$M_m = \frac{m_0 - m_4}{F} \quad (2)$$

trong đó  $m_0$  là khối lượng mẫu trước khi thử (g);  $m_4$  là khối lượng mẫu còn lại sau 4 chu kỳ mài (g);  $F$  là diện tích mặt mẫu bị mài (cm<sup>2</sup>).

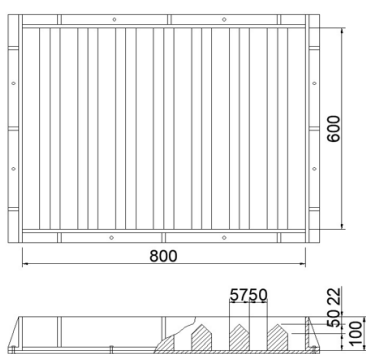
### c. Thí nghiệm thấm

Thí nghiệm thấm để đo lường tỷ lệ hấp thụ nước của BTXM áp dụng theo tiêu chuẩn ASTM C1585 [22]. Mẫu được cắt từ mẫu trụ 10 cm × 20 cm, có kích thước 10 cm × 5 cm. Mỗi cấp phối BTXM chuẩn bị 4 mẫu, 2 mẫu sấy ở nhiệt độ 100 °C, 2 mẫu sấy ở nhiệt độ 40 °C cho đến khi khối lượng không đổi. Dùng keo 2 thành phần TEENIAX phủ kín bề mặt xung quanh mẫu để đảm bảo nước chỉ thấm 1 chiều từ mặt đáy của mẫu. Sau khi keo khô đem cân khối lượng chính xác đến 0,01 g. Đặt mẫu thử nghiệm vào khay nước có rải đáy lớp đệm sỏi dày 1 cm, duy trì mực nước ngập cao một phần mẫu trên bề mặt của lớp sỏi 5 mm (Hình 2(c)). Sau những khoảng thời gian nhất định, lấy mẫu ra khỏi khay, lau nước ở mặt tiếp xúc ở đáy và xung quanh, cân mẫu. Thời gian đầu, mẫu thấm nước nhiều nên mật độ đo khối lượng mẫu dày hơn, càng về sau giảm dần. Lượng nước thấm vào mẫu tính theo công thức (3).

$$I = \frac{m_t}{a} \quad (3)$$

trong đó  $I$  là độ hấp thụ nước (kg/m<sup>2</sup>);  $m_t$  là sự thay đổi khối lượng mẫu tính tại thời điểm  $t$  (kg);  $a$  là diện tích tiếp xúc mẫu với nước (m<sup>2</sup>).

### d. Thí nghiệm kháng nứt do co ngót dẻo



(a) Kích thước khuôn xương



(b) Hình ảnh khuôn xương thực tế



(c) Tạo gió trên bề mặt mẫu sau khi đúc

Hình 3. Khuôn xương và thí nghiệm kháng nứt do co ngót dẻo

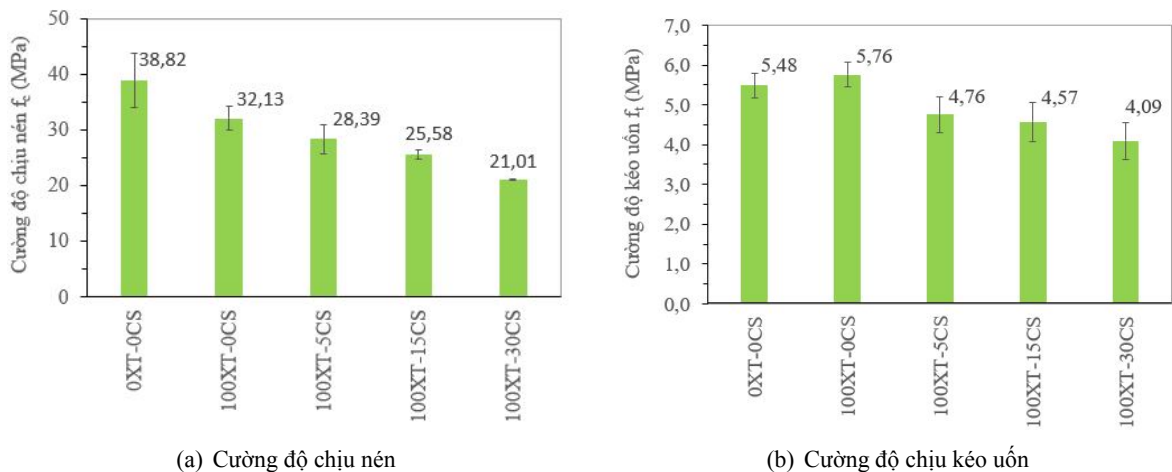
Khả năng kháng nứt do co ngót dẻo thí nghiệm theo tiêu chuẩn GB/T 50082:2009 [23] sử dụng khuôn xương có kích thước và hình ảnh như Hình 3(a, b). Mẫu được chế bị bằng phương pháp rung,

rung lớp thứ nhất đến khi nổi bọt khí trước khi tiếp tục cho bê tông vào rung lớp thứ 2. Sau đó mẫu được hoàn thiện bằng cách làm phẳng trước khi quạt liên tục 24h vào bề mặt mẫu thử với vận tốc gió không được nhỏ hơn 5 m/s (Hình 3(c)). Sau 24h, tiến hành quan trắc sự hình thành vết nứt, đánh dấu các vết nứt rồi đo chiều dài, chiều rộng và chiều sâu các vết nứt.

### 3. Kết quả thí nghiệm và bàn luận

#### 3.1. Cường độ chịu nén và cường độ kéo uốn

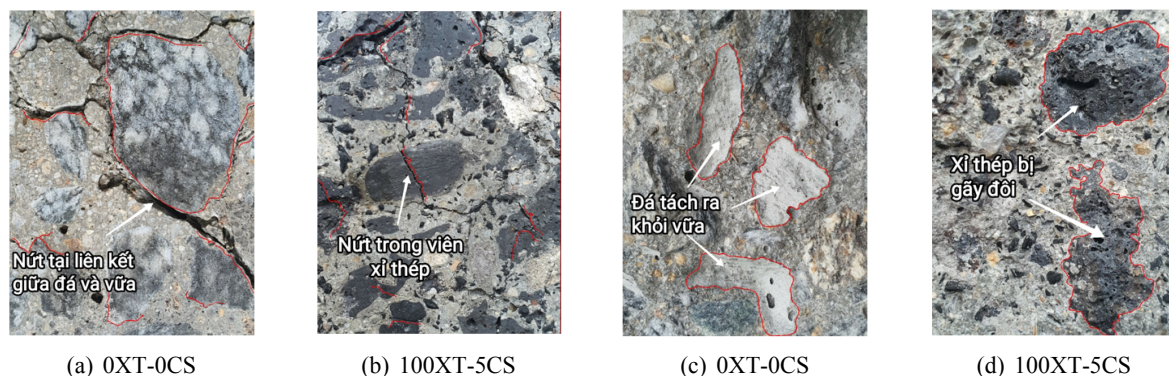
Hình 4(a) thể hiện sự suy giảm cường độ chịu nén khi sử dụng cốt liệu xi thép thay thế toàn bộ cho cốt liệu lớn và cao su thay thế một phần cốt liệu nhỏ trong BTXM mặt đường. Cường độ chịu nén lớn nhất giảm từ 38,82 MPa đối với cấp phối đối chứng (0XT-0CS) đến 32,13 MPa (100XT-0CS), 28,79 MPa (100XT-5CS), 25,58 MPa (100XT-15CS) và 21,01 MPa (100XT-30CS). Sự suy giảm cường độ chịu nén có thể do độ cứng của cốt liệu xi thép và cao su thấp hơn đá dăm và cát đồng thời do lực dính kém giữa cốt liệu cao su và hỗn hợp hồ xi măng. Ngoài ra, quan sát bề mặt mẫu phá hoại nén thì có thể thấy cốt liệu xi thép bị gãy vỡ (Hình 5(b)) trong khi mẫu đối chứng chỉ bị hư hỏng tại vùng chuyển tiếp cốt liệu (Hình 5(a)). Đối với BTXM sử dụng xi thép để thay thế cốt liệu lớn, cường độ chịu nén của BTXM xi thép tăng giảm tùy thuộc vào hàm lượng xi thép thay thế và kích cỡ cốt liệu [5]. Một số nghiên cứu có trước nhận thấy việc sử dụng hàm lượng xi thép EAF lớn hơn 50% làm giảm cường độ chịu nén [24, 25]. Đối với BTXM thông thường, việc sử dụng cao su để thay thế cốt liệu mịn hoặc cốt liệu lớn đã được chứng minh làm giảm cường độ chịu nén [26]. Do đó suy giảm cường độ chịu nén của BTXM sử dụng xi thép và cao su khá tương đồng với kết quả nghiên cứu có trước nếu xét riêng cho BTXM xi thép hoặc BTXM cao su.



Hình 4. Ảnh hưởng của xi thép và cao su đến cường độ BTXM mặt đường

Cường độ chịu kéo uốn của các cấp phối BTXM được thể hiện ở Hình 4(b). Cấp phối đối chứng 0XT-0CS có cường độ kéo uốn 5,48 MPa. So với 0XT-0CS, BTXM sử dụng 100% cốt liệu lớn xi thêm giúp tăng cường độ chịu kéo uốn đến 5,1%, các cấp phối khác 100XT-5CS, 100XT-15CS và 100XT-30CS có cường độ chịu kéo uốn giảm lần lượt là 13,1%, 16,6% và 25,4%. Sự tăng cường độ chịu kéo uốn của cấp phối khi thay thế 100% cốt liệu lớn bằng xi thép và không sử dụng cao su có thể do hình dạng góc cạnh và bề mặt kết cấu tổ ong nhiều lỗ rỗng có độ nhám cao tạo nên lực dính tốt

giữa xi thép và hồ xi măng. Wang và cs. [27] báo cáo cấu trúc xốp và bề mặt nhám của cốt liệu xi thép có thể cho phép hồ xi măng thâm nhập vào bên trong xi thép, tạo ra sự đặc chắc giữa vùng chuyển tiếp cốt liệu xi thép-vữa xi măng. Sự suy giảm cường độ chịu kéo uốn khi sử dụng cốt liệu cao su và khi tăng hàm lượng cốt liệu cao su là do lực dính kém giữa cốt liệu cao su với vùng vữa xi măng xung quanh [6].



Hình 5. Hình ảnh phá hoại trên bề mặt chịu nén (a, b) và ở mặt phá hoại uốn (c, d)

Sự cải thiện cường độ chịu kéo uốn khi sử dụng 100% cốt liệu xi thép (không dùng cốt liệu cao su) có thể được giải thích thêm dựa trên quan trắc hư hỏng trên bề mặt mẫu sau khi phá hoại thể hiện ở Hình 5(c, d). Ở mẫu đối chứng (Hình 5(a)), vữa và đá tách nhau ở vị trí vùng chuyển tiếp cốt liệu đá và hồ xi măng. Đối với mẫu sử dụng 100% xi thép thay thế cốt liệu lớn thì các viên xi bị gãy ngang (Hình 5(b)). Điều đó có thể giải thích do tính chất bề mặt gồ ghề nhiều lỗ rỗng giúp lực dính xi thép bên trong bê tông tăng lên nên dẫn đến cường độ chịu kéo khi uốn lớn hơn.

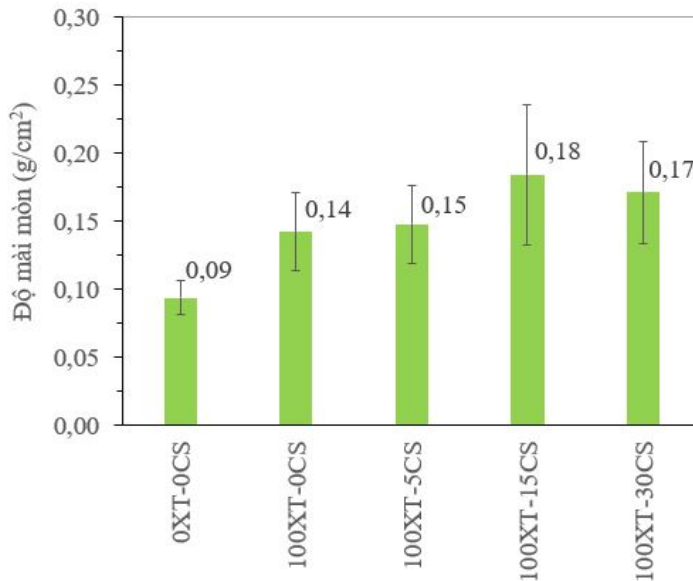
Khi thiết kế mặt đường bê tông xi măng theo TCCS 39-2022 [18], tiêu chuẩn chỉ yêu cầu về cường độ chịu kéo uốn, không quy định cường độ chịu nén. Do vậy, việc suy giảm cường độ chịu nén của BTXM khi sử dụng cốt liệu xi thép và cao su không làm ảnh hưởng đến cường độ mặt đường. Thậm chí việc suy giảm cường độ chịu nén này có thể giúp làm giảm độ cứng mặt đường, giảm tính giòn và tạo êm thuận cho xe chạy. Cường độ chịu kéo uốn ở 28 ngày tuổi của 0XT-0CS và 100XT-0CS lớn hơn 5 MPa thỏa mãn cường độ yêu cầu cho BTXM tầng mặt của đường cao tốc, đường cấp I, II và các đường có cấp quy mô giao thông nặng, rất nặng, cực nặng. Cường độ uốn ở 28 ngày tuổi của 100XT-5CS và 100XT-15CS lớn hơn 4,5 MPa thỏa mãn cường độ yêu cầu cho BTXM đối với đường cấp khác, các đường có quy mô giao thông cấp trung bình và cấp nhẹ nhưng có có xe nặng với trục đơn > 100 kN thông qua. Cấp phối 100XT-30CS có cường độ lớn hơn 4 MPa phù hợp với đường khác có quy mô giao thông cấp nhẹ không có xe nặng với trục đơn > 100 kN thông qua. Do vậy, các cấp phối đề xuất có sử dụng cốt liệu xi thép và cốt liệu cao su đảm bảo cường độ chịu kéo khi uốn yêu cầu của bê tông xi măng mặt đường.

### 3.2. Độ mài mòn

Độ mài mòn ở 28 ngày tuổi của các cấp phối BTXM được thể hiện ở Hình 6. Cấp phối đối chứng (0XT-0CS) bị mài mòn ít nhất 0,09 (g/cm<sup>2</sup>). Độ mài mòn với các cấp BTXM khác lần lượt là 0,14 (g/cm<sup>2</sup>) (100XT-0CS), 0,15 (g/cm<sup>2</sup>) (100XT-5CS), 0,18 (g/cm<sup>2</sup>) (100XT-15CS) và 0,17 (g/cm<sup>2</sup>) (100XT-30CS). Việc sử dụng cốt liệu xi thép và cao su ảnh hưởng không đáng kể đến khả năng kháng mài mòn của BTXM xi thép cao su so với BTXM đối chứng. Các nghiên cứu có trước đa số khẳng



định khả năng kháng hao mòn tốt của BTXM xi thép do độ cứng lớn và độ hao mòn thấp của xi thép [28, 29]. Ở đây, sự tăng nhẹ độ mài mòn có thể do xi thép có thành phần không đều, có hàm lượng CaO cao, độ hao mòn khi va đập LA của xi thép lớn 33,11% so với 19,81% của đá dăm. Khi sử dụng cốt liệu cao su, cấp phối BTXT cao su có độ hao mòn cao hơn do lực liên kết kém giữa cao su và vữa xi măng. Kết quả này cũng đã khẳng định ở một số số nghiên cứu có trước trên BTXM thông thường có sử dụng cốt liệu cao su [30].



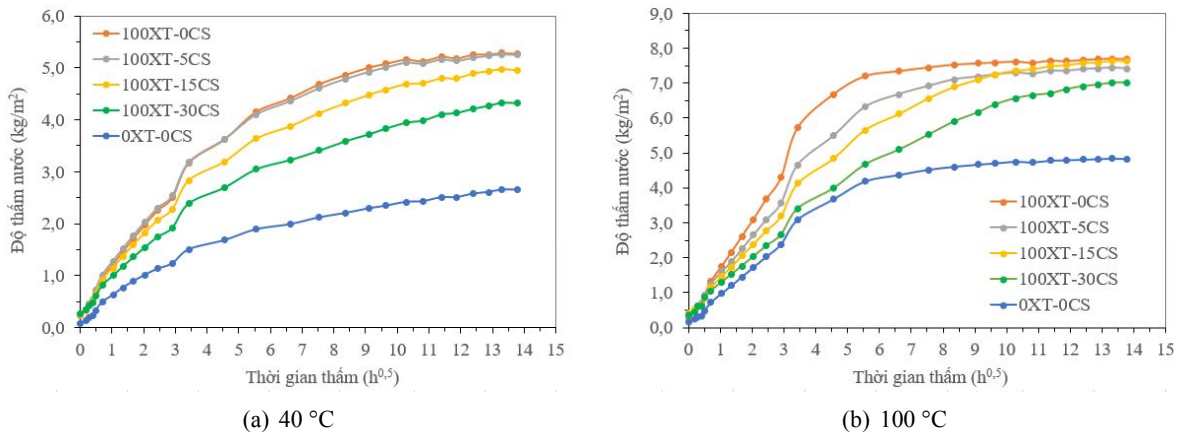
Hình 6. Sự gia tăng mài mòn khi sử dụng cốt liệu xi thép và cao su

Từ kết quả thí nghiệm độ mài mòn và đối sánh với yêu cầu về độ mài mòn theo tiêu chuẩn TCCS 40:2022/TCĐBVN [31] thì có thể thấy tất cả các cấp phối BTXM đề xuất đều đáp ứng yêu cầu độ mài mòn đối với tất cả các cấp đường. Lưu ý là mặt đường BTXM đường cao tốc, đường cấp I, II, III yêu cầu độ mài mòn nhỏ hơn 0,3 (g/cm²) trong khi các cấp đường khác yêu cầu độ mài mòn nhỏ hơn 0,6 (g/cm²).

### 3.3. Tính thấm nước

Sự hấp thụ nước khác nhau của các cấp phối BTXM khác nhau được thể hiện rõ ở Hình 7. Khi sấy các loại BTXM ở 40 °C và 100 °C thì BTXM xi thép hấp thụ nước nhiều nhất. Việc thay thế cát bằng 5%, 15% và 30% cốt liệu cao su giúp giảm khả năng thấm nước mặt đường BTXM xi thép. Sau 7 ngày cho các mẫu sấy ở 40 °C tiếp xúc với nước, lượng hấp phụ nước trong cấp phối đối chứng, các cấp phối thay thế cốt liệu lớn tự nhiên bằng 100% xi thép kết hợp với sử dụng cao su 0%, 5%, 15% và 30% lần lượt xấp xỉ 2,58 (kg/m²), 5,25 (kg/m²), 5,19 (kg/m²), 4,89 (kg/m²), 4,22 (kg/m²). Sự gia tăng tính thấm của BTXM xi thép so với BTXM đối chứng có thể do (i) xi thép hấp thụ nước lớn, (ii) xi thép rỗng, (iii) cấu tạo của bề mặt xi thép có nhiều lỗ xốp hở dẫn đến độ rỗng dư lớn. Việc giảm tính thấm khi sử dụng cốt liệu cao su có thể được giải thích do cao su không thấm nước và tính kỵ nước của cốt liệu cao su [32].

Khi sấy mẫu ở nhiệt độ 100 °C, lượng hấp thụ nước của các cấp phối BTXM lớn hơn nhiều so với các mẫu BTXM khi được sấy khô ở 40 °C. Tại thời điểm 7 ngày sau khi cho các mẫu thấm ướt, sự khác nhau về mức độ thấm giữa 40 °C và 100 °C cho các cấp phối đối chứng, 100XT-0CS, 100XT-5CS,



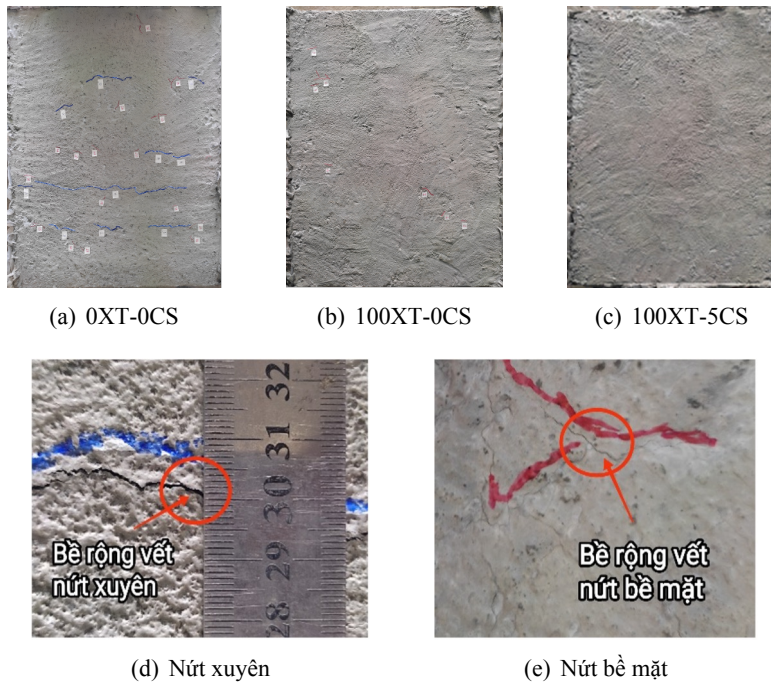
Hình 7. So sánh hấp thụ nước của các loại BTXM sau khi sấy ở nhiệt độ khác nhau

100XT-15CS, 100XT-30CS lần lượt xấp xỉ  $2,23 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ ,  $2,41 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ ,  $2,20 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ ,  $2,69 \text{ (kg/m}^2\text{)}$  và  $2,69 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ . Khi sấy ở  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , nước trong lỗ rỗng của BTXM được bay hơi hoàn toàn, hình thành nhiều khoảng trống dẫn đến khi tiếp xúc với nước thì thể tích dành cho nước thấm vào lớn hơn. Mẫu 100XT-30CS thấm ướt lớn khi sấy ở  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  và có xu hướng gần bằng BTXM 100XT-15CS có thể là do sự giãn nở của cốt liệu cao su khi được sử dụng với hàm lượng lớn, dẫn đến có thể hình thành các vi vết nứt bên trong mẫu BTXM xi thép cao su.

### 3.4. Khả năng kháng nứt do co ngót dẻo

Khả năng kháng nứt do co ngót dẻo của các cấp phối BTXM được thể hiện qua số vết nứt, chiều dài vết nứt lớn nhất, tổng chiều dài vết nứt, chiều sâu vết nứt, bề rộng vết nứt và tính chất của vết nứt. Sau khi các mẫu BTXM được phơi gió 24h, các vết nứt hình thành khá nhiều và rõ ràng trên mẫu đối chứng 0XT-0CS (Hình 8(a)). Khi sử dụng 100% xi thép để thay thế cốt liệu lớn, vấn đề nứt giảm đáng kể (Hình 8(b)), đặc biệt mẫu BTXM hoàn toàn không bị nứt khi sử dụng cốt liệu 5% cốt liệu cao su (Hình 8(c)). Các cấp phối có hàm lượng cao su cao hơn cũng có quan sát tương tự. Hình 8(c, d) chỉ ra sự khác nhau về bề rộng vết nứt đối với các vết nứt mặt và vết nứt xuyên. Chi tiết nứt do co ngót dẻo được phân tích và tổng hợp ở Bảng 3.

Bảng 3 định lượng khả năng kháng nứt do co ngót dẻo của BTXM được thể hiện rõ ràng khi lần lượt thay hoàn toàn cốt liệu lớn bằng xi thép và khi thay cốt liệu nhỏ bằng 5% cao su thì hoàn toàn chống lại nứt do co ngót dẻo. BTXM đối chứng nhiều vết nứt nhất (lên đến 26 vết nứt), nhiều vết nứt phát triển đến hết chiều dày mẫu thí nghiệm (nứt xuyên) (10 vết nứt), chiều dài và tổng chiều dài vết nứt lần lượt là 430 mm và 1122 mm, chiều rộng vết nứt lớn 1mm. Trong khi đó, mọi thông số đối với BTXM xi thép ít hơn, chỉ có nứt mặt với số lượng chỉ có 7 vết nứt. Số vết nứt, chiều dài vết nứt lớn nhất và tổng chiều dài vết nứt đối với cấp phối này (100XT-0CS) cũng giảm lần lượt gần 4, 10 và 6 lần so với BTXM đối chứng (0XT-0CS). Khả năng kháng nứt do co ngót dẻo của BTXM xi thép có thể được giải thích do cường độ chịu kéo khi uốn cao của BTXT. Cốt liệu cao su bên trong bê tông đóng vai trò như các khe co giãn hỗ trợ quá trình kháng co ngót của BTXM xi thép cao su. Do đó khả năng kháng nứt do co ngót của BTXM xi thép cao su tốt nhất.



Hình 8. Quan trắc nứt do co ngót dẻo trên bề mặt các cấp phối BTXM mặt đường

Bảng 3. Tổng hợp các thông tin nứt do co ngót dẻo của BTXM mặt đường

Cấp phối	0XT-0CS	100XT-0CS	100XT-5CS
Số vết nứt	26	7	0
Chiều sâu vết nứt sâu nhất (mm)	35	0,7	0
Chiều dài vết nứt lớn nhất (mm)	430	45	0
Tổng chiều dài vết nứt (mm)	1122	180	0
Bề rộng vết nứt lớn nhất (mm)	1	0,7	0
Tính chất vết nứt/ số vết nứt	Nứt xuyên 10	Nứt bề mặt 16	Nứt bề mặt 7 0

#### 4. Kết luận

Bài báo trình bày kết quả thí nghiệm khảo sát một số tính chất của BTXM mặt đường Dmax25, trong đó sử dụng xi thép thay thế 100% cốt liệu thô và một phần cát được thay thế bằng cốt liệu cao su cỡ hạt 1-3 mm theo thể tích (0%, 5%, 15% và 30%). Trên cơ sở thí nghiệm cường độ chịu nén, cường độ kéo uốn, độ mài mòn, thấm nước và khả năng kháng nứt do co ngót dẻo, một số kết luận được tổng hợp như sau:

- Cường độ chịu nén BTXM giảm khi sử dụng cốt liệu xi thép và cao su. Tuy nhiên, việc suy giảm cường độ này không ảnh hưởng đến yêu cầu cường độ của BTXM mặt đường vì BTXM chỉ yêu cầu cường độ chịu kéo uốn và độ mài mòn.

- Cường độ chịu kéo uốn của BTXM xi thép cao hơn cường độ của cấp phối đối chứng do tính dính bám tốt giữa xi thép và hồ xi măng. Cốt liệu cao su làm giảm cường độ chịu kéo uốn của BTXM

xi thép. Tuy nhiên, các cấp phối BTXM đề xuất sử dụng 5-15% cao su thỏa mãn yêu cầu cường độ của mặt đường BTXM thiết kế chịu được xe có tải trọng trục nặng > 100 kN thông qua.

- Việc sử dụng cốt liệu xi thép và cao su ảnh hưởng không đáng kể đến độ mài mòn của BTXM mặt đường. Các cấp phối BTXM đề xuất đều đạt yêu cầu về độ mài mòn cho mặt đường BTXM ( $< 0,3 \text{ g/cm}^2$ ).

- Việc sử dụng cốt liệu xi thép thay thế hoàn toàn cốt liệu lớn ở mặt đường BTXM dẫn đến hiện tượng thấm lớn. Tuy nhiên, vấn đề này có thể phần nào hạn chế nếu kết hợp sử dụng cốt liệu cao su thay thế một phần cát trong BTXM xi thép.

- Khả năng kháng nứt do co ngót dẻo của mặt đường BTXM được cải thiện rất lớn khi được thay thế cốt liệu bằng xi thép và cao su. Đối với BTXM xi thép sử dụng cốt liệu cao su không thấy sự hình thành bất kỳ vết nứt nào, điều này cho thấy tiềm năng của việc sử dụng cốt liệu xi thép và cao su để hạn chế hiệu quả hiện tượng nứt do co ngót ở mặt đường BTXM.

Việc sử dụng phế thải xi thép từ nhà máy sản xuất thép và cốt liệu cao su nghiền từ lốp xe cũ đã có những ảnh hưởng đáng kể đến tính chất của BTXM. Mặc dù tính thấm nước có tăng khi sử dụng cốt liệu xi thép, tuy nhiên khả năng hạn chế nứt do co ngót dẻo tốt và duy trì được cường độ chịu kéo uốn và khả năng kháng mài mòn giúp cải thiện được tính chất của BTXM mặt đường. Hơn nữa, việc sử dụng các phế thải này góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn, hướng đến phát triển xanh và bền vững.

## Lời cảm ơn

Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa-ĐHĐN với đề tài có mã số: T2022-02-49.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Ziari, H., Fazaeli, H., Olyaei, S. J. V. K., Ziari, M. A. (2021). [Evaluation of Effects of Temperature, Relative Humidity, and Wind Speed on Practical Characteristics of Plastic Shrinkage Cracking Distress in Concrete Pavement Using a Digital Monitoring Approach](#). *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(1):138–158.
- [2] Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghobadipour, B., Adresi, M. (2019). [Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete](#). *Construction and Building Materials*, 211:88–98.
- [3] Turatsinze, A., Garros, M. (2008). [On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates](#). *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10):1209–1215.
- [4] Pham, P. N., Zhuge, Y., Turatsinze, A., Toumi, A., Siddique, R. (2019). [Application of rubberized cement-based composites in pavements: Suitability and considerations](#). *Construction and Building Materials*, 223: 1182–1195.
- [5] Alghazo, S., Salem, M. N. A., Alrashdan, I. (2021). [Stance and engagement in English and Arabic research article abstracts](#). *System*, 103:102681.
- [6] Pham, N.-P., Toumi, A., Turatsinze, A. (2018). [Rubber aggregate-cement matrix bond enhancement: Microstructural analysis, effect on transfer properties and on mechanical behaviours of the composite](#). *Cement and Concrete Composites*, 94:1–12.
- [7] Turatsinze, A., Measson, M., Faure, J.-P. (2016). [Rubberised concrete: from laboratory findings to field experiment validation](#). *International Journal of Pavement Engineering*, 19(10):883–892.
- [8] Barišić, I., Dimter, S., Rukavina, T. (2014). [Strength properties of steel slag stabilized mixes](#). *Composites Part B: Engineering*, 58:386–391.
- [9] Liu, J., Yu, B., Wang, Q. (2020). [Application of steel slag in cement treated aggregate base course](#). *Journal of Cleaner Production*, 269:121733.



- [10] Hằng, N. T. T., Hà, M. H., Tiếng, T. V. (2019). [Nghiên cứu sử dụng xỉ thép-cát mịn gia cố xi măng làm lớp móng đường ô tô](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 13(5V):93–101.
- [11] El-Hakim, R. T. A., Elgendy, G. M., El-Badawy, S. M., Amin, M. (2021). [Performance evaluation of steel slag high performance concrete for sustainable pavements](#). *International Journal of Pavement Engineering*, 23(11):3819–3837.
- [12] Liu, J., Xu, J., Liu, Q., Wang, S., Yu, B. (2022). [Steel Slag for Roadway Construction: A Review of Material Characteristics and Application Mechanisms](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6).
- [13] Phường, P. N., Trung, L. M., Hoàng, H. H., Thảo, T. T. T., Cường, N. T., Châu, L. Đ. (2021). [Ảnh hưởng của cốt liệu cao su đến tính chất cơ lý của cấp phối đá dăm-cao su gia cố xi măng](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(7V):68–78.
- [14] ASTM C33/C33M-18 (2010). [Specification for Concrete Aggregates](#).
- [15] TCVN 7570:2006 (2006). [Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật](#).
- [16] TCVN 6016:2011 (2011). [Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ](#).
- [17] TCVN 6260:2009 (2009). [Xi măng hỗn hợp - yêu cầu kỹ thuật](#).
- [18] TCCS 39:2022/TCĐBVN (2022). [Thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông](#).
- [19] ASTM C39/C39M-20 (2003). [Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens](#). ASTM Stand. B.
- [20] ASTM C293/C293M-16 (2015). [Test Method for Flexural Strength of Concrete \(Using Simple Beam With Center-Point Loading\)](#). ASTM Int.
- [21] TCVN 3114:2022 (2022). [Bê tông - Phương pháp xác định độ mài mòn](#).
- [22] C1585-11 (2013). [Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes](#). ASTM Int. 41.
- [23] GB/T 50082 (2009). [Test Methods of Long-term Performance and Durability of Ordinary Concrete](#). Chinese Stand.
- [24] Lam, M. N.-T., Le, D.-H., Jaritngam, S. (2018). [Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash](#). *Construction and Building Materials*, 191:912–922.
- [25] Choi, Y. S., Lee, S. M. (2021). [Fundamental properties and radioactivity shielding performance of concrete recycled cathode ray tube waste glasses and electric arc furnace slag as aggregates](#). *Progress in Nuclear Energy*, 133:103649.
- [26] Roychand, R., Gravina, R. J., Zhuge, Y., Ma, X., Youssf, O., Mills, J. E. (2020). [A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete](#). *Construction and Building Materials*, 237: 117651.
- [27] Dong, Q., Wang, G., Chen, X., Tan, J., Gu, X. (2021). [Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: An overview](#). *Journal of Cleaner Production*, 282:124447.
- [28] Wang, S., Zhang, G., Wang, B., Wu, M. (2020). [Mechanical strengths and durability properties of pervious concretes with blended steel slag and natural aggregate](#). *Journal of Cleaner Production*, 271:122590.
- [29] Papachristoforou, M., Anastasiou, E. K., Papayianni, I. (2020). [Durability of steel fiber reinforced concrete with coarse steel slag aggregates including performance at elevated temperatures](#). *Construction and Building Materials*, 262:120569.
- [30] Zhai, S., Liu, G., Pang, B., Liu, C., Zhang, Z., Zhang, L., Liu, L., Yang, Y., Liu, Z., Zhang, Y. (2022). [Investigation on the influence of modified waste rubber powder on the abrasion resistance of concrete](#). *Construction and Building Materials*, 357:129409.
- [31] TCCS 40:2022/TCĐBVN (2022). [Thi công và nghiệm thi mặt đường bê tông xi măng trong xây dựng công trình giao thông](#).
- [32] Pham, N. P., Touni, A., Turatsinze, A. (2017). [Effect of Styrene-Butadiene Copolymer Coating on Properties of Rubberized Cement-Based Composites](#). *Strain-Hardening Cement-Based Composites*, Springer Netherlands, 342–350.