

# KHẢ NĂNG CHỊU TẢI TRỌNG VÀ ĐẬP CỦA BÊ TÔNG CỐT LIỆU MỊN SỬ DỤNG HẠT CAO SU TÁI CHẾ TỪ LỐP XE THẢI

Trịnh Thị Hiền<sup>a</sup>, Ngô Sĩ Huy<sup>a</sup>, Phạm Thái Hoàn<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Khoa Kỹ thuật, Công nghệ và Truyền Thông, Trường Đại học Hồng Đức, số 565 Quang Trung, Phường Hạc Thành, Tỉnh Thanh Hóa, Việt Nam

<sup>b</sup>Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 07/12/2025, Sửa xong 24/4/2026, Chấp nhận đăng 04/5/2026

## Tóm tắt

Để tái sử dụng các lốp xe thải và phát triển một loại vật liệu mới có khả năng chịu tải trọng và đập, nghiên cứu này sử dụng các hạt cao su tái chế từ lốp xe thải để thay thế một phần cát tự nhiên trong sản xuất bê tông cốt liệu mịn. Năm hỗn hợp bê tông được thiết kế với tỷ lệ nước/chất kết dính bằng 0,35 và thay thế 0%, 5%, 15%, 25% và 35% cát tự nhiên bởi hạt cao su theo thể tích. Khả năng chịu lực cũng như khả năng chịu tải trọng và đập của bê tông được nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, cường độ chịu nén và cường độ chịu uốn của bê tông giảm, trong khi khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông tăng khi tăng hàm lượng cao su tái chế. Khả năng chịu tải trọng và đập rơi tự do và tải trọng và đập uốn của bê tông được cải thiện khi sử dụng các hạt cao su tái chế, và các khả năng này đạt giá trị lớn nhất ứng với hàm lượng cao su sử dụng là 15%. Với hàm lượng này, khả năng hấp thụ năng lượng và đập rơi tự do và năng lượng và đập uốn của bê tông cao su cao hơn tương ứng 6,1 và 1,86 lần so với mẫu đối chứng. Hơn nữa, nghiên cứu còn chỉ ra rằng, khả năng chịu tải trọng và đập của bê tông cao su là sự tương tác qua lại giữa khả năng chịu lực và khả năng hấp thụ năng lượng.

*Từ khoá:* khả năng chịu tải trọng và đập; bê tông cốt liệu mịn; cao su tái chế; lốp xe thải; khả năng chịu tải trọng và đập rơi tự do; khả năng chịu tải trọng và đập uốn.

## IMPACT RESISTANCE OF THE FINE AGGREGATE CONCRETE INCORPORATING RECYCLED RUBBER PARTICLES FROM SCRAP TIRES

### Abstract

To recycle scrap tires and develop a new material that can sustain impact loading, this study investigated the use of recycled rubber particles to partially replace natural sand in producing fine aggregate concrete. Five mixtures were designed with a constant water-to-binder ratio of 0.35 and substituted natural sand with recycled rubber at replacement levels of 0%, 5%, 15%, 25%, and 35% by volume. The load-bearing capacity and the impact resistance of concrete were investigated. Test results indicated that both the compressive strength and flexural strength of concrete decreased, while the energy absorption capacity increased with an increasing recycled rubber replacement level. Both the impact resistance of concrete under the drop weight test and flexural loading were enhanced with the presence of recycled rubber, and these capacities were maximum at the same recycled rubber replacement level of 15%. At this level, the drop-weight impact energy and flexural impact energy are approximately 6.1 and 1.86 times higher than those of the control specimen, respectively. Furthermore, the impact resistance of concrete was a result of the interaction between strength capacity and energy absorption capacity.

*Keywords:* impact resistance; fine aggregate concrete; recycled rubber; scrap tire; impact resistance under drop weight test; impact resistance under flexural loading.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(2V\)-10](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(2V)-10) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Mở đầu

Hiện nay tình trạng phát thải các chất thải rắn sinh hoạt đang ngày càng gia tăng, đặc biệt tại các thành phố lớn, gây nên nhiều mối quan ngại về môi trường và sức khỏe cộng đồng. Theo ước tính của Ngân hàng thế giới, lượng chất thải rắn tại các thành phố lớn trên toàn cầu đạt khoảng 2 tỷ tấn năm 2016, và dự kiến tăng lên 3,4 tỷ tấn năm 2030 [1]. Trong số các chất thải rắn sinh hoạt, tốc độ tăng trưởng của lốp xe thải có xu hướng tăng nhanh do tốc độ công nghiệp hóa và đô thị hóa diễn ra mạnh. Theo ước tính của Martínez, và cs. [2], trung bình mỗi cư dân ở các đô thị thải ra 01 chiếc lốp mỗi

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [hoanpt@huce.edu.vn](mailto:hoanpt@huce.edu.vn) (Hoàn, P. T.)

năm, thì tương ứng sẽ có khoảng 1 tỷ chiếc lốp xe được thải ra hàng năm trên toàn cầu, con số này cũng tương đồng với nghiên cứu của Colom, và cs. [3]. Với tốc độ tăng trưởng dân số và kinh tế như hiện nay, dự báo lượng lốp xe thải trên toàn cầu đạt khoảng 1,2 tỷ chiếc vào năm 2030, và tổng số lốp xe thải tồn đọng tại các bãi chứa khoảng 5 tỷ chiếc [4]. Tại Châu Âu, khoảng 5,5 triệu tấn lốp xe được thải ra hàng năm, và chi phí cho việc xử lý và quản lý chúng khoảng 600 triệu Euros [5]. Tại Mỹ, mỗi năm có khoảng 290 triệu chiếc lốp xe được sản xuất ra, đồng thời khoảng 275 triệu chiếc được loại biên [6]. Ở khu vực châu Đại Dương, Australia là nước có lượng lốp xe thải hàng năm nhiều nhất với khoảng 20 triệu chiếc [7]. Tại khu vực châu Á, Trung Quốc với dân số đông nhất thế giới, mỗi năm thải ra khoảng 330 triệu chiếc [8]. Việt Nam hiện là quốc gia đông dân thứ 3 Đông Nam Á và thứ 15 thế giới, theo thống kê sản lượng tiêu thụ xe ô tô lần lượt năm 2022 và 2023 khoảng 334.000 và 370.000 chiếc, lượng lốp xe tương ứng khoảng 2 triệu chiếc/năm. Ước tính khối lượng lốp xe thải ra mỗi năm khoảng 500.000 tấn. Hiện nay, ngoại trừ một số quốc gia phát triển có tỷ lệ tái chế lốp xe thải cao, còn lại đa phần chúng được lưu giữ hoặc chôn lấp tại các bãi rác [9], là nơi trú ngụ và phát triển của nhiều sinh vật gây hại như chuột, gián, muỗi... Với lượng lốp xe thải ngày càng gia tăng ở tất cả các khu vực trên thế giới, việc nghiên cứu các giải pháp để tái sử dụng chúng là một vấn đề cấp thiết được rất nhiều nhà nghiên cứu cũng như chính phủ các nước trên thế giới quan tâm.

Một trong những giải pháp tái sử dụng lốp xe thải là nghiền chúng thành các hạt cốt liệu để thay thế một phần cát hoặc đá trong sản xuất bê tông. Các nghiên cứu trước đã sử dụng các hạt cao su tái chế trong sản xuất bê tông thường [10, 11], bê tông cường độ cao [12, 13], bê tông tự lèn [14, 15], bê tông nhẹ [16], gạch bê tông [17]. Đa phần các kết quả nghiên cứu đều cho rằng, mặc dù cường độ chịu nén, chịu uốn và chịu cắt của bê tông giảm, tuy nhiên lợi ích lớn nhất khi sử dụng các hạt cao su tái chế là tăng khả năng chịu tải trọng động và tải trọng nổ cho bê tông [9]. Một số nghiên cứu tiêu biểu như, Gupta, và cs. [13] đã nghiên cứu sử dụng các sợi cao su tái chế để thay thế 0%, 5%, 10%, 15%, 20% và 25% cát theo thể tích. Kết quả nghiên cứu cho thấy, cường độ chịu nén của các mẫu bê tông giảm khi tăng hàm lượng cao su tái chế, cụ thể cường độ chịu nén giảm từ khoảng 59-75 MPa xuống còn khoảng 15-19 MPa khi tăng hàm lượng cao su từ 0% lên 25%. Tuy nhiên, khả năng hấp thụ năng lượng và chịu tải trọng động của bê tông tăng đáng kể khi tăng hàm lượng cao su. Đặc biệt sự có mặt của silica fume (SF) giúp bê tông giữ được cường độ để có thể sử dụng trong các kết cấu chịu lực. AbdeAleem, và cs. [15] đã nghiên cứu sử dụng các hạt cao su tái chế để thay thế 0-30% cát theo thể tích trong thành phần bê tông tự lèn. Kết quả thí nghiệm có xu hướng tương tự như kết quả nghiên cứu của Gupta, và cs. [13], cường độ chịu nén, chịu uốn và chịu cắt của bê tông giảm, tuy nhiên khả năng chịu tải trọng động của bê tông tăng khi tăng hàm lượng cao su. Khả năng chịu tải trọng va đập của bê tông sử dụng hạt cao su tái chế chủ yếu bắt nguồn từ cơ chế hấp thụ và tiêu tán năng lượng của các hạt cao su trong ma trận xi măng. Do có khả năng biến dạng lớn và đặc tính đàn hồi, các hạt cao su có thể hấp thụ năng lượng va đập thông qua quá trình biến dạng, từ đó làm giảm ứng suất truyền vào ma trận xi măng [9, 13]. Với mô đun đàn hồi thấp, hạt cao su còn giúp phân tán và làm suy giảm sóng ứng suất trong vật liệu, qua đó làm chậm quá trình hình thành và phát triển vết nứt [15]. Bên cạnh đó, vùng chuyển tiếp yếu giữa cao su và hồ xi măng thúc đẩy sự hình thành các vi khe nứt phân bố đều, góp phần nâng cao khả năng tiêu tán năng lượng và cải thiện tính dẻo của bê tông [9].

Khả năng chịu tải trọng động của bê tông thường tăng lên khi sử dụng các hạt cao su tái chế, tuy nhiên khả năng này và hàm lượng cao su không phải lúc nào cũng có mối quan hệ tuyến tính. Khalil, và cs. [18] đã nghiên cứu sử dụng hạt cao su tái chế thay thế 0%, 10%, 20%, 30% và 40% cát theo thể tích trong bê tông tự lèn. Kết quả thí nghiệm cho thấy, khả năng chịu tải trọng động của bê tông được cải thiện khi sử dụng hạt cao su tái chế, tuy nhiên khả năng này tốt nhất khi hàm lượng thay thế là 30%. Có nghĩa là khả năng chịu tải trọng động của bê tông đạt cao nhất với hàm lượng cao su phù

hợp, trong nghiên cứu này hàm lượng thay thế cát 30% được cho là hàm lượng tối ưu. Một nghiên cứu khác của Sallam, và cs. [19] cũng chỉ ra rằng, trong khoảng thay thế từ 0-30% cát bởi hạt cao su tái chế, hàm lượng cao su để bê tông có khả năng chịu tải trọng động cao nhất là 10% đối với các mẫu không sử dụng SF và 20% đối với các mẫu có sử dụng SF. Chú ý rằng, trong các nghiên cứu trên chủ yếu là bê tông nặng có cả cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn, vì vậy hàm lượng cao su sử dụng để thay thế mình cát là tương đối nhỏ so với thể tích tuyệt đối của bê tông. Cụ thể hàm lượng cao su sử dụng thay thế cát và thể tích cao su thực tế trong 1 m<sup>3</sup> bê tông được thống kê như Bảng 1. Có thể thấy, trong các nghiên cứu trước mức độ sử dụng hạt cao su tái chế nhỏ hơn 0,112 m<sup>3</sup> trong 1 m<sup>3</sup> bê tông và hàm lượng thay thế cát cũng như thể tích cao su ứng với khả năng chịu tải trọng động cao nhất của bê tông khác nhau qua từng nghiên cứu. Do vậy, nghiên cứu sử dụng các hạt cao su tái chế thay thế cát với các hàm lượng lớn hơn cũng cần được xem xét. Bên cạnh các nghiên cứu quốc tế, một số nghiên cứu trong nước cũng đã khảo sát việc sử dụng hạt cao su tái chế trong vật liệu gia cố nền và bê tông mặt đường xi măng [20, 21]. Các kết quả cho thấy việc bổ sung cao su giúp cải thiện đáng kể độ dẻo, khả năng hấp thụ năng lượng và kháng nứt của vật liệu, thông qua việc giảm tập trung ứng suất và làm chậm quá trình lan truyền vết nứt. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào các tính chất cơ học và ứng xử dưới tải trọng tĩnh hoặc tải trọng lặp, chưa đánh giá trực tiếp khả năng chịu tải trọng va đập, đặc biệt là va đập rơi tự do và va đập uốn.

Bảng 1. Thống kê hàm lượng cao su sử dụng và hàm lượng cao su ứng với khả năng chịu tải trọng động cao nhất của bê tông

TT	Tài liệu tham khảo	Hàm lượng cao su sử dụng		Hàm lượng cao su ứng với khả năng chịu tải trọng động cao nhất	
		Thay thế cát (%)	Thể tích ứng với hàm lượng cao su nhất trong 1 m <sup>3</sup> bê tông (m <sup>3</sup> )	Thay thế cát (%)	Theo thể tích thực tế trong 1 m <sup>3</sup> bê tông (m <sup>3</sup> )
1	Gupta, và cs. [13]	0, 5, 10, 15, 20 và 25	0,075	25	0,075
2	AbdeAleem, và cs. [15]	0, 5, 10, 15, 20, 25 và 30	0,102	30	0,102
3	Khalil, và cs. [18]	0, 10, 20, 30 và 40	0,112	30	0,084
4	Sallam, và cs. [19] mẫu không có SF	0, 10, 20 và 30	0,070	10	0,023
	Sallam, và cs. [19] mẫu có SF	0, 10, 20 và 30	0,077	20	0,051

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về bê tông và vữa sử dụng hạt cao su, tuy nhiên các nghiên cứu về vữa cao su chủ yếu tập trung vào các tính chất cơ học cơ bản và độ bền lâu, trong khi dữ liệu về khả năng chịu tải trọng va đập còn hạn chế. Đối với bê tông cao su, phần lớn sử dụng cả cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ nên thể tích cao su thực tế trong bê tông còn thấp, thường nhỏ hơn 0,112 m<sup>3</sup> trong 1 m<sup>3</sup> bê tông [13, 15, 18]. Trong khi đó, bê tông cốt liệu mịn sử dụng hệ chất kết dính hỗn hợp (xi măng, silica fume và xỉ lò cao nghiền mịn) có đặc điểm cấu trúc và cơ chế làm việc khác so với vữa truyền thống, do đó cần được nghiên cứu độc lập. Hơn nữa, mặc dù xu hướng suy giảm cường độ và gia tăng khả năng hấp thụ năng lượng khi tăng hàm lượng cao su đã được ghi nhận, mối quan hệ tương tác giữa hai

yếu tố này trong việc chi phối khả năng chịu tải trọng và đập vỡ chưa được phân tích một cách hệ thống. Ngoài ra, phần lớn các nghiên cứu hiện nay chủ yếu đánh giá khả năng chịu và đập thông qua thí nghiệm rơi tự do, trong khi các dạng tải trọng va đập khác như va đập uốn chưa được xem xét đầy đủ. Điều này hạn chế khả năng đánh giá toàn diện hành vi chịu tải trọng động của vật liệu.

Từ những vấn đề nêu trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm khảo sát khả năng chịu tải trọng va đập của bê tông cốt liệu mịn sử dụng hạt cao su tái chế từ lốp xe thải. Hai dạng tải trọng va đập được xem xét bao gồm va đập rơi tự do và va đập uốn. Bên cạnh đó, nghiên cứu phân tích ảnh hưởng của hàm lượng cao su đến các tính chất cơ học và làm rõ mối quan hệ tương tác giữa sự suy giảm cường độ và khả năng hấp thụ năng lượng, từ đó xác định hàm lượng cao su tối ưu, là tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo về khả năng chịu tải trọng nổ.

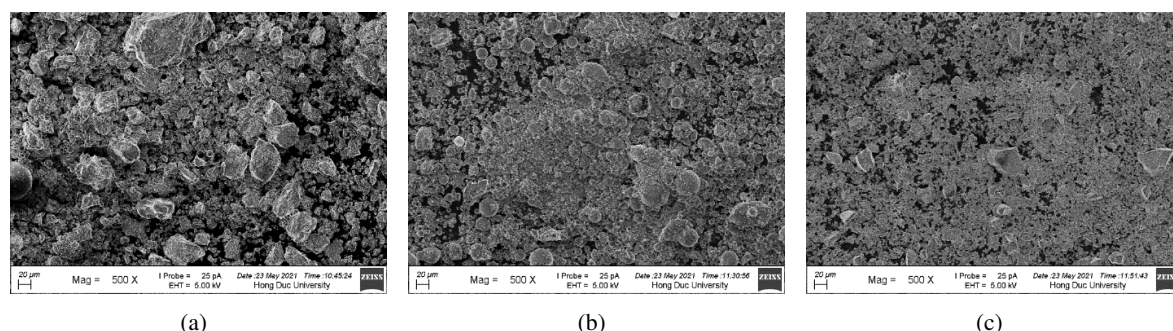
## 2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

### 2.1. Vật liệu

Các vật liệu thô chuẩn bị cho 01 mẻ trộn được minh họa như Hình 1. Các chất kết dính bao gồm xi măng, silica fume (SF) và xỉ lò cao nghiền mịn (XLCNM), cốt liệu mịn bao gồm cát sông tự nhiên có kích cỡ hạt lớn nhất là 1,25 mm và hạt cao su tái chế với kích cỡ hạt lớn nhất là 1,0 mm. Xi măng sử dụng là Nghi Sơn PCB40, SF dạng bột được cung cấp bởi Công ty Cổ phần IPRO, và XLCNM loại S95 của nhà máy luyện gang thép Hòa Phát. Khối lượng riêng của chúng lần lượt là 3,12 t/m<sup>3</sup>, 2,20 t/m<sup>3</sup> và 2,82 t/m<sup>3</sup>. Hình ảnh vi cấu trúc và thành phần hóa học chủ yếu của chúng được thể hiện trên Hình 2 và Bảng 2. Các hạt xi măng và XLCNM có hình dạng góc cạnh, các hạt xi măng có kích cỡ lớn hơn với đường kính hạt trung bình là 20,8 μm, trong khi cỡ hạt trung bình của XLCNM là 9,8 μm. Silica fume có nhiều hạt dạng hình cầu với đường kính hạt trung bình khoảng 11,2 μm. Thành phần hóa học chính của xi măng bao gồm các ô xít CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> và Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, thành phần hóa học chính của XLCNM gồm CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> và MgO, trong khi thành phần hóa học chính của SF chủ yếu là SiO<sub>2</sub> với hàm lượng 85,85%.



Hình 1. Các vật liệu khô dùng cho một mẻ trộn



Hình 2. Hình ảnh vi cấu trúc của xi măng, silica fume và XLCNM

Hạt cao su tái chế được mua từ Công ty Trách nhiệm hữu hạn tái chế cao su Long Long, có khối lượng riêng khoảng 1,1 t/m<sup>3</sup> và có cỡ hạt từ 0-1 mm. Hạt cao su được công ty tái chế từ lốp xe thải, sau khi cắt thành miếng nhỏ và tiến hành loại bỏ các sợi thép và sợi vải, chúng được đưa vào máy

nghiên để cho ra các cỡ hạt khác nhau. Cát sông tự nhiên được mua tại các mỏ cát trên khu vực sông Mã, có khối lượng riêng  $2,65 \text{ t/m}^3$ , sau đó được tuyển qua rây sàng đường kính  $1,25 \text{ mm}$  để kích thước hạt gần tương đồng với các hạt cao su tái chế. Phụ gia siêu dẻo là loại F, có gốc hóa học naphthalene formaldehyde sulfonate và khối lượng riêng khoảng  $1,15 \text{ t/m}^3$ , được sử dụng để kiểm soát độ linh động của bê tông. Nước trộn bê tông là nước máy được cung cấp bởi Công ty Cổ phần cấp nước Thanh Hóa.

Bảng 2. Thành phần hóa học chính của xi măng, silica fume và XLCNM

Vật liệu	Thành phần hóa học theo khối lượng (%)								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LMKN*
Xi măng	50,54	24,49	4,41	7,92	2,72	0,82	0,48	1,31	2,45
Silica fume	1,82	85,85	4,35	0,99	1,31	0,19	0,22	0,37	2,60
XLCNM	42,00	35,20	0,64	10,04	8,87	0,11	0,23	0,13	0,74

### 2.2. Thiết kế thành phần cấp phối

Thành phần cấp phối của các mẫu bê tông cốt liệu mịn sử dụng hạt cao su tái chế để thay thế một phần cát được thể hiện trong Bảng 3. Mẫu đối chứng M35-R00 được thiết kế trước với tỷ lệ nước/chất kết dính bằng 0,35 [13], hàm lượng các chất kết dính bao gồm 55% xi măng, 15% SF và 30% XLCNM theo khối lượng, tham khảo từ nghiên cứu trước [22]. Mẫu đối chứng được thiết kế với cường độ chịu nén khoảng 70 MPa nhằm đảm bảo rằng, khi thay thế một phần cát tự nhiên bằng hạt cao su tái chế, các hỗn hợp bê tông thu được vẫn duy trì mức cường độ đủ để xem xét sử dụng trong các kết cấu chịu lực hoặc cấu kiện thứ yếu, tùy theo yêu cầu thiết kế cụ thể. Lượng nước được sử dụng cố định là  $205 \text{ kg/m}^3$ , sử dụng lượng phụ gia siêu dẻo để điều chỉnh độ chảy xòe của các mẫu bê tông trong phạm vi  $15 \pm 2 \text{ cm}$ . Sau đó lần lượt thay thế 5%, 15%, 25% và 35% thể tích cát bởi hạt cao su tái chế được các mẫu tương ứng là M35-R05, M35-R15, M35-R25 và M35-R35. Ký hiệu các mẫu được định nghĩa như sau, M35 là mẫu bê tông có tỷ lệ nước/chất kết dính bằng 0,35; các ký hiệu theo sau R00, R05, R15, R25 và R35 thể hiện hàm lượng cao su tái chế thay thế cát với các hàm lượng tương ứng là 0%, 5%, 15%, 25% và 35% theo thể tích. Từ Bảng 3 ta thấy, khi tăng hàm lượng cao su, hàm lượng phụ gia siêu dẻo để đảm bảo các mẫu có độ chảy xòe trong phạm vi  $15 \pm 2 \text{ cm}$ . Nguyên nhân chính khiến độ linh động của bê tông cao su giảm là do các hạt cao su có hình dạng không đồng đều và ma sát lớn, vì vậy cần phải tăng hàm lượng phụ gia siêu dẻo [23].

Bảng 3. Thành phần cấp phối của bê tông cao su cốt liệu mịn

Tên mẫu	Thành phần (kg/m <sup>3</sup> )						
	Xi măng	SF	XLCNM	Cát	Cao su	Nước	Phụ gia siêu dẻo
M35-R00	322	87,9	175,7	1535	0,0	205	11,7
M35-R05	322	87,9	175,7	1458	31,9	205	13,1
M35-R15	322	87,9	175,7	1305	95,6	205	16,6
M35-R25	322	87,9	175,7	1151	159,3	205	20,5
M35-R35	322	87,9	175,7	998	223,0	205	24,1

### 2.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Các vật liệu đầu vào được cân cho 01 mẻ trộn dựa vào Bảng 3 ở trên, sau đó các vật liệu khô được cho vào máy trộn trước trong khoảng 3 phút để cho chúng được trộn đều vào nhau. Sau đó cho 2/3 hỗn

hợp nước và phụ gia siêu dẻo vào và trộn thêm khoảng 3 phút. Tiếp theo cho nốt 1/3 hỗn hợp nước và phụ gia siêu dẻo vào trộn cho đến khi được hỗn hợp đồng nhất. Tiến hành thử độ chảy xòe theo TCVN 3121:2022 [24], nếu chưa đạt thì điều chỉnh lượng phụ gia siêu dẻo cho đến khi đạt rồi mới tiến hành đúc mẫu. Bảng 3 là thành phần cấp phối của tất cả các hỗn hợp sau khi đã điều chỉnh lượng phụ gia siêu dẻo. Sử dụng các khuôn thép với các kích thước khác nhau để đúc các mẫu phục vụ cho việc xác định các thông số kỹ thuật của bê tông. Sau 24h các mẫu bê tông được tháo khuôn (minh họa như Hình 3) và ngâm trong nước ở nhiệt độ phòng để bảo dưỡng. Hình 4 trình bày quá trình kiểm tra hiện tượng phân tầng của mẫu bê tông có hàm lượng cao su lớn nhất (M35-R35). Mẫu được cắt theo phương đúc nhằm đánh giá sự phân bố của hạt cao su trong tiết diện. Kết quả quan sát cho thấy các hạt cao su phân bố tương đối đồng đều, không xuất hiện hiện tượng phân tầng rõ rệt. Điều này chứng tỏ độ chảy xòe của hỗn hợp ( $15\pm 2$  cm) chưa gây ra sự tách lớp đáng kể giữa các pha vật liệu, đảm bảo tính đồng nhất của bê tông trong phạm vi nghiên cứu.



Hình 3. Các mẫu bê tông M35-R15 sau khi tháo khuôn



(a) Cắt mẫu bê tông



(b) Mặt cắt theo phương đúc

Hình 4. Kiểm tra sự phân tầng trong mẫu bê tông M35-R35

#### 2.4. Phương pháp thí nghiệm

Cường độ chịu uốn của bê tông cốt liệu mịn được xác định theo TCVN 3121:2022 [24] trên mẫu lăng trụ có kích thước 40×40×160 mm. Sau thí nghiệm uốn, mẫu bị gãy làm đôi, sử dụng 02 nửa mẫu này trên gá nén tiết diện 40×40 mm để xác định cường độ chịu nén theo TCVN 3121:2022 [24]. Cường độ chịu uốn được xác định tại 7, 14, 28 và 56 ngày tuổi, trong khi cường độ chịu nén được định tại 3, 7, 14, 28 và 56 ngày tuổi. Như vậy, cường độ chịu uốn thể hiện trong bài báo là giá trị trung bình của ít nhất 3 phép thử, trong khi cường độ chịu nén là giá trị trung bình của ít nhất 6 mẫu thử.



(a) Thiết bị thí nghiệm xác định độ bật nảy



(b) Đo độ bật nảy

Hình 5. Thiết bị thí nghiệm và ảnh minh họa xác định độ bật nảy

Khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông được xác định tương tự như thí nghiệm của Gupta, và cs. [13] thông qua chiều cao bật nảy của viên bi sắt. Hình 5(a) minh họa thiết bị thí nghiệm gồm khung thép có ống thẳng đứng đặt ở giữa khung kèm theo 01 thước đo. Ống thép được thiết kế sao cho từ miệng ống đến bề mặt mẫu bê tông có chiều cao 1 m. Tiến hành thí nghiệm bằng cách thả viên bi sắt nặng 0,5 kg từ độ cao 1 m để nó rơi xuống bề mặt mẫu bê tông có kích thước 100×100×100 mm. Độ bật nảy của viên bi sắt được xác định thông qua chiều cao bật lại sau va chạm. Một máy ảnh tốc độ cao được sử dụng để ghi lại quá trình va chạm và bật nảy của viên bi. Video thu được được phân tích theo từng khung hình để xác định chiều cao bật lại lớn nhất (minh họa như Hình 5b). Giá trị độ cao bật nảy càng nhỏ cho thấy khả năng hấp thụ năng lượng của vật liệu càng lớn. Mỗi thí nghiệm được lặp lại nhiều lần và lấy giá trị trung bình để đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Thế năng ban đầu ( $E_1$ ) của viên bi được xác định theo công thức (1), thế năng tại điểm bật nảy ( $E_2$ ) được xác định theo công thức (2), và khả năng hấp thụ năng lượng ( $E_{12}$ ) của bê tông được xác định theo công thức (3).

$$E_1 = m_1gh_1 \quad (1)$$

$$E_2 = m_1gh_2 \quad (2)$$

$$E_{12} = E_1 - E_2 \quad (3)$$

trong đó  $m_1 = 0,5$  kg là khối lượng của bi sắt,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> là gia tốc trọng trường,  $h_1 = 1$  m là chiều cao ban đầu của bi sắt,  $h_2$  chiều cao bật nảy của bi sắt (m). Độ cao bật nảy là giá trị trung bình của 5 lần thử trên 5 mẫu thử khác nhau.



Hình 6. Thiết bị thí nghiệm xác định khả năng chịu tải trọng và đập rơi tự do

Khả năng chịu tải trọng và đập rơi tự do được xác định theo tiêu chuẩn ACI 544 [25] và được minh họa như Hình 6. Thiết bị thí nghiệm gồm khung thép có gắn quả nặng 4,5 kg, chân thiết bị có hàn 4 thanh thép sao cho khi đặt mẫu bê tông thí nghiệm hình trụ có đường kính 150 mm, chiều cao 65 mm vào giữa thì khoảng cách giữa biên ngoài của mẫu với các thanh thép là 5 mm. Cổ định viên bi sắt đường kính 63 mm ở giữa mẫu bê tông và treo quả nặng lên giá sao cho khoảng cách từ quả nặng đến bi sắt là 450 mm. Tiến hành thí nghiệm bằng cách thả quả nặng rơi tự do và tác dụng lên bề mặt mẫu bê tông thông qua việc va đập với bi sắt. Tiếp tục thí nghiệm lặp đi lặp lại cho đến khi xuất hiện vết nứt đầu tiên thì ghi giá trị  $N_1$ , số lần va đập ứng với xuất hiện vết nứt đầu tiên. Tiếp tục thí nghiệm cho đến khi các vết nứt mở rộng và mẫu bê tông chạm vào 3 thanh sắt ở chân đế, khi đó ghi giá trị  $N_2$ , số lần va đập đến khi mở rộng vết nứt. Giá trị  $N_1$  và  $N_2$  ghi trong bài báo là giá trị trung bình của 03 lần thử. Khả năng hấp thụ năng lượng của mẫu bê tông dưới tải trọng và đập rơi tự do được xác định theo công thức (4) và (5).

$$J_1 = N_1 m_2 g h \quad (4)$$

$$J_2 = N_2 m_2 g h \quad (5)$$

trong đó  $J_1$  và  $J_2$  là khả năng hấp thụ năng lượng của mẫu bê tông dưới tải trọng và đập rơi tự do ứng với xuất hiện vết nứt đầu tiên và mở rộng vết nứt,  $m_2 = 4,5$  kg là khối lượng quả nặng,  $h = 0,45$  m là chiều cao quả nặng.

Khả năng chịu tải trọng và đập uốn được đánh giá thông qua khả năng hấp thụ năng lượng và đập uốn, thí nghiệm được thực hiện tương tự như nghiên cứu của Gupta, và cs. [13]. Hình 7 minh họa thiết bị được sử dụng trong thí nghiệm, gồm khung thép có ống thẳng đứng ở giữa để thả quả nặng 1,0 kg tác dụng lên giữa dầm có kích thước 100×100×500 mm. Dầm được gối lên 2 gối tựa, khoảng cách 2 gối tựa là 400 mm. Chiều cao từ bề mặt mẫu bê tông đến miệng ống thép là 450 mm. Quả nặng được thả tự do, ống thép được thiết kế nhằm định vị cho quả nặng rơi đúng vào vị trí giữa dầm từ độ cao 450 mm. Quả nặng được thả lặp đi lặp lại đến khi dầm bị gãy, số lần va đập được ghi nhận là  $N_u$ , giá trị ghi trong bài báo là trung bình của 03 lần thử. Khả năng hấp thụ năng lượng và đập uốn ( $J_u$ ) được xác định theo công thức (6).

$$J_u = N_u m_u g h_u \quad (6)$$

trong đó  $m_u = 1,0$  kg là khối lượng quả nặng,  $h_u = 0,45$  m là chiều cao quả nặng.



Hình 7. Thiết bị thí nghiệm xác định khả năng chịu tải trọng và đập uốn

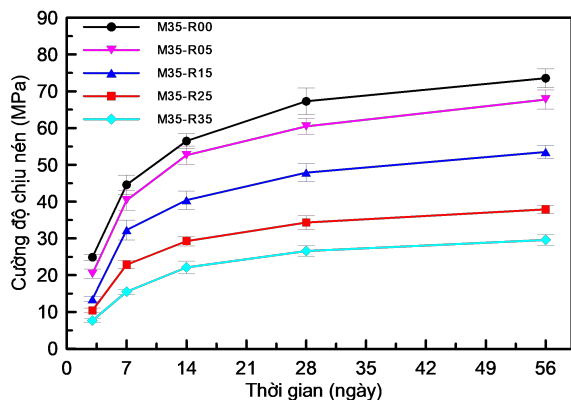
### 3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

#### 3.1. Cường độ chịu nén

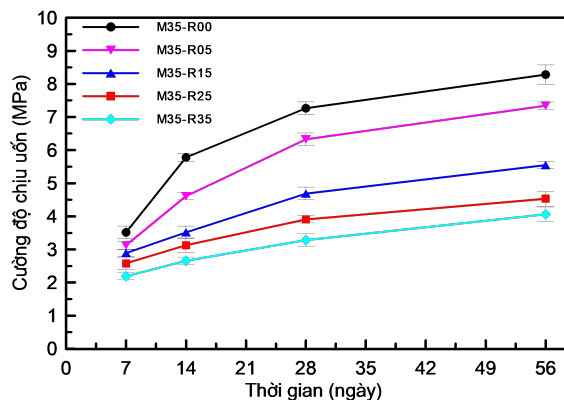
Cường độ chịu nén của các mẫu bê tông với các hàm lượng cao su tái chế khác nhau theo thời gian được thể hiện trên Hình 8. Nhìn chung, cường độ chịu nén của bê tông tăng theo thời gian và giảm khi tăng hàm lượng cao su. Tại 28 ngày tuổi, cường độ chịu nén của mẫu đối chứng là 67,3 MPa trong khi các mẫu sử dụng 5%, 15%, 25% và 35% cao su lần lượt là 60,5 MPa, 47,9 MPa, 34,3 MPa và 26,6 MPa. Có nghĩa là khi thay thế 5%, 15%, 25% và 35% cát tự nhiên bởi cao su tái chế, cường độ chịu nén của bê tông tại 28 ngày tuổi giảm lần lượt là 10,1%, 28,8%, 49,0% và 60,5% so với mẫu đối chứng. Tương tự, tại 56 ngày tuổi, mẫu bê tông đối chứng có cường độ chịu nén là 73,6 MPa, trong khi các mẫu khác có cường độ lần lượt là 67,8 MPa, 53,5 MPa, 37,9 MPa và 29,6 MPa tương ứng với các hàm lượng cao su 5%, 15%, 25% và 35%, giảm tương ứng so với mẫu đối chứng là 7,9%, 27,2%, 48,5% và 59,8%. Mặc dù cường độ chịu nén của bê tông giảm, tuy nhiên khi thay thế đến 35% cát tự nhiên bởi cao su, cường độ chịu nén tại 28 ngày tuổi đạt 26,6 MPa, có thể sử dụng được trong các kết cấu thứ yếu (không phải kết cấu chịu lực chính). Sự giảm cường độ chịu nén của bê tông khi tăng hàm lượng cao su tái chế là do cao su có cường độ thấp, độ đàn hồi cao và khả năng liên kết giữa cao su với hồ xi măng kém hơn nhiều so với liên kết giữa cát và hồ xi măng [9, 13]. Việc vẫn giữ được cường độ chịu nén để sử dụng trong các kết cấu chịu lực là do sự có mặt của silica fume, giúp cải thiện cường độ chịu nén của bê tông cao su [12, 13].

Mặt khác, như đã đề cập ở phần Mở đầu, các nghiên cứu trước sử dụng bê tông nặng thông thường với cả cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn, nên thể tích cao su thực tế trong  $1 \text{ m}^3$  bê tông là tương đối nhỏ. Cụ thể, Gupta, và cs. [13] sử dụng cao su tái chế thay thế cát với hàm lượng 5%, 10%, 15%, 20% và 25%, cường độ chịu nén tương ứng giảm 16%, 25%, 35%, 45% và 51%. Với hàm lượng thay thế 5%, 15% và 25%, thể tích cao su tái chế sử dụng thực tế là  $0,015 \text{ m}^3$ ,  $0,045 \text{ m}^3$  và  $0,075 \text{ m}^3$ . Trong khi với cùng hàm lượng cao su tái chế 5%, 15% và 25%, nghiên cứu này sử dụng  $0,029 \text{ m}^3$ ,  $0,087 \text{ m}^3$  và  $0,145 \text{ m}^3$ , lớn hơn rất nhiều so với nghiên cứu trước của Gupta, và cs. [13]. Như vậy, có thể thấy rằng, sự suy giảm cường độ trong bê tông cốt liệu mịn thấp hơn so với bê tông thường. Nói cách khác, sử dụng hạt cao su tái chế trong bê tông cốt liệu mịn hiệu quả hơn so với bê tông thường. Theo thống kê ở Bảng 1, thể tích cao su lớn nhất sử dụng thực tế trong  $1 \text{ m}^3$  bê tông từ các nghiên cứu trước là  $0,112 \text{ m}^3$ , trong khi hàm lượng cao su thực tế trong nghiên cứu này là  $0,203 \text{ m}^3$ , lớn hơn gấp 1,81 lần. Điều này được giải thích là do bê tông cốt liệu mịn chỉ sử dụng các hạt mịn (cát và hạt cao su) làm cốt liệu, trong khi bê tông thường có cả cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn. Do vậy, cùng tỷ lệ phần trăm thay thế cát, thể tích

cao su sử dụng thực tế trong bê tông cốt liệu mịn lớn hơn nhiều so với chỉ thay thế cát trong bê tông thường. Mặt khác, với cùng thể tích, các hạt nhỏ sẽ có diện tích bề mặt lớn hơn so với các hạt lớn, do vậy diện tích tiếp xúc giữa các cốt liệu nhỏ với hồ xi măng sẽ lớn hơn so với diện tích tiếp xúc giữa các hạt cốt liệu lớn với hồ xi măng. Đây là nguyên nhân chính dẫn đến sự suy giảm cường độ trong bê tông cốt liệu mịn nhỏ hơn so với bê tông thường.



Hình 8. Cường độ chịu nén của các mẫu bê tông cao su



Hình 9. Cường độ chịu uốn của các mẫu bê tông cao su

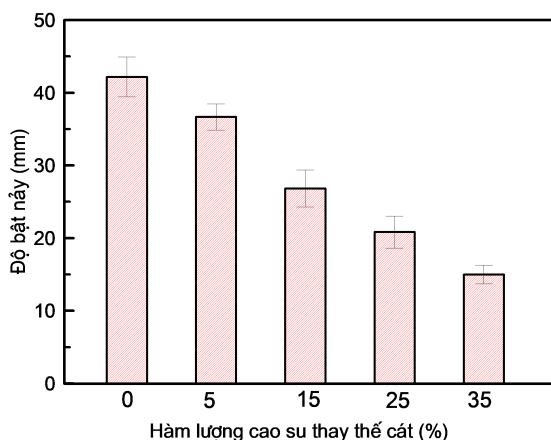
### 3.2. Cường độ chịu uốn

Cường độ chịu uốn của các mẫu bê tông cao su được thể hiện trên Hình 9. Tương tự như cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn phát triển theo thời gian nhưng giảm dần khi tăng hàm lượng cao su tái chế. Tại 28 ngày tuổi, cường độ chịu uốn của mẫu đối chứng là 7,3 MPa, trong khi các mẫu sử dụng 5%, 15%, 25% và 35% cao su có cường độ chịu uốn tương ứng là 6,3 MPa, 4,7 MPa, 3,9 MPa và 3,3 MPa. Cường độ chịu uốn của các mẫu bê tông cao su giảm từ 12,9% đến 54,8%. Tương tự, tại 56 ngày tuổi, cường độ chịu uốn của bê tông giảm từ 8,3 MPa xuống còn 7,3 MPa, 5,6 MPa, 4,5 MPa và 4,1 MPa tương ứng với hàm lượng cao su sử dụng là 5%, 15%, 25% và 35%, tương ứng giảm 11,3%, 33,0%, 45,3% và 50,9% so với mẫu đối chứng. Sự suy giảm cường độ chịu uốn của bê tông khi tăng hàm lượng cao su tái chế chủ yếu là do mối liên kết lỏng lẻo giữa các hạt cao su với hồ xi măng [13]. Kết quả trong nghiên cứu này cũng tương đồng với nghiên cứu trước về cường độ chịu uốn của bê tông cao su [15]. Cần lưu ý rằng, thể tích cao su lớn nhất sử dụng trong nghiên cứu của AbdelAleem, và cs. [15] khoảng 0,102 m<sup>3</sup> trong 1 m<sup>3</sup> bê tông, nhỏ hơn nhiều so với thể tích cao su sử dụng trong nghiên cứu này (0,203 m<sup>3</sup>).

### 3.3. Khả năng hấp thụ năng lượng

Khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông được đánh giá thông qua độ bật nảy của bi sắt và được thể hiện trên Hình 10 và trong Bảng 4. Độ bật nảy càng thấp có nghĩa là khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông cao, ngược lại độ bật nảy càng cao thì khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông thấp. Từ Hình 10 ta thấy, độ bật nảy của bê tông giảm dần khi tăng hàm lượng cao su tái chế. Độ bật nảy của mẫu đối chứng là 42,2 mm, trong khi độ bật nảy của các mẫu sử dụng hạt cao su tái chế giảm còn 36,7 mm, 26,8 mm, 20,8 mm và 15,0 mm ứng với hàm lượng cao su tái chế 5%, 15%, 25% và 35%. Bảng 4 thống kê các thông số liên quan đến khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông cốt liệu mịn. Tương ứng với độ bật nảy thấp, khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông tăng khi tăng hàm lượng cao su. Hiện tượng này là do cao su có khả năng đàn hồi cao, do vậy nó dễ dàng làm tiêu tán năng lượng và đập tác dụng lên nó. Đây cũng là lợi ích lớn nhất của việc sử dụng các hạt cao su tái chế

trong thành phần bê tông [9]. Kết quả của nghiên cứu này có cùng xu hướng với kết quả từ nghiên cứu trước của Gupta, và cs. [13].



Hình 10. Độ bật nảy của các mẫu bê tông cao su

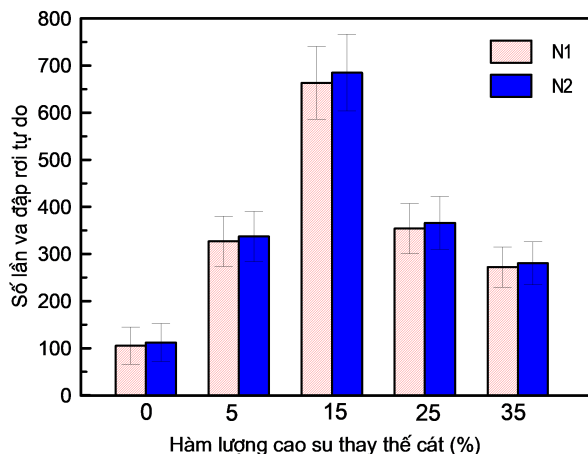
Bảng 4. Khả năng hấp thụ năng lượng của các mẫu bê tông cao su

Tên mẫu	Hàm lượng cao su (%)	Độ bật nảy (mm)		Khả năng hấp thụ năng lượng (J)		
		Trung bình	Độ lệch chuẩn	$E_0$	$E_h$	$E_i$
M35-R00	0	42,2	2,7	4,91	0,21	4,70
M35-R05	5	36,7	1,8	4,91	0,18	4,73
M35-R15	15	26,8	2,5	4,91	0,13	4,77
M35-R25	25	20,8	2,2	4,91	0,10	4,80
M35-R35	35	15,0	1,3	4,91	0,07	4,83

### 3.4. Khả năng chịu tải trọng và đập rơi tự do

Hình 11 thể hiện số lần chịu va đập rơi tự do của các mẫu bê tông cho đến khi xuất hiện vết nứt đầu tiên ( $N_1$ ) và cho đến khi mở rộng vết nứt ( $N_2$ ). Mẫu đối chứng có khả năng chịu va đập thấp nhất, trong khi các mẫu bê tông cao su có khả năng chịu va đập tốt hơn. Đặc biệt, mẫu sử dụng 15% cao su tái chế cho khả năng chịu tải trọng và đập rơi tự do lớn nhất, sau đó giảm dần khi tăng hàm lượng cao su tái chế. Điều này có nghĩa rằng, hàm lượng cao su tái chế thay thế cát 15% được cho là tối ưu trong khả năng chịu tải trọng và đập rơi tự do. Tương ứng với số lần chịu va đập, khả năng hấp thụ năng lượng và đập được thể hiện trong Bảng 5. Mẫu đối chứng có khả năng hấp thụ năng lượng thấp nhất, trong khi các mẫu bê tông cao su có khả năng hấp thụ năng lượng cao hơn. Mẫu M35-R15 có khả năng hấp thụ năng lượng cao nhất gấp khoảng 6,1 lần so với mẫu đối chứng, đồng thời mẫu này cũng có hiệu số  $N_2 - N_1$  lớn hơn so với các mẫu còn lại.

Bảng 6 trình bày so sánh khả năng hấp thụ năng lượng và đập rơi tự do ( $J_2$ ) của nghiên cứu này với các nghiên cứu trước. Kết quả cho thấy, mặc dù bê tông cao su nhìn chung có khả năng chịu va đập cao hơn mẫu đối chứng, tuy nhiên hàm lượng cao su tối ưu chưa thống nhất giữa các nghiên cứu [13, 15, 18, 19]. Nguyên nhân chủ yếu là do phần lớn các nghiên cứu trước sử dụng bê tông thường (có cả cốt liệu thô và mịn), dẫn đến thể tích cao su thực tế trong  $1 \text{ m}^3$  bê tông còn hạn chế, với giá trị lớn nhất khoảng  $0,112 \text{ m}^3$ . Cụ thể, đối với các nghiên cứu mà khả năng chịu va đập tăng theo hàm lượng cao su, thể tích cao su tối đa thường nằm trong khoảng  $0,075\text{--}0,102 \text{ m}^3$ ; trong khi ở các nghiên cứu khác, giá trị tối ưu chỉ nằm trong khoảng  $0,023\text{--}0,084 \text{ m}^3$ . Trong nghiên cứu này, khả



Hình 11. Số lần chịu và đập rơi tự do của các mẫu bê tông cao su

Bảng 5. Khả năng chịu tải trọng và đập rơi tự do của các mẫu bê tông cao su

Tên mẫu	$N_1$ (lần)	$N_2$ (lần)	$N_2 - N_1$	Năng lượng hấp thụ (J)	
				$J_1$	$J_2$
M35-R00	106	112	7	2096	2230
M35-R05	327	337	10	6496	6701
M35-R15	663	685	22	13177	13608
M35-R25	354	366	12	7032	7271
M35-R35	272	280	8	5409	5568

năng chịu và đập đạt lớn nhất tại hàm lượng cao su 15% (tương ứng  $0,087 \text{ m}^3$ ), tương đồng với kết quả của Gupta, và cs. [13] và Khalil, và cs. [18]. Khi tăng hàm lượng cao su lên 25% ( $0,145 \text{ m}^3$ ), vượt xa phạm vi các nghiên cứu trước, khả năng chịu và đập có xu hướng giảm, cho thấy sự tồn tại của hàm lượng tối ưu. Đáng chú ý, năng lượng hấp thụ và đập trong nghiên cứu này đạt 13608 J, cao hơn đáng kể so với khoảng 1655–7390 J của các nghiên cứu trước (khoảng 1,8-8,2 lần), có thể do việc sử dụng bê tông cốt liệu mịn giúp cải thiện độ đồng nhất của ma trận và tăng khả năng tiêu tán năng lượng thông qua sự phát triển của các vi khe nứt.

Bảng 6. So sánh khả năng hấp thụ năng lượng và đập rơi tự do ( $J_2$ )

TT	Tài liệu tham khảo	Thể tích cao su lớn nhất ( $\text{m}^3$ )	Thể tích cao su tại giá trị cực đại ( $\text{m}^3$ )	Năng lượng hấp thụ cực đại (J)
1	Gupta, và cs. [13]	0,075	0,075	7390
2	AbdeAleem, và cs. [15]	0,102	0,102	5400
3	Khalil, và cs. [18]	0,112	0,084	1655
4	Sallam, và cs. [19] mẫu không có SF	0,070	0,023	6100
	Sallam, và cs. [19] mẫu có SF	0,077	0,051	2990
5	Nghiên cứu này	0,203	0,087	13608

Hình 12 minh họa các mẫu bê tông sau thí nghiệm chịu tải trọng và đập rơi tự do. Mẫu chuẩn M35-R00 có cường độ chịu nén lớn, tuy nhiên khả năng hấp thụ năng lượng kém nên bị phá hủy giòn,

minh chứng là thể tích bê tông bị phá hoại do va đập gây ra nhỏ, mẫu có nhiều vết nứt. Ngược lại, mẫu M35-R35 có cường độ chịu nén thấp nhưng khả năng hấp thụ năng lượng cao, nên mẫu bị phá hoại dẻo. Minh chứng là thể tích bê tông bị phá hoại va đập lớn, hình thành hố lõm sâu do khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông cao và sự đàn hồi tốt. Ngoài ra, độ lõm tại vị trí va đập có xu hướng tăng cả về chiều sâu và đường kính khi hàm lượng cao su cao (mẫu M35-R25 và M35-R35), cho thấy vật liệu có khả năng biến dạng cục bộ lớn hơn để tiêu tán năng lượng va đập. Ngược lại, với các mẫu có hàm lượng cao su thấp (M35-R05 và M35-R15) chỉ xuất hiện vùng lõm nông và hẹp, phản ánh cơ chế phá hoại giòn với khả năng hấp thụ năng lượng hạn chế. Hình 12 chứng minh có mối liên hệ giữa khả năng chịu lực và khả năng hấp thụ năng lượng đến khả năng chịu tải trọng va đập rơi tự do của bê tông.



Hình 12. Các mẫu bê tông bị phá hủy sau thí nghiệm chịu tải trọng va đập rơi tự do

Trong nghiên cứu của Gupta, và cs. [13], mẫu bê tông cao su thể hiện xu hướng xuất hiện nhiều vết nứt nhỏ và phân tán hơn so với mẫu bê tông thường, phản ánh vai trò của hạt cao su trong việc làm chậm quá trình lan truyền vết nứt thông qua hiệu ứng “cầu nối”. Lưu ý rằng, Gupta, và cs. [13] sử dụng các sợi cao su có đường kính 2-4mm và chiều dài 4-10 mm nên hiệu ứng cầu nối được quan sát thấy rõ nét. Trong nghiên cứu này, mức độ khác biệt về hình thái vết nứt không quá rõ rệt, có thể do cường độ bê tông nền cao (khoảng 70 MPa) làm tăng tính giòn của vật liệu, cùng với kích thước hạt cao su nhỏ (1 mm) làm giảm hiệu ứng cầu nối ở quy mô vĩ mô. Do đó, các vi vết nứt chủ yếu phát triển ở quy mô nhỏ và khó quan sát trực tiếp, nhưng vẫn góp phần nâng cao khả năng hấp thụ năng lượng và cải thiện ứng xử của bê tông dưới tải trọng va đập.

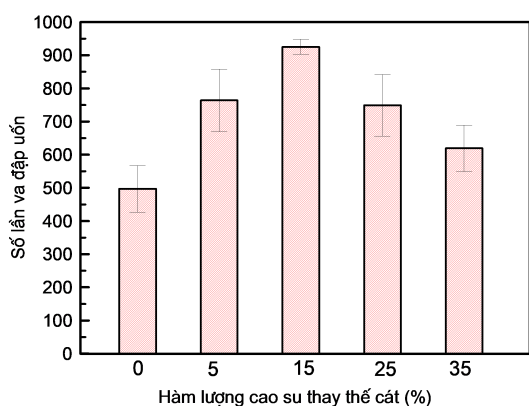
### 3.5. Khả năng chịu tải trọng va đập uốn

Số lần chịu tải trọng va đập uốn của các mẫu bê tông được thể hiện trên Hình 13. Tất cả các mẫu bê tông cao su có số lần chịu va đập uốn cao hơn so với mẫu đối chứng. Tương tự như khả năng chịu tải trọng va đập rơi tự do, mẫu M35-R15 với 15% cao su cho khả năng chịu tải trọng va đập uốn tốt nhất. Bảng 7 thống kê các chỉ số cơ bản trong thí nghiệm chịu tải trọng va đập uốn. Khả năng hấp thụ năng lượng khi chịu tải trọng va đập uốn của mẫu bê tông đối chứng là thấp nhất, trong khi các mẫu bê tông cao su có khả năng hấp thụ năng lượng cao hơn, và mẫu sử dụng 15% cao su có khả năng hấp thụ năng lượng va đập uốn tốt nhất, cao hơn khoảng 1,86 lần so với mẫu đối chứng. Tương tự như đã giải thích ở trên, khả năng chịu tải trọng va đập uốn là sự tương tác qua lại giữa khả năng chịu tải trọng uốn và khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông. Mẫu đối chứng có cường độ chịu uốn tốt nhất nhưng khả năng hấp thụ năng lượng kém nhất. Trong khi mẫu sử dụng 35% cao su có cường độ chịu uốn thấp nhất nhưng khả năng hấp thụ năng lượng cao nhất. Do đó, với hàm lượng 15% cao su, mẫu

bê tông có cường độ chịu uốn đủ lớn và có khả năng hấp thụ năng lượng cao hơn mẫu đối chứng nên có khả năng chịu tải trọng và đập uốn cao nhất.

Bảng 7. Khả năng chịu tải trọng và đập uốn của các mẫu bê tông cao su

Tên mẫu	Số lần va đập uốn ( $N_u$ )		Khả năng hấp thụ năng lượng khi chịu tải trọng và đập uốn, $J_u$ (J)
	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	
M35-R00	497	70	2195
M35-R05	764	94	3373
M35-R15	925	23	4083
M35-R25	749	93	3305
M35-R35	619	69	2734



Hình 13. Số lần chịu va đập uốn



Hình 14. Các mẫu bê tông bị phá hủy sau thí nghiệm chịu tải trọng và đập uốn

Hình 14 minh họa các mẫu bị phá hoại sau khi chịu tải trọng uốn. Nhìn chung các mẫu chịu tải trọng uốn không quan sát thấy sự khác biệt rõ ràng như chịu tải trọng và đập rơi tự do (Hình 12), bởi vì số lần chịu va đập uốn của các mẫu này đều tương đối cao (Bảng 7), nên vùng bê tông bị phá hoại lớn và tương đối giống nhau (Hình 14). Tuy nhiên nếu quan sát kỹ vẫn thấy chiều dày lớp bê tông bị phá hoại ở mẫu M35-R00 nhỏ hơn ở mẫu M35-R35. Ngoài ra, phạm vi hư hỏng có thể được đánh giá thông qua mức độ mất mát khối lượng và thể tích vật liệu tại vùng phá hoại. Kết quả quan sát cho thấy các mẫu bê tông cao su, đặc biệt là M35-R35, có vùng vật liệu bị bong tróc và mất mát lớn hơn so với mẫu đối chứng, phản ánh khả năng biến dạng dẻo và tiêu tán năng lượng tốt hơn dưới tác động va đập lặp. Ngược lại, mẫu M35-R00 có mức độ mất mát khối lượng nhỏ hơn nhưng xuất hiện nhiều vết nứt sắc nét, đặc trưng cho cơ chế phá hoại giòn. Điều này cho thấy bê tông cao su có xu hướng giảm phá hoại đột ngột bằng cách phân tán năng lượng thông qua biến dạng và bong tróc cục bộ, qua đó cải thiện khả năng kháng va đập của vật liệu.

#### 4. Kết luận

Nhằm phát triển một loại bê tông có khả năng hấp thụ năng lượng tốt, được sử dụng như một lớp bê tông mỏng trên bề mặt kết cấu chịu tải trọng va đập hoặc tải trọng nổ. Nghiên cứu này sử dụng các hạt cao su tái chế từ lốp xe thải để thay thế cát với hàm lượng 0%, 5%, 15%, 25% và 35% theo thể

tích trong thành phần bê tông cốt liệu mịn. Ảnh hưởng của hàm lượng cao su tái chế đến khả năng chịu lực cũng như khả năng chịu tải trọng động của bê tông được nghiên cứu. Một số kết luận chính được rút ra như sau:

- Cường độ chịu nén và chịu uốn của bê tông giảm, tuy nhiên khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông tăng khi tăng hàm lượng cao su tái chế. Điều này là do các hạt cao su có khả năng chịu lực thấp và liên kết yếu với hồ xi măng, trong khi khả năng đàn hồi của cao su cao. Tại 28 ngày tuổi, cường độ chịu nén của bê tông giảm từ 67,3 MPa xuống 26,6 MPa, trong khi cường độ chịu uốn giảm từ 7,3 MPa xuống 3,3 MPa.

- Khả năng chịu tải trọng va đập rơi tự do và tải trọng va đập uốn của bê tông cao su cao hơn so với mẫu đối chứng, và mẫu sử dụng 15% cao su thay thế cát có khả năng chịu tải trọng va đập cao nhất. Cụ thể, khả năng hấp thụ năng lượng va đập rơi tự do cực đại đạt 13608 J tại hàm lượng cao su 15% cao hơn 6,1 lần so với mẫu đối chứng và cao hơn đáng kể (khoảng 1,8–8,2 lần) so với các nghiên cứu trước; trong khi khả năng hấp thụ năng lượng va đập uốn cao hơn khoảng 1,86 lần so với mẫu đối chứng.

- Khả năng chịu tải trọng va đập có mối liên hệ mật thiết với khả năng chịu lực và khả năng hấp thụ năng lượng.

- Dựa trên kết quả thí nghiệm, bê tông sử dụng hạt cao su tái chế thể hiện khả năng hấp thụ năng lượng và chịu tải trọng va đập tốt, do đó phù hợp với các công trình hoặc cấu kiện chịu tải trọng động như lớp phủ bảo vệ, kết cấu chống va đập, dải phân cách giao thông hoặc các lớp vật liệu hấp thụ năng lượng trong công trình chịu tải trọng nổ. Tuy nhiên, việc sử dụng hạt cao su tái chế dẫn đến sự suy giảm đáng kể cường độ chịu nén và chịu uốn của bê tông, đặc biệt ở hàm lượng cao. Vì vậy, loại vật liệu này không phù hợp cho các kết cấu chịu lực chính yêu cầu cường độ cao, mà nên được sử dụng cho các cấu kiện thứ yếu hoặc các lớp vật liệu chức năng. Hàm lượng cao su khoảng 15% được xem là tối ưu trong nghiên cứu này, do đảm bảo được sự cân bằng giữa khả năng chịu lực và khả năng hấp thụ năng lượng.

- Nghiên cứu này là tiền đề quan trọng để thực hiện các nghiên cứu tiếp theo về khả năng chịu tải trọng nổ của bê tông cao su cũng như chiều dày tối ưu của lớp bê tông cao su trong khả năng chịu tải trọng nổ.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua Đề tài khoa học và Công nghệ cấp Bộ, mã số: B2024-XDA-09.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Publications, Washington, DC.
- [2] Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., Mastral, A. M. (2013). [Waste tyre pyrolysis – A review](#). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23:179–213.
- [3] Colom, X., Carrillo, F., Cañavate, J. (2007). [Composites reinforced with reused tyres: Surface oxidant treatment to improve the interfacial compatibility](#). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(1):44–50.
- [4] Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., Jalali, S. (2012). [Properties and durability of concrete containing polymeric wastes \(tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles\): An overview](#). *Construction and Building Materials*, 30:714–724.
- [5] Lo Presti, D. (2013). [Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review](#). *Construction and Building Materials*, 49:863–881.
- [6] Batayneh, M. K., Marie, I., Asi, I. (2008). [Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries](#). *Waste Management*, 28(11):2171–2176.

- [7] Mohammadi, I., Khabbaz, H., Vessalas, K. (2014). [In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete \(CRC\) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements](#). *Construction and Building Materials*, 71:456–471.
- [8] Cui, D., Bi, Z., Gu, Y., Wang, H., Gao, X., Wang, P., Sun, X., Chen, W. Q. (2024). [Scenario analysis of waste tires from China's vehicles future](#). *Journal of Cleaner Production*, 478:143940.
- [9] Rashad, A. M. (2016). [A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials](#). *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1):46–82.
- [10] Gerges, N. N., Issa, C. A., Fawaz, A. A. (2018). [Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties](#). *Case Studies in Construction Materials*, 9:e00184.
- [11] Yang, F., Feng, W., Liu, F., Jing, L., Yuan, B., Chen, D. (2019). [Experimental and numerical study of rubber concrete slabs with steel reinforcement under close-in blast loading](#). *Construction and Building Materials*, 198:423–436.
- [12] Thomas, B. S., Gupta, R. C. (2016). [Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber](#). *Journal of Cleaner Production*, 113:86–92.
- [13] Gupta, T., Sharma, R. K., Chaudhary, S. (2015). [Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume](#). *International Journal of Impact Engineering*, 83:76–87.
- [14] Yung, W. H., Yung, L. C., Hua, L. H. (2013). [A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete](#). *Construction and Building Materials*, 41:665–672.
- [15] AbdelAleem, B. H., Ismail, M. K., Hassan, A. A. A. (2018). [The combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete](#). *Construction and Building Materials*, 162:816–829.
- [16] Eltayeb, E., Ma, X., Zhuge, Y., Youssf, O., Mills, J. E. (2020). [Influence of rubber particles on the properties of foam concrete](#). *Journal of Building Engineering*, 30:101217.
- [17] Ling, T. C. (2011). [Prediction of density and compressive strength for rubberized concrete block](#). *Construction and Building Materials*, 25:4303–4306.
- [18] Khalil, E., Abd-Elmohsen, M., Anwar, A. M. (2015). [Impact resistance of rubberized self-compacting concrete](#). *Water Science*, 29(1):45–53.
- [19] Sallam, H. E. M., Sherbini, A. S., Seleem, M. H., Balaha, M. M. (2008). [Impact resistance of rubberized concrete](#). *Engineering Research Journal*, 31:265–271.
- [20] Phương, P. N., Cường, N. T., Đắc, Đ. N. H., Hào, N. V. P., Châu, L. Đ. (2023). [Cường độ, khả năng kháng nứt do co ngót dẻo và tính thấm nước của bê tông xi măng mặt đường sử dụng cốt liệu xi thép và cao su](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE) - ĐHXDHN*, 17(2V):154–166.
- [21] 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.
- [22] Ngo, S. H., Nguyen, N. T., Nguyen, X. H. (2022). [Assessing the effect of GGBFS content on mechanical and durability properties of high-strength mortars](#). *Civil Engineering Journal*, 8(5):938–950.
- [23] Güneş, E., Gesoğlu, M., Özturan, T. (2004). [Properties of rubberized concretes containing silica fume](#). *Cement and Concrete Research*, 34(12):2309–2317.
- [24] TCVN 3121:2022. *Vữa xây dựng - Phương pháp thử*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, Việt Nam.
- [25] ACI 544 (1999). *Measurement of properties of fiber reinforced concrete*. American Concrete Institute.