

# Ảnh hưởng của cát nghiền từ đá vôi đến tổn thất độ sụt và cường độ chịu nén của bê tông xi măng chịu lực

Influence of crushed limestone sand on slump loss and compressive strength of cement concrete

> ĐỖ TRỌNG THÀNH<sup>1,2</sup>, TỐNG TÔN KIÊN<sup>2,\*</sup>, LÊ VIỆT DŨNG<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Văn phòng UBND thành phố Hải Phòng, Hải Phòng

<sup>2</sup>Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE)

\*Email: kientt@huce.edu.vn

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của cát nghiền (CN) từ đá vôi khi thay thế một phần và toàn bộ cát tự nhiên (CTN) đến tổn thất độ sụt theo thời gian và sự phát triển cường độ nén của bê tông. Hai cấp bền B20 và B30, đại diện cho các cấp phối có hàm lượng xi măng thấp và cao, được thiết kế với các tỷ lệ CN thay thế CTN là 0%, 50% và 100%. Tổn thất độ sụt được xác định tại các thời điểm 0, 30, 60, 90 và 120 phút sau khi trộn. Cường độ nén được thí nghiệm trên mẫu lập phương (150×150×150 mm) và mẫu lăng trụ (150×150×600 mm) ở tuổi 7, 14 và 28 ngày, đồng thời trên mẫu trụ (D×H=150×300 mm) ở tuổi 28 ngày. Kết quả cho thấy việc tăng hàm lượng CN làm gia tăng đáng kể tốc độ tổn thất độ sụt, đặc biệt đối với bê tông có hàm lượng xi măng thấp (B20), do đặc trưng hình dạng góc cạnh và diện tích bề mặt riêng lớn của hạt CN. Ngược lại, bê tông có hàm lượng xi măng cao (B30) thể hiện khả năng duy trì tính công tác tốt hơn. Việc sử dụng CN góp phần nâng cao cường độ nén, đặc biệt ở tuổi dài ngày, với hiệu quả rõ rệt hơn ở bê tông cấp bền cao, nhờ hiệu ứng lấp đầy và cải thiện cấu trúc lèn chặt của vật liệu. Đồng thời, tốc độ phát triển cường độ của bê tông sử dụng CN cũng được cải thiện. Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, nghiên cứu đề xuất các hệ số chuyển đổi cường độ nén giữa mẫu lập phương, mẫu lăng trụ và mẫu trụ đối với bê tông sử dụng các tỷ lệ CN khác nhau. Các hệ số này phụ thuộc theo hàm lượng CN, phản ánh ảnh hưởng của đặc tính cốt liệu đến phân bố ứng suất và hiệu ứng hình dạng mẫu thử. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc hiểu rõ ứng xử của tính công tác theo thời gian và tính chất cơ học của bê tông sử dụng CN từ đá vôi, góp phần định hướng thiết kế cấp phối bê tông bền vững và hiệu chỉnh các hệ số chuyển đổi cường độ trong thực tiễn.

**Từ khóa:** Bột đá vôi; cát nhân tạo; tổn thất độ sụt; cường độ nén; hệ số chuyển đổi cường độ; bê tông bền vững.

## ABSTRACT

This study investigates the effects of limestone crushed sand (CS) as a partial and total replacement of natural sand (NS) on slump loss and compressive strength development of concrete. Two strength grades, B20 and B30, representing low and high cement content mixtures, were designed with 0%, 50%, and 100% CS replacement ratios. Slump loss was evaluated at 0, 30, 60, 90, and 120 minutes after mixing. Compressive strength was measured on cube specimens (150×150×150 mm) and prism specimens (150×150×600 mm) at 7, 14, and 28 days, as well as cylinder specimens (D×H=150×300 mm) at 28 days. The results indicate that increasing the CS content significantly accelerates slump loss, particularly in low-cement-content concrete (B20), due to the higher surface area and angularity of crushed particles. In contrast, mixtures with higher cement content (B30) exhibit improved workability retention. The incorporation of CS enhances compressive strength, especially at later ages, with more pronounced effects observed in high-strength mixtures, attributed to the filler effect and improved particle packing. Additionally, the rate of strength development is accelerated in concretes containing crushed sand. Based on the experimental results, conversion factors between cube, prism, and cylinder compressive strengths are proposed for

concretes with different crushed sand contents. These factors depend on the replacement ratio, highlighting the influence of aggregate characteristics on stress distribution and specimen geometry effects. The findings provide a comprehensive understanding of the time-dependent workability and mechanical performance of concrete incorporating limestone CS, contributing to the optimization of sustainable concrete mixtures and the refinement of strength conversion coefficients for practical applications.

**Keywords:** Limestone fines; manufactured sand; slump loss; compressive strength; strength conversion factors; sustainable concrete.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, nhu cầu sử dụng cát làm vật liệu xây dựng tại Việt Nam gia tăng nhanh chóng cùng với tốc độ đô thị hóa và phát triển hạ tầng. Theo báo cáo của Bộ Xây dựng [1], tổng nhu cầu cát xây dựng tại Việt Nam ước tính dao động khoảng 120 - 130 triệu m<sup>3</sup>/năm, trong khi tổng trữ lượng cát sông có thể khai thác hợp pháp chỉ đáp ứng khoảng 60 - 70% nhu cầu thực tế. Sự mất cân đối cung - cầu này đã dẫn đến tình trạng khan hiếm cát quá mức, nguồn cung bị gián đoạn, giá cả vật liệu này tăng cao đã đẩy nhanh chi phí xây dựng và ảnh hưởng đến tiến độ công trình. Việc khai thác CTN với quy mô lớn cũng đã gây ra nhiều hệ lụy nghiêm trọng như suy giảm tài nguyên, sạt lở bờ sông và tác động tiêu cực đến hệ sinh thái. Hơn nữa, các quy định về quản lý, khai thác tài nguyên ngày càng chặt chẽ khiến nguồn cung CTN tiếp tục bị hạn chế. Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu và sử dụng các vật liệu thay thế, đặc biệt là CN từ đá vôi, được xem là giải pháp cấp thiết nhằm đảm bảo nguồn cung ổn định và hướng tới phát triển vật liệu xây dựng bền vững [2, 3].

CN có đặc tính rất khác so với CTN do đó ảnh hưởng lớn đến các tính chất của hỗn hợp vữa và bê tông khi sử dụng loại vật liệu này. Khác với CTN có dạng hạt hình tròn và bề mặt trơn nhẵn, CN có đặc điểm hình học hạt góc cạnh, bề mặt nhám ráp, diện tích bề mặt riêng lớn và chứa nhiều hạt mịn, dẫn đến làm thay đổi đáng kể về tính công tác và tính chất cơ học của bê tông [4]. Một trong những vấn đề kỹ thuật quan trọng nhưng chưa được làm rõ đầy đủ là sự tổn thất độ sụt theo thời gian và mối quan hệ giữa hàm lượng CN với sự phát triển cường độ của bê tông. Do đó, việc thay thế này không chỉ đơn thuần là bài toán đảm bảo nguồn vật liệu mà còn đặt ra các thách thức kỹ thuật cần tiếp tục nghiên cứu phân tích chuyên sâu liên quan đến tính công tác, tính ổn định theo thời gian và tính chất cơ học của bê tông, đặc biệt trong điều kiện thi công thực tế tại Việt Nam.

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của CN và cốt liệu đá vôi đến tính chất của bê tông. Menadi và cộng sự [5] chỉ ra rằng việc sử dụng CN từ đá vôi có thể cải thiện cường độ và độ bền lâu của bê tông nhờ hiệu ứng lấp đầy và tăng độ đặc chắc của cấu trúc vi mô. Donza và cộng sự [6] cũng ghi nhận rằng CN làm tăng cường độ nén do cải thiện cấu trúc hạt và tăng khả năng liên kết giữa hồ xi măng và bề mặt hạt cốt liệu. Xin Xin Ding và cộng sự [7] đã chứng minh rằng bê tông sử dụng cát nhân tạo có khả năng phát triển cường độ tuổi dài ngày tốt hơn so với bê tông sử dụng CTN, đặc biệt khi tối ưu cấp phối hạt. Bên cạnh đó, các nghiên cứu tổng quan gần đây như Ziyang Li và cộng sự [4] đã khẳng định tiềm năng của cốt liệu mịn (từ đá granite, đá vôi) trong việc nâng cao tính chất cơ học và giảm phát thải carbon trong bê tông. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng CN làm giảm tính công tác của hỗn hợp bê tông do đặc điểm hình học góc cạnh và diện tích bề mặt lớn, dẫn đến nhu cầu nước cao hơn và tốc độ mất độ sụt nhanh hơn [4, 5]. Nhưng Celik và Marar và cộng sự [8] đã cho rằng CN từ đá vôi và bột đá có thể được sử dụng hiệu quả trong bê tông ngay cả khi không sử dụng phụ gia siêu dẻo, mặc dù tính công tác bị suy giảm đáng kể [4]. Một số nghiên cứu gần đây tập trung vào cấu trúc vi mô cũng cho thấy rằng sự phân bố kích thước hạt và hàm lượng hạt mịn đóng vai trò quyết định đến cả tính công tác và cường độ của bê tông sử dụng CN [5, 9]. Có thể nói rằng CN đã được nhiều nghiên

cứu sử dụng trong sản xuất bê tông trên thế giới, tuy nhiên quy luật ảnh hưởng của vật liệu này đến các tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông vẫn còn nhiều điểm chưa thống nhất, tùy thuộc vào thành phần vật liệu, cấu trúc hạt và loại bê tông nghiên cứu.

Tại Việt Nam, nghiên cứu về CN đã được quan tâm từ khá sớm và có nhiều đóng góp quan trọng cả về lý thuyết và thực tiễn. Tuyển tập hội thảo khoa học toàn quốc “Cát nghiền thay thế cát tự nhiên- Vật liệu thân thiện môi trường” đã tổng hợp nhiều kết quả nghiên cứu cho thấy CN có thể thay thế một phần hoặc hoàn toàn CTN trong bê tông nếu được kiểm soát hợp lý về thành phần hạt và hàm lượng hạt mịn [2]. Tiêu chuẩn TCVN 9205:2012 cũng đã được ban hành [10], tạo cơ sở pháp lý cho việc sử dụng CN trong xây dựng. Các nghiên cứu trong nước như “Kết hợp cát nghiền và cát mịn trong chế tạo bê tông” cho thấy việc phối trộn hợp lý có thể cải thiện tính công tác mà vẫn đảm bảo cường độ [11]. Nghiên cứu Nguyễn Văn Đoàn và cộng sự [12] đã chỉ ra rằng CN làm tăng cường độ nén nhưng làm giảm độ sụt ban đầu của hỗn hợp bê tông. Ngoài ra, nghiên cứu thực nghiệm về sử dụng CN đá vôi cho kết cấu cột bê tông cốt thép chịu nén cho thấy khả năng ứng dụng thực tế là khả thi, với cường độ đạt yêu cầu thiết kế [13]. Đặc biệt, các nghiên cứu về bê tông cường độ siêu cao (đạt tới 120 MPa) sử dụng CN đã chứng minh tiềm năng vượt trội của vật liệu này trong các ứng dụng đặc biệt [14]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trong nước tập trung vào cường độ nén tại một số tuổi tiêu chuẩn hoặc tính công tác ban đầu, trong khi các vấn đề về tổn thất độ sụt theo thời gian và sự phát triển cường độ chưa được nghiên cứu một cách hệ thống.

Từ các phân tích trên cho thấy, vẫn tồn tại một số khoảng trống khoa học quan trọng. Thứ nhất, các nghiên cứu về tính công tác chủ yếu dừng lại ở giá trị độ sụt ban đầu, trong khi tổn thất độ sụt theo thời gian - yếu tố có ý nghĩa thực tiễn quan trọng trong thi công bê tông vẫn chưa được đánh giá một cách hệ thống và định lượng. Thứ hai, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào cường độ chịu nén tại một số tuổi tiêu chuẩn mà chưa phân tích đầy đủ tốc độ phát triển cường độ theo thời gian, đặc biệt trong mối liên hệ với hàm lượng xi măng và tỷ lệ CN. Thứ ba, sự khác biệt về cường độ nén giữa các dạng mẫu thử (lập phương, trụ, lăng trụ) đối với bê tông sử dụng CN chưa được nghiên cứu đầy đủ, dẫn đến thiếu cơ sở để hiệu chỉnh các hệ số chuyển đổi trong thiết kế và kiểm định. Xuất phát từ các khoảng trống này, nghiên cứu này tập trung làm rõ ảnh hưởng của hàm lượng CN đến tổn thất độ sụt theo thời gian và sự phát triển cường độ nén của bê tông ở các cấp bền khác nhau, đồng thời đề xuất các hệ số chuyển đổi cường độ nén giữa các loại mẫu thử. Kết quả nghiên cứu không chỉ đóng góp về mặt học thuật trong việc hiểu rõ cơ chế ảnh hưởng của CN, mà còn có ý nghĩa thực tiễn trong thiết kế cấp phối và kiểm soát chất lượng bê tông sử dụng vật liệu thay thế này, góp phần thúc đẩy ứng dụng vật liệu bền vững trong xây dựng tại Việt Nam.

## 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Vật liệu sử dụng

Trong nghiên cứu này, 2 loại cát gồm cát vàng tự nhiên (CTN) và cát nhân tạo nghiền từ đá vôi Hà Nam (CN) được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ CN thay thế CTN đến tổn thất độ sụt và cường độ chịu nén của bê tông xi măng chịu lực. Các vật liệu được đánh giá kiểm tra tính chất cơ bản theo TCVN 7570:2006 và TCVN

9205:2012 (Hình 1). Cốt liệu lớn sử dụng trong nghiên cứu là đá dăm tự nhiên (ĐD) có  $D_{max} = 20$  mm. Bảng 1 thể hiện các tính chất cơ bản của ĐD, CTN và CN. Đường kính trung bình và tổng diện tích bề mặt hạt cát được tính toán theo công thức (1) và (2) [15]. Có thể thấy rằng, các loại cốt liệu có tính chất cơ bản đảm bảo yêu cầu theo TCVN 7570:2006 và TCVN 9205:2012. Từ Hình 1 cho thấy CN có hình dạng hạt sắc cạnh, mô-đun độ lớn cao và cỡ hạt đồng đều. Cả hai loại CTN và CN đều là loại cát thô, CN có thành phần hạt cát thô hơn CTN và có thành phần cấp phối đạt yêu cầu kỹ thuật của TCVN 7570:2006 và TCVN 9205: 2012 (Hình 2). Nhưng CN chứa nhiều bụi mịn hơn và hút nước cao hơn so với CTN (Bảng 1). Đường kính trung bình ( $D_{tb}$ ) của CTN đạt 0,394 mm cao hơn của CN đạt 0,303 mm nhưng tỷ diện tích ( $S$ ) và độ góc cạnh của CTN thấp hơn nhiều (28,4% và 5,92%) so với các giá trị này của CN. Do đó, loại cát này có thể giúp bê tông tăng cường độ bám dính nhưng làm giảm độ sụt hay tính công tác của hỗn hợp bê tông đòi hỏi phải điều chỉnh lượng nước và phụ gia hợp lý [12, 13].

$$D_{tb} = 0,5 \times \sqrt{\frac{a_{2,5} + a_{1,25} + a_{0,63} + a_{0,315} + a_{0,14}}{11a_{2,5} + 1,37a_{1,25} + 1,171a_{0,63} + 0,02a_{0,315} + 0,0024a_{0,14}}} \quad (1)$$

$$S = \frac{6}{\rho \times D_{tb}} \quad (2)$$

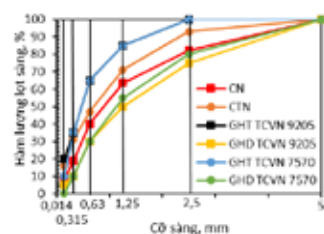
trong đó:  $a_{2,5}$ ,  $a_{1,25}$ ,  $a_{0,63}$ ,  $a_{0,315}$ ,  $a_{0,14}$ , là hàm lượng sót riêng trên sàng 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 mm

$\rho$ : là khối lượng riêng của cát

Xi măng sử dụng là loại PCB40 Vicem Bút Sơn có cường độ nén ở 3 ngày và 28 ngày đạt lần lượt là 26,7 MPa và 47,5 MPa, các tính chất cơ bản thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật của TCVN 6260: 2020. Nước sử dụng trong nghiên cứu là nước sinh hoạt.



Hình 1. Ảnh chụp CN (trái) và CTN (phải) sử dụng trong nghiên cứu



Hình 2. Biểu đồ thành phần hạt của CN, CTN so với yêu cầu của TCVN 9205:2012 và TCVN 7570:2006

Bảng 1. Các tính chất cơ bản của cốt liệu sử dụng

| STT | Tính chất                       | Đơn vị             | CTN    | CN     | ĐD   | Phương pháp thí nghiệm               |
|-----|---------------------------------|--------------------|--------|--------|------|--------------------------------------|
| 1   | Khối lượng riêng                | g/cm <sup>3</sup>  | 2,68   | 2,71   | 2,7  | TCVN 7572-4:2006<br>TCVN 7572-5:2006 |
| 2   | Khối lượng thể tích             | g/cm <sup>3</sup>  | 2,58   | 2,61   | 2,62 | TCVN 7572-4:2006<br>TCVN 7572-5:2006 |
| 3   | Độ hút nước bão hòa             | %                  | 1,2    | 3,4    | 2,8  | TCVN 7572-4:2006<br>TCVN 7572-5:2006 |
| 4   | Khối lượng thể tích xốp         | kg/m <sup>3</sup>  | 1430   | 1405   | 1510 | TCVN 7572-6:2006                     |
| 5   | Mô đun độ lớn                   |                    | 2,42   | 2,87   | -    | TCVN 7572-2:2006                     |
| 6   | Hàm lượng bụi bùn sét           | %                  | 1,6    | 2,0    | 0,12 | TCVN 7572-8:2006                     |
| 7   | Đường kính trung bình, $D_{tb}$ | mm                 | 0,394  | 0,303  | -    | Tính toán theo (1)                   |
| 8   | Tỷ diện tích, $S$               | cm <sup>2</sup> /g | 56,890 | 73,048 | -    | Tính toán theo (2)                   |
| 9   | Độ góc cạnh của cát             | %                  | 45,6   | 48,3   | -    | TCVN 8860-7:2011                     |
| 10  | Độ hao mòn Los Angeles          | %                  | -      | -      | 23,2 | TCVN 7572-12:2006                    |

## 2.2. Cấp phối thử nghiệm

Bê tông đối chứng sử dụng CTN được nghiên cứu đạt cấp độ bền B20 và B30. Hỗn hợp bê tông sử dụng cho thí công các kết cấu chịu lực thông thường và yêu cầu độ sụt bằng  $8 \pm 2$  cm. Hỗn hợp bê tông có tỷ lệ CN thay thế CTN lần lượt là 0%, 50% và 100% được ký hiệu là B20, B20-50CN, B20-100CN, B30, B30-50CN, B30-100CN. Thành phần vật liệu của các hỗn hợp bê tông sử dụng trong nghiên cứu được nêu ở Bảng 2. Tỷ lệ thể tích hồ xi măng/ thể tích cốt liệu ( $V_{hx}/V_{CL}$ ) trong các hỗn hợp bê tông được tính theo công thức (3). Từ Bảng 2 cho thấy tỷ lệ  $V_{hx}/V_{CL}$  trong các hỗn hợp bê tông B30 tăng lên rõ rệt, cao hơn 11,5% so với tỷ lệ này của hỗn hợp bê tông B20 (0,453). Điều này dẫn đến lượng hồ xi măng tăng thêm có thể bao bọc toàn bộ bề mặt hạt cốt liệu, tăng chiều dày lớp hồ xi măng và/ hoặc lấp đầy lỗ rỗng giữa các hạt cốt liệu, tăng độ đặc trong cấu trúc bê tông B30.

$$\frac{V_{hx}}{V_{CL}} = \frac{\frac{X}{\rho_{CTN}} + \frac{N}{\rho_{CN}}}{\frac{X}{\rho_{CTN}} + \frac{N}{\rho_{CN}} + \frac{DD}{\rho_{DD}}} \quad (3)$$

Trong đó:  $\rho_{CTN}$ ,  $\rho_{CN}$ ,  $\rho_{DD}$ ,  $\rho_N$ ,  $\rho_X$ : lần lượt là khối lượng riêng của CTN, CN, ĐD, nước và xi măng (kg/l)

Bảng 2. Thành phần bê tông sử dụng cát nghiền ở các tỷ lệ khác nhau

| No. | Ký hiệu cấp phối | XM, kg | CTN, kg | CN, kg | ĐD, kg | N, kg | $V_{hx}/V_{CL}$ |
|-----|------------------|--------|---------|--------|--------|-------|-----------------|
| 1   | B20              | 350    | 750     | 0      | 1020   | 185   | 0,453           |
| 2   | B20-50CN         | 350    | 375     | 375    | 1020   | 185   | 0,454           |
| 3   | B20-100CN        | 350    | 0       | 750    | 1020   | 185   | 0,455           |
| 4   | B30              | 430    | 680     | 0      | 1020   | 180   | 0,505           |
| 5   | B30-50CN         | 430    | 340     | 340    | 1020   | 180   | 0,506           |
| 6   | B30-100CN        | 430    | 0       | 680    | 1020   | 180   | 0,507           |

## 2.3. Phương pháp nghiên cứu

Để đánh giá sự ảnh hưởng của hàm lượng CN thay thế CTN đến tính chất hỗn hợp bê tông. Nghiên cứu này tập trung đánh giá tính công tác của hỗn hợp bê tông thông qua độ sụt. Độ sụt được xác định theo tiêu chuẩn hiện hành TCVN 3106:2022 và tổn thất độ sụt được đo tại các thời điểm 0, 30, 60, 90, 120 phút sau khi trộn. Cường độ nén và sự phát triển cường độ nén được xác định trên các tổ mẫu lập phương  $150 \times 150 \times 150$  mm và tổ mẫu lăng trụ  $150 \times 150 \times 600$  mm ở các tuổi bảo dưỡng 7, 14, 28 ngày. Mẫu trụ có  $D \times h = 150 \times 300$  mm cũng được chuẩn bị để xác định cường độ nén ở tuổi 28 ngày và so sánh ảnh hưởng của hình dạng mẫu. Quy trình thí nghiệm được thực hiện theo TCVN 3118:2022. Một số hình ảnh thí nghiệm được thể hiện như Hình 3.



Hình 3. Thử nghiệm độ sụt của hỗn hợp bê tông, đúc mẫu và thí nghiệm cường độ nén mẫu bê tông

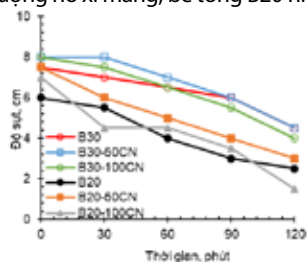
## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Độ sụt và tổn thất độ sụt theo thời gian

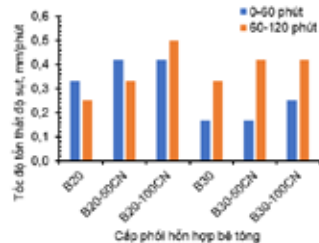
Kết quả phân tích ảnh hưởng của hàm lượng CN thay thế CTN đến độ sụt và tổn thất độ sụt của hỗn hợp bê tông B20, B30 được thể hiện ở Hình 4 và Hình 5. Các giá trị thể hiện là giá trị trung bình của 2 lần thí nghiệm. Kết quả cho thấy độ sụt ban đầu của hỗn hợp bê tông sử dụng CN cao

hơn so với bê tông sử dụng CTN. Hỗn hợp bê tông B20 và B30 có độ sụt đạt 6,0 cm và 7,5 cm còn các hỗn hợp bê tông B20 và B30 sử dụng 50 - 100% CN lần lượt đạt 7 - 7,5 cm và 8,0 cm. Điều này có thể do khi trộn hỗn hợp bê tông, các loại cát và đá dầm đều trộn với lượng nước tự do và nước hấp phụ bão hòa khô bề mặt của hạt cốt liệu. Theo Bảng 1, độ hút nước bão hòa khô bề mặt của CN là 3,4% cao hơn giá trị này của CTN (1,2%) nhưng ở thời điểm ngay sau khi trộn, lượng nước này chưa được hút hết bởi các hạt CN nên nằm ở trạng thái tự do, từ đó làm giảm độ nhớt của hồ xi măng và tăng nhẹ độ sụt ban đầu của hỗn hợp bê tông. Nhưng khi ở thời điểm sau trộn tăng lên, độ sụt của các hỗn hợp bê tông đều giảm vì xi măng liên tục hút nước để thực hiện phản ứng thủy hóa; một phần nước trong hỗn hợp tiếp tục bị cốt liệu (cát, đá) khô hút và có thể bị bay hơi ra ngoài không khí. Do đó quá trình này làm hỗn hợp bê tông bị khô đi, giảm dần tính dẻo và trở nên đặc cứng hơn.

Hình 5 cho thấy tốc độ tổn thất độ sụt của hỗn hợp bê tông sử dụng CN tăng mạnh khi tăng hàm lượng cát nghiền. Trong 60 phút đầu sau khi trộn tốc độ tổn thất độ sụt của hỗn hợp bê tông khá cao đạt  $0,17 \div 0,33$  mm/ph đối với hỗn hợp bê tông sử dụng CTN, và  $0,17 \div 0,42$  mm/ph đối với hỗn hợp bê tông sử dụng CN. Trong 60÷120 phút sau khi trộn tốc độ tổn thất độ sụt của hỗn hợp bê tông sử dụng CN tiếp tục tăng mạnh hơn đạt  $0,33 \div 0,50$  mm/ph so với  $0,25 \div 0,33$  mm/ph của hỗn hợp bê tông đối chứng. Sau 120 phút, độ sụt của B20-100CN giảm mạnh nhất chỉ còn 1,5 cm; B30-100CN giảm ít hơn (còn 4,0 cm) do hàm lượng hồ xi măng cao hơn. Cát nghiền có đặc tính bề mặt nhám ráp, hình dạng góc cạnh lớn nên tăng nội ma sát trong hỗn hợp; hàm lượng hạt mịn trong cát nghiền cao sẽ hấp phụ nhiều nước [4]. Điều này dẫn đến tốc độ tổn thất độ sụt của hỗn hợp bê tông sử dụng cát nghiền luôn cao hơn so với hỗn hợp sử dụng cát tự nhiên. Khi so sánh giữa các loại hỗn hợp bê tông B20 và B30 cho thấy tốc độ tổn thất độ sụt của hỗn hợp bê tông B20 luôn cao hơn tốc độ tổn thất độ sụt của hỗn hợp bê tông B30 ở tất cả các khoảng thời gian 0÷60 phút hay 60÷120 phút. Điều này là do tổng thể tích hồ xi măng/thể tích cốt liệu ( $V_{h\text{xi}}/V_{cl}$ ) trong hỗn hợp bê tông B30 đạt khoảng 0,506 cao hơn 11,7% so với tỷ lệ này trong hỗn hợp bê tông B20 (chỉ đạt 0,453), nên lượng hồ xi măng ngoài việc bao bọc bôi trơn bề mặt hạt cốt liệu, lượng hồ xi măng còn dư sẽ đẩy xa các hạt cốt liệu giảm nội ma sát trong hỗn hợp bê tông. Điều này chứng tỏ ảnh hưởng của CN đến tốc độ tổn thất độ sụt rõ ràng hơn đối với hỗn hợp bê tông có tỷ lệ  $V_{h\text{xi}}/V_{cl}$  thấp. Từ đây có thể đưa ra kết luận là ảnh hưởng của CN đến tổn thất độ sụt phụ thuộc nhiều vào hàm lượng hồ xi măng; bê tông B20 nhạy cảm hơn so với bê tông B30.



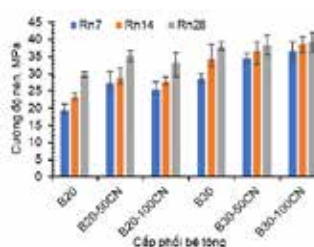
Hình 4. Ảnh hưởng của CN thay thế CTN đến độ sụt của hỗn hợp bê tông B20 và B30



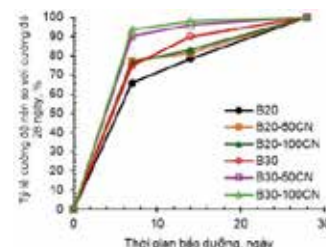
Hình 5. Ảnh hưởng của CN thay thế CTN đến tốc độ tổn thất độ sụt của hỗn hợp bê tông B20 và B30

### 3.2. Cường độ nén và sự phát triển cường độ nén theo thời gian

Kết quả ảnh hưởng của hàm lượng CN thay thế CTN đến cường độ nén của bê tông trên các mẫu lập phương 15x15x15 cm (Hình 6, Hình 7) và mẫu lăng trụ 15x15x60 cm (Hình 8) ở tuổi 7, 14 và 28 ngày, mẫu trụ  $d_{xh} = 15 \times 60$  cm ở tuổi 28 ngày (Hình 9). Các giá trị biểu diễn trong hình là giá trị trung bình của tổ mẫu gồm 3 mẫu thí nghiệm. Kết quả thực nghiệm cho thấy ảnh hưởng của cát nghiền từ đá vôi đến cường độ nén phụ thuộc đáng kể vào cấp nền bê tông, hàm lượng CN, hình dạng mẫu thử và tuổi bảo dưỡng mẫu.



Hình 6. Ảnh hưởng của CN đến cường độ nén bê tông B20 và B30 trên mẫu lập phương 15 cm



Hình 7. Ảnh hưởng của CN đến tốc độ phát triển cường độ nén trên mẫu lập phương 15 cm của bê tông B20 và B30

Đối với mẫu lập phương 150x150x150 mm (Hình 6), cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày của B20, B20-50CN và B20-100CN lần lượt đạt 29,6; 35,4 và 33,4 MPa. So với cấp phối đối chứng sử dụng 100% CTN, việc thay thế 50% và 100% cát tự nhiên bằng CN làm cường độ tăng tương ứng 19,6% và 12,8%. Đáng chú ý, hiệu quả tăng cường độ đạt giá trị lớn hơn ở tuổi sớm tại 7 ngày, cường độ của B20-50CN và B20-100CN cao hơn B20 lần lượt 40,0% và 30,8%; đến 14 ngày, các mức tăng tương ứng giảm xuống 24,1% và 19,4%. Xu hướng này cho thấy ảnh hưởng của CN đến cường độ không chỉ liên quan đến cường độ cuối cùng mà còn liên quan đến động học quá trình rắn chắc và phát triển cường độ của bê tông. Đối với B30, mức độ ảnh hưởng ở tuổi 28 ngày nhỏ hơn đáng kể. Cường độ của B30, B30-50CN và B30-100CN lần lượt đạt 38,0; 38,3 và 39,4 MPa, tương ứng với mức tăng chỉ 0,8% và 3,9% khi sử dụng CN. Như vậy, lợi ích về cường độ của cát nghiền thể hiện rõ hơn đối với cấp phối bê tông B20 có hàm lượng xi măng thấp hơn, trong khi đối với bê tông B30, sự khác biệt cường độ ở tuổi 28 ngày trở nên không đáng kể.

Sự gia tăng cường độ của bê tông sử dụng CN (Hình 7), đặc biệt ở cấp phối B20, có thể được giải thích bởi sự kết hợp giữa hiệu ứng lấp đầy, cải thiện cấp phối hạt và tăng khả năng chèn móc cơ học giữa các hạt cốt liệu [16]. Cát nghiền từ đá vôi có các hạt tương đối góc cạnh, bề mặt nhám và thường chứa tỷ lệ hạt mịn cao hơn cát tự nhiên. Các đặc điểm này làm tăng diện tích tiếp xúc giữa hạt cốt liệu và hồ xi măng, đồng thời các hạt mịn có khả năng lấp đầy một phần khoảng trống giữa các hạt lớn, từ đó làm tăng độ đặc chắc của cấu trúc bê tông [5]. Hiệu ứng này đặc biệt có ý nghĩa đối với cấp phối B20 do hàm lượng xi măng chỉ 350 kg/m<sup>3</sup>, thấp hơn đáng kể so với 430 kg/m<sup>3</sup> của B30. Khi hỗn hợp bê tông có hàm lượng hồ xi măng thấp, việc tối ưu cấu trúc hạt thông qua CN có thể tạo ra sự thay đổi tương đối lớn hơn về độ rỗng và khả năng truyền ứng suất. Ngược lại, đối với B30, lượng hồ xi măng lớn hơn đã tạo điều kiện bao phủ và lấp đầy tốt hơn khoảng trống giữa các hạt cốt liệu. Vì vậy, phần lợi ích bổ sung từ hiệu ứng điển đầy của CN trở nên hạn chế. Kết quả thực nghiệm cho thấy giả thuyết này phù hợp với xu hướng phát triển cường độ. Tỷ số cường độ nén ở tuổi 7 ngày/28 ngày của mẫu lập phương lần lượt là 65,7%, 77,2% và 76,5% đối với B20, B20-50CN và B20-100CN; đối với B30, các tỷ số này tương ứng là 74,8%, 90,2% và 93,6%. Như vậy, CN làm tăng đáng kể tốc độ phát triển cường độ ở tuổi sớm, đặc biệt đối với B30, mặc dù mức tăng cường độ cuối cùng ở 28 ngày lại khá nhỏ. Hiện tượng này cho thấy cơ chế tác động của CN có thể liên quan đến việc cải thiện cấu trúc hạt và thúc đẩy quá trình hình thành cấu trúc chịu lực ở giai đoạn đầu, thay vì đơn thuần làm tăng cường độ cuối cùng.

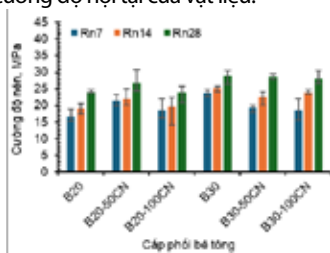
Một kết quả đáng chú ý khác là việc thay thế 100% CTN không tiếp tục làm tăng cường độ so với tỷ lệ thay thế 50%. Đối với B20, cường độ 28 ngày của B20-50CN đạt 35,4 MPa, cao hơn B20-100CN khoảng 6,0%. Điều này cho thấy ảnh hưởng của CN không có quan hệ tuyến tính với tỷ lệ thay thế. Khi tăng hàm lượng CN từ 50% lên 100%, lợi ích do cải thiện khả năng lấp đầy và lực chèn móc có thể bị bù trừ bởi sự gia tăng diện tích bề mặt riêng, nội ma sát và lượng hồ xi măng yêu cầu để bao phủ hạt cốt liệu. Với cùng hàm lượng hồ xi măng và nước trong nhóm B20, việc sử dụng 100% CN có thể làm giảm khả năng duy trì cấu trúc

đồng nhất của hỗn hợp, đặc biệt khi hàm lượng hạt góc cạnh và hạt mịn tăng. Sự gia tăng độ phân tán của kết quả cũng ủng hộ nhận định này. Hệ số biến thiên CV của cường độ mẫu lập phương 28 ngày tăng từ 2,62% đối với B20 lên 4,7% đối với B20-50CN và 11,5% đối với B20-100CN. Do đó, trong phạm vi cấp phối nghiên cứu, tỷ lệ thay thế khoảng 50% có thể được xem là vùng có hiệu quả thuận lợi hơn so với thay thế toàn phần, mặc dù cần có thêm thí nghiệm với các tỷ lệ trung gian để xác định chính xác tỷ lệ tối ưu.

Bảng 3. Tỷ lệ tăng/giảm cường độ do cát nghiền so với mẫu đối chứng sử dụng CTN

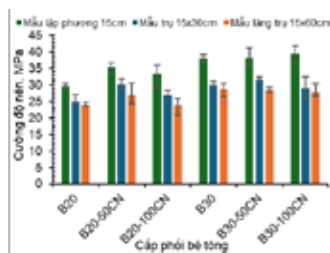
| Loại mẫu/ ngày tuổi | Tỷ lệ tăng/giảm cường độ so với mẫu đối chứng, % |           |          |           |
|---------------------|--------------------------------------------------|-----------|----------|-----------|
|                     | B20-50CN                                         | B20-100CN | B30-50CN | B30-100CN |
| Lập phương/ 7 ngày  | 40,2                                             | 31,2      | 21,2     | 29,4      |
| Lập phương/ 14 ngày | 24,0                                             | 19,1      | 7,1      | 12,5      |
| Lập phương/ 28 ngày | 19,3                                             | 12,6      | 0,6      | 3,5       |
| Lăng trụ/ 7 ngày    | 28,5                                             | 11,6      | -18,7    | -21,9     |
| Lăng trụ/ 14 ngày   | 15,1                                             | 2,9       | -9,8     | -5,1      |
| Lăng trụ/ 28 ngày   | 11,6                                             | -0,4      | -0,7     | -2,8      |
| Trụ/ 28 ngày        | 20,7                                             | 7,5       | 5,6      | -3,9      |

Sự ảnh hưởng của CN đến cường độ nén bê tông cũng phụ thuộc vào hình dạng mẫu thí nghiệm ở Bảng 3 và Hình 8. Sự ảnh hưởng cường độ nén do được thể hiện rõ hơn khi so sánh mẫu lập phương, mẫu trụ và mẫu lăng trụ ở các tuổi 28 ngày được thể hiện ở Hình 9. Đối với B20-50CN, cường độ 28 ngày của mẫu lập phương đạt 35,4 MPa, trong khi mẫu trụ và mẫu lăng trụ chỉ đạt lần lượt 30,3 và 26,9 MPa. Như vậy, mức tăng so với B20 giảm từ 19,6% trên mẫu lập phương xuống 20,7% trên mẫu trụ và 11,6% trên mẫu lăng trụ. Đối với mẫu bê tông B20-100CN, các mức tăng tương ứng là 12,6%, 7,5% và -0,4%. Đối với bê tông B30, sự khác biệt còn rõ hơn. Mẫu bê tông B30-50CN tăng 0,6% trên mẫu lập phương và 5,6% trên mẫu trụ nhưng giảm 0,7% trên mẫu lăng trụ. Mẫu B30-100CN tăng 3,5% trên mẫu lập phương nhưng giảm 3,9% và 2,8% lần lượt trên mẫu trụ và mẫu lăng trụ. Kết quả này cho thấy mức tăng cường độ quan sát được trên mẫu lập phương không thể được quy hoàn toàn cho sự cải thiện nội tại của vật liệu do cát nghiền mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể của điều kiện biên và hình dạng mẫu. Về cơ chế, mẫu lập phương 15x15x15cm có tỷ số chiều cao/kích thước ngang bằng 1,0, do đó ma sát giữa hai đầu mẫu và bàn ép làm hạn chế đáng kể biến dạng nở ngang của bê tông. Trạng thái ứng suất trong các vùng gần hai đầu mẫu vì vậy có mức độ kiểm chế (hiệu ứng bó) ngang cao hơn so với phần giữa của mẫu trụ hoặc mẫu lăng trụ [17]. Hiệu ứng bó này làm tăng cường độ nén biểu kiến của mẫu lập phương. Khi sử dụng CN, khả năng liên kết chèn móc cơ học giữa các hạt cốt liệu và sự tương tác trên bề mặt hạt cốt liệu-hỗ xi măng được cải thiện rõ rệt. Do đó, cấu trúc bê tông có khả năng tăng cường hiệu quả hơn trạng thái kiểm chế ngang. Kết quả là hiệu ứng tăng cường độ nén do CN và hiệu ứng bó chặt của mẫu lập phương có thể cộng hưởng, dẫn đến mức tăng cường độ nén quan sát được lớn hơn mức tăng cường độ nội tại của vật liệu.



Hình 8. Ảnh hưởng của CN đến cường độ nén bê tông B20 và B30 trên mẫu lăng trụ 15x15x60 cm

Đối với mẫu trụ  $d \times h = 150 \times 300$  mm có tỷ số chiều cao/đường kính bằng 2,0, ảnh hưởng của ma sát và hiệu ứng bó ở hai đầu giảm so với



Hình 9. So sánh mức độ ảnh hưởng của CN đến cường độ nén ở 28 ngày trên mẫu bê tông có hình dáng khác nhau

mẫu lập phương, do đó cường độ đo được phản ánh gần hơn trạng thái chịu nén một trục của vật liệu [18]. Điều này giải thích tại sao lợi thế của CN giảm đối với mẫu trụ. Đặc biệt, đối với B20, mức tăng của B20-50CN và B20-100CN lần lượt là 20,7% và 7,5%, thấp hơn đáng kể hoặc tương đương với mức tăng đạt được trên mẫu lập phương. Đối với B30, hiệu ứng này gần như biến mất ở tỷ lệ thay thế 100%, khi cường độ của B30-100CN thấp hơn B30 là 3,9%. Tương tự, với mẫu lăng trụ 150x150x600 mm có tỷ số chiều cao/kích thước tiết diện bằng 4,0 và do đó chịu ảnh hưởng nhỏ hơn của hiệu ứng bó tại hai đầu [19]. Cường độ đo được trên mẫu này vì vậy có xu hướng phản ánh rõ hơn ứng xử chịu nén của phần vật liệu bê tông nằm giữa mẫu. Kết quả cho thấy lợi thế của CN hầu như biến mất ở tuổi 28 ngày. Đối với B20, mức tăng của B20-50CN chỉ còn 11,6%, trong khi B20-100CN thấp hơn đối chứng 0,4%. Đối với B30, cả hai cấp phối sử dụng cát nghiền đều cho cường độ thấp hơn mẫu đối chứng, lần lượt 0,7% và 2,8%. Bên cạnh đó, do bản thân trong hạt CN có thể tồn tại các khuyết tật nứt trong hạt khi gia công nghiền đập nên cường độ nén của hạt yếu cũng dẫn đến cường độ bê tông thu được thấp và độ phân tán của kết quả mẫu lăng trụ có xu hướng tăng cao hơn khi sử dụng CN, đặc biệt đối với B20-100CN, với CV ở 14 ngày đạt 24,26%. Do đó, sự suy giảm cường độ lăng trụ không nên được quy hoàn toàn cho ảnh hưởng bất lợi của CN mà cần xem xét đồng thời ảnh hưởng của hình dạng mẫu, sự giảm hiệu ứng bó, tính không đồng nhất của cấu trúc bê tông và độ phân tán kết quả thực nghiệm.

### 3.3. Đề xuất hệ số chuyển đổi cường độ nén giữa các loại mẫu

Kết quả cụ thể so sánh cường độ nén ở tuổi 28 ngày giữa các loại mẫu bê tông được thể hiện ở Hình 9 và Bảng 4. Rõ ràng ở tất cả các loại bê tông thì cường độ nén trên mẫu lăng trụ và mẫu trụ đều nhỏ hơn so với cường độ nén của bê tông tương ứng trên mẫu lập phương. Các kết quả trên cũng được phản ánh qua hệ số chuyển đổi cường độ nén giữa các dạng mẫu (Bảng 4). Tại 28 ngày, hệ số giữa cường độ nén mẫu trụ và mẫu lập phương ( $K_{Tr}=R_{Tr}/R_{Lp}$ ) lần lượt đạt 0,846; 0,856 và 0,807 đối với B20, B20-50CN và B20-100CN; đối với B30, các giá trị tương ứng là 0,792; 0,831 và 0,735. Hệ số giữa cường độ nén mẫu lăng trụ và mẫu lập phương ( $K_{Lt}=R_{Lt}/R_{Lp}$ ) lần lượt đạt 0,812; 0,759 và 0,718 đối với B20 và 0,757; 0,747 và 0,711 đối với B30. Như vậy, hệ số chuyển đổi cường độ nén không phải là một giá trị cố định mà phụ thuộc vào cả cấp bền và tỷ lệ cát nghiền. Đáng chú ý,  $K_{Lt}$  có xu hướng giảm khi tăng tỷ lệ CN, đặc biệt rõ đối với B20, từ 0,812 ở cấp phối đối chứng xuống 0,718 khi sử dụng 100% CN. Kết quả này cho thấy ảnh hưởng của CN đến cường độ biểu kiến của mẫu lập phương lớn hơn so với mẫu có tỷ lệ hình học lớn, qua đó cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc xây dựng hệ số chuyển đổi riêng đối với bê tông sử dụng CN.

Kiểm tra độ phân tán của kết quả cường độ nén mẫu lập phương ở 28 ngày (CV) cho thấy khi tăng hàm lượng cát nghiền từ 50% lên 100%, độ phân tán của cường độ có xu hướng tăng (Bảng 4). Đặc biệt B20-100CN có CV=11,45% so với chỉ CV=2,62% của B20. Điều này củng cố giả thuyết rằng 100% CN làm cấu trúc bê tông nhạy cảm hơn với sự phân bố vật liệu và điều kiện đúc mẫu. CV của mẫu lăng trụ còn thể hiện rõ hơn ở bê tông B20, CV của mẫu B20 là 2,53%; B20-50CN là 12,72% và B20-100CN là 11,19%. Đặc biệt ở 14 ngày các giá trị lần lượt đạt 8,48%; 11,66% và 24,26%. Điều đó cho thấy kết quả mẫu lăng trụ 150x150x600 mm nhạy hơn rất nhiều với sự không đồng nhất của cấu trúc bê tông, đặc biệt khi sử dụng 100% CN. Phân tích thống kê ở tuổi 28 ngày cho thấy mức tăng cường độ của B20-50CN so với B20 là có ý nghĩa thống kê đối với mẫu lập phương và mẫu trụ, với giá trị p lần lượt bằng 0,014 và 0,023. Tuy nhiên, sự khác biệt giữa B20-100CN và B20 không đạt mức ý nghĩa 5% đối với cả ba dạng mẫu. Đối với B30, các khác biệt giữa cấp phối bê tông sử dụng CN và cấp phối bê tông đối chứng đều không đạt ý nghĩa thống kê ở mức 5%. Kết quả này cho thấy cần thận trọng khi khái quát hóa ảnh hưởng của CN. Tác động tích cực rõ ràng nhất trong phạm vi nghiên cứu là đối với

B20 sử dụng 50% CN, trong khi đối với B30, sự thay đổi cường độ chủ yếu nằm trong phạm vi phân tán thực nghiệm.

Bảng 4. Hệ số thực nghiệm điều chỉnh cường độ  $K_{Tr}$ ,  $K_{Lr}$  và độ dao động kết quả CV

| Hệ số                               | B20   | B20-50CN | B20-100CN | B30   | B30-50CN | B30-100CN |
|-------------------------------------|-------|----------|-----------|-------|----------|-----------|
| $K_{Tr}=R_{Tr}/R_{lp}$              | 0,846 | 0,856    | 0,807     | 0,792 | 0,831    | 0,735     |
| $K_{Lr}=R_{Lr}/R_{lp}$              | 0,812 | 0,759    | 0,718     | 0,757 | 0,747    | 0,711     |
| CV mẫu lập phương ở tuổi 28 ngày, % | 2,62  | 4,71     | 11,45     | 3,07  | 7,34     | 7,15      |

Từ các kết quả thực nghiệm có thể đề xuất mô hình cơ chế ảnh hưởng của CN đến cường độ nén của bê tông gồm bốn yếu tố tương tác chính: (i) hiệu ứng vật liệu của CN thông qua hình dạng góc cạnh, bề mặt nhám và khả năng chèn mốc cơ học; (ii) hiệu ứng lấp đầy và lên chặt do thành phần hạt mịn; (iii) ảnh hưởng của hàm lượng hồ xi măng và khả năng đáp ứng yêu cầu bao bọc bề mặt hạt cốt liệu; và (iv) hiệu ứng hình dạng mẫu và hiệu ứng bó trong phép thí nghiệm nén. Khi tăng tỷ lệ CN từ 0 lên 50%, ba yếu tố đầu tiên có xu hướng làm tăng khả năng truyền ứng suất và cường độ nén, đặc biệt trong bê tông B20. Khi tăng tiếp lên 100%, sự gia tăng diện tích bề mặt và nội ma sát có thể làm giảm hoặc triệt tiêu lợi ích của sự lên chặt. Đồng thời, khi tỷ số hình học của mẫu tăng từ 1,0 lên 2,0 và 4,0, ảnh hưởng của hiệu ứng bó giảm, làm cho mức tăng cường độ biểu kiến do CN giảm dần. Ngoài ra thực tế mẫu lập phương và mẫu lăng trụ được thí nghiệm nén vuông góc với phương chế tạo mẫu, còn mẫu trụ lại được đúc theo phương đứng và sau đó nén theo phương song song/trùng với chiều cao đúc, cho nên sự phân bố của cốt liệu và hướng đúc trong mẫu cũng có thể ảnh hưởng đến cường độ nén đo được của mẫu bê tông [20]. Do đó, cường độ nén đo được của bê tông sử dụng CN cần được xem là kết quả tổng hợp của đặc tính vật liệu và điều kiện biên của phép thử, thay vì chỉ phản ánh cường độ nội tại của bê tông.

#### 4. KẾT LUẬN

Dựa trên các kết quả nghiên cứu có thể đưa ra một số kết luận như sau:

✓ Cát nghiền có bề mặt nhám ráp và hình dạng hạt góc cạnh nên đã làm tăng đáng kể tổn thất độ sụt theo thời gian, đặc biệt cần kiểm soát tính công tác đối với bê tông có hàm lượng hồ xi măng thấp (B20);

✓ Khả năng liên kết bám dính của bề mặt hạt cát nghiền và đá xi măng tăng đã làm tăng cường độ nén của bê tông sử dụng cát nghiền, mức độ tăng rõ rệt hơn ở bê tông có hàm lượng hồ xi măng thấp (B20) khi khả năng liên kết này được hỗ trợ bởi sự tăng độ đặc vi cấu trúc trong bê tông.

✓ Cát nghiền có khả năng thúc đẩy sự phát triển cường độ nén của bê tông ở tuổi sớm cao hơn so với tuổi tiêu chuẩn nhờ khả năng hút nước của cát nghiền.

✓ Việc đánh giá ảnh hưởng của cát nghiền chỉ dựa trên mẫu lập phương có thể dẫn đến đánh giá cao hơn mức cải thiện cường độ thực của vật liệu. Việc đồng thời sử dụng mẫu lập phương, mẫu trụ và mẫu lăng trụ cho phép phân tách tương đối ảnh hưởng của vật liệu và ảnh hưởng của hình dạng mẫu.

✓ Hệ số chuyển đổi cường độ giữa các loại mẫu (lập phương, lăng trụ, trụ) phụ thuộc nhiều vào hàm lượng cát nghiền và các hệ số này cần được tiếp tục nghiên cứu với số lượng mẫu nhiều hơn nhằm hiệu chỉnh để đảm bảo độ chính xác trong đánh giá cường độ nén của bê tông. Đây là cơ sở quan trọng để đề xuất các hệ số chuyển đổi cường độ phù hợp cho bê tông sử dụng cát nghiền từ đá vôi và tránh áp dụng máy móc một hệ số chuyển đổi chung cho tất cả các loại cấp phối và hình dạng mẫu.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phạm Văn Bắc. Cát nghiền và khoáng sản thay thế cát tự nhiên: Tình hình đầu tư sản xuất - sử dụng cát nghiền, cơ chế chính sách phát triển và khuyến khích sử dụng cát nghiền và tro xỉ nhiệt điện trong sản xuất vật liệu xây dựng. Tuyển tập báo cáo hội thảo KHCN toàn quốc "Cát nghiền thay thế cát tự nhiên: Vật liệu thân thiện môi trường", NXB. Xây dựng, tr. 13-20, 2018.
- [2] Bạch Đình Thiên, Tống Tôn Kiên và Cao Thị Hương. Vật liệu thay thế cát tự nhiên và sử dụng tro xỉ nhà máy nhiệt điện trong sản xuất vật liệu xây dựng. Tuyển tập báo cáo hội thảo KHCN toàn quốc "Cát nghiền thay thế cát tự nhiên: Vật liệu thân thiện môi trường". NXB. Xây dựng, tr. 36-55, 2018.
- [3] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1266/QĐ-TTg ngày 18/8/2020: Phê duyệt Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021 - 2030, định hướng đến năm 2050.
- [4] Ziyang Li, Junying Lao, Lijie Wang, Namyo Salim Lim, Kang Hai Tan, Shunzhi Qian. A review on substitution of natural sand with granite fines in sustainable concrete. Construction and Building Materials, volume 346, 5 September 2022, 128417, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128417>.
- [5] Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., Ait-Mokhtar, A. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. Construction and Building Materials, vol. 23, no. 2, pp. 625-633. 2009, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.005>.
- [6] Donza, H., Cabrera, O., Irassar, E.F. High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research, vol. 32, no. 11, pp. 1755-1761, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00860-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00860-8).
- [7] Xinxin Ding, Changyong Li, Yangyang Xu, Fenglan Li, Shunbo Zhao. Experimental study on long-term compressive strength of concrete with manufactured sand. Construction and Building Materials, vol. 108, pp. 67-73, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.028>.
- [8] Celik, T., Marar, K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. Cement and Concrete Research, vol. 26, no. 7, pp. 1121-1130, 1996, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00078-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00078-6).
- [9] Quiroga, P.N., Fowler, D.W. The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete. ICAR 104-1F Report. International Center for Aggregates Research The University of Texas at Austin, 2004.
- [10] Nguyễn Duy Hiếu, Trương Thị Kim Xuân và Đỗ Trọng Toàn. Kết hợp cát nghiền và cát mịn trong chế tạo bê tông. Tuyển tập báo cáo hội thảo KHCN toàn quốc "Cát nghiền thay thế cát tự nhiên: Vật liệu thân thiện môi trường", NXB. Xây dựng, tr. 130-139, 2018.
- [11] TCVN 9205: 2012. Cát nghiền cho bê tông và vữa, 2012.
- [12] Nguyễn Văn Đoàn, Phan Văn Quỳnh, & Dương Thanh Qui. Ảnh hưởng của cát nghiền đến một số tính chất của bê tông. Tạp chí Vật liệu Và Xây dựng - Bộ Xây dựng, tập 15, số 6, tr. 7-12, 2025, <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2025.1130>.
- [13] Dũng, L. V., Kiên, T. T., Thành, Đỗ T., & Lâm, N. B. Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá khả năng sử dụng cát nghiền nguồn gốc đá vôi cho cột BTCT chịu nén. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN, tập 15, số 3V, tr. 93-103, 2021. [https://doi.org/10.31814/stce.nuce.2021-15\(3V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.nuce.2021-15(3V)-08).
- [14] Trần Quốc Hoàn. Nghiên cứu sử dụng cát nghiền chế tạo bê tông cường độ chịu nén đạt 120 MPa. Viện Khoa học công nghệ xây dựng, 2025.
- [15] Phùng Văn Lự, Nguyễn Anh Đức, Phạm Hữu Hanh, Trịnh Hồng Tùng. Bài tập Vật liệu xây dựng. NXB. Giáo dục Việt Nam, 1994.
- [16] Japhet Tiegoum Wembe, Luc Leroy Mambou Nguoyep, Emmanuel Elat Assoua Moukete, Javad Eslami, Prosper Pliya, Jean-Marie Bienvenu Ndjaka, Albert Noumowe. Physical, mechanical properties and microstructure of concretes made with natural and crushed aggregates: Application in building construction. Cleaner Materials, vol. 7, 2023, article 100173, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100173>.
- [17] Ali Abasi, Reza Hassanli, Thomas Vincent. Allan Manalo Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry. Construction and Building Materials, vol. 264, 20 December 2020, article 120182, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120182>.
- [18] C.T. Tam, Daneti S. Babu, W. Li. EN 206 Conformity Testing for Concrete Strength in Compression. Procedia Engineering, vol. 171, pp. 227-237, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.330>.
- [19] Matthews Vargas Vaucher Bandeira, Kevin Rebolledo La Torre, Luis Eduardo Kostas, Ederli Marangon, Jorge Daniel Rieral. Influence of contact friction in compression tests of concrete samples. Construction and Building Materials, vol. 317, 2022, article 125811, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125811>.
- [20] Seong-Tae Yi, Eun-Ik Yang, Joong-Cheol Choi. Effect of specimen sizes, specimen shapes and placement directions on compressive strength of concrete. Nuclear Engineering and Design, vol. 236, no. 2, pp. 115-127, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2005.08.004>.