

# Nghiên cứu so sánh một số tính chất cơ học và chỉ tiêu kinh tế giữa bê tông thông thường và bê tông đầm lăn xi trong đường giao thông

Lê Châu Tuấn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại Học Xây Dựng Miền Tây

## TỪ KHOÁ

Bê tông đầm lăn  
Đường giao thông  
Chỉ tiêu kinh tế  
Tính chất cơ học  
RCC

## TÓM TẮT

Bài báo này nhằm mục đích đánh giá tính chất cơ học và chi phí xây dựng đường giao thông khi sử dụng bê tông thông thường (PCC) và bê tông đầm lăn xi (RCC) trong cùng mức thiết kế. Trong nghiên cứu thực nghiệm này, các tính chất được kiểm tra trong bài báo này là cường độ nén (CĐCN), cường độ chịu kéo khi uốn (CĐCU) và chi phí xây dựng. Với mục đích này, ba hỗn hợp bê tông đầm lăn chính đã được thiết kế có chứa ba mức xi lò cao (0 %, 15 % và 30 % so với trọng lượng của vật liệu xi măng) ở hàm lượng ẩm tối ưu và hỗn hợp bê tông thông thường. Kết quả thử nghiệm cho thấy, ở 7 ngày tuổi CĐCN và CĐCU của RCC đều cao hơn so với PCC, đặc biệt là ở 0% xi lẫn lượt là 29,9 % và 27 %. Ở 28 ngày tuổi, RCC 15 % lại có CĐCN và CĐCU cao nhất, tăng lần lượt 9,1 % và 17,6 % so với mẫu PCC. Về chi phí xây dựng, RCC ở 3 mức xi đều có chi phí thấp hơn từ 31,2 % đến 34,7 % so với PCC.

## KEYWORDS

Roller compacted concrete  
Roads  
Economic indicators  
Mechanical properties  
RCC

## ABSTRACT

This paper aims to evaluate the mechanical properties and construction costs of roads using conventional concrete (PCC) and slag roller compacted concrete (RCC) of the same design grade. In this experimental study, the properties tested in this paper are compressive strength (CĐCN), flexural tensile strength (CĐCU) and construction costs. For this purpose, three main roller compacted concrete mixtures were designed containing three levels of blast furnace slag (0%, 15% and 30% by weight of cementitious materials) at optimum moisture content and conventional concrete mixtures. The test results showed that at 7 days of age, the CĐCN and CĐCU of RCC were higher than that of PCC, especially at 0% slag, which were 29.9% and 27%, respectively. At 28 days of age, 15% RCC had the highest CĐCN and CĐCU, increasing by 9.1% and 17.6% respectively compared to PCC. Regarding construction costs, RCC at all 3 slag levels had lower costs from 31.2% to 34.7% compared to PCC.

## 1. Giới thiệu

Trong bối cảnh phát triển hạ tầng giao thông ngày càng đòi hỏi các giải pháp bền vững, kinh tế và thi công nhanh, việc lựa chọn loại vật liệu phù hợp cho kết cấu mặt đường là một trong những yếu tố then chốt quyết định hiệu quả đầu tư công trình. Bê tông xi măng thông thường (PCC) từ lâu đã được sử dụng rộng rãi nhờ tính ổn định, khả năng chịu tải cao và tuổi thọ dài. Tuy nhiên, chi phí thi công và thời gian hoàn thành thường cao, đặc biệt là trong các dự án yêu cầu tiến độ gấp hoặc có điều kiện tài chính hạn chế. Bê tông đầm lăn (RCC) đã nổi lên như một giải pháp thay thế tiềm năng, đặc biệt trong thi công đường giao thông và bãi đỗ xe. Với đặc tính không cần cốt pha, không dùng cốt thép và khả năng thi công bằng thiết bị san lấp và lu đầm thông thường, RCC giúp rút ngắn thời gian thi công và giảm đáng kể chi phí xây dựng. Theo nghiên cứu của Harrington et al. [1] RCC đã chứng minh hiệu quả vượt trội về mặt chi phí thi công và bảo trì so với bê tông truyền thống trong các ứng dụng đường nội bộ và công nghiệp. Tương tự, ACI Committee 325 [2] ghi nhận rằng RCC đạt được cường độ nén cao trong thời gian ngắn và có khả năng kháng mài mòn tốt, phù

hợp với các tuyến đường có tải trọng lớn. Ở Việt Nam, việc nghiên cứu RCC ứng dụng RCC trong lĩnh vực giao thông còn tương đối hạn chế so với lĩnh vực thủy lợi, nhưng đã có những bước khởi đầu đáng chú ý ở một số địa phương và khu công nghiệp.

Tuy nhiên, việc áp dụng RCC cũng gặp phải một số thách thức, như yêu cầu về kiểm soát chất lượng nghiêm ngặt trong quá trình thi công và hạn chế về tính thẩm mỹ bề mặt so với PCC. Ngoài ra, việc thiết kế cấp phối và kiểm soát thi công RCC cũng đòi hỏi các tiêu chuẩn riêng, chưa được áp dụng rộng rãi tại nhiều quốc gia đang phát triển, trong đó có Việt Nam. Do đó, cần có những nghiên cứu so sánh toàn diện giữa RCC và PCC về các đặc tính cơ học, hiệu quả kinh tế và khả năng ứng dụng thực tế.

Trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh phát triển hạ tầng giao thông và hướng đến xây dựng bền vững, việc nghiên cứu và ứng dụng bê tông đầm lăn có sử dụng xi trong mặt đường là một hướng đi tiềm năng. Bài báo này nhằm mục tiêu đánh giá và so sánh hai loại kết cấu bê tông – bê tông xi măng thông thường và bê tông đầm lăn – khi sử dụng GGBFS thay thế xi măng từ 0 % đến 30 %, dựa trên một số đặc tính cơ học (cường độ nén, cường độ uốn) và chỉ tiêu kinh tế (chi phí vật liệu, nhân

\*Liên hệ tác giả: lechautuan@mtu.edu.vn

Nhận ngày 10/06/2025, sửa xong ngày 16/07/2025, chấp nhận đăng ngày 17/07/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2025.1028>

công, máy thi công) trong ứng dụng làm mặt đường giao thông. Thông qua so sánh các chỉ tiêu kinh tế và kết quả thực nghiệm, phân tích sẽ cung cấp cơ sở khoa học hỗ trợ các kỹ sư và nhà quản lý dự án lựa chọn giải pháp kết cấu, phù hợp với điều kiện kinh tế và thực tế từng khu vực.

## 2. Chương trình thí nghiệm

### 2.1 Vật liệu và hỗn hợp bê tông

#### 2.1.1 Vật liệu

Các vật liệu được sử dụng trong thí nghiệm này bao gồm xi măng, cát sông, đá dăm tự nhiên và xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS) được thí nghiệm theo TCVN [3,4,5]. Mỏ đá Tradico ở tỉnh An Giang, Việt Nam, cung cấp đá dăm tự nhiên được sử dụng làm cốt liệu thô và cốt liệu mịn là cát nghiền. Cát sông cũng được sử dụng làm cốt liệu mịn. Các tính chất vật lý của cốt liệu được thể hiện trong Bảng 1. Biểu đồ phân bố kích thước hạt của cốt liệu trong RCC được thiết kế theo ACPA (American Concrete Pavement Association) như thể hiện trong Hình 1 [6]. Xi măng Portland loại I do công ty Xi Măng Nghi Sơn sản xuất và GGBFS do công ty Phát Triển Quốc Tế Formosa tạo ra được sử dụng làm chất kết dính để sản xuất RCC. Kết quả phân tích hóa học của xi măng và GGBFS được báo cáo trong Bảng 2.

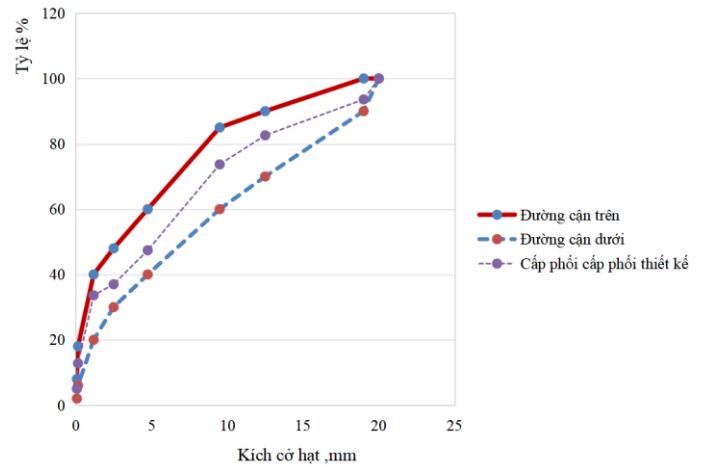
**Bảng 1.** Tính chất vật lý cơ bản của cốt liệu thô và cốt liệu mịn.

| Tính chất vật lý           | Đơn vị            | Đá 5x20 | Cát vàng | Cát nghiền |
|----------------------------|-------------------|---------|----------|------------|
| Kích thước cốt liệu tối đa | mm                | 5-20    | 0-2,5    | 0-5        |
| Khối lượng riêng           | g/cm <sup>3</sup> | 2,731   | 2,625    | 2,703      |
| Khối lượng thể tích xốp    | g/cm <sup>3</sup> | 1,505   | 1,542    | 1,586      |
| Độ ẩm vật liệu             | %                 | 0,530   | 1,890    | 1,320      |
| Mô đun độ lớn              |                   |         | 1,910    | 3,510      |

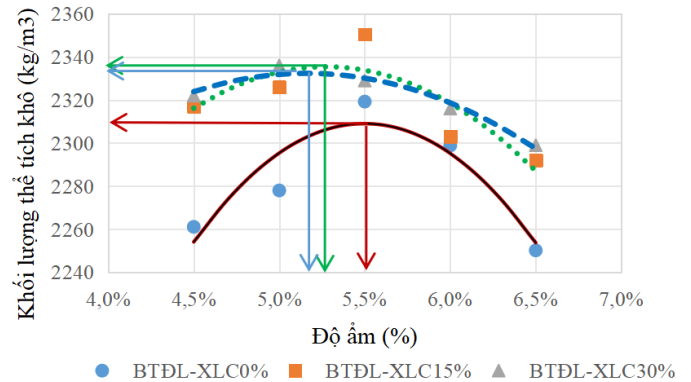
**Bảng 2.** Thành phần hóa học của xi măng và GGBFS.

| Chỉ tiêu thí nghiệm                      | Đơn vị             | Xi măng | GGBFS |
|------------------------------------------|--------------------|---------|-------|
| Độ mịn                                   | cm <sup>2</sup> /g | 4017    | 5260  |
| Thời gian đông kết                       |                    |         |       |
| - Bắt đầu                                | Phút               | 110     |       |
| - Kết thúc                               | Phút               | 190     |       |
| Khối lượng riêng                         | g/cm <sup>3</sup>  | 3,05    | 2,88  |
| Cường độ nén                             | MPa                |         |       |
| - 3 ngày ± 2h                            |                    | 34,2    |       |
| - 28 ngày ± 2h                           |                    | 57,2    |       |
| Tỷ lệ lưu động                           |                    |         | 98,6  |
| Độ ẩm                                    | %                  |         | 0,16  |
| Hàm lượng MgO                            | %                  | 1,85    | 7,50  |
| Hàm lượng CaO                            | %                  | 0,60    | 41,2  |
| Hàm lượng Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                  |         | 14,3  |
| Hàm lượng SiO <sub>2</sub>               | %                  |         | 34,1  |
| Hàm lượng SO <sub>3</sub>                | %                  | 2,66    | 0,24  |
| Hàm lượng mất khi nung                   | %                  | 1,92    | 0,35  |
| Hàm lượng Cl <sup>-</sup>                | %                  | 0,012   | 0,009 |

#### 2.1.2 Hỗn hợp bê tông



**Hình 1.** Biểu đồ thiết kế đường cấp phối của RCC.

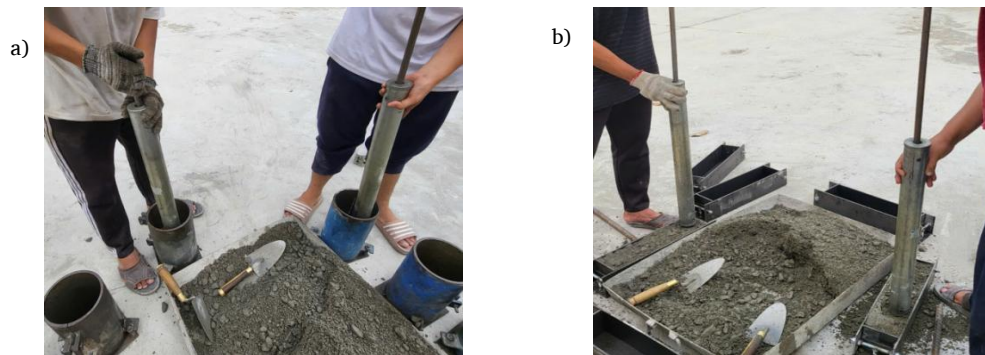


**Hình 2.** Biểu đồ đường cong độ ẩm của 3 cấp phối RCC.

Hỗn hợp PCC được thiết kế theo tiêu chuẩn Việt Nam, thành phần cấp phối được thể hiện trong Bảng 3. Hỗn hợp RCC được khám khảo thiết kế theo [6]. Sau khi thiết kế được thành phần cấp phối RCC dựa trên lượng nước theo kinh nghiệm, ta tiến hành xác định lượng nước tối ưu cho thành phần cấp phối. Đầu tiên, hỗn hợp RCC sau khi được trộn kỹ bằng tay sẽ được đổ vào khuôn hình trụ 150x300 mm thành bốn lớp liên tiếp. Mỗi lớp đã thực hành 56 lần đập bằng búa Proctor cải tiến với trọng lượng 4,5 kg, rơi từ độ cao 450 mm theo phương pháp thử nghiệm ASTM D-1557-12 [7]. Tổng cộng 15 mẫu hình trụ đã được chuẩn bị và mật độ khô của mỗi mẫu đã được xác định. Hàm lượng ẩm tối ưu được xác định thông qua biểu đồ đường cong parabol được vẽ dựa trên biểu đồ mật độ ẩm đã được phát triển với đầm Proctor cải tiến bằng cách thay đổi hàm lượng ẩm trong phạm vi 4,5–6,5% với mức tăng 0,5 % (Hình 2). Cuối cùng, với hàm lượng ẩm tối ưu ta có được thành phần cấp phối cho RCC như Bảng 3.

**Bảng 3.** Thành phần cấp phối cho bê tông thông thường (PCC) và bê tông đầm lăn (RCC) (tính cho 1 m<sup>3</sup>).

| Mác bê tông | XM OPC (kg) | XLC (kg) | Cát vàng (kg) | Cát nghiền (kg) | Đá 5x20 (kg) | Nước (lít) | Ghi chú |
|-------------|-------------|----------|---------------|-----------------|--------------|------------|---------|
| M300        | 340         | -        | 700           | -               | 1250         | 183        | PCC     |
| M300XLC0    | 250         | 0,00     | 520           | 860             | 620          | 123        | RCC     |
| M300XLC15   | 212.5       | 37.3     | 520           | 860             | 620          | 119        | RCC     |
| M300XLC30   | 175         | 75.0     | 520           | 860             | 620          | 116        | RCC     |



**Hình 3.** Đúc mẫu bê tông bằng đầm Proctor cải tiến: a) Đúc mẫu 150x300mm ; b) Đúc mẫu 100x100x400mm.

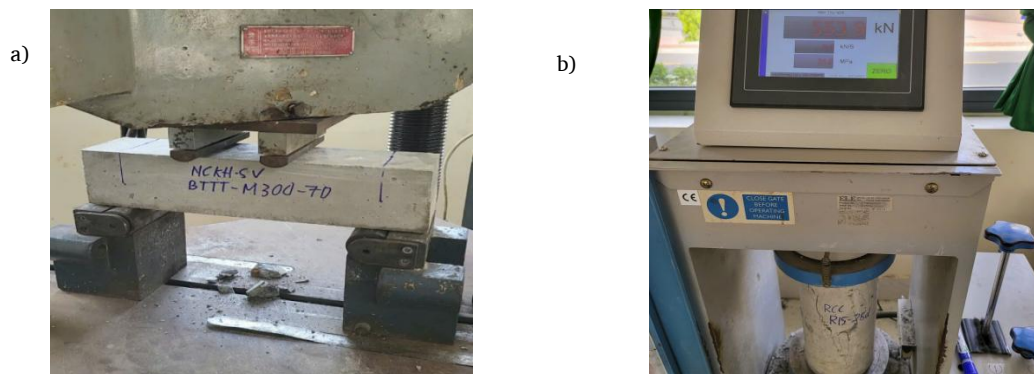
## 2.2 Số lượng mẫu và phương pháp thí nghiệm

Theo hàm lượng nước tối ưu và mật độ khô tối đa, tổng cộng 12 mẫu PCC và 36 mẫu RCC mẫu hình trụ (150x300 mm) đã được chuẩn bị để xác định cường độ nén và cường độ chịu kéo khi uốn với mẫu hình lăng trụ (100x100x400 mm) ở 7 và 28 ngày tuổi của thời gian bảo

dưỡng (Bảng 4). Tải trọng đã được thực hiện trên máy nén có công suất 2000 kN và tăng tải với tốc độ gần bằng khoảng  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s theo quy định trong TCVN 3118:2022 [8]. Đối với cường độ uốn, các mẫu đầm (100 x 100 x 400 mm) đã được thí nghiệm uốn bốn điểm bằng máy kéo nén đa năng và được gia tăng tải với tốc độ không đổi  $(0,05 \pm 0,01)$  MPa/s được quy định theo TCVN 3119:2022 [9].

**Bảng 4.** Thống kê số lượng mẫu trụ 150x300mm thí nghiệm nén (N) và mẫu 100x100x400mm thí nghiệm chịu kéo khi uốn (U)

| STT | Tên tổ mẫu                     | Ngày tuổi | Cường độ chịu nén (MPa) | Tỷ lệ XLC (%) | Ghi chú |
|-----|--------------------------------|-----------|-------------------------|---------------|---------|
| 1   | - M300-N<br>- M300-U           | 7 và 28   | 30                      | 0             | PCC     |
| 2   | - M300XLC0-N<br>- M300XLC0-U   | 7 và 28   |                         | 0             | RCC     |
| 3   | - M300XLC15-N<br>- M300XLC15-U |           |                         | 15            |         |
| 4   | - M300XLC30-N<br>- M300XLC30-U |           |                         | 30            |         |

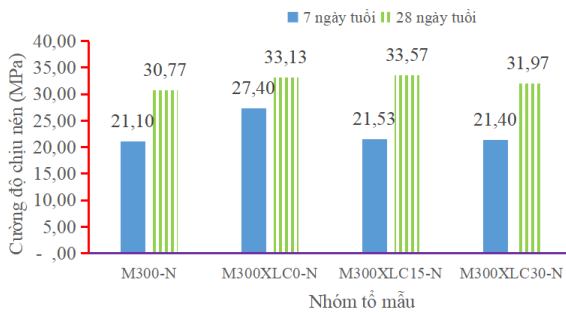


**Hình 4.** Thí nghiệm bê tông: a) thí nghiệm cường độ chịu kéo khi uốn; b) Thí nghiệm cường độ chịu nén.

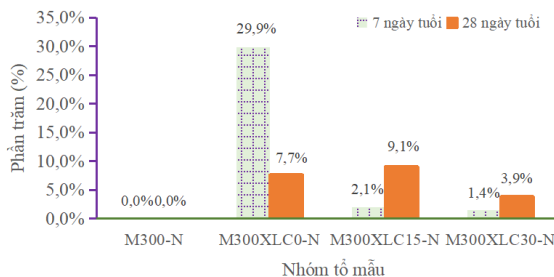
### 3. Đánh giá thảo luận kết quả thí nghiệm và chỉ tiêu kinh tế

#### 3.1 Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén

Tất cả các mẫu bê tông hình trụ đều được thử nghiệm bằng máy nén. Trước khi nén, lấy mẫu ra khỏi nước, bảo quản mẫu trong điều kiện phòng thí nghiệm với thời gian khoảng 24 giờ. Kết quả thử nghiệm nén được thể hiện qua Hình 5 và 6 được phân loại theo độ tuổi của bê tông là 7 ngày và 28 ngày. Kết quả thí nghiệm nén cho thấy, nhóm mẫu PCC (M300-N) có cường độ nén thấp nhất tại cả 7 và 28 ngày tuổi. Ở 7 ngày tuổi, nhóm mẫu RCC (M300XLC0-N) là lớn nhất trong các nhóm mẫu, tăng 29,9 % so với mẫu PCC (M300-N), các nhóm mẫu RCC còn lại vẫn cao hơn so với PCC nhưng không nhiều. Ở 28 ngày tuổi, tất cả nhóm mẫu RCC đều cao hơn so với nhóm mẫu PCC, trong đó M300XLC15-N là lớn nhất (tăng 9,1 % so với mẫu PCC (M300-N)).



Hình 5. CĐCN của các nhóm tổ mẫu ở 7 và 28 ngày tuổi.

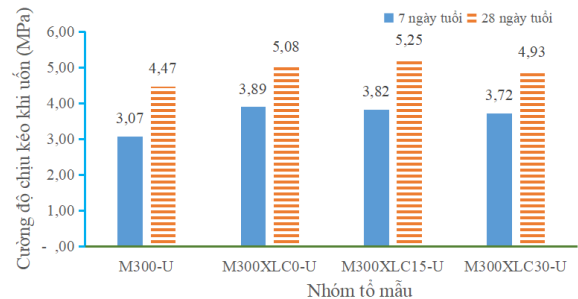


Hình 6. Biểu đồ tỷ lệ % CĐCN tăng của nhóm mẫu RCC so với mẫu PCC.

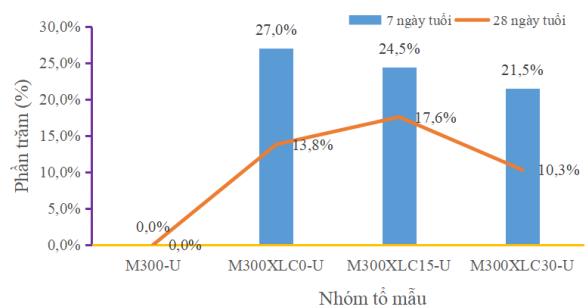
#### 3.2 Kết quả thí nghiệm cường độ chịu kéo khi uốn

Cường độ chịu kéo khi uốn của hỗn hợp PCC và RCC được xác định ở 7 và 28 ngày bảo dưỡng. Kết quả thí nghiệm được thể hiện qua hình 7 và hình 8 (do thí nghiệm cùng loại mẫu nên hệ số chuyển đổi  $\delta$  như nhau,  $\delta = 1$ ). Từ kết quả thí nghiệm cho thấy, ở 7 ngày tuổi, tất cả các mẫu RCC (M300XLC0-U, M300XLC15-U và M300XLC30-U) đều có CĐCU cao hơn rất nhiều so với mẫu PCC (M300-U) lần lượt là 51,8 %, 48,7 % và 45,2 %. Ở 28 ngày tuổi, tất cả các mẫu RCC (M300XLC0-U, M300XLC15-U và M300XLC30-U) vẫn có CĐCU cao hơn so với mẫu PCC (M300-U) nhưng tỷ lệ % không còn cao như 7 ngày tuổi nữa mà lần lượt là 13,8 %, 17,6 % và 10,3 %. Bên cạnh đó, cũng giống như mẫu kiểm tra CĐCN thì CĐCU của mẫu

M300XLC15-U vẫn cao nhất so với các nhóm mẫu còn lại. Cho thấy tỷ lệ GGBFS thay thế xi măng ở 15% là tối ưu nhất.



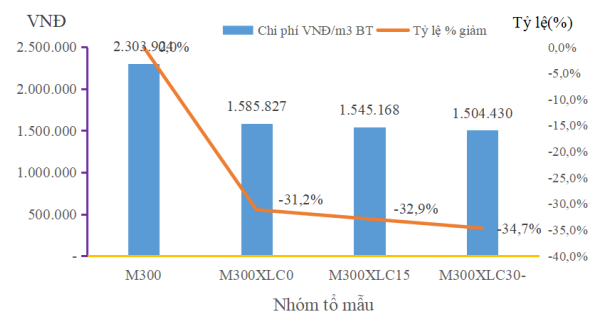
Hình 7. CĐCU của các tổ mẫu ở 7 và 28 ngày tuổi.



Hình 8. Biểu đồ tỷ lệ % CĐCU tăng của nhóm mẫu RCC so với mẫu PCC.

#### 3.3 So sánh chỉ tiêu kinh tế

Chi phí được tính dựa trên định mức xây dựng của Bộ Xây Dựng ban hành [10,11] và đơn giá xây dựng của tỉnh Vĩnh Long tháng 4/2025. Theo đó, chi phí để xây dựng 1m<sup>3</sup> bê tông đường giao thông có mức thiết kế 300 bằng bê tông thông thường phải tốn tới 2.303.924 đồng. Trong khi đó nếu làm bằng RCC sử dụng GGBFS thay thế xi măng lần lượt là 0 %, 15 % và 30 % thì sẽ giảm được chi phí đáng kể lần lượt là 1.585.827 đồng, 1.545.168 đồng và 1.504.430 đồng. Đồng nghĩa với việc giảm theo tỷ lệ phần trăm: -31,2 %, -32,9 % và -34,7 % (Hình 9). Nguyên nhân đường giao thông bằng PCC cao hơn RCC là do phải tốn chi phí ván khuôn, nhân công lắp đặt và tháo ván khuôn và đặc biệt là lượng xi măng tiêu thụ nhiều hơn 26,5 % so với RCC.



Hình 9. Biểu đồ so sánh chi phí xây dựng 1 m<sup>3</sup> PCC và RCC.

#### 4. Kết luận

Từ kết quả thí nghiệm trên ta có thể rút ra kết luận như sau:

- Ở 7 ngày tuổi, CĐCN và CĐCU của nhóm mẫu RCC cao hơn so với PCC, đặc biệt ở nhóm RCC (M300XLC0). Nguyên nhân là do phương pháp chế tạo khác nhau dẫn đến CĐCN và CĐCU có sự khác biệt lớn. Điều này là một lợi thế của RCC so với PCC vì nó có thể cho phép xe lưu thông sớm sau 3 ngày đổ bê tông khi được chế tạo đối với đường giao thông.
- Ở 28 ngày tuổi, CĐCN và CĐCU của nhóm mẫu RCC vẫn cao hơn so với PCC. Bên cạnh đó, kết hợp với hiệu quả kinh tế của RCC thì ta thấy lợi ích khi sử dụng RCC trong các dự án đường giao thông là rất lớn: vừa rút ngắn thời gian thi công, giảm kinh phí đầu tư, tiết kiệm nguồn nước, giảm lượng nhiệt phát thải CO<sub>2</sub> ra môi trường, ...
- Khi thay thế xi măng bằng GGBFS với tỷ lệ 15 % thì RCC sẽ cho kết quả thí nghiệm về CĐCN và CĐCU là cao nhất. Tuy nhiên, so với PCC thì thay thế hàm lượng xi măng bằng GGBFS với tỷ lệ 30 %, RCC vẫn mang lại hiệu quả kinh tế và kỹ thuật cao.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. Dale Harrington, P.E., Snyder and Associates, Inc, "Guide for Roller-compacted concrete pavements," *National Concrete Pavement Technology Center*, 2010.
- [2]. ACI 325.10R.95 (2001). *Report on Roller-Compacted Concrete Pavements*. Reported by ACI Committee 325.
- [3]. TCVN 7570:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [4]. TCVN 9382:2012. *Chỉ dẫn kỹ thuật lựa chọn thành phần bê tông sử dụng cát nghiền*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [5]. TCVN 11586:2016. *Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam
- [6]. ACPA (American Concrete Pavement Association) (2014). *Roller-Compacted Concrete Guide Specification*.
- [7]. ASTM D1557-12 (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*. doi: 10.1520/D1557-12.1.
- [8]. TCVN 3118:2022. *Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam
- [9]. TCVN 3119:2022. *Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu kéo khi uốn*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam
- [10]. Thông tư Ban hành Định mức xây dựng số 12/2021/TT-BXD ngày 31 tháng 8 năm 2021 của Bộ trưởng Bộ Xây dựng.
- [11]. Thông tư số 09/2024/TT-BXD của Bộ Xây dựng: Sửa đổi, bổ sung một số định mức xây dựng ban hành tại Thông tư số 12/2021/TT-BXD ngày 31 tháng 8 năm 2021 của Bộ trưởng Bộ Xây dựng
- [12]. Arash Aghaeipour, Morteza Madhkan, "Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability," *Construction and Building Materials*, Volume 141, pp. 533–541, 2017.
- [13]. Ali Mardani-Aghabaglou, Sultan Husein Bayqra, Süleyman Özen, Zia Ahmad Faqiri, Kambiz Ramyar, "Properties of Materials Used in Roller Compacted Concrete Mixtures," *International Journal of Engineering Research and Development*, Issue:1, pp. 61-72, 2020.
- [14]. My Ngoc-Tra Lam, Saravut Jaritngam, Duc-Hien Le, "Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties," *Construction and Building Materials*, Volume 154, pp 482-495, 2017.
- [15]. M. Selvam and S. Singh, "Comparative investigation of laboratory and field compaction techniques for designing roller compacted concrete pavements (RCCP)," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 24, no. 1, 2023, doi: 10.1080/10298436.2023.2177850.
- [16]. M. Selvam, K. NSSP, K. R. Kannan, and S. Singh, "Assessing the effect of different compaction mechanisms on the internal structure of roller compacted concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 365, no. November 2022, p. 130072, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130072.
- [17]. M. Selvam and S. Singh, "Comparative investigation of laboratory and field compaction techniques for designing roller compacted concrete pavements (RCCP)," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 24, no. 1, 2023, doi: 10.1080/10298436.2023.2177850.
- [18]. E. Rahmani, M. K. Sharbatdar, and M. H.A. Beygi, "Influence of cement contents on the fracture parameters of Roller compacted concrete pavement (RCCP)," *Construction and Building Materials*, vol. 289, p. 123159, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123159.
- [19]. E. Sengun, S. Kim & H. Ceylan, "A comparative study on structural design of plain and roller-compacted concrete for heavy-duty pavements", *Road Materials and Pavement Design*, 25:2, 392-422, 2024, DOI: 10.1080/14680629.2023.2209194.
- [20]. Ram Kumar B.A.V., Ramakrishna G., "Performance evaluation of sustainable materials in roller compacted concrete pavements: a state of art review", *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7:78, 2022, https://doi.org/10.1007/s41024-022-00212-y.
- [21]. Shahad Qais Abd Almajeed1, Zena K. Abbas, "Eco-Friendly Roller Compacted Concrete: A Review", *Journal of Engineering*, Volume 30 Number 7, July 2024, <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.07.09>.
- [22]. Marjono, Taufiq Rochman, "The Review on the Roller Compacted Concrete Performance: The Effect of Compaction Number on the Compressive Strength", *Civil Engineering and Architecture*, 11(5): 2392-2404, 2023, DOI: 10.13189/cea.2023.110511.
- [23]. Sadik Alper Yildizela, Gokhan Calisa, Bassam A. Tayehb, "Mechanical and durability properties of ground calcium carbonate-added roller-compacted concrete for pavement", *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6):13341-13351, 2020, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.070.