

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CỐT LIỆU TÁI CHẾ TỪ PHẾ THẢI XÂY DỰNG ĐẾN TÍNH CHẤT CỦA BÊ TÔNG RỒNG THOÁT NƯỚC

Ngô Kim Tuấn<sup>a,\*</sup>, Phan Quang Minh<sup>b</sup>, Nguyễn Hoàng Giang<sup>b</sup>, Nguyễn Tiến Dũng<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

<sup>b</sup>Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 26/10/2021, Sửa xong 13/11/2021, Chấp nhận đăng 15/11/2021

## Tóm tắt

Bài báo này trình bày các đặc tính của gạch bê tông rỗng thoát nước sử dụng hỗn hợp cốt liệu tái chế (cốt liệu gạch đỏ và cốt liệu bê tông), trong đó, đặc tính lỗ rỗng và hệ số thoát nước được tập trung phân tích. Các đặc tính cơ học bao gồm cường độ nén, cường độ uốn cũng được trình bày trong nghiên cứu này, đây là thông số xác định ứng dụng của sản phẩm. Trong nghiên cứu sử dụng 10% hạt bê tông khí chưng áp (AAC) kích thước 2,5 – 5 mm để làm tăng độ rỗng trong hạt và tổng độ rỗng của gạch bê tông rỗng. Hỗn hợp cốt liệu có hàm lượng gạch đỏ từ 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% làm thay đổi đáng kể tổng độ rỗng của gạch bê tông. Khi thiết kế độ rỗng 20%, tổng độ rỗng tăng từ 32,6% lên 44,4% khi sử dụng 0% và 100% gạch đỏ. Tuy nhiên, cường độ nén của mẫu giảm đáng kể từ 10,6 MPa còn 5,3 MPa. Các cấp phối thiết kế có hệ số thoát nước từ 2,4 – 9,8 mm/s, tương ứng với tổng độ rỗng từ 28,5% đến 48,4%, trong khi đó cường độ nén giảm từ 14,8 MPa xuống 4,5 MPa. Mối quan hệ giữa hệ số thoát nước, độ rỗng và đặc tính cơ học được trình bày trong nghiên cứu.

*Từ khoá:* bê tông rỗng; phế thải xây dựng; cốt liệu tái chế; độ rỗng; hệ số thoát nước.

RESEARCH ON THE EFFECTS OF RECYCLED AGGREGATES FROM UTILIZING RECYCLED DEMOLITION WASTE ON THE PROPERTIES OF PERVIOUS CONCRETE BRICK

## Abstract

This paper presents the characteristics of the pervious concrete using recycled aggregate (clay brick aggregate and concrete aggregate), in which, the results focus on the evaluation the pore characteristic and permeability property of pervious concrete brick. The mechanical properties are presented in this study, this parameter is intended to determine the specific application of pervious concrete. 10% of autoclaved aerated concrete aggregate (AAC) (size 2.5 – 5 mm) is used to increase the intra-porosity and total porosity of pervious concrete bricks. Blended aggregate with 0% to 20%, 40%, 60%, 80%, 100% of clay brick aggregate significantly changes the total porosity of pervious concrete bricks. With 20% design porosity, the total porosity rise from 32.6% to 44.4% when clay brick aggregate content change from 0% to 100%. However, the compressive strength decreased significantly from 10.6 MPa to only 5.3 MPa. The pervious brick in this study has permeability coefficients from 2.4 – 9.8 mm/s, corresponding to total porosity from 28.5% to 48.4%, while compressive strength is reduced from 14.8 to 4.5 MPa. The relationship between permeability coefficient, porosity characteristics, and mechanical properties are also presented in the research.

*Keywords:* pervious concrete; construction & demolition waste; recycled aggregate; porosity; permeability coefficient.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-06) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [tuannk@nuce.edu.vn](mailto:tuannk@nuce.edu.vn) (Tuân, N. K.)

## 1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, sự phát triển kinh tế - xã hội đã thúc đẩy quá trình xây dựng và đầu tư cơ sở hạ tầng phát triển mạnh mẽ, kéo theo sự gia tăng các vấn đề về môi trường, trong đó một lượng lớn chất thải xây dựng được hình thành đang là vấn đề được xã hội quan tâm. Theo Báo cáo Môi trường Quốc gia năm 2017 về quản lý chất thải do Bộ Tài nguyên và Môi trường ban hành, lượng chất thải xây dựng tăng rất nhanh hàng năm, chiếm khoảng 10 - 15% khối lượng chất thải rắn đô thị. Các đô thị đặc biệt như Hà Nội, TP.Hồ Chí Minh, chất thải xây dựng chiếm 25% chất thải rắn đô thị [1]. Lượng CTR xây dựng này đang gây ra nhiều hệ lụy về vấn đề môi trường, cảnh quan đô thị và xã hội. Đồng thời cũng lãng phí một nguồn tài nguyên thiên nhiên rất lớn có thể tái chế, tái sử dụng. Công nghiệp xây dựng là ngành tiêu thụ chính tài nguyên thiên nhiên và tổng nhu cầu sử dụng cốt liệu toàn cầu tăng gần gấp đôi từ 21 tỷ tấn năm 2007 lên 40 tỷ tấn vào năm 2014 [2]. Vì vậy giải pháp tái sử dụng phế thải xây dựng là cần thiết. Ở nhiều quốc gia khác, PTXD đã được nghiên cứu và chứng minh là sự thay thế hiệu quả cho các vật liệu tự nhiên, Nhật Bản hoặc một số nước Châu Âu, tỷ lệ tái chế có thể đạt 98% [3, 4]. Tỷ lệ tái chế cao nhờ một phần do đánh thuế cao vào cốt liệu tự nhiên và các công nghệ phát triển. Ở Việt Nam, tỷ lệ tái chế tái sử dụng PTXD thành các vật liệu thay thế vật liệu tự nhiên còn rất nhỏ.

Phế thải xây dựng hình thành ở tất cả các khâu trong vòng đời của một công trình xây dựng như sản xuất nguyên vật liệu, xây dựng, cải tạo sửa chữa, phá dỡ [5]. Nhiều tiêu chuẩn được áp dụng để phân loại và đánh giá khả năng sử dụng cốt liệu tái chế. Tiêu chuẩn Anh BS 8500-2:2006 về Quy định đối với các vật liệu thành phần và bê tông chia cốt liệu lớn tái chế [6]. Tiêu chuẩn Nhật Bản chia cốt liệu tái chế từ PTXD thành 03 chủng loại chủ yếu dựa trên độ hút nước của cốt liệu [7–9]. Việt Nam hiện nay đã có tiêu chuẩn TCVN 11969:2018 [10] về cốt liệu lớn tái chế cho bê tông. Trên thực tế, độ hút nước là một tiêu chí quan trọng để đánh giá chất lượng của cốt liệu tái chế từ PTXD.

PTXD có nhiều hướng xử lý và tái chế như làm cốt liệu trong bê tông, vật liệu san nền, vật liệu xử lý nước thải, ... Trong đó ứng dụng làm cốt liệu trong bê tông nhận được nhiều sự quan tâm hơn cả. Nhiều tỷ lệ cốt liệu tái chế và nhiều loại cốt liệu tái chế (bê tông, gạch, ceramic, khối xây, thủy tinh, ...) được nghiên cứu sử dụng để chế tạo bê tông. Một trong các hướng nghiên cứu được quan tâm gần đây là sử dụng cốt liệu tái chế từ PTXD để chế tạo bê tông rỗng do yêu cầu cường độ của loại bê tông này không cao. Bê tông rỗng là loại bê tông thân thiện với môi trường, có khả năng thoát nước vượt trội, chống trơn trượt, hấp thụ âm thanh và giảm hiện tượng đảo nhiệt đô thị (hiệu ứng nhiệt đô thị) [11–13]. Bê tông rỗng chủ yếu được sử dụng để làm vỉa hè, các bãi đậu xe, đường nhỏ và đường đi nội bộ vì khả năng chịu lực kém do liên quan đến độ rỗng [14]. Đặc điểm được quan tâm nhất của cốt liệu để chế tạo bê tông rỗng là thành phần hạt. Thông thường, cấp hạt phổ biến nhất là số 7, 8, 67 và 69 theo ASTM C33 được sử dụng để chế tạo bê tông rỗng [15]. Theo ACI 522R-10, các đặc điểm của cốt liệu như cường độ, độ hút nước, hàm lượng tạp chất với mỗi loại cốt liệu là khác nhau và ảnh hưởng chủ yếu đến cường độ, từ đó quyết định ứng dụng của loại bê tông rỗng. Khi sử dụng cốt liệu tái chế từ PTXD có độ hút nước khác nhau, vì vậy nên trộn hỗn hợp khi cốt liệu ở trạng thái bão hòa khô bề mặt để loại bỏ ảnh hưởng của độ hút nước của các loại cốt liệu khác nhau [15].

Khả năng tiêu thoát nước, thấm nước của bê tông rỗng và các loại vật liệu rỗng khác phụ thuộc vào các đặc tính của cấu trúc rỗng như kích thước lỗ rỗng, diện tích bề mặt, tổng độ rỗng, tính kết nối giữa hệ thống lỗ rỗng [13, 16]. Trong đó, hệ thống lỗ rỗng thông nhau (yếu tố quyết định khả năng thoát nước) phụ thuộc chủ yếu vào loại cốt liệu, chứ không phải kích thước cốt liệu [17]. Do cốt liệu tái chế có hình dạng góc cạnh, diện tích bề mặt lớn hơn nên thường cho độ rỗng hiệu quả cao hơn (với cùng một tỷ lệ hồ xi măng, chiều dày lớp hồ bao bọc hạt cốt liệu tái chế sẽ mỏng hơn so với khi sử dụng cốt liệu tự nhiên [18, 19]. Tuy nhiên, có những nghiên cứu khác cho thấy cốt liệu tái chế không

ảnh hưởng đến độ rỗng mà chỉ làm giảm khối lượng thể tích và tăng khả năng thoát nước của bê tông rỗng. Việc sử dụng các phương pháp đầm ảnh hưởng nhiều đến độ rỗng của bê tông rỗng sử dụng cốt liệu tái chế. Khi sử dụng cốt liệu tái chế từ gạch vỡ, độ rỗng giảm so với cấp phối sử dụng cốt liệu tự nhiên do cường độ của gạch thấp và trong quá trình đầm nén, các hạt cốt liệu gạch bị vỡ thành các hạt nhỏ làm thay đổi thành phần hạt. Việc sử dụng cốt liệu mịn có thể cải thiện đáng kể cường độ nén. Tuy nhiên độ rỗng và khả năng thoát nước lại giảm tương ứng với việc tăng cốt liệu mịn [16].

Hệ số thoát nước của bê tông rỗng thường từ 0,1 – 3,3 cm/s và phù hợp để làm lớp bê tông bề mặt hoặc block bê tông thoát nước [20]. Trong bê tông rỗng, số lượng lỗ rỗng có khả năng liên kết với nhau tạo thành hệ thống lỗ rỗng thông nhau tối đa đạt được là 30%, lỗ rỗng này quyết định khả năng thoát nước của bê tông rỗng [21]. Trong tổng độ rỗng, ngoài các lỗ rỗng thông nhau còn có các lỗ rỗng đóng kín và lỗ rỗng trong các hạt cốt liệu (rỗng trong hạt). Các thành phần rỗng trong hạt làm tăng khả năng hút và giữ nước. Trong các một số ứng dụng cụ thể, khả năng hút và giữ nước lại được xem là yếu tố cần thiết và cần được tăng cường [22]. Để tăng độ hút nước và giữ nước của bê tông, một số loại cốt liệu rỗng được nghiên cứu sử dụng. Một số loại tro vỏ cây, tro xỉ được sử dụng để tăng độ rỗng [23]. Trong một số nghiên cứu gần đây, phế thải bê tông khí AAC cũng được sử dụng như vật liệu tái chế giúp tăng cường khả năng hút và giữ nước của bê tông [24]. Việc sử dụng hạt AAC trong bê tông rỗng sẽ làm tăng độ rỗng trong hạt, từ đó làm tăng độ hút nước của bê tông. Lượng nước này khi bay hơi sẽ làm giảm nhiệt độ bề mặt của bê tông rỗng, từ đó làm giảm hiệu ứng nhiệt độ thị (UHI) [25]. Bê tông khí chưng áp có độ rỗng xấp xỉ cao, tỷ diện tích bề mặt lớn vì vậy khả năng hấp thụ nước của cốt liệu AAC rất cao, do đó, trước khi trộn, cốt liệu AAC cần được trộn với nước trước để duy trì được tính công tác của hồ xi măng. Nhược điểm của AAC là cường độ cơ học không cao, vì vậy cần sử dụng với hàm lượng và kích thước phù hợp để đảm bảo cường độ của bê tông.

Trong nghiên cứu này, cốt liệu tái chế được sử dụng gồm cốt liệu tái chế từ bê tông, gạch vỡ và các hạt cốt liệu từ bê tông khí chưng áp AAC. Tỷ lệ AAC sử dụng có kích thước 2,5 – 5mm và hàm lượng được cố định 10% dựa trên kết quả nghiên cứu trước đó của chính tác giả [24]. Kích thước và tỷ lệ AAC sử dụng như trên đảm bảo các tiêu chí về khả năng hút nước, mức độ ảnh hưởng đến cường độ. Tỷ lệ gạch vỡ trong hỗn hợp cốt liệu (bê tông – gạch vỡ) thay đổi từ 0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%. Ảnh hưởng của gạch vỡ trong hỗn hợp cốt liệu tái chế đến các đặc tính độ rỗng, hệ số thoát nước và cường độ của gạch bê tông rỗng thoát nước chưa được đề cập đến trong nhiều nghiên cứu. Bài báo sẽ trình bày kết quả nghiên cứu về mối quan hệ giữa đặc trưng độ rỗng, hệ số thoát nước và cường độ của gạch bê tông rỗng với hàm lượng gạch trong hỗn hợp cốt liệu và thông số độ rỗng thiết kế. Vai trò của các loại độ rỗng cũng được đánh giá trong nghiên cứu này.

## 2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Vật liệu sử dụng

Gạch bê tông rỗng sử dụng 4 nguyên liệu là: xi măng PC40, cốt liệu tái chế từ bê tông và gạch vỡ, hạt cốt liệu AAC và nước. Xi măng PC40 Bút Sơn có khối lượng riêng 3,1 g/cm<sup>3</sup>, tỷ diện tích bề mặt đạt 3300 cm<sup>2</sup>/g; cường độ nén 28 ngày là 46,3 MPa. Cốt liệu lớn tái chế gồm cốt liệu tái chế từ bê tông và gạch vỡ, kích thước từ 5 – 10 mm. Thực tế cho thấy, rất khó để thu được cốt liệu hoàn toàn cốt liệu gạch vỡ hoặc bê tông do quá trình phá dỡ và phân loại luôn còn một lượng nhỏ các vật liệu tạp chất, hàm lượng này được khống chế dưới 5%. Các loại cốt liệu này thu gom trên một công trình trên địa bàn thành phố Hà Nội, được vận chuyển và gia công trên dây chuyền nghiền của Dự án Satreps đặt tại Đông Anh, Hà Nội. Các cốt liệu được nghiền sàng đúng kích thước, không có các công đoạn xử lý bề mặt hoặc rửa sạch sau gia công. Hạt AAC có kích thước 2,5 – 5 mm được đập nghiền từ bê tông khí chưng áp loại B4, cường độ nén trên 5 MPa và khối lượng thể tích từ 700 – 800 kg/m<sup>3</sup>.



(a) Dây chuyền nghiền cốt liệu



(b) Cốt liệu gạch đỏ tái chế 5 – 10 mm



(c) Cốt liệu bê tông tái chế 5 – 10 mm



(d) Hạt AAC có kích thước 2,5 – 5 mm

Hình 1. Dây chuyền công nghệ nghiền PTXD (a) và hình ảnh cốt liệu tái chế từ gạch đỏ (b); bê tông (c) và hạt AAC sau khi gia công (d)

Tổng hợp một số tính chất cơ bản của cốt liệu được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Một số tính chất của các loại cốt liệu và hạt AAC

| Tính chất                                          | Cốt liệu bê tông tái chế | Cốt liệu gạch đỏ tái chế | Hạt AAC   | Phương pháp thử        |
|----------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|------------------------|
| Kích thước hạt (mm)                                | 5,0 – 10,0               | 5,0 – 10,0               | 2,5 – 5,0 | TCVN 7572-2:2006 [26]  |
| Khối lượng riêng ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )        | 2,62                     | 2,57                     | 2,51      | TCVN 7572-4:2006 [27]  |
| Khối lượng thể tích hạt ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 1975                     | 1786                     | 710       | TCVN 7572-5:2006 [28]  |
| Độ hút nước sau 24h (%)                            | 3,8                      | 14,7                     | 78,4      | TCVN 7572-4:2006 [27]  |
| Độ mài mòn Los Angeles (%)                         | 38                       | 46                       | 100       | TCVN 7572-12:2006 [29] |

## 2.2. Phương nghiên cứu

Cấp phối hỗn hợp bê tông được thiết kế theo chỉ dẫn của ACI 522R – 10. Cấp phối hỗn hợp bê tông rỗng cần đảm bảo tính công tác tốt và bê tông rỗng có chiều dày lớp hồ xi măng hợp lý để đảm bảo cân bằng giữa các đặc tính độ rỗng và cường độ [15]. Cốt liệu tái chế có kích thước 5 – 10 mm

thuộc đường số 8 trong ASTM C33/C33M [30]. Tỷ lệ nước/xi măng là một chỉ số quan trọng để đạt được cường độ và độ rỗng như mong muốn. Các nghiên cứu cho thấy, tỷ lệ nước/xi măng từ 0,26 – 0,45 sẽ phù hợp để tạo lớp hồ xi măng bao bọc một cách hợp lý các hạt cốt liệu. Trong nghiên cứu này, tỷ lệ nước/xi măng được lựa chọn là 0,33 cho các cấp phối. Để đảm bảo hiệu quả thoát nước của bê tông rỗng, độ rỗng thiết kế và độ rỗng thực tế nên có giá trị từ 15% trở lên. Các cấp phối được thiết kế với độ rỗng (độ rỗng hiệu quả) là 15%, 20% và 25%. Dựa trên độ rỗng thiết kế và phương pháp đầm nhẹ được lựa chọn, tỷ lệ hồ xi măng được xác định qua bảng tra của phụ lục 6, ACI 522R-10 [15].

Bảng 2. Bảng cấp phối hỗn hợp bê tông rỗng

| Ký hiệu mẫu | Độ rỗng (%) | Hàm lượng gạch (%) | Xi măng (Kg) | AAC 10% (Kg) | Gạch (Kg) | Cốt Liệu (Kg) | Nước (Lít) |
|-------------|-------------|--------------------|--------------|--------------|-----------|---------------|------------|
| M1          | 15          | 0                  | 413,7        | 80           | 0         | 1145,7        | 137,5      |
| M2          |             | 20                 | 413,7        | 80           | 229,1     | 916,6         | 137,5      |
| M3          |             | 40                 | 413,7        | 80           | 458,3     | 687,4         | 137,5      |
| M4          |             | 60                 | 413,7        | 80           | 687,4     | 458,3         | 137,5      |
| M5          |             | 80                 | 413,7        | 80           | 916,6     | 229,1         | 137,5      |
| M6          |             | 100                | 413,7        | 80           | 1145,7    | 0             | 137,5      |
| M7          | 20          | 0                  | 337,1        | 80           | 0         | 1145,7        | 111,2      |
| M8          |             | 20                 | 337,1        | 80           | 229,1     | 916,6         | 111,2      |
| M9          |             | 40                 | 337,1        | 80           | 458,3     | 687,4         | 111,2      |
| M10         |             | 60                 | 337,1        | 80           | 687,4     | 458,3         | 111,2      |
| M11         |             | 80                 | 337,1        | 80           | 916,6     | 229,1         | 111,2      |
| M12         |             | 100                | 337,1        | 80           | 1145,7    | 0             | 111,2      |
| M13         | 25          | 0                  | 268,2        | 80           | 0         | 1133,8        | 88,5       |
| M14         |             | 20                 | 268,2        | 80           | 226,8     | 907,0         | 88,5       |
| M15         |             | 40                 | 268,2        | 80           | 453,5     | 680,3         | 88,5       |
| M16         |             | 60                 | 268,2        | 80           | 680,3     | 453,5         | 88,5       |
| M17         |             | 80                 | 268,2        | 80           | 907,0     | 226,8         | 88,5       |
| M18         |             | 100                | 268,2        | 80           | 1133,8    | 0             | 88,5       |

Mẫu gạch bê tông rỗng có kích thước theo mẫu gạch bê tông tiêu chuẩn là  $210 \times 100 \times 60$  mm. Kết quả được lấy trung bình từ 3 mẫu thí nghiệm. Đặc trưng độ rỗng của gạch bê tông rỗng được xác định dựa trên nguyên lý chất lỏng chiếm chỗ, các mẫu được sấy khô hoàn toàn trong tủ sấy, sau đó xác định các khối lượng khô, khối lượng bão hòa nước và khối lượng mẫu cân trong nước [31]. Từ đó xác định được các thông số độ rỗng, trong đó, tổng độ rỗng  $\phi_T$  có thể được xác định bằng hai công thức khác nhau. Nếu bỏ qua các lỗ rỗng kín bị cô lập sau khi ngâm bão hòa nước thì tổng độ rỗng (%) được tính theo công thức (1) như sau:

$$\phi_T = \left(1 - \frac{\rho_d}{G_s * \rho_w}\right) * 100 (\%) \quad (1)$$

Nếu tính theo phương pháp thể tích nước thay thế theo các tài liệu tham khảo [31, 32] thì tổng độ rỗng được tính toán theo công thức (2) như sau:

$$\phi_T = \left(1 - \frac{M_d - M_{sub}}{V_T * \rho_w}\right) * 100 (\%) \quad (2)$$

Độ rỗng hiệu quả  $\phi_{eff}$  thể hiện các lỗ rỗng hở có kết nối với nhau hình thành lên khả năng tiêu thoát nước và được tính toán dựa trên công thức (3) như sau:

$$\phi_{eff} = \left( 1 - \frac{M_{suf} - M_{sub}}{V_T * \rho_w} \right) * 100 (\%) \quad (3)$$

Cấu trúc hệ thống lỗ rỗng của bê tông rỗng có thể quan niệm gồm các cấu trúc rỗng giữa các hạt và hệ thống cấu trúc rỗng trong các hạt [33]. Đồng thời khi bão hòa, nước sẽ điền đầy hệ thống lỗ rỗng trong các hạt cũng như đá xi măng, độ rỗng trong hạt  $\phi_{int ra}$  (%) có thể tính toán thông qua lượng nước hấp thụ như sau:

$$\phi_{int ra} = \left( \frac{M_{suf} - M_d}{V_T * \rho_w} \right) * 100 (\%) \quad (4)$$

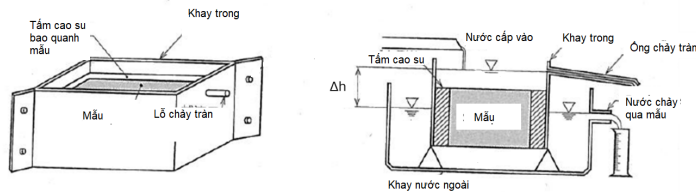
trong đó:  $\phi_T$  là tổng độ rỗng (%);  $\phi_{eff}$  là độ rỗng hiệu quả (%);  $\phi_{int ra}$  là độ rỗng trong hạt (%);  $M_{sub}$  là khối lượng mẫu cân trong nước (g);  $M_{suf}$  là khối lượng mẫu bão hoà khô bề mặt (g);  $M_d$  là khối lượng mẫu ở trạng thái khô (g);  $\rho_d$  là khối lượng thể tích khô của mẫu ( $g/cm^3$ );  $V_T$  là thể tích của mẫu;  $G_s$  là khối lượng riêng của mẫu ( $g/cm^3$ );  $\rho_w$  là khối lượng riêng của nước ( $g/cm^3$ ).

Hệ số thoát nước được tính toán theo công thức (5) và được thực hiện theo mô hình thể hiện trong Hình 2. Công thức tính toán và mô hình thí nghiệm dựa trên tiêu chuẩn JIS A 5371:2016 của Nhật [34]:

$$K = \frac{t}{\Delta h} * \frac{Q}{A * 30} * \frac{1}{100} \text{ (mm/s)} \quad (5)$$

trong đó:  $K$  là hệ số thoát nước (mm/s);  $t$  là chiều dày của mẫu (mm);  $Q$  là lượng nước chảy qua mẫu ( $mm^3$ );  $\Delta h$  là sự chênh lệch chiều cao mực nước (mm);  $A$  là diện tích bề mặt mẫu mà nước chảy qua ( $mm^2$ ).

Cường độ nén và cường độ uốn của mẫu viên gạch được xác định của tuổi 28 ngày. Tiêu chuẩn thí nghiệm được áp dụng theo phương pháp thử cường độ nén đối với gạch bê tông - TCVN 6477:2016 và phương pháp thử cường độ uốn đối với gạch xây - TCVN 6355-2:1998.



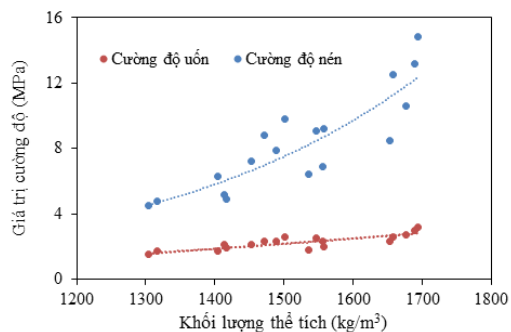
Hình 2. Mô hình thí nghiệm xác định hệ số thoát nước

### 3. Kết quả nghiên cứu

#### 3.1. Đặc tính cơ học

Đặc tính cơ học, cụ thể trong nghiên cứu là cường độ nén và cường độ uốn, là chỉ tiêu quan trọng đánh giá trực tiếp khả năng chịu lực và tính ứng dụng của bê tông rỗng. Ngoài ra, đặc tính cơ học gián tiếp thể hiện đặc tính độ rỗng và khả năng thoát nước của bê tông rỗng. Mối quan hệ tỷ lệ nghịch giữa đặc tính cơ học với độ rỗng và khả năng thoát nước là cho thấy nếu muốn đạt cường độ cơ học cao thì độ rỗng và khả năng thoát nước sẽ bị giảm và ngược lại [35].

Với cùng một loại nguyên vật liệu, độ rỗng cũng được thể hiện qua khối lượng thể tích của mẫu. Biểu đồ trong Hình 3 thể hiện mối quan hệ giữa khối lượng thể tích mẫu và cường độ nén, cường độ uốn của mẫu viên gạch. Khối lượng thể tích của các mẫu gạch bê tông rỗng trong nghiên cứu dao động từ 1304 – 1694 kg/m<sup>3</sup>, phụ thuộc chủ yếu vào độ rỗng thiết kế và hàm lượng gạch đỏ sử dụng. Khi tăng độ rỗng, khối lượng thể tích giảm xuống. Với cùng tỷ lệ gạch sử dụng 100%, khối lượng thể tích của mẫu 15% độ rỗng là 1472 kg/m<sup>3</sup>, trong khi đó với mẫu 25% độ rỗng là 1304 kg/m<sup>3</sup>. Gạch đỏ có khối lượng thể tích hạt nhỏ hơn so với cốt liệu từ bê tông, vì vậy khi tăng hàm lượng gạch đỏ thì khối lượng thể tích của bê tông giảm. Theo Hình 3, khi khối lượng thể tích tăng, cường độ nén của gạch bê tông rỗng tăng rõ rệt. Cường độ nén lớn nhất là 14,8 MPa ghi nhận với mẫu có khối lượng thể tích lớn nhất là 1694 kg/m<sup>3</sup>, trong khi các mẫu có khối lượng thể tích nhỏ, cường độ chỉ đạt dưới 5 MPa. Đối với cùng độ rỗng thiết kế, cường độ nén phụ thuộc nhiều vào hàm lượng cốt liệu gạch đỏ sử dụng. Các mẫu sử dụng cốt liệu gạch đỏ lớn hơn sẽ có cường độ nén thấp hơn. Kết quả này cũng trùng với một số nghiên cứu đã công bố [16, 36]. Ví dụ, với độ rỗng thiết kế 20%, mẫu sử dụng 100% cốt liệu bê tông có cường độ 10,6 MPa, nếu sử dụng 100% cốt liệu từ gạch đỏ, cường độ chỉ đạt 5,2 MPa, giảm khoảng 50% cường độ. Quy luật cũng tương tự với các độ rỗng thiết kế khác. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng của cốt liệu gạch đỏ nhỏ hơn mức độ ảnh hưởng của độ rỗng thiết kế đến cường độ. Kết quả cho thấy yếu tố quan trọng nhất quyết định cường độ của gạch bê tông rỗng là độ rỗng hay khối lượng thể tích [37].



Hình 3. Mối quan hệ giữa khối lượng thể tích mẫu và đặc tính cơ học của bê tông rỗng

Ảnh hưởng của cốt liệu tái chế đến cường độ nén có thể giải thích dựa trên các đặc tính của cơ học của cốt liệu tái chế và cường độ liên kết với đá xi măng. Cốt liệu tái chế có cường độ yếu và lớp hồ xi măng bao bọc mỏng hơn so với cốt liệu tự nhiên (do có hình dạng nhiều góc cạnh, tỷ diện bề mặt lớn), dẫn đến các vết nứt và trạng thái phá hủy mẫu khi chịu tải trọng chủ yếu tập trung ở cốt liệu. Hình 4 cho thấy mẫu bị phá hủy chủ yếu qua các hạt cốt liệu. Hơn nữa, lớp vữa, đá xi măng cũ còn dính lại trên cốt liệu tái chế cũng ảnh hưởng đáng kể đến cường độ bám dính và sự hình thành vết nứt ở vùng liên kết ITZ. Điều này cũng giải thích việc các mẫu có cường độ uốn không cao, dao động từ 1,5 đến 3,2 MPa. Quy luật ảnh hưởng của độ rỗng, khối lượng thể tích mẫu đến cường độ uốn tương tự như cường độ nén. Tuy nhiên sự chênh lệch khi thay đổi các biến số (hàm lượng gạch và độ rỗng) không lớn như cường độ nén.

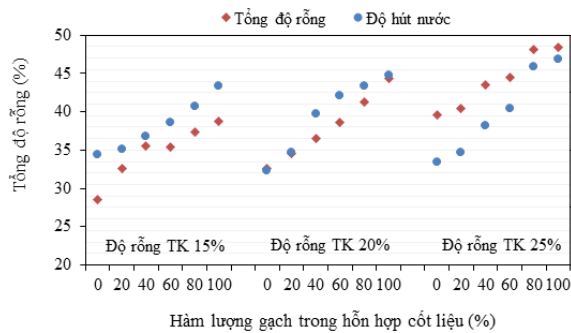


Hình 4. Bề mặt mẫu sau khi bị nén vỡ

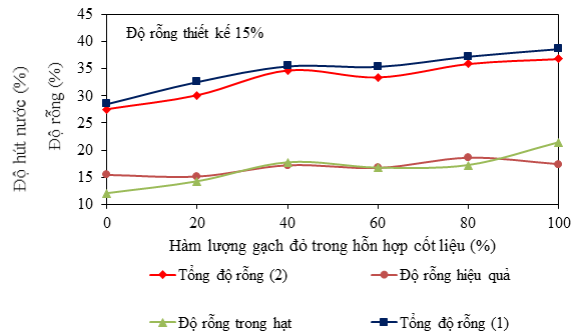
### 3.2. Đặc tính độ rỗng

Đặc tính độ rỗng được đánh giá trong nghiên cứu này thông qua nguyên tắc tính toán thể tích chiếm chỗ của nước, trong đó, thể tích nước chiếm chỗ và điền đầy các lỗ rỗng được tính toán thành

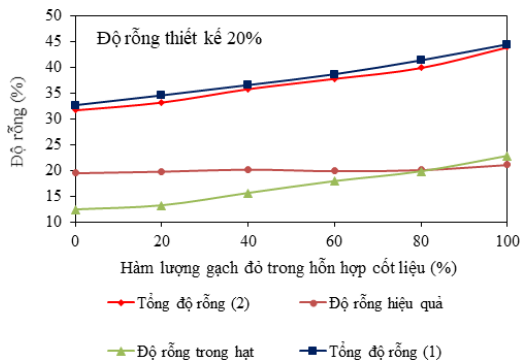
thể tích lỗ rỗng. Kết quả nghiên cứu được thể hiện trong các Hình 5–8. Độ rỗng được đánh giá thông qua ba thông số: tổng độ rỗng (quyết định các đặc tính cơ học), độ rỗng hiệu quả (độ rỗng hình thành khả năng tiêu thoát nước), độ rỗng trong hạt (quyết định khả năng hút và giữ nước). Trong đó, tổng độ rỗng được xác định bằng hai công thức khác nhau (công thức (1) và (2)). Kết quả cho thấy, tổng độ rỗng của gạch bê tông rỗng tăng theo độ rỗng thiết kế và hàm lượng cốt liệu gạch đỏ sử dụng trong hỗn hợp cốt liệu. Do cốt liệu gạch đỏ của độ rỗng trong hạt và độ hút nước cao (14,7%) nên khi tăng hàm lượng cốt liệu gạch đỏ sẽ làm tăng tương ứng tổng độ rỗng và độ hút nước. Cụ thể, với độ rỗng thiết kế 15%, tổng độ rỗng tăng từ 28,5% lên 38,7% khi tăng hàm lượng cốt liệu gạch đỏ từ 0 đến 100%. Quy luật tương tự đối với độ rỗng thiết kế 20% và 25%. Trong thông số tổng độ rỗng phải kể đến sự đóng góp của hạt AAC, trong tất cả các cấp phối đều sử dụng 10% hạt AAC. Với độ hút nước lên đến 78,4%, hạt AAC có vai trò tăng cường độ rỗng trong hạt và khả năng hút, giữ nước. Vai trò của khả năng hút nước và giữ nước sẽ được đánh giá cụ thể trong các nghiên cứu tiếp theo của tác giả.



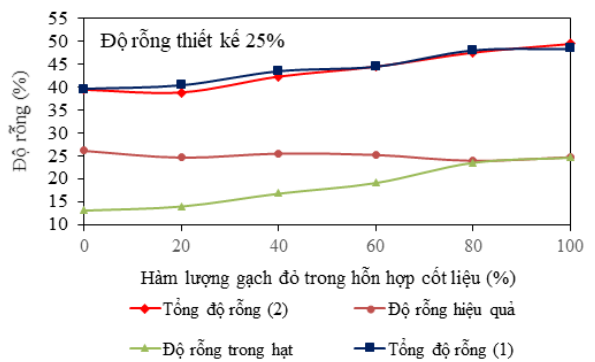
Hình 5. Mối quan hệ giữa hàm lượng cốt liệu gạch với tổng độ rỗng và độ hút nước của gạch bê tông rỗng



Hình 6. Mối quan hệ giữa các thông số độ rỗng (Độ rỗng thiết kế 15%)



Hình 7. Mối quan hệ giữa các thông số độ rỗng (Độ rỗng thiết kế 20%)



Hình 8. Mối quan hệ giữa các thông số độ rỗng (Độ rỗng thiết kế 25%)

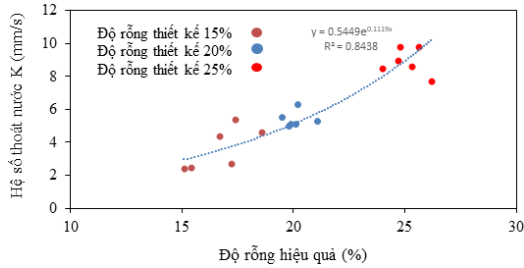
Khi đánh giá tổng độ rỗng theo hai công thức khác nhau, kết quả cho thấy tổng độ rỗng theo công thức (1) cao hơn so với tính toán theo công thức (2) (Hình 6–8). Điều này có thể giải thích do trong quá trình thiết lập công thức (1) đã bỏ qua các lỗ rỗng kín và lỗ rỗng có kích thước nhỏ không bị nước chiếm chỗ trong quá trình ngâm bão hòa mẫu trong nước. Công thức (1) xem như các lỗ rỗng được điền đầy hoàn toàn, vì vậy giá trị tổng độ rỗng lớn hơn so với tính toán theo công thức (2). Công thức (2) thể hiện thể tích lỗ rỗng thực tế bị nước chiếm chỗ. Sự chênh lệch tổng độ rỗng tính toán theo hai công thức lớn nhất là 2,5%. Đối với mẫu gạch bê tông rỗng có độ rỗng thiết kế 25%, sự chênh lệch giữa tổng độ rỗng tính toán theo hai công thức trên là nhỏ nhất, điều này là do với độ rỗng hiệu quả

lớn hơn (lỗ rỗng lớn), tức hàm lượng đá xi măng bao bọc các hạt mỏng hơn, tạo điều kiện thuận lợi cho nước xâm nhập và điền đầy các lỗ rỗng nhỏ và lỗ rỗng trong hạt. Vì vậy giá trị tổng độ rỗng tính toán trong công thức (2) tương đồng với công thức (1) hơn (Hình 8).

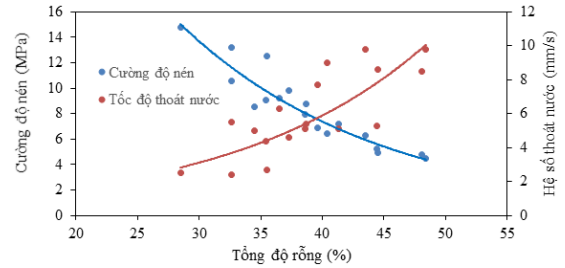
Khi thay đổi độ rỗng thiết kế, hàm lượng hồ xi măng sử dụng thay đổi (độ rỗng thiết kế càng lớn thì lượng hồ xi măng càng nhỏ). Vì vậy độ rỗng hiệu quả tăng theo độ rỗng thiết kế và có sự tương đồng. Tuy nhiên, với cùng độ rỗng thiết kế, khi tăng hàm lượng cốt liệu gạch sử dụng, độ rỗng hiệu quả có xu hướng tăng nhẹ như trong Hình 6–8. Do cốt liệu gạch đỏ có hình dạng hạt góc cạnh, tỷ diện tích bề mặt lớn, do vậy độ rỗng hiệu quả tăng nhẹ khi tăng hàm lượng gạch với cùng độ rỗng thiết kế. Đây là điểm khác biệt so với khi sử dụng cốt liệu tự nhiên có bề mặt trơn nhẵn, lý giải này cũng tương đồng với một số nghiên cứu khác [36]. Ví dụ, với độ rỗng thiết kế 15%, khi sử dụng hàm lượng cốt liệu gạch đỏ từ 20 – 100%, độ rỗng hiệu quả thu được dao động trong khoảng 15,1 đến 18,6%. Mức độ ảnh hưởng phụ thuộc nhiều vào phương pháp đầm chặt trong quá trình tạo hình mẫu. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phương pháp đầm nhẹ. Ảnh hưởng của các phương pháp đầm chặt sẽ được trình bày trong các nghiên cứu khác của tác giả. Ngoài ra, sự phân tán ngẫu nhiên của các hạt AAC và cốt liệu tái chế cũng ảnh hưởng đến độ rỗng hiệu quả và đặc tính của cấu trúc lỗ rỗng của bê tông rỗng. Xét về quy luật sắp xếp ở trạng thái lèn chặt (tương tự như khi xác định khối lượng thể tích chọc chặt – ASTM C29) thì các hạt có kích thước nhỏ sẽ nằm trong khoảng trống giữa các hạt có kích thước lớn. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, quá trình tạo hình hỗn hợp bê tông rỗng không có tác động rung lèn chặt, mà chỉ được lèn chặt bằng phương pháp đầm nhẹ (làm đầy khuôn với 2 lớp, dùng bay và dụng cụ lăn làm phẳng bề mặt. Vì vậy, các hạt cốt liệu AAC có kích thước 2,5 – 5 mm phân bố ngẫu nhiên qua quan sát bề mặt nứt vỡ (Hình 4), một phần hạt AAC phân bố giữa khoảng trống giữa các hạt, điều này làm ảnh hưởng đến độ rỗng hiệu quả của bê tông rỗng. Một phần hạt AAC phân bố như cốt liệu tham gia vào bộ khung chịu lực (ảnh hưởng đáng kể đến cường độ do các hạt AAC có cường độ rất yếu). Tổng độ rỗng lớn nhất thu được với mẫu có độ rỗng thiết kế 25% và sử dụng 100% cốt liệu gạch đỏ với 48,4%. Với tổng độ rỗng lớn nhất, đây cũng là mẫu có khối lượng thể tích nhỏ nhất và cường độ nén thấp nhất.

### 3.3. Hệ số thoát nước

Các đặc tính lỗ rỗng quyết định các tính chất khác của gạch bê tông rỗng, trong đó, độ rỗng hiệu quả quyết định hệ số thoát nước của vật liệu nhờ hệ thống lỗ rỗng hở và thông nhau. Đây được xem là đặc tính nổi bật nhất của bê tông rỗng. Thông thường, hệ số thoát nước của bê tông rỗng từ 1 – 33 mm/s [36], và phù hợp với các ứng dụng tiêu thoát nước bề mặt. Hệ số thoát nước được thể hiện trong Hình 9. Hệ số thoát nước của các mẫu gạch bê tông rỗng có giá từ 2,4 mm/s đến 9,8 mm/s. Kết quả cho thấy độ rỗng thiết kế càng nhỏ thì tốc độ thoát nước càng chậm. Với độ rỗng thiết kế 15%, 20% và 25% thì tốc độ thoát nước lần lượt dao động trong khoảng 2,5 – 5,4 mm/s; 5,0 – 6,3 mm/s và 7,7 – 9,8 mm/s. Trong cùng một độ rỗng thiết kế, hệ số thoát nước phụ thuộc vào tỷ lệ thành phần cốt liệu gạch đỏ sử dụng. Theo phân tích kết quả mục 3.2, độ rỗng hiệu quả phụ thuộc vào tỷ lệ cốt liệu gạch đỏ sử dụng, do đó, với các cấp phối có tỷ lệ cốt liệu gạch đỏ khác nhau sẽ thu được hệ số thoát nước khác nhau. Hệ số thoát nước lớn nhất là 9,8 mm/s ghi nhận ở mẫu có độ rỗng thiết kế là 25% và tỷ lệ cốt liệu gạch đỏ là 40% (M15) và 100% (M18). Điểm đáng lưu ý là các mẫu M15 có độ rỗng hiệu quả lớn hơn mẫu M18, điều này cho thấy ngoài độ rỗng hiệu quả thì đặc tính thông nhau của hệ thống lỗ rỗng cũng ảnh hưởng đến tốc độ thoát nước. Những hệ thống lỗ rỗng thông nhau tạo thành đường đi ngắn nhất của chất lỏng qua mẫu sẽ cho hệ số thoát nước lớn hơn. Đồng thời đường kính trung bình của hệ thống lỗ rỗng cũng quyết định hệ số thoát nước. Kết quả ở các mẫu M6, M7, M12 cũng minh chứng cho giải thích trên, các mẫu này có độ rỗng hiệu quả lần lượt là 17,4%; 19,5% và 21,1% nhưng hệ số thoát nước thu được khá tương đồng lần lượt là 5,4 mm/s, 5,5 mm/s và 5,3 mm/s.



Hình 9. Hệ số thoát nước của gạch bê tông rỗng



Hình 10. Mối quan hệ giữa cường độ nén, hệ số thoát nước và tổng độ rỗng

### 3.4. Mối quan hệ giữa cường độ, độ rỗng và hệ số thoát nước

Như phân tích mục 3.2, độ rỗng là thông số đặc trưng quyết định các tính chất của bê tông rỗng. Với mỗi loại độ rỗng (độ rỗng trong hạt, độ rỗng giữa các hạt) sẽ có ảnh hưởng rõ rệt đến một số tính chất nhất định của bê tông rỗng. Nhưng các đặc tính đó có mối liên hệ với nhau và có ảnh hưởng đến các tính chất chung của bê tông rỗng. Vì vậy, mục 3.4 sẽ sử dụng thông số tổng độ rỗng để phân tích ảnh hưởng của độ rỗng đến các thông số khác của bê tông rỗng. Hình 10 thể hiện mối quan hệ giữa các đại lượng: cường độ nén, hệ số thoát nước và tổng độ rỗng của bê tông rỗng.

Biểu đồ cho thấy tổng độ rỗng tăng lên làm giảm cường độ nén của bê tông rỗng. Điều này hợp quy luật và đã được phân tích trong mục 3.1. Độ rỗng hiệu quả hoặc độ rỗng trong hạt đều ảnh hưởng đến cường độ của bê tông. Khi độ rỗng trong hạt tăng làm suy yếu cường độ của cốt liệu. Cốt liệu tái chế có lớp vữa rỗng xốp, nhiều vết nứt làm giảm đáng kể cường độ nén và cường độ bám dính với lớp đá chất kết dính mới. Độ rỗng hiệu quả tăng đồng nghĩa với lượng đá chất kết dính giảm (theo ACI 522R-10), làm giảm khả năng liên kết giữa các hạt cốt liệu. Bộ khung chịu lực trở nên yếu hơn và làm giảm cường độ nén của mẫu. Khi tổng độ rỗng tăng từ 28,5% (độ rỗng thiết kế 15% và 0% cốt liệu gạch) lên 48,4% (độ rỗng thiết kế 25% và 100% cốt liệu gạch), cường độ mẫu giảm gần 70% từ 14,8 MPa xuống 4,5 MPa. Trong khi đó, hệ số thoát nước tăng 308% từ 2,4 mm/s lên 9,8 mm/s với hai cấp phối trên. Điều này cho thấy, hệ số thoát nước và cường độ nén là hai hàm mục tiêu tỷ lệ nghịch với nhau. Khi muốn ưu tiên tăng một đại lượng thì đại lượng còn lại sẽ bị giảm. Điều này đặt ra bài toán cần có sự cân đối giữa các đại lượng để thu được bê tông rỗng có các ứng dụng phù hợp. Ví dụ, với ứng dụng chế tạo gạch bê tông rỗng dùng để lát vỉa hè cho người đi bộ, tải trọng nhẹ cho phép thiết kế với cường độ thấp, vì vậy có thể ưu tiên tăng độ rỗng để tăng khả năng tiêu thoát nước. Việc này vừa giảm khối lượng viên gạch (Theo phân tích mục 3.1), vừa tăng hiệu quả tiêu thoát nước và hạn chế quá trình tắc nghẽn nhờ hệ thống lỗ rỗng thông nhau có đường kính trung bình lớn, đường đi của chất lỏng là ngắn nhất [38]. Ngược lại, nếu ứng dụng yêu cầu bê tông rỗng cường độ lớn hơn như bãi đỗ xe, đường nội bộ, ... lúc này cần giảm độ rỗng nhưng vẫn đảm bảo khả năng tiêu thoát nước, hoặc áp dụng thêm các biện pháp hỗ trợ như đầm nén hoặc sử dụng phụ gia nhằm nâng cao cường độ đá chất kết dính [39].

## 4. Kết luận

Dựa trên nguyên vật liệu sử dụng và các phương pháp nghiên cứu được lựa chọn, nhóm tác giả đưa ra một số kết luận sau:

Đặc tính của hỗn hợp cốt liệu tái chế ảnh hưởng đến các tính chất cường độ nén, cường độ uốn, độ rỗng và hệ số thoát nước của bê tông rỗng.

Khi tỷ lệ gạch đỏ trong hỗn hợp cốt liệu tăng, độ hút nước của bê tông rỗng tăng từ 9,6% lên 16,9%, 8,2% lên 16,5% và 9% lên 17,9% tương ứng với độ rỗng thiết kế là 15%, 20% và 25%.

Gạch bê tông rỗng sử dụng cốt liệu tái chế có hệ số thoát nước từ 2,4 mm/s đến 9,8 mm/s, đảm bảo tốc độ thoát nước bề mặt tốt. Hệ số thoát nước chủ yếu phụ thuộc vào độ rỗng thiết kế.

Cường độ nén dao động từ 4,5 MPa đến 14,8 MPa. Kết quả phụ thuộc vào độ rỗng thiết kế và hàm lượng cốt liệu gạch đỏ trong hỗn hợp cốt liệu. Khi tăng hàm lượng gạch đỏ từ 0 – 100%, cường độ bê tông rỗng giảm xuống.

Khi tăng độ rỗng thiết kế từ 15% đến 20% và 25%, tổng độ rỗng tăng từ 28,5% lên đến 48,4%, tương ứng với hệ số thoát nước tăng và cường độ giảm. Mức độ ảnh hưởng do hàm lượng cốt liệu gạch đỏ tái chế trong hỗn hợp cốt liệu quyết định.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Dự án SATREPS – Trường Đại học Xây dựng Hà Nội và các cộng sự. Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Dự án trong việc triển khai nghiên cứu và hoàn thiện bài báo này.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Bộ Tài nguyên và Môi Trường (2018). *Báo cáo môi trường quốc gia 2017 - Chuyên đề: quản lý chất thải*.
- [2] Tam, V. W. Y., Soomro, M., Evangelista, A. C. J. (2018). [A review of recycled aggregate in concrete applications \(2000–2017\)](#). *Construction and Building Materials*, 172:272–292.
- [3] Söderholm, P. (2011). [Taxing virgin natural resources: Lessons from aggregates taxation in Europe](#). *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11):911–922.
- [4] Tam, V. W. Y., Tam, L., Le, K. N. (2010). [Cross-cultural comparison of concrete recycling decision-making and implementation in construction industry](#). *Waste Management*, 30(2):291–297.
- [5] da Rocha, C. G., Sattler, M. A. (2009). [A discussion on the reuse of building components in Brazil: An analysis of major social, economical and legal factors](#). *Conservation and Recycling*, 54(2):104–112.
- [6] BS 8500-2:2015. *Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1-Part 2. Specification for constituent materials and concrete*. British Standards Institution, London.
- [7] JIS A 5021:2018. *Recycled aggregate for concrete-Class H*. Japanese Standards Association.
- [8] JIS A 5022:2018. *Recycled aggregate concrete-Class M*. Japanese Standards Association.
- [9] JIS A 5023:2018. *Recycled aggregate for concrete-Class L*. Japanese Standards Association.
- [10] TCVN 11969:2018. *Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông*.
- [11] Wang, H., Li, H., Liang, X., Zhou, H., Xie, N., Dai, Z. (2019). [Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio](#). *Construction and Building Materials*, 202:387–395.
- [12] Sansalone, J., Kuang, X., Ying, G., Ranieri, V. (2012). [Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage](#). *Water Research*, 46(20):6763–6774.
- [13] Huang, J., Alyousef, R., Suhatrio, M., Baharom, S., Alabduljabbar, H., Alaskar, A., Assilzadeh, H. (2020). Influence of porosity and cement grade on concrete mechanical properties. *Advances in Concrete Construction*, 10(5):393–402.
- [14] Elizondo-Martínez, E.-J., Andrés-Valeri, V.-C., Jato-Espino, D., Rodríguez-Hernández, J. (2020). [Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement](#). *Journal of Building Engineering*, 27: 100967.
- [15] ACI 522.R-10 (2010). *Report on Pervious Concrete*.
- [16] Debnath, B., Sarkar, P. P. (2019). [Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate](#). *Construction and Building Materials*, 213:643–651.
- [17] Čosić, K., Korat, L., Ducman, V., Netinger, I. (2015). [Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete](#). *Construction and Building Materials*, 78:69–76.

- [18] Sumanasooriya, M. S., Neithalath, N. (2011). [Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction](#). *Cement and Concrete Composites*, 33(8):778–787.
- [19] Gaedicke, C., Marines, A., Mata, L., Miankodila, F. (2015). [Efecto del uso de materiales reciclados y métodos de compactación en las propiedades mecánicas e índice de reflectancia solar del hormigón permeable](#). *Revista ingeniería de construcción*, 30(3):159–167.
- [20] Chandrappa, A. K., Biligiri, K. P. (2016). [Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach](#). *Construction and Building Materials*, 123:627–637.
- [21] Agar-Ozbek, A. S., Weerheijm, J., Schlangen, E., van Breugel, K. (2013). [Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales](#). *Construction and Building Materials*, 41:480–490.
- [22] Wang, J., Meng, Q., Zhang, L., Zhang, Y., He, B.-J., Zheng, S., Santamouris, M. (2019). [Impacts of the water absorption capability on the evaporative cooling effect of pervious paving materials](#). *Building and Environment*, 151:187–197.
- [23] Tijani, M. A., Ajagbe, W. O., Agbede, O. A. (2018). Recycling wastes for sustainable pervious concrete production. *Proceedings of the 17th National Conference of the Nigerian Institution of Environmental Engineers (NIEE)*, 1–7.
- [24] Ngo, K. T., Nguyen, T. D., Phan, Q. M., Nguyen, V. T., Kawamoto, K. (2020). [Influence of AAC grains on some properties of permeable pavement utilizing of CDW and industrial by-product](#). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 869:032046.
- [25] Wang, J., Meng, Q., Tan, K., Zhang, L., Zhang, Y. (2018). [Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment](#). *Building and Environment*, 140:184–193.
- [26] TCVN 7572-2:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử - Phần 2: xác định thành phần hạt*.
- [27] TCVN 7572-4:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử Phần 4: Xác định khối lượng riêng, khối lượng thể tích và độ hút nước*.
- [28] TCVN 7572-5:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử Phần 5: Xác định khối lượng riêng, khối lượng thể tích và độ hút nước của đá gốc và hạt cốt liệu lớn*.
- [29] TCVN 7572-12:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử - Phần 12: Xác định độ hao mòn khi va đập của cốt liệu lớn trong máy Los Angeles*. 55–58.
- [30] ASTM C33/C33M - 13 (2013). *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- [31] Dean, S. W., Montes, F., Valavala, S., Haselbach, L. M. (2005). [A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete](#). *Journal of ASTM international*, 2(1):12931.
- [32] ASTM C1754/C1754M-12. *Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete*.
- [33] Durner, W. (1994). [Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure](#). *Water Resources Research*, 30(2):211–223.
- [34] JIS A 5371:2016. *Precast Unreinforced Concrete Products*. Japanese Standards Association.
- [35] Sriravindrarajah, R., Wang, N. D. H., Ervin, L. J. W. (2012). [Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete](#). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(4):239–246.
- [36] Bhutta, M. A. R., Hasanah, N., Farhayu, N., Hussin, M. W., bin Md Tahir, M., Mirza, J. (2013). [Properties of porous concrete from waste crushed concrete \(recycled aggregate\)](#). *Construction and Building Materials*, 47:1243–1248.
- [37] Zhang, Z., Zhang, Y., Yan, C., Liu, Y. (2017). [Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete](#). *Construction and Building Materials*, 135:112–118.
- [38] Huang, J., Zhang, Y., Sun, Y., Ren, J., Zhao, Z., Zhang, J. (2021). [Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete](#). *Construction and Building Materials*, 290:123228.
- [39] Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., Jiang, J. (2010). [Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete](#). *Construction and Building Materials*, 24(5):701–708.