

**ĐẶC TRƯNG CƠ HỌC VÀ ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG CHỨA TRO TRÁU**  
**STRENGTH AND DURABILITY OF CONCRETE USING RICE HUSK ASH****PHẠM VĂN TOÀN<sup>1\*</sup>, PHẠM VĂN THẮNG<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam<sup>2</sup>Viện Vật liệu xây dựng Việt Nam

\*Email liên hệ: toanpv@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.956>**Tóm tắt**

Bài báo tập trung đánh giá tác động của tro trấu đến các tính chất cơ học và độ bền của bê tông thông qua các thí nghiệm xác định cường độ chịu nén, khả năng hút nước và mức độ thấm nhập ion clorua. Phân tích kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng tro trấu có khả năng thay thế xi măng với tỷ lệ từ 10% đến 30% mà không làm suy giảm chỉ tiêu cường độ nén của bê tông, đồng thời góp phần cải thiện đáng kể khả năng chống thấm nước và hạn chế sự xâm nhập của ion clorua. Ngoài ra, nghiên cứu xác định tỷ lệ thay thế xi măng bằng tro trấu đạt hiệu quả tối ưu trong khoảng 15-20%, trong khi hàm lượng thay thế lớn nhất được khuyến nghị là khoảng 30%.

Bài báo cũng giới thiệu và trình bày trên cơ sở khoa học quá trình hình thành cường độ bê tông, hiệu ứng lấp đầy (filler effect), hiệu ứng pha loãng (dilution effect), ảnh hưởng của độ rỗng vi cấu trúc bê tông đến độ bền chống thấm nước và khuếch tán ion clorua.

**Từ khóa:** Tro trấu, cường độ chịu nén, độ hút nước, thấm nhập ion clorua.

**Abstract**

This research assesses the impact of incorporating rice husk ash on both the mechanical characteristics and durability-related performance of concrete, particularly in terms of compressive strength, water absorption, and chloride ion penetration tests. The results show that rice husk ash can partially replace cement at levels of 10-30% without compromising strength, while significantly improving resistance to water and chloride ion ingress. An optimal replacement level of 15-20% is identified, with a maximum feasible replacement of approximately 30%.

The paper also presents and scientifically explains the mechanisms of concrete strength development, including the filler effect, the dilution effect, and

the influence of concrete microstructural porosity on water permeability resistance and chloride ion diffusion.

**Keywords:** Rice husk ash, compressive strength, water absorption, chloride ion penetration.

**1. Giới thiệu**

Sự phát triển mạnh mẽ của ngành công nghiệp bê tông xi măng (BTXM) giữ vai trò quan trọng trong tăng trưởng kinh tế và phát triển hạ tầng. Tuy nhiên, xi măng Portland - thành phần kết dính chủ yếu trong bê tông - lại là một trong những nguồn phát thải CO<sub>2</sub> lớn nhất trong lĩnh vực xây dựng. Theo các báo cáo, ngành xi măng đóng góp khoảng 8% tổng lượng phát thải CO<sub>2</sub> toàn cầu, trong đó riêng công đoạn sản xuất clinker chiếm tới hơn 90% lượng phát thải của toàn ngành [1]. Bên cạnh hệ quả về phát thải trực tiếp, ngành sản xuất xi măng còn đặc trưng bởi cường độ tiêu thụ năng lượng cực lớn tạo nên những thách thức lớn trong việc tối ưu hóa hiệu suất năng lượng và phát triển các giải pháp thay thế bền vững cho ngành vật liệu xây dựng [2]. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải nghiên cứu các giải pháp vật liệu thay thế nhằm giảm hàm lượng xi măng sử dụng trong bê tông, đồng thời vẫn đảm bảo các chỉ tiêu cơ học và độ bền dài.

Trong xu hướng phát triển vật liệu xây dựng bền vững, các phụ gia khoáng như tro bay, xi hạt lò cao nghiền mịn (GGBS), silica fume đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi. Bên cạnh đó, các phế phẩm nông nghiệp giàu silica đang ngày càng được quan tâm, đặc biệt tại các quốc gia sản xuất lúa gạo lớn như Việt Nam. Tro trấu (Rice Husk Ash - RHA) là vật liệu pozzolan có hàm lượng silica vô định hình cao, được tạo ra từ quá trình đốt trấu. Với sản lượng lúa toàn cầu đạt hàng trăm triệu tấn mỗi năm [4], nguồn tro trấu tiềm năng là rất lớn, mở ra cơ hội tái sử dụng phế phẩm nông nghiệp trong sản xuất bê tông theo định hướng kinh tế tuần hoàn.

Nhiều nghiên cứu trước đây đã chứng minh rằng RHA có khả năng cải thiện cường độ nén và độ bền

của bê tông thông qua phản ứng pozzolan và hiệu ứng lấp đầy vi cấu trúc [5-8], [12], [13]. Tuy nhiên, tổng quan tài liệu cho thấy vẫn tồn tại một số khoảng trống nghiên cứu đáng chú ý:

- Ảnh hưởng của RHA đối với đặc trưng cơ học và độ bền thường được đánh giá riêng lẻ, thiếu cách tiếp cận tích hợp giữa tính chất cơ học và các thông số độ bền trong cùng điều kiện cấp phối.

- Phần lớn các nghiên cứu tập trung vào cường độ nén ở tuổi 28 ngày, trong khi đánh giá dài hạn (91 ngày) còn hạn chế.

- Một số nghiên cứu chỉ khảo sát ở cấp độ vữa hoặc bê tông riêng lẻ, thiếu sự so sánh đồng bộ giữa hai cấp độ vật liệu.

Hàm lượng thay thế tối ưu của RHA chưa có sự thống nhất, vẫn còn nhiều kết luận khác nhau.

Do đó, cần có một nghiên cứu thực nghiệm mang tính hệ thống nhằm đánh giá đồng thời các đặc trưng cơ học và độ bền của bê tông sử dụng RHA trong cùng một điều kiện cấp phối, đặc biệt ở các mức thay thế tương đối cao.

Xuất phát từ những vấn đề nêu trên, nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của việc thay thế xi măng Portland bằng tro trấu với hàm lượng từ 0% đến 35% theo khối lượng chất kết dính, trong điều kiện giữ nguyên tỷ lệ nước/chất kết dính ( $N/(X+RHA) = 0,50$ ). Nghiên cứu được thực hiện đồng thời trên cả vữa và bê tông, với các nội dung chính bao gồm:

- Xác định cường độ nén ở tuổi sớm (7 ngày), và tuổi muộn 28 và 91 ngày;
- Đánh giá độ hút nước theo ASTM C642;
- Xác định hệ số khuếch tán ion clorua dựa trên phương trình Nernst-Einstein.

*Điểm mới của nghiên cứu là:*

(i) Cung cấp đánh giá tích hợp về ảnh hưởng của tro trấu đến cả cường độ và hai chỉ tiêu độ bền quan trọng của bê tông (độ hút nước và hệ số khuếch tán ion clorua) trong cùng hệ cấp phối;

(ii) Phân tích sự chuyển tiếp từ hiệu ứng pozzolan và hiệu ứng lấp đầy sang hiệu ứng pha loãng khi hàm lượng RHA vượt ngưỡng tối ưu;

(iii) Xác định khoảng thay thế hợp lý (15-20%) giúp tối ưu hóa cường độ, đồng thời chỉ ra rằng mức thay thế đến 30% vẫn có thể duy trì cường độ tương đương bê tông đối chứng và cải thiện đáng kể khả năng kháng thấm ion clorua.

Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ cơ sở khoa học cho việc ứng dụng tro trấu trong sản xuất bê tông bền vững, đặc biệt phù hợp với điều kiện nguồn nguyên liệu tại Việt Nam và các quốc gia nông nghiệp.

## 2. Vật liệu và các phương pháp thực nghiệm

Xi măng Portland (OPC) được sử dụng tuân thủ các chỉ tiêu kỹ thuật của tiêu chuẩn quốc gia TCVN 2682:2020. Quy trình chế tạo tro trấu (RHA) được thực hiện qua 3 giai đoạn nhằm tối ưu hóa hoạt tính pozzolan. Ban đầu, trấu thô từ nhà máy xay xát được làm sạch tạp chất, phơi sấy tự nhiên để giảm độ ẩm, đảm bảo sự ổn định cho quá trình cháy. Giai đoạn đốt sơ cấp được thực hiện trong thiết bị lò đốt không kiểm soát nhiệt độ. Sau đó, quá trình nung được thực hiện trong lò nung điện trở có kiểm soát nhiệt độ, trong điều kiện môi trường không khí.

Quy trình gia nhiệt được kiểm soát với tốc độ tăng nhiệt  $10^{\circ}\text{C}/\text{phút}$  cho đến khi đạt nhiệt độ nung mục tiêu  $650^{\circ}\text{C}$ . Nhiệt độ này được duy trì ổn định trong thời gian 1 giờ nhằm đảm bảo quá trình đốt cháy hoàn toàn carbon dư và tạo pha silica vô định hình có hoạt tính cao. Sau khi kết thúc giai đoạn giữ nhiệt, mẫu được làm nguội tự nhiên trong lò (furnace cooling) đến nhiệt độ phòng. Việc làm nguội chậm trong môi trường lò giúp hạn chế sốc nhiệt và tránh sự kết tinh lại của silica, từ đó duy trì cấu trúc vô định hình mong muốn.

Việc lựa chọn nhiệt độ nung  $650^{\circ}\text{C}$  dựa trên các nghiên cứu trước đây cho thấy khoảng nhiệt độ  $600-700^{\circ}\text{C}$  là tối ưu để thu được  $\text{SiO}_2$  vô định hình có hoạt tính pozzolan cao, trong khi nhiệt độ vượt quá  $750-800^{\circ}\text{C}$  có thể dẫn đến sự chuyển pha sang dạng tinh thể (cristobalite hoặc tridymite), làm suy giảm hoạt tính [14-15].

Hàm lượng mất khi nung (LOI) sau quá trình xử lý nhỏ hơn 3%, cho thấy carbon dư đã được loại bỏ hiệu quả và điều kiện nung là phù hợp.

Sau đó, tro trấu được nghiền trong máy nghiền bi để tạo thành dạng bột mịn. Thành phần hóa lý của xi măng và tro trấu được thể hiện trong Bảng 1.

**Bảng 1. Thành phần hóa lý của vật liệu**

Thành phần (%)	XM	Tro trấu
$\text{SiO}_2$	20,31	88,13
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,98	0,55
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,08	0,35
CaO	66,87	1,75
MgO	1,22	0,78
Mất khối lượng khi nung (%)	3,25	2,65
Trọng lượng riêng ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3,13	2,06
Cỡ hạt trung bình ( $\mu\text{m}$ )	~11	~4

## 2.1. Vữa xi măng

Vữa xi măng trộn tro trấu (RHA) được chế tạo bằng cách thay thế xi măng OPC (X) bằng các hàm lượng tro trấu khác nhau: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% theo khối lượng xi măng lần lượt tương ứng với mẫu M0, M5, M10, M15, M20, M25, M30 và M35. Tỷ lệ N/(X+RHA) - (nước/chất kết dính) bằng 0,50; tỷ lệ xi măng/ cát bằng 1/3. Thành phần cấp phối vữa được thể hiện trong Bảng 2.

**Bảng 2. Cấp phối vữa**

Tên cấp phối	XM	RHA	N	Cát	Phụ gia siêu dẻo
M0	550	0	275	1455	0.19
M5	522	28	275	1443	0.21
M10	495	55	275	1431	0.23
M15	467	83	275	1419	0.25
M20	440	110	275	1407	0.26
M25	412	138	275	1394	0.28
M30	385	165	275	1382	0.30
M35	357	193	275	1370	0.32

(đơn vị kg/m<sup>3</sup>)

Các mẫu được bọc kín, phủ khăn ẩm trong nhiệt độ phòng cho đến thời điểm tiến hành thí nghiệm.

## 2.2. Bê tông

5 cấp phối BTXM khác nhau, bao gồm cấp phối kiểm chứng (C0) chứa hàm lượng xi măng thay thế bằng RHA là 0% và các cấp phối khác với hàm lượng RHA từ 10, 20, 30, và 35% theo khối lượng xi măng, đã được thiết kế tương ứng với các mẫu C10, C20, C30 và C35. Tất cả các cấp phối được lựa chọn với tỷ lệ N/(X+RHA) bằng 0,50. Tỷ lệ cát/ tổng cấp phối hạt bằng xấp xỉ 0,47 được duy trì ổn định ở tất cả các cấp phối BTXM. Trong quá trình trộn bê tông phụ gia Plasticizer Sikament-R7N được sử dụng để tăng độ dẻo công tác của hỗn hợp BTXM dao động quanh mức 10,0±2,0 cm. Thành phần cấp phối BTXM được thể hiện trong Bảng 3.

Lượng phụ gia được điều chỉnh nhẹ tùy theo hàm lượng RHA để:

- Bù lại sự gia tăng khả năng hút nước của RHA;
- Đảm bảo tính công tác tương đương giữa các cấp phối; tránh ảnh hưởng của sự thay đổi độ sụt đến cường độ và độ bền.

Tuy nhiên, các điều chỉnh rất nhỏ hàm lượng phụ gia siêu dẻo này chỉ nhằm duy trì tính công tác ổn định, không làm thay đổi bản chất so sánh giữa các hỗn hợp vì tỷ lệ nước/chất kết dính được giữ không đổi (0,50).

**Bảng 3. Cấp phối BTXM**

Tên cấp phối	XM	RHA	N	Cát	Đá	Phụ gia siêu dẻo	Độ sụt
C0	400	0	200	850	948	0.22	9.5
C10	360	40	200	845	935	0.26	9.5
C20	320	80	200	835	928	0.30	9.5
C30	280	120	200	825	920	0.34	9.0
C35	260	140	200	820	916	0.38	9.0

(đơn vị kg/m<sup>3</sup>)

Như vậy, ảnh hưởng chính đến tính chất cơ học và độ bền vẫn là hàm lượng RHA.

Mẫu hình trụ  $\phi 100\text{mm}$  và cao 200mm được đúc trong khuôn định hình bằng thép để phục vụ các thí nghiệm xác định cường độ nén, đo độ hút nước và khả năng thấm ion clorua.

Sau khi đúc, toàn bộ các mẫu được bọc kín bằng băng dính nhôm và bảo dưỡng trong phòng đúc trong thời gian 24 giờ. Các mẫu được bảo dưỡng trong điều kiện bọc kín, phủ khăn ẩm trong nhiệt độ phòng cho đến thời điểm tiến hành thí nghiệm.

## 2.3. Thí nghiệm

### (1) Thí nghiệm nén

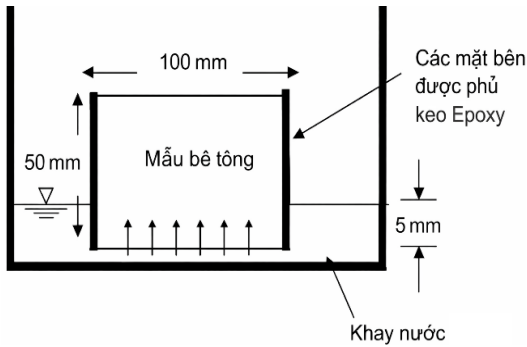
Giá trị cường độ nén của vữa và bê tông được tính toán trên cơ sở trung bình cộng của ba mẫu, với yêu cầu độ sai lệch giữa các giá trị đo không vượt quá 15%, phù hợp với TCVN 3118:2022 [9]. Cường độ nén của vữa xi măng được xác định ở các ngày tuổi 3,7 và 28. Cường độ nén của bê tông được xác định ở các ngày tuổi 28 và 91.

Thí nghiệm nén vữa XM được tiến hành trên máy nén Matest E160-01D, phạm vi đo 0-250kN, vạch chia 0,01kN (Hình 3).

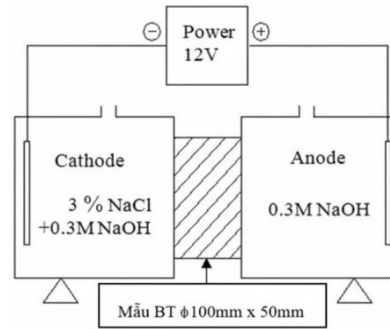
Thí nghiệm nén BTXM được thực hiện trên máy nén Shimadzu UH-3000kN, phạm vi đo 0-3000kN, vạch chia 0,1kN (Hình 4).

### (2) Thí nghiệm độ hút nước

Thí nghiệm khả năng hút nước được tiến hành nhằm xác định lượng chất lỏng (nước) mà bê tông có thể hấp thụ trong những điều kiện xác định. Thí nghiệm này là một chỉ tiêu quan trọng để đánh giá các đặc tính cơ học và độ bền của BTXM khi làm việc trong môi trường ẩm hoặc môi trường nước. Nguyên lý của thí nghiệm dựa trên việc so sánh khối lượng mẫu ở trạng thái khô và trạng thái ướt. Thông qua giá trị độ hút nước, có thể đánh giá chất lượng BTXM cũng



**Hình 1. Thí nghiệm khả năng hút nước của BTXM**



**Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm khuếch tán ion clorua**



**Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm nén vữa**



**Hình 4. Sơ đồ thí nghiệm nén BTXM**

như tình trạng và cấu trúc của hệ lỗ rỗng bên trong, cũng như khả năng chống lại các dạng hư hỏng như nứt nẻ hoặc suy giảm do chu kỳ co ngót, dãn nở của BTXM.

Thí nghiệm độ hút nước được tiến hành theo tiêu chuẩn ASTM C642-91 [10] như trên Hình 1. Trước khi tiến hành thí nghiệm, các mẫu được sấy trong tủ gia nhiệt ở nhiệt độ 105°C trong năm ngày đến khi khối lượng ổn định. Khối lượng được coi là ổn định khi sự sai khác giữa hai lần cân liên tiếp sau 24 giờ không vượt quá 0,5%. Sau đó, các mẫu được để nguội dần trong thời gian hai ngày. Để đảm bảo quá trình thấm nước chỉ diễn ra theo một hướng xác định, các mặt bên của mẫu bê tông được phủ một lớp keo epoxy.

Tiếp theo, các mẫu được đặt theo phương thẳng đứng và ngâm một phần trong nước sạch, với chiều sâu ngập nước 5mm tại một đầu mẫu, trong khi đầu còn lại được để tiếp xúc với không khí trong phòng thí nghiệm. Thời gian ngâm mẫu không dưới 48 giờ; sau mỗi 24 giờ, mẫu được lấy ra cân để theo dõi sự thay đổi khối lượng cho đến khi khối lượng ổn định không thay đổi. Trước khi cân, bề mặt mẫu được lau khô bằng giẻ sạch. Khối lượng mẫu được cân bằng cân điện tử với độ chính xác ±0,01g.

Độ hút nước được biểu thị dưới dạng phần trăm gia tăng khối lượng của mẫu. Tỷ lệ hút nước (%) được tính toán như sau:

$$\text{Độ hút nước (\%)} = \frac{[(\text{Khối lượng ướt} - \text{Khối lượng khô}) / \text{Khối lượng khô}] \times 100}{}$$

Trong đó:

- Khối lượng ướt: Khối lượng của mẫu sau khi ngâm ở trạng thái ổn định (bão hòa nước).
- Khối lượng khô: Khối lượng mẫu trước khi ngâm. Như đã nêu ở trên, trước khi ngâm mẫu được sấy đến khi khối lượng không thay đổi.

Các mẫu bê tông ở 28 và 91 ngày tuổi dưỡng hộ được đem ra tiến hành thí nghiệm.

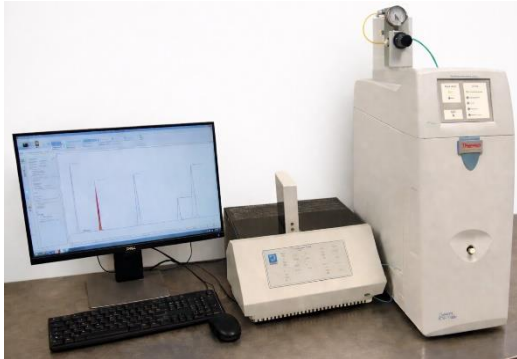
### (3) Thí nghiệm tính hệ số khuếch tán (HSKT) ion clorua

Thí nghiệm tính HSKT ion clorua đánh giá khả năng kháng ion clorua đặc biệt ý nghĩa đối với bê tông sử dụng trong điều kiện môi trường chứa nhiều ion clorua như nước biển, nước lợ ven biển.

Như minh họa ở Hình 2, mẫu bê tông được cố định giữa hai ngăn của buồng khuếch tán, trong đó một ngăn đựng NaCl 3% và ngăn còn lại chứa NaOH 0,3M. Một hiệu điện thế một chiều 12 V được đặt giữa hai điện cực titan đặt trong các dung dịch. Quá trình di chuyển của ion clorua xuyên qua các mẫu bê tông sau 28 và 91 ngày dưỡng hộ ẩm được theo dõi bằng cách định kỳ lấy các mẫu dung dịch nhỏ và xác định nồng độ ion clorua cho đến khi đạt trạng thái ổn định (khoảng 120 giờ). HSKT ion clorua được tính toán dựa trên phương trình Nernst-

Einstein [11]. Nồng độ ion Cl- được xác định bằng máy đo nồng độ ion Chromatography Dionex ICS-1000 thể hiện trên Hình 5.

### 3. Thảo luận



Hình 5. Máy đo nồng độ dung dịch ion

#### 3.1. Cường độ nén của vữa xi măng

Cường độ nén của các mẫu vữa xi măng sử dụng tro trấu (RHA) được trình bày trong Hình 6. Kết quả thí nghiệm tại các tuổi dưỡng hộ 3, 7 và 28 ngày cho thấy cường độ nén tăng dần khi hàm lượng RHA tăng đến khoảng 15%, sau đó giảm khi tỷ lệ thay thế xi măng tiếp tục tăng. Đáng chú ý, tại mức thay thế 30% RHA, cường độ nén của mẫu vữa vẫn đạt giá trị xấp xỉ so với mẫu đối chứng (M0). Tuy nhiên, khi hàm lượng RHA tăng lên 35%, cường độ nén giảm xuống thấp hơn so với vữa tham chiếu. Kết quả này cho thấy tỷ lệ thay thế xi măng Portland thông thường (OPC) bằng RHA khoảng 30% có thể được xem là giới hạn thay thế khả thi, trong khi hỗn hợp chứa 15% RHA thể hiện giá trị cường độ nén cao nhất trong phạm vi nghiên cứu.

Theo các công bố khoa học trước đây, phản ứng pozzolan của tro trấu (RHA) xảy ra thông qua sự tương tác giữa silica vô định hình trong RHA và canxi hydroxit  $Ca(OH)_2$  sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng Portland. Phản ứng này dẫn đến sự hình thành các sản phẩm hydrat hóa thứ cấp, chủ yếu là gel canxi silicat hydrat (CSH). Cơ chế phản ứng tổng quát có thể được biểu diễn như sau:

- Thủy hóa của xi măng:



- Phản ứng Pozzolanic:



Về mặt lý thuyết, quan hệ giữa cường độ và độ rỗng theo mô hình Ryshkewitch-Duckworth có:

$$f_c = f_{c0} \times e^{(-bP)} \quad (3)$$

Trong đó:

- +  $f_c$ : Cường độ nén;
- +  $f_{c0}$ : Cường độ khi độ rỗng bằng 0;
- +  $P$ : Độ rỗng tổng;
- +  $b$ : Hằng số vật liệu.

Theo quan hệ này, cường độ nén của bê tông tăng theo hàm mũ khi độ rỗng giảm.

Trong phản ứng pozzolanic, lượng  $Ca(OH)_2$  sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng đóng vai trò là tác nhân phản ứng với silica vô định hình (chiếm 88,13% trong RHA theo Bảng 1) để tạo thêm CSH thứ cấp làm tăng mật độ pha rắn trong hồ xi măng. Lượng CSH thứ cấp sinh ra tiếp tục lấp đầy lỗ rỗng góp phần làm đặc chắc vi cấu trúc của xi măng. Điều này giải thích vì sao tại mức thay thế 10-20%, cường độ nén ở 28 và 91 ngày tăng khoảng 15-20% so với mẫu đối chứng M0. Ở mức thay thế này, lượng  $Ca(OH)_2$  sinh ra đủ để phản ứng với phần lớn silica hoạt tính của RHA.

Bên cạnh phản ứng pozzolanic, việc bổ sung tro trấu (RHA) với độ mịn cao (kích thước hạt trung bình khoảng  $\sim 4\mu\text{m}$ , nhỏ hơn đáng kể so với khoảng  $\sim 11\mu\text{m}$  của xi măng) không những làm tăng diện tích bề mặt tiếp xúc phản ứng mà còn tạo ra hiệu ứng lấp đầy (filler effect) trong hệ vật liệu. Nhờ kích thước hạt rất mịn và diện tích bề mặt riêng lớn, các hạt RHA có khả năng lấp đầy các khoảng trống giữa các hạt xi măng và cốt liệu mịn, từ đó cải thiện sự phân bố kích thước hạt và làm giảm độ rỗng tổng thể của hồ xi măng. Sự suy giảm độ rỗng mao dẫn góp phần làm tăng mức độ đặc chắc của vi cấu trúc bê tông, qua đó nâng cao các đặc trưng cơ học và giảm khả năng thấm nước của vật liệu.

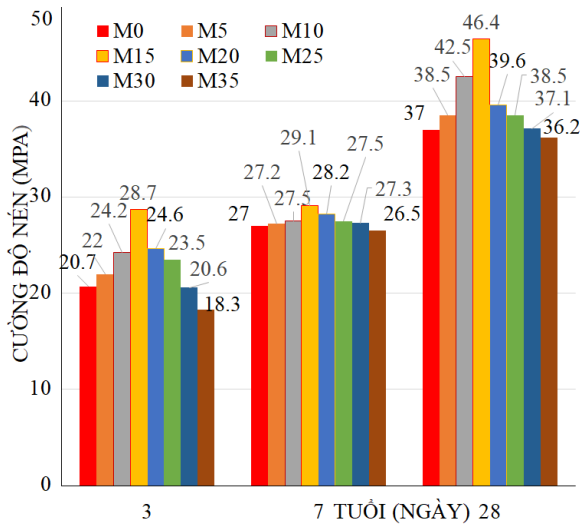
Kết quả thực nghiệm này phù hợp với xu hướng được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đây [5-7].

#### 3.2. Cường độ nén của bê tông

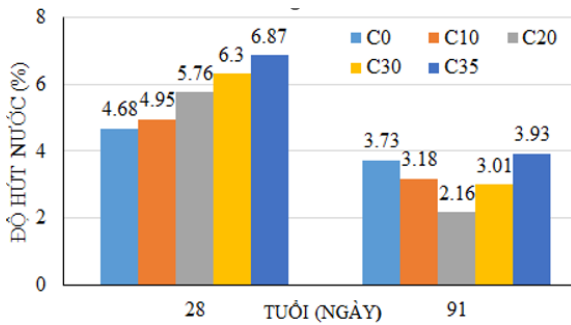
Cường độ nén của các hỗn hợp bê tông được mô tả trên Hình 7. Phân tích kết quả thực nghiệm tại các tuổi dưỡng hộ 7, 28 và 91 ngày cho thấy cường độ nén của bê tông tăng dần khi hàm lượng RHA tăng đến 20%. Khi tỷ lệ thay thế RHA vượt quá 20%, cường độ nén của bê tông có xu hướng suy giảm. Tại mức thay thế 30% RHA, cường độ nén của mẫu C30 đạt giá trị xấp xỉ so với mẫu bê tông tham chiếu C0. Ngược lại, khi hàm lượng RHA tăng lên 35%, cường độ nén có giá trị thấp hơn so với bê tông tham chiếu. Trên cơ sở đó, mức thay thế 30% RHA được xem là giới hạn tối ưu.

Sự tăng cường độ của bê tông chứa RHA với hàm lượng thay thế dưới 20% cũng được lý giải do tác động tích cực của phản ứng Pozzolanic và hiệu ứng lấp đầy giải thích ở mục 3.1.

Tuy nhiên, khi hàm lượng thay thế xi măng vượt



Hình 6. Cường độ nén của vữa xi măng



Hình 8. Độ hút nước của bê tông

quá 30%, cường độ nén của bê tông bắt đầu suy giảm rõ rệt. Hiện tượng này có thể được giải thích bởi hiệu ứng pha loãng (dilution effect) của hệ chất kết dính.

Về mặt định lượng, khi tro trấu (RHA) thay thế xi măng với tỷ lệ  $r$ , lượng xi măng còn lại trong hỗn hợp được xác định theo biểu thức:

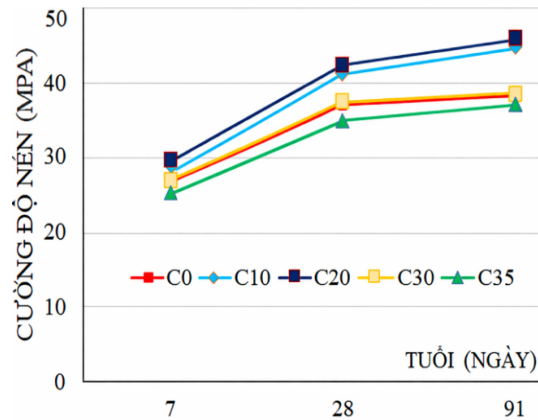
$$m_c = m_o (1 - r) \quad (4)$$

Trong đó:

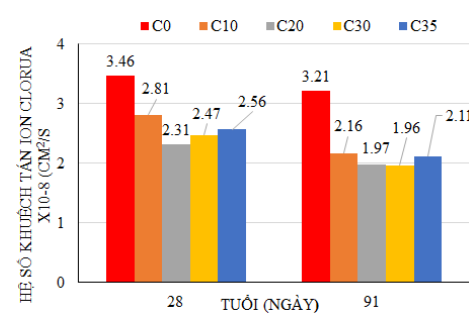
- +  $m_c$  là khối lượng xi măng còn lại;
- +  $m_o$  là khối lượng xi măng ban đầu;
- +  $r$  là tỷ lệ thay thế RHA.

Khi  $r \geq 0,35$ , hàm lượng clinker trong hệ giảm đáng kể, kéo theo sự suy giảm lượng  $\text{Ca(OH)}_2$  sinh ra trong quá trình thủy hóa. Do  $\text{Ca(OH)}_2$  là tác nhân cần thiết cho phản ứng pozzolan, sự thiếu hụt này làm hạn chế mức độ hình thành các sản phẩm CSH thứ cấp. Đồng thời, tổng lượng sản phẩm hydrat hóa trong hệ giảm do lượng xi măng tham gia thủy hóa ban đầu thấp hơn.

Sự suy giảm đồng thời của CSH sơ cấp và thứ cấp làm giảm mật độ cấu trúc của hồ xi măng, tăng độ rỗng



Hình 7. Cường độ nén của BTXM



Hình 9. Hệ số khuếch tán ion clorua

hữu hiệu và làm suy yếu mạng lưới liên kết trong ma trận bê tông. Hệ quả là cường độ sớm bị ảnh hưởng rõ rệt và trong một số trường hợp, cả cường độ ở tuổi muộn cũng có xu hướng giảm khi hàm lượng RHA vượt quá ngưỡng tối ưu.

Như vậy, kết quả thực nghiệm quan sát được phản ánh sự cân bằng giữa hai cơ chế: Hiệu ứng hoạt tính (pozzolanic và filler) chiếm ưu thế ở mức thay thế trung bình, và hiệu ứng pha loãng trở nên chi phối khi hàm lượng RHA quá cao.

Những kết quả thu được có sự tương đồng với các nghiên cứu đã được công bố trước đây. Zhang và cộng sự [12] báo cáo rằng cường độ nén của bê tông có hàm lượng tro trấu (RHA) lên đến 30% cao hơn so với bê tông tham chiếu tại các tuổi 7, 14, 28 và 91 ngày. Bhanumathidas và cộng sự [13] cũng khẳng định rằng, cường độ nén ở tuổi 91 ngày của BTXM sử dụng RHA với mức độ thay thế lên đến 40% cao hơn so với hỗn hợp bê tông thông thường không chứa RHA.

### 3.3. Độ hút nước của BTXM

Tính thấm nước của BTXM được đánh giá thông qua độ hút nước bão hòa sau 28 và 91 ngày dưỡng hộ,

được mô tả trong Hình 8. Có thể nhận thấy rằng, ở tuổi dưỡng hộ 28 ngày, tỷ lệ hút nước tăng khi hàm lượng RHA tăng đến 35%. Nguyên nhân là do RHA có kích thước hạt mịn hơn so với xi măng Portland làm tăng diện tích bề mặt hút nước và đồng thời bản chất RHA cũng có tính hút ẩm cao. Ở 28 ngày, phản ứng pozzolanic xảy ra còn chậm, lượng RHA chưa phản ứng hết vẫn còn tương đối nhiều dẫn đến độ hút nước còn cao.

Khi thời gian dưỡng hộ tăng lên 91 ngày, giá trị độ hút nước giảm đáng kể khi hàm lượng RHA tăng đến 25%. Ngay cả tại mức thay thế 30% RHA, giá trị độ hút nước vẫn thấp hơn so với mẫu bê tông tham chiếu C0.

Điều này cho thấy, việc kéo dài thời gian dưỡng hộ bê tông sử dụng RHA góp phần làm giảm số lượng lỗ rỗng thấm nước, từ đó cải thiện khả năng chống thấm của bê tông. Điều này được lý giải nguyên nhân là do tốc độ phản ứng pozzolanic của RHA vẫn còn tiếp tục xảy ra mạnh ở tuổi muộn của bê tông (sau 28 ngày tuổi), tiếp tục tiêu thụ RHA và tạo CSH thứ cấp làm giảm lỗ rỗng tăng độ đặc chắc từ đó giảm độ hút nước.

### 3.4. Hệ số khuếch tán (HSKT) ion clorua

Trong nghiên cứu độ bền kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt tại các vùng duyên hải hoặc môi trường biển xâm thực, việc thực nghiệm xác định HSKT ion clorua được xem là chỉ số đánh giá then chốt. Ion clorua được xem là tác nhân chủ yếu gây ăn mòn cốt thép trong kết cấu xây dựng hoạt động trong môi trường biển, vùng ven biển, khu vực sử dụng muối chống băng và môi trường công nghiệp. Dựa trên kết quả thí nghiệm khuếch tán ion clorua, mức độ và tốc độ thâm nhập của ion clorua qua hệ lỗ rỗng của bê tông có thể được xác định, từ đó đánh giá hiệu quả bảo vệ cốt thép của bê tông. HSKT ion clorua càng nhỏ cho thấy cấu trúc bê tông càng đặc chắc, khả năng thấm ion clorua càng thấp và khả năng chống ăn mòn cốt thép càng cao. Do đó, thí nghiệm này được sử dụng như một cơ sở khoa học quan trọng để đánh giá và so sánh độ bền của các loại bê tông khác nhau.

Về mặt lý thuyết, phương trình Nernst-Einstein để xác định hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông:

Hệ số khuếch tán ion chloride được tính toán theo công thức:

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z|EFC_{Cl}} \quad (5)$$

Trong đó:

$D_e$ : Hệ số thấm nhập ion ( $m^2/s$ );

$R$ : Hằng số khí (8,3144J/mol K);

$T$ : Nhiệt độ tuyệt đối của dung dịch ở anode (K);

$Z$ : Điện tích của ion Chloride ion (-1);

$F$ : Hằng số Faraday (96,480J/V mol);

$C_{Cl}$ : Nồng độ trung bình tại khoang Cathode ( $mol/m^3$ );

$E$ : Hiệu điện thế thực tế trên bề mặt mẫu (V);

$L$ : Chiều cao mẫu (m).

$J_{Cl}$ : Thông lượng của ion chloride ở trạng thái tĩnh ( $mol/m^2s$ ).

Thông lượng của ion chloride ở trạng thái tĩnh được tính theo công thức:

$$J_{Cl} = \frac{V \Delta C_{Cl}}{A \Delta t} \quad (6)$$

Trong đó,  $V$  là thể tích khoang chứa anode ( $m^3$ ),  $A$  là diện tích mặt cắt ngang mẫu ( $m^2$ ) và tỷ số  $\Delta C_{Cl}/\Delta t$  là độ biến thiên nồng độ chloride ở cực anode ( $mol/m^3/s$ ).

Từ các công thức (5) và (6) có thể nhận thấy rằng khi lượng ion clorua đi qua lớp bê tông giảm, tức là thông lượng giảm, thì hệ số khuếch tán ion clorua cũng giảm theo. Điều này giải thích vì sao hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông có sử dụng tro trấu (RHA) tại các thời điểm 28 và 91 ngày tuổi thấp hơn so với bê tông thông thường không chứa RHA (Hình 9). Nguyên nhân chủ yếu là do phản ứng pozzolanic của RHA tạo ra sản phẩm CSH thứ cấp, góp phần lấp đầy các lỗ rỗng trong vi cấu trúc bê tông xi măng, làm cho cấu trúc trở nên đặc chắc hơn và giảm mức độ liên thông của hệ mao dẫn. Kết quả là quá trình vận chuyển ion clorua trong bê tông bị hạn chế, dẫn đến sự suy giảm thông lượng ion clorua.

Hình 9 thể hiện sự biến thiên giá trị của HSKT ion clorua của các cấp phối bê tông sử dụng tro trấu. Kết quả cho thấy HSKT ion clorua của bê tông giảm dần khi hàm lượng RHA tăng đến 20%. Khi tỷ lệ thay thế RHA tăng lên 30% và 35%, HSKT có xu hướng tăng trở lại, tuy nhiên vẫn thấp hơn so với bê tông tham chiếu không sử dụng RHA. Xu hướng này được ghi nhận nhất quán tại cả hai thời điểm dưỡng hộ 28 và 91 ngày. Các kết quả trên cho thấy việc thay thế một phần xi măng Portland thông thường bằng RHA góp phần làm giảm đáng kể khả năng phân tán ion clorua trong bê tông.

Theo lý thuyết khuếch tán trong vật liệu rỗng, hệ số khuếch tán ion clorua phụ thuộc chặt chẽ vào độ rỗng và mức độ liên thông của hệ mao dẫn trong bê tông [13]. Nhờ kích thước hạt siêu mịn, tro trấu có khả năng lấp đầy các lỗ hổng siêu vi và lỗ rỗng lớn, từ đó ngăn chặn sự kết nối của hệ thống mao dẫn

trong cấu trúc bê tông. Zhang [12] đã chỉ ra rằng các vật liệu pozzolan có hoạt tính cao, điển hình là tro trấu, có khả năng làm giảm kích thước lỗ rỗng trong hồ xi măng sau thủy hóa, khiến cấu trúc trở nên gần như không thấm ngay cả ở tuổi sớm (7-28 ngày). Kết quả này cũng phù hợp với nhận định của Bhanumathidas [13] về khả năng lấp đầy lỗ rỗng của RHA trong BTXM.

Bên cạnh đó, độ mịn của thành phần tro trấu càng cao thì khả năng chống thấm ion clorua của các mẫu bê tông càng được cải thiện rõ rệt [12]. Dữ liệu thực nghiệm từ nghiên cứu đã xác nhận rằng sự hiện diện của các hạt RHA mịn tạo ra hiệu ứng lấp đầy lỗ rỗng cấu trúc BTXM, từ đó nâng cao đáng kể khả năng kháng thấm của BTXM.

#### 4. Kết luận

Từ các kết quả thí nghiệm về cường độ nén, độ hút nước và hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông sử dụng tro trấu (RHA), có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

Việc thay thế một phần xi măng bằng tro trấu (RHA) có ảnh hưởng rõ rệt đến đặc trưng cơ học của bê tông. Trong phạm vi nghiên cứu, cường độ nén của bê tông tăng khi hàm lượng RHA tăng đến khoảng 15-20%. Ở mức thay thế này, cường độ nén tại 28 và 91 ngày tăng khoảng 10-20% so với bê tông đối chứng. Khi hàm lượng RHA tiếp tục tăng, cường độ nén có xu hướng giảm dần do hiệu ứng pha loãng chất kết dính, tuy nhiên ở mức thay thế 30% cường độ vẫn duy trì xấp xỉ bê tông đối chứng.

Sự có mặt của RHA góp phần cải thiện đáng kể đặc trưng độ bền chống thấm nước của bê tông. Kết quả thí nghiệm cho thấy các hỗn hợp bê tông chứa RHA có độ hút nước thấp hơn so với bê tông thông thường, cho thấy cấu trúc lỗ rỗng của vật liệu trở nên đặc chắc hơn.

Hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông chứa RHA giảm đáng kể so với bê tông đối chứng, đặc biệt tại các tuổi 28 và 91 ngày. Điều này chứng tỏ việc sử dụng RHA giúp nâng cao khả năng kháng thấm ion clorua của bê tông, qua đó góp phần cải thiện độ bền trong môi trường xâm thực, đặc biệt là môi trường biển.

Cơ chế cải thiện tính chất của bê tông khi sử dụng RHA được giải thích chủ yếu bởi hai yếu tố: (i) phản ứng pozzolanic giữa silica vô định hình trong RHA và  $\text{Ca(OH)}_2$  sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng, tạo thành gel CSH thứ cấp; và (ii) hiệu ứng lấp đầy của các hạt RHA mịn, giúp giảm độ rỗng và hạn chế sự liên thông của hệ mao dẫn trong vi cấu trúc bê tông.

Trong điều kiện nghiên cứu với tỷ lệ nước/ chất kết dính bằng 0,50, hàm lượng thay thế xi măng bằng tro trấu khoảng 15-20% được xác định là khoảng tối ưu, cho phép đồng thời cải thiện cường độ và độ bền của bê tông. Hàm lượng thay thế đến khoảng 30% vẫn có thể được xem là khả thi khi mục tiêu ưu tiên là tăng cường khả năng kháng thấm và tận dụng vật liệu phế thải nông nghiệp.

Kết quả nghiên cứu cho thấy tro trấu là một phụ gia khoáng tiềm năng trong sản xuất bê tông bền vững, góp phần giảm hàm lượng xi măng sử dụng, cải thiện độ bền vật liệu và thúc đẩy việc tái sử dụng phế phẩm nông nghiệp trong lĩnh vực xây dựng.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT25-26.105.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] How Cement Is Made, *American Cement Association*.  
<https://www.cement.org/cement-concrete/how-cement-is-made/>
- [2] *Concrete: the world's 3rd largest CO<sub>2</sub> emitter*.  
<https://phys.org/news/2021-10-concrete-world-3rd-largest-co2.html>
- [3] D. D. Bui et al. (2005), *Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete*, *Cem. Concr. Compos.*, Vol.27, pp.357-366.  
Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.05.002.
- [4] *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.  
<https://www.fao.org/economic/est/publications/rice-publications/rice-market-monitor-rmm/en/>
- [5] A. S. Montoya et al. (2022), *Effectiveness of Ternary Blend Incorporating Rice Husk Ash, Silica Fume, and Cement in Preparing ASR Resilient Concrete*, *Materials*, Vol.15.  
doi: 10.3390/ma15062125.
- [6] A. S. Montoya et al. (2023), *High Performance Concretes with Highly Reactive Rice Husk Ash and Silica Fume*, *Materials*, Vol.16.  
Doi: 10.3390/ma16113903.
- [7] S. A. Endale et al. (2024), *The Effects of Rice Husk Ash as Bio-Cementitious Material in Concrete*, *Constr. Mater.*, Vol.4, pp.629-639.  
Doi: 10.3390/constrmater4030034.

- [8] T.B. Viet et al. (2022), *Nghiên cứu sử dụng tro trấu nghiền mịn (RHA) thay thế một phần silica fume (SF) để chế tạo UHPC*, Tạp chí Xây dựng, Số 7, tr.60-63.
- [9] *Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 3118:2022: Bê tông - phương pháp xác định cường độ chịu nén.*
- [10] *ASTM C 642: 2013 Standard Test Method for Density*, Absorption.  
<https://www.intertekinform.com/en-gb/standards/s>.
- [11] C. Andrade et al. (1993), *Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements*, Cem. Concr. Res., Vol.23, pp.724-742.  
Doi: 10.1016/0008-8846(93)90023-3.
- [12] Z. Zhang, et al. (2020), *Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash*, Cem. Concr. Res., Vol.137.  
Doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106200.
- [13] N. Bhanumathidas and P. K. Mehta (2001), *Concrete Mixtures Made with Ternary Blended Cements Containing Fly Ash and Rice-Husk Ash*, ACI Mater. J., Vol.199, pp.379-392.  
Doi: 10.14359/10505.
- [14] A. Siddika, et al. (2021), *State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete*, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, Vol.3(5), pp.294-307.  
doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.006.
- [15] M. Thiedeiz et al. (2020), *Performance of rice husk ash as supplementary cementitious material after production in the field and in the lab*, Material, Vol.13, p.4319.  
Doi:10.3390/ma13194319ww.

Ngày nhận bài:	06/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	08/03/2026
Ngày duyệt đăng:	10/03/2026