



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.7.40-51>

*Corresponding author:

Email address:

ninh.bt@ut.edu.vn

Received: 25/05/2026

Received in Revised Form:

14/08/2026

Accepted: 18/08/2026

Compressive, Tensile, and Flexural Strength of Ultra-High Performance Concrete Using Rice Husk Ash as a Mineral Admixture

Thach Makara¹, Bui Thi Ninh^{2*}, Huynh Van Thanh², Nguyen Trong Tam², Nguyen Chi Tai³, Cao Cong Anh², Pham Ngoc Sang²

¹Southern Infrastructure Construction Joint Stock Company, No. 37/17/11 Ha Huy Giap Street, An Phu Dong Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

²University of Transport Ho Chi Minh City, No. 2 Vo Oanh Street, Thanh My Tay Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

³Southern Institute of Construction Planning, 65 Mac Dinh Chi Street, Tan Dinh Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

Abstract: Ultra-High Performance Concrete (UHPC) has been widely used to enhance the load-bearing capacity and durability of concrete structures. This study investigates the feasibility of using finely ground Rice Husk Ash (RHA) as a replacement for silica fume (SF) in UHPC production. The mechanical properties including flowability, compressive strength, direct tensile strength, and flexural strength characteristics of UHPC, were evaluated through laboratory experiments. The results show that UHPC incorporating RHA as the sole mineral admixture can achieve a compressive strength of 135.67 MPa, a direct tensile strength of 8.16 MPa, and a flexural strength of 18.84 MPa at 28 days. The findings demonstrate that RHA has significant potential as an alternative to silica fume in UHPC, contributing to cost reduction and promoting the wider application of this material in Vietnam.

Keywords: UHPC, Rice husk ash, Compressive strength, Direct tensile strength, Flexural strength.



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.7.40-51>

*Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
ninh.bt@ut.edu.vn

Ngày nộp bài: 25/05/2026
Ngày nộp bài sửa: 14/08/2026
Ngày chấp nhận: 18/08/2026

Đặc tính cường độ chịu nén, kéo và uốn của bê tông siêu tính năng sử dụng tro trấu làm phụ gia khoáng

Thạch Makara¹, Bùi Thị Ninh^{2*}, Huỳnh Văn Thành², Nguyễn Trọng Tâm², Nguyễn Chí Tài³, Cao Công Ánh², Phạm Ngọc Sáng²

¹Công ty Cổ phần Xây dựng hạ tầng Miền Nam, số 37/17/11 đường Hà Huy Giáp, phường An Phú Đông, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh, số 2 đường Võ Oanh, phường Thạnh Mỹ Tây, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Viện Quy hoạch xây dựng Miền Nam, số 65 đường Mạc Đĩnh Chi, phường Tân Định, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Tóm tắt: Sử dụng bê tông siêu tính năng (UHPC) giúp nâng cao khả năng chịu lực cũng như độ bền của cấu kiện bê tông trong xây dựng. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về tính khả thi khi sử dụng tro trấu nghiền mịn (RHA) thay thế phụ gia khoáng silica fume (SF) trong chế tạo bê tông UHPC. Các tính năng cơ học của UHPC như độ chảy xòe, cường độ chịu nén, kéo trực tiếp và uốn được xác định thông qua thí nghiệm. Kết quả cho thấy UHPC sử dụng hoàn toàn phụ gia khoáng từ tro trấu RHA có thể đạt cường độ chịu nén 135,67 MPa, cường độ kéo 8,16 MPa và cường độ uốn 18,84 MPa sau 28 ngày. Nghiên cứu khẳng định tiềm năng ứng dụng phụ gia khoáng RHA trong chế tạo UHPC, góp phần giảm chi phí và mở rộng khả năng ứng dụng vật liệu này tại Việt Nam.

Từ khóa: UHPC, Tro trấu, Cường độ chịu nén, Cường độ chịu kéo trực tiếp, Cường độ chịu uốn.

1. Giới thiệu

Bê tông siêu tính năng cao (Ultra-High Performance Concrete - UHPC) là một loại vật liệu được nghiên cứu và phát triển trên thế giới khoảng hơn 40 năm. Theo đó, UHPC là loại bê tông được tối ưu hóa thành phần cấp phối hạt, có tỷ lệ nước trên xi măng nhỏ hơn 0,25 và hàm lượng cốt sợi cao. Các tính chất cơ học UHPC gồm cường độ nén lớn hơn 120 MPa và cường độ kéo sau nứt duy trì lớn hơn 5 MPa, cường độ chịu kéo khi uốn từ 8 - 30 MPa và mô đun đàn hồi trong khoảng 40 đến 55 MPa [1].

Trong các cấp phối UHPC, silica fume được

sử dụng rộng rãi như một phụ gia khoáng (SCM) rất quan trọng nhờ kích thước hạt cực mịn, phân bố rộng và hàm lượng silica vô định hình (SiO_2) cao, điều này góp phần làm đặc chắc ma trận xi măng thông qua hiệu ứng lấp đầy và phản ứng pozzolanic [2], [3], giúp cải thiện đáng kể vi cấu trúc và đặc tính cơ học của UHPC. Tuy nhiên, việc sử dụng SF với hàm lượng cao trong UHPC vẫn tồn tại một số hạn chế liên quan đến chi phí và khả năng cung ứng, do SF là sản phẩm phụ của quá trình sản xuất silicon và hợp kim ferrosilicon, nên nguồn cung của vật liệu này phụ thuộc đáng kể vào hoạt động của ngành công nghiệp luyện kim [4].

Những hạn chế này thúc đẩy việc nghiên cứu các vật liệu giàu silica thay thế có nguồn cung ổn định hơn và phù hợp với định hướng phát triển UHPC bền vững. Do đó, tìm kiếm phụ gia khoáng để thay thế một phần hoặc hoàn toàn SF truyền thống và duy trì tính năng ưu việt của UHPC hết sức cần thiết, mang ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn cao.

Trong thực tế, RHA là phụ phẩm nông nghiệp thu được từ quá trình đốt vỏ trấu và được xem là một vật liệu bổ sung xi măng (SCM) tiềm năng nhờ hàm lượng silica cao và khả năng tham gia phản ứng pozzolan. Việc tận dụng RHA trong vật liệu xi măng không chỉ góp phần xử lý nguồn phế thải nông nghiệp mà còn hướng tới giảm tiêu thụ tài nguyên và nâng cao tính bền vững của bê tông [5]. Đặc tính của RHA phụ thuộc đáng kể vào quá trình xử lý; đặc biệt, việc nghiền làm giảm kích thước hạt và cải thiện hoạt tính pozzolan, qua đó có thể tác động tích cực đến sự phát triển cường độ và các đặc tính độ bền của bê tông [6]. So với SF, RHA thường có hạt không đều, kích thước lớn và cấu trúc xốp, làm tăng nhu cầu nước và có thể ảnh hưởng đến tính công tác cũng như độ đặc chắc của UHPC. Tuy nhiên, nhờ hàm lượng silica vô định hình cao, RHA có khả năng phản ứng pozzolan với $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tạo thêm gel C-S-H và cải thiện vi cấu trúc bê tông. Zhang và Malhotra [7] cho thấy việc sử dụng RHA với hàm lượng thích hợp có thể cải thiện cường độ và một số tính chất của bê tông. Vì vậy, RHA được xem là vật liệu tiềm năng thay thế một phần SF trong UHPC, song cần tiếp tục nghiên cứu để xác định mức thay thế phù

hợp và ảnh hưởng đến các tính chất của UHPC.

Bên cạnh những ảnh hưởng tích cực đến tính chất cơ học, RHA còn cho thấy tiềm năng cải thiện độ bền của bê tông. Bouzoubaâ và Fournier [8] ghi nhận rằng việc sử dụng RHA với hàm lượng thích hợp có thể làm giảm đáng kể khả năng xâm nhập của ion clorua vào bê tông, đồng thời vẫn duy trì sự phát triển cường độ nén. Hiệu quả này cho thấy RHA không chỉ đóng vai trò là vật liệu pozzolan thay thế một phần chất kết dính mà còn có tiềm năng nâng cao khả năng chống lại sự xâm nhập của các tác nhân gây suy giảm độ bền trong môi trường khai thác.

Ngoài các lợi ích về mặt kỹ thuật, việc sử dụng RHA còn có ý nghĩa về môi trường. Việc thay thế một phần xi măng Portland bằng các vật liệu bổ sung xi măng (SCMs) được xem là một trong những giải pháp góp phần giảm lượng clinker tiêu thụ và phát thải CO_2 liên quan đến sản xuất xi măng [9]. Trong bối cảnh đó, việc tận dụng RHA như một nguồn SCM từ phụ phẩm nông nghiệp không chỉ góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên mà còn tạo tiềm năng giảm tác động môi trường của vật liệu xi măng, hướng tới phát triển bê tông theo hướng bền vững.

Hơn nữa, nghiên cứu [10] cho thấy RHA có thể thay thế một phần silica fume trong chế tạo UHPC. Kết quả chứng minh có thể đạt chất lượng UHPC khi sử dụng tỷ lệ thay thế hợp lý. Tuy nhiên, khi tăng hàm lượng thay thế, tính công tác và hiệu quả giảm, đồng thời chưa có khảo sát cho trường hợp thay thế hoàn toàn SF.



Hình 1. Tro trấu nghiền mịn RHA

Tro trấu tại Đồng bằng sông Cửu Long có một số đặc điểm khác biệt so với các nguồn RHA khác do điều kiện sản xuất nông nghiệp và công nghệ đốt. Trước hết, khu vực này là vùng sản xuất lúa lớn nhất Việt Nam, đóng góp hơn 50% tổng sản lượng lúa của cả nước, tạo ra nguồn phụ phẩm trấu rất dồi dào. Với sản lượng khoảng 23 triệu tấn lúa mỗi năm, Đồng bằng sông Cửu Long phát sinh khoảng 4,6 triệu tấn trấu, tạo tiền đề cho việc sản xuất RHA quy mô lớn [11].

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá khả năng sử dụng phụ gia khoáng RHA có nguồn gốc từ Đồng bằng sông Cửu Long như Hình 1 để thay thế toàn bộ silica fume truyền thống trong cấp phối UHPC. Cấp phối đối chứng được khảo sát để đánh giá hàm lượng RHA, nước và phụ gia siêu dẻo tương ứng. Trên cấp phối tối ưu, tiến hành xác định độ chảy xòe, đặc tính cơ học và đặc điểm vi cấu trúc của UHPC sử dụng RHA.

Ngoài ra, nghiên cứu còn đánh giá chi phí chế tạo loại bê tông này so với bê tông UHPC sử dụng phụ gia khoáng truyền thống là silica fume,

từ đó góp phần thúc đẩy sử dụng bền vững phụ phẩm nông nghiệp làm phụ gia khoáng trong chế tạo UHPC. RHA trong nghiên cứu này có hàm lượng silica vô định hình cao, khối lượng riêng tương đương với SF. Bên cạnh đó, loại vật liệu này có kích thước hạt lớn, đường cong cấp phối hạt liên tục khi phối trộn với các thành phần nguyên vật liệu khác trong cấp phối UHPC. Kết quả thực nghiệm cho thấy chế tạo và sử dụng UHPC với phụ gia khoáng hoàn toàn RHA thỏa mãn yêu cầu cơ bản của UHPC. Nhóm nghiên cứu đã nghiên cứu chế tạo UHPC từ RHA. Các tính năng như cường độ chịu nén, cường độ kéo trực tiếp và cường độ chịu kéo khi uốn của UHPC được nghiên cứu làm rõ.

2. Thành phần nguyên vật liệu và quy trình chế tạo UHPC

2.1. Thành phần nguyên vật liệu

Trong bài báo này, hỗn hợp UHPC được chế tạo từ các nguyên vật liệu như xi măng, silica fume, tro trấu, cát thạch anh, phụ gia siêu dẻo, bột cát như Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần nguyên vật liệu

STT	Nguyên vật liệu	Ký hiệu	Khối lượng riêng (g/cm ³)
1	Xi măng PC 50	C	3,05
2	Silica fume	SF	2,22
3	Tro trấu	RHA	2,05
4	Bột cát thạch anh	QP	2,63
5	Cát thạch anh	SS	2,65
6	Sợi thép	F	7,85
7	Nước	W	1,00
8	Phụ gia siêu dẻo	SP	1,10

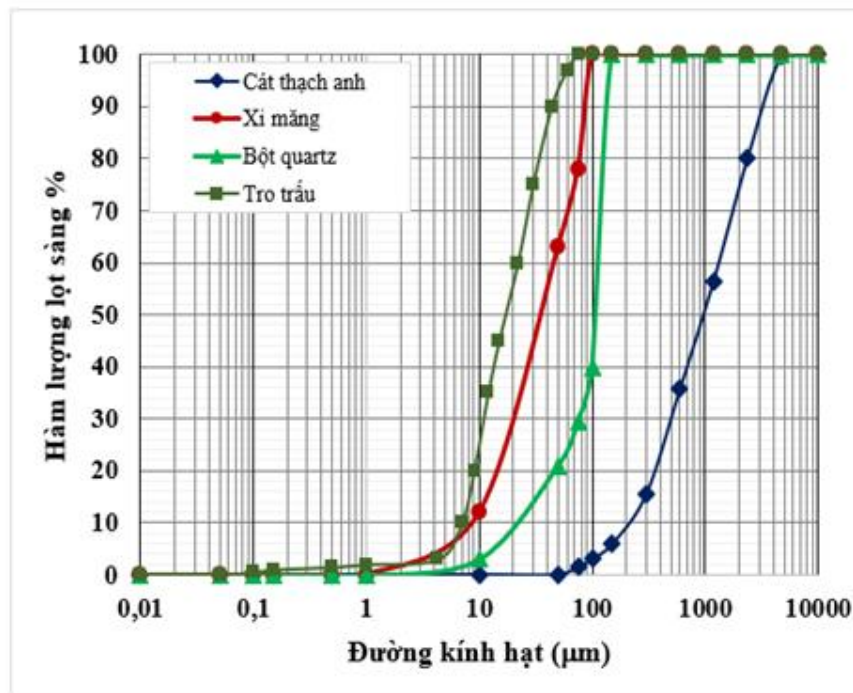
Trong nghiên cứu này phụ gia khoáng RHA có khối lượng bị mất khi nung là 4,9%, hàm lượng SiO₂ hoạt tính 91,17%, kích thước trung bình của hạt 22,5 μ m, diện tích riêng bề mặt 303 m²/g. Như vậy, RHA thỏa mãn tiêu chuẩn ASTM C618-22 [12]. Đồng thời, hoạt tính pozzolan của RHA được đánh giá theo tiêu chuẩn ASTM C311/C311M [13], cho thấy loại vật liệu này có khả năng phản ứng với Ca(OH)₂ sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng

để hình thành gel C-S-H.

Các chỉ tiêu cơ lý của phụ gia khoáng RHA và SF được phân tích như Bảng 2. Phân tích cho thấy tính chất cơ lý của hai loại vật liệu này khá tương đồng, tuy diện tích bề mặt riêng của RHA lớn hơn so với SF nhưng do RHA có cấu trúc xốp, diện tích đo được bao gồm bề mặt bên trong lỗ rỗng, phần không tiếp xúc trực tiếp với sản phẩm thủy hóa.

Bảng 2. Các chỉ tiêu cơ lý của RHA và SF

Loại phụ gia khoáng	Thông số	Đơn vị	Kết quả
RHA	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,05
	Diện tích bề mặt	m ² /g	303
	Hàm lượng SiO ₂	%	91,17
SF	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,22
	Diện tích bề mặt	m ² /g	27
	Hàm lượng SiO ₂	%	95,45

**Hình 2.** Biểu đồ thành phần hạt của các cốt liệu

Trong khi đó, diện tích riêng của SF gần như là diện tích tổng thể bề mặt ngoài có hiệu của loại vật liệu này vì SF có kích thước hạt rất nhỏ, hầu như không có lỗ rỗng, đây là diện tích hiệu quả trực tiếp xúc với sản phẩm thủy hóa Calcium Hydroxide (CH) chuỗi phản ứng nên độ hoạt tính pozzolan của SF vẫn cao hơn đáng kể so với RHA. Ngoài ra, hàm lượng SiO₂ hoạt tính trong RHA thấp hơn SF đây cũng là lý do khiến UHPC sử dụng loại phụ gia khoáng này có cường độ thấp hơn so với UHPC có phụ gia khoáng là SF truyền thống. Thành phần hạt các loại cốt liệu được phân tích như Hình 2.

Từ biểu đồ cho thấy, phụ gia khoáng RHA có kích thước hạt trung bình là 18,37 μm lớn hơn khá

nhều so với SF là 0,15 μm, sự chênh lệch kích thước hạt ảnh hưởng đến tốc độ phản ứng pozzolan, mức độ lèn chặt trong cấu trúc đồng thời vùng chuyển tiếp (interfacial transition zone - ITZ) giữa cốt liệu và đá xi măng cũng kém đặc chắc hơn. Những yếu tố trên đều ảnh hưởng đến cường độ của UHPC. Ngoài ra, có thể thấy khi thay SF hoàn toàn bằng RHA thì thành phần hạt RHA có thể nối với thành phần lớn hơn kế tiếp là xi măng để tạo nên tính liên tục trong cấp phối hạt các cốt liệu.

2.2. Cấp phối đối chứng

Dựa trên nền cấp phối hạt mịn M3Q [14], nhóm nghiên cứu tiến hành lựa chọn phụ gia khoáng là tro trấu nghiền mịn có nguồn gốc từ

Đồng bằng sông Cửu Long và các vật liệu khác ở địa phương Việt Nam. Tiến hành thử nghiệm đánh giá dần trong phòng thí nghiệm để chọn cấp phối đối chứng.

Bảng 3 là cấp phối đối chứng lựa chọn. Trong cấp phối này, tỷ lệ giữa phụ gia khoáng RHA, nước, phụ gia siêu dẻo và sợi thép với xi măng lần lượt là: $RHA/C=18,69\%$, $W/C=26\%$, $SP/C=2,8\%$

và $F/C=2\%$.

Cường độ chịu nén được xác định trên các mẫu trụ có kích thước 100×200 mm, được chế tạo và thí nghiệm theo ASTM C39/C39M [15]. Cấu tạo máy trộn như hình 3.

Tiến hành trộn UHPC theo đúng quy trình kỹ thuật khoảng từ 5 - 8 phút. Quá trình chuẩn bị khuôn và đổ mẫu nén UHPC như Hình 4.

Bảng 3. Cấp phối dùng trong nghiên cứu thực nghiệm.

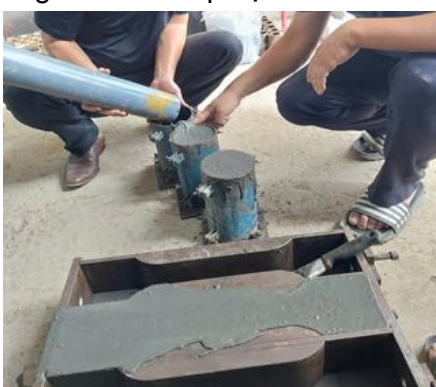
STT	Thành phần	Đơn vị	Kích thước hạt	Khối lượng
1	Xi măng PC50	kg	1 - 75 μ m	850
2	Tro trấu	kg	7 - 43 μ m	159
3	Bột cát thạch anh	kg	1 - 100 μ m	200
4	Nước	kg		221
5	Sợi thép	kg	D=0.2mm, L=13mm	157
6	Phụ gia siêu dẻo	kg		23,8
7	Cát thạch anh	kg	0,14 - 5 mm	946



Hình 3. Máy trộn cường bức bốn cấp độ



(a)



(b)

Hình 4. Chế tạo mẫu nén 100×200 mm: (a) Khuôn 100×200 mm, (b) Đổ bê tông vào mẫu trụ.

Các mẫu đã chế tạo được bọc bề mặt trong 24 giờ trong điều kiện tự nhiên. Tiến hành bảo dưỡng nhiệt ẩm tại nhiệt độ 90°C và bão hòa ẩm trong 72 giờ tiếp theo, sau cùng đem bảo dưỡng trong nước đến thời điểm nén mẫu.

Hình 5 mô tả các mẫu được mài phẳng bằng máy mài chuyên dụng. Bộ mẫu trụ được nén để

xác định cường độ theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M [15].

Bộ khuôn chế tạo mẫu kéo trực tiếp có cấu tạo như Hình 6a, mẫu xương chó được chế tạo như Hình 6b. Trong nghiên cứu này, ở hai đầu mẫu kéo có bố trí hai thanh cáp để tạo đồng trục trong quá trình kéo mẫu.



Hình 5. Mài phẳng mẫu trụ UHPC



(a)



(b)

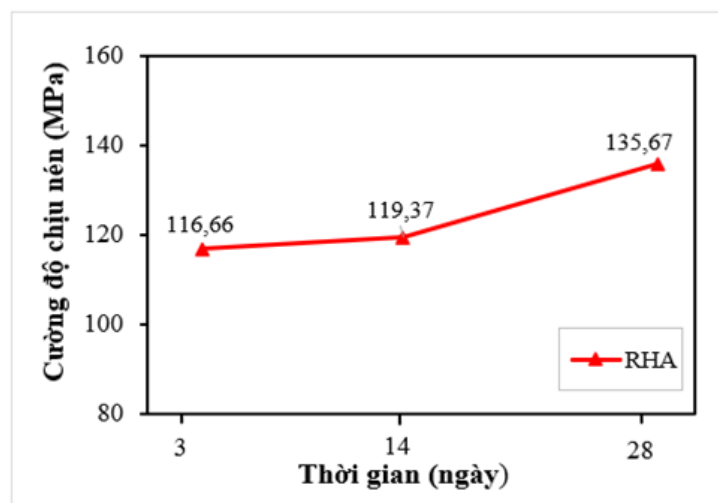
Hình 6. Chế tạo mẫu kéo UHPC: (a) Khuôn mẫu kéo xương chó, (b) Chế tạo mẫu kéo UHPC

Mẫu uốn được chế tạo theo tiêu chuẩn ASTM C78/C78M-18 [16]. Các mẫu có kích thước 100 × 100 × 400 mm và được thí nghiệm theo phương pháp uốn ba điểm nhằm xác định cường độ chịu kéo khi uốn của UHPC.

Trong quá trình thí nghiệm, tải trọng được truyền tại giữa nhịp thông qua một điểm tác dụng, trong khi mẫu được đỡ tại hai gối, cho phép xác định cường độ chịu kéo khi uốn và đánh giá khả năng chống nứt của vật liệu.



Hình 7. Thí nghiệm nén mẫu UHPC



Hình 8. Biểu đồ phát triển cường độ chịu nén của UHPC

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm nén của UHPC sử dụng RHA

Cấp phối	Cường độ chịu nén (MPa)											
	Tên mẫu	R3	Rtb3	S3	Tên mẫu	R14	Rtb14	S14	Tên mẫu	R28	Rtb28	S28
RHA	RHA1.35	119,54			RHA1.145	123,24			RHA1.285	130,53		
	RHA2.35	123,42			RHA2.145	119,15			RHA2.285	126,99		
	RHA3.35	112,11			RHA3.145	112,19			RHA3.285	125,58		
	RHA4.35	119,23	116,66	4,95	RHA4.145	121,32	119,37	4,18	RHA4.285	135,07	133,63	7,41
	RHA5.35	115,27			RHA5.145	122,98			RHA5.285	144,97		
	RHA6.35	110,39			RHA6.145	117,34			RHA6.285	138,64		

Ghi chú: Trong Bảng 4, các mẫu được đặt tên là RHAi.jk; i, j và k lần lượt là thứ tự mẫu, ngày và tháng đúc mẫu

Kết quả cho thấy, cường độ chịu nén trung bình của mẫu UHPC khi sử dụng phụ gia khoáng hoàn toàn là RHA tại 28 ngày tuổi đạt 133,63 MPa. Đồng thời, cường độ tại 3 và 14 ngày tuổi đạt

87,3% và 89,3% so với cường độ UHPC 28 ngày tuổi. Hơn nữa, cường độ UHPC với phụ gia khoáng RHA chỉ bằng 87,5% so với UHPC sử dụng phụ gia khoáng là SF, nguyên nhân của sự giảm

sự cường độ này được cho là do đường kính hạt RHA lớn hơn nhiều so với kích thước của SF dẫn đến giảm độ đặc của cấu trúc bê tông, bên cạnh đó mức độ hoạt tính của RHA cũng thấp hơn SF dẫn đến mức độ phản ứng pozzolanic tạo đá xi măng bị suy giảm dẫn đến cường độ bê tông chỉ đạt 87,5% như đã phân tích.

Bộ mẫu xương chó sau bảo dưỡng như Hình

9a, sơ đồ kéo mẫu như Hình 9b, giá trị lực kéo được bộ cảm biến đo lực ghi nhận. Tốc độ kéo trong khoảng (0,025 - 0,04) mm/phút. Biến dạng phương đứng được ghi nhận bằng bộ LVDT (Linear Variable Differential Transformers) gắn dọc theo mẫu. Toàn bộ kết quả được máy tính ghi lại. Bảng 5 là kết quả cường độ chịu kéo trực tiếp của UHPC sau bảo dưỡng nhiệt ẩm.



(a) Lắp đặt thiết bị.



(b) Mẫu phá hoại

Hình 9. Thí nghiệm kéo trực tiếp

Bảng 5. Cường độ chịu kéo của UHPC

Tuổi mẫu	Đơn vị	Tên mẫu	Vết nứt đầu tiên		Giá trị phá hủy	
7	MPa	K.RHA1.75	5,68		7,26	
		K.RHA2.75	6,38	6,11	7,51	7,42
		K.RHA3.75	6,27		7,48	
		f_{cr}/f_u (%)	82,37			
28	MPa	K.RHA1.285	6,97		8,07	
		K.RHA2.285	6,28	6,74	8,09	8,16
		K.RHA3.285	6,97		8,31	
		f_{cr}/f_u (%)	82,63			

2.3. Xác định cường độ chịu kéo trực tiếp và chịu uốn của UHPC

Trong Bảng 5, f_{cr} và f_u là ứng suất chịu kéo trực tiếp và cường độ chịu kéo trực tiếp cực hạn của UHPC. Kết quả cho thấy, cường độ chịu kéo trực tiếp của UHPC đạt 7,42 MPa và 8,16 MPa

tương ứng tại 7 và 28 ngày tuổi, trong đó cường độ ở 7 ngày đạt khoảng 90,9% so với 28 ngày. Đồng thời, vết nứt đầu tiên xuất hiện khi ứng suất đạt khoảng 82,37–82,63% cường độ phá hủy, cho thấy sau khi hình thành vết nứt, mẫu vẫn tiếp tục chịu tải nhờ cơ chế bắc cầu của sợi thép.



Hình 10. Thử nghiệm uốn ba điểm dầm UHPC

Tiến hành thử nghiệm theo mô hình uốn ba điểm trên máy kéo hoặc nén thủy lực cho mẫu đủ 28 ngày như Hình 10.

Giá trị cường độ chịu kéo khi uốn của UHPC như Bảng 6.

Ở Bảng 6, $f_{t,cr}$ và $f_{t,u}$ là ứng suất chịu kéo khi uốn và cường độ chịu kéo khi uốn trực tiếp cực hạn của UHPC. Kết quả cho thấy cường độ chịu uốn

của UHPC đạt 17,62 MPa và 18,84 MPa tương ứng tại 7 và 28 ngày tuổi, trong đó cường độ ở 7 ngày đạt khoảng 93,5% so với 28 ngày. Vết nứt đầu tiên xuất hiện khi ứng suất đạt khoảng 72,37–79,93% cường độ phá hủy, cho thấy sau khi hình thành vết nứt, mẫu vẫn tiếp tục chịu tải nhờ cơ chế bắc cầu của sợi thép, góp phần nâng cao khả năng chịu uốn và độ dẻo của UHPC.

Bảng 6. Cường độ chịu uốn của UHPC

Tuổi mẫu	Đơn vị	Tên mẫu	Vết nứt đầu tiên		Giá trị phá hủy	
7	MPa	U.RHA1.75	13,66		18,02	
		U.RHA2.75	12,88	12,75	17,6	17,62
		U.RHA3.75	11,72		17,20	
		$f_{t,cr}/f_{t,u}$ (%)	72,37			
28	MPa	U.RHA1.285	15,79		18,10	
		U.RHA2.285	15,44	15,06	18,90	18,84
		U.RHA3.285	13,96		19,53	
		$f_{t,cr}/f_{t,u}$ (%)	79,93			

3. Giá thành UHPC

Để áp dụng rộng rãi UHPC vào thực tế xây dựng thì giá thành của loại bê tông này cần được đánh giá. Giá thành UHPC phụ thuộc vào nguyên vật liệu cấu thành.

Trong nghiên cứu này sử dụng SF làm phụ gia khoáng để chế tạo UHPC thì giá thành là 7,9 triệu đồng trên 1 m³. Trong khi đó nếu dùng RHA

để chế tạo thì giá thành khoảng 5,9 triệu đồng trên 1 m³.

Kết quả thể hiện ở Bảng 7 cho thấy UHPC sử dụng SF (U_{SF}) có giá thành cao hơn 25,25% so với UHPC sử dụng RHA (U_{RHA}) khi so sánh chi phí tổng thể. Điều này cho thấy RHA là một giải pháp phụ gia khoáng có lợi thế về mặt kinh tế so với SF trong điều kiện nghiên cứu.

Bảng 7. So sánh giá thành của UHPC

Cơ cấu phụ gia khoáng (%)	Giá thành / 1m ³ (VNĐ)
4,61	5.916.342
28,69	7.914.998

4. Kết luận

Phụ gia khoáng RHA trong nghiên cứu này có nguồn gốc từ Đồng bằng sông Cửu Long. Kết quả nghiên cứu cho thấy RHA có hàm lượng silica cao và đáp ứng các yêu cầu của vật liệu pozzolanic theo tiêu chuẩn ASTM C618. Đồng thời, hoạt tính pozzolanic của RHA cũng được đánh giá theo ASTM C311, cho thấy loại vật liệu này có khả năng phản ứng với sản phẩm thủy hóa CH. Vì vậy, RHA có thể được xem là phụ gia khoáng tiềm năng để thay thế silica fume trong chế tạo UHPC.

Nghiên cứu đã đánh giá tính khả thi sử dụng hoàn toàn tro trấu nghiền mịn RHA làm phụ gia khoáng trong chế tạo bê tông siêu tính năng, thay thế hoàn toàn silica fume thường được sử dụng. Dựa trên nền cấp phối hạt mịn M3Q kết hợp với vật liệu địa phương và điều kiện bảo dưỡng nhiệt ẩm, UHPC sử dụng hoàn toàn RHA đạt được các tính năng như cường độ chịu nén lên đến 135,67 MPa, cường độ chịu kéo trực tiếp 8,16 MPa và cường độ chịu uốn 18,84 MPa tại 28 ngày tuổi.

Như vậy, kết quả nghiên cứu cho thấy RHA là phụ gia khoáng có tiềm năng thay thế SF trong chế tạo UHPC, với cơ sở khoa học và tính thực tiễn cao. Kết quả đạt được vừa đem lại hiệu quả kinh tế - kỹ thuật vừa giải quyết được vấn đề thay thế silica fume truyền thống với giá thành cao và nguồn cung cấp hạn chế trong giai đoạn hiện tại. Từ những kết quả đạt được, RHA cần tiếp tục nghiên cứu và hoàn thiện và áp dụng rộng rãi hơn trong các lĩnh vực xây dựng, đặc biệt là ở những địa bàn có trữ lượng tro trấu dồi dào như Đồng bằng sông Hồng, Đồng bằng sông Cửu Long và Đồng bằng duyên hải miền Trung.

Tuyên bố về việc sử dụng AI tạo sinh

Trong quá trình chuẩn bị bài báo này, tác giả đã không sử dụng công cụ AI để tạo ra nội dung cho bài báo.

Tài liệu tham khảo

- [1] C. Magureanu, I. Sosa, C. Negrutiu, B. Heghes. (2012). Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, 109(2), 177–184. [https://www.concrete.org/store/](https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=RPRINTMJP-66214&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US_Units)
- [2] P. Richard, M. Cheyrezy. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- [3] P.-C. Aïtcin. (2000). Cements of Yesterday and Today: Concrete of Tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1349–1359. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- [4] G. Habert, E. Denarié, A. Šajna, P. Rossi. (2013). Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. *Cement and Concrete Composites*, 38, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.008>
- [5] B.S. Thomas. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3913–3923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>
- [6] H.C. Lung, B.L.A. Tuan, C.C. Tsun. (2011). Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3768–3772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.009>
- [7] M.-H. Zhang, V.M. Malhotra. (1996). High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *ACI Materials Journal*, 93(6), 629–636. <https://doi.org/10.14359/9870>
- [8] N. Bouzoubaâ, B. Fournier. (2001). Concrete Incorporating Rice-Husk Ash: Compressive Strength and Chloride-Ion Penetrability. Research Report MTL 2001-5 (TR), Materials Technology Laboratory, CANMET, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada. <https://ecosmartconcrete.com/docs/trbouzoub>

- arice01.pdf (truy cập ngày 13/08/2026)
- [9] V.M. Malhotra. (1999). Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions. In *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*, O. E. Gjrv, K. Sakai, pp. 226–235. *CRC Press*.
- [10] B.V. Trần, V.X. Nguyễn, V.T. Ngô, T.H. Lương. (2022). Nghiên cứu sử dụng tro trấu nghiền mịn (RHA) thay thế một phần silica fume (SF) để chế tạo UHPC. *Tp chí Xây dựng*, 7, 60-63. <https://tapchixaydung.vn/nguyen-cuu-su-dung-tro-trau-nghien-min-rha-thay-the-mot-phan-silica-fume-sf-de-che-tao-uhpc--20201224000012380.html> (truy cập ngày 13/08/2026)
- [11] V.H. Nguyen, T.N. Nguyen, V.T. Tran, V.X. Nguyen, H.H. Phan. (2013), Rice Husk Uses in the Mekong Delta of Vietnam. In *Proceedings of the International Workshop on Agricultural Engineering and Postharvest Technology for Asia Sustainability (AEPAS 2013)*, Hanoi, Vietnam. Science and Technics Publishing House.
- [12] ASTM C618-22. (2022). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA. <https://store.astm.org/c0618-22.html> (truy cập ngày 13/08/2026).
- [13] ASTM C311/C311M-22. (2022). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. <https://store.astm.org/c0311-22.html> (truy cập ngày 13/08/2026).
- [14] M. Schmidt, E. Fehling, S. Fröhlich, J. Thiemicke (Eds.). (2014). *Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete: Results of the German Priority Programme 1182 funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau*, no. 22. *Kassel University Press*, Kassel, Germany. <https://www.uni-kassel.de/fb14bau/institute/institut-fuer-konstruktiven-ingenieurbau-iki/werkstoffe-des-bauwesens-und-bauchemie/forschung/abgeschlossene-projekte/zentralprojekt-spp-1182.html> (truy cập ngày 13/08/2026).
- [15] ASTM C39/C39M-21. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA. <https://fr.scribd.com/document/890094989/C39-C39M-21> (truy cập ngày 13/08/2026).
- [16] ASTM C78/C78M-22. (2022). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA. https://store.accuristech.com/standards/astm-c78-c78m-22?product_id=2251097&srsItd=AfmBOorrAiN0pahxqQX2F9XXXnu0wJEIsiEo2PKJnb7hCdgz5kw0y59e (truy cập ngày 13/08/2026).