

# Đánh giá ảnh hưởng của tro trấu và gạch đất sét đến cường độ của bê tông cốt sợi thép bằng phương pháp đáp ứng bề mặt

Evaluation of the effects of rice husk ash and clay brick powder on the strength of high performance fiber reinforced concrete using response surface methodology

> LÂM NGỌC TRÀ MY

Khoa Xây dựng, Trường ĐH Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

Email: mylnt@hcmute.edu.vn

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của tro trấu và bột gạch đất sét đến cường độ nén, uốn ở 28 ngày tuổi của bê tông cốt sợi thép (HPFRC) bằng phương pháp đáp ứng bề mặt. Tro trấu được sử dụng để thay thế silica fume với hàm lượng thay thế từ 10% đến 40%, trong đó bột gạch đất sét sẽ thay thế tro bay với hàm lượng từ 20% đến 80%. Với phương pháp thiết kế hỗn hợp trung tâm (CCD) của phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM), mười ba cấp phối HPFRC đã được chuẩn bị trong nghiên cứu này để thí nghiệm cường độ nén, uốn ở 28 ngày tuổi. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng, ta có thể sử dụng tro trấu kết hợp bột gạch đất sét để chế tạo ra HPFRC có cường độ nén, uốn ở 28 ngày tuổi bằng cường độ HPFRC đối chứng. Cụ thể là khi sử dụng tro trấu ở tỷ lệ 18% và bột gạch đất sét 49%; hoặc tro trấu 19% và bột gạch đất sét 80%; hoặc tro trấu 23% và bột gạch đất sét 65%; hay tro trấu 34% và bột gạch đất sét 35.5% sẽ tạo ra HPFRC có cường độ nén ở 28 ngày tuổi là 100 MPa và cường độ uốn ở 28 ngày tuổi là 32.5 MPa bằng HPFRC đối chứng. Ngoài ra, để tối ưu hóa hàm lượng sử dụng tro trấu và bột gạch đất sét, ta có thể sử dụng 40% tro trấu kết hợp với 80% bột gạch đất sét để tạo ra HPFRC có cường độ nén và uốn cao hơn HPFRC thông thường ở 28 ngày tuổi. Đồng thời, việc sử dụng tro trấu và bột gạch đất sét để chế tạo HPFRC không làm thay đổi ứng xử uốn và ứng xử nén của HPFRC. Bên cạnh đó, hai phương trình thể hiện mối quan hệ giữa cường độ nén/ cường độ uốn ở 28 ngày tuổi của HPFRC với tỷ lệ tro trấu và bột gạch đất sét sử dụng trong hỗn hợp được đề xuất trong nghiên cứu này.

**Từ khóa:** Bê tông cốt sợi thép; cường độ; gạch đất sét; phương pháp đáp ứng bề mặt; tro trấu.

## ABSTRACT

This paper presents a study on the effects of rice husk ash and clay brick powder on compressive strength and flexural strength of high performance fiber reinforced concrete (HPFRC) at 28-day age using response surface methodology. The weight of silica fume using in HPFRC was replaced by rice husk ash from 10% to 40%, while fly ash was substituted by clay brick powder at range of 20% to 80%. Thirteen mixtures of HPFRC were prepared based on central composite design of response surface methodology in order to investigate the compressive strength and flexural strength of HPFRC at 28-day age. The result indicated that combination of fly ash and clay brick powder can be produced UHPFRC which have the compressive strength and flexural strength as much as those of the control. For example, using 18% rice husk ash combined with 49% clay brick powder; or 19% rice husk ash combined with 80% clay brick powder; or 23% rice husk ash combined with 65% clay brick powder; or 34% rice husk ash combined with 35.5% clay brick powder can be made HPFRCs that attained the 28-day compressive strength of 100 MPa and 28-day flexural strength of 32.5 MPa. Additionally, the compressive and flexural strength of HPFRC containing 40% rice husk ash and 80% clay brick powder were higher than those of the HPFRC control at 28-day age. Furthermore, there was no change in compressive and flexural behaviours of the HPFRC containing rice husk ash and clay brick powder. Two models displayed the relationship between compressive strength/ flexural strength and deflection were established in this study.

**Keywords:** High performance fiber reinforced concrete; strength; clay brick; response surface methodology; rice husk ash.

## 1. GIỚI THIỆU

Bê tông cốt sợi thép (HPFRC), là một loại bê tông tính năng cao (UHPC) với nhiều ưu điểm như cường độ chịu nén, chịu kéo cao, khả năng biến dạng tốt, độ bền lớn, vì vậy HPFRC phù hợp với nhiều loại công trình xây dựng lớn, có yêu cầu kỹ thuật cao. Hỗn hợp HPFRC bao gồm một lượng lớn xi măng poóc lăng, silica fume, bột thạch anh, cát thạch anh và cốt sợi thép. Silica fume đóng vai trò là phụ gia khoáng, trong đó bột thạch anh là chất độn. Để giảm chi phí chế tạo UHPC nói chung và HPFRC nói riêng, các nhà khoa học tìm phương án thay thế một phần xi măng poóc lăng, silica fume, và bột thạch anh bằng các loại phế thải nông nghiệp, ví dụ như tro trấu. Một số kết quả nghiên cứu về việc sử dụng tro trấu để thay thế xi măng poóc lăng, silica fume, bột thạch anh trong chế tạo UHPC và HPFRC đã công bố như sau:

Ha và các cộng sự (2022) [1] nghiên cứu thay thế 30% xi măng poóc lăng trong chế tạo UHPC bằng xi hạt lò cao nghiền mịn kết hợp với tro trấu. Tác giả kết luận rằng, việc thay thế 30% xi măng bằng các phế thải xi hạt lò cao và tro trấu vẫn tạo ra UHPC có cường độ nén tĩnh và động cao. Cường độ UHPC đạt 143,5 MPa khi sử dụng 15% xi hạt lò cao nghiền mịn và 15% tro trấu để thay thế 30% xi măng poóc lăng.

Tuan và các cộng sự (2011) [2] kết luận rằng đường kính hạt tối ưu của tro trấu là 5,6  $\mu\text{m}$  để sản xuất UHPC. Khi thay thế tối đa 30% xi măng bằng tro trấu không làm ảnh hưởng đến cường độ nén của UHPC. Khi kết hợp giữa tro trấu và silica fume thì hàm lượng xi măng có thể thay thế đến 40%. Tuy nhiên, hàm lượng sử dụng 10% tro trấu và 10% silica fume để thay thế xi măng là tối ưu.

Van và các cộng sự (2014) [3] cho biết rằng sự kết hợp đồng thời giữa tro trấu và xi hạt lò cao nghiền mịn để thay thế xi măng poóc lăng sẽ cải thiện tính công tác, cường độ và sự co ngót của UHPC.

Meraz và các cộng sự (2023) [4], [5] nghiên cứu thay thế 10, 20, 30 và 40% silica fume bằng tro trấu. Khi thay thế silica fume bằng 10% tro trấu thì cường độ nén, kéo, uốn tăng lần lượt tương ứng là 6,49%, 12,85% và 5,27%. Kết quả cho thấy khi thay thế 20% silica fume bằng tro trấu làm tăng cường độ nén của bê tông tính năng cao cốt sợi thép lên 2,66% ở 56 ngày tuổi. Đồng thời, độ hút nước và hệ số hấp phụ giảm 3,5% và 30% tương ứng.

Huang và các cộng sự (2017) [6] sử dụng tro trấu để thay thế silica fume trong sản xuất UHPC. Việc thay thế silica fume bằng tro trấu sẽ làm giảm tính lưu động của hỗn hợp UHPC. Việc bổ sung tro trấu làm tăng cường độ nén và khả năng chống thấm của UHPC do các phản ứng pozzolanic đã cải thiện cấu trúc lỗ rỗng của UHPC.

Kang và các cộng sự (2018) [7] sử dụng tro trấu để làm chất độn thay thế bột thạch anh trong chế tạo UHPC. Bằng việc thay thế 50% và 100% bột thạch anh bằng tro trấu làm cường độ của UHPC tăng 7,7% và 18,5%, tương ứng ở 91 ngày tuổi.

Hạt nano tro trấu được sử dụng để chế tạo UHPC được tìm thấy trong nghiên cứu của Faried và các cộng sự (2021) [8]. Hạt nano tro trấu được sản xuất bằng cách đốt cháy trấu ở các nhiệt độ khác nhau, cụ thể 300, 500, 700 và 900  $^{\circ}\text{C}$ , sau đó được nghiền đến cỡ hạt 5,5  $\mu\text{m}$  rồi được thêm vào hỗn hợp UHPC từ 1 đến 5%. Sử dụng 1% hạt nano tro trấu được sản xuất bằng cách nung ở nhiệt độ 900  $^{\circ}\text{C}$  sẽ làm cho UHPC đạt cường độ nén cao nhất, cụ thể là tăng 12% và 12,3% ở 7 ngày và 28 ngày tuổi so với mẫu bê tông đối chứng.

Bên cạnh đó, một số kết quả nghiên cứu đã chứng minh sự gia tăng cường độ của vữa hoặc bê tông thông thường khi có sử dụng bột gạch đất sét nung vì có tính pozzolanic [9]-[12]. Ge và các cộng sự [9] đã công bố kết quả cường độ bê tông chứa bột gạch đất sét đạt 50 MPa ở 90 ngày tuổi và cường độ uốn đạt 12 MPa ở 28 ngày tuổi. Tương tự, Naceri và Hamina [11] cho biết cường độ nén của vữa có thể đạt 62,2 MPa ở tuổi 90 ngày khi sử dụng 20% bột gạch đất sét

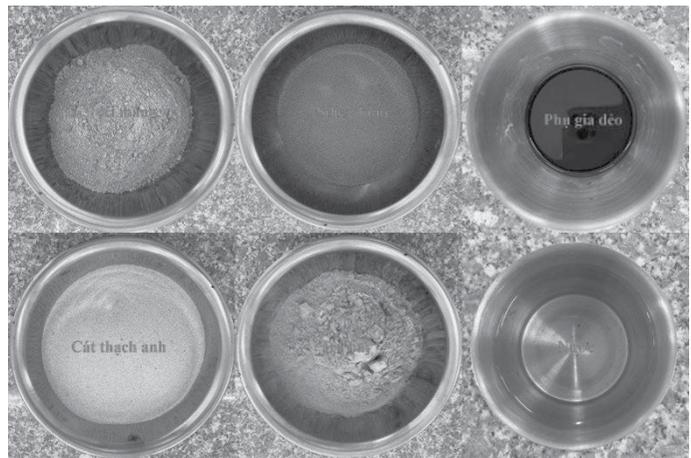
trong vữa [12]. Từ những kết quả nghiên cứu trên, việc tái sử dụng phế thải gạch đất sét trong HPFRC cũng là một giải pháp tiềm năng.

Việc kết hợp và tái sử dụng hàm lượng lớn các chất phế thải phát sinh trong các ngành công-nông nghiệp, ví dụ như tro trấu và gạch phế thải, để thay thế các loại vật liệu truyền thống trong sản xuất HPFRC là giải pháp phát triển bền vững của ngành Xây dựng, tạo ra các loại bê tông thân thiện môi trường, đồng thời mang lại hiệu quả kinh tế trong việc giảm giá thành sản phẩm. Vì vậy, đề tài này nghiên cứu cường độ nén, uốn ở 28 ngày tuổi của HPFRC sử dụng tro trấu thay thế 40% silica fume kết hợp với gạch phế thải làm chất độn. Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của tro trấu và gạch phế thải đến cường độ nén, uốn của HPFRC phương pháp thiết kế hỗn hợp trung tâm (CCD) của phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) được sử dụng trong nghiên cứu này.

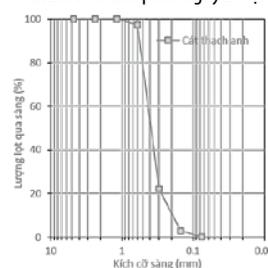
## 2. NGUYÊN VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

### 2.1. Nguyên vật liệu

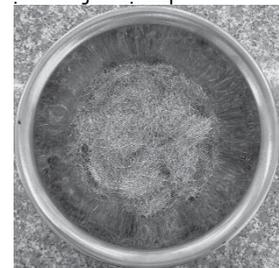
Trong nghiên cứu này, xi măng poóc lăng Nghi Sơn PC40, silica fume, cát thạch anh, tro bay, phụ gia dẻo, nước và cốt sợi thép được sử dụng để chế tạo bê tông cốt sợi thép. Xi măng (hình 1) có đường kính hạt trung bình là 15,6  $\mu\text{m}$  và thành phần hóa học như bảng 1. Silica fume (hình 1) có đường kính hạt trung bình 0,1  $\mu\text{m}$  và thành phần  $\text{SiO}_2$  là 94,5%. Cốt liệu sử dụng là cát thạch anh (hình 1) có thành phần là 100% hạt thạch anh tròn tự nhiên với thành phần hạt như hình 2 phù hợp với tiêu chuẩn ASTM C778 [13]. Cát thạch anh đóng vai trò là cốt liệu lớn trong bê tông cốt sợi thép. Tro bay (hình 1) với đường kính hạt trung bình là 16  $\mu\text{m}$  có vai trò là cốt liệu mịn trong bê tông cốt sợi thép. Thành phần hóa học của tro bay được liệt kê trong bảng 1. Phụ gia siêu hóa dẻo và giảm nước Sika Ment NN (hình 1) được sử dụng. Cốt sợi thép (hình 3) có đường kính 0,2 mm, chiều dài 13 mm, khối lượng riêng là 7,85  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Cường độ chịu kéo của cốt sợi thép là 2500 MPa.



Hình 1. Thành phần nguyên vật liệu chế tạo bê tông cốt sợi thép



Hình 2. Thành phần hạt của cát thạch anh

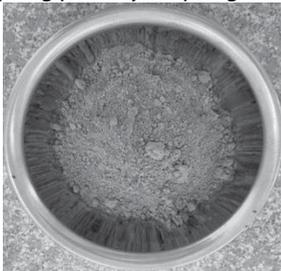


Hình 3. Cốt sợi thép

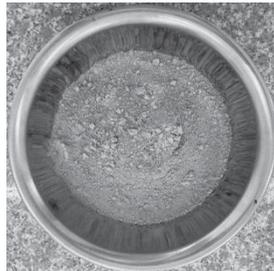
**Bảng 1** Thành phần hóa học của xi măng poóc lăng, tro bay, tro trấu và gạch đất sét (% theo khối lượng)

Thành phần hóa học	Xi măng	Tro bay	Tro trấu	Gạch đất sét
CaO	63.17	3.08	0.13	0,57
SiO <sub>2</sub>	23.41	63.88	95.59	60,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.93	25.16	0.66	18,63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.49	4.35	0.06	14,20
SO <sub>3</sub>	3.45	0.37	0.40	0,13
K <sub>2</sub> O	0.56	1.05	1.91	4,43
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.93	-	1,29
MnO	0.08	0.03	0.25	0,09
MgO	1.14	0	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.37	0.67	0.85	-
SrO	0.04	0.12	-	-
CaO	63.17	3.08	0.13	-

Tro trấu thu được bằng cách nướng vỏ trấu ở nhiệt độ 600 °C trong vòng 6 giờ. Tro trấu sau khi lấy ra khỏi lò nướng, để nguội đến nhiệt độ phòng sẽ được nghiền 2 giờ trong máy nghiền bi với tốc độ quay của máy nghiền là 60 vòng/ phút. Đường kính hạt trung bình của tro trấu sau khi nghiền (hình 4) là 5,6 μm. Thành phần hóa học của tro trấu thể hiện ở bảng 1 được xác định bằng phương pháp quang phổ huỳnh quang tia X.



Hình 4. Tro trấu



Hình 5. Bột gạch đất sét

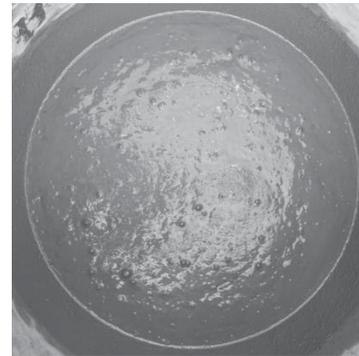
Gạch đất sét vỡ được thu thập tại các công trình xây dựng được nghiền trong máy nghiền bi đến cỡ hạt 16 μm (hình 5), tương đương cỡ hạt tro bay. Thành phần hóa học của gạch đất sét được trình bày ở bảng 1.

**2.2. Thiết kế cấp phối và tạo mẫu**

Bảng 2 trình bày cấp phối của hỗn hợp bê tông cốt sợi thép đối chứng (kí hiệu CT). Để chế tạo bê tông cốt sợi thép, tiến hành trộn đều xi măng, silica fume, cát silic và tro bay ở trạng thái khô trong vòng 5 phút trong cối trộn. Tiếp theo nước được cho từ từ vào cối trộn, tiếp tục trộn đều tất cả thành phần nguyên vật liệu với nước trong vòng 10 phút. Sau đó phụ gia siêu dẻo được cho vào hỗn hợp và tiếp tục trộn thêm 5 phút. Cuối cùng, cốt sợi thép sẽ được rắc từ từ đều khắp mặt hỗn hợp bê tông trong cối trộn. Tiếp tục trộn cho đến khi hỗn hợp đồng nhất như hình 6. Tổng thời gian nhào trộn hỗn hợp bê tông cốt sợi thép là 25 phút.

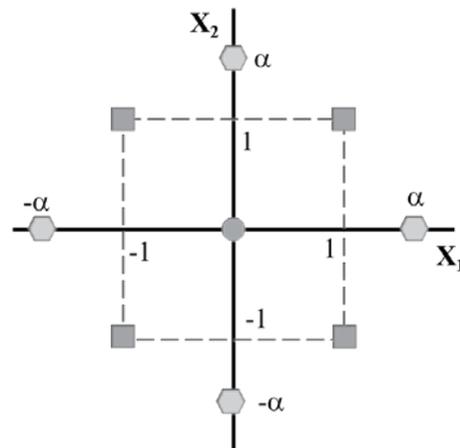
Bảng 2. Cấp phối bê tông cốt sợi thép đối chứng (CT), tỷ lệ theo khối lượng

Nguyên vật liệu	Tỷ lệ trong hỗn hợp
Xi măng	0.9
Silica fume	0.1
Cát silic	1.0
Tro bay	0.2
Nước	0.25
Phụ gia dẻo	0.04
Cốt sợi thép	1,5% theo thể tích



Hình 6. Hỗn hợp bê tông cốt sợi thép đối chứng (CT) sau khi nhào trộn

Để đánh giá ảnh hưởng của tro trấu và bột gạch đất sét đến cường độ của bê tông cốt sợi thép (HPFRC), các cấp phối HPFRC chứa tro trấu và bột gạch đất sét được thiết kế bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology - RSM). Thiết kế hỗn hợp trung tâm (Central Composite Design - CCD) của phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) được sử dụng trong nghiên cứu này. Các điểm thí nghiệm được thiết kế theo CCD như hình 7 khi tỷ lệ tro trấu thay silica fume từ 10% đến 40%, tỷ lệ gạch đất sét thay thế tro bay trong hỗn hợp HPFRC từ 20% đến 80%. Với thiết kế hỗn hợp trung tâm (CCD), các giá trị cực đoan được đề xuất ở mức tỷ lệ ±α như bảng 3.



Hình 7. Thiết kế thí nghiệm có 2 yếu tố theo CCD của phương pháp RSM

**Bảng 3** Bảng mức độ nghiên cứu của các yếu tố ảnh hưởng theo thiết kế CCD

Yếu tố ảnh hưởng	Mã hóa	Mức				
		-α	-1	0	+1	+α
Hàm lượng tro trấu (%)	RHA	3,8%	10%	25%	40%	46,2%
Hàm lượng bột gạch đất sét (%)	CWA	7,6%	20%	50%	80%	92,4%

Theo hình 7 và bảng 3, một điểm trung tâm (0,0) lặp lại 5 lần và tám điểm thiết kế trục tạo nên mười ba cấp phối HPFRC được chuẩn bị trong nghiên cứu này như bảng 4 để thiết lập phương trình thể hiện mối quan hệ giữa cường độ nén, uốn của HPFRC với 2 yếu tố ảnh hưởng là tro trấu và bột gạch đất sét (Eq. 1). Đồng thời cấp phối HPFRC đối chứng (CT) cũng được thí nghiệm để so sánh với các cấp phối HPFRC chứa tro trấu và gạch đất sét.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{Eq. 1})$$

Trong đó: y là cường độ nén hoặc uốn ở 28 ngày tuổi của HPFRC;  $x_i, x_j$  là giá trị của yếu tố ảnh hưởng,  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  là các hệ số, n là số lượng yếu tố ảnh hưởng,  $\varepsilon$  là sai số ngẫu nhiên.

Bảng 4. Các cấp phối HPFRC

STT	Điểm thiết kế	Hàm lượng tro trấu (%)	Hàm lượng bột gạch đất sét (%)	Tên cấp phối	Cường độ nén ở 28 ngày tuổi (MPa)	Cường độ uốn ở 28 ngày tuổi (MPa)
1	-1,-1	10	20	C10-20	121,9	38,7
2	+1,-1	40	20	C40-20	100,6	32,7
3	-1,+1	10	80	C10-80	93,0	29,5
4	+1,+1	40	80	C40-80	109,0	36,9
5	$-\alpha, 0$	3,8	50	C3,8-50	95,3	30,9
6	$+\alpha, 0$	46,2	50	C46,2-50	102,5	33,7
7	$0, -\alpha$	25	7,6	C25-7.6	109,6	37,2
8	$0, +\alpha$	25	92,4	C25-92.4	112,4	37,4
9	0,0	25	50	C25-50a	95,0	30,3
10	0,0	25	50	C25-50b	98,4	31,7
11	0,0	25	50	C25-50c	98,6	32,4
12	0,0	25	50	C25-50d	108,2	36,6
13	0,0	25	50	C25-50e	100,8	33,3
14	-	-	-	CT	100,0	32,5

### 2.3. Phương pháp thí nghiệm

Các mẫu lập phương kích thước 50 mm được chế tạo để xác định cường độ chịu nén của HPFRC ở 28 ngày tuổi theo ASTM C109 [14]. Hỗn hợp HPFRC sau khi nhào trộn sẽ được cho vào khuôn đúc. Mẫu sau khi đúc 24 giờ được tiến hành tháo khuôn và được bảo dưỡng trong nước đến ngày thí nghiệm. Khi thí nghiệm nén, mặt tác dụng tải là mặt phẳng tiếp xúc với khuôn (hình 8). Tốc độ gia tải trong phạm vi từ 900 đến 1800 N/s cho đến khi mẫu thử bị phá hoại. Mỗi tổ mẫu gồm ba viên mẫu. Giá trị cường độ của tổ mẫu là giá trị trung bình số học của ba viên mẫu trong tổ.



Hình 8. Thí nghiệm nén mẫu HPFRC

Các mẫu lăng trụ chữ nhật kích thước 40 x 40 x 160 mm được chế tạo để xác định cường độ chịu uốn của HPFRC ở 28 ngày tuổi theo ASTM C348 [15]. Mẫu thí nghiệm uốn được đúc mẫu và bảo dưỡng tương tự mẫu thí nghiệm nén. Khi thí nghiệm, mẫu được đặt lên giá thử uốn cân chỉnh mẫu sao cho đường tâm của mẫu thử phải được đặt ngay phía trên điểm giữa của hai gối tựa (hình 9). Tải tác dụng vuông góc với mặt mẫu thử với giá trị đặt tải  $2640 \pm 110$  N với độ chính xác là  $\pm 1\%$  trên mặt chia độ không quá 44 N. Mỗi tổ mẫu gồm ba viên mẫu. Giá trị cường độ của tổ mẫu là giá trị trung bình số học của ba viên mẫu trong tổ.



Hình 9. Thí nghiệm uốn mẫu HPFRC

## 3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

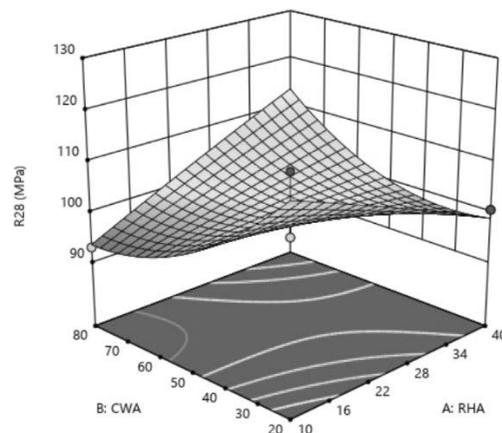
### 3.1 Phân tích ảnh hưởng của tro trấu và gạch đất sét đến cường độ nén 28 ngày của HPFRC

Kết quả thí nghiệm cường độ nén ở 28 ngày tuổi của HPFRC (R28) được thể hiện ở bảng 4. Mối quan hệ giữa tro trấu, bột gạch đất sét và cường độ nén 28 ngày của HPFRC được thể hiện bằng phương trình 2 (Eq. 2) và hình 10.

$$R_{28} = 143,3579 - 0,9162xRHA - 1,2196xCWA + 0,0207xRHAxCWA - 0,0016xRHA^2 + 0,0063xCWA^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Bảng 5 Kết quả phân tích ANOVA mô hình (Eq. 2) cường độ nén 28 ngày

Các yếu tố	Bậc tự do (DF)	Tổng bình phương (SS)	Phương sai (MS)	Trị số F	Trị số P	
Cường độ nén 28 ngày (R28)						
Mô hình	5	619,07	123,81	4,23	0,0431	Có ý nghĩa
Tro trấu (A-RHA)	1	2,98	2,98	0,1019	0,7589	
Gạch đất sét (B-CWA)	1	34,20	34,20	1,17	0,3154	
AB	1	347,82	347,82	11,89	0,0107	
A <sup>2</sup>	1	0,8829	0,8829	0,0302	0,8670	
B <sup>2</sup>	1	225,52	225,52	7,71	0,0274	
Số dư	7	204,71	29,24			
Sự thiếu phù hợp	3	107,51	35,84	1,47	0,3483	Không có
Sai số	4	97,20	24,30			
Tổng	12	823,78				



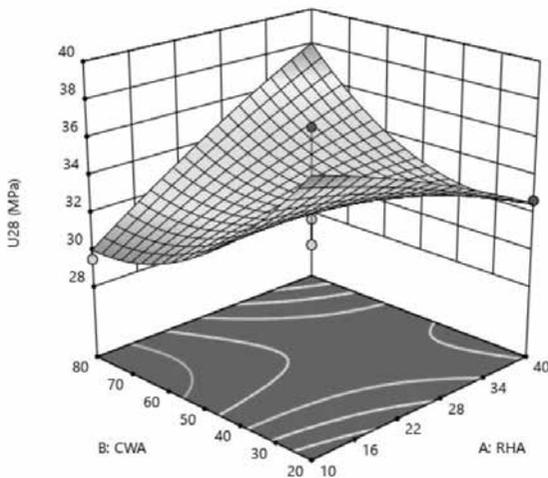
Hình 10. Mối quan hệ giữa cường độ nén 28 ngày tuổi của HPFRC với tro trấu và bột gạch đất sét

Hình 10 thể hiện mối quan hệ giữa cường độ nén 28 ngày tuổi của HPFRC với tro trấu và bột gạch đất sét. Theo hình 10, chúng ta thấy khi sử dụng 10% tro trấu thay thế silica fume và 20% bột gạch đất sét thay thế tro bay, cường độ nén 28 ngày của HPFRC đạt giá trị là 116,32 MPa. Khi tỷ lệ sử dụng tro trấu và gạch đất sét tăng lên thì cường độ nén 28 ngày của HPFRC sẽ giảm xuống, tuy nhiên tiếp tục tăng hàm lượng tro trấu lên 40% và gạch đất sét lên 80% thì cường độ nén 28 ngày của HPFRC tăng lên và đạt giá trị 113,405 MPa. Phân tích ANOVA phương trình 2 (xem bảng 5), chúng ta thấy tỷ lệ phối hợp 2 yếu tố tro trấu và gạch đất sét ảnh hưởng đến cường độ nén 28 ngày của HPFRC thể hiện bởi trị số P < 0,05.

**3.2 Phân tích ảnh hưởng của tro trấu và gạch đất sét đến cường độ uốn 28 ngày của HPFRC**

Kết quả thí nghiệm cường độ uốn ở 28 ngày tuổi của HPFRC (U28) được thể hiện ở bảng 4. Mối quan hệ giữa tro trấu, bột gạch đất sét và cường độ uốn 28 ngày của HPFRC được thể hiện bằng phương trình 3 (Eq. 3) và hình 11.

$$U_{28} = 46,9344 - 0,2459xRHA - 0,4427xCWA + 0,0074xRHAxCWA - 0,0016xRHA^2 + 0,0024xCWA^2 \quad (Eq. 3)$$



**Hình 11.** Mối quan hệ giữa cường độ uốn 28 ngày tuổi của HPFRC với tro trấu và bột gạch đất sét

**Bảng 6** Kết quả phân tích ANOVA mô hình (Eq. 3) của cường độ uốn 28 ngày

Các yếu tố	Bậc tự do (DF)	Tổng bình phương (SS)	Phương sai (MS)	Trị số F	Trị số P	
<b>Cường độ uốn 28 ngày (U28)</b>						
Mô hình	5	85,85	17,17	4,48	0,0377	Có ý nghĩa
Tro trấu (A-RHA)	1	3,59	3,59	0,9364	0,3654	
Gạch đất sét (B-CWA)	1	2,78	2,78	0,7253	0,4226	
AB	1	44,89	44,89	11,71	0,0111	
A <sup>2</sup>	1	0,9395	0,9395	0,2450	0,6358	
B <sup>2</sup>	1	31,64	31,64	8,25	0,0239	
Số dư	7	26,84	3,83			
Sự thiếu phù hợp	3	4,55	1,52	0,2723	0,8432	Không có
Sai số	4	22,29	5,57			
Tổng	12	112,69				

Hình 11 thể hiện mối quan hệ giữa cường độ uốn 28 ngày tuổi của HPFRC với tro trấu và bột gạch đất sét. Tương tự như cường độ

nén, cường độ uốn 28 ngày tuổi của HPFRC bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ kết hợp giữa tro trấu và gạch đất sét khi giá trị P = 0,0111 (< 0,05) của giá trị AB. Khi sử dụng 40% tro trấu kết hợp với 80% gạch đất sét cường độ uốn đạt giá trị 38 MPa. Tương tự, cường độ uốn cũng đạt giá trị 38 MPa khi tỷ lệ sử dụng tro trấu là 10% và gạch đất sét là 20%. Cường độ uốn sẽ đạt giá trị thấp nhất là 30 MPa khi sử dụng 10% tro trấu kết hợp với 80% gạch đất sét.

Bảng 7 thể hiện tỷ lệ sử dụng tro trấu và gạch đất sét để đạt được giá trị cường độ nén 28 ngày của HPFRC là 100 MPa và cường độ uốn 28 ngày là 32,5 MPa bằng với cường độ nén, uốn 28 ngày của mẫu HPFRC đối chứng (xem bảng 4).

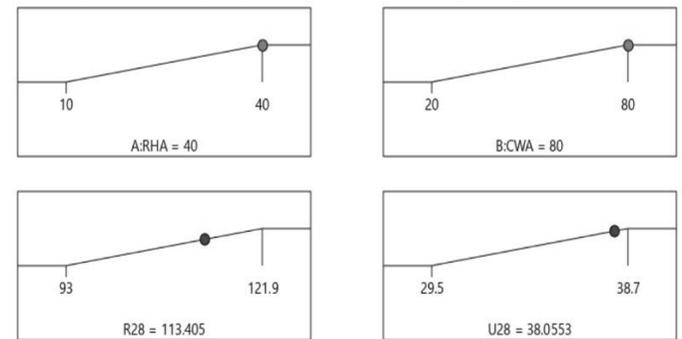
**Bảng 7** Các tỷ lệ tro trấu, bột gạch đất sét sử dụng để chế tạo HPFRC có cường độ nén, uốn bằng cường độ nén, uốn của HPFRC đối chứng ở 28 ngày tuổi

STT	Tỷ lệ tro trấu thay thế silica fume (%)	Tỷ lệ gạch đất sét thay thế tro bay (%)	Cường độ nén 28 ngày của HPFRC (MPa)	Cường độ uốn 28 ngày của HPFRC (MPa)
1	10	20	100	32,5
2	19	80	100	32,5
3	23	65	100	32,5
4	34	35,5	100	32,5

**3.3. Tối ưu hóa sử dụng tro trấu và gạch đất sét trong chế tạo HPFRC**

Tối ưu việc sử dụng phế thải với hàm lượng tối đa được thể hiện trong hình 12. Tro trấu thay thế silica fume 40% và gạch đất sét thay thế 80% tro bay ta sẽ được cường độ nén 28 ngày của HPFRC dự đoán theo mô hình là 113,405 MPa, cường độ uốn 28 ngày của HPFRC là 38,0553 MPa.

Để kiểm tra sự tương thích của 2 mô hình cường độ nén 28 ngày (Eq. 2), uốn 28 ngày (Eq. 3) được thiết lập bằng phương pháp đáp ứng bề mặt, ta tiến hành thí nghiệm lại cường độ nén, uốn của hỗn hợp HPFRC chứa 40% tro trấu thay thế silica fume và 80% gạch đất sét thay thế tro bay được kết quả liệt kê trong bảng 8.



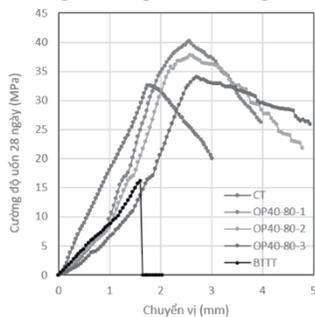
**Hình 12.** Tỷ lệ tro trấu, gạch đất sét trong hỗn hợp HPFRC và cường độ nén, uốn ở 28 ngày tuổi

**Bảng 8.** Cường độ nén, uốn 28 ngày của hỗn hợp tối ưu HPFRC

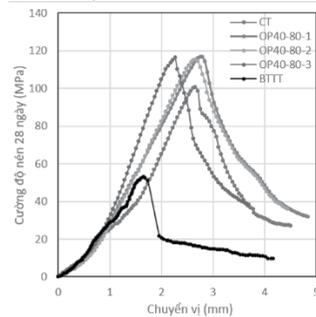
STT	Tên cấp phối	Tỷ lệ tro trấu (%)	Tỷ lệ gạch đất sét (%)	Cường độ nén 28 ngày (MPa)	Sai số giữa thực nghiệm và mô hình (%)	Cường độ uốn 28 ngày (MPa)	Sai số giữa thực nghiệm và mô hình (%)
1	OP40-80-1	40	80	116,7	2,9	40,20	5,63
2	OP40-80-2	40	80	115,2	1,6	37,81	-0,64
3	OP40-80-3	40	80	116,2	1,5	34,01	-10,63

Hình 13 thể hiện ứng xử uốn của HPFRC và bê tông không cốt sợi thép. Cường độ uốn ở 28 ngày tuổi của các mẫu HPFRC sử dụng

40% tro trấu để thay thế silica fume và 80% gạch đất sét thay thế tro bay lần lượt đạt giá trị 40,20 MPa, 37,81 MPa và 34,01 MPa. Sai số giữa kết quả thí nghiệm với số liệu mô hình dự đoán lần lượt là 5,63%, -0,64% và -10,63%. Ngoài ra, ta thấy không có sự khác biệt lớn về ứng xử uốn của HPFRC chứa tro trấu và gạch đất sét (mẫu OP40-80-1, OP40-80-2, OP40-80-3) và mẫu HPFRC đối chứng (CT) sử dụng vật liệu truyền thống là silica fume và tro bay. Tuy có sự khác biệt về giá trị, cường độ uốn mẫu HPFRC đối chứng chỉ đạt 32,5 MPa ở 28 ngày nhưng đường cong thể hiện mối quan hệ giữa chuyển vị và cường độ uốn ở 28 ngày tuổi là tương tự nhau. Tất cả các mẫu HPFRC thể hiện tính dẻo, ứng suất giảm từ từ sau khi phá hoại. Trong khi đó mẫu bê tông không cốt sợi thép (BTTT) thể hiện tính giòn, thể hiện sự giảm ứng suất đột ngột về 0 sau khi phá hoại.



**Hình 13.** Ứng xử uốn của HPFRC và bê tông không cốt sợi thép (BTTT)



**Hình 14.** Ứng xử nén của HPFRC và bê tông không cốt sợi thép (BTTT)

Hình 14 thể hiện ứng xử nén của HPFRC và bê tông không cốt sợi thép. Cường độ nén ở 28 ngày tuổi của các mẫu HPFRC sử dụng 40% tro trấu để thay thế silica fume và 80% gạch đất sét thay thế tro bay lần lượt đạt giá trị 116,7 MPa, 115,2 MPa và 116,2 MPa. So với số liệu mô hình dự đoán là HPFRS chứa 40% tro trấu thay thế silica fume và 80% gạch đất sét sẽ đạt giá trị cường độ nén ở 28 ngày tuổi là 113,405 MPa, thì sai số giữa kết quả thí nghiệm lần lượt là 2,9%, 1,6% và 2,5%. Với sai số này, ta thấy kết quả dự đoán cường độ nén ở 28 ngày tuổi của mô hình có độ chính xác cao. Đồng thời, hình 11 còn thể hiện ứng xử nén của bê tông không cốt sợi. Với bê tông không cốt sợi, tính giòn được thể hiện rõ rệt, đó là sự giảm ứng suất đột ngột sau khi bị phá hoại ở giá trị cường độ 53 MPa. Đối với các mẫu HPFRC, cốt sợi thép đã làm cho bê tông mềm dẻo hơn, thể hiện bởi sự giảm từ từ của ứng suất sau khi phá hoại.

#### 4. KẾT LUẬN

Dựa trên kết quả thí nghiệm của nghiên cứu, có thể rút ra các kết luận sau đây:

- Sử dụng kết hợp tro trấu và bột gạch đất sét thay thế silica fume và tro bay có thể tạo ra HPFRC có cường độ nén, uốn bằng cường độ nén, uốn của HPFRC đối chứng ở 28 ngày tuổi.
- Khi thay thế silica fume bằng 40% tro trấu và 80% tro bay bằng bột gạch đất sét sẽ tạo ra HPFRC có cường độ nén lớn hơn khoảng 13,4% cường độ nén mẫu HPFRC đối chứng ở 28 ngày tuổi, và cường độ uốn lớn hơn 17,1% cường độ uốn HPFRC đối chứng ở 28 ngày tuổi.
- Việc sử dụng tro trấu và bột gạch đất sét trong chế tạo HPFRC không làm thay đổi ứng xử nén và uốn. Đường cong thể hiện mối quan hệ giữa ứng suất và chuyển vị trong ứng xử nén, uốn của HPFRC chứa tro trấu và bột gạch đất sét tương tự đường cong của mẫu HPFRC đối chứng.
- Hai phương trình thể hiện mối quan hệ giữa cường độ uốn/cường độ nén với tỷ lệ tro trấu và bột gạch đất sét được thiết lập trong nghiên cứu cho kết quả dự báo cường độ nén, uốn của cấp phối HPFRC tối ưu ở 28 ngày tuổi đáng tin cậy.

**Lời cảm ơn:** Đề tài được tài trợ bởi kinh phí nghiên cứu khoa học năm 2024 của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. S. Ha, S. S. Marundrury, T. M. Pham, E. Pournasiri, F. Shi, and H. Hao, "Effect of grounded blast furnace slag and rice husk ash on performance of ultra-high-performance concrete (UHPC) subjected to impact loading," *Constr. Build. Mater.*, vol. 329, no. March, p. 127213, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127213.
- [2] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, A. L. A. Fraaij, and B. Danh, "The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 2030–2035, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.046.
- [3] V. Van, C. Röbler, D. Bui, and H. Ludwig, "Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 270–278, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015.
- [4] M. Meraz *et al.*, "On the utilization of rice husk ash in high-performance fiber reinforced concrete (HPFRC) to reduce silica fume content," *Constr. Build. Mater.*, vol. 369, no. January, p. 130576, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130576.
- [5] M. Meraz *et al.*, "Using rice husk ash to imitate the properties of silica fume in high-performance fiber-reinforced concrete (HPFRC): A comprehensive durability and life-cycle evaluation," *J. Build. Eng.*, vol. 76, no. July, p. 107219, 2023, doi: 10.1016/j.jobte.2023.107219.
- [6] H. Huang, X. Gao, H. Wang, and H. Ye, "Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 621–628, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.155.
- [7] S. Kang, S. Hong, and J. Moon, "The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. i, no. March, pp. 0–1, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.09.004.
- [8] A. S. Faried, S. A. Mostafa, B. A. Tayeh, and T. A. Tawfik, "The effect of using nano rice husk ash of different burning degrees on ultra-high-performance concrete properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 290, p. 123279, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123279.
- [9] Z. Ge, Y. Wang, R. Sun, X. Wu, and Y. Guan, "Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 128–136, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100.
- [10] M. Heikal, K. M. Zohdy, and M. Abdelkreem, "Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 101–109, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.114.
- [11] A. Naceri and M. C. Hamina, "Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 8, pp. 2378–2384, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.03.026.
- [12] J. Shao, J. Gao, Y. Zhao, and X. Chen, "Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 213, pp. 209–215, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.307.
- [13] ASTM C778, "Standard Specification for Standard Sand," pp. 15–17, 2009.
- [14] ASTM C109/C109M-08, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [ 50-mm ] Cube Specimens)."
- [15] ASTM C348-08, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars," doi: 10.1520/C0348-08.2.