

Nghiên cứu ảnh hưởng của việc phối trộn cát sông với cát thạch anh đến đặc tính của bê tông siêu tính năng

Research on the effects of mixing river sand with quartz sand on the properties of ultra-high-performance concrete

➤ **Bùi Thị Ninh¹; Nguyễn Trọng Tâm¹; Phạm Ngọc Sáng¹; Nguyễn Chí Tài²; Vũ Việt Hưng^{3*}**

¹Trường Đại học GTVT TP Hồ Chí Minh

²Viện Quy hoạch Xây dựng Miền Nam

³Phân hiệu tại TP Hồ Chí Minh Trường Đại học GTVT

*Email: hungvv_ph@utc.edu.vn.

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 20/3/2026

Ngày sửa bài: 02/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 15/4/2026

Ngày xuất bản Online: 17/4/2026

Tác giả liên hệ:

Email: hungvv_ph@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Sử dụng bê tông siêu tính năng giúp nâng cao khả năng chịu lực và độ bền cấu kiện bê tông trong xây dựng. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu về sự ảnh hưởng của tỷ lệ phối trộn cát sông (RS) với cát thạch anh (QS) đến tính năng của bê tông UHPC. Nhóm nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm trên cấp phối bê tông đã được thiết kế điều chỉnh trên nền cấp phối hạt mịn M2Q, áp dụng vào điều kiện vật liệu địa phương Việt Nam.

Trong nghiên cứu này, sự biến đổi cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo trực tiếp, cường độ chịu kéo khi uốn của UHPC theo các tỷ lệ phối trộn khác nhau của cát sông và cát thạch anh đã được phân tích. Kết quả nghiên cứu cho thấy, với điều kiện vật liệu địa phương, kỹ thuật trộn và phương pháp bảo dưỡng thích hợp thì vẫn có thể chế tạo được bê tông siêu tính năng với cường độ chịu nén, kéo, uốn đạt ngưỡng 125/8/15 MPa với cốt liệu hoàn toàn bằng cát sông, đồng thời tùy theo mức độ và yêu cầu về chi phí và tính năng của bê tông mà có tỷ lệ phối trộn cốt liệu RS

và QS hợp lý. Hơn nữa, khi sử dụng cốt liệu RS để thay thế một phần hoặc toàn bộ QS trong chế tạo UHPC không những đem lại hiệu quả trong việc ứng dụng rộng rãi loại bê tông này vào thực tế xây dựng mà còn có ý nghĩa trong việc giảm thiểu các tác động bất lợi đến môi trường.

Từ khoá: UHPC, cát sông, cát thạch anh, sợi thép, bảo dưỡng nhiệt ẩm, cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo, cường độ chịu uốn.

ABSTRACT

Using Ultra-High Performance Concrete improves the bearing capacity and durability of concrete structures. This research presents the results on the influence of mixing ratios of river sand (RS) with quartz sand (QS) on the performance of UHPC. The authors conducted experiments on concrete mixes that were designed and adjusted on M2Q fine-grained aggregates, applying to local material conditions in Vietnam.

In this present study, the changes in compressive strength, direct tensile strength, and flexural strength of concrete according to different mixing ratios of crushed stone and quartz sand were analyzed. Research results show that, with appropriate local material conditions, mixing techniques and curing methods, it is still possible to produce super high-performance concrete with compressive, tensile and flexural strengths reaching 125/8/15 MPa with aggregates completely made of river sand, and depending on the level and requirements of cost and performance of concrete, there is a reasonable mixing ratio of RS and QS aggregates. Furthermore, using RS aggregate to replace part or all of QS in producing UHPC is not only effective in widely applying this type of concrete in construction practice but is also meaningful in minimize adverse impacts on the environment.

Keywords: UHPC, river sand, quartz sand, the steel fiber, moist heat curing, compressive strength, tensile strength, flexural strength.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông siêu tính năng cao (Ultra-high performance concrete hay viết tắt là UHPC) là một loại vật liệu mới được nghiên cứu và phát triển trên thế giới từ năm 1990. Tính năng nổi bật của loại bê tông này là có cường độ chịu nén từ 120 đến 200 MPa, cường độ chịu kéo trực tiếp, chịu uốn tăng cao, khả năng chịu tác động va chạm, chịu tải trọng lặp rất lớn và đặc biệt loại bê tông này còn được đặc trưng bởi độ cứng và độ bền cực kỳ cao. Thành phần cơ bản của UHPC bao gồm xi măng, silica fume, cát thạch anh, phụ gia siêu dẻo, cốt sợi và nước. So với các loại bê tông khác, UHPC có tỷ lệ nước-xi măng W/C nhỏ hơn 0,25. Cát thạch anh được cho là sự lựa chọn tiêu biểu trong vai trò cốt liệu trong công nghệ chế tạo UHPC, tuy nhiên trữ lượng loại vật liệu này ở Việt Nam không nhiều, ngoài một số mỏ nằm sâu trong nội địa, phần còn lại phân bố rải rác dọc theo duyên hải các tỉnh Quảng Ninh, Quảng Trị, Huế, Đà Nẵng, Gia Lai, Đắk Lắk, Khánh Hòa...

Đặc điểm nổi bật của loại vật liệu này là độ cứng lớn, hình dạng hạt có độ tròn cao và bề mặt góc cạnh, ít hàm lượng tạp chất, kích cỡ hạt đồng đều, với những yếu tố này khi sử dụng QS làm cốt liệu trong chế tạo bê tông sẽ giảm thiểu lỗ rỗng và khuyết tật xuất hiện tại vùng chuyển tiếp ITZ, đồng thời giúp cường độ bê tông tăng cao. Tuy nhiên, việc khai thác cát tự nhiên ở ạt gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến địa mạo và môi trường. Để khắc phục vấn đề trên nhóm nghiên cứu đã dùng vật liệu RS phối trộn với QS với những tỷ lệ khác nhau để làm cốt liệu trong chế tạo UHPC.

Cát sông được khai thác tự nhiên từ triền sông nên các hình dạng loại cốt liệu này chịu ảnh hưởng đặc điểm của dòng chảy, nhìn chung có bề mặt trơn nhẵn, dạng tròn cạnh hoặc bán tròn. Những yếu tố này tác động quyết định đến đặc tính làm việc của bê tông tươi và bê tông đã đông cứng.

Cấp phối bê tông sử dụng cát sông RS trong đã được nghiên cứu cả trong và ngoài nước. Nhìn chung, các tài liệu đưa ra các quy định và yêu cầu cơ bản đối với RS về việc lựa chọn thành phần hạt, kích cỡ hạt để có được hỗn hợp đồng nhất, đặc sít và liên tục khi phối với các cỡ hạt khác. Khi sử dụng RS làm cốt liệu, độ rỗng trong hỗn hợp bê tông tăng lên do hàm lượng hạt thoi dẹt trong RS nhiều hơn so với cát thạch anh. Nếu muốn giữ nguyên độ đặc sít của các thành phần vật liệu khoáng với mục đích thỏa mãn các yêu cầu về tính công tác, độ bền và cường độ của bê tông thì việc thiết kế điều chỉnh cấp phối phù hợp với loại vật liệu này để đạt được những tính năng mong muốn của hỗn hợp là hết sức cần thiết.

Ở Việt Nam, cát sông được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng và đã có tiêu chuẩn hướng dẫn TCVN 7570:2006 - Cốt liệu cho bê tông và vữa [1]. Nhìn chung, nghiên cứu và ứng dụng RS trong bê tông thường và bê tông cường độ cao đã tương đối toàn diện khi nó làm cốt liệu trung gian mà cấp hạt lớn nhất là đá nghiền nằm ngoài miền cát theo tiêu chuẩn trên. Tuy nhiên, việc sử dụng RS trong bê tông UHPC vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ tại Việt Nam và trên thế giới.

Pradeep Kumar Badapalli và các cộng sự [2] đã nghiên cứu vi cấu trúc và hình dạng của các hạt thạch anh từ nhiều mẫu cát khác nhau. Kết quả cho thấy, cát sông có hình dạng tròn đến bán tròn, hình dạng của cát phụ thuộc vào đặc tính dòng chảy như hướng và lưu tốc dòng chảy. Trong khi đó, các mẫu cát hồ có hình dạng nhẵn và bán tròn, cát biển có dạng tròn và nhẵn. Kết quả nghiên cứu cho thấy, hình dạng của cát sông đã ảnh hưởng đáng kể đến tính công tác và cường độ của bê tông.

U.S. Agrawal và các cộng sự [3] đã nghiên cứu chế tạo bê tông từ cát sông tự nhiên để làm rõ đặc tính của loại bê tông này so với bê tông cốt liệu cát nhân tạo. Kết quả nghiên cứu đã chế tạo được bê tông thường NSC với cường độ nén của bê tông với cốt liệu cát sông tại 1, 3, 7, 28, 56 và 90 ngày bảo dưỡng lần lượt là 11,82 MPa, 18,31 MPa, 22,12 MPa, 34,22 MPa, 40,51 MPa và 44,14 MPa. Đồng thời, cường độ chịu uốn đạt 3,7 MPa và cường độ chịu kéo trực tiếp đạt 3,5 MPa tại 90 ngày tuổi.

Nghiên cứu của Donza và các cộng sự [4] đã sử dụng cát sông và cát nghiền có nguồn gốc từ các loại đá gốc khác nhau để làm rõ các đặc tính của bê tông tươi và bê tông đã đông cứng. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi sử dụng cát nghiền từ đá granite sẽ cải thiện 10 - 15% về cường độ nén. Kết quả tương tự ở các nghiên cứu khác [6,9].

Các tác giả [5-8] đã nghiên cứu tính công tác của bê tông sử dụng cát sông so với các loại cát nghiền khác nhau. Kết quả cho thấy, bê tông sử dụng cát sông có tính công tác tốt hơn, do cát nghiền thường có hình dạng góc cạnh, kết cấu không đồng đều và độ rỗng lớn, làm giảm khả năng linh động của hỗn hợp; vì vậy cần tăng hàm lượng phụ gia siêu dẻo để cải thiện tính công tác.

Mục đích của nghiên cứu này là chế tạo UHPC với thành phần cốt liệu được phối trộn từ RS có đường kính đến 5 mm và QS. Trên cơ sở đó nghiên cứu tính năng chịu nén bằng cách ghi nhận trạng thái ứng suất nén - biến dạng thực nghiệm, từ đó xác định cường độ

chịu nén, modul đàn hồi và hệ số poisson, đồng thời tiến hành xây dựng đường cong ứng suất nén - biến dạng của UHPC có tỷ lệ cốt liệu RS và QS phối trộn khác nhau.

Đối tượng nghiên cứu của bài báo này là cấp phối bê tông sử dụng cốt liệu cát sông Đồng Nai (RS) phối trộn với cát thạch anh Cam Ranh (QS) như Hình 1 với các tỷ lệ khác nhau. Trong đó, RS lần lượt thay đổi từ 0%, 25%, 50%, 75% và 100% so với tổng khối lượng cốt liệu. Mục tiêu của nghiên cứu là có thể thay thế một phần hoặc toàn bộ QS bởi RS trong chế tạo UHPC. Trong đó, QS và RS có thành phần hạt nằm trong miền cát hạt mịn với modul cỡ hạt theo hướng dẫn TCVN 7572:2006 - Cốt liệu cho bê tông và vữa [7]. Khi phân tích theo tiêu chuẩn ASTM C33 [14] thì QS và RS nằm trong miền cốt liệu mịn. Kết quả nghiên cứu cho thấy, có thể chế tạo UHPC với tính năng và giá thành hợp lý khi phối trộn cát sông và cát thạch anh với tỷ lệ phù hợp.



(a) Cát thạch anh QS

(b) Cát sông RS

Hình 1. Cốt liệu cát thạch anh QS và cát sông RS.

2. VẬT LIỆU THÀNH PHẦN VÀ CÔNG TÁC CHẾ TẠO BÊ TÔNG UHPC

2.1. Vật liệu thành phần

Ngoài cát thạch anh và cát sông như Hình 1, trong nghiên cứu này, UHPC được chế tạo từ các vật liệu bao gồm: Xi măng, silica fume, bột cát thạch anh và phụ gia siêu dẻo như Hình 2. Thành phần nguyên vật liệu được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần nguyên vật liệu.

STT	Nguyên vật liệu	Ký hiệu	Kích cỡ hạt	Khối lượng riêng (kg/m ³)
1	Xi măng PC 50	C	1-75 μ m	3050
2	Silica fume	SF	0,05-1 μ m	2220
3	Bột cát thạch anh	QP	1-100 μ m	2630
4	Cát sông	RS	0,14-5 mm	2700
5	Cát thạch anh	QS	0,14-1,25 mm	2650
6	Nước	W	-	1000

STT	Nguyên vật liệu	Ký hiệu	Kích cỡ hạt	Khối lượng riêng (kg/m ³)
7	Phụ gia siêu dẻo	AD	-	1100



(a) Xi măng



(b) Silica fume



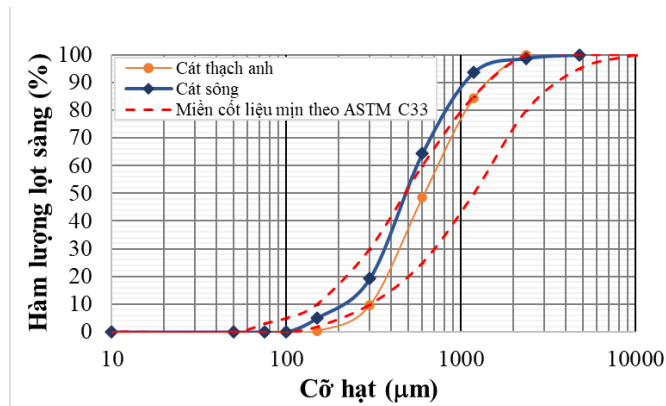
(c) Bột cát



(d) Sợi thép

Hình 2. Thành phần nguyên vật liệu.

Thành phần hạt và mô đun độ lớn và các đặc điểm cơ lý của cát sông Đồng Nai và cát thạch anh Cam Ranh được phân tích từ phòng thí nghiệm và cho kết quả như Bảng 2, 3 và Hình 3.



Hình 3. Biểu đồ thành phần hạt của QS và RS theo ASTM C33.

Bảng 2. Hàm lượng lọt sàng của cát sông và cát thạch anh.

Cỡ sàng (mm)	Cát sông		Cát thạch anh		Giới hạn theo ASTM C33	
	Tích lũy (%)	Lượng lọt sàng (%)	Tích lũy (%)	Lượng lọt sàng (%)	Min	Max
9,5 (3/8 in.)	0	100	0	100	100	100
4,75 (số. 4)	0	100	0	100	100	95
2,36 (số. 8)	1,21	98,79	0	100	100	80
1,18 (số. 16)	6,35	93,65	0,6	99,4	85	50
0,6 (số. 30)	35,57	64,43	51,6	48,4	60	25
0,3 (số. 50)	80,76	19,24	99,46	0,54	30	10
0,15 (số. 100)	94,99	5,01	99,76	0,24	10	2
0,075 (số. 200)	100	0	100	0	5	0
< 0,075	100	0	100	0	-	-
Mô đun cỡ hạt	2,19		2,51			
Hình dạng	Tròn cạnh		Tròn cạnh			

Cỡ sàng	Cát sông		Cát thạch anh		Giới hạn theo ASTM C33	
	Tích lũy	Lượng lọt sàng	Tích lũy	Lượng lọt sàng	Min	Max
(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)		
Tình trạng bề mặt	Nhẵn		Nhẵn			

Bảng 3. Các tính chất cơ lý của QS và RS

Cốt liệu	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả
QS	Khối lượng riêng	g/cm ³	2650
	Khối lượng thể tích xốp	g/cm ³	1670
	Hệ số lèn chặt	-	0,621
	Độ hút nước	%	0,60
	Hàm lượng SiO ₂	%	98,55
RS	Khối lượng riêng	g/cm ³	2700
	Khối lượng thể tích xốp	g/cm ³	1480
	Hệ số lèn chặt	-	0,629
	Độ hút nước	%	1,04
	Hàm lượng SiO ₂	%	91,45

Tính năng của bê tông phụ thuộc chủ yếu vào mức độ sắp xếp của các hạt cốt liệu. Vì vậy, việc lựa chọn thành phần hạt hợp lý, có độ lèn chặt tối ưu là một trong những yếu tố rất quan trọng trong việc thiết kế cấp phối bê tông.

2.2. Các tỷ lệ phối trộn thành phần hạt cốt liệu

2.2.1. Xác định hệ số lèn chặt lý thuyết

Hệ số lèn chặt theo lý thuyết của nhiều cấu tử được xác định theo F. de Larrard [11] như sau:

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \beta_j \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] y_j} \quad (1)$$

Trong đó: γ_i là độ lèn chặt của cấu tử thứ i trong hỗn hợp;

β_i là độ lèn chặt của cấu tử thứ i ;

y_j là thể tích cấu tử thứ j trong 1 đơn vị thể tích hỗn hợp;

a_{ij} là hiệu ứng lỏng lẻo của hỗn hợp được xác định như công thức (2);

b_{ij} là hiệu ứng tường chắn của hỗn hợp được xác định như công thức (3)

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02}} \quad (2)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,50} \quad (3)$$

Trong đó: $d_i > d_j$ là đường kính trung bình của cỡ hạt thứ i và thứ j .

Trường hợp phối trộn 2 cấu tử là cát sông và cát thạch anh thì công thức (1) được đặc biệt hóa với $n = 2$, cấu tử thứ 1 là RS, cấu tử thứ 2 là QS như sau:

$$\gamma_{CS} = \frac{\beta_{RS}}{1 - \left(1 - a_{12} \frac{\beta_{RS}}{\beta_{QS}}\right)} y_{QS} \quad (4)$$

$$\gamma_{QS} = \frac{\beta_{QS}}{1 - \left[1 - \beta_{QS} + \beta_{RS} b_{21} \left(1 - \frac{1}{\beta_{RS}}\right)\right]} y_{RS} \quad (5)$$

Hiệu ứng lỏng lẻo và hiệu ứng tường chắn như (6) và (7):

$$a_{12} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_{QS}}{d_{RS}}\right)^{1,02}} \quad (6)$$

$$b_{12} = 1 - \left(1 - \frac{d_{RS}}{d_{QS}}\right)^{1,50} \quad (7)$$

Thể tích cấu tử QS và RS trong 1 đơn vị thể tích hỗn hợp được xác định như (8) và (9):

$$y_{QS} = \frac{\frac{m_{QS}}{\rho_{QS}}}{\frac{m_{QS}}{\rho_{QS}} + \frac{m_{RS}}{\rho_{RS}}} \quad (8), \quad y_{RS} = \frac{\frac{m_{RS}}{\rho_{RS}}}{\frac{m_{QS}}{\rho_{QS}} + \frac{m_{RS}}{\rho_{RS}}} \quad (9)$$

Hệ số lèn chặt và độ rỗng của hỗn hợp cốt liệu phối trộn là:

$$p = \gamma = \text{Min}(\gamma_{QS}; \gamma_{RS}) \quad (10)$$

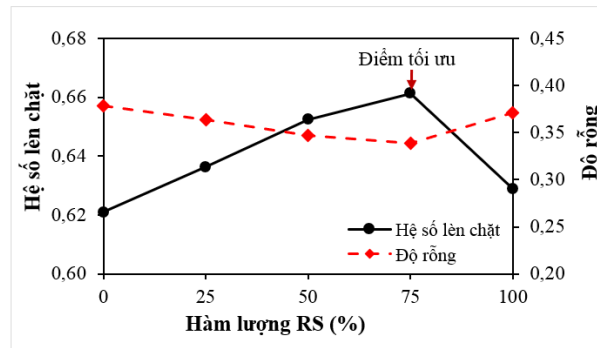
$$e = 1 - \gamma \quad (11)$$

Bảng 4. Hệ số lèn chặt lý thuyết của hỗn hợp cốt liệu

STT	Ký hiệu	RS (%)	m (kg)	QS (kg)	RS (kg)	a_{ij}	b_{ij}	y_{QS}	y_{RS}	γ_{QS}	γ_{RS}	p	e
1	QS ¹⁰⁰ -RS ₀	0	1000	1000	0	2,668	2,65	0,377	0	1,000	0	0,621	0,781
2	QS ⁷⁵ -RS ₂₅	25	1000	750	250	2,668	2,65	0,283	0,094	0,751	0,249	0,636	0,737
3	QS ⁵⁰ -RS ₅₀	50	1000	500	500	2,668	2,65	0,189	0,187	0,502	0,498	0,652	0,697
4	QS ²⁵ -RS ₇₅	75	1000	250	750	2,668	2,65	0,094	0,281	0,251	0,749	0,670	0,661

STT	Ký hiệu	RS (%)	m (kg)	QS (kg)	RS (kg)	a_{ij}	b_{ij}	y_{QS}	y_{RS}	γ_{QS}	γ_{RS}	p	e
5	QS ₀ -RS ₁₀₀	100	1000	0	1000	2,668	2,65	0	0,375	0,000	1,000	0,688	0,629

*Trong đó QS_i-RS_{100-i} là hỗn hợp phối trộn bao gồm $i\%$ QS và $(100-i)\%$ RS.



Hình 4. Hệ số lèn chặt và độ rỗng lý thuyết của hỗn hợp cát sông và cát thạch anh.

Hệ số lèn chặt và độ rỗng lý thuyết của RS và QS được xác định như Hình 4. Ở kết quả phân tích này độ chặt lớn nhất xuất hiện tại tỷ lệ 25% QS phối trộn với 75% RS.

2.2.2. Xác định hệ số lèn chặt thực nghiệm

Cốt liệu QS và RS trong nghiên cứu này như Hình 1, thành phần hạt như Bảng 2 và được phối trộn với các tỷ lệ khác nhau. Ứng với từng tỷ lệ phối trộn, tiến hành thí nghiệm để xác định khối lượng riêng (ρ_a) và khối lượng thể tích xốp (ρ_v) của mẫu theo tiêu chuẩn [7]. Từ đó có thể xác định được hệ số lèn chặt (p) và độ rỗng (e) của hỗn hợp với công thức (12) và (13) như sau:

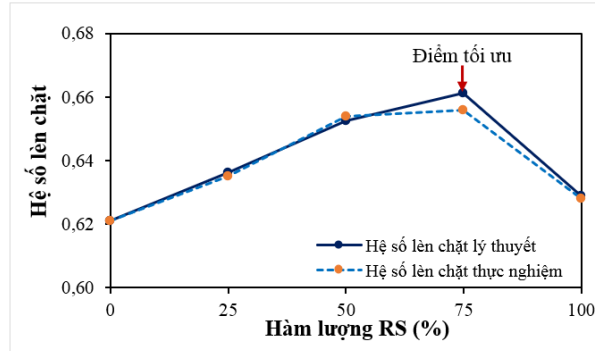
$$p = \frac{\rho_v}{\rho_a} \quad (12)$$

$$e = \frac{\rho_a - \rho_v}{\rho_a} \quad (13)$$

Bảng 5. Hệ số lèn chặt thực nghiệm của hỗn hợp cốt liệu

STT	Ký hiệu	RS (%)	m (kg)	QS (kg)	RS (kg)	ρ_v	ρ_a	p	e	c	e
						(g/cm ³)	(g/cm ³)	Lý thuyết		Thực nghiệm	
1	QS ₁₀₀ -RS ₀	0	1000	1000	0	1,646	2,650	0,621	0,379	0,621	0,379
2	QS ₇₅ -RS ₂₅	25	1000	750	250	1,691	2,663	0,636	0,364	0,635	0,365
3	QS ₅₀ -RS ₅₀	50	1000	500	500	1,738	2,657	0,652	0,348	0,654	0,346

STT	Ký hiệu	RS (%)	m (kg)	QS (kg)	RS (kg)	ρ_v	ρ_a	p	e	c	e
						(g/cm ³)	(g/cm ³)	Lý thuyết		Thực nghiệm	
4	QS ₂₅ -RS ₇₅	75	1000	250	750	1,747	2,663	0,661	0,339	0,656	0,344
5	QS ₀ -RS ₁₀₀	100	1000	0	1000	1,676	2,668	0,629	0,371	0,628	0,372



Hình 5. Hệ số lèn chặt lý thuyết và thực nghiệm của hỗn hợp cát sông và cát thạch anh.

Kết quả phân tích lý thuyết như Bảng 4, Hình 4 và phân tích thực nghiệm như Bảng 5, Hình 5 cho thấy khi phối 25% QS và 75% RS sẽ tạo nên hỗn hợp cốt liệu có hệ số lèn chặt lớn nhất.

2.3. Cấp phối đánh giá

Ý tưởng chủ đạo là dựa trên nền cấp phối tiên tiến trên thế giới, cụ thể là các cấp phối hạt mịn M3Q [11], kết hợp với quá trình thử nghiệm thăm dò trong phòng thí nghiệm với cốt liệu là cát sông Đồng Nai và các vật liệu địa phương Việt Nam khác để lựa chọn được cấp phối phù hợp cho nghiên cứu thực nghiệm. Nhóm nghiên cứu đã lựa chọn cấp phối đánh giá như Bảng 6. Trong đó, các tỷ lệ: nước-xi măng là W/C , phụ gia-xi măng là AD/C và cốt liệu-xi măng là Agg/C của cấp phối tương ứng là 0,229, 2% và 1,17. Trong đó, Agg là hệ 2 cấu tử phối trộn từ cát sông và cát thạch anh với tỷ lệ khác nhau.

Bảng 6. Cấp phối dùng trong nghiên cứu thực nghiệm.

STT	Thành phần	Đơn vị	Kích thước hạt	Khối lượng các thành phần
1	Xi măng PC50	kg	1-75 μ m	850
2	Silicafume	kg	0,05-1 μ m	170
3	Bột cát thạch anh	kg	1-100 μ m	200
5	Nước	kg	-	202
6	Sợi thép	kg	-	78,5

STT	Thành phần	Đơn vị	Kích thước hạt	Khối lượng các thành phần
7	Phụ gia siêu dẻo	kg	-	18,7
8	Agg	kg	0,14-5 mm	946

2.4. Công tác đổ, bảo dưỡng và gia công mẫu

Để xác định cường độ chịu nén, nhóm nghiên cứu tiến hành đúc 65 mẫu trụ chịu nén có đường kính 100 mm, chiều cao 200 mm và được ký hiệu là 100×200 mm theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M [12].

Thiết bị trộn là máy trộn cưỡng bức 4 cấp độ tại phòng thí nghiệm như hình 6. Quy trình trộn UHPC như sau:

Bước 1: Cho hỗn hợp bột gồm xi măng, bột cát và silicafume vào cối trộn và tiến hành trộn trong 30 giây với tốc độ số 1 để hỗn hợp bột hòa trộn vào nhau.

Bước 2: Cho 80% nước vào hỗn hợp, quay từ 30 đến 60 giây với tốc độ số 1, lượng nước cho vào từ từ và phân tán đều trong hỗn hợp. Cho tiếp từ 70 đến 80% phụ gia vào hỗn hợp và trộn từ 2 phút đến 3 phút, xem trạng thái của hỗn hợp mà điều chỉnh lượng phụ gia và nước còn lại vào cho đến khi hỗn hợp chảy dẻo. Tăng tốc lên số 2 và số 3 khi đã cho hết phụ gia và nước.

Bước 4: Cho tiếp cốt liệu phối trộn từ RS và QS vào hỗn hợp và trộn từ 1 đến 2 phút. Tốc độ từ số 1 tăng lên số 2.

Bước 5: Cuối cùng cho sợi thép vào hỗn hợp đảm bảo sợi phân tán đều, trộn tối đa 1 phút và kết thúc quy trình trộn.

Tổng thời gian trộn dao động từ 5 đến 8 phút.



Hình 6. Thiết bị trộn cưỡng bức 4 cấp độ tại phòng thí nghiệm.

Khuôn trụ trước khi đổ phải được vệ sinh, bôi lớp chống dính bám, kín khí và không bị cong vênh. Quá trình đổ mẫu cần có biện pháp giảm bọt khí trong mẫu. Đối với mẫu kéo và mẫu uốn để tránh hiện tượng sợi thép bị lắng xuống đáy, cần đổ bê tông thành từng lớp. Sau khi đổ mẫu tiến hành bọc bề mặt mẫu để tránh bay hơi nước và để mẫu trong môi trường tự nhiên 24 giờ. Sau đó, các mẫu tiếp tục được bảo dưỡng nhiệt ẩm ở điều kiện nhiệt độ 80°C và bảo hòa ẩm trong 48 giờ tiếp theo, cuối cùng ngâm mẫu đến thời điểm cần nén. Khuôn trụ 100×200 mm và công tác đổ mẫu chịu nén vào các khuôn trụ như Hình 7.



(a) Khuôn 100x200 mm



(b) Đổ bê tông vào mẫu trụ.

Hình 7. Chế tạo mẫu nén 100 x 200 mm.

Sau bảo dưỡng, tiến hành mài phẳng mẫu bằng máy mài chuyên dụng như Hình 8.



(a) Công tác mài mẫu.



(b) Mẫu 100x200mm sau mài phẳng.

Hình 8. Mài phẳng mẫu trụ UHPC.

Quy cách mẫu bê tông cho thí nghiệm kéo, 2 thanh cáp có đường kính 7,1 mm được đặt đối xứng và đồng trục với mẫu xương chó, chiều dài 230 mm được đặt vào mẫu sao trục của 2 thanh đồng trục với trục của mẫu bê tông như Hình 9.

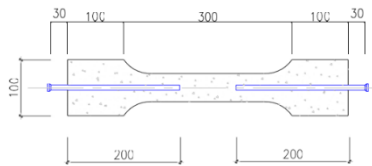


(a) Khuôn mẫu kéo.



(b) Đổ mẫu kéo.

Hình 9. Công tác đổ mẫu kéo UHPC.



Hình 10. Quy cách mẫu kéo UHPC.

Quy cách mẫu kéo như Hình 10.

Thí nghiệm uốn được thực hiện theo hướng dẫn của ASTM C78/C78M-18 [13]. Mẫu uốn dạng dầm kích thước (100 x 100 x 400) mm được chế tạo nhằm đánh giá cường độ chịu kéo khi uốn của vật liệu. Công tác chế tạo mẫu uốn được thể hiện như Hình 11.



Hình 11. Công tác đổ mẫu uốn.

3. THÍ NGHIỆM CÁC TÍNH NĂNG CỦA UHPC TRÊN NỀN CẤP PHỐI ĐÁNH GIÁ

3.1. Cường độ chịu nén



(a) Bộ mẫu thí nghiệm

(b) Nén mẫu UHPC

Hình 12. Xác định đặc tính chịu nén UHPC.

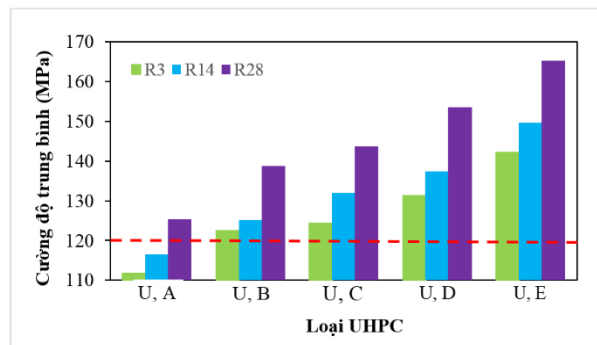
Cường độ chịu nén của bê tông được thí nghiệm trên mẫu trụ 100×200 mm. Bộ mẫu sau khi bảo dưỡng và mài phẳng bề mặt tiến hành thí nghiệm xác định cường độ chịu nén trên máy nén bê tông năng lực tối đa 2000 KN như Hình 12. Tốc độ nén 0,25 MPa/s. Kết quả thí nghiệm cho kết quả cường độ chịu nén như Bảng 7 và Hình 13.

Bảng 7. Kết quả cường độ chịu nén của UHPC với cốt liệu được phối trộn từ RS và QS

Cường độ chịu nén (MPa)									
Tên mẫu	R ₃	R ^{tb} ₃	Tên mẫu	R ₁₄	R ^{tb} ₁₄	Tên mẫu	R ₂₈	R ^{tb} ₂₈	S ₂₈
RS ₁₀₀ QS ₀ ^{3,1}	119,5	111,66	RS ₁₀₀ QS ₀ ^{14,1}	123,2	116,54	RS ₁₀₀ QS _{0,1}	124,06	125,28	2,45
RS ₁₀₀ QS ₀ ^{3,2}	103,4		RS ₁₀₀ QS ₀ ^{14,2}	119,2		RS ₁₀₀ QS _{0,2}	126,33		
RS ₁₀₀ QS ₀ ^{3,3}	112,1		RS ₁₀₀ QS ₀ ^{14,3}	112,2		RS ₁₀₀ QS _{0,3}	121,35		
RS ₁₀₀ QS ₀ ^{3,4}	109,2		RS ₁₀₀ QS ₀ ^{14,4}	121,3		RS ₁₀₀ QS _{0,4}	128,37		
RS ₁₀₀ QS ₀ ^{3,5}	115,3		RS ₁₀₀ QS ₀ ^{14,5}	116		RS ₁₀₀ QS _{0,5}	124,78		

Cường độ chịu nén (MPa)									
Tên mẫu	R₃	R^{tb}₃	Tên mẫu	R₁₄	R^{tb}₁₄	Tên mẫu	R₂₈	R^{tb}₂₈	S₂₈
RS ₁₀₀ QS ₀ ³ ,6	110,4		RS ₁₀₀ QS ₀ ¹⁴ ,6	107,3		RS ₁₀₀ QS ₀ ,6	126,76		
RS ₇₅ QS ₂₅ ³ ,1	122,53	122,42	RS ₇₅ QS ₂₅ ¹⁴ ,1	125,31	125,20	RS ₇₅ QS ₂₅ ,1	139,11	138,78	5,08
RS ₇₅ QS ₂₅ ³ ,2	119,00		RS ₇₅ QS ₂₅ ¹⁴ ,2	121,72		RS ₇₅ QS ₂₅ ,2	136,26		
RS ₇₅ QS ₂₅ ³ ,3	126,22		RS ₇₅ QS ₂₅ ¹⁴ ,3	129,00		RS ₇₅ QS ₂₅ ,3	139,32		
RS ₇₅ QS ₂₅ ³ ,4	121,31		RS ₇₅ QS ₂₅ ¹⁴ ,4	124,07		RS ₇₅ QS ₂₅ ,4	137,96		
RS ₇₅ QS ₂₅ ³ ,5	118,47		RS ₇₅ QS ₂₅ ¹⁴ ,5	121,19		RS ₇₅ QS ₂₅ ,5	135,78		
RS ₇₅ QS ₂₅ ³ ,6	127,02		RS ₇₅ QS ₂₅ ¹⁴ ,6	129,90		RS ₇₅ QS ₂₅ ,6	144,22		
RS ₅₀ QS ₅₀ ³ ,1	125,89	124,41	RS ₅₀ QS ₅₀ ¹⁴ ,1	133,61	132,02	RS ₅₀ QS ₅₀ ,1	145,68	143,76	7,64
RS ₅₀ QS ₅₀ ³ ,2	122,42		RS ₅₀ QS ₅₀ ¹⁴ ,2	129,99		RS ₅₀ QS ₅₀ ,2	142,85		
RS ₅₀ QS ₅₀ ³ ,3	130,20		RS ₅₀ QS ₅₀ ¹⁴ ,3	137,97		RS ₅₀ QS ₅₀ ,3	146,61		
RS ₅₀ QS ₅₀ ³ ,4	119,86		RS ₅₀ QS ₅₀ ¹⁴ ,4	127,23		RS ₅₀ QS ₅₀ ,4	138,99		
RS ₅₀ QS ₅₀ ³ ,5	122,48		RS ₅₀ QS ₅₀ ¹⁴ ,5	130,06		RS ₅₀ QS ₅₀ ,5	143,03		
RS ₅₀ QS ₅₀ ³ ,6	125,58		RS ₅₀ QS ₅₀ ¹⁴ ,6	133,29		RS ₅₀ QS ₅₀ ,6	145,39		
RS ₂₅ QS ₇₅ ³ ,1	133,14	131,29	RS ₂₅ QS ₇₅ ¹⁴ ,1	139,38	137,44	RS ₂₅ QS ₇₅ ,1	155,98	153,61	4,94
RS ₂₅ QS ₇₅ ³ ,2	132,73		RS ₂₅ QS ₇₅ ¹⁴ ,2	138,99		RS ₂₅ QS ₇₅ ,2	156,66		
RS ₂₅ QS ₇₅ ³ ,3	132,85		RS ₂₅ QS ₇₅ ¹⁴ ,3	138,91		RS ₂₅ QS ₇₅ ,3	151,57		
RS ₂₅ QS ₇₅ ³ ,4	131,43		RS ₂₅ QS ₇₅ ¹⁴ ,4	137,60		RS ₂₅ QS ₇₅ ,4	154,22		
RS ₂₅ QS ₇₅ ³ ,5	129,50		RS ₂₅ QS ₇₅ ¹⁴ ,5	135,62		RS ₂₅ QS ₇₅ ,5	153,02		
RS ₂₅ QS ₇₅ ³ ,6	128,11		RS ₂₅ QS ₇₅ ¹⁴ ,6	134,12		RS ₂₅ QS ₇₅ ,6	150,19		
RS ₀ QS ₁₀₀ ³ ,1	139,80	142,23	RS ₀ QS ₁₀₀ ¹⁴ ,1	147,12	149,68	RS ₀ QS ₁₀₀ ,1	162,77	165,37	5,71
RS ₀ QS ₁₀₀ ³ ,2	139,04		RS ₀ QS ₁₀₀ ¹⁴ ,2	146,38		RS ₀ QS ₁₀₀ ,2	163,05		
RS ₀ QS ₁₀₀ ³ ,3	150,69		RS ₀ QS ₁₀₀ ¹⁴ ,3	158,40		RS ₀ QS ₁₀₀ ,3	171,32		
RS ₀ QS ₁₀₀ ³ ,4	148,44		RS ₀ QS ₁₀₀ ¹⁴ ,4	156,22		RS ₀ QS ₁₀₀ ,4	172,99		
RS ₀ QS ₁₀₀ ³ ,5	139,92		RS ₀ QS ₁₀₀ ¹⁴ ,5	147,31		RS ₀ QS ₁₀₀ ,5	164,19		
RS ₀ QS ₁₀₀ ³ ,6	135,52		RS ₀ QS ₁₀₀ ¹⁴ ,6	142,62		RS ₀ QS ₁₀₀ ,6	157,88		

*Trong đó $RS_iQS_{100-i}^3,j$, $RS_iQS_{100-i}^{14,j}$, $RS_iQS_{100-i}^{28,j}$ với j là thứ tự mẫu, $i = 0, 25, 50, 75, 100$ là ký hiệu các mẫu khi phối trộn RS và QS với các tỷ lệ khác nhau ở 3, 14 và 28 ngày tuổi. Bê tông với cốt liệu thay đổi được ký hiệu lần lượt là U, A; U, B; U, C; U, D và U, E.



Hình 13. Biểu đồ cường độ chịu nén trung bình tại 3, 14 và 28 ngày của bê tông.

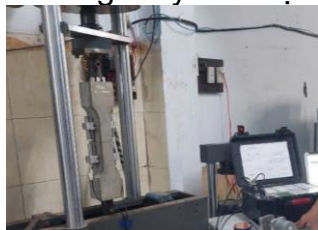
Kết quả thí nghiệm trình bày ở Bảng 7 và Hình 13 cho thấy, khi hàm lượng RS trong hỗn hợp cốt liệu tăng dần từng cấp 25% thì cường độ chịu nén giảm dần và biến thiên trong khoảng từ 165,37 MPa giảm đến 125,28 MPa. Như vậy, với điều kiện vật liệu, kỹ thuật trộn và phương pháp bảo dưỡng hiện tại thì vẫn có thể chế tạo được bê tông siêu tính năng cao đạt cường độ chịu nén trên 120 MPa với cốt liệu có hàm lượng 100% cát sông. Đồng thời, phương pháp chế tạo trên còn cho cường độ bê tông đạt khoảng 87% và 92% ở 3 ngày tuổi và 14 ngày tuổi so với cường độ bê tông ở 28 ngày tuổi.

3.2. Cường độ chịu kéo trực tiếp

Thí nghiệm kéo mẫu bằng máy kéo dọc trục như Hình 14.



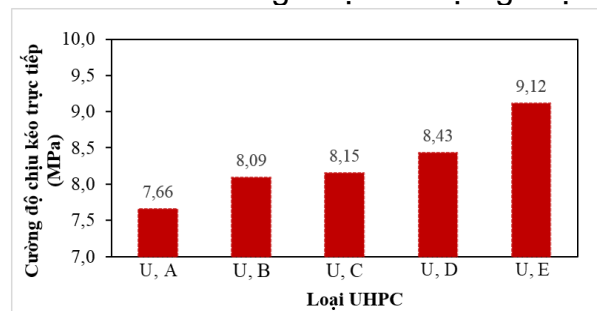
(a) Mẫu sau bảo dưỡng



(b) Đo lực - chuyển vị

Hình 14. Thí nghiệm kéo trực tiếp.

Trong đó, lực tác dụng lên mẫu được ghi nhận từ cảm biến đo lực (load cell). Tốc độ kéo từ 0,025 đến 0,04 mm/phút. Ở mặt bên của mẫu gắn thiết bị LVDT để đo biến dạng dọc theo chiều dài mẫu. Các giá trị đo được ghi lại tự động bằng máy tính.



Hình 15. Biểu đồ cường độ chịu kéo trực tiếp trung bình của UHPC.

Bảng 8. Cường độ chịu kéo của UHPC sau bảo dưỡng nhiệt ẩm.

STT	Nhóm mẫu	Vết nứt đầu tiên	Cường độ trung bình
		(MPa)	(MPa)
1	U, A	5,63	7,66
2	U, B	5,97	8,09
3	U, C	6,09	8,15
4	U, D	6,20	8,43
5	U, E	6,79	9,12

Phân tích kết quả cường độ chịu kéo trực tiếp trung bình của các loại bê tông được thể hiện như Bảng 8 và Hình 15 cho thấy, cường độ chịu kéo trực tiếp biến thiên trong khoảng 7,66 MPa đến 9,12 MPa. Như vậy, khi hàm lượng RS càng lớn trong hỗn hợp cốt liệu thì cường độ chịu kéo trực tiếp có xu hướng giảm, điều này là do những nhược điểm của RS về hình dạng và đặc tính bề mặt của hạt đã tạo nên những lỗ rỗng và khuyết tật ở vùng chuyển tiếp ITZ nên ảnh hưởng đến cường độ bê tông. Tuy nhiên, khi sử dụng cốt liệu hoàn toàn bằng cát sông thì vẫn tạo được UHPC có cường độ chịu kéo trên 7 MPa.

3.3. Cường độ chịu uốn

Khi mẫu đạt 28 ngày tuổi, tiến hành thí nghiệm theo mô hình uốn 3 điểm trên máy kéo/nén thủy lực như Hình 16.

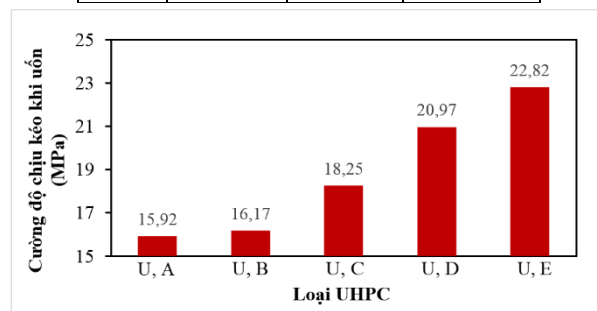


Hình 16. Thí nghiệm uốn 3 điểm.

Kết quả thí nghiệm như Bảng 9 và Hình 16.

Bảng 9. Cường độ chịu uốn của UHPC sau bảo dưỡng nhiệt ẩm.

STT	Nhóm mẫu	Vết nứt đầu tiên	Cường độ trung bình
		(MPa)	(MPa)
1	U, A	11,02	15,92
2	U, B	12,07	16,17
3	U, C	12,71	18,25
4	U, D	14,27	20,97
5	U, E	17,19	22,82

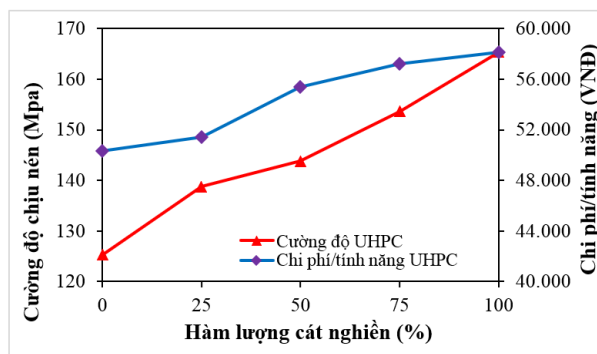


Hình 17. Biểu đồ cường độ chịu uốn trung bình của UHPC.

Từ Hình 17 và Bảng 9 cho cường độ chịu nén trung bình của các loại bê tông biến thiên trong khoảng 15,92 MPa đến 22,82 MPa. Như vậy, khi hàm lượng RS càng lớn trong hỗn hợp cốt liệu thì cường độ chịu uốn có xu hướng giảm, điều này là do những nhược điểm của RS về hình dạng và đặc tính bề mặt của hạt đã tạo nên những lỗ rỗng và khuyết tật ở vùng chuyển tiếp ITZ. Tuy nhiên, vẫn có thể chế tạo được UHPC có cường độ chịu kéo trên 15 MPa với cốt liệu hoàn toàn bằng cát sông RS.

4. ĐÁNH GIÁ CHI PHÍ UHPC

Từ thực tế sản xuất cho thấy, chi phí chế tạo UHPC là thách thức để ứng dụng rộng rãi loại vật liệu này trong lĩnh vực xây dựng. Hỗn hợp UHPC được chế tạo từ cấp phối với cốt liệu RS₁₀₀QS₀, RS₇₅QS₂₅, RS₅₀QS₅₀, RS₂₅QS₇₅, RS₀QS₁₀₀ lần lượt là U, A; U, B; U, C; U, D và U, E. Khi giữ nguyên các thành phần vật liệu trong hỗn hợp UHPC với tiêu chí tổng khối lượng cốt liệu không đổi thì giá thành của UHPC phụ thuộc vào tỷ lệ giữa RS và QS trong hỗn hợp cốt liệu này. Kết quả phân tích cho thấy, U, A sử dụng 100% RS có giá thành khoảng 6,31 triệu VNĐ/1m³ trong khi đó U, E sử dụng 100% QS có giá thành 8,67 triệu VNĐ/1m³ như Bảng 10 và Hình 18.



Hình 18. Biểu đồ tương quan cường độ và chi phí/tính năng của UHPC.

Đồng thời, U, A; U, B; U, C; U, D có giá thành thấp hơn U, E lần lượt là 34,42%, 25,82%, 17,21%, 8,61% khi so sánh tổng thể và 13,44%, 11,60%, 4,77%, 1,62% khi so sánh tỷ lệ chi phí trên tính năng chịu nén. Kết quả phân tích cho thấy, tuy cường độ chịu nén của U,A; U, B; U, C; U, D thấp hơn U, E, nhưng khi so sánh về giá thành tổng thể hay chi phí trên tính năng thì UHPC với hàm lượng RS cao có nhiều ưu điểm hơn, điều này là do giá thành vật liệu RS thấp hơn nhiều so với QS.

Bảng 10. Khái toán chi phí chế tạo bê tông UHPC.

Loại UHPC	Chi phí/m ³ (VNĐ)	Rmax (Mpa)	Chi phí/Rmax (VNĐ/MPa)
U, A	6.307.020	125,275	50.345
U, B	7.134.770	138,775	51.413
U, C	7.962.520	143,758	55.388
U, D	8.790.270	153,607	57.226
U, E	9.618.020	165,367	58.162

Như vậy, có thể sử dụng UHPC với cốt liệu phối trộn đạt được hiệu quả kinh tế - kỹ thuật mong muốn khi sử dụng hàm lượng cát sông thích hợp trong hỗn hợp cốt liệu, tuy nhiên phạm vi nghiên cứu này không tiến hành so sánh chi phí với các nghiên cứu khác vì giá nguyên vật liệu phụ thuộc vào từng khu vực ở những thời điểm khác nhau.

5. KẾT LUẬN

Cát thạch anh và cát sông Đồng Nai được sử dụng trong nghiên cứu này có thành phần hạt, modul độ lớn phù hợp với tiêu chuẩn hướng dẫn TCVN 7572:2006 - Cốt liệu cho bê tông và vữa. Với đặc điểm về thành phần hạt, modul cỡ hạt và một số tính chất cơ lý của 2 loại cát này cho thấy hỗn hợp cốt liệu được phối trộn từ cát sông và cát thạch anh với những tỷ lệ hợp lý có thể sử dụng làm cốt liệu để nghiên cứu và chế tạo bê tông siêu tính năng.

Thử nghiệm trên nền cấp phối đánh giá với hàm lượng RS chiếm 100%, 75%, 50%, 25%, 0% tổng khối lượng cốt liệu đã chế tạo được bê tông siêu tính năng với cường độ nén, kéo, uốn đạt ngưỡng 125/8/15 MPa. Kết quả thử nghiệm cho thấy, khi hàm lượng

QS trong hỗn hợp càng cao thì các tính năng của UHPC càng được cải thiện. Đồng thời có thể khẳng định rằng, có thể sử dụng cốt liệu cát sông thay thế một phần hoặc toàn bộ cát thạch anh để chế tạo UHPC.

Nghiên cứu các nhóm U, A; U, B; U, C; U, D và U, E, kết quả là các nhóm có cường độ chịu nén lần lượt là 125,28 MPa, 138,78 MPa, 143,76 MPa, 153,61 MPa và 165,37 MPa. Cường độ chịu nén phát triển nhanh sau bảo dưỡng nhiệt ẩm, đạt 85,2-88,2% tại 3 ngày và 90,2-91,8% tại 14 ngày khi so sánh với cường độ 28 ngày. Ngoài ra, tuy nhóm U, B được tạo nên từ việc phối 75% RS với 25% QS có độ chặt lớn nhất nhưng nhóm U, E lại đạt được giá trị cường độ lớn nhất. Như vậy, vì những đặc điểm bất lợi về đặc tính hạt, hỗn hợp cốt liệu có hàm lượng RS chiếm ưu thế đã ảnh hưởng đến tính năng của UHPC.

Từ những luận cứ trên có thể kết luận rằng, việc sử dụng cốt liệu phối trộn từ cát sông và cát thạch anh để chế tạo UHPC là khả thi, có cơ sở khoa học và tính thực tiễn cao. Tùy theo mục tiêu cường độ và mức chi phí hướng đến mà có sự lựa chọn tỷ lệ phối trộn hợp lý giữa RS và QS. Việc phối trộn làm giảm hàm lượng QS trong hỗn hợp vừa mang ý nghĩa bảo vệ môi trường vừa có ý nghĩa trong điều kiện khan hiếm cát thạch anh. Ngoài ra, với trữ lượng cát sông phong phú, kết hợp với việc khai thác hợp lý việc mở rộng phạm vi nghiên cứu với nhiều loại cát có nguồn gốc khác nhau dựa trên nền cấp phối đánh giá sẽ cung cấp một góc nhìn toàn diện hơn về tiềm năng khai thác và ứng dụng rộng rãi loại vật liệu này để chế tạo bê tông cường độ cao và bê tông siêu tính năng cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Tiêu chuẩn TCVN-7572:2006; “Cốt liệu cho bê tông và vữa”. TCVN/QCVN, Việt Nam, 2006.
- [2] Pradeep Kumar Badapalli, and Raghu Babu Kottala, C. Krupavathi “Modeling of comparative studies on surface micro morphology of Aeolian, River, Lake, and Beach sand samples using SEM and EDS/EDAX”, Materials Today: Proceedings, 2022.
- [3] U.S. Agrawal, S.P. Wanjari, and D.N. Naresh “Impact of replacement of natural river sand with geopolymer fly ash sand on hardened properties of concrete”, Construction and Building Materials 209 (2019) 499-507.
- [4] H. Donza, O. Cabrera, E.F. Irassar, “High-strength concrete with different fine aggregate”, Cem. Concr. Res. 32 (2002) 1755-1761.
- [5] X. Ding, C. Li, Y. Xu, F. Li, S. Zhao, “Experimental study on long-term compressive strength of concrete with manufactured sand”, Constr. Build. Mater. 108 (2016) 67-73.
- [6] C.K. Kankam, B.K. Meisuh, G. Sossou, T.K. Buabin, “Stress-strain characteristics of concrete containing quarry rock dust as partial replacement of sand”, Case Stud. Constr. Mater. 7 (2017) 66-72.
- [7] B.K. Meisuh, C.K. Kankam, T.K. Buabin, “Case studies in construction materials effect of quarry rock dust on the flexural strength of concrete”, Case Stud. Constr. Mater. 8 (2017) 16-22.
- [8] W. Shen, Y. Liu, X. Huo, Z. Yang, C. Zhou, P. He, Z. Lu, “Mixing design and microstructure of ultra high strength concrete with manufactured sand”, Constr. Build. Mater. 143 (2017) 312-321.
- [9] R. Ilangoana, N. Mahendrana, K. Nagamanib, “Strength and durability properties of concrete containing quarry rock dust as fine aggregate”, ARPN J. Eng. Appl. Sci. 3 (5) (2008) 20-26.
- [10] F. de Larrard, “Concrete Mixture Proportioning: a scientific approach,” London and New York, 2011, ISBN 0-419-23500-0.

[11] Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; and Thiemicke, J, “Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete,” Results of the German Priority Programme 1182 funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)”, No. 22, kassel university press GmbH, Germany, 2015.

[12] ASTM C39/C39M-01, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens” ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2012.

[13] ASTM C78/C78M-18, “Standard Test Method for Flexural strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-point Loading),” ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2018.

[14] American Society for Testing and Materials, C33/C33M-16: Standard Specification for Concrete Aggregates, 2016.