

# Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao và bê tông siêu tính năng cao từ cát nghiền khu vực Tây Nguyên, Đông Nam Bộ và Đồng bằng sông Cửu Long

## Research on manufacturing high-strength concrete and ultra-high-performance concrete from crushed sand in the Central Highlands, Southeast and Mekong Delta

Phạm Ngọc Sáng, Mai Lựu\*

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

\*Tác giả liên hệ: luu.mai@ut.edu.vn

Ngày nhận bài: 8/3/2024 ; Ngày chấp nhận đăng: 15/3/2024

### Tóm tắt:

Bê tông siêu tính năng cao (UHPC) là loại bê tông thế hệ mới với các điểm ưu việt về cường độ, độ bền, tính công tác và độ dẻo dai cao giúp nâng cao khả năng chịu tải của kết cấu, đồng thời, đảm bảo sự bền vững của công trình xây dựng trước tác động xâm thực từ môi trường xung quanh. Nghiên cứu thực hiện trên nền cấp phối bê tông được điều chỉnh từ nền cấp phối hạt mịn M3Q với cốt liệu là cát nghiền được thu thập từ nhiều mỏ khác nhau ở Tây Nguyên, Đông Nam Bộ và Đồng bằng sông Cửu Long. Kết quả thí nghiệm cung cấp góc nhìn về cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn, cường độ chịu kéo trực tiếp, module đàn hồi và hệ số Poisson của bê tông với các loại cát nghiền khác nhau. Kết quả nghiên cứu cho thấy, có thể chế tạo bê tông cường độ cao (HSC) và siêu tính năng cao với các cốt liệu trên, trong đó, bê tông với cốt liệu là cát nghiền Fico và cát nghiền Hùng Vương có thể chế tạo được UHPC với cường độ chịu nén đạt 124 đến 130 MPa, cường độ kéo uốn trên 15 MPa, cường độ chịu kéo trực tiếp trên 7 MPa.

**Từ khóa:** UHPC; HSC; NSC; Cát nghiền; Cát quartz; Sợi thép; Bảo dưỡng nhiệt ẩm; Độ chảy xoè; Cường độ chịu nén; Cường độ chịu kéo; Cường độ chịu uốn; Module đàn hồi; Hệ số Poisson.

### Abstract:

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is a new-generation concrete with superior features in terms of strength, durability, workability, and toughness, helping to improve the load-bearing capacity of structures. UHPC can ensure the sustainability of construction against corrosive impacts from the surrounding environment. The study was carried out on concrete aggregates based on the M3Q fine-grain aggregate, in which QS was replaced by crushed sand (CS) collected from different mines in the Central Highlands, Southeast, and the Mekong Delta. The test results provide a perspective on the compressive strength, flexural strength, direct tensile strength, elastic modulus, and Poisson's ratio of concrete with different types of CS. The results showed that high-strength concrete (HSC) and super-high-performance concrete can be made with the CS aggregates mentioned above. In particular, the compressive strength of concrete with aggregates of Fico CS and Hung Vuong CS can reach 124–130 MPa, while its bending tensile and direct strengths are over 15 MPa and 7 MPa, respectively.

**Keywords:** UHPC; HSC; NSC; Crushed sand; Quartz sand; Steel rope; Moist heat curing; Flow; compressive strength; Tensile strength; Bending strength; Elastic modulus; Poisson coefficient.

## 1. Giới thiệu

Bê tông siêu tính năng cao (Ultra-high-performance concrete - UHPC) là một loại vật liệu mới được nghiên cứu và phát triển trên thế giới khoảng hơn 40 năm. Theo đó, UHPC là vật liệu được tối ưu hóa các thành phần hạt, tỷ lệ vật liệu nước và xi măng nhỏ hơn 0,25, tỷ lệ cốt sợi bên trong không liên tục cao. Các tính chất cơ học của UHPC bao gồm cường độ nén lớn hơn 120 MPa và cường độ kéo sau nứt duy trì lớn hơn 5 MPa, cường độ chịu uốn từ 8 đến 30 MPa và module đàn hồi trong khoảng 40 đến 55 MPa [1]. UHPC có cấu trúc lỗ rỗng không liên tục giúp giảm sự xâm nhập của chất lỏng, tăng cường đáng kể độ bền so với bê tông thông thường.

Cát thạch anh (QS) được cho là sự lựa chọn tiêu biểu trong vai trò cốt liệu của 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 Bình, Quảng Trị, Thừa Thiên - Huế, Đà Nẵng, Quảng Nam, Bình Định, Phú Yên, Khánh Hòa, Kiên Giang. 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 cát nghiền (CS) phối trộn với QS theo những tỷ lệ khác nhau để làm cốt liệu trong chế tạo UHPC. Cát nghiền trong nghiên cứu này được thu thập từ các mỏ đá khác nhau tại khu vực Tây Nguyên, Đông Nam Bộ và Đồng bằng sông Cửu Long như mỏ đá Hùng Vương - Bình Phước, Phước Hòa Fico - Bà Rịa - Vũng Tàu, Tân Cang 8 - Đồng Nai, Antraco - An Giang, Phước Hòa - Long Thành, Thăng Long - Gia Lai và Núi Tào - Bình Thuận. Yếu tố quan trọng

bậc nhất khi sử dụng cát nghiền làm cốt liệu là cường độ đá gốc, hình dạng hạt, mức độ góc cạnh, tính chất bề mặt và độ lèn chặt của hỗn hợp cốt liệu. Có thể thấy rằng, cường độ đá gốc và thành phần thạch học của nó phụ thuộc vào chủng loại nguồn gốc của đá. Trong khi đó, hình dạng, cỡ hạt và tính chất bề mặt phụ thuộc vào công nghệ chế tạo, còn độ lèn chặt của hỗn hợp cốt liệu được cải thiện đáng kể khi phối trộn các thành phần vật liệu có các cỡ hạt khác nhau bởi những phương pháp lý thuyết kết hợp với thực nghiệm và bán thực nghiệm.

Cát nghiền được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng ở Việt Nam và đã có tiêu chuẩn hướng dẫn TCVN 9205:2012 - Cát nghiền cho bê tông và vữa [2]. Các nghiên cứu và ứng dụng CS trong bê tông thường và bê tông cường độ cao đã tương đối toàn diện, tuy nhiên, việc sử dụng CS trong bê tông UHPC vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ tại Việt Nam và trên thế giới. Aitcin và Mindess [3] đã trình bày ảnh hưởng của các loại cát nghiền khác nhau đối với bê tông thường. Nghiên cứu cho thấy độ hút ẩm của cốt liệu CS lớn và hàm lượng nước dùng cho cấp phối bê tông tăng thêm so với cốt liệu cát truyền thống, kết quả thí nghiệm đã tạo ra bê tông thường (NSC) với cường độ trong khoảng 30 - 40 MPa, đồng thời, đưa ra các hướng dẫn kỹ thuật để chế tạo loại bê tông này. Một trong những nghiên cứu khác về bê tông sử dụng cát nghiền của các tác giả Aitcin và Mehta [4] đã được thực hiện, mục tiêu của nghiên cứu này là tìm ra ảnh hưởng của cốt liệu CS đối với các nguồn đá gốc có thành phần khoáng khác nhau. Kết quả cho thấy có thể chế tạo bê tông HSC với cường độ đạt trên 70 MPa.

Haleerattanawattana và Limsuwan [5] đã sử dụng ba loại cốt liệu từ đá nghiền thuộc các loại đá gốc khác nhau là đá vôi, đá bazan và đá granite. Các tác giả đã đề xuất chỉ số (SBG) được xác định bằng tích số giữa hệ số lèn chặt và chỉ số cường độ của từng loại cốt liệu. Nghiên cứu cho thấy, chỉ số SBG liên hệ tuyến tính với cường độ chịu nén của bê tông. Hơn nữa, đối với bê tông có cốt liệu được phối trộn bởi ba loại đá nghiền cho cường độ 104 MPa

sau 28 ngày và khi sử dụng cốt liệu đá bazan, đá granite hay đá vôi cho cường độ chịu nén tương ứng đạt 150 MPa, 140 MPa và 138 MPa sau 28 ngày. Nhóm nghiên cứu Teichmann và Schmidt [6] đã đánh giá ảnh hưởng của tối ưu hóa độ chặt đến tính năng và độ bền của UHPC, cường độ chịu nén của bê tông có thể đạt trên 200 MPa. Theo đó, bê tông có độ chặt càng cao thì càng tăng khả năng chống xâm nhập của nước và không khí so với bê tông thường. Ma [7] nghiên cứu chế tạo UHPC trong hai trường hợp có và không có cát nghiền. QS có đường kính từ 0,2 đến 0,8 mm, CS có đường kính từ 2 đến 5 mm, kết quả đã chế tạo được UHPC với cường độ chịu nén từ 150 đến 165 MPa. Nghiên cứu này đã đề xuất phương trình hồi quy mô tả quan hệ module đàn hồi và cường độ chịu nén, kết quả cho thấy module đàn hồi với cốt liệu nghiền từ đá bazan cao hơn và biến dạng thấp hơn ở ứng suất nén cực đại. Vinh [8] trình bày nghiên cứu chế tạo UHPC với hai trường hợp thuộc hai trường phái khác nhau, là một phần của dự án nghiên cứu hợp tác SPP1182, hai hỗn hợp UHPC có nguồn gốc từ Đại học Kassel (B4Q) và Đại học Leipzig (G7) đã được sử dụng để chế tạo UHPC. Trong nghiên cứu này, thành phần cốt liệu CS thuộc hỗn hợp G7 có đường kính 2 - 5 mm và B4Q có đường kính 5 - 8 mm được trộn với cát thạch anh đường kính 0,3 - 0,8 mm. Trong tất cả các thí nghiệm, thể

tích sợi dao động từ 0,5% đến tối đa 1,25%, kết quả thí nghiệm cho cường độ đạt giá trị 140 MPa sau 7 ngày và 150 MPa sau 28 ngày. Chu và cộng sự [9] đã nghiên cứu các cấp phối cốt liệu được phối từ ba cấu tử là hai loại đá nghiền có module cỡ hạt tương ứng là 3,66 và 4,6 với cát thạch anh bằng phương pháp tối ưu hóa độ đặc hỗn hợp. Nhóm tác giả đã thử nghiệm ba trường hợp phối trộn với tỷ lệ đá nghiền so với tổng cốt liệu gồm đá nghiền và cát thạch anh tương ứng là 60%, 70%, 82%. Kết quả nghiên cứu đã chế tạo được UHPC với cường độ nén của mẫu đạt 130 - 150 MPa, cường độ chịu kéo khi uốn đạt 12 - 29 Mpa và cường độ chịu kéo trực tiếp đạt 7 - 8 MPa.

Từ đó, bài báo này trình bày chế tạo bê tông cường độ cao và siêu cao với thành phần cốt liệu từ các loại cát nghiền khác nhau. Trên cơ sở đó, nghiên cứu một số tính năng như độ chảy xè, cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo trực tiếp, cường độ chịu kéo uốn, module đàn hồi và hệ số Poisson. Vật liệu cát nghiền Hùng Vương, cát nghiền Phước Hòa Fico, cát nghiền An Bình và cát nghiền Tân Cang 8 có cấp phối hạt nằm trong miền cát hạt thô theo tiêu chuẩn TCVN 9205:2012-Cát nghiền cho bê tông và vữa [2], các loại cát nghiền khác vượt ra khỏi đường bao của tiêu chuẩn trên. Nguồn gốc vật liệu được thể hiện như Bảng 1.

**Bảng 1.** Nguồn gốc các mẫu cát nghiền.

Loại cát	Nguồn gốc	Ký hiệu
Cát thạch anh Cam Ranh	Cam Ranh, Khánh Hòa	QSCR
Cát nghiền Hùng Vương	Đông Xoài, Bình Phước	CSHV
Cát nghiền Phước Hòa Fico	Phú Mỹ, Bà Rịa-Vũng Tàu	CSFC
Cát nghiền Tân Cang 8	Tân Cang, Đồng Nai	CSTC
Cát nghiền Antraco	Tri Ôn, An Giang	CSAG
Cát nghiền An Bình	Phú Giáo, Bình Dương	CSPG
Cát nghiền Phước Hòa	Long Thành, Đồng Nai	CSLT
Cát nghiền Thăng Long	Pleiku, Gia Lai	CSTL
Cát nghiền Núi Tào	Núi Tào, Bình Thuận	CSNT

## 2. Vật liệu thành phần

Trong nghiên cứu này, hỗn hợp bê tông được chế tạo từ các vật liệu thành phần điển hình bao gồm: Xi măng, silica fume, cát nghiền, cát

thạch anh, bột cát thạch anh, phụ gia siêu dẻo, như trình bày trong Bảng 2. Sau đó, tiến hành phân tích cát thạch anh và cát nghiền được kết quả như Bảng 3.

**Bảng 2.** Thành phần nguyên vật liệu.

STT	Nguyên vật liệu	Ký hiệu	Kích cỡ hạt	Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )
1	Xi măng PC 50	C	1-75 $\mu$ m	3050
2	Silica fume	SF	0,05-1 $\mu$ m	2220
3	Bột cát thạch anh	QP	1-100 $\mu$ m	2630
4	Cát nghiền	CS	0,14-5 mm	2668
5	Cát thạch anh	QS	0,14-1,25 mm	2650
6	Nước	W	-	1000
7	Phụ gia siêu dẻo	AD	-	1100

**Bảng 3.** Hàm lượng lọt sàng của cát nghiền.

	Cốt liệu							
	CSHV	CSFC	CSTC	CSAG	CSPG	CSLT	CSTL	CSNT
	Hàm lượng lọt sàng (%)							
> 10,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
5,0-10,0	99,70	100,00	93,60	100,00	100,00	96,70	73,30	90,62
2,5-5,0	79,98	81,30	64,90	73,00	93,63	70,80	48,80	64,13
1,25-2,5	62,35	55,40	45,10	50,60	81,48	50,90	35,60	41,96
0,63-1,25	46,91	34,50	25,40	32,30	47,24	28,60	26,80	30,24
0,315-0,63	33,47	18,70	11,70	16,50	19,13	11,00	19,20	18,19
0,14-0,315	16,93	7,90	5,50	5,70	7,04	3,60	13,90	13,68
< 0,14	-	-	-	-	-	7,70	7,68	7,68
	Module							
	2,60	3,00	3,47	3,22	2,52	3,35	3,02	3,32

**Bảng 4.** Các tính chất cơ lý của QS và các loại CS.

Loại cát	Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	Hệ số lèn chặt	Độ hút nước (%)	Hàm lượng SiO <sub>2</sub> (%)
CSHV	2,668	0,626	0,8	61,5
CSFC	2,630	0,612	0,8	73,2
SCTC	2,762	0,612	0,7	74,3
SCAG	2,686	0,601	0,8	59,1
CSPG	2,652	0,618	0,8	67,4

Loại cát	Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	Hệ số lèn chặt	Độ hút nước (%)	Hàm lượng SiO <sub>2</sub> (%)
CSLT	2,621	0,609	0,7	61,1
CSTL	2,836	0,499	0,8	72,1
CSNT	2,733	0,514	0,9	69,3

### 3. Cấp phối đánh giá

Nhóm nghiên cứu đã dựa trên nền cấp phối tiên tiến thế giới, cụ thể là các cấp phối hạt mịn M3Q [10], kết hợp quá trình thử nghiệm thăm dò trong phòng thí nghiệm với cốt liệu là cát nghiền khu vực Đông Nam Bộ và các vật liệu địa phương khác tại Việt Nam để lựa chọn được

cấp phối phù hợp cho nghiên cứu thực nghiệm. Nhóm tác giả đã lựa chọn cấp phối đối chứng như Bảng 5. Các tỷ lệ  $\frac{W}{C}$ ,  $\frac{AD}{C}$  và  $\frac{Agg}{C}$  trong cấp phối tương ứng là 0,238%, 2,2% và 1,1%. Trong đó, CS là hệ một cấu tử cát nghiền khu vực Tây Nguyên, Đông Nam Bộ và Đồng bằng sông Cửu Long (Bảng 1).

**Bảng 5.** 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 $\mu$ m	850
2	Silicafume	kg	0,05-1 $\mu$ m	170
3	Bột cát thạch anh	kg	1-100 $\mu$ m	200
5	Nước	kg		202
6	Sợi thép	kg		78,5
7	Phụ gia siêu dẻo	kg		18,7
8	CS	kg	0,14-5 mm	946

### 4. Thử nghiệm các tính năng của bê tông HSC và UHPC trên nền cấp phối đánh giá

#### 4.1. Công tác đổ, bảo dưỡng và gia công mẫu

Thiết bị trộn là máy trộn cưỡng bức 04 cấp độ tại phòng thí nghiệm như Hình 1. Quy trình trộn bê tông như sau:

Bước 1: Cho hỗn hợp bột gồm xi măng, cát nghiền và silica fume vào cối trộn, 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 đến 3 phút, xem trạng thái của hỗn hợp để điều chỉnh lượng phụ gia và nước còn lại cho

đến khi hỗn hợp chảy dẻo. Tăng tốc lên số 2, 3 khi đã cho hết phụ gia và nước.

Bước 4: Cho tiếp CS 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.

Khuôn trụ trước khi đổ phải được vệ sinh, bôi lớp chống dính bám, kín khít 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 trong môi trường tự nhiên 24 giờ. Sau đó, các mẫu tiếp tục được bảo

đưỡng nhiệt ẩm ở điều kiện nhiệt độ  $80^{\circ}\text{C}$  và bảo hòa ẩm trong 48 giờ tiếp theo, cuối cùng, ngâm mẫu đến thời điểm cần nén. Khuôn trụ 10 x 20 cm và công tác đổ mẫu chịu nén vào các khuôn trụ như Hình 2. Sau bảo dưỡng, tiến hành mài phẳng mẫu bằng máy mài chuyên dụng như Hình 3. Cường độ chịu nén của bê tông được thí

nghiệm trên mẫu trụ có đường kính ( $D$ ) là 100 mm và chiều cao mẫu ( $H$ ) là 200 mm, được ký hiệu  $D100\text{ mm} \times H200\text{ mm}$  theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M [11]. Bộ mẫu sau khi bảo dưỡng và mài phẳng bề mặt tiến hành thí nghiệm xác định cường độ chịu nén.



**Hình 1.** Thiết bị trộn cường bức 04 cấp độ tại phòng thí nghiệm.



(a) Khuôn trụ 10 x 20.



(b) Quá trình đổ bê tông.

**Hình 2.** Công tác đổ mẫu trụ.



(a) Công tác mài mẫu.



(b) Mẫu 10 x 20 sau khi mài phẳng.

**Hình 3.** Mài phẳng mẫu trụ bê tông.

#### 4.2. Độ chảy xòe

Độ chảy là yếu tố cơ bản cho tính công tác của hỗn hợp bê tông. Độ chảy càng cao, hỗn hợp bê tông càng nhanh chóng lấp đầy khuôn, do đó, có thể sử dụng cho các kết cấu mỏng hoặc kết cấu có hình dạng phức tạp. Độ chảy xòe được thực hiện với hai loại thiết bị: Phễu hình côn C230 và phễu hình côn cao. Công tác thử nghiệm được thực hiện: Sau khi bê tông được trộn hoàn tất, tiến hành cho hỗn hợp bê tông vào phễu để đo độ chảy

xòe như Hình 4. Kết quả độ chảy xòe đo được với cấp phối đánh giá các loại CS khác nhau như Bảng 6. Trong đó, độ chảy xòe của bê tông biến thiên từ đường kính 227 - 255 mm (côn C230) và 665 - 722 mm (côn cao). Trong quá trình thí nghiệm, cần đảm bảo vật liệu được phân bố đồng nhất, không có các hiện tượng tách nước, phân tầng hay cốt liệu bị sa lắng. Ngoài ra, yếu tố khác như hàm lượng bọt khí cũng được xác định và trình bày tại Bảng 6.



(a) Đo độ chảy xòe (côn C230).



(b) Độ chảy xòe (côn C230).



(c) Đo độ chảy xòe (côn cao).



(d) Độ chảy xòe (côn cao).

**Hình 4.** Đo độ chảy của hỗn hợp bê tông.

**Bảng 6.** Kết quả thí nghiệm các tính chất của hỗn hợp bê tông.

Các chỉ tiêu	CSHV	CSFC	CSTC	CSAG	CSPG	CSLT	CSTL	CSNT
Độ chảy xòe (côn C230), mm	243	255	247	251	237	242	227	229
Độ chảy xòe (côn cao), mm	722	689	714	712	671	690	665	689
Hàm lượng bọt khí, %	2,6	2,3	2,5	2,6	2,6	2,7	2,4	2,5

#### 4.3. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén, module đàn hồi và hệ số Poisson

Thí nghiệm nén mẫu bằng máy nén bê tông năng lực 2000 KN như Hình 5. Tốc độ nén 0,25 MPa/s, kết quả cường độ chịu nén, module đàn

hồi và hệ số Poisson thể hiện tại Bảng 7. Ký hiệu mẫu nén được chế tạo từ các loại CS thuộc các mỏ với nguồn gốc khác nhau được lấy từ Bảng 1.



(a) Bộ mẫu thí nghiệm.



(b) Thí nghiệm xác định đường cong ứng suất nén-biến dạng.

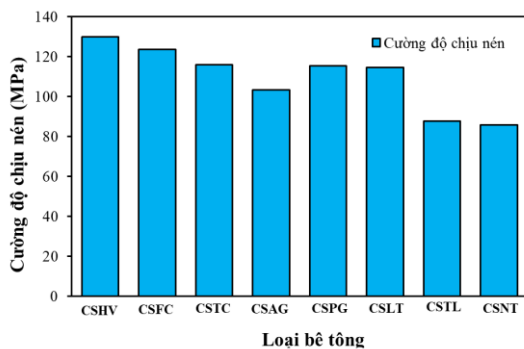
**Hình 5.** Thí nghiệm nén mẫu.**Bảng 7.** Kết quả cường độ chịu nén, module đàn hồi và hệ số Poisson.

Tên mẫu	$V_f$ (%)	Tuổi bê tông (ngày)	Cường độ chịu nén (MPa)			Module đàn hồi (GPa)			Hệ số Poisson		
			$R_{28}$	$R_{tb}$	$S_3$	$E$	$E_{tb}$	$S$	$\nu$	$\nu_b$	$S$
CSHV-1	1	28	127,53			41,59			0,1611		
CSHV-2	1	28	124,07			41,38			0,1954		
CSHV-3	1	28	119,21	129,98	8,08	38,51	41,27	1,47	0,1816	0,1871	0,018
CSHV-4	1	28	131,96			42,92			0,1744		
CSHV-5	1	28	141,64			41,34			0,2100		
CSHV-6	1	28	135,45			41,87			0,2000		
CSFC-1	1	28	127,53			45,01			0,1613		
CSFC-2	1	28	124,07	123,60	4,18	47,01	46,01	1,00	0,1956	0,1796	0,017
CSFC-3	1	28	119,21			46,01			0,1818		
CSTC-1	1	28	112,36			40,00			0,1855		
CSTC-2	1	28	114,49	115,90	6,50	42,32	42,08	1,42	0,1762	0,1787	0,013
CSTC-3	1	28	111,30			43,01			0,1617		
CSTC-4	1	28	125,44			43,01			0,1914		
CSAG-1	1	28	94,32			38,20			0,1931		
CSAG-2	1	28	104,04	103,36	8,72	39,32	39,84	1,95	0,1914	0,1870	0,009
CSAG-3	1	28	111,72			42,01			0,1764		
CSPG-1	1	28	115,56			41,01			0,2134		
CSPG-2	1	28	129,96	115,31	14,77	44,21	41,09	3,08	0,1669	0,1820	0,027
CSPG-4	1	28	100,42			38,04			0,1656		
CSLT-1	1	28	114,49			39,00			0,1803		
CSLT-2	1	28	118,81	114,52	4,28	42,64	41,13	1,89	0,2136	0,1974	0,017
CSLT-3	1	28	110,25			41,75			0,1982		
CSTL-1	1	28	91,01	87,84	14,78	38,00	37,32	3,88	0,2114	0,1947	0,014
CSTL-2	1	28	97,02			39,00			0,1914		

Tên mẫu	$V_f$ (%)	Tuổi bê tông (ngày)	Cường độ chịu nén (MPa)			Module đàn hồi (GPa)			Hệ số Poisson		
			$R_{28}$	$R_{tb}$	$S_3$	$E$	$E_{tb}$	$S$	$\nu$	$\nu_b$	$S$
CSTL-4	1	28	66,10			31,72			0,1983		
CSTL-5	1	28	97,22			40,54			0,1777		
CSNT-1	1	28	95,06			40,21			0,1836		
CSNT-2	1	28	92,16			39,00			0,1852		
CSNT-3	1	28	97,79	85,85	11,81	38,58	36,65	3,28	0,1748	0,1813	0,004
CSNT-4	1	28	69,56			31,60			0,1782		
CSNT-5	1	28	73,10			34,17			0,1822		
CSNT-6	1	28	87,42			36,32			0,1839		

### Cường độ chịu nén

Cường độ chịu nén của bê tông với cốt liệu CS từ các mỏ khác nhau được thể hiện như Hình 6. Cường độ chịu nén trung bình của các loại bê tông được thể hiện như Bảng 7 và Hình 6. Phân tích kết quả cho thấy, cốt liệu CSHV và CSFC có thể chế tạo UHPC với cường độ chịu nén trên 120 MPa. Các loại cốt liệu CS khác chế tạo được HSC với cường độ từ 85 đến 115 MPa. Như vậy, bê tông từ cốt liệu CSHV và CSFC đạt được cường độ chịu nén cao hơn bê tông từ các loại CS khác, điều này được lý giải là do những ưu điểm về hình dạng hạt, tính chất bề mặt, đồng thời, loại CS này có thành phần cấp phối hạt nằm hoàn toàn trong miền cát hạt thô theo tiêu chuẩn [2].



Hình 6. Biểu đồ cường độ chịu nén trung bình của các loại bê tông.

### Module đàn hồi

Module đàn hồi được xác định thông qua đường cong nén - biến dạng đứng của bê tông và được tính theo công thức sau:

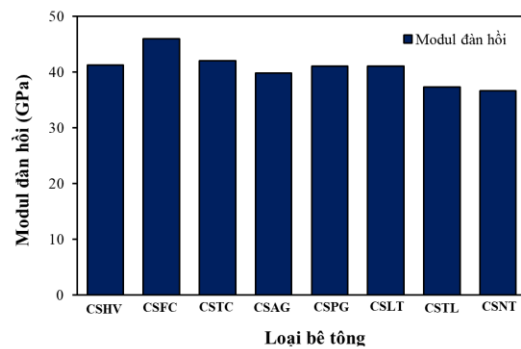
$$E_c = \frac{f_2 - f_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (1)$$

Trong đó:

$f_2$  là ứng suất khi đạt 40% ứng suất nén cực đại;

$f_1$  là ứng suất tại biến dạng 0,00005;

$\varepsilon_2$  là biến dạng tương đối ứng với  $f_2$ .



Hình 7. Biểu đồ module đàn hồi trung bình của các loại bê tông.

Biểu đồ module đàn hồi trung bình của các loại bê tông được thể hiện như Bảng 7 và Hình 7. Kết quả cho thấy, các loại cốt liệu CSHV, CSFC, CSTC, CSPG, CSLT có thể chế tạo bê tông với module đàn hồi từ 41,09 đến 46,01 GPa. Các loại cốt liệu khác như CSAG, CSTL, CSNT khi chế tạo bê tông cho module đàn hồi nhỏ hơn 40 GPa.

### Hệ số Poisson

Hệ số Poisson được xác định thông qua đường cong nén - biến dạng đứng và biến dạng chu vi của bê tông, được tính theo công thức sau:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{c,30} - \varepsilon_{c,10}}{\varepsilon_{a,30} - \varepsilon_{a,10}} \quad (2)$$

Trong đó:

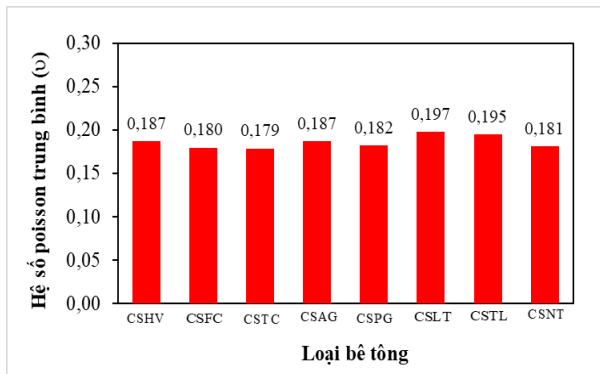
$\varepsilon_{c,30}$  là biến dạng chu vi tại 30% ứng suất nén cực đại;

$\varepsilon_{c,10}$  là biến dạng chu vi tại 10% ứng suất nén cực đại;

$\varepsilon_{a,30}$  là biến dạng đứng tại 30% ứng suất nén cực đại;

$\varepsilon_{a,10}$  là biến dạng đứng tại 10% ứng suất nén cực đại.

Giá trị hệ số Poisson trung bình ứng với từng loại bê tông được thể hiện như Hình 8. Biểu đồ hệ số Poisson trung bình của các loại bê tông được trình bày tại Bảng 7 và Hình 8. Kết quả cho thấy, có rất ít tương quan giữa hệ số Poisson trung bình và loại cốt liệu cát nghiền chế tạo bê tông, hệ số Poisson biến thiên từ 0,179 đến 0,197.



**Hình 8.** Hệ số Poisson trung bình của các loại bê tông.

**Bảng 8.** Cường độ chịu kéo của bê tông sau bảo dưỡng nhiệt ẩm.

STT	Nhóm mẫu	$V_f$ (%)	Tuổi bê tông (ngày)	Cường độ kéo trung bình (MPa)
1	CSHV	1	28	7,87
2	CSFC	1	28	7,25
3	CSTC	1	28	7,1
4	CSAG	1	28	7,08
5	CSPG	1	28	7,12
6	CSLT	1	28	7,11
7	CSTL	1	28	6,82
8	CSNT	1	28	6,65

#### 4.4. Cường độ chịu kéo trực tiếp

Thí nghiệm kéo mẫu bằng máy kéo dọc trục như Hình 9, 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. Mặt bên của mẫu được gắn thiết bị cảm biến đo chuyển vị LVDT (Linear Variable Differential Transformer) để đo biến dạng dọc theo chiều dài mẫu. Các giá trị đo được ghi lại tự động bằng máy tính. Kết quả thí nghiệm như Bảng 8.

Phân tích mặt cắt phá hoại như trên Hình 9 cho thấy, sự phân bố sợi thép có ảnh hưởng đáng kể đến cường độ chịu kéo, sự phân bố vết nứt và hình dạng vết nứt. Trong quá trình đổ mẫu, bê tông được đổ thành từng lớp mỏng khoảng 10 mm để tránh hiện tượng sa lắng sợi thép. Từ kết quả cường độ chịu kéo trực tiếp trung bình của các loại bê tông được thể hiện như Bảng 8 cho thấy, các cốt liệu CSTL và CSNT khi chế tạo bê tông cho cường độ nhỏ hơn 7 MPa, các loại cốt liệu CS khác có thể chế tạo bê tông với cường độ chịu kéo trực tiếp từ 7,08 đến 7,87 MPa. Như vậy, bê tông được chế tạo từ cốt liệu CSTL và CSNT có cường độ chịu kéo trực tiếp thấp hơn bê tông từ các loại CS khác, điều này, được lý giải là do những bất lợi về hình dạng và tính chất bề mặt hạt, đồng thời, với loại CS này, đường cấp phối hạt nằm ngoài miền cát hạt thô theo tiêu chuẩn [2].



(a) Lắp đặt mẫu và LVDT.



(b) Bộ thiết bị đo ứng suất - biến dạng.



(c) Hình dạng và vị trí vết nứt.



(d) Phân bố sợi thép trên mặt phá hoại.

**Hình 9.** Thí nghiệm kéo trực tiếp.

#### 4.5. Cường độ chịu uốn

Thí nghiệm uốn được thực hiện theo hướng dẫn của ASTM C78/C78M-18 [12]. 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. Với mẫu đạt 28 ngày tuổi, tiến hành thí nghiệm theo mô hình uốn ba điểm trên máy kéo/nén thủy lực như Hình 9. Kết quả thí nghiệm được trình bày tại Bảng 9.



(a) Mẫu uốn sau bảo dưỡng nhiệt ẩm.



(b) Thí nghiệm uốn.

**Hình 10.** Thí nghiệm uốn dầm.

**Bảng 9.** Cường độ chịu kéo uốn của bê tông sau bảo dưỡng nhiệt ẩm.

STT	Nhóm mẫu	$V_f(\%)$	Tuổi bê tông (ngày)	Cường độ uốn trung bình (MPa)
1	CSHV	1	28	15,92
2	CSFC	1	28	16,73
3	CSTC	1	28	14,29
4	CSAG	1	28	13,67
5	CSPG	1	28	15,65
6	CSLT	1	28	14,33
7	CSTL	1	28	13,12
8	CSNT	1	28	13,92

Từ kết quả thể hiện như Bảng 9 cho thấy, cường độ chịu kéo uốn của bê tông có cốt liệu từ các loại CS khác nhau biến thiên từ 13,12 đến 16,73 MPa. Trong đó, cường độ nhỏ nhất là khi bê tông sử dụng cốt liệu CSTL và CSNT, điều này được lý giải vì sự bất lợi về thành phần cấp phối, độ cứng, hình dạng và tính chất bề mặt của hạt so với các loại cát nghiền khác.

## 5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, CSHV, CSFC, CSPG và CSLT có thành phần hạt phù hợp với tiêu chuẩn hướng dẫn TCVN 9205:2012: Cát nghiền cho bê tông và vữa [2]. Các loại cát nghiền khác có cấp phối hạt và module độ lớn, vượt ra ngoài phạm vi các tiêu chuẩn trên.

Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ bê tông sử dụng cốt liệu CSHV, CSFC có thể chế tạo được UHPC với cường độ từ 124 đến 130 MPa. Khi sử dụng cốt liệu là CSPG, CSLT hay CSTC có thể chế tạo HSC với cường độ chịu nén đạt 115 MPa. Đối với các loại CS khác có thể chế tạo HSC với cường độ trung bình đạt từ 86 đến 103 MPa. Đồng thời, các mẫu cho cường độ kéo trực tiếp đạt từ 6,5 đến 7,9 MPa, cường độ chịu uốn từ 12 đến 16 MPa, module đàn hồi từ 36 đến 51 GPa, hệ số Poisson biến thiên trong khoảng 0,179 đến 0,197. Thành phần cấp phối hạt, đặc tính hình dạng, tính chất bề mặt hay cấu trúc các hạt của CSHV, CSFC, CSPG, CSLT và CSTC có ảnh hưởng quan trọng đến sự liên kết

của pha hồ với cốt liệu, vùng chuyển tiếp ITZ được cải thiện đáng kể, dẫn đến sự gia tăng cường độ của bê tông.

Như vậy, mỗi mỏ đá khác nhau sẽ cung cấp sản phẩm CS với những đặc tính riêng biệt, khi sử dụng làm cốt liệu trên nền cấp phối đánh giá có thể chế tạo bê tông cường độ cao hay bê tông siêu tính năng cao. Tuy nhiên, để hiểu rõ hơn các tính năng của bê tông sử dụng cốt liệu cát nghiền cần tiếp tục mở rộng nghiên cứu với cốt liệu từ những mỏ đá ở các địa phương khác nhau với những chủng loại đá gốc đa dạng. Khi phạm vi nghiên cứu càng mở rộng, góc nhìn về tính năng của bê tông càng toàn diện hơn, kết quả nghiên cứu là tiền đề để tiếp tục nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi HSC và UHPC vào thực tế xây dựng.

## Tài liệu tham khảo

- [1] C. Magureanu, I. Sosa, C. Negrutiu, and B. Heghes, "Mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete," *ACI Mater. J.* vol. 109, no. 2, pp. 177-184, Mar. 2012.
- [2] *Cát nghiền cho bê tông và vữa*, TCVN-9205:2012, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, Việt Nam, 2012.
- [3] P. C. Aitcin, S. Mindess, "High-performance concrete: science and applications," *Materials Science of Concrete V*, The American Society Ceramic in J. Skalny, S. Mindess, Eds., Westerville, 1998, pp. 477 – 511.

- [4] P. C. Aitcin and P. K. Mehta, "Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 87, no. 2, pp. 103 – 107, 1990, doi: 10.14359/1882.
- [5] P. Haleerattanawattana và E. Limsuwan, "Strength-based gradation of coarse aggregates of ultra-high-strength concrete," in *Proc. Int. Symp. UHPC*, Kassel, Germany, Sep. 2004, pp. 239-249.
- [6] T. Teichmann and M. Schmidt, "Influence of the packing density of fine particles on structure, strength, and durability of UHPC," in *Proc. Int. Symp. UHPC*, Kassel, Germany, Sep. 2004, pp. 313–323.
- [7] J. Ma, M. Orgass, F. Dehn, D. Schmidt, N. V. Tue, "Comparative investigation on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates," in *Proc. Int. Symp. UHPC*, Kassel, Germany, 2004, pp. 205-212.
- [8] B. D. Vinh, "Behaviour of steel-concrete composite beams made of ultra high performance concrete", Ph.D. dissertation, Leipzig Uni., Sachsen, Germany, 2010.
- [9] V. T. H. Chu, V. D. Bui, and T. V. Nguyen, "Effect of combining the aggregate grading with cementitious composition on mechanical properties of ultra - high performance concrete," *Buildings*, vol. 13, no. 1, 2023, Art. no. 248, doi: 10.3390/buildings13010248.
- [10] Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; and Thiemicke, J. (2015); "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.
- [11] *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, ASTM C39/C39M-01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2012.
- [12] *Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading)*, ASTM C78/C78M-18ASTM, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2018.