



# NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO SỬ DỤNG SILICA FUME VÀ XỈ LÒ CAO HẠT HÓA NGHIÊN MỊN Ở VIỆT NAM

Nguyễn Công Thắng<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Thắng<sup>2</sup>, Phạm Hữu Hanh<sup>3</sup>,  
Nguyễn Văn Tuấn<sup>4</sup>, Lê Trung Thành<sup>5</sup>, Nguyễn Trọng Lâm<sup>6</sup>

**Tóm tắt:** Bê tông chất lượng siêu cao (BTCLSC) được coi là một trong những sản phẩm mang tính bước ngoặt trong công nghệ bê tông với các đặc tính rất tốt như độ chảy cao, cường độ nén lớn hơn 150 MPa và độ bền tuyệt vời. Để chế tạo bê tông này thông thường phải sử dụng một lượng lớn xi măng, khoảng 900-1000 kg/m<sup>3</sup>. Điều này gây ra sự bất lợi theo quan điểm phát triển bền vững, và một trong những giải pháp cho vấn đề này là sử dụng các phụ gia khoáng thay thế xi măng. Bài báo này trình bày những kết quả nghiên cứu ban đầu về việc sử dụng phối hợp silica fume và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn có sẵn ở Việt Nam để chế tạo BTCLSC. Kết quả chỉ ra rằng việc sử dụng tổ hợp này đã cải thiện cả tính công tác và cường độ nén của BTCLSC. Thêm vào đó, tổng hàm lượng xi măng được thay thế bằng hỗn hợp này có thể đạt đến 55% (tính theo tổng khối lượng chất kết dính). Đây là một kết quả rất quan trọng đối với sự phát triển bền vững của loại bê tông này trong thực tế.

**Từ khóa:** Bê tông chất lượng siêu cao, silica fume, xỉ lò cao hạt hóa.

**Abstract:** Ultra-High Performance Concrete (UHPC) is considered to be one of major breakthroughs in concrete technology with superior qualities, i.e. high fluidity, over 150MPa compressive strength and excellent durability. To produce this concrete, a very high amount of cement, about 900-1000 kg/m<sup>3</sup>, is commonly used, that causes some disadvantages in the view of sustainable development. Using mineral admixtures to replace cement in UHPC composition is one of good ways to overcome this problem. This paper presents the preliminary results of using a combination of Silica fume and Ground Granulated Blast-furnace Slag available in Vietnam as a cement replacement in making UHPC. The results showed that this combination improved both the workability and compressive strength of UHPC. Additionally, a maximum total amount of cement of 60% by weight can be replaced by this combination to produce UHPC. This is very promising for the sustainable development in concrete production industry.

**Keywords:** Ultra-high performance concrete, silica fume, Ground Granulated Blast-furnace Slag.

Nhận ngày 20/2/2013, chỉnh sửa ngày 21/3/2013, chấp nhận đăng 30/3/2013



## 1. Giới thiệu

Bê tông chất lượng siêu cao (BTCLSC) được coi là một sản phẩm mang tính bước ngoặt của sự phát triển mới đối với công nghệ xây dựng nói chung và công nghệ bê tông nói riêng. Loại bê tông này đã được nghiên cứu từ đầu những năm 90 của thế kỷ 20 ở Pháp và Canada [1], với các đặc tính vượt trội so với bê tông thường như có tỷ lệ N/CKD rất thấp, thường nhỏ hơn 0.25, có cường độ nén rất cao (thường

<sup>1</sup>NCS, Khoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng. E-mail: keulas115@gmail.com

<sup>2</sup>KS, Khoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

<sup>3</sup>PGS. TS, Khoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

<sup>4</sup>TS, Khoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

<sup>5</sup>TS, Bộ Xây dựng.

<sup>6</sup>ThS, Khoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

lớn hơn 150 MPa), cường độ uốn lớn (khi sử dụng cốt sợi) 15-40 MPa, mô đun đàn hồi cao từ 50-60 GPa, độ thấm thấp và độ bền rất cao [2]. Ở Việt Nam, loại bê tông này được coi là khá mới (từ 2006) và đến nay chỉ có một vài đề tài tìm hiểu và nghiên cứu chính thức [3- 5].

Vật liệu để chế tạo BTCLSC thông thường bao gồm cát quắc với kích thước khoảng 100-600µm, xi măng, silica fume, nước và phụ gia siêu dẻo. Trong đó, lượng xi măng khoảng 900-1000kg/m<sup>3</sup> [6] và đây là nhược điểm lớn nhất của loại bê tông này bởi vì sẽ làm tăng giá thành của sản phẩm và ảnh hưởng bất lợi đến tính chất kỹ thuật cũng như về môi trường. Do đó, việc tìm kiếm các phụ gia khoáng khác thay thế xi măng đồng thời vẫn đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật là rất cần thiết.

Trong số các phụ gia khoáng hoạt tính thì xi lò cao hạt hóa nghiền mịn (BFS) được cho là vật liệu có triển vọng để thay thế xi măng trong BTCLSC [7, 8]. Đây là thải phẩm của quá trình luyện gang trong lò cao, thành phần khoáng chủ yếu là pha thủy tinh (trên 95%), thành phần khoáng này có khả năng phản ứng với Ca(OH)<sub>2</sub> sinh ra trong quá trình thủy hóa của xi măng tạo thành các sản phẩm C-S-H có cấu trúc đặc chắc hơn [8, 9]. Tuy nhiên, khi sử dụng BFS với hàm lượng lớn sẽ gây ra hiện tượng tách nước [8]. Do đó, BFS có thể sử dụng kết hợp với silica fume (SF) sẽ hạn chế nhược điểm này vì SF có bề mặt riêng rất lớn. Bên cạnh đó SF còn có tác dụng cải thiện độ đặc chắc và tăng cường độ của bê tông... [10]. Việc sử dụng kết hợp giữa 2 loại phụ gia khoáng này không những cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông, mà còn làm tăng đáng kể cường độ và độ bền lâu của bê tông. Đây là một trong những giải pháp làm tăng hiệu quả về kinh tế, kỹ thuật và môi trường.

Bài báo này trình bày những kết quả thí nghiệm ban đầu về sự ảnh hưởng của việc dùng tổ hợp BFS kết hợp với SF sẵn có ở Việt Nam đến tính công tác và cường độ nén, uốn của BTCLSC, trong đó có xét đến ảnh hưởng của điều kiện dưỡng hộ nhiệt ẩm đến cường độ nén của BTCLSC.

## 2. Vật liệu chế tạo và phương pháp nghiên cứu

### 2.1 Vật liệu chế tạo

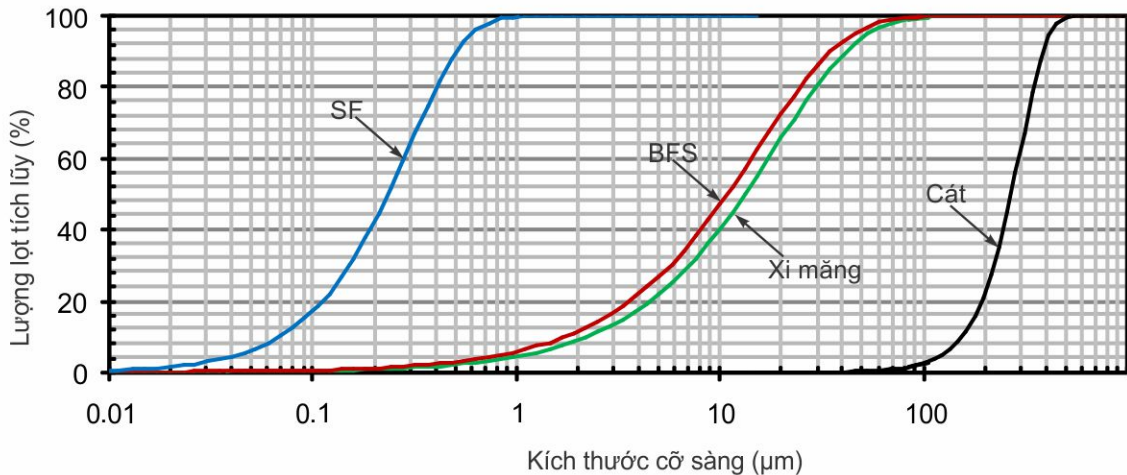
Vật liệu được dùng trong nghiên cứu gồm: xi măng Pooclăng Sông Gianh PC40 có các tính chất cơ lý trình bày ở bảng 1, với đường kính hạt trung bình khoảng 14µm; SF dạng hạt rời của hãng Elkem, có đường kính hạt trung bình khoảng 0.15µm, hàm lượng SiO<sub>2</sub> là 92.3%, chỉ số hoạt tính với xi măng là 113.5%; cốt liệu là cát quắc có đường kính cỡ hạt trung bình khoảng 315µm, độ rỗng khi chưa lèn chặt 45.1%; phụ gia siêu dẻo (PGSD) sử dụng của hãng BASF có gốc polycarboxylate, với hàm lượng chất khô 30%.

Xi lò cao hạt hóa Thái Nguyên, được nghiền mịn với đường kính cỡ hạt trung bình khoảng 12.5µm, hàm lượng các oxit (SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) khoảng 46.2%, chỉ số hoạt tính với xi măng là 107.0%.

Thành phần hạt của các vật liệu này được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ laze, kết quả thể hiện ở hình 1.

**Bảng 1.** Tính chất cơ lý của xi măng

Tính chất	Đơn vị	Giá trị	Quy phạm	Phương pháp thí nghiệm
Độ mịn				
Lượng sót sàng 0.09m m	%	2.1	≤ 10	TCVN 4030 -2003
Độ mịn Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3380	≥ 2800	
Độ dẻo tiêu chuẩn	%	29.0	-	TCVN 6017 -1985
Giới hạn bền nén				
Sau 3 ngày	MPa	26.4	≥ 21.0	TCVN 6016 -1995
Sau 28 ngày		49.6	≥ 40.0	



Hình 1. Thành phần hạt của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

## 2.2 Phương pháp thực nghiệm

Tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định bằng thí nghiệm độ chảy của côn nhỏ theo tiêu chuẩn của Anh BS 4551-1:1998. Giá trị độ chảy loang của các hỗn hợp bê tông trong nghiên cứu này được điều chỉnh trong khoảng 210-230mm.

Trong bê tông chất lượng siêu cao, việc xác định cường độ nén theo tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN3118-1993) là rất khó bởi vì cường độ nén của bê tông rất cao. Một số nghiên cứu [7, 11], đã khẳng định rằng, ảnh hưởng của kích thước khuôn đến cường độ nén của bê tông chất lượng siêu cao là không đáng kể do sự đồng nhất cao về cấu tạo của loại bê tông này. Do vậy, trong nghiên cứu này cường độ nén của bê tông được xác định với mẫu có kích thước 50× 50× 50 mm<sup>3</sup>.

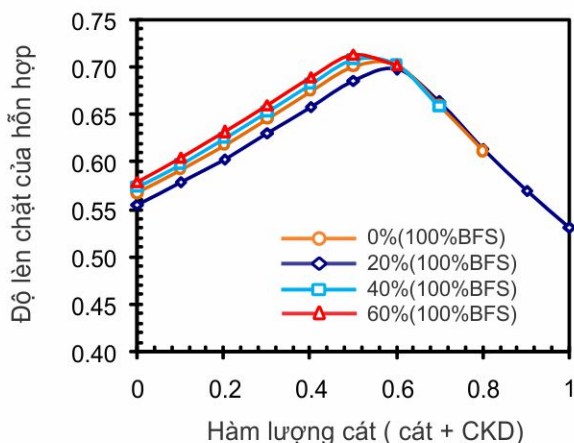


## 3. Thiết kế thành phần và quy trình thí nghiệm bê tông chất lượng siêu cao

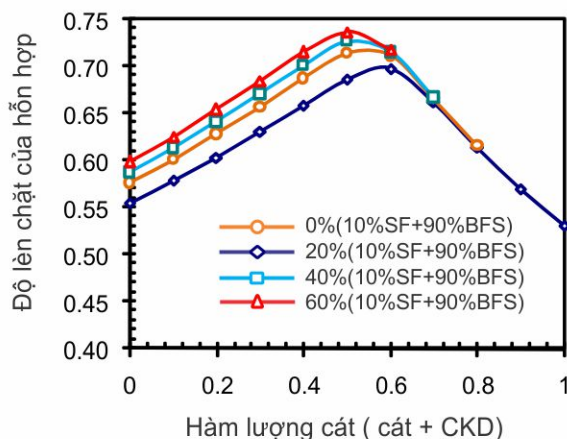
Việc thiết kế thành phần BTCLSC được thực hiện qua 2 bước: (1) thiết kế tối ưu thành phần hạt cốt liệu, và (2) thiết kế cấp phối BTCLSC.

### 3.1 Thiết kế thành phần hạt cốt liệu

Tối ưu hóa thành phần hạt là một trong những khâu then chốt của việc thiết kế cấp phối hỗn hợp BTCLSC. Trong nghiên cứu này, tối ưu hóa thành phần hạt được tính toán theo lý thuyết do De Larrard và Sedran đề xuất [12, 13]. Phương pháp này xác định trên cơ sở thành phần hạt của các vật liệu, qua lượng sàng tích lũy của mỗi cấp hạt, tương ứng với các loại vật liệu, từ đó xác định mức độ lèn chặt lớn nhất của hỗn hợp hạt thông qua các công thức tính toán và hệ số lèn chặt hỗn hợp để chuyển đổi từ mô hình lý thuyết sang mô hình thực tế. Ở nghiên cứu này trong đó hệ số lèn chặt chuyển đổi của hỗn hợp hạt được lấy là 12.5 theo đề xuất của Jones, M. và các cộng sự [14]. Đối với hệ hỗn hợp hạt gồm cát - xi măng - BFS - SF, lượng SF được cố định là 10% khối lượng chất kết dính (CKD), lượng BFS sẽ thay thế lượng dùng xi măng tương ứng (từ 0-60%). Khi đó CKD sẽ bao gồm xi măng, SF và BFS. Như vậy, thành phần hạt ở đây được xem xét như là hệ hai cấu tử gồm cát và CKD. Quan hệ giữa độ lèn chặt của hỗn hợp với tỷ lệ của vật liệu thành phần được thể hiện ở (hình 2-3). Như vậy, dựa trên kết quả tính toán thì lượng tối ưu được xác định với tỷ lệ Cát/(Cát + CKD) là 0.50. Tỷ lệ phối hợp giữa 3 cấu tử lúc đó sẽ là 50% cát + 20% xi măng + 30% PGK. Trên cơ sở tỷ lệ phối hợp giữa các cấu tử, đề tài tiến hành khảo sát với lượng dùng phụ gia khoáng tương ứng với các tỷ lệ (0-30%) trong hỗn hợp (từ 0-70% khối lượng chất kết dính). Khi tỷ lệ N/CKD lấy cố định là 0.16 thì cấp phối bê tông được xác định. Bảng 2 thể hiện thành phần hỗn hợp cấp phối được sử dụng trong nghiên cứu.



Hình 2. Độ lên chặt của hỗn hợp hạt gồm các cấu tử Cát - Xi măng - BFS



Hình 3. Độ lên chặt của hỗn hợp hạt gồm các cấu tử Cát - Xi măng - BFS - SF

### 3.2. Cấp phối bê tông chất lượng siêu cao

Từ kết quả tính toán tối ưu hóa thành phần hạt này, đề tài đã xác định được tỷ lệ của vật liệu thành phần, từ đó xác định được cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu (bảng 2).

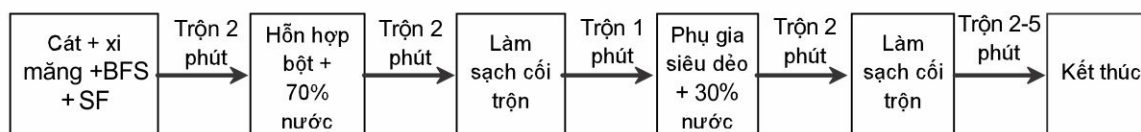
Giá trị hàm lượng PGSD sử dụng trong bảng 2 này là lượng PGSD dùng để đạt độ chảy loang của hỗn hợp bê tông trong khoảng 210-230mm như đã đề cập ở phần trên.

Bảng 2. Cấp phối BTCLSC sử dụng trong nghiên cứu

STT	Khối lượng CKD tính cho 1 m <sup>3</sup> bê tông, (kg)	N/CKD (theo khối lượng)	Cát/CKD (theo khối lượng)	SF, % (theo khối lượng của CKD)	BFS, % (theo khối lượng của CKD)	PGSD, % (theo khối lượng của CKD)
1	1170	0.16	1	0	0	1.30
2	1167	0.16	1	0	10	1.20
3	1164	0.16	1	0	20	1.10
4	1161	0.16	1	0	30	1.00
5	1155	0.16	1	0	50	0.90
6	1152	0.16	1	0	60	0.80
7	1145	0.16	1	10	20	0.80
8	1142	0.16	1	10	30	0.80
9	1139	0.16	1	10	40	0.70
10	1137	0.16	1	10	50	0.65
11	1134	0.16	1	10	60	0.60

### 3.3. Quy trình thí nghiệm

Máy trộn sử dụng trong nghiên cứu có dung tích 20 lít. Quy trình trộn hỗn hợp bê tông có thể thấy ở hình 4.



Hình 4. Quy trình trộn hỗn hợp BTCLSC

Mẫu được đúc trong khuôn có kích thước  $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$ , sau đó được dưỡng hộ ở điều kiện tiêu chuẩn ( $t = 27 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $\text{RH} > 95\%$ ) trong thời gian 24h, mẫu được tháo ra khỏi khuôn và tiếp tục dưỡng hộ trong 2 môi trường khác nhau:

- Chế độ 1: Tiếp tục dưỡng hộ trong điều kiện tiêu chuẩn.

- Chế độ 2: Dưỡng hộ 02 ngày trong điều kiện nhiệt ẩm ( $t = 90 \pm 5^\circ\text{C}$ ,  $\text{RH} = 100\%$ ) sau đó tiếp tục dưỡng hộ trong điều kiện tiêu chuẩn đến tuổi cần thí nghiệm.

Cường độ nén của bê tông được xác định ở các tuổi 3, 7, 28, 90 ngày.



## **4. Kết quả và bàn luận**

### **4.1 Tính công tác của hỗn hợp bê tông**

Lượng dùng PGSD của hỗn hợp BTCLSC để đạt được độ chảy loang từ 210 – 230mm được thể hiện ở bảng 2. Qua kết quả ta thấy, khi sử dụng BFS với hàm lượng càng tăng thì độ chảy của hỗn hợp bê tông tăng. Điều này có thể giải thích do BFS có bề mặt thủy tinh đặc chắc nên khi thay thế xi măng thì lượng nước dư tăng lên và cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông.

Xét theo khía cạnh điền đầy (hình 2-3) thì kích thước của hạt BFS tương tự như với kích thước hạt xi măng, do vậy việc dùng thêm các hạt siêu mịn như SF sẽ cải thiện được độ lèn chặt của hỗn hợp. Theo [15] thì hàm lượng SF sử dụng để chế tạo BTCLSC là 10% sẽ cải thiện tốt nhất về tính công tác cũng như về cường độ của BTCLSC. Do vậy ở nghiên cứu này, hàm lượng 10%SF được dùng cố định để khảo sát sự ảnh hưởng của tổ hợp (SF và BFS) đến các tính chất của BTCLSC.

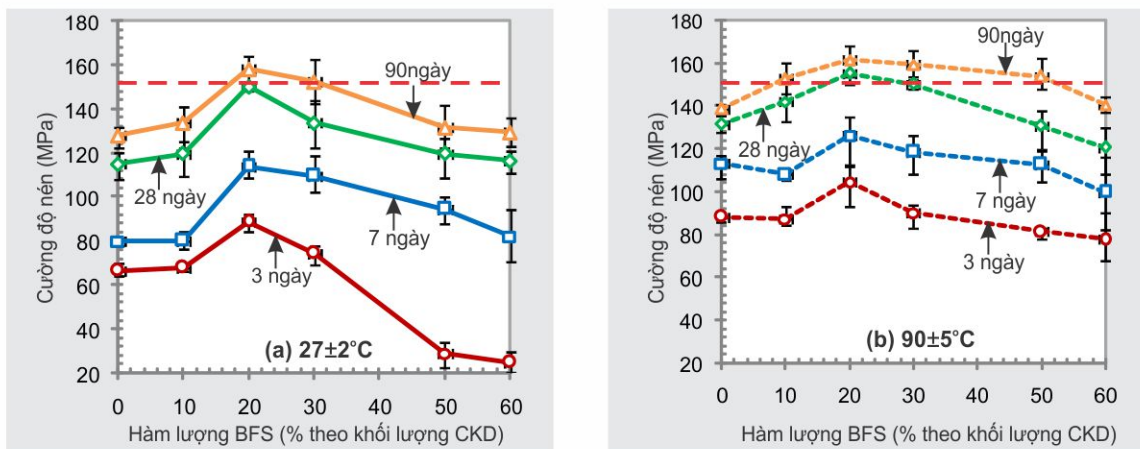
Qua kết quả nghiên cứu có thể thấy rằng khi sử dụng kết hợp giữa SF với BFS thì tính công tác của hỗn hợp bê tông được cải thiện rõ rệt, đặc biệt độ chảy của hỗn hợp khi tạo hình theo quan sát thực tế. Điều này có thể giải thích do các hạt SF dạng tròn và có tác động có lợi với hiệu ứng “ổ bi - Ball - bearing effect”. Hơn nữa các hạt SF siêu mịn sẽ chiếm chỗ của lượng nước lẽ ra nằm giữa các hạt xi măng vón tụ, làm tăng lượng nước tự do trong hồ và do đó làm tăng độ lưu động của hỗn hợp bê tông.

Từ kết quả khảo sát sự ảnh hưởng của việc dùng phụ gia khoáng BFS kết hợp với SF đến tính công tác của hỗn hợp BTCLSC, đề tài tiến hành nghiên cứu sự ảnh hưởng của tổ hợp này đến các tính chất của BTCLSC.

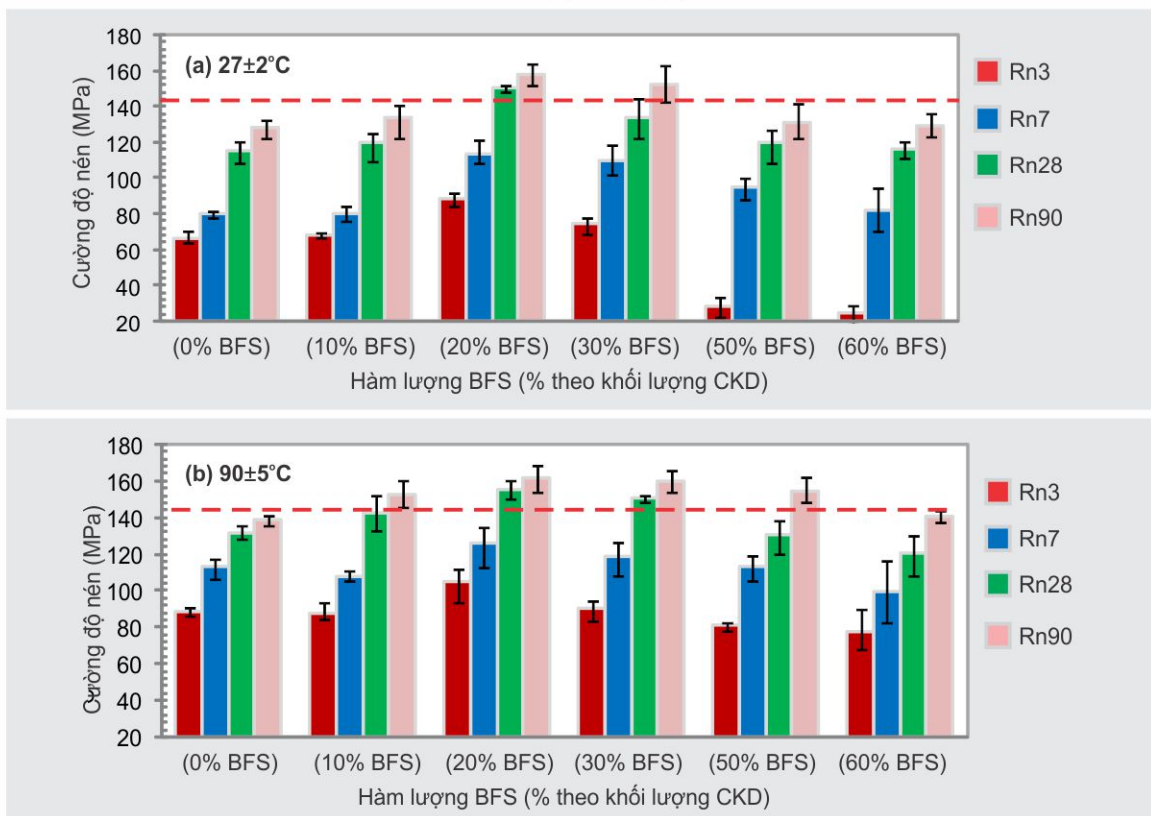
### **4.2 Ảnh hưởng của lượng dùng xi nghiền mịn đến cường độ nén của bê tông chất lượng siêu cao**

Hình 5 và hình 6 thể hiện sự ảnh hưởng của hàm lượng BFS đến cường độ nén BTCLSC. Có thể thấy ở các hàm lượng thay thế xi măng dưới 20% thì cường độ nén của BTCLSC tăng lên khi lượng dùng của BFS tăng. Sau đó thì cường độ nén của BTCLSC giảm xuống khi lượng dùng BFS tăng từ 30% đến 60%. Với các lượng dùng BFS lớn, 50-60% thì cường độ ban đầu của BTCLSC thấp ở các tuổi sớm ngay khi được bảo dưỡng ở chế độ tự nhiên, nhưng không bị ảnh hưởng nhiều khi mẫu được bảo dưỡng ở chế độ nhiệt ẩm cao (hình 6). Cường độ nén BTCLSC sử dụng 20% BFS đạt giá trị lớn nhất đối với chế độ bảo dưỡng tự nhiên và bảo dưỡng nhiệt ẩm cao tương ứng là 151MPa và 155MPa.

Nếu căn cứ vào tuổi và chế độ bảo dưỡng mẫu khác nhau thì sẽ có sự lựa chọn khác nhau trong việc sử dụng BFS. Chẳng hạn, khi thiết kế cường độ tính toán ở 28 ngày với chế độ bảo dưỡng tự nhiên thì lượng dùng BFS tối đa là 20% (hình 6), nhưng nếu thiết kế cường độ tính toán ở 90 ngày với chế độ bảo dưỡng nhiệt ẩm cao thì có thể tăng lượng dùng BFS đến 50%. Tốc độ phát triển cường độ nén của bê tông ở các tuổi khác nhau phụ thuộc vào hàm lượng BFS sử dụng. Việc tăng cường độ nén của BTCLSC khi dùng BFS ở tuổi 90 ngày với lượng dùng BFS cao (30%-60%) có thể giải thích là do khi dùng BFS, các thành phần hoạt tính của BFS có phản ứng rất chậm với  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sinh ra trong quá trình thủy hóa của xi măng, do vậy cường độ nén của bê tông ở tuổi ban đầu thấp. Tuy nhiên, ở tuổi dài ngày (sau 28 ngày) cường độ nén của bê tông sử dụng BFS lớn hơn so với mẫu đối chứng, điều này là do hầu như các thành phần hoạt tính của BFS đã phản ứng với sản phẩm thủy hóa của xi măng, góp phần làm tăng cường độ, độ bền cho bê tông.



Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng BFS đến cường độ nén của BTCLSC  
N/CKD = 0.16, (a) 27±2°C, (b) 90±5°C

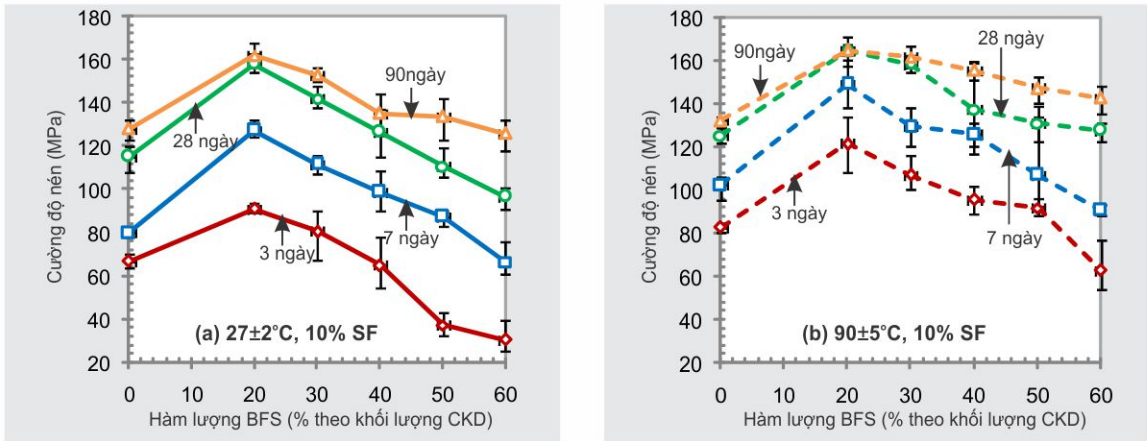


Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng BFS đến sự phát triển cường độ nén của BTCLSC theo thời gian, N/CKD = 0.16, (a) 27±2°C, (b) 90±5°C

### 4.3 Ảnh hưởng của sự kết hợp giữa silica fume và xỉ nghiền mịn đến cường độ nén của bê tông chất lượng siêu cao

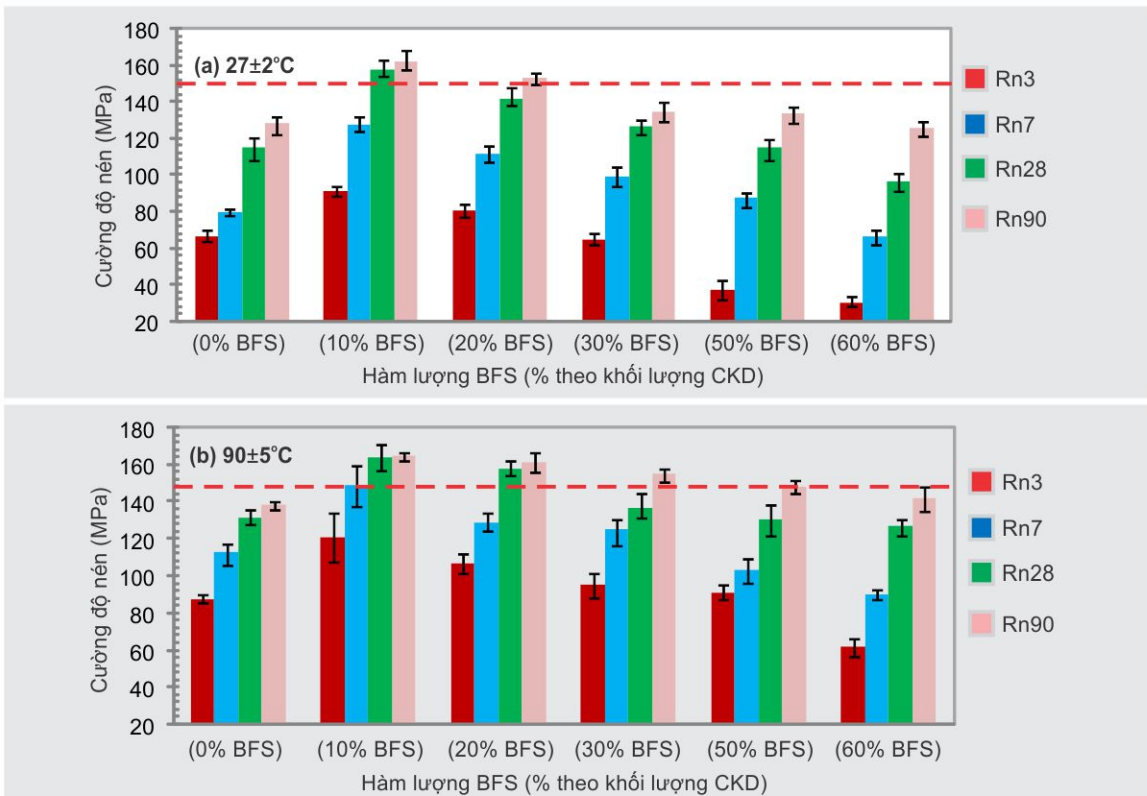
Hình 7 thể hiện sự ảnh hưởng của hàm lượng (SF và BFS) đến cường độ nén của BTCLSC, trong đó hàm lượng SF được giữ cố định là 10%. Kết quả cho thấy cường độ nén lớn nhất của tổ hợp này đạt được khi lượng dùng BFS là 20%, nghĩa là tổng hàm lượng phụ gia khoáng là 30%. Giá trị cường độ nén của mẫu khi bảo dưỡng tự nhiên đạt được tại tuổi 28 ngày là 158MPa và bảo dưỡng nhiệt ẩm cao là 164MPa. Đáng chú ý là với điều kiện bảo dưỡng nhiệt ẩm cao thì cường độ nén của BTCLSC có thể đạt được cường độ yêu cầu ngay từ 7 ngày. Bên cạnh đó, lượng dùng BFS có thể tăng lên đến 45% mà vẫn đạt giá trị cường độ yêu cầu.

Như vậy, tổng lượng dùng của phụ gia khoáng trong trường hợp này có thể nâng lên đến 55%, điều này mang lại ý nghĩa rất lớn trong việc sử dụng phụ gia khoáng thay thế xi măng để chế tạo BTCLSC.



**Hình 7.** Ảnh hưởng của hàm lượng BFS đến cường độ nén của BTCLSC, SF=10%  
N/CKD = 0.16, (a) 27±2°C, (b) 90±5°C

Tốc độ phát triển cường độ của bê tông ở các tuổi khác nhau trong các điều kiện dưỡng hộ khác nhau thể hiện ở hình 8. Kết quả thí nghiệm có thể thấy rằng cường độ nén của BTCLSC được cải thiện rõ rệt khi bê tông được dưỡng hộ ở điều kiện nhiệt ẩm cao. Thực tế cho thấy rằng quá trình dưỡng hộ ở chế độ nhiệt ẩm cao có vai trò làm cải thiện vi cấu trúc của bê tông, làm giảm co ngót đồng thời tăng khả năng chống nứt cho bê tông.



**Hình 8.** Ảnh hưởng của hàm lượng BFS đến sự phát triển cường độ nén của bê tông ở các tuổi khác nhau, với SF = 10%, N/CKD = 0.16, (a) 27±2°C, (b) 90±5°C

Hàm lượng BFS thay thế xi măng cũng ảnh hưởng đến tốc độ phát triển cường độ của BTCLSC, như ở hình 8. Khi sử dụng BFS thay thế xi măng, ở điều kiện dưỡng hộ thường thì tốc độ phát triển cường độ ở những ngày đầu chậm, BFS càng được sử dụng nhiều thì tốc độ phát triển cường độ ở những ngày đầu càng chậm. Mặc dù các mẫu bê tông sử dụng 50%, 60% BFS được dưỡng hộ ở điều kiện nhiệt ẩm, tốc độ phát triển cường độ nên ở những ngày đầu vẫn thấp. Ở tuổi 90 ngày thì tốc độ phát triển cường độ tăng nhanh hơn so với mẫu đối chứng.

## 5. Kết luận

Dựa trên những kết quả nghiên cứu đạt được, một số kết luận có thể rút ra như sau:

- Hoàn toàn có thể sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn ở Việt Nam thay thế một phần xi măng để chế tạo BTCLSC.

- Khi sử dụng đơn phụ gia khoáng BFS, thì hàm lượng dùng là 20% và tỷ lệ N/CKD là 0.16 được coi là tối ưu để chế tạo BTCLSC với cường độ nén lớn nhất đạt được là 151MPa và 155MPa tương ứng với chế độ bảo dưỡng tự nhiên và bảo dưỡng nhiệt ẩm cao. Lượng BFS lớn nhất có thể dùng là 30% và 60% để đạt cường độ thiết kế tương ứng với chế độ dưỡng hộ tự nhiên và dưỡng hộ nhiệt ẩm.

- Khi dùng kết hợp hai loại phụ gia thì hàm lượng 10% SF và 20% BFS được coi là tối ưu để chế tạo BTCLSC với cường độ nén lớn nhất đạt được là 158MPa và 164MPa tương ứng với chế độ bảo dưỡng tự nhiên và bảo dưỡng nhiệt ẩm cao.

### Tài liệu tham khảo

1. Buitelaar, P. (2004), "Ultra High Performance Concrete: *Developments and Applications during 25 years*", *International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany.
2. Richard, P. and M.H. Cheyrezy (1995), Composition of reactive power concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), p 1501-1511.
3. Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh, Nguyễn Công Thắng (2005), *Nghiên cứu khả năng chế tạo bê tông hạt mịn chất lượng cao ở Việt Nam*, Đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường, Đại học Xây dựng, 07-2005/KHCN.
4. Huu, P.D (2011), *Research on production technology of super high strength concrete for application in bridge and high rise building*. Project for Ministry of Science and technology, B2010-04-130-TĐ.
5. Hoang, K.H., B.D. Vinh, and N.V. Chanh (2011), "Physical and mechanical properties of Ultra-High Performance Concrete with and without coarse aggregate", *Science and technology conference 12th*, HCMUT - 26-28/10/2011.
6. Richard, P. and M.H. Cheyrezy (1994), "Reactive Power concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength." in Mehta, P.K. (ED). *Concrete Technology: Past, Present and Future*, Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, Detroit: Victoria Wieczorek, ACI SP 144-24, p 507-518.
7. Le, T.T. (2008), *Ultra high performance fibre reinforced concrete paving flags*. University of Liverpool: Liverpool. p. 374.
8. Yazici.H (2010), "Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, 32(8): p. 639-648.
9. Yazıcı, H. and M.Y. Yardımcı (2009), "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", *Construction and Building Materials*, 23(3): p. 1223-1231.
10. Tuan, N.V (2011), *Rice Husk Ash as a Mineral Admixture for Ultra High Performance Concrete*, in Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, the Netherlands. p. 165.
11. Kollmorgen, G.A (2004), *Impact of Age and Size on the Mechanical Behavior of an Ultra-High Performance Concrete*, in MS Thesis in Civil Engineering. Michigan Technological, University, Houghton, Michigan.
12. Larrard, F.d. and T. Sedran (1994), "Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model", *Cement and Concrete Research*, 24(6): p. 997-1009.
13. de Larrard, F (1999), *Concrete mixture proportioning: A scientific approach*. Modern Concrete Technology Series, E&FN SPON, London.
14. Jones, M., L. Zheng, and M. Newlands (2002), "Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio", *Materials and Structures*. 35(5): p. 301-309.
15. Nguyễn Công Thắng, Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh (2012), "Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng vật liệu sẵn có ở Việt Nam", *Tạp chí xây dựng*, Bộ xây dựng, số 12 (2012), PP 71-74.