



NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ SIÊU CAO SỬ DỤNG PHỤ GIA KHOÁNG THAY THẾ MỘT PHẦN XI MĂNG Ở VIỆT NAM HƯỚNG TỚI PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

Nguyễn Văn Tuấn¹, Nguyễn Công Thắng², Phạm Hữu Hanh³

Tóm tắt: Bê tông cường độ siêu cao (BTCĐSC) đã và đang được nghiên cứu và ứng dụng ở Việt Nam với các tính chất đặc biệt như độ chảy cao, cường độ rất cao, độ thấm nước thấp và độ bền cao. Tuy nhiên, trong BTCĐSC, lượng xi măng sử dụng rất lớn, khoảng 900-1000 kg/m³, điều này sẽ ảnh hưởng lớn đến tính chất, giá thành và môi trường của sản phẩm. Do vậy, việc nghiên cứu sử dụng phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng chế tạo BTCĐSC có ý nghĩa to lớn về mặt kỹ thuật, kinh tế và môi trường, góp phần vào mục tiêu phát triển xây dựng bền vững sản phẩm này. Bài báo này trình bày những kết quả nghiên cứu về việc sử dụng một số phụ gia khoáng sẵn có ở Việt Nam như silica fume, tro bay, tro xỉ, tro trấu, bột đá vôi, cũng như một số tổ hợp phụ gia này trong việc chế tạo BTCĐSC. Kết quả này góp phần quan trọng trong việc phát triển và ứng dụng loại bê tông này trong công nghiệp xây dựng bền vững ở Việt Nam.

Từ khóa: Bê tông cường độ siêu cao; phụ gia khoáng; phát triển bền vững.

Summary: Ultra-High Strength Concrete has been being researched and applied in Vietnam with some exceptional properties, i.e. very high fluidity, ultra high strength, very low water permeability, and excellent durability. However, high amount of cement used to make this concrete, ranging from 900 to 1000 kg/m³, can result in negative effect on product properties, cost, and environment. Therefore, the use of mineral admixtures to partly replace cement in making UHPC seems to be a good solution in terms of technical, economic and environmental issues, and this would contribute to sustainable development for this product. This paper presents the possibility of using available mineral admixtures in Vietnam, i.e. silica fume, rice husk ash, fly ash, blast furnace slag, limestone, to make Ultra-High Strength Concrete. This result can contribute a great benefit in developing and applying this concrete in the sustainable construction industry of Vietnam.

Keywords: Ultra high strength concrete; mineral admixtures; sustainable development.

Nhận ngày 1/6/2015, chỉnh sửa ngày 16/6/2015, chấp nhận đăng 30/6/2015



1. Giới thiệu

Bê tông cường độ cao, chất lượng cao đã và đang được nghiên cứu và ứng dụng ở Việt Nam nhằm đáp ứng nhu cầu phát triển xây dựng trong các công trình đặc biệt như nhà siêu cao tầng, cầu nhịp lớn, kết cấu vỏ mỏng... Thực tế đối với những ứng dụng đặc biệt này, loại bê tông cường độ cao/chất lượng cao hiện nay đang được ứng dụng ở Việt Nam chưa đạt được kỳ vọng về cường độ/chất lượng, do đó cần tiếp tục nghiên cứu nâng cao hơn nữa phẩm chất của loại vật liệu này. Một số nước trên thế giới đã nghiên cứu và ứng dụng thành công bê tông cường độ/chất lượng siêu cao với những đặc tính vượt trội [1-3], chẳng hạn như ở Pháp và Canada ở đầu những năm 90 của thế kỷ 20 [4-5].

Bê tông cường độ, chất lượng siêu cao có độ chảy cao, cường độ nén rất cao (thường lớn hơn 150 MPa), cường độ uốn lớn 15-40 MPa (khi sử dụng cốt sợi), mô đun đàn hồi cao từ 50-60 GPa, độ thấm nước

¹ TS, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng. E-mail: tuan.rang@gmail.com.

² NCS, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

³ PGS. TS, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

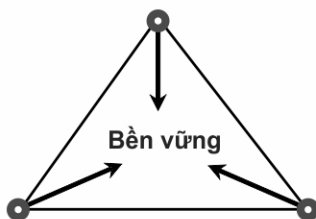
thấp và độ bền cao [5]. BTCĐSC có ưu điểm vượt trội so với bê tông thường và bê tông chất lượng cao thậm chí có thể so sánh với thép ở một số tính chất. Cường độ cao cho phép thiết kế kết cấu mỏng hơn; khi có cùng một khả năng chịu lực, nhưng lượng vật liệu sử dụng ít hơn. Thực tế ở Việt Nam, loại bê tông này còn là vật liệu mới (được nghiên cứu từ 2005 ở Trường Đại học Xây dựng) [6]. Cho đến nay chỉ có một số ít đề tài tìm hiểu và nghiên cứu chính thức ở một vài đơn vị nghiên cứu, như Trường Đại học Bách Khoa thành phố Hồ Chí Minh (năm 2009) [7], Trường Đại học Giao thông Vận tải (năm 2011) [8]. Các nghiên cứu về BTCĐSC mới chỉ dừng lại ở nghiên cứu khảo sát và chế tạo các loại BTCĐSC sử dụng phụ gia khoáng hoạt tính, chủ yếu là silica fume, với cường độ nén đạt xấp xỉ 150MPa.

Trong các vật liệu xây dựng, bê tông là vật liệu nhân tạo được sử dụng nhiều nhất trên thế giới, nhiều gấp 2 lần so với tổng lượng các vật liệu xây dựng còn lại. Theo Mehta [9] đề xuất, sự phát triển bền vững của bê tông có thể được thực hiện bằng 3 giải pháp chính sau (Hình 1):

- Giảm lượng bê tông tiêu thụ bằng cách nâng cao chất lượng, độ bền lâu của bê tông hoặc thay thế bằng các vật liệu mới.
- Giảm lượng xi măng sử dụng bằng cách tính toán tối ưu thành phần hạt, sử dụng phụ gia hóa học...
- Thay thế một phần xi măng bằng các loại phụ gia khoáng như tro bay, xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn, silica fume, tro trấu... để giảm lượng clanhke trong sản xuất xi măng thực tế.

Giảm lượng bê tông sử dụng trong các công trình

GIẢI PHÁP 1



GIẢI PHÁP 2

GIẢI PHÁP 3

Giảm lượng xi măng sử dụng trong hỗn hợp bê tông

Giảm lượng clanhke trong sản xuất xi măng

Hình 1. Phát triển bền vững của bê tông theo quan điểm của Mehta [9]

Nghiên cứu này, giải pháp thứ 3, sử dụng phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng được lựa chọn. Giải pháp này mang lại hiệu quả về góc độ môi trường do có thể tận dụng được phế thải. Việc sử dụng phụ gia khoáng không những cải thiện độ bền lâu của bê tông, giảm nguy cơ nứt do nhiệt cho bê tông khối lớn, mà còn cho phép giảm lượng CO₂ do giảm lượng xi măng.

BTCĐSC còn được gọi là bê tông sử dụng bột hoạt tính (Reactive Powder Concrete), chủ yếu được chế tạo từ hỗn hợp gồm cát quắc có kích thước hạt trong khoảng 100-600μm; xi măng; phụ gia khoáng (thông thường là silica fume); nước và phụ gia siêu dẻo. Trong đó lượng xi măng khoảng 900-1000 kg/m³, lượng dùng phụ gia khoáng khoảng 20% so với khối lượng chất kết dính, lớn hơn rất nhiều so với bê tông thường. Điều này sẽ ảnh hưởng lớn đến giá thành của loại bê tông này khi khả năng cung ứng hạn chế và giá thành của phụ gia khoáng là cao, đồng thời việc sử dụng một lượng xi măng lớn, theo quan điểm của Mehta [9] có tác động tiêu cực đến sử dụng bền vững BTCĐSC.

Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu về khả năng sử dụng và hiệu quả phụ gia khoáng sẵn có ở Việt Nam, như tro bay, tro xỉ, tro trấu, bột đá vôi, thay thế một phần xi măng, so sánh với việc sử dụng phụ gia khoáng silica fume giá thành cao chế tạo BTCĐSC hướng tới mục tiêu phát triển bền vững của loại bê tông này ở Việt Nam.



2. Vật liệu chế tạo và phương pháp nghiên cứu

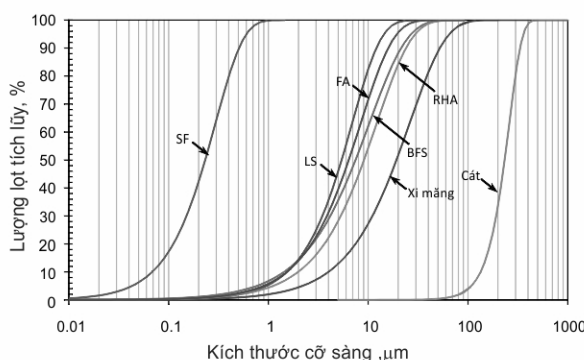
2.1 Vật liệu chế tạo

Vật liệu sẵn có ở Việt Nam được sử dụng trong nghiên cứu gồm xi măng Poóclăng PC40, khối lượng riêng 3.15 g/cm³; cốt liệu cát quắc có đường kính cỡ hạt trung bình 315μm, khối lượng riêng 2.62 g/cm³; phụ gia siêu dẻo (PGSD) gốc polycarboxylate.

Ngoài các vật liệu trên, đề tài còn sử dụng một số phụ gia khoáng (PGK) sau:

- Silica fume (SF) sử dụng trong nghiên cứu là dạng hạt rời của hãng Elkem cung cấp, có hàm lượng SiO_2 92.3%, đường kính hạt trung bình $0.15\mu\text{m}$, khối lượng riêng 2.2 g/cm^3 và chỉ số hoạt tính cường độ 113.5%;
- Xi lò cao hạt hóa (BFS) có đường kính cỡ hạt trung bình $7.2\mu\text{m}$, hàm lượng các oxit ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) 47.6%, khối lượng riêng 2.94 g/cm^3 và chỉ số hoạt tính với xi măng là 106.5%.
- Tro trấu (RHA) có hàm lượng SiO_2 88.0%, than chưa cháy là 3.8% và kích thước hạt trung bình là khoảng $7.9\mu\text{m}$, khối lượng riêng 2.1 g/cm^3 . Chỉ số hoạt tính cường độ 107.6%.
- Tro bay (FA) có đường kính cỡ hạt trung bình $5.83\mu\text{m}$, khối lượng riêng 2.4 g/cm^3 . Chỉ số hoạt tính cường độ 103.4%.
- Bột đá vôi (LS) có đường kính cỡ hạt trung bình $5.0\mu\text{m}$, khối lượng riêng 2.74 g/cm^3 . Chỉ số hoạt tính cường độ 96.4%.

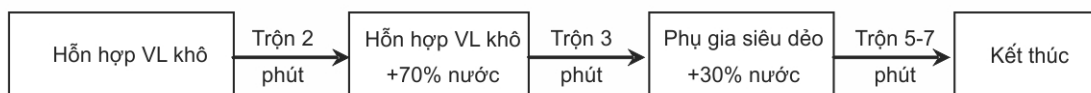
Thành phần hạt của các vật liệu này được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ laser và kết quả thể hiện ở Hình 2.



Hình 2. Thành phần hạt của các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

2.2 Quy trình thí nghiệm và bảo dưỡng

Máy trộn sử dụng trong nghiên cứu có dung tích 20 lít. Quy trình trộn hỗn hợp bê tông thể hiện ở Hình 3. Tổng thời gian trộn khoảng 10 đến 12 phút để đảm bảo độ đồng nhất của hỗn hợp bê tông.



Hình 3. Quy trình trộn hỗn hợp BTCĐSC

Sau khi được trộn, hỗn hợp bê tông ở dạng chảy lỏng và tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định thông qua giá trị đường kính trung bình của độ chảy loãng theo tiêu chuẩn BS 4551-1:1998. Trong nghiên cứu này giá trị đường kính trung bình độ chảy loãng của hỗn hợp bê tông được điều chỉnh trong khoảng 210-230mm. Cường độ nén BTCĐSC được xác định trên mẫu có kích thước $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$. Các khuôn chứa mẫu được chấn động trên bàn rung với tần số 2900 ± 100 vòng/phút, biên độ $0.50 \pm 0.01\text{mm}$ và thời gian rung cố định là 1 phút. Sau đó các mẫu được bảo dưỡng ở điều kiện thường ($27 \pm 2^\circ\text{C}$, độ ẩm $\geq 95\%$) trong thời gian 16-24 giờ và được tháo khỏi khuôn và tiếp tục bảo dưỡng trong 2 môi trường khác nhau:

- Chế độ 1: Tiếp tục bảo dưỡng trong điều kiện thường.

- Chế độ 2: Bảo dưỡng 02 ngày trong điều kiện nhiệt ẩm ($90 \pm 5^\circ\text{C}$, độ ẩm $\geq 98\%$), tốc độ tăng và hạ nhiệt khi bảo dưỡng $10-11^\circ\text{C}/\text{giờ}$, sau đó tiếp tục bảo dưỡng trong điều kiện thường đến các tuổi cần thí nghiệm nén (3, 7, 28, 90 ngày).



3. Thiết kế thành phần bê tông cường độ siêu cao

Một số căn cứ sử dụng trong thiết kế thành phần BTCĐSC bao gồm:

- Kết quả nghiên cứu khảo sát đã xuất bản [10] về nghiên cứu chế tạo BTCĐSC sử dụng 0-5-10-15-20% LS thay thế xi măng cho thấy cường độ nén lớn nhất của BTCĐSC đạt được ở tất cả các tuổi khi lượng LS sử dụng là 10%. Khi tiếp tục tăng lượng dùng LS, cường độ nén của BTCĐSC giảm xuống.

- Kết quả nghiên cứu khảo sát đã xuất bản [11] về nghiên cứu chế tạo BTCĐSC sử dụng 0-10-20-30% RHA thay thế xi măng cho thấy cường độ nén lớn nhất của BTCĐSC đạt được ở tất cả các tuổi khi lượng RHA sử dụng là 10%. Cường độ nén của BTCĐSC giảm xuống khi tiếp tục tăng lượng dùng RHA.

- Kết quả nghiên cứu khảo sát đã xuất bản [12] về nghiên cứu chế tạo BTCĐSC sử dụng 0-10-20-30% SF thay thế xi măng cho thấy cường độ nén lớn nhất của BTCĐSC đạt được ở tất cả các tuổi khi lượng SF sử dụng là 10%. Khi tăng lượng dùng SF đến 30% (tính theo khối lượng chất kết dính) thì cường độ nén bê tông giảm. Đồng thời khi SF thay thế xi măng ở tỷ lệ 10% thì hỗn hợp bê tông có độ chảy là cao nhất.

- Kết quả nghiên cứu khảo sát đã xuất bản [13] về nghiên cứu chế tạo BTCĐSC sử dụng 0-10-20-30% FA thay thế xi măng cho thấy cường độ nén lớn nhất của BTCĐSC đạt được ở tất cả các tuổi khi lượng FA sử dụng là 20%. Sau đó thì cường độ nén của BTCĐSC giảm xuống khi tăng lượng dùng FA.

- Kết quả nghiên cứu khảo sát đã xuất bản [14] về nghiên cứu chế tạo BTCĐSC sử dụng 0-10-20-30-40-50-60% BFS thay thế xi măng cho thấy cường độ nén lớn nhất của BTCĐSC đạt được ở tất cả các tuổi khi lượng BFS sử dụng là 30%. Khi lượng dùng BFS tăng từ 30% đến 60% thì cường độ nén của BTCĐSC giảm xuống.

Trong nghiên cứu này, các cấp phối BTCĐSC sử dụng các PGK khác nhau với cùng hàm lượng 20% thay thế xi măng (tính theo khối lượng) được thể hiện ở Bảng 1, trong đó giá trị hàm lượng PGSD sử dụng trong Bảng 1 này là lượng PGSD dùng sau khi đã điều chỉnh để hỗn hợp bê tông đạt đường kính độ chảy loang trung bình trong khoảng 210-230mm. Dựa trên các tỷ lệ đã lựa chọn này, lượng dùng vật liệu được tính toán dựa trên nguyên lý thể tích tuyệt đối.

Bảng 1. Cấp phối BTCĐSC sử dụng trong nghiên cứu

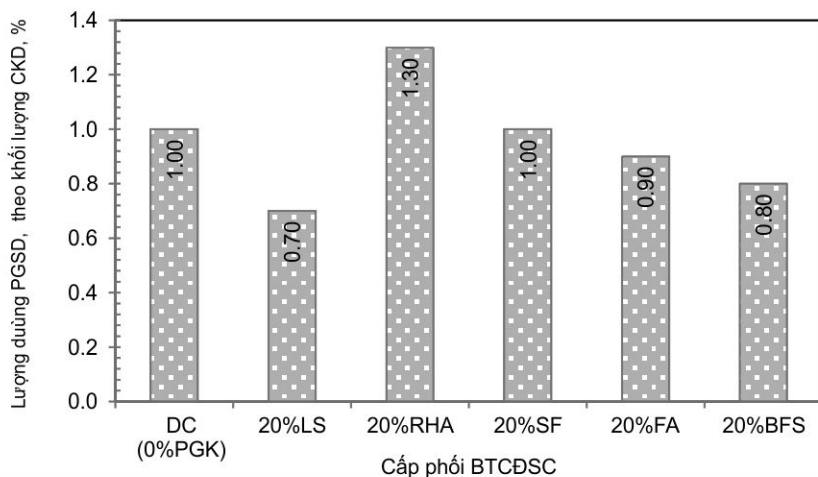
Ký hiệu mẫu	Khối lượng CKD (kg)	C/CKD	N/CKD	Hàm lượng PGK, % (theo khối lượng của CKD)					PGSD, %
				LS	RHA	SF	FA	BFS	
ĐC (0%PGK)	1143	1.0	0.18	-	-	-	-	-	1.00
20%LS	1131	1.0	0.18	20	-	-	-	-	0.70
20%RHA	1103	1.0	0.18	-	20	-	-	-	1.30
20%SF	1108	1.0	0.18	-	-	20	-	-	1.00
20%FA	1118	1.0	0.18	-	-	-	20	-	0.90
20%BFS	1137	1.0	0.18	-	-	-	-	20	0.80



4. Kết quả và bàn luận

4.1 Ảnh hưởng của phụ gia khoáng đến tính chất của hỗn hợp BTCĐSC

Hình 4 thể hiện hàm lượng PGSD của các hỗn hợp BTCĐSC sử dụng các PGK khác nhau. Ở đây độ chảy loang của các hỗn hợp được giữ nguyên và việc điều chỉnh này thực hiện thông qua việc thay đổi hàm lượng PGSD.



Hình 4. Lượng dùng PGSD hợp lý trong BTCĐSC phụ thuộc vào loại phụ gia khoáng khác nhau

Kết quả cho thấy, khi sử dụng PGK thay thế một phần xi măng hầu hết sẽ cải thiện tính công tác. Điều này có thể giải thích trước hết do thể tích của các hạt mịn tăng lên khi PGK thay thế xi măng với cùng khối lượng nhưng PGK có khối lượng riêng nhỏ hơn so với xi măng (phần 2.1). Lượng hạt mịn tăng lên này sẽ cải thiện tính công tác.

Trong các PGK sử dụng thì các PGK với tỷ diện tích lớn (khoảng $20.000\text{cm}^2/\text{g}$) như RHA và SF làm giảm tính công tác. Thực tế tỷ diện tích lớn của SF chủ yếu dựa trên các hạt đặc chắc nhưng siêu mịn (đường kính hạt trung bình khoảng $0.15\mu\text{m}$), còn tỷ diện tích của RHA dựa trên cấu trúc rỗng xốp của bản thân các hạt RHA. Như vậy nếu giữ cùng giá trị đường kính độ chảy loãng của hỗn hợp bê tông thì hàm lượng PGSD sử dụng sẽ tăng lên. Ở trường hợp SF, lượng PGSD ít hơn so với RHA do các hạt SF hình cầu có tác dụng làm giảm nội ma sát trong hỗn hợp hạt, còn gọi là hiệu ứng “đổ bi” [15], giúp cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông. Bên cạnh đó, 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 cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông [16].

Các hạt FA cũng có dạng hình cầu và có thể cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông nhờ hiệu ứng “đổ bi” này. Còn đối với các hạt BFS, do bề mặt các hạt có cấu trúc phẳng mịn làm các hạt có thể trượt lên nhau dễ hơn, nghĩa là giảm nội ma sát giữa các hạt, đồng thời các hạt BFS có cấu trúc đặc chắc không hút nước, làm tăng lượng nước tự do trong hỗn hợp, từ đó cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông là đáng kể khi sử dụng BFS thay thế một phần xi măng [17]. Như vậy với cùng 1 lượng PGK thay thế (20% so với khối lượng chất kết dính), thì sử dụng BFS có tác dụng hiệu quả nhất cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông.

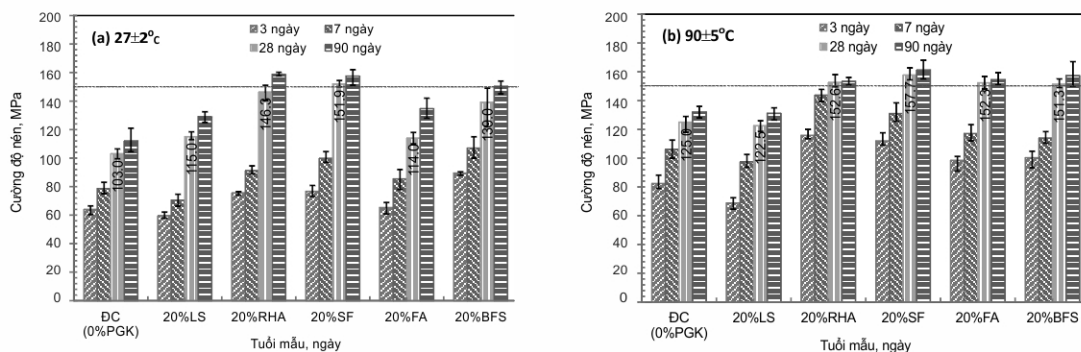
4.2 So sánh hiệu quả của các loại PGK có cùng lượng dùng trong BTCĐSC đến cường độ nén

Cường độ nén theo các tuổi 3, 7, 28, 90 ngày của BTCĐSC sử dụng các PGK khác nhau ở 2 điều kiện bảo dưỡng thường và nhiệt ẩm thể hiện ở Hình 5.

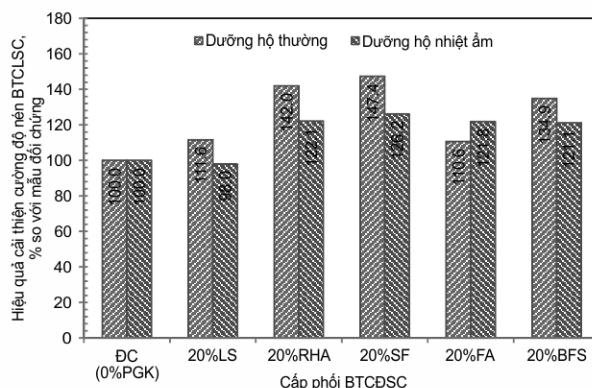
Có thể thấy rằng việc sử dụng PGK khác nhau sẽ cho hiệu quả cải thiện cường độ nén so với mẫu đối chứng không sử dụng PGK. Đối với điều kiện bảo dưỡng thường (Hình 5a), cường độ nén mẫu đối chứng ở tuổi 28 ngày chỉ đạt 103MPa, trong khi hầu như cường độ nén các mẫu sử dụng phụ gia khoáng đều tăng lên, tuy vậy chỉ có mẫu sử dụng 20%SF có cường độ nén lớn hơn 150MPa. Bên cạnh đó có thể quan sát thấy cường độ nén tuổi sớm ngày (3, 7 ngày) tăng lên của các mẫu khi sử dụng các PGK SF, RHA và BFS là khá rõ rệt, một số PGK như RHA có thể cải thiện cường độ nén của bê tông ở cả tuổi muộn.

Trong khi đó, điều kiện bảo dưỡng ở điều kiện nhiệt ẩm đã cải thiện rõ rệt cường độ nén của BTCĐSC (Hình 5b). Ở điều kiện bảo dưỡng nhiệt ẩm, cường độ nén tuổi 28 ngày của mẫu đối chứng chỉ đạt 125MPa, nhưng khi sử dụng PGK thay thế một phần xi măng thì cường độ nén của bê tông tăng lên đáng kể, tất cả các mẫu chứa PGK, trừ LS, đều đạt cường độ nén 150MPa. Bên cạnh đó, đối với mẫu bê tông bảo dưỡng ở chế độ nhiệt ẩm cao, cường độ nén ở những ngày đầu (3 ngày) phát triển rất mạnh, tuy vậy đến các tuổi muộn (7, 28 ngày) cường độ phát triển chậm hơn, đặc biệt 90 ngày.

Hiệu quả cải thiện cường độ nén BTCĐSC khi sử dụng các phụ gia khoáng khác nhau ở điều kiện bảo dưỡng thường ($27\pm 2^\circ\text{C}$) và bảo dưỡng nhiệt ẩm ($90\pm 5^\circ\text{C}$) thể hiện ở Hình 6. Đối với bảo dưỡng thường, việc cải thiện cường độ nén BTCĐSC là lớn hơn (từ 110-150% so với cường độ nén mẫu đối chứng) so với điều kiện bảo dưỡng nhiệt ẩm (từ 121-126% so với cường độ nén mẫu đối chứng). Việc cải thiện cường độ nén BTCĐSC lớn nhất khi sử dụng các PGK RHA, SF, và BFS.



Hình 5. Cường độ nén của BTCĐSC sử dụng các PGK khác nhau (lượng dùng PGK 20% thay thế xi măng), $N/KCKD = 0.18$ tương ứng với hai điều kiện bảo dưỡng (a) $27\pm 2^\circ\text{C}$, (b) $90\pm 5^\circ\text{C}$



Hình 6. Hiệu quả cải thiện cường độ nén BTCĐSC (tuổi 28 ngày) khi sử dụng các PGK khác nhau ở điều kiện bảo dưỡng thường ($27\pm 2^\circ\text{C}$), và bảo dưỡng nhiệt ẩm ($90\pm 5^\circ\text{C}$), % so với mẫu đối chứng

Việc cải thiện cường độ nén của BTCĐSC khi sử dụng PGK có thể giải thích trước hết là do thể tích của các hạt mịn tăng lên khi PGK thay thế xi măng với cùng khối lượng nhưng PGK có khối lượng riêng nhỏ hơn so với xi măng (mục 2.1). Lượng hạt mịn này tăng lên có thể lấp đầy các khoảng trống của cốt liệu cát, làm đặc chắc hơn hỗn hợp bê tông. Hơn nữa, do PGK có kích thước hạt nhỏ hơn xi măng (đặc biệt các hạt SF siêu mịn, nhỏ hơn các hạt xi măng khoảng 100 lần) nên có khả năng lấp đầy khoảng trống giữa các hạt xi măng, làm tăng độ đặc chắc của hệ, có thể coi đây là hiệu ứng vật lý của các PGK. PGK LS được coi là PGK trơ và thường chỉ cải thiện cường độ nén của bê tông nhờ hiệu ứng vật lý này. Các PGK khác thường ở dạng hoạt tính nên có thể cải thiện sự thủy hóa và vi cấu trúc của hệ thống qua các phản ứng thứ cấp giữa các PGK này với các sản phẩm thủy hóa xi măng như phản ứng pozolanic. Từ đó làm giảm hàm lượng hydroxit canxi (CH - không có tính kết dính) của hệ, trong khi đó hàm lượng các sản phẩm thủy hóa ở dạng bền, như C-S-H, lại tăng lên, từ đó sẽ cải thiện được cường độ và độ bền cho bê tông, đây chính là hiệu ứng hóa học của các PGK hoạt tính. Bên cạnh đó, do các hạt PGK có kích thước nhỏ, có thể điền đầy vào các vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu và đá xi măng và thực hiện các phản ứng thứ cấp làm giảm các sản phẩm thủy hóa không có tính chất kết dính (như CH) tại các vùng này, làm tăng độ đặc chắc và tăng sự liên kết ở các vị trí này [18]. Hơn nữa, một số PGK như RHA, FA, ở điều kiện bảo dưỡng thường, cường độ nén của bê tông ở những ngày đầu tăng không nhiều so với mẫu đối chứng, nhưng sự phát triển cường độ ở tuổi về sau khá lớn, đặc biệt ở tuổi 90 ngày. Điều này có thể do các hạt này có cấu trúc xốp, trong quá trình nhào trộn sẽ hút một lượng nước nhất định của hệ. Do quá trình thủy hóa của xi măng, theo thời gian độ ẩm của hệ sẽ giảm xuống, khi đó lượng nước trong các hạt PGK xốp này sẽ được nhả ra và giúp quá trình thủy hóa của xi măng được triệt để hơn, từ đó làm tăng cường độ nén của bê tông.

Đối với quá trình bảo dưỡng ở chế độ nhiệt ẩm, sự cải thiện về giá trị và sự phát triển cường độ nén theo thời gian, đặc biệt tuổi sớm ngày (3 ngày tuổi) có thể giải thích do sự cải thiện vi cấu trúc của bê tông, làm giảm co ngót đồng thời tăng khả năng chống nứt cho bê tông [19]. Sự phát triển cường độ nén nhanh ở tuổi sớm và chậm hơn ở tuổi muộn có thể do ở điều kiện nhiệt độ cao, xi măng thủy hóa triệt để hơn, đồng thời xảy ra phản ứng thứ cấp giữa các phụ gia khoáng với sản phẩm thủy hóa của xi măng với tốc độ nhanh làm cho cường độ nén của bê tông phát triển nhanh ở tuổi sớm.

4.3 Hiệu quả kinh tế của việc sử dụng PGK trong chế tạo BTCĐSC

Bài báo này chỉ tính toán sơ bộ về giá thành vật liệu chế tạo (Bảng 2) và căn cứ vào bảng các cấp phối sử dụng trong nghiên cứu này (Bảng 1), giá thành của các cấp phối của BTCĐSC sử dụng các phụ gia khoáng khác nhau được tính toán và thể hiện ở Bảng 3. Ở bảng giá thành chế tạo này đã tính quy đổi về cùng một cường độ nén tuổi 28 ngày theo chế độ bảo dưỡng nhiệt ẩm của BTCĐSC là 150 MPa.

So sánh theo giá thành của cấp phối đối chứng thì giá thành chế tạo BTCĐSC sử dụng phụ gia khoáng giảm hơn tùy theo loại phụ gia khoáng thay thế (trừ trường hợp sử dụng SF), cũng như lượng phụ gia siêu dẻo sử dụng, giảm khoảng 10-30% (Hình 7). Cấp phối giảm nhiều nhất là cấp phối sử dụng tro bay và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn, với giá thành còn khoảng dưới 75% so với mẫu đối chứng. Đối với cấp phối sử dụng SF, do giá thành SF đắt hơn 10 lần so với xi măng, nên việc thay thế SF mặc dù nâng cao tính chất của BTCLSC nhưng khi quy về cùng giá trị cường độ nén (150MPa) thì giá thành của cấp phối sử dụng SF này vẫn cao hơn nhiều (khoảng 128%) so với giá thành của cấp phối mẫu đối chứng.

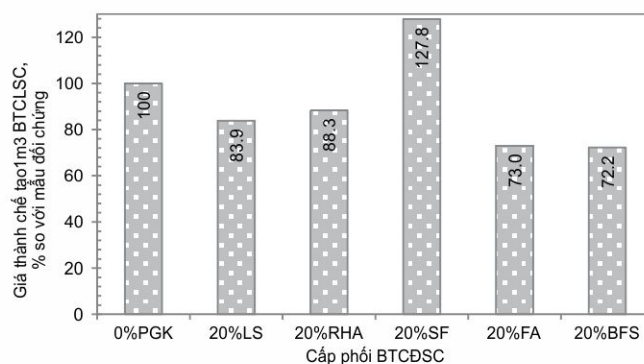
Nếu xét theo giá thành khi quy về cùng một giá trị cường độ nén và tính công tác như nhau, thì hoàn toàn có thể sử dụng các phụ gia khoáng sẵn có ở Việt Nam thay thế silica fume với cùng chức năng, trong đó việc sử dụng tro bay và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn là hợp lý nhất. Điều này sẽ mang lại hiệu quả to lớn vì silica fume là sản phẩm ngoại có nguồn cung ứng hạn chế và giá thành rất đắt (gấp khoảng 15 lần so với giá thành các phụ gia khoáng khác).

Bảng 2. Giá thành thực tế vật liệu chế tạo, đồng/kg

Nước	Xi măng	Cát	PGSD	LS	RHA	SF	FA	BFS
-	1.450	800	55.000	750	1.100	15.000	780	810

Bảng 3. Giá thành BTCĐSC sử dụng các phụ gia khoáng khác nhau
(chỉ tính theo giá vật liệu chế tạo và đã quy về cùng 1 giá trị cường độ nén 150MPa), đồng/m³

ĐC	20%LS	20%RHA	20%SF	20%FA	20%BFS
5.602.447	4.698.644	4.947.890	7.161.804	4.088.620	4.045.961



Hình 7. Giá thành 1m³ BTCĐSC, % so với mẫu đối chứng
(chỉ tính theo giá vật liệu chế tạo và đã quy về cùng 1 giá trị cường độ nén 150MPa)



5. Kết luận

Từ những kết quả nghiên cứu đạt được dựa trên sự so sánh về tính công tác, cường độ nén, và giá thành, việc sử dụng PGK khác nhau thay thế một phần xi măng trong chế tạo BTCĐSC hướng tới phát triển bền vững cho phép đưa ra một số kết luận sau:

- Việc sử dụng các PGK sẵn có khác nhau ở Việt Nam cải thiện và phát triển cường độ nén so với mẫu đối chứng với hiệu quả khác nhau tùy thuộc vào loại PGK và điều kiện bảo dưỡng, trong đó việc cải thiện cường độ nén BTCĐSC lớn nhất khi sử dụng PGK tro trấu, silica fume và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn, khoảng 150% và 125% so với cường độ nén mẫu đối chứng tương ứng ở điều kiện bảo dưỡng thường và nhiệt ẩm.

- Các PGK khác nhau cải thiện tính công tác của hỗn hợp BTCĐSC khác nhau dựa vào hình dạng hạt của các PGK như hạt cầu (SF, FA), tính chất bề mặt của các hạt (BFS có cấu trúc bề mặt đặc chắc, phẳng mịn). PGK LS và BFS cải thiện lớn nhất tính công tác BTCĐSC trong nghiên cứu này.

- Việc sử dụng các PGK sẵn có khác nhau làm giảm giá thành chế tạo BTCĐSC tùy theo loại PGK thay thế (trừ trường hợp sử dụng SF), cũng như lượng phụ gia siêu dẻo sử dụng, giảm từ 10-30% giá thành so với mẫu đối chứng, trong đó việc sử dụng tro bay và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn có thể giảm xuống lớn nhất, khoảng gần 30% giá thành so với mẫu đối chứng.

Tài liệu tham khảo

1. Collepardi, M. (2003), "Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC", *Proceedings of the Workshop on New Technologies and Material in Civil Engineering*, Milan, 30 June, pp. 1-8.
2. Buitelaar, P. (2004), "Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications during 25 years", *International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany.

3. Schmidt, M. & E. Fehling (2005), "Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe", *ACI, SP 228-4*, pp. 51-78.
4. Richard, P. & M.H. Cheyrezy (1995), "Composition of reactive powder concretes", *Cement and Concrete Research*, 25(7) 1501-1511.
5. AFGC-SETRA (2002), *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes*, Paris, France: Interim Recommendations, AFGC publication.
6. Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh, Nguyễn Công Thắng (2005), *Nghiên cứu khả năng chế tạo bê tông hạt mịn chất lượng siêu cao ở Việt Nam*, Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Trường, Mã số 07-2005/KHCN, Trường Đại học Xây dựng, Việt Nam.
7. Bùi Phương Trinh, Kim Huy Hoàng, Nguyễn Văn Chánh (2009), "Recent research on New Ultra High Performance Concrete", *International Conference on Civil and Environmental Engineering, ICCEE-2009*, Pukyong National University.
8. Phạm Duy Hữu (2011), *Nghiên cứu công nghệ chế tạo bê tông có cường độ siêu cao ứng dụng trong kết cấu cầu và nhà cao tầng*, Đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ, Bộ Giáo dục và đào tạo, Mã số B2010-04-130-TĐ.
9. Mehta, P.K. (2009), "Global Concrete Industry Sustainability: Tools for Moving Forward to Cut Carbon Emissions", *American Concrete Institute, Concrete International*, February 2009, pp. 45-48.
10. Nguyễn Công Thắng, Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh (2013), "Ultra high performance concrete using a combination of Silica fume and Limestone in Vietnam", *Proceedings of International symposium on new Technologies for Urban Safety of Mega in Asian (USMCA2013)*, Hanoi, Vietnam, pp. 879-888.
11. Nguyễn Công Thắng, Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh (2014), "Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng tổ hợp phụ gia khoáng hoạt tính tro trấu và tro bay ở Việt Nam", *Tạp chí Vật liệu Xây dựng*, số 04/2014, trang 66-71.
12. Nguyễn Công Thắng, Phạm Hữu Hanh, Nguyễn Văn Tuấn (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, trang 71-74.
13. Nguyễn Công Thắng, Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh (2014), "Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng tổ hợp phụ gia khoáng hoạt tính tro trấu và tro bay ở Việt Nam", *Tạp chí Vật liệu Xây dựng*, số 04/2014, trang 66-71.
14. Nguyễn Công Thắng, Nguyễn Văn Tuấn, Lê Trung Thành, Phạm Hữu Hanh, Ye Guang (2013), "Ultra high performance concrete using a combination of Silica fume and Ground Granulated Blast-furnace Slag in Vietnam", *Proceedings of International conference on Sustainable Built Environment for Now and the Future, SBE2013*, Hanoi, Vietnam, pp. 303-309.
15. Chandra, S. (1997), *Waste materials used in concrete manufacturing*, Noyes Publications, 651 pp.
16. Bache, H.H. (1981), "Densified cement/ultra-fine particle-based materials", Presented at the *Second International Conference on Superplasticizers in Concrete*, 10-12 June, Ottawa, Canada, published by Aalborg Cement, Aalborg, PO Box 163, DK-9100 Aalborg, Denmark, 12 pp.
17. Ramezaniapour, A.A. (2014), *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Berlin, 2014. - XIII, 336 pp.
18. Maso, J. C. (1996), *Interfacial transition zone in concrete: State-of-the-art report*, London: E & FN Spon, (RILEM report, 11), 179 pp.
19. Yazici H, (2007), "The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures", *Building and Environment*, 42(5) 2083-2089.