

# ẢNH HƯỞNG CỦA TRO BAY VÀ XỈ LÒ CAO ĐẾN ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO TRONG MÔI TRƯỜNG XÂM THỰC

Văn Viết Thiên Ân<sup>a,\*</sup>, Bùi Danh Đại<sup>a</sup>, Trần Đức Trung<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

*Nhận ngày 11/10/2021, Sửa xong 08/11/2021, Chấp nhận đăng 09/11/2021*

## Tóm tắt

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng tro bay (FA), xỉ lò cao nghiền mịn (SL) đến các tính chất của bê tông chất lượng siêu cao có cùng lượng dùng silica fume (SF) như tính công tác, cường độ nén, độ bền trong dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 5M và khả năng chống thấm ion clorua. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng FA hoặc SL đã cải thiện tính công tác của hỗn hợp UHPC. Hàm lượng FA hoặc SL hợp lý để đạt được cường độ nén ở tuổi 28 ngày cao nhất là 20% thể tích thay thế xi măng. Tăng hàm lượng SL đến 30% sẽ làm tăng khả năng chống thấm ion clorua, cải thiện độ bền trong môi trường sun phat. FA cũng làm giảm mất khối lượng nhưng lại làm tăng đôi chút độ giãn nở của mẫu UHPC trong môi trường sun phat so với mẫu chỉ chứa SF. Sử dụng SL hoặc FA sẽ làm giảm sự mất khối lượng mẫu khi sử dụng đến 20% thể tích thay thế xi măng nhưng lại làm tăng chiều sâu ăn mòn trong dung dịch NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> của UHPC. Nhìn chung, khi sử dụng cùng hàm lượng phụ gia khoáng thì tính công tác của hỗn hợp chứa tro bay cải thiện hơn so với xỉ lò cao. Cường độ 28 ngày và độ bền trong dung dịch NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 5M hoặc H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5 của UHPC sử dụng xỉ lò cao lại tốt hơn so với UHPC sử dụng tro bay.

*Từ khoá:* bê tông chất lượng siêu cao; tro bay; xỉ lò cao; độ bền.

## EFFECT OF FLY ASH AND GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG ON DURABILITY OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE IN AGGRESSIVE SOLUTIONS

### Abstract

In this study, the effects of fly ash (FA), ground granulated blast-furnace slag (SL) on characteristics of UHPC containing the same content of silica fume (SF) such as workability, compressive strength, chloride-ion permeability, and durability in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5 and NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 5M solutions were assessed. The results showed that using SL or FA improves mini-cone slump flow of UHPC. With 20 vol.-% of FA or SL partially replacing cement, a maximum compressive strength at the age of 28 days of UHPC in normal temperature curing is obtained. Increasing the content of SL up to 30 vol.-% will enhance the chloride-ion penetration resistance and the durability in the sulfate solution of UHPC. FA also reduces the weight loss but slightly increases the expansion of the samples in the sulfate solution compared to the sample containing only SF. In the ammonium nitrate solution, the addition of FA and SL decrease the weight loss of the samples when using up to 20 vol.-% of the mineral admixture but increase the corrosion depth of UHPC. Generally, with the same amount of the mineral admixtures, FA induces higher slump flow of UHPC than SL. UHPC containing SL possesses higher 28-d compressive strength and better durability in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5 or NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 5M solution than UHPC containing FA.

*Keywords:* ultra-high performance concrete; fly ash; ground granulated blast-furnace slag; durability.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-05](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-05) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [anvt@nuce.edu.vn](mailto:anvt@nuce.edu.vn) (Ân, V. V. T.)

## 1. Đặt vấn đề

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) là một phân hạng bê tông mới sử dụng chất kết dính xi măng poóc lăng có độ chảy cao, cường độ nén ở tuổi 28 ngày thường đạt trên 120 MPa trong điều kiện dưỡng hộ thường, cường độ uốn lớn (khi sử dụng cốt sợi thép), độ rỗng rất thấp và độ bền rất cao [1–3]. Để đạt được các tính chất vượt trội này, UHPC thường sử dụng tỷ lệ nước/chất kết dính rất thấp, đồng thời có lượng dùng xi măng, silica fume và phụ gia siêu dẻo lớn [1, 2, 4]. Các hướng nghiên cứu chính hiện nay không chỉ tập trung nâng cao tính công tác, cường độ nén, uốn, độ dẻo dai của bê tông mà còn cần cải thiện vi cấu trúc, độ bền, giảm giá thành sản xuất, giảm lượng dùng xi măng, ... nhằm tăng tính thân thiện với môi trường của UHPC. Giá của UHPC không chỉ đơn thuần là giá của 1 m<sup>3</sup> bê tông hoặc 1 MPa cường độ mà còn là giá của 1 năm làm việc của kết cấu. Yếu tố độ bền, chi phí bảo dưỡng và vận hành công trình vì vậy cần được tính toán vào giá của UHPC và hơn nữa là giá của toàn bộ công trình sử dụng UHPC [5].

Với hàm lượng xi măng và silica fume (SF) rất lớn, UHPC thường có giá thành cao hơn nhiều so với bê tông thường hoặc bê tông chất lượng cao. Bên cạnh hiệu ứng pozzolanic của SF thì lượng dùng tối ưu của SF thường đạt đến 20-30% khối lượng xi măng nhằm tăng cường hiệu quả điền đầy trong UHPC [6–8]. Để thay thế một phần SF và xi măng, các loại phụ gia khoáng hoạt tính khác đã được sử dụng trong việc chế tạo UHPC [9–17]. Khi tro bay (FA) được sử dụng để thay thế một phần xi măng sẽ cải thiện tính công tác nhưng lại làm suy giảm cường độ nén của UHPC. Tro bay có kích thước hạt thô hoặc siêu mịn sẽ ảnh hưởng xấu hoặc không ảnh hưởng đến tính công tác của hỗn hợp UHPC khi sử dụng tro bay để thay thế hoàn toàn bột quắc. Việc sử dụng tro bay siêu mịn để thay thế một phần SF sẽ làm tăng lượng dùng phụ gia siêu dẻo và làm chậm tốc độ phát triển cường độ nén trong điều kiện dưỡng hộ ở nhiệt độ thường [11, 14, 15]. Nghiên cứu trước đây cũng chỉ ra rằng khi sử dụng tro bay siêu mịn để thay thế một phần xi măng sẽ cải thiện tính công tác, độ co ngót của hỗn hợp bê tông và làm giảm cường độ nén ở tuổi 3 và 7 ngày nhưng lại có thể làm tăng cường độ nén ở tuổi dài ngày cũng như khả năng kháng nứt của bê tông khi sử dụng với hàm lượng tro bay hợp lý [12, 16]. Xi lò cao nghiền mịn (SL) cũng đã được sử dụng nhằm thay thế một phần xi măng trong sản xuất UHPC [13, 17–19]. Kết quả nghiên cứu của các tác giả Thắng [13] và Ân [17, 18] đều cho thấy việc thay thế một phần xi măng bằng SL sẽ cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông. Cường độ nén ở tuổi 28 ngày sẽ đạt mức cao nhất khi sử dụng hàm lượng SL hợp lý. Trong khi đó các nghiên cứu khác [19, 20] lại cho thấy việc sử dụng SL hoặc FA thay thế xi măng đều làm giảm tính công tác của hỗn hợp bê tông. Cường độ nén ở tuổi 28 ngày của UHPC sử dụng 30% FA sẽ đạt cường độ cao nhất so với mẫu đối chứng và mẫu chứa 50% FA. Việc sử dụng FA sẽ làm giảm cường độ nén của UHPC so với mẫu đối chứng. Các kết quả về vi cấu trúc và độ bền của UHPC đều cho thấy khi sử dụng hàm lượng phụ gia khoáng FA hoặc SL hợp lý sẽ cải thiện các tính chất của UHPC trong các điều kiện ăn mòn so với mẫu đối chứng [20].

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng sử dụng của FA hoặc SL thay thế một phần xi măng đến các đặc tính của bê tông chất lượng siêu cao. Độ chảy loãng và cường độ nén của UHPC có sử dụng 0, 10, 20, 30% thể tích FA hoặc SL kết hợp với 15% thể tích SF thay thế xi măng đã được thí nghiệm. Hơn nữa, các dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5 và NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 5M cũng như thí nghiệm xác định mức độ thấm ion clorua cũng đã được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng và chủng loại phụ gia khoáng (PGK) đến độ bền của UHPC.

## 2. Nguyên vật liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Nguyên vật liệu

Xi măng PC40, silica fume không kết nén, tro bay, xỉ lò cao hạt hoá nghiền mịn là các vật liệu chất kết dính được sử dụng trong nghiên cứu. Tro bay sử dụng có kích thước hạt trung bình là 7,87  $\mu\text{m}$ , mịn hơn so với các loại tro bay thông dụng hiện nay. Cốt liệu dùng trong UHPC là cát quắc. Phụ gia siêu dẻo (SD) là loại phụ gia giảm nước tầm cao gốc polycarboxylate. Các đặc tính hóa lý của vật liệu sử dụng được trình bày ở Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Thành phần hóa của vật liệu chất kết dính, (%)

	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	MKN
Xi măng	22,56	3,47	5,29	64,21	0,14	0,61	2,26	0,81
Silica fume	92,60	1,85	0,87	0,32	0,39	1,20	0,85	1,60
Xỉ lò cao	35,30	0,45	16,50	33,10	0,18	2,00	8,66	0,40
Tro bay	58,70	7,31	22,89	0,98	0,33	3,60	0,85	4,41

Bảng 2. Tính chất cơ lý cơ bản của vật liệu

Các tính chất	Xi măng	Silica fume	Xỉ lò cao	Tro bay	Cát quắc
Khối lượng riêng, (g/cm <sup>3</sup> )	3,1	2,2	2,89	2,24	2,64
Kích thước hạt trung bình ( $\mu\text{m}$ )	21,1	0,151	8,92	7,87	313,45
Cường độ nén của xi măng (MPa)	3 ngày:	28,7	28 ngày:	47,9	

### 2.2. Chế tạo UHPC

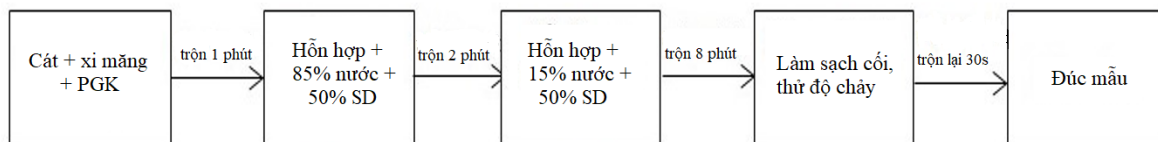
Bảng 3 trình bày 07 cấp phối bê tông UHPC sử dụng trong nghiên cứu. W/Fv là tỷ lệ thể tích của nước (gồm cả nước trong phụ gia siêu dẻo) và thể tích của vật liệu mịn (xi măng, phụ gia khoáng). Hàm lượng phụ gia siêu dẻo là tỷ lệ khối lượng của hàm lượng chất khô đối với chất kết dính. Thể tích hồ chất kết dính chiếm 57% thể tích bê tông, cao hơn 15% so với thể tích rỗng của cốt liệu không

Bảng 3. Thành phần cấp phối UHPC

Hỗn hợp	Xi măng	Cát quắc	Silica fume	Xỉ lò cao	Tro bay	Nước	SD	W/Fv
	(Kg/m <sup>3</sup> )					(%)		
SF-15	1001	1135	125,4	-	-	190	1,0	0,50
SL-10	884	1135	125,4	109,8	-	190	1,0	0,50
SL-20	766	1135	125,4	219,6	-	190	1,0	0,50
SL-30	648	1135	125,4	329,5	-	190	1,0	0,50
FA-10	884	1135	125,4	-	85,1	190	1,0	0,50
FA-20	766	1135	125,4	-	170,2	190	1,0	0,50
FA-30	648	1135	125,4	-	255,4	190	1,0	0,50

đậm chặt. Hàm lượng SF chiếm 15% thể tích chất kết dính trong tất cả các cấp phối. FA và SL lần lượt được sử dụng thay thế xi măng với hàm lượng tương ứng 0, 10, 20, 30% thể tích chất kết dính nhằm đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia khoáng đến các tính chất của UHPC.

Hỗn hợp UHPC được chế tạo theo quy trình trộn được nêu trong Hình 1. Mẫu thí nghiệm được tạo hình với thời gian rung trên bàn rung tạo hình 30 giây, dưỡng hộ trong phòng thí nghiệm và tháo khuôn sau 48 tiếng. Sau khi tháo khuôn, mẫu được dưỡng hộ trong nước cho đến ngày thí nghiệm.



Hình 1. Quy trình chế tạo bê tông chất lượng siêu cao

### 2.3. Phương pháp nghiên cứu

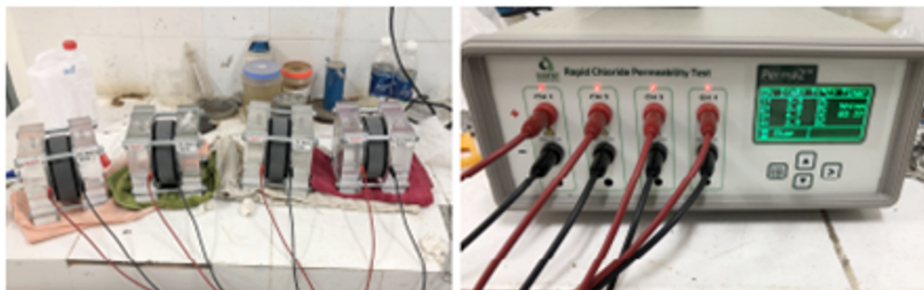
Độ chảy loãng của UHPC được xác định bởi côn đo loại nhỏ ( $h = 60$ ;  $d = 70$  và  $D = 100$ ) ngay sau khi trộn. Kết quả độ chảy loãng là giá trị trung bình của kết quả đo 2 đường kính vuông góc sau 2 phút tự chảy loãng của UHPC. Cường độ nén được thí nghiệm trên mẫu  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ .

Dung dịch axit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pH = 2,5 và dung dịch ammonium nitrate ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) 5M được sử dụng để đánh giá khả năng ăn mòn của UHPC sử dụng các phụ gia khoáng khác nhau khi ngâm trong các môi trường ăn mòn này. Mỗi cấp phối UHPC sử dụng 3 mẫu có kích thước  $10 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  đã được tạo hình với đầu đo chiều dài gắn ở 2 đầu và dưỡng hộ trong nước đến 28 ngày tuổi. Các mẫu thí nghiệm sẽ được ngâm trong dung dịch axit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (pH = 2,5) ở điều kiện phòng thí nghiệm với thể tích dung dịch/thể tích bê tông là 4. Để duy trì độ pH, dung dịch ngâm mẫu sẽ được đo độ pH bởi pH kế và một lượng  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (pH = 1) sẽ được tính toán và bổ sung vào hàng tuần. Dung dịch  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ngâm mẫu sẽ được thay mới sau 2 tháng ngâm mẫu. Sự thay đổi khối lượng và chiều dài mẫu UHPC sẽ được xác định hàng tuần trong suốt quá trình thí nghiệm. Sự thay đổi kích thước của mẫu UHPC trong dung dịch  $\text{H}_2\text{SO}_4$  được xác định trên mẫu thử với kích thước  $10 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . 3,5 mẫu có kích thước  $10 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  ở tuổi 28 ngày được ngâm vào dung dịch  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  5M để xác định sự thay đổi khối lượng và chiều sâu lớp bê tông bị ăn mòn theo thời gian. Chiều sâu lớp bê tông bị ăn mòn được xác định trên tiết diện ngang  $10 \times 40 \text{ mm}^2$  được cắt ra từ nửa mẫu ngâm trong dung dịch thông qua chất chỉ thị màu phenolphthalein và kỹ thuật chụp, phóng đại ảnh. Kết quả đo là giá trị trung bình của 5 điểm đo trên tiết diện ngang mẫu (Hình 2).



Hình 2. UHPC bị ăn mòn trong dung dịch  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  5M

Thí nghiệm đo khả năng chống thấm ion clorua của UHPC được thực hiện dựa trên tiêu chuẩn ASTM C1202-19 [21]. Thí nghiệm được thực hiện trên 03 mẫu UHPC có đường kính 100 mm và chiều dày 50 mm được cắt ra từ mẫu hình trụ  $100 \times 200 \text{ mm}^2$  ở 28 ngày tuổi. Mặt bên của mẫu được sơn phủ bằng epoxy. Sau khi được bão hoà nước trong bình hút chân không, mẫu được lắp vào các khoang có chứa dung dịch NaCl 3% và NaOH 0,3N. Tổng số culông truyền qua mẫu dưới hiệu điện thế 60 V trong 6 tiếng được sử dụng để đánh giá khả năng thấm ion clorua của bê tông (Hình 3).



Hình 3. Thí nghiệm đo độ thấm ion clorua

### 3. Kết quả thực nghiệm và bàn luận

#### 3.1. Tính công tác và cường độ nén

Kết quả độ chảy loang và cường độ nén ở tuổi 28 ngày được đưa ra trên Bảng 4 đều cho thấy tất cả các hỗn hợp bê tông UHPC đều có độ chảy loang đạt trên 260 mm và cường độ nén vượt quá 130 MPa. Có thể thấy rằng khi tăng hàm lượng sử dụng xỉ lò cao hoặc tro bay đã cải thiện rõ rệt tính công tác của hỗn hợp UHPC. Tính công tác của hỗn hợp sử dụng FA tốt hơn so với sử dụng SL nhưng cường độ nén ở các tuổi tương ứng của hỗn hợp sử dụng SL lại cao hơn so với hỗn hợp sử dụng FA khi có cùng hàm lượng phụ gia khoáng sử dụng. Hỗn hợp sử dụng 20% SL cho cường độ nén cao nhất ở cả 7 và 28 ngày tuổi. Sử dụng FA với hàm lượng 20% trong thành phần chất kết dính (FA-20) cho cường độ nén ở tuổi 28 ngày cao nhất. Khi tăng hàm lượng FA sẽ làm giảm cường độ nén ở tuổi 7 ngày. Khi so sánh cường độ của các hỗn hợp có chứa FA hoặc SL so với cường độ nén của mẫu chỉ chứa silica fume (SF-15) cho thấy việc sử dụng phối hợp FA- SF hoặc SL- SF đã cải thiện cường độ nén của bê tông ở tuổi dài ngày. Ở 7 ngày tuổi, việc sử dụng tro bay sẽ làm giảm cường độ nén của bê tông so với mẫu không chứa tro bay. Sự giảm cường độ nén của mẫu có chứa xỉ lò cao so với mẫu không chứa xỉ lò cao ở tuổi 7 ngày chỉ xảy ra khi hàm lượng xỉ lò cao sử dụng đến 30% thể tích chất kết dính (SL-30). Kết quả nghiên cứu của Yu và cs. [9] lại cho thấy khi tăng hàm lượng sử dụng của SL hoặc FA thay thế xi măng thì lượng cần nước của hỗn hợp UHPC sẽ giảm. Lượng cần nước của hỗn hợp có chứa FA thấp hơn so với hỗn hợp có chứa SL do hiệu ứng ổ bi và có thể sự tương hợp giữa phụ gia siêu dẻo và của FA. Cường độ nén ở 28 và 91 ngày của mẫu có chứa SL cao hơn mẫu có chứa FA và đều thấp hơn mẫu đối chứng [9]. Ganesh và cs. [22] cũng cho thấy việc cải thiện độ chảy loang của hỗn hợp UHPC khi sử dụng đến 60% khối lượng SL thay thế xi măng. Ở chế độ dưỡng hộ thường, cường độ nén của UHPC có chứa 20% khối lượng SL thay thế xi măng sẽ đạt cường độ nén lớn nhất và cao hơn cường độ của mẫu đối chứng chỉ sử dụng SF.

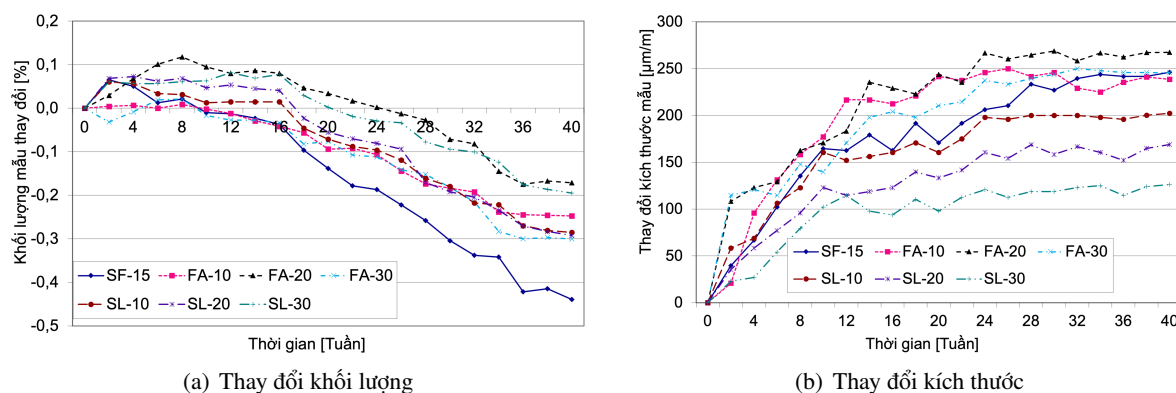
Bảng 4. Tính chất của bê tông chất lượng cao sử dụng các loại phụ gia khoáng

Hỗn hợp	SF-15	SL-10	SL-20	SL-30	FA-10	FA-20	FA-30
Độ chảy loang, (mm)	260	265	280	300	270	300	320
Cường độ nén 7 ngày, (MPa)	115,9 (3,7)	116,4 (4,2)	126,7 (2,5)	109,2 (3,9)	113,2 (7,1)	107,9 (5,6)	93,2 (2,7)
Cường độ nén 28 ngày, (MPa)	134,6 (4,1)	138,9 (2,3)	161,4 (6,4)	155,8 (8,6)	138,1 (8,7)	150,6 (6,9)	142,4 (4,6)

Ghi chú: Giá trị trong ngoặc đơn là độ lệch chuẩn của kết quả.

### 3.2. Trong dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5

Kết quả sự thay đổi khối lượng và kích thước mẫu thử theo thời gian ngâm mẫu trong dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5 được thể hiện trên Hình 4. Trong những tuần đầu, các mẫu UHPC đều tăng khối lượng sau đó các mẫu gần như không thay đổi khối lượng đến khoảng tuần 16 trong dung dịch. Sự suy giảm khối lượng mẫu thử bắt đầu tăng lên từ tuần thứ 16 trở đi (Hình 4(a)). Trong khi đó, trong khoảng 10 đến 14 tuần đầu tiên trong dung dịch, kích thước các mẫu thử tăng gần như là tuyến tính. Tốc độ giãn nở mẫu ở các tuần đầu này nhanh hơn, sau đó thì giảm dần (Hình 4(b)). Kết quả trên Hình 4 cũng cho thấy càng tăng hàm lượng sử dụng SL thì càng giảm sự mất khối lượng cũng như độ giãn nở của mẫu thử trong dung dịch. Nghiên cứu trước đây cũng cho thấy SL nâng cao độ bền của UHPC sử dụng xi măng có hàm lượng C3A thấp trong dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5 so với UHPC chỉ sử dụng SF [23]. Việc sử dụng FA cũng cải thiện khả năng mất khối lượng mẫu trong dung dịch. Tuy nhiên, độ giãn nở của các mẫu thử có chứa FA có phần cao hơn đôi chút ở thời gian đầu nhưng đến 40 tuần thì không có sự khác biệt nhiều với mẫu chỉ chứa SF. Điều này cho thấy độ bền của UHPC sử dụng SL tốt hơn so với mẫu UHPC sử dụng FA khi ngâm mẫu trong dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5.

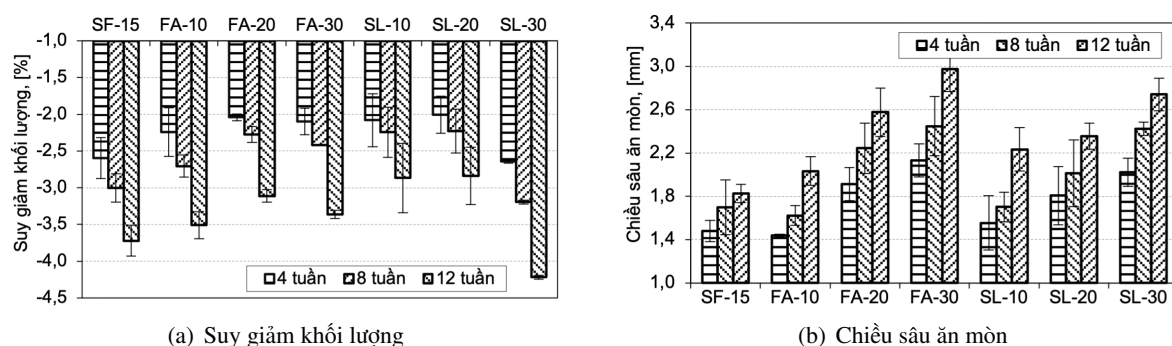


Hình 4. Độ bền của UHPC trong dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH 2,5 theo thời gian

### 3.3. Trong dung dịch NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 5M

Hình 5 thể hiện kết quả mất khối lượng và tăng chiều sâu ăn mòn của UHPC sử dụng hàm lượng phụ gia FA và SL khác nhau với thời gian ngâm mẫu 4, 8 và 12 tuần trong dung dịch NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 5M. Kết quả cho thấy rằng theo thời gian ngâm mẫu trong dung dịch thì khối lượng mẫu bị mất dần đi và

chiều sâu lớp bê tông bị ăn mòn tăng lên. Ngoại trừ mẫu có chứa 30% thể tích SL thay thế xi măng (SL-30), sự kết hợp giữa SF và FA hoặc SL làm giảm mức độ mất khối lượng của bê tông trong dung dịch so với việc chỉ sử dụng SF. Khi sử dụng 20% thể tích FA hoặc SL thay thế xi măng sẽ làm khối lượng bê tông mất đi trong dung dịch là nhỏ nhất (Hình 5(a)). Kết quả chiều sâu lớp bê tông bị ăn mòn (Hình 5(b)) cho thấy khi tăng hàm lượng sử dụng tro bay hoặc xỉ lò cao sẽ làm giảm khả năng chống ăn mòn của bê tông. Khả năng chống lại sự xâm nhập của tác nhân ăn mòn vào trong bê tông sử dụng SL tốt hơn so với bê tông sử dụng FA. Kết quả cũng tương tự đối với ảnh hưởng của SL đến độ bền của hỗn hợp UHPC sử dụng xi măng có hàm lượng C3A thấp trong dung dịch  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  5M [24], SL cải thiện khả năng chống lại sự mất khối lượng nhưng lại làm tăng chiều dày lớp ăn mòn của mẫu UHPC trong dịch dịch so với mẫu chỉ chứa SF.



Hình 5. Độ bền của UHPC trong dung dịch  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  5M theo thời gian

### 3.4. Thẩm ion clorua

Bảng 5. Kết quả thẩm ion clorua của UHPC

Hỗn hợp	Điện lượng truyền qua (Culông)		Hỗn hợp	Điện lượng truyền qua (Culông)	
	Mẫu	Trung bình		Mẫu	Trung bình
SF-15	69,30	68,10	FA-10	71,14	67,66
	65,35			64,30	
	69,65			67,55	
SL-10	75,20	67,79	FA-20	62,98	63,60
	58,60			61,58	
	69,57			66,23	
SL-20	60,80	65,87	FA-30	64,21	64,15
	70,10			65,26	
	66,70			62,98	
SL-30	69,20	60,70			
	55,10				
	57,80				

Kết quả thí nghiệm thẩm ion clorua trên Bảng 5 cho thấy mức độ thẩm ion clorua của tất cả các cấp phối bê tông đều đạt dưới 100 Culông, là mức được phân vào mức độ không bị thẩm. Nhìn chung, khi sử dụng phụ gia FA hoặc SL kết hợp với SF đều cho khả năng chống thẩm ion clorua cao hơn

so với mẫu chỉ sử dụng SF. Khi tăng hàm lượng SL sử dụng lên trong khoảng thí nghiệm thì mức độ thấm clorua qua mẫu bê tông có giảm nhẹ. Đối với FA thì cấp phối sử dụng 20% thể tích tro bay thay thế xi măng dường như sẽ cho tổng điện lượng truyền qua mẫu thấp hơn so với cấp phối sử dụng với hàm lượng tro bay khác. Kết quả này phù hợp với các kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia FA, SL đến khả năng chống thấm của UHPC trước đây. Kết quả nghiên cứu của Ganesh và cs. [22] cũng cho thấy khi tăng hàm lượng SL từ 0% đến 40% thì khả năng chống thấm clorua của UHPC tăng lên, sau đó giảm xuống khi sử dụng hàm lượng SL ở mức 60 và 80%.

#### 4. Kết luận

Dựa vào các kết quả thực nghiệm thu được trong nghiên cứu, các kết luận sau đây được rút ra:

- Việc sử dụng FA hoặc SL thay thế một phần xi măng trong chế tạo UHPC sẽ cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông. Khi sử dụng cùng hàm lượng phụ gia khoáng thì độ chảy loãng của hỗn hợp có chứa FA cao hơn so với hỗn hợp có chứa SL nhưng cường độ nén của hỗn hợp có chứa SL lại cao hơn. Với cùng lượng dùng 20% thì cường độ nén ở tuổi 7 và 28 ngày đối với bê tông có chứa SL và ở tuổi 28 ngày đối với bê tông sử dụng FA là cao nhất. Tuy nhiên, đối với mẫu sử dụng FA thì hàm lượng FA càng cao thì cường độ ở tuổi 7 ngày càng thấp.

- Khi tăng hàm lượng SL thì càng cải thiện độ bền của UHPC trong dung dịch  $H_2SO_4$  pH 2,5, tăng khả năng chống thấm clorua so với mẫu đối chứng chỉ chứa SF. Trong dung dịch  $NH_4NO_3$  5M, chiều sâu UHPC bị ăn mòn càng lớn khi hàm lượng sử dụng SL càng tăng trong khi mất khối lượng của mẫu có chứa 20% SL là thấp nhất.

- Mức độ chống ăn mòn khối lượng trong trong dung dịch sun phat và dung dịch amoni cũng như chống thấm clorua của mẫu UHPC có chứa FA và SF đã được cải thiện so với mẫu chỉ chứa SF. Trong khi đó, mức độ giãn nở trong môi trường sun phat cũng như chiều sâu ăn mòn trong dung dịch amoni của mẫu có chứa FA lại cao hơn so với mẫu đối chứng.

- Khi sử dụng cùng hàm lượng phụ gia khoáng thì độ bền trong dung dịch  $NH_4NO_3$  5M và dung dịch  $H_2SO_4$  pH 2,5 của UHPC sử dụng SL tốt hơn so với UHPC sử dụng FA. Khả năng chống thấm ion clorua của UHPC sử dụng FA hoặc SL thay thế một phần xi măng là rất cao ( $< 100$  Culông) và không có sự khác biệt nhiều khi thay đổi hàm lượng các phụ gia khoáng trong khoảng 30% thể tích thay thế xi măng.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE) với đề tài có Mã số 25-2019/KHXD-TĐ.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Schmidt, M., Fehling, E. (2005). Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. *The 7th International Symposium on the Utilization of High-strength- and High-performance-concrete*, 228(1):51–78.
- [2] Schmidt, M. (2007). Von der Nanotechnologie zum Ultra-Hochfesten Beton. *The 16th International Conference on Building materials (ibausil)*, Weimar, Germany.
- [3] ASTM C1856/C1856M-17 (2017). *Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [4] Shah, S. P. (1995). Recent Trends in the Science and Technology of Concrete. *Proceedings of the International RILEM 26*.



- [5] Perry, V. H. (2011). *Sustainable UHPC Bridges for the 22nd Century*. Annual Transportation Association of Canada (TAC) Conference and Exhibition, Alberta, Canada.
- [6] Richard, P., Cheyrezy, M. (1995). [Composition of reactive powder concretes](#). *Cement and Concrete Research*, 25(7):1501–1511.
- [7] de Larrard, F., Sedran, T. (1994). [Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model](#). *Cement and Concrete Research*, 24(6):997–1009.
- [8] Park, J. J., Kang, S. T., Koh, K. T., Kim, S. W. (2008). Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion. *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel Germany, 105–112.
- [9] Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2015). [Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete \(UHPC\) with efficient cement and mineral admixtures uses](#). *Cement and Concrete Composites*, 55:383–394.
- [10] Kim, H., Koh, T., Pyo, S. (2016). [Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags](#). *Construction and Building Materials*, 123:153–160.
- [11] Ferdosian, I., Camões, A., Ribeiro, M. (2017). [High-volume fly ash paste for developing ultra-high performance concrete \(UHPC\)](#). *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(1):e157–e161.
- [12] An, V. V. T. (2018). [Study on using maximum amount of fly ash in producing ultra-high performance concrete](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 12(3):51–61.
- [13] Thăng, N. C. (2016). *Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng phụ gia khoáng và vật liệu sẵn có ở Việt Nam*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [14] Gerlicher, T., Leonhardt, S., Heinz, D., Urbonas, L. (2009). Einfluss des Steinkohlenflugascheinsatzes auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von ultrahochfestem Beton. *The 17th International Conference on Building materials (ibausil)*, Weimar, Germany.
- [15] Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., Karabulut, A. Ş. (2009). [Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes](#). *Construction and Building Materials*, 23(3):1223–1231.
- [16] Ân, V. V. T., Hải, L. Đ. (2019). [Ảnh hưởng của nano carbon và tro bay đến cơ ngót và khả năng kháng nứt của bê tông chất lượng siêu cao](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 13 (2V):32–40.
- [17] Van, V.-T.-A. (2013). *Characteristics of rice husk ash and application in Ultra-High Performance Concrete*. PhD thesis, Bauhaus University Weimar, Germany.
- [18] Van, V.-T.-A., Ludwig, H.-M. (2012). Proportioning optimization of UHPC containing rice husk ash and ground granulated blast-furnace slag. *Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany*, 197–205.
- [19] Ahmed, T., Elchalakani, M., Karrech, A., Ali, M. M., Guo, L. (2021). [Development of ECO-UHPC with very-low-C3A cement and ground granulated blast-furnace slag](#). *Construction and Building Materials*, 284:122787.
- [20] Tahwia, A. M., Elgendy, G. M., Amin, M. (2021). [Durability and microstructure of eco-efficient ultra-high-performance concrete](#). *Construction and Building Materials*, 303:124491.
- [21] ASTM C1202-19 (2019). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [22] Ganesh, P., Murthy, A. R. (2019). [Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material](#). *Construction and Building Materials*, 197:667–680.
- [23] An, V. V. T. (2015). Nghiên cứu nâng cao độ bền của bê tông chất lượng siêu cao sử dụng trong môi trường axit sulfuric. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, (24):26–33.
- [24] An, V. V. T. (2016). Durability of ultra-high performance concrete in NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> solution. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, (31):96–101.