

# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM KHẢ NĂNG CHỐNG XÂM THỰC AXIT CỦA BÊ TÔNG SỬ DỤNG XỈ LÒ CAO VÀ TRO BAY

Nguyễn Văn Chính<sup>a,\*</sup>, Phạm Công Tuấn Trung<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng, 54 đường Nguyễn Lương Bằng, quận Liên Chiểu, thành phố Đà Nẵng, Việt Nam*

<sup>b</sup>*Thành đoàn Đà Nẵng, 71 đường Xuân Thủy, thành phố Đà Nẵng, Việt Nam*

*Nhận ngày 11/05/2021, Sửa xong 18/06/2021, Chấp nhận đăng 21/06/2021*

## Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của xỉ lò cao S95 và tro bay loại F từ nhà máy nhiệt điện Vũng Áng đến khả năng chống xâm thực axit của bê tông. Tỷ lệ các thành phần cấp phối là chất kết dính : cát : đá : nước = 1 : 2 : 3 : 0,6. Xi măng portland được thay thế bởi xỉ lò cao S95 và tro bay loại F với tổng tỷ lệ thay thế theo khối lượng là 20%, trong khi chất kết dính được định nghĩa bằng tổng của xi măng, xỉ lò cao và tro bay. Thí nghiệm về khả năng chống xâm thực axit sunfuric được thực hiện trên mẫu lập phương kích thước 100 × 100 × 100 mm sau khi ngâm 28, 56 và 90 ngày. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng nằm trong giới hạn nghiên cứu, xỉ lò cao và tro bay đều góp phần nâng cao độ linh động của vữa bê tông. Xi lò cao và tro bay đều nâng cao khả năng chống xâm thực axit của bê tông thông qua việc giảm sự hư hại bề mặt, giảm sự hao hụt khối lượng và sự suy giảm cường độ chịu nén. Ngoài ra, khả năng chống xâm thực axit sunfuric của tro bay lớn hơn so với xỉ lò cao.

*Từ khoá:* cường độ chịu nén; xâm thực axit; xỉ lò cao; tro bay; bê tông.

## EXPERIMENTAL STUDY ON ACID RESISTANCE OF CONCRETE CONTAINING GGBS AND FLY ASH

### Abstract

The paper investigated the effect of GGBS, fly ash on the acid sulfuric resistance of concrete. The mix composition was cementitious material (OPC + GGBS + fly ash); sand: coarse aggregate: water of 1 : 2 : 3 : 0.6 in which 20% by mass of total cementitious materials was replaced by GGBS and class F fly ash. The tests were conducted on the cubes dimensions of 100 × 100 × 100 mm after immersing in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution of 28, 56 and 90 days. The results show that within the range of this investigation, both GGBS and fly ash improved the workability of fresh concrete. Both GGBS and fly ash increase the acid sulfuric resistance of concrete by reduction in surface deterioration, mass loss and compressive strength loss. In addition, fly ash has better acid sulfuric resistance of concrete than GGBS.

*Keywords:* compressive strength; acid resistance; GGBS; fly ash; concrete.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(3V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(3V)-07) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

## 1. Giới thiệu

Độ bền của bê tông là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến sự làm việc và tuổi thọ của công trình bê tông cốt thép. Các tác nhân gây hại đến kết cấu bê tông cốt thép bao gồm sự tấn công do axit, cacbonat, sulphat và clorua. Đây là những nguyên nhân hàng đầu làm bê tông bị bong tróc, suy giảm độ bền của bê tông và ăn mòn cốt thép. Các thành phần như CSH, portlandite, sulfoaluminates trong bê tông cân bằng với các chất lỏng trong lỗ rỗng được thể hiện qua độ pH (12,5) cùng với sự có mặt

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [nvchinh@dut.udn.vn](mailto:nvchinh@dut.udn.vn) (Chính, N. V.)

của ion OH<sup>-</sup> (nằm trong NaOH và KOH). Khi bê tông bị xâm thực bởi axit, những thành phần này có thể bị phá hủy. Tốc độ phá hủy bê tông do axit phụ thuộc vào khả năng thấm của bê tông, hàm lượng và loại axit [1]. Một trong những loại axit mạnh có thể phá hoại bê tông đó là axit sulphuric (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Có nhiều nghiên cứu đã và đang thực hiện nhằm nâng cao độ bền của bê tông Portland dưới tác động của axit bằng cách sử dụng các loại vật liệu thay thế một phần hoặc toàn bộ xi măng Portland trong việc sản xuất bê tông như tro bay và tro xỉ lò cao.

Tro bay là một trong những vật liệu pozzolan phổ biến từ các nhà máy nhiệt điện và được sử dụng như loại phụ gia khoáng thay thế cho xi măng từ nhiều năm qua vì có tính kinh tế, bảo vệ môi trường cũng như cải thiện nhiều đặc tính khác của bê tông như cải thiện độ linh động, nâng cao cường độ và độ bền [2–5]. Nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng tro bay nâng cao khả năng chống ăn mòn axit sunfuric khi được sử dụng thay thế xi măng trong bê tông [3, 6–9] hoặc vữa xi măng [10]. Điều này được giải thích là do hoạt chất pozzolan trong tro bay phản ứng với Ca(OH)<sub>2</sub> từ quá trình thủy hóa xi măng để hình thành CSH, đồng thời làm cho bê tông đặc chắc hơn, giảm độ rỗng [11]. Hàm lượng tro bay được sử dụng thay thế xi măng nhằm nâng cao khả năng chống xâm thực axit trong bê tông hoặc vữa xi măng phụ thuộc vào loại axit tác động [8, 10].

Tro xỉ lò cao cũng là một loại vật liệu pozzolan thu được từ quá trình sản xuất gang và cũng được sử dụng như phụ gia khoáng để thay thế xi măng Portland trong bê tông vì có chứa hàm lượng lớn silica [12, 13]. Tương tự như tro bay thì tro xỉ lò cao trong thành phần cấp phối sẽ tác dụng với Ca(OH)<sub>2</sub> từ quá trình thủy hóa xi măng Portland để hình thành nên CSH có hàm lượng thấp Cao/SiO<sub>2</sub>, đó là CaO · SiO<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O góp phần nâng cao các đặc tính cường độ, độ linh động, độ bền và khả năng chống thấm của bê tông [14, 15]. Những nghiên cứu về ảnh hưởng của tro xỉ lò cao đối với khả năng chống xâm thực axit của bê tông cũng chỉ ra rằng xỉ lò cao góp phần nâng cao khả năng chống xâm thực axit của vữa hoặc bê tông vì việc hình thành CSH có hàm lượng thấp Cao/SiO<sub>2</sub> tương tự như tro bay [16, 17].

Bài báo này trình bày nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của xỉ lò cao và tro bay tại Việt Nam sử dụng để thay thế một phần xi măng trong bê tông đối với khả năng chống lại sự tấn công của dung dịch axit sulphuric (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 10%. Sự tấn công của axit sunfuric vào kết cấu bê tông rất phổ biến trên thế giới khi các lượng chất thải từ nhà máy công nghiệp chứa hàm lượng lớn loại axit này. Các tỉ lệ xỉ lò cao và tro bay thay thế xi măng được nghiên cứu khác nhau với tổng tỉ lệ thay thế là 20% theo khối lượng của chất kết dính. Các thông số kỹ thuật được đưa vào đánh giá bao gồm sự hư hại bề mặt của bê tông, sự suy giảm khối lượng và sự suy giảm cường độ chịu nén.

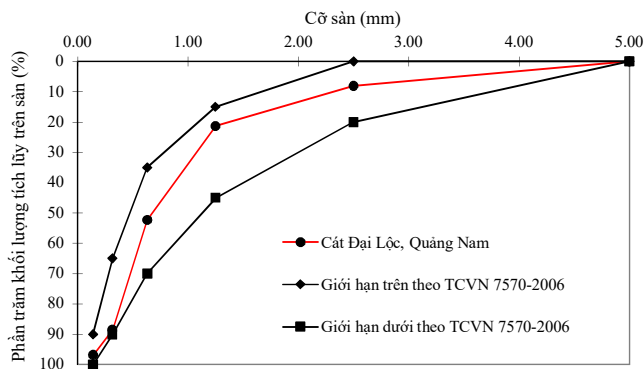
## 2. Chương trình thí nghiệm

### 2.1. Vật liệu

Các loại vật liệu địa phương được sử dụng trong nghiên cứu này. Loại cát sử dụng là cát dúc Đại Lộc, Quảng Nam với các đặc tính cơ lý được trình bày ở Bảng 1 và thành phần hạt được thể hiện ở Hình 1, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [18]. So với TCVN 7570-2006 thì loại cát được sử dụng có mô đun độ lớn bằng 2,67 nằm trong khoảng 2,0 đến 3,3 nên được xếp vào loại cát thô.

Cốt liệu lớn là đá 1 - 2 cm tại Phước Tường (Cẩm Lệ, Đà Nẵng) có thành phần cỡ hạt được trình bày ở Hình 2 đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006. Các chỉ tiêu cơ lý của đá Phước Tường (Cẩm Lệ, Đà Nẵng) cũng được trình bày ở Bảng 2 đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [18].

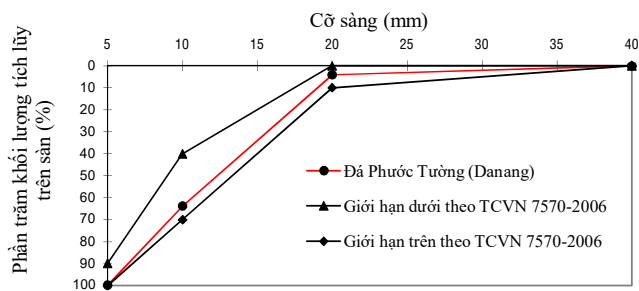
Xi măng được sử dụng là loại Sông Gianh PCB 40 có các thông số kỹ thuật được trình bày ở Bảng 3, đáp ứng TCVN 6260:2009 [19].



Hình 1. Thành phần cỡ hạt của cát Đại Lộc, Quảng Nam

Bảng 1. Đặc tính cơ lý của cát Đại Lộc, Quảng Nam

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả
Mô đun độ lớn của cát Mđl	-	2,67
Tổng hàm lượng bụi sét	%	0,94
Khối lượng thể tích xốp	kg/m <sup>3</sup>	1410
Khối lượng thể tích bão hòa	g/cm <sup>3</sup>	2,612
Khối lượng thể tích khô	g/cm <sup>3</sup>	2,583
Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2,660
Độ hút nước	-	-
Hàm lượng tạp chất hữu cơ	-	Sáng hơn màu chuẩn



Hình 2. Thành phần cỡ hạt của đá Phước Tường (Cẩm Lệ, Đà Nẵng)

Bảng 2. Các chỉ tiêu cơ lý của đá Phước Tường (Cẩm Lệ, Đà Nẵng)

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả
Tỷ lệ hạt thoi dẹt	%	15
Khối lượng thể tích xốp	kg/m <sup>3</sup>	1404
Khối lượng thể tích bão hòa	g/cm <sup>3</sup>	2,758
Khối lượng thể tích khô	g/cm <sup>3</sup>	2,733
Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2,803
Độ hút nước	%	0,909
Độ hồng	%	48,6
Độ ép vỡ trong xy lanh	%	10,5

Bảng 3. Các chỉ tiêu cơ lý của xi măng Sông Gianh PCB40

Chỉ tiêu cơ lý	Đơn vị	Kết quả	TCVN 6260-2009
Độ mịn	%	$\leq 4$	$\leq 10$
Thời gian bắt đầu đông kết	phút	$\geq 100$	$\geq 45$
Thời gian kết thúc đông kết	phút	$\leq 360$	$\leq 420$
Độ ổn định thể tích theo pp Le Chaterlier	mm	$\leq 5$	$\leq 10$
Cường độ nén mẫu thử lúc 3 ngày	MPa	$\geq 20$	$\geq 18$
Cường độ nén mẫu thử lúc 28 ngày	MPa	$\geq 44$	$\geq 40$
Hàm lượng $\text{SO}_3$	%	$\leq 3$	$\leq 3,5$

Tro bay dùng cho bê tông và vữa xây dựng cần đáp ứng chỉ tiêu chất lượng quy định theo TCVN 10302:2014 - Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng [20]. Tro bay sử dụng trong chương trình thí nghiệm này là tro bay nhà máy nhiệt điện Vũng Áng 1 (Hà Tĩnh) với các thông số kỹ thuật thể hiện trong Bảng 4 đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 10302:2014 [20] và được xếp vào loại F vì có tổng hàm lượng ôxit  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ .

Bảng 4. Thông số kỹ thuật của tro bay Vũng Áng 1

Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	TCVN 10302:2014
Tổng hàm lượng ôxit $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	%	79,83	Min 45
Hàm lượng lưu huỳnh, hợp chất lưu huỳnh tính quy đổi ra $\text{SO}_3$	%	0,08	Max 6
Hàm lượng canxi ôxit tự do $\text{CaO}_{\text{td}}$	%	0,02	Max 4
Hàm lượng mất khi nung MKN	%	6,72	Max 15
Hàm lượng kiềm có hại (kiềm hòa tan)	%	< 0,01	Max 0,1

Xi lò cao (GGBFS – Granulated Ground Blast Furnace Slag) là dạng rác thải rắn, sản phẩm phụ của quá trình sản xuất gang trong lò cao. Quy trình sản xuất xỉ hạt lò cao nghiền mịn không quá phức tạp và khá phổ biến tại nhiều quốc gia phát triển trên thế giới. Sau khi được đưa vào dây chuyền nghiền, xỉ hạt được nghiền mịn đến tỷ diện lớn hơn  $5.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , đạt tiêu chuẩn loại S95 theo TCVN 11586:2016, mịn hơn xi măng và trở thành một loại phụ gia khoáng hoạt tính rất tốt cho xi măng, bê tông. Xi lò cao được dùng trong thí nghiệm này là loại S95 Hòa Phát có thành phần hóa học được thể hiện tại Bảng 5 và một số chỉ tiêu chất lượng được thể hiện tại Bảng 6.

Bảng 5. Thành phần hóa học trung bình của xỉ lò cao Hòa Phát S95

Oxit	FeO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$
%	0,38	33,85	13,74	40,08	8,16	0,25	0,82	0,68



Bảng 6. Một số chỉ tiêu chất lượng của Xi lò cao Hòa Phát S95

Chỉ tiêu	Đơn vị	S95 Hòa Phát	TCVN 11586:2016
Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2,8	≥ 2,8
Bề mặt riêng	cm <sup>2</sup> /g	4500	≥ 4000
Chỉ số hoạt tính cường độ 7 ngày	%	83	≥ 75
Chỉ số hoạt tính cường độ 28 ngày	%	96	≥ 95
Tỷ lệ lưu động	%	92	≥ 90
Độ ẩm	%	0,8	≤ 1,0
Hàm lượng Magie oxit (MgO)	%	8,16	≤ 10,0
Hàm lượng anhydric sunfuric (SO <sub>3</sub> )	%	1,0	≤ 4,0
Hàm lượng ion Cl-	%	0,001	≤ 0,02
Hàm lượng mất khi nung (MKN)	%	1,0	≤ 3,0

## 2.2. Thành phần cấp phối của các hỗn hợp bê tông

Thành phần cấp phối của các tổ hợp mẫu được trình bày ở Bảng 7. Các mẫu thí nghiệm được chia làm 6 nhóm cấp phối khác nhau (M1, M2, M3, M4, M5, M6), trong đó mỗi nhóm cấp phối gồm 21 mẫu lập phương với tỉ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) = 0,6, trong đó chất kết dính được định nghĩa là tổng của xi măng, xỉ lò cao và tro bay. Trong mỗi nhóm cấp phối xỉ lò cao và tro bay lần lượt được sử dụng để thay thế một phần xi măng với tỉ lệ tương ứng là 0% (mẫu đối chứng), 5%, 15% và 20%.

Bảng 7. Thành phần cấp phối của các hỗn hợp bê tông

Tên mẫu	Thành phần vật liệu theo xi măng			Đá 1-2	Cát	N/CKD
	Xi măng	Xỉ lò cao S95	Tro bay			
M1 (100,0,0)	1	0	0	3	2	0,6
M2 (80,20,0)	0,8	0,2	0	3	2	0,6
M3 (80,15,5)	0,8	0,15	0,05	3	2	0,6
M4 (80,10,10)	0,8	0,10	0,10	3	2	0,6
M5 (80,5,15)	0,8	0,05	0,15	3	2	0,6
M6 (80,0,20)	0,8	0	0,20	3	2	0,6

## 2.3. Đúc mẫu và dưỡng hộ mẫu

Cốt liệu trước khi đúc mẫu được phơi khô, đảm bảo các mẻ được trộn cùng điều kiện. Toàn bộ hỗn hợp bê tông được trộn đều bằng máy trộn bê tông tự do dung tích 350 lít. Trước hết cho máy chạy không tải một vài vòng, nếu trộn mẻ đầu tiên thì đổ một ít nước cho ướt vỏ cốt và bàn gạt, như vậy mẻ đầu tiên không bị mất nước do vỏ cốt và bàn gạt hút nước và không làm vữa bê tông dính vào cốt. Tiếp theo, đổ 15% ÷ 20% lượng nước, sau đó đổ xi măng và cốt liệu cùng một lúc đồng thời đổ dần và liên tục phần nước còn lại, trộn đến khi đều. Độ sụt hỗn hợp bê tông được tiến hành thử ngay không chậm hơn 5 phút, các mẫu thí nghiệm kích thước 100 × 100 × 100 mm cũng được tiến hành đúc ngay không chậm hơn 15 phút. Số lượng mẫu đúc và quy trình dưỡng hộ mẫu được trình bày chi tiết trong các thí nghiệm tiếp theo.

#### 2.4. Thí nghiệm xác định độ sụt

Độ sụt của bê tông được thí nghiệm dựa theo tiêu chuẩn TCVN 3106:1993 [21]. Độ sụt của hỗn hợp bê tông được xác định ngay sau khi trộn bê tông. Số liệu đo được làm tròn đến 0,5 cm.

#### 2.5. Thí nghiệm xác định sự hư hại bề mặt và mất mát khối lượng do xâm thực axit

Khả năng chống xâm thực axit của bê tông được thí nghiệm dựa trên việc hiệu chỉnh Tiêu chuẩn Mỹ ASTM C267- Tiêu chuẩn thí nghiệm về khả năng chống xâm thực hóa của vữa và bê tông [22]. Dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% được tạo ra bằng cách hòa tan axit sunfuric  $H_2SO_4$  98% với nước máy. Cần lưu ý rằng dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% không phải là điều kiện làm việc thực tế của kết cấu bê tông, tuy nhiên dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% đã được sử dụng trong các thí nghiệm về độ bền chống axit sunfuric của bê tông từ Hạt Los Angeles hơn 15 năm nay [23]. Nồng độ cao của axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% được dùng nhằm mục đích gia tốc nhanh các thí nghiệm trong khoảng thời gian hợp lý trong phòng thí nghiệm.

Ba mẫu lập phương của mỗi hỗn hợp cấp phối (M1, M2, M3, M4, M5, M6) được tiến hành đúc, dưỡng hộ trong phòng thí nghiệm sau đó tháo ván khuôn sau 24h. Các mẫu sau đó sẽ được dưỡng hộ trong nước đến 28 ngày tuổi. Các mẫu lập phương được sấy khô ở nhiệt độ ngoài trời khoảng  $35^\circ C$  sau 48-72 giờ đến khi sự chênh lệch khối lượng mẫu 2 lần đo liên tiếp cách nhau 24h không vượt quá 2% để loại bỏ độ ẩm trong mẫu rồi cân khối lượng ban đầu trước khi ngâm trong dung dịch axit sunfuric ( $m_1$ ). Sau đó mẫu sẽ được tiến hành ngâm trong dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10%. Sau khi ngâm mẫu trong dung dịch axit được 28 ngày, mẫu bê tông được lấy ra khỏi bể ngâm rồi được sấy khô ở nhiệt độ ngoài trời khoảng  $35^\circ C$  sau 48-72 giờ đến khi sự chênh lệch khối lượng mẫu 2 lần đo liên tiếp cách nhau 24h không vượt quá 2%. Mẫu sau đó được làm sạch bề mặt, chụp hình quan sát bề mặt, cân lại để xác định khối lượng mẫu sau khi ngâm trong dung dịch axit ( $m_2$ ). Sự suy giảm khối lượng được xác định như phương trình (1). Giá trị mất khối lượng mỗi hỗn hợp cấp phối là giá trị trung bình mất khối lượng của 3 mẫu. Sau khi xác định sự hư hại bề mặt và mất mát khối lượng, các mẫu này tiếp tục được ngâm lại trong dung dịch axit để tiến hành xác định sự hư hại và mất khối lượng tại thời điểm 84 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ trong nước sau khi tháo ván khuôn và 56 ngày ngâm trong dung dịch axit). Quy trình được lặp lại cho đến thí nghiệm tại 118 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ trong nước sau khi tháo ván khuôn và 90 ngày ngâm trong dung dịch axit).

$$\Delta m(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

#### 2.6. Thí nghiệm xác định sự suy giảm cường độ chịu nén do xâm thực axit

18 mẫu lập phương của mỗi hỗn hợp cấp phối (M1, M2, M3, M4, M5, M6) được tiến hành đúc, dưỡng hộ trong phòng thí nghiệm sau đó tháo ván khuôn sau 24h. Các mẫu sau đó sẽ được dưỡng hộ trong nước đến 28 ngày tuổi và được tiếp tục chia làm 2 nhóm dưỡng hộ trong hai môi trường khác nhau đó là môi trường nước (nhóm A) và môi trường dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% (nhóm B).

Nhóm A: 9 mẫu lập phương được tiếp tục dưỡng hộ trong môi trường nước để xác định cường độ chịu nén tại 56 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu sau khi tháo ván khuôn và 28 ngày dưỡng hộ tiếp theo sau đó), 84 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu sau khi tháo ván khuôn và 56 ngày dưỡng hộ tiếp theo sau đó) và 118 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu sau khi tháo ván khuôn và 90 ngày dưỡng hộ tiếp theo sau đó). Cường độ chịu nén mẫu nhóm đối chứng (nhóm A) ký hiệu là  $R_1$ .

Nhóm B: 9 mẫu lập phương được ngâm trong dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% để tiến hành xác định cường độ chịu nén còn lại tại các thời điểm 56 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong

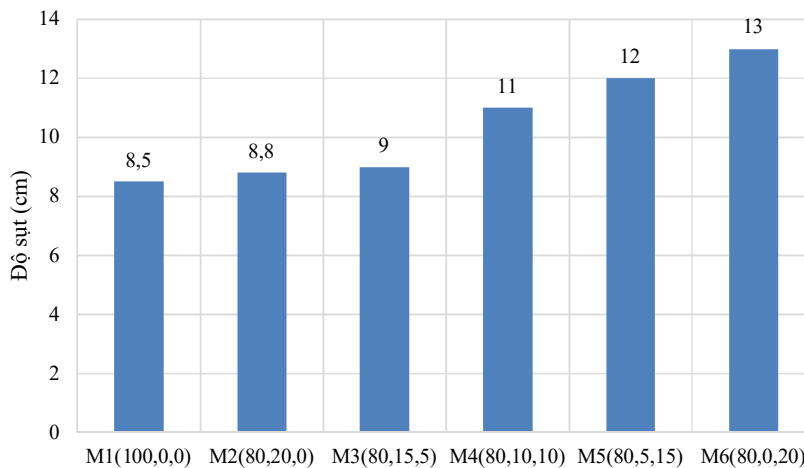
nước sau khi tháo ván khuôn và 28 ngày ngâm trong dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10%), 84 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong nước sau khi tháo ván khuôn và 56 ngày ngâm trong dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10%) và 118 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong nước sau khi tháo ván khuôn và 90 ngày ngâm trong dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10%). Tại thời điểm thí nghiệm 3 mẫu lập phương được lấy ra khỏi dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10%, sau đó phơi khô 72h để loại bỏ bê tông bị hư hại rồi tiến hành phủ lớp vữa nhằm làm bằng phẳng bề mặt tiếp xúc khi nén mẫu để xác định cường độ chịu nén mẫu ngâm trong dung dịch axit, ký hiệu  $R_2$ . Cường độ chịu nén của bê tông được xác định theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 3118:1993 - Bê tông nặng – Phương pháp xác định cường độ chịu nén [24]. Cường độ chịu nén từng viên mẫu bê tông ( $R$ ) được tính bằng MPa. Máy nén mẫu điện tử TYA-300 được sử dụng. Tốc độ gia tải được sử dụng từ 4 daN/cm<sup>2</sup>/s đến 6 daN/cm<sup>2</sup>/s. Sự suy giảm cường độ chịu nén của bê tông do xâm thực axit được xác định theo phương trình (2):

$$\Delta R(\%) = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times 100\% \quad (2)$$

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Độ sụt của hỗn hợp bê tông

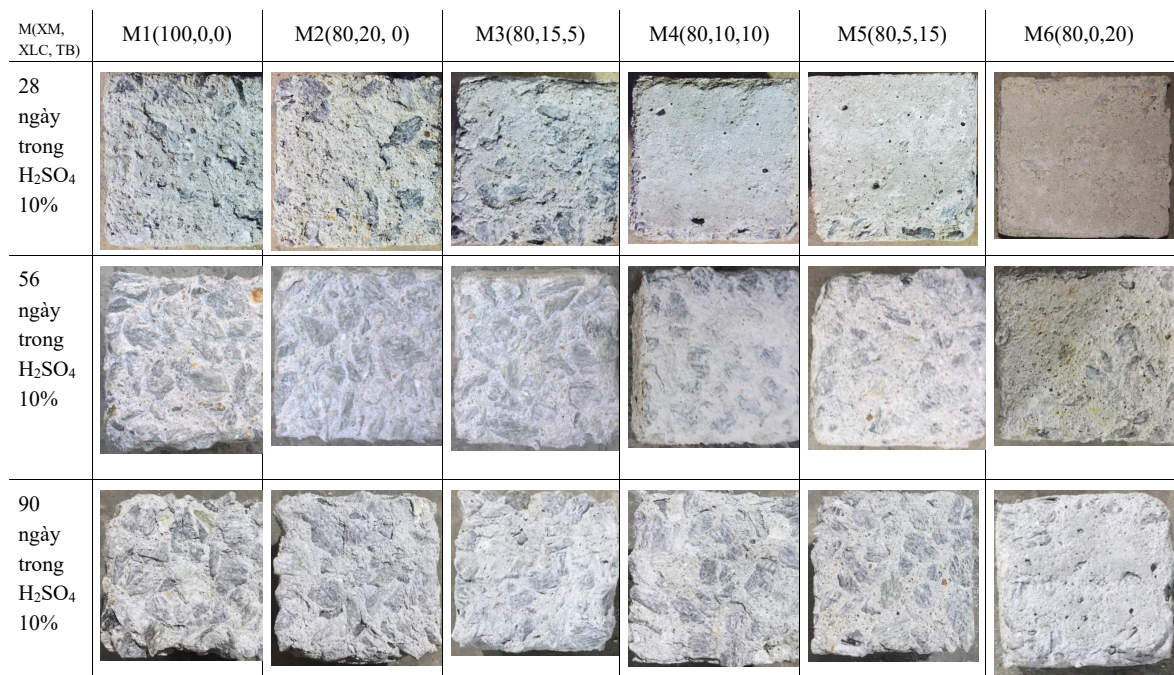
Độ sụt của các hỗn hợp bê tông được xác định và thể hiện ở Hình 3. Độ sụt của hỗn hợp bê tông thay đổi tỷ lệ thuận với hàm lượng tro bay và xỉ lò cao thay thế xi măng trong thành phần cấp phối, thể hiện rõ nhất khi thay thế khối lượng xi măng tại mẫu M4 (10%XLC, 10%TB), M5 (5%XLC, 15%TB), M6 (0%XLC, 20%TB). Độ sụt của hỗn hợp bê tông đối chứng M1 là 8,5 cm tăng lần lượt là 11 cm; 12 cm và 15 cm khi tro bay được sử dụng để thay thế xi măng tăng từ 0% đến 10%; 15% và 20%. Hỗn hợp bê tông khi có tro bay sẽ linh động hơn so với bê tông thông thường không có tro bay và xỉ lò cao S95 thay thế xi măng. Còn đối với mẫu M2 (20%XLC, 0%TB) và M3(15%XLC, 5%TB) thì nhận thấy xỉ lò cao cũng góp phần tăng độ sụt so với mẫu đối chứng M1 từ 8,5 cm đến 8,8 cm, 9 cm tương ứng, tuy nhiên so với tro bay thì xỉ lò cao làm tăng độ sụt ít hơn. Sự tăng độ sụt do tro bay thay thế xi măng được giải thích bởi sự sai khác về hình dạng cầu của tro bay và hình dạng góc cạnh của xi măng làm việc hút nước của tro bay thấp hơn xi măng [25]. Tương tự xỉ lò cao cũng có diện tích tiếp xúc bề mặt nhỏ hơn xi măng nên làm tăng độ sụt của bê tông.



Hình 3. Độ sụt của các hỗn hợp bê tông

### 3.2. Sự hư hại bề mặt bê tông dưới tác động môi trường xâm thực axit sunfuric

Hình 4 cho thấy rằng nhìn tổng thể thì xỉ lò cao và tro bay góp phần giảm sự hư hại bề mặt của bê tông dưới tác động của dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% ở tất cả các thời điểm thí nghiệm 28, 56 và 90 ngày ngâm trong dung dịch axit. Đồng thời Hình 4 cũng cho thấy rằng tro bay có khả năng chống lại sự hư hại bề mặt bê tông dưới tác động của axit tốt hơn xỉ lò cao. Điều này thể hiện cụ thể khi tro bay thay thế xỉ lò cao tăng dần từ hỗn hợp M2 đến M6 thì sự hư hại bề mặt bê tông giảm dần. Việc nâng cao khả năng bảo vệ bề mặt bê tông dưới tác động của axit sunfuric đã được nghiên cứu và khẳng định trước đó đối với loại tro bay tại nhà máy nhiệt điện Phả Lại (Quảng Ninh). Nghiên cứu này chỉ ra rằng khi tro bay tại nhà máy nhiệt điện Phả Lại được sử dụng để thay thế xi măng theo tỉ lệ khối lượng lần lượt là 10%, 20% và 40% và tỉ lệ nước/chất kết dính lần lượt là 0,42, 0,5 và 0,55 thì tất cả các thành phần cấp phối đều làm tăng khả năng chống lại sự hư hại bề mặt của bê tông dưới sự tấn công của axit sunfuric [3]. Cơ chế của việc chống lại sự hư hại bề mặt của bê tông có tro bay được cho là do khi axit sunfuric tấn công thì gypsum ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) được hình thành từ phản ứng giữa  $H_2SO_4$  và  $Ca(OH)_2$  có trong bê tông làm cho bề mặt bê tông trở nên mềm và có màu trắng [26]. Tuy nhiên tro bay hoặc tro xỉ lò cao sẽ phản ứng với  $Ca(OH)_2$  tạo ra C-S-H đồng thời hấp thụ lượng  $Ca(OH)_2$  do phản ứng thủy hóa xi măng nên sẽ giảm bớt sự hư hại trên bề mặt bê tông.



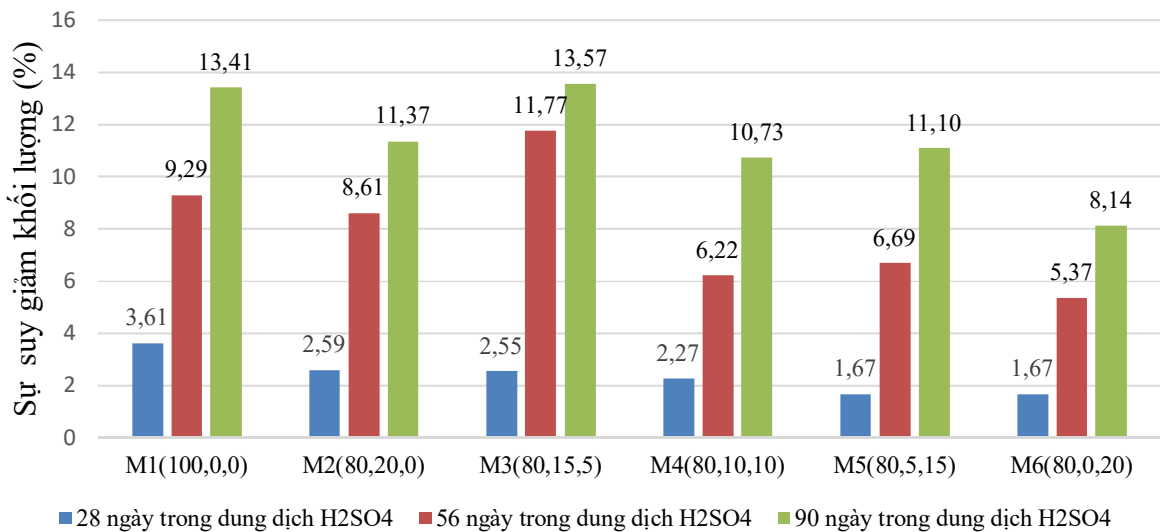
Hình 4. Sự hư hại bề mặt của các hỗn hợp bê tông dưới tác động xâm thực của dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10%

Hình 4 cũng cho thấy rằng, theo thời gian bị xâm thực tăng dần từ 28 ngày đến 90 ngày trong dung dịch  $H_2SO_4$  thì sự hư hại của các mẫu bê tông càng tăng. Tuy nhiên đến 90 ngày ngâm trong dung dịch axit thì bê tông chứa 20% tro bay thay thế xi măng vẫn có ưu thế lớn hơn trong sự chống lại hư hại bề mặt so với bê tông chứa xỉ lò cao. Cụ thể mẫu bê tông đối chứng M1 và M2 (20% XLC, 0%TB) có hiện tượng bị xâm thực rất lớn (bong tróc đá  $1 \times 2$ ) bề mặt gồ ghề; mẫu M3 (15%XLC, 5%TB), M4 (10%XLC, 10%TB), M5 (5%XLC, 15%TB) có hiện tượng bị xâm thực của dung dịch

axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% bề mặt gồ ghề nhưng ít hơn so với mẫu bê tông đối chứng M1 và M2 (20%XLC, 0%TB); đối với mẫu M6 (0%XLC, 20%TB) có bề mặt chưa bị dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% xâm thực nhiều, tương đối còn giữ hình dáng ban đầu so với trước khi ngâm trong dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10%. Mặc khác cũng có thể nhận thấy rằng xỉ lò cao cũng góp phần chống lại xâm thực bề mặt bê tông do axit sunfuric so với mẫu đối chứng M1, tuy nhiên khả năng chống xâm thực bề mặt do axit gây ra của xỉ lò cao thấp hơn tro bay.

### 3.3. Sự suy giảm khối lượng của bê tông dưới tác động của môi trường xâm thực axit sunfuric

Hình 5 cho thấy rằng khi ngâm bê tông trong dung dịch axit sunfuric  $H_2SO_4$  10% thì nhận thấy tro bay và xỉ lò cao đều có khả năng chống xâm thực của dung dịch axit làm giảm đi sự mất mát khối lượng so với mẫu đối chứng M1 tại tất cả các thời gian khảo sát ngâm 28, 56 và 90 ngày. Tuy nhiên, suy giảm khối lượng của bê tông càng giảm khi hàm lượng tro bay thay thế xi măng tăng từ 0% đến 20% tương ứng với xỉ lò cao giảm từ 20% đến 0%. Mặc dù xỉ lò cao khi được thay thế xi măng đến 20% cũng góp phần giảm sự mất mát khối lượng bê tông, tuy nhiên sự mất mát khối lượng của bê tông chứa xỉ lò cao vẫn lớn hơn so với mẫu bê tông có tro bay. Nếu yêu cầu cấp phối có sử dụng kết hợp giữa tro bay và xỉ lò cao thay thế cho xi măng thì cấp phối tối ưu là M5 (5%XLC, 15%TB).



Hình 5. Sự mất mát khối lượng các mẫu bê tông dưới tác động xâm thực của dung dịch axit sunfuric

### 3.4. Sự suy giảm cường độ chịu nén của bê tông dưới tác động của xâm thực axit sunfuric

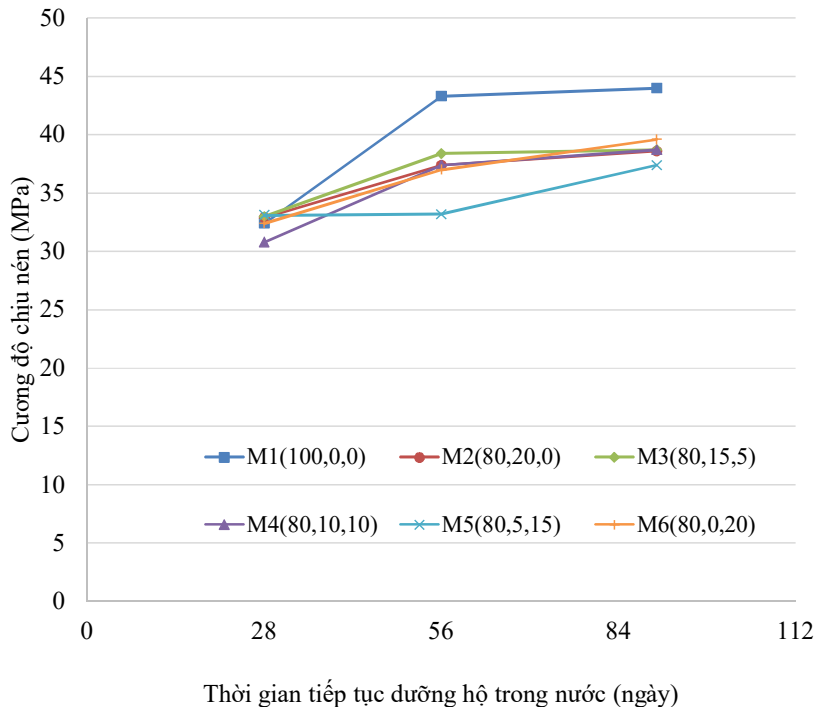
Cường độ chịu nén của tất cả các mẫu thí nghiệm khi được dưỡng hộ trong môi trường nước (nhóm A) và khi bị xâm thực bởi dung dịch axit sunfuric (nhóm B) được trình bày ở Bảng 8, Hình 6 và Hình 7. Có thể nhận thấy rằng mặc dù xỉ lò cao và đặc biệt là tro bay góp phần tăng độ sụt của hỗn hợp bê tông tươi (Hình 3), cường độ chịu nén của bê tông chứa xỉ lò cao và tro bay sau 56 ngày tuổi được dưỡng hộ trong nước (xem Bảng 8) vẫn tương đương hoặc lớn hơn so với mẫu đối chứng.

Cường độ chịu nén của mẫu đối chứng (nhóm A) được trình bày ở Hình 6. Kết quả cho thấy rằng sau 28 ngày tiếp tục được dưỡng hộ trong nước, cường độ chịu nén của tất cả các mẫu bê tông có hoặc không có xỉ lò cao và tro bay tiếp tục tăng nhẹ đến sau 90 ngày dưỡng hộ trong nước. Cường độ chịu nén của mẫu M1 (100% xi măng) tăng từ 32,4 MPa ở 56 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong



Bảng 8. Cường độ chịu nén của tất cả các mẫu thí nghiệm khi được dưỡng hộ trong môi trường nước (nhóm A) và khi bị xâm thực bởi dung dịch axit sunfuric (nhóm B)

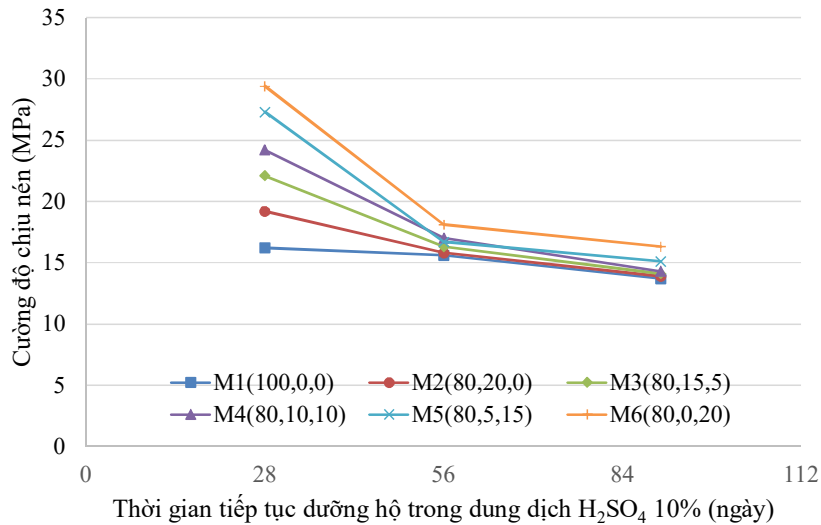
Tên mẫu	Tuổi (ngày) / môi trường dưỡng hộ					
	56 ngày/ 28 ngày, nước	56 ngày/ 28 ngày, nước	84 ngày/ 28 ngày, nước	84 ngày/ 28 ngày, nước	118 ngày/ 28 ngày, nước	118 ngày/ 28 ngày, nước
	+28 ngày, nước (nhóm A)	+28 ngày, axit sunfuric (nhóm B)	+56 ngày, nước (nhóm A)	+56 ngày, axit sunfuric (nhóm B)	+90 ngày, nước (nhóm A)	+90 ngày, axit sunfuric (nhóm B)
M1(100,0,0)	32,4	16,2	43,3	15,6	44,0	13,7
M2(80,20,0)	32,9	19,2	37,4	15,8	38,6	13,9
M3(80,15,5)	33,0	22,1	38,4	16,3	38,7	14,1
M4(80,10,10)	30,8	24,2	37,4	17,0	38,7	14,3
M5(80,5,15)	33,1	27,3	33,2	16,7	37,4	15,1
M6(80,0,20)	32,4	29,4	37	18,1	39,6	16,3



Hình 6. Cường độ chịu nén của các mẫu bê tông khi tiếp tục được dưỡng hộ trong nước sau 28 ngày được dưỡng hộ trong nước trước đó (nhóm A, mẫu đối chứng)

nước sau khi tháo ván khuôn và 28 ngày dưỡng hộ tiếp theo) đến 44 MPa tại 118 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong nước sau khi tháo ván khuôn và 90 ngày dưỡng hộ tiếp theo). Khi được thay thế 20% xi măng bởi tro xỉ lò cao và tro bay thì tại thời điểm 56 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong nước sau khi tháo ván khuôn và 28 ngày dưỡng hộ tiếp theo) cường độ chịu nén của bê tông tăng nhẹ đối với nhóm mẫu M2, M3, M5, M6 tuy nhiên cường độ chịu nén của bê tông giảm so với mẫu đối chứng tại thời điểm 84 ngày tuổi và 118 ngày tuổi. Điều này có thể là do phản ứng chậm của tro bay Vũng Áng và tro xỉ lò cao với  $\text{Ca(OH)}_2$  sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng khi 20% tổng

lượng xi măng được thay thế bằng tro xỉ lò cao và tro bay.



Hình 7. Cường độ chịu nén của các mẫu bê tông khi bị xâm thực bởi dung dịch axit sunfuric, sau 28 ngày được dưỡng hộ trong nước trước đó (nhóm B)

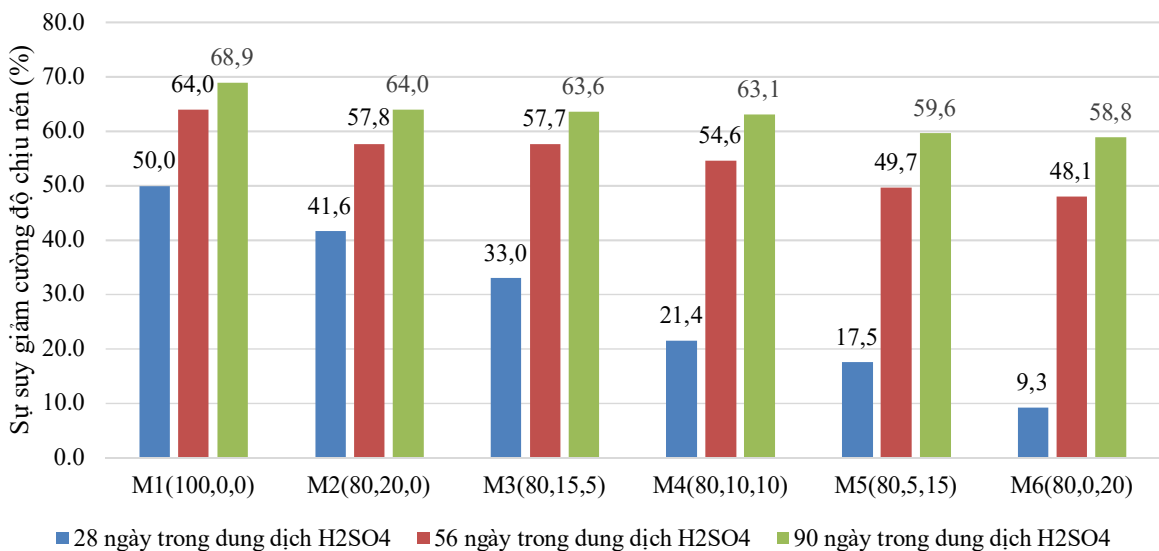
Cường độ chịu nén của các mẫu bê tông dưới tác động xâm thực của môi trường axit sunfuric H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sau thời gian xâm thực 28, 56 và 90 ngày được trình bày tại Hình 7 (nhóm B). Có thể dễ dàng nhận thấy rằng cường độ chịu nén của bê tông giảm dần khi thời gian xâm thực tăng dần từ 28 ngày đến 90 ngày. Sự suy giảm cường độ chịu nén trong các mẫu bê tông đối chứng không chứa tro bay và xỉ lò cao dưới tác động của dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> được giải thích là do axit sunfuric là loại axit hoạt tính mạnh tác dụng với Ca(OH)<sub>2</sub> có trong xi măng hình thành nên gypsum (CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O). Điều này làm tăng thể tích lên khoảng 2,2 lần so với ban đầu làm hư hại bê tông. Ngoài ra, gypsum có thể tiếp tục phản ứng với C3A trong xi măng tạo thành ettringite (3 CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3 CaSO<sub>4</sub> · 32 H<sub>2</sub>O) làm tăng thể tích bên trong lên rất nhiều, gây ra nội ứng lực và nứt bê tông. Các hoạt chất hình thành trở nên mềm và màu trắng và cuối cùng làm suy giảm cường độ bê tông [6, 11, 26]. Tuy nhiên cường độ chịu nén của các mẫu bê tông chứa tro xỉ lò cao và tro bay vẫn lớn hơn mẫu đối chứng không có xỉ lò cao và tro bay tại tất cả thời gian xâm thực, điều đó chứng tỏ tro xỉ lò cao và tro bay góp phần lớn vào khả năng chống xâm thực dung dịch axit sunfuric của bê tông. Cụ thể, tại 56 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong nước sau khi tháo ván khuôn và 28 ngày ngâm trong môi trường xâm thực axit), cường độ chịu nén còn lại của các mẫu bê tông M1, M2, M3, M4, M5, M6 lần lượt là 16,2 MPa, 19,2 MPa, 22,1 MPa, 24,2 MPa, 27,3 MPa và 29,4 MPa. Tại 84 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong nước sau khi tháo ván khuôn và 56 ngày ngâm trong môi trường xâm thực axit), cường độ chịu nén còn lại của các mẫu bê tông M1, M2, M3, M4, M5, M6 lần lượt là 15,6 MPa, 15,8 MPa, 16,3 MPa, 17,0 MPa, 16,7 MPa và 18,1 MPa. Tại 118 ngày tuổi (28 ngày dưỡng hộ ban đầu trong nước sau khi tháo ván khuôn và 90 ngày trong môi trường xâm thực axit), cường độ chịu nén còn lại của các mẫu bê tông M1, M2, M3, M4, M5, M6 lần lượt là 13,7 MPa, 13,9 MPa, 14,1 MPa, 14,3 MPa, 15,1 MPa và 16,3 MPa.

Kết quả từ Hình 6 và 7 cũng chỉ ra rằng mặc dù đến 118 ngày tuổi cường độ chịu nén của bê tông chứa tro xỉ lò cao và tro bay vẫn chưa đạt bằng mẫu đối chứng khi làm việc trong môi trường nước, tuy nhiên nếu làm việc trong môi trường chứa axit thì các mẫu bê tông chứa tro xỉ lò cao và tro bay vẫn có cường độ chịu nén còn lại lớn hơn mẫu bê tông không có tro xỉ lò cao và tro bay. Điều này là



do khả năng chống xâm thực axit lớn của tro xỉ lò cao và tro bay. Cường độ chịu nén còn lại của các mẫu bê tông khi bị xâm thực axit tăng dần khi tro bay tăng dần từ 0% đến 20%, đồng thời xỉ lò cao giảm dần từ 20% đến 0%. Điều đó một lần nữa khẳng định mặc dù tro xỉ lò cao có tác dụng chống lại sự xâm thực axit tuy nhiên khả năng chống xâm thực axit của xỉ lò cao thấp hơn tro bay.

Khả năng chống xâm thực axit sunfuric của bê tông chứa tro bay được giải thích là do quá trình xâm thực của axit trong bê tông đầu tiên sẽ tác dụng với  $\text{Ca(OH)}_2$ , tuy nhiên khi có tro bay thay thế xi măng thì lượng  $\text{Ca(OH)}_2$  có trong bê tông sẽ giảm xuống do lượng  $\text{Ca(OH)}_2$  sản sinh từ quá trình thủy hóa xi măng Póc lăng giảm, đồng thời tro bay góp phần hấp thu  $\text{Ca(OH)}_2$  để hình thành nên CSH vừa tăng cường độ bê tông, vừa giúp bê tông đặc chắc hơn [11]. Ngoài ra, việc hình thành thêm CSH do phản ứng pozzolan của tro bay và  $\text{Ca(OH)}_2$  còn góp phần giảm độ pH có trong chất lỏng lỗ rỗng vì CSH sinh ra có hàm lượng calcium/silicon (C/S) nhỏ hơn xi măng Portland. Khi pH giảm xuống góp phần giảm khả năng phá hủy gel CSH [27]. Tương tự như tro bay thì khả năng chống xâm thực axit của xỉ lò cao là do sự hình thành CSH hàm lượng thấp C/S do phản ứng giữa  $\text{SiO}_2$  có trong xỉ lò cao và  $\text{Ca(OH)}_2$  có trong bê tông [14, 15].



Hình 8. Sự suy giảm cường độ chịu nén của bê tông dưới tác động xâm thực của dung dịch axit

Hình 8 trình bày sự suy giảm cường độ chịu nén của các mẫu bê tông có tro xỉ lò cao, tro bay và bê tông đối chứng không có tro xỉ lò cao, tro bay sau thời gian xâm thực axit 28, 56 và 90 ngày. Nhìn chung sự suy giảm cường độ chịu nén của các mẫu bê tông không có tro xỉ lò cao và tro bay là lớn nhất tương ứng 50%, 64% và 68,9% sau thời gian xâm thực 28, 56 và 90 ngày. Sự suy giảm cường độ chịu nén của bê tông chứa 20% tro bay là nhỏ nhất tương ứng 9,3%, 48,1% và 58,8% sau thời gian xâm thực 28, 56 và 90 ngày trong môi trường  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10%. Điều này hoàn toàn phù hợp với nghiên cứu trước đó khi 20% tro bay tại nhà máy nhiệt điện Phả Lại được sử dụng thay thế xi măng với các tỉ lệ nước/ chất kết dính lần lượt là 0,42; 0,5; 0,55 đều góp phần hạn chế sự suy giảm cường độ chịu nén của bê tông dưới tác động xâm thực của axit sunfuric [3]. Tại tất cả các thời gian xâm thực trong môi trường axit thì tro xỉ lò cao và tro bay đều cho thấy góp phần tăng cường chống lại xâm thực axit thể hiện qua việc gia tăng cường độ chịu nén còn lại của bê tông. Sự suy giảm cường độ chịu nén của bê tông khi làm việc trong môi trường xâm thực  $\text{H}_2\text{SO}_4$  giảm dần khi hàm lượng tro xỉ lò cao giảm dần

từ 20% xuống 0% tương ứng với hàm lượng tro bay tăng dần từ 0% đến 20%.

Hình 5 và Hình 8 cũng cho thấy rằng các mẫu bê tông chứa tro bay và xỉ lò cao góp phần hạn chế sự suy giảm khối lượng và suy giảm cường độ chịu nén của bê tông khi chịu tác động của môi trường xâm thực axit sunfuric. Nhìn tổng thể, sự suy giảm cường độ chịu nén tỉ lệ thuận với sự suy giảm khối lượng bê tông. Tuy nhiên sự suy giảm khối lượng của mẫu M3(80,15,5) và M4(80,10,10) sau khi ngâm trong dung dịch axit sunfuric 56 ngày và mẫu M3(80,15,5), M5(80,5,15) sau khi ngâm trong dung dịch axit sunfuric 90 ngày không theo xu hướng trên. Điều này có thể do sự phân phối các hạt cốt liệu tại bề mặt của mẫu bê tông này dẫn đến một số cốt liệu lớn bị mất mát sau thời gian chịu tác động của xâm thực axit sunfuric dẫn đến sự mất mát khối lượng nhiều hơn so với trường hợp chỉ mất mát cốt liệu bé (cát) và hồ xi măng. Do đó, có thể thấy việc chuẩn bị mẫu thử, đặc biệt là việc trộn và đầm nén mẫu bê tông cần đảm bảo giống nhau giữa tất cả các mẫu bê tông để việc so sánh, phân tích kết quả chính xác và phù hợp.

#### 4. Kết luận

Các kết luận chính được rút ra từ các kết quả nghiên cứu trong bài báo này bao gồm:

- Cả tro xỉ lò cao và tro bay đều góp phần tăng cường độ linh động của hỗn hợp bê tông tươi, tuy nhiên so với tro bay thì xỉ lò cao làm tăng độ sụt ít hơn.
- Tro xỉ lò cao và tro bay đều góp phần nâng cao khả năng chống xâm thực axit sunfuric của bê tông thể hiện thông qua việc nâng cao khả năng chống hư hại bề mặt, giảm dần sự suy giảm khối lượng và nâng cao cường độ chịu nén còn lại của bê tông.
- Khả năng chống xâm thực axit sunfuric của tro xỉ lò cao nhỏ hơn so với tro bay khi được sử dụng để thay thế xi măng trong thành phần cấp phối bê tông.
- Nằm trong giới hạn nghiên cứu của bài báo, cấp phối bê tông tối ưu trong việc chống lại xâm thực axit sunfuric là M6(80,0,20) khi 20% tro bay được sử dụng để thay thế xi măng. Tuy nhiên nếu có sự kết hợp với xỉ lò cao thì cấp phối bê tông tối ưu là M5(80,5,15) khi 15% tro bay và 5% xỉ lò cao được sử dụng để thay thế xi măng.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., Polder, R. (2013). *Corrosion of steel in concrete: Prevent, diagnosis, repair*, volume 392. Wiley Online Library.
- [2] ASTM C618-17a (2017). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
- [3] Nguyen, C. V., Lambert, P., Tran, Q. H. (2019). [Effect of Vietnamese Fly Ash on Selected Physical Properties, Durability and Probability of Corrosion of Steel in Concrete](#). *Materials*, 12(4):593.
- [4] Tuấn, N. V., Thắng, N. C., Hanh, P. H. (2012). Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng cốt liệu cấp phối gián đoạn với cát mịn. *Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng*, 24(6):11–18.
- [5] Thang, N. C., Tuan, N. V., Hanh, P. H. (2018). [Ảnh hưởng của phụ gia khoáng đến khả năng ăn mòn cốt thép trong bê tông chất lượng siêu cao](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 12(2):86–91.
- [6] Aydın, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H., Baradan, B. (2007). [Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete](#). *Building and Environment*, 42(2):717–721.
- [7] Barbhuiya, S., Kumala, D. (2017). [Behaviour of a Sustainable Concrete in Acidic Environment](#). *Sustainability*, 9(9):1556.
- [8] Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D. S., Bhattacharjee, B. (2009). [Resistance of Mineral Admixture Concrete to Acid Attack](#). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2):273–283.

- [9] Duraman, S. B., Omar, M. F. H. H. (2019). [Durability of pulverised fuel ash \(PFA\) concrete exposed to acidic and alkali conditions](#). *MATEC Web of Conferences*, 258:05015.
- [10] Torii, K., Kawamura, M. (1994). [Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack](#). *Cement and Concrete Research*, 24(2):361–370.
- [11] Monteny, J., Belie, N. D., Vincke, E., Verstraete, W., Taerwe, L. (2001). [Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete](#). *Cement and Concrete Research*, 31(9):1359–1365.
- [12] Lye, C.-Q., Dhir, R. K., Ghataora, G. S. (2016). [Carbonation resistance of GGBS concrete](#). *Magazine of Concrete Research*, 68(18):936–969.
- [13] Shi, C., Qian, J. (2000). [High performance cementing materials from industrial slags — a review](#). *Resources, Conservation and Recycling*, 29(3):195–207.
- [14] Songa, H. W., Saraswathy, V. (2006). [Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview](#). *Journal of Hazardous Materials*, 138(2):226–233.
- [15] Daube, J., Bakker, R. (1986). Portland blast-furnace slag cement: a review. *Blended Cements*.
- [16] Łukowski, P., Salih, A. (2015). [Durability of Mortars Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag in Acid and Sulphate Environment](#). *Procedia Engineering*, 108:47–54.
- [17] Breitenbücher, R., Bäcker, J., Kunz, S., Ehrenberg, A., Gerten, C. (2018). [Optimizing the Acid Resistance of Concrete with Granulated Blast-Furnace Slag](#). *MATEC Web of Conferences*, 199:02001.
- [18] TCVN 7570:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [19] TCVN 6260:2009. *Xi măng Pooc lăng hỗn hợp - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [20] TCVN 10302:2014. *Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [21] TCVN 3106:1993. *Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [22] ASTM C267-01:2012. *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [23] Redner, J. A., His, R. P., Esfandi, E. T., Sydney, R. (1998). *Evaluation of Protective Coatings for Concrete*. County Sanitation Districts of Los Angeles County, Whittier, California.
- [24] TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ chịu nén*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [25] Arezoumandi, M., Volz, J. S. (2013). [Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high-volume fly ash concrete beams](#). *Journal of Cleaner Production*, 59:120–130.
- [26] Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., Belie, N. D., Taerwe, L., Gemert, D. V., Verstraete, W. (2000). [Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete](#). *Cement and Concrete Research*, 30(4):623–634.
- [27] Hooton, R. D. (2000). [Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(4): 754–760.