

ẢNH HƯỞNG CỦA TRO BAY, SILICAFUME VÀ MÔI TRƯỜNG DƯỠNG HỘ ĐẾN CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN CỦA BÊ TÔNG

Nguyễn Văn Chính^{a,*}, Đặng Công Thuật^a

^a*Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng, số 54 đường Nguyễn Lương Bằng, quận Liên Chiểu, Đà Nẵng, Việt Nam*

Nhận ngày 30/03/2020, Sửa xong 11/06/2020, Chấp nhận đăng 22/06/2020

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của tro bay, silicafume và môi trường dưỡng hộ đến cường độ chịu nén của bê tông. Trong đó, xi măng được thay thế bởi tro bay và silicafume lần lượt theo các tỉ lệ khác nhau tối đa 20%. Các mẫu bê tông được dưỡng hộ trong hai môi trường không khí và nước. Tiến hành khảo sát độ sụt, khối lượng thể tích và cường độ chịu nén của bê tông trong thời gian 90 ngày, kết quả chỉ ra rằng tro bay làm tăng trong khi silicafume làm giảm độ sụt của hỗn hợp bê tông. Ngoài ra silicafume còn góp phần giảm khối lượng thể tích của bê tông. Trong cả hai môi trường dưỡng hộ thì 20% xi măng được thay thế bởi tro bay và silicafume giảm cường độ chịu nén của bê tông và đạt tối đa 93% cường độ chịu nén so với mẫu đối chứng tại 90 ngày, trong khi đó 5% silicafume làm tăng cường độ chịu nén của bê tông. Cường độ chịu nén của bê tông có và không có tro bay hay silicafume thay thế xi măng khi được dưỡng hộ trong nước lớn hơn so với các mẫu bê tông tương ứng dưỡng hộ trong môi trường không khí, tỉ lệ cường độ giữa hai môi trường dưỡng hộ dao động trong khoảng từ 1,2 đến 1,7. Sai lệch lớn nhất về cường độ chịu nén giữa hai môi trường dưỡng hộ là khi sử dụng 20% tro bay để thay thế xi măng, trong khi đó sự khác biệt là nhỏ nhất khi 10% silicafume được sử dụng để thay thế xi măng.

Từ khoá: tro bay; silicafume; môi trường dưỡng hộ; cường độ chịu nén; độ sụt; khối lượng riêng.

EFFECT OF FLY ASH, SILICAFUME AND CURING ENVIRONMENTS ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

Abstract

The paper studied the effect of fly ash, silicafume and curing environments on the compressive strength of concrete. Portland cement was replaced by fly ash and silicafume at different proportions of up to 20%. Samples were cured in water and in the laboratory conditions. Slump, density, and compressive strengths up to 90 days were investigated. The results show that fly ash increases, but silicafume reduced the workability of fresh concrete. In addition, silicafume decreases the density of hardened concrete. Both curing environments, 20% of Portland cement replaced by fly ash and silicafume reduces the compressive strength as it was up to 93% of the control samples at 90 days, while 5% of silicafume improved the compressive strength. The compressive strength of concrete with or without fly ash and silicafume cured in water are higher than that cured in laboratory condition. The ratio of compressive strength cured in both environments are in the range of 1.2 to 1.7. The biggest variation of compressive strength of concrete in two curing environments is obtained when 20% fly ash was used to replace Portland cement whereas the smallest difference is found when 10% silicafume was used to replace Portland cement.

Keywords: fly ash; silicafume; curing environments; slump; density; compressive strength.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(3V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(3V)-06) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

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

1. Giới thiệu

Bê tông là vật liệu xây dựng thông dụng phổ biến trên toàn thế giới. Tuy nhiên công nghệ sản xuất xi măng sản sinh ra lượng lớn khí thải CO₂ gây ô nhiễm môi trường. Do đó, xu hướng phát triển và sử dụng vật liệu thay thế xi măng đang phát triển mạnh. Những loại vật liệu thay thế thông dụng được sử dụng như tro bay và silica fume đang trở nên càng phổ biến bởi vì nó không chỉ sử dụng trong ngành công nghệ sản xuất bê tông mà còn góp phần giảm các tác động có hại cho môi trường.

Silicafume là vật liệu siêu mịn, chứa SiO₂ vô định hình, thu được trong quá trình sản xuất silic và hợp kim silic bằng hồ quang. Silicafume là phụ gia khoáng hoạt tính cao. Trong bê tông, silicafume có thể phân bố ở khoảng trống giữa các hạt xi măng và tham gia phản ứng với các sản phẩm thủy hóa xi măng hình thành các khoáng mới. Nhờ đó có thể cải thiện được cấu trúc, độ chống thấm, cường độ, độ bền lâu và khả năng bảo vệ cốt thép của bê tông trong các môi trường xâm thực [1, 2].

Tro bay là sản phẩm bụi khí dạng hạt mịn thu được từ quá trình đốt than đá ở các nhà máy nhiệt điện. Nó được thu gom từ buồng đốt qua ống khói nhà máy, trong đó các thành phần tạp chất bị loại bỏ. Tro bay là một loại pozzolan nhân tạo với thành phần chính tạo hiệu ứng pozzolan là các silic oxit, nhôm oxit. Ngày nay tro bay được sử dụng rộng rãi làm vật liệu thay thế một phần xi măng trong bê tông, góp phần lớn vào việc nâng cao giá trị kinh tế và môi trường, đặc biệt giảm lượng khí thải CO₂ [3–7]. Tro bay sử dụng thay thế một phần xi măng làm tăng độ linh động bê tông tươi, giảm nhiệt thủy hóa xi măng, nâng cao khả năng chống xâm thực axit, xâm thực sulfat và khả năng chống ăn mòn cốt thép trong bê tông [5, 8–12]. Ngoài ra việc sử dụng tro bay làm giảm độ rỗng của bê tông và tăng khả năng chống thấm [13, 14].

Môi trường dưỡng hộ là một trong những nhân tố quan trọng ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của bê tông. Việc dưỡng hộ được tiến hành ngay sau khi đúc mẫu, nó liên quan đến quá trình đảm bảo điều kiện nhiệt độ và độ ẩm môi trường cần thiết nhằm hạn chế việc mất nước trong quá trình thủy hóa của xi măng. Việc dưỡng hộ phù hợp giúp bảo đảm độ ẩm môi trường thuận lợi cho quá trình thủy hóa xi măng, vì thế sẽ giảm độ rỗng vữa xi măng [15–17]. Nhiều nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng hiệu quả của việc dưỡng hộ phụ thuộc vào cách thức dưỡng hộ, độ đặc chắc của loại bê tông, môi trường và thời gian dưỡng hộ [18–21].

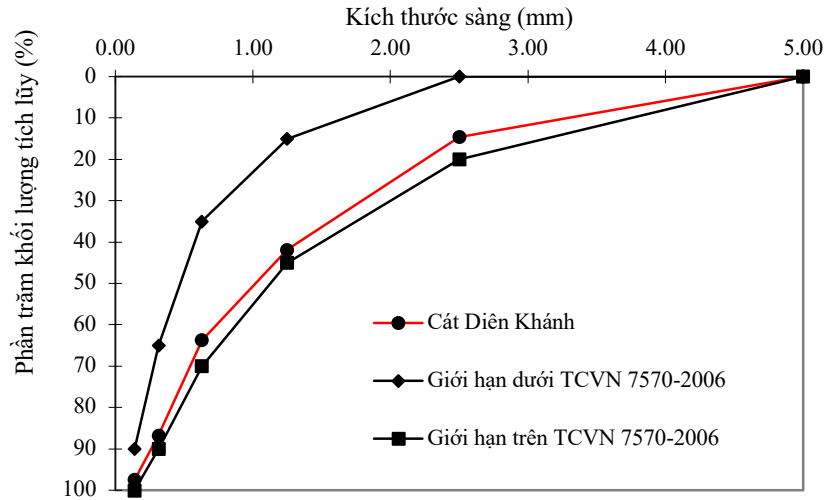
Bài báo nghiên cứu sự ảnh hưởng tổng hợp của thành phần cấp phối bê tông trong đó xi măng được thay thế bởi tro bay và silicafume lần lượt theo các tỉ lệ khác nhau tối đa 20% và môi trường dưỡng hộ đến cường độ chịu nén lâu dài của bê tông. Các mẫu bê tông được dưỡng hộ trong hai môi trường không khí và nước. Các thông số kỹ thuật được khảo sát bao gồm độ sụt bê tông, khối lượng thể tích và cường độ chịu nén đến 90 ngày.

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 Diên Khánh, Nha Trang có thành phần cỡ hạt như trình bày ở Hình 1 đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [22]. Các đặc tính cơ lý của cát sông Duyên Khánh được trình bày tại Bảng 1, so với TCVN 7570-2006 thì loại cát được sử dụng có mô đun độ lớn nằm trong khoảng 2,0 đến 3,3 nên được xếp vào loại cát thô.

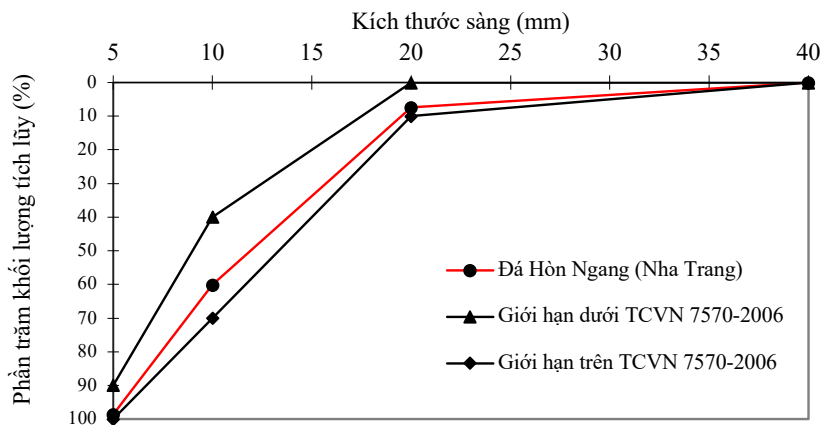
Cốt liệu lớn là đá 1-2 cm tại Hòn Ngang (Nha Trang) có thành phần cỡ hạt được trình bày ở Hình 2 đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [22]. Các chỉ tiêu cơ lý của đá Hòn Ngang cũng được trình bày ở Bảng 2 đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [22].



Hình 1. Thành phần cỡ hạt cát Diên Khánh

Bảng 1. Đặc tính cơ lý cát Diên Khánh, Nha Trang

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả
Mô đun độ lớn của cát M _{dl}	-	3,04
Tổng hàm lượng bụi sét	%	1,13
Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1493,87
Khối lượng thể tích bão hòa	g/cm ³	2,58
Khối lượng thể tích khô	g/cm ³	2,54
Khối lượng riêng	g/cm ³	2,65
Độ hút nước	%	1,61
Hàm lượng tạp chất hữu cơ	-	Sáng hơn màu chuẩn



Hình 2. Thành phần cỡ hạt đá Hòn Ngang (Nha Trang)

Xi măng được sử dụng là loại Nghi Sơn PCB40 có các thông số kỹ thuật được trình bày ở Bảng 3, đáp ứng TCVN 6260:2009 [23].

Bảng 2. Các chỉ tiêu cơ lý của đá Hòn Ngang (Nha Trang)

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả
Tỷ lệ hạt thoi dẹt	%	9,8
Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1371,6
Khối lượng thể tích bão hòa	g/cm ³	2,7
Khối lượng thể tích khô	g/cm ³	2,7
Khối lượng riêng	g/cm ³	2,7
Độ hút nước	%	0,6
Độ hồng	%	49,2
Độ ép vỡ trong xy lạnh	%	7,4

Bảng 3. Các chỉ tiêu cơ lý xi măng Nghi Sơn PCB40

Chỉ tiêu cơ lý	Đơn vị	Kết quả	TCVN 6260:2009
Độ mịn	%	1,3	≤ 10
Lượng nước tiêu chuẩn	%	30,0	-
Thời gian bắt đầu đông kết	phút	95	≥ 45
Thời gian kết thúc đông kết	phút	155	≤ 420
Độ ổn định thể tích theo pp Le Chaterlier	mm	< 1	≤ 10
Cường độ nén mẫu thử lúc 3 ngày	MPa	29,6	≥ 18
Cường độ nén mẫu thử lúc 28 ngày	MPa	44,4	≥ 40
Hàm lượng SO ₃	%	1,72	≤ 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 [24]. Tro bay sử dụng trong chương trình thí nghiệm này là tro bay nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân (Bình Thuận) với các thông số kỹ thuật thể hiện trong Bảng 4 đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 10302:2014 [24] và được xếp vào loại F vì có tổng hàm lượng ôxit SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 70%.

Bảng 4. Đặc tính vật lý và thành phần hóa học của tro bay Vĩnh Tân

Chỉ tiêu kỹ thuật	Kết quả	TCVN 10302:2014
Độ mịn (%)	23,5	≤ 25
Độ mất khi nung (%)	5,9	≤ 12
Độ ẩm (%)	0,04	≤ 3
SiO ₂ (%)	48,1	
Fe ₂ O ₃ (%)	17,1	
Al ₂ O ₃ (%)	15,8	
SO ₃ (%)	0,15	
CaO	12,2	
MgO	2,18	
ZnO	0,01	
MnO	0,08	
TiO ₂	0,69	
Na ₂ O	0,93	

Silica fume dạng bột do Công ty TNHH Xuất nhập khẩu Tổng hợp Vi Khanh cung cấp có các đặc tính lý hóa như Bảng 5, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 8827:2011 [25].

Bảng 5. Đặc tính vật lý và thành phần hóa học của Silicafume

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	TCVN 8827:2011
Hàm lượng SiO ₂	%	92,2	≥ 85,0
Độ ẩm	%	0,80	≤ 3,0
Độ mất khi nung	%	4,1	≤ 6,0
Độ mịn (sàng 45 μm)	%	1,2	≤ 10
Bề mặt riêng	m ² /g	15,27	≥ 12

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

Thành phần tỉ lệ cấp phối bê tông được trình bày trong Bảng 6 với hệ số tổng bột (chất kết dính) bằng 1. Có 6 loại cấp phối, trong đó M1 là mẫu đối chứng không sử dụng tro bay và silicafume. Tro bay và silicafume được sử dụng để thay thế một phần xi măng theo các tỉ lệ khối lượng tương ứng là 20%, 10% và 5%. Các tỉ lệ khối lượng thay thế này được lựa chọn dựa trên các nghiên cứu trước đó về tro bay và silicafume đã được thực hiện [1, 11–13, 20, 26].

Bảng 6. Thành phần cấp phối của các hỗn hợp bê tông

Tên mẫu	Thành phần vật liệu theo xi măng			Đá 1-2	Cát	Nước/XM
	Xi măng	Tro bay	Silicafume			
M1 (100,0,0)	1	0	0	3	2	0,55
M2 (80,20,0)	0,8	0,2	0	3	2	0,55
M3 (80,10,10)	0,8	0,1	0,1	3	2	0,55
M4 (80,0,20)	0,8	0	0,2	3	2	0,55
M5 (90,0,10)	0,9	0	0,1	3	2	0,55
M6 (95,0,5)	0,95	0	0,05	3	2	0,55

2.3. Đúc mẫu và dưỡng hộ mẫu

Cốt liệu trước khi đúc mẫu được phơi khô, đảm bảo các mẻ được trộn cùng một điều kiện. Các loại xi măng, tro bay, silicafume, đá, cát được trộn trong vòng 10 phút để các loại vật liệu phân bố đều, sau đó nước được đổ dần dần vào thành phần hỗn hợp và trộn đều trong vòng 10 phút tiếp theo nhằm đảm bảo sự đồng đều của hỗn hợp bê tông. Với mỗi thành phần cấp phối, 39 mẫu hình lập phương cạnh 100 mm được đúc. Trong đó 9 mẫu được dùng để xác định khối lượng thể tích bê tông ở các trạng thái bão hòa nước (ký hiệu SAT), sau khi đúc mẫu 24h (AR), làm khô trong lò sấy (DR); 15 mẫu 100 × 100 × 100 mm được đúc và ngâm nước sau 24h đúc mẫu để xác định cường độ chịu nén tại các thời điểm 1, 7, 28, 56, 90 ngày (Hình 3(a)); 15 mẫu được dưỡng hộ trong phòng thí nghiệm ($T = 30^{\circ}\text{C}$) để xác định cường độ chịu nén tại các thời điểm 1, 7, 28, 56, và 90 ngày (Hình 3(b)).



(a) Môi trường nước



(b) Môi trường không khí

Hình 3. Dưỡng hộ bê tông

2.4. Thí nghiệm xác định độ sụt

Độ sụt của bê tông được thí nghiệm dựa theo tiêu chuẩn TCVN 3106:1993 [27]. 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 khối lượng thể tích của bê tông

Thí nghiệm xác định khối lượng thể tích được thực hiện theo tiêu chuẩn BS EN 12390-7:2009: Thí nghiệm bê tông - Phần 7: Khối lượng thể tích của bê tông [28]. Khối lượng thể tích của bê tông được xác định 3 loại bao gồm khối lượng thể tích của bê tông ngay sau khi tháo mẫu ở 1 ngày tuổi (AR) và khối lượng thể tích bão hòa nước sau khi ngâm mẫu trong nước 28 ngày (SAT) và mẫu dưỡng hộ khô trong lò sấy (DR) tại thời điểm 28 ngày.

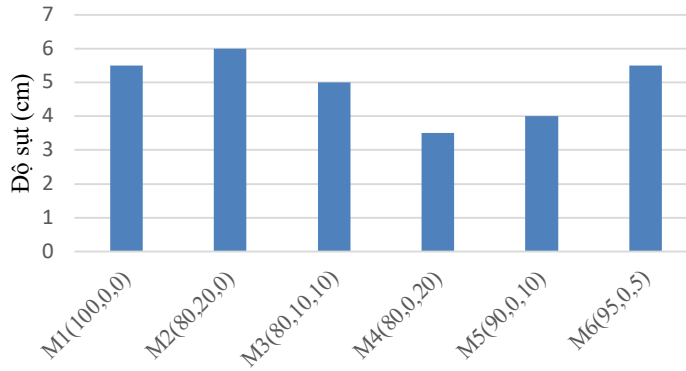
2.6. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của bê tông

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 [29]. Cường độ 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/cm²/s đến 6 daN/cm²/s.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Độ sụt hỗn hợp bê tông

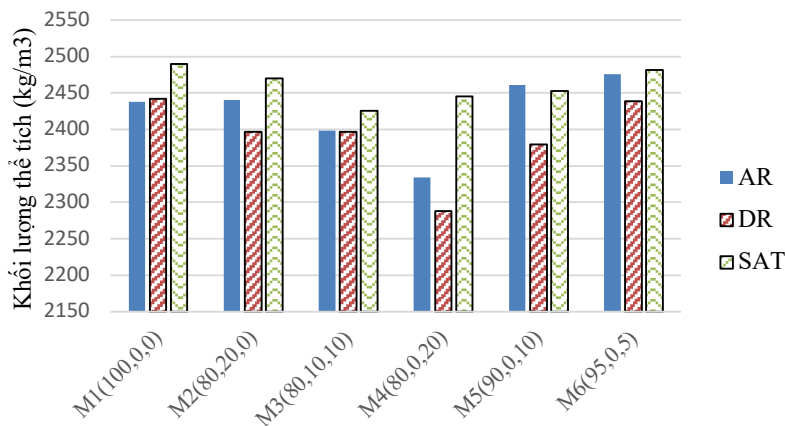
Độ sụt của các hỗn hợp bê tông được đo và thể hiện ở Hình 4. Nhìn chung, độ sụt tăng khi tro bay được sử dụng để thế xi măng nhưng giảm khi có silicafume được sử dụng để thay thế xi măng. Trong khi độ sụt của hỗn hợp bê tông mẫu đối chứng M1 là 5,5 cm, độ sụt của 20% tro bay thay thế xi măng (M2) là 6 cm. Độ sụt của các hỗn hợp bê tông có silicafume thay thế xi măng theo các tỉ lệ 20%, 10%, 5% lần lượt là 3,5 cm, 4,0 cm và 5,5 cm. 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 [30]. Ngược lại diện tích bề mặt của silicafume lớn hơn xi măng do đó tăng việc hút nước làm giảm độ sụt của bê tông. Ngoài ra, hỗn hợp bê tông có silicafume thường ít bị phân tách hơn hỗn hợp bê tông không có silicafume [1].



Hình 4. Độ sệt của các hỗn hợp bê tông

3.2. Khối lượng thể tích của bê tông

Khối lượng thể tích của các mẫu bê tông được trình bày ở Hình 5. Khối lượng thể tích của tất cả các mẫu bê tông ngay sau khi tháo mẫu ở 1 ngày tuổi (AR) thay đổi không đáng kể, dao động trong khoảng từ 2334 kg/m³ đến 2476 kg/m³. Khối lượng thể tích của mẫu bê tông khi thay thế xi măng bằng 20% silicafume là thấp nhất với giá trị là 2334 kg/m³. Hình 5 cũng chỉ ra rằng, khối lượng thể tích của tất cả các mẫu khô (đưỡng hồ trong lò sấy đến khối lượng không đổi) sau 28 ngày tuổi (DR) thay đổi từ 2287 kg/m³ đến 2772 kg/m³. Silicafume và tro bay góp phần làm giảm khối lượng thể tích của bê tông, khi hàm lượng silicafume tăng thì khối lượng thể tích khô (DR) giảm và đạt giá trị nhỏ nhất khi 20% silicafume được sử dụng để thay thế xi măng với giá trị là 2287 kg/m³. Khối lượng thể tích của tất cả các mẫu bão hòa nước (ngâm nước đến khối lượng không đổi) tại 28 ngày tuổi (SAT) gần như chênh lệch rất bé. Trong khi khối lượng thể tích bé nhất của AR và DR là mẫu M4 có 20% silicafume được dùng thay thế xi măng, thì khối lượng thể tích nhỏ nhất của mẫu bão hòa nước (SAT) tương ứng mẫu M3 có 10% silicafume và 10% tro bay. So sánh với mẫu bê tông bão hòa nước có 20% silicafume (M4), mẫu M3 (10% tro bay và 10% silicafume) có khối lượng thể tích bão hòa nước nhỏ hơn chứng tỏ hút nước ít hơn hay nói cách khác là tăng khả năng chống thấm nước hơn. Nguyên nhân có thể là do 10% tro bay có trong mẫu bê tông M3. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đó khi tro bay góp phần tăng khả năng chống thấm nước của bê tông [13].



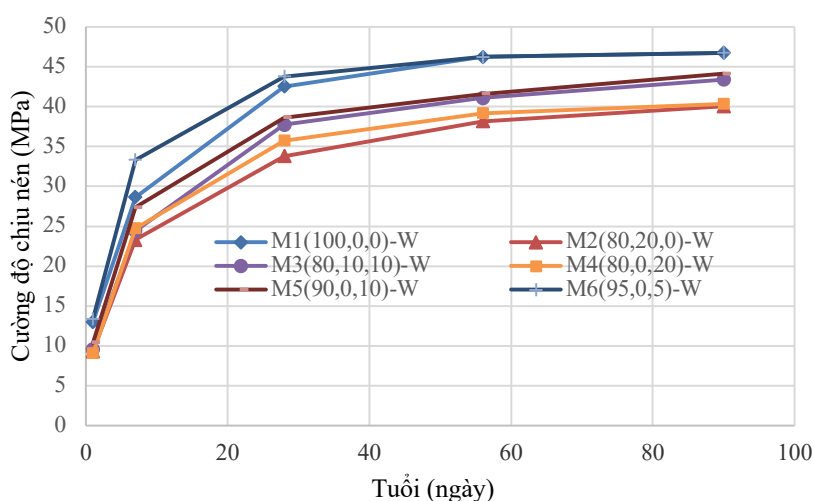
Hình 5. Khối lượng thể tích của bê tông

Trong cả ba trường hợp thì silicafume làm giảm khối lượng thể tích của bê tông. Điều này phù hợp với nghiên cứu trước đó [31]. Khối lượng thể tích của các mẫu bê tông có 20%, 10% và 5% silicafume thay thế xi măng lần lượt là 2334 kg/m³, 2461 kg/m³, 2476 kg/m³ cho mẫu AR và 2287 kg/m³, 2379 kg/m³, 2438 kg/m³ cho mẫu DR và 2445 kg/m³, 2453 kg/m³, 2481 kg/m³ cho mẫu hòa nước SAT. Sự giảm khối lượng thể tích do silicafume được cho là do khối lượng thể tích của silicafume nhỏ hơn póc-lăng xi măng. Trong khi khối lượng thể tích của silicafume là từ 2,2 g/cm³ đến 2,5 g/cm³ thì khối lượng thể tích của xi măng póc lăng là 3,15 g/cm³ [26].

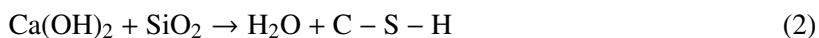
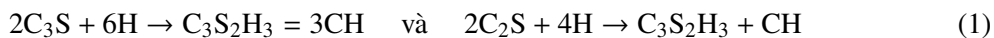
3.3. Ảnh hưởng silicafume, tro bay và môi trường dưỡng hộ đến cường độ chịu nén của bê tông

a. Ảnh hưởng của silicafume và tro bay đến cường độ chịu nén của bê tông khi được dưỡng hộ trong nước

Hình 6 thể hiện cường độ chịu nén của mẫu bê tông đối chứng M1 và các mẫu bê tông có tro bay và/ hoặc silicafume thay thế một phần xi măng khi được dưỡng hộ trong nước. Nhìn chung 20% xi măng được thay thế bởi tro bay và silicafume làm giảm cường độ chịu nén của bê tông. Đến thời điểm 28 ngày tuổi, cường độ chịu nén của mẫu bê tông có 20% tro bay thay thế xi măng (M2) là nhỏ nhất (33,79 MPa) bằng 79% cường độ chịu nén mẫu đối chứng M1 (42,52 MPa). Việc giảm cường độ của bê tông có 20% tro bay Vĩnh Tân thay thế xi măng (M2) so với mẫu đối chứng phù hợp với các nghiên cứu trước đó vì tro bay làm giảm cường độ sớm của bê tông nhưng bê tông có tro bay tiếp tục gia tăng cường độ theo thời gian do các phản ứng hóa học tiếp tục diễn ra đến 6 tháng hoặc thậm chí lâu hơn và vì thế bê tông có tro bay có cường độ cuối cùng cao hơn so với mẫu đối chứng không có tro bay [32]. Điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu trong bài báo này khi cường độ bê tông có tro bay tiếp tục tăng dần đến thời điểm khảo sát 90 ngày, mặc dù còn thấp hơn mẫu đối chứng nhưng dự đoán cường độ bê tông có 20% tro bay (M2) tiếp tục tăng sau thời gian dưỡng hộ lớn hơn 90 ngày. Sự tăng cường độ lâu dài theo thời gian của bê tông có tro bay là do phản ứng pozzolanic giữa Ca(OH)₂ sinh ra từ phản ứng thủy hóa xi măng póc lăng tiếp tục phản ứng với silica oxide (SiO₂) có trong tro bay để tạo gel C-S-H góp phần gia tăng cường độ như được thể hiện trong phương trình (1), (2) [33]. Ngoài ra, tốc độ gia tăng cường độ lâu dài của bê tông có tro bay phụ thuộc vào loại tro bay, thành phần hóa học, độ mịn và tỉ lệ tro bay thay thế xi măng [32] và tỉ lệ nước/chất kết dính [12].



Hình 6. Cường độ chịu nén bê tông khi dưỡng hộ trong nước



Trong khi đó tại 28 ngày cường độ chịu nén của bê tông có 20% xi măng thay thế bởi 20% silica fume (M4), 10% silica fume (M5) và 5% silica fume (M6) lần lượt là 35,76 MPa, 38,6 MPa và 43,76 MPa tương ứng 84%, 91%, 103% cường độ chịu nén của mẫu đối chứng M1. Với hàm lượng silicafume thay thế xi măng hợp lý thông thường 5%-10% theo khối lượng xi măng [26] thì silicafume góp phần tăng cường độ bê tông vì SiO_2 trong silicafume thêm vào sẽ phản ứng với $Ca(OH)_2$ từ phản ứng thủy hóa xi măng để tạo thêm gel C-S-H tương tự như phương trình (1), (2) [1, 34].

Điều này lý giải vì sao so với mẫu đối chứng M1, cường độ chịu nén của mẫu bê tông có 5% silicafume thay thế xi măng (M6) tăng, trong khi cường độ chịu nén của mẫu bê tông có 10% silicafume (M5) và 20% silicafume (M4) giảm. Khi hàm lượng silicafume được sử dụng để thay thế xi măng quá nhiều thì lượng xi măng bị giảm dẫn đến C-S-H tạo ra từ phương trình (1) giảm làm suy giảm cường độ. Tuy nhiên so với các nghiên cứu đã được thực hiện trước đó [34] thì có thể chất lượng của nguồn silicafume được sử dụng trong thí nghiệm này chưa cao dẫn đến việc tăng rất ít cường độ chịu nén khi 5% thay thế xi măng và thậm chí là giảm cường độ chịu nén khi 10% và 20% silicafume được sử dụng để thay thế xi măng. Điều đó cho thấy rằng tương tự như tro bay thì sự ảnh hưởng của silicafume trong việc thay thế xi măng đối với cường độ chịu nén bê tông còn phụ thuộc lớn vào loại silicafume trong đó các thông số như hàm lượng SiO_2 , độ mịn, đóng vai trò quan trọng và cần được tiến hành nghiên cứu sâu hơn với các loại silicafume từ các nguồn khác nhau.

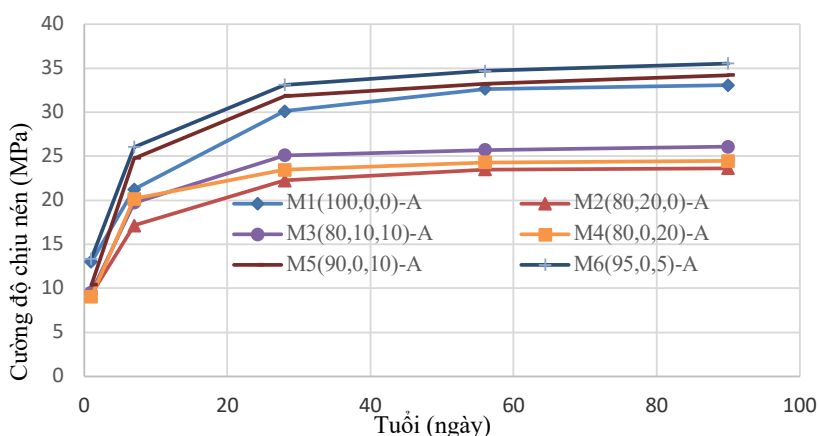
Cơ chế làm việc của silicafume và tro bay trong việc thay thế xi măng gần tương tự nhau như thể hiện ở các phương trình (1), (2). Tuy nhiên silicafume được cho là tăng cường độ ban đầu nhanh hơn tro bay khi được sử dụng để thay thế xi măng [1, 34]. Do đó, tại 28 ngày cường độ chịu nén của bê tông có 20% xi măng thay thế bởi 10% tro bay và 10% silicafume (M3) là 37,75 MPa tương ứng 89% cường độ chịu nén của mẫu đối chứng M1, tăng hơn so với mẫu bê tông có 20% tro bay (M2) hoặc 20% silicafume (M4). Cơ chế làm việc chung của tro bay và silicafume trong việc thay thế xi măng cho đến nay vẫn chưa có thông tin cụ thể [1]. Tuy nhiên các nghiên cứu đã có chỉ ra rằng việc kết hợp giữa silicafume và tro bay góp phần tăng tốc độ phản ứng pozzolan hơn so với việc sử dụng chỉ một mình tro bay [35] và sự phát triển cường độ lâu dài không bị ảnh hưởng vì hàm lượng CaOH tự do vẫn đủ cho các phản ứng số (2) diễn ra [36].

Tóm lại có thể thấy tại thời điểm 28 ngày, 20% tro bay hoặc silicafume hoặc cả hai được dùng để thay thế xi măng thì cường độ chịu nén giảm, nhưng 5% silicafume thay thế xi măng góp phần gia tăng ít cường độ chịu nén của bê tông. Xu hướng này cũng diễn ra tương tự tại thời điểm 56 và 90 ngày. Tại 90 ngày cường độ chịu nén của các mẫu M2 (20% tro bay); M3 (10% tro bay và 10% silicafume), M4 (20% silicafume), M5 (10% silicafume) và M6 (5% silicafume) lần lượt là 40,05 MPa, 43,39 MPa, 40,34 MPa, 44,14 MPa, 46,74 MPa đạt tương ứng 86%, 93%, 86%, 94% và 100% so với mẫu đối chứng M1 (46,73 MPa). Ngoài ra cường độ chịu nén của các mẫu bê tông tiếp tục tăng sau 28 ngày đến 90 ngày.

b. Ảnh hưởng của silicafume và tro bay đến cường độ chịu nén của bê tông khi được dưỡng hộ trong môi trường không khí

Hình 7 thể hiện cường độ chịu nén của mẫu bê tông đối chứng M1 và các mẫu bê tông có tro bay và/hoặc silicafume thay thế một phần xi măng khi được dưỡng hộ trong không khí. Tương tự như nhóm mẫu dưỡng hộ trong môi trường nước, đối với các mẫu bê tông dưỡng hộ trong môi trường

không khí, 20% xi măng được thay thế bởi tro bay hoặc silicafume làm suy giảm cường độ chịu nén của bê tông. Tại thời điểm 28 ngày, cường độ chịu nén của mẫu bê tông có 20% tro bay thay thế xi măng là thấp nhất (22,24 MPa), đạt 74% so với mẫu đối chứng M1. Trong khi đó cường độ chịu nén của mẫu M3 (10% tro bay, 10% silicafume) và M4 (20% silicafume) tương ứng lần lượt là 25,1 MPa và 23,48 MPa, đạt 83% và 78% so với mẫu đối chứng M1. Nguyên nhân sự suy giảm cường độ này có cơ chế hoàn toàn tương tự như trường hợp dưỡng hộ trong nước được trình bày ở mục 3.3a. Tuy nhiên 10% và 5% silicafume góp phần tăng cường độ chịu nén bê tông tại 28 ngày, với cường độ lần lượt là 31,85 MPa và 33,13 MPa đạt 106% và 110% cường độ mẫu đối chứng M1 (30,12 MPa). Cơ chế của sự gia tăng cường độ khi silicafume được sử dụng thay thế xi măng ở trường hợp này tương tự như được giải thích ở Mục 3.3a và phù hợp với các nghiên cứu trước đó [26, 34]. Mặc dù tất cả các mẫu bê tông dưỡng hộ môi trường không khí có cường độ chịu nén giảm so với dưỡng hộ trong môi trường nước nhưng xét các mẫu cùng môi trường dưỡng hộ không khí, 10% silicafume góp phần tăng cường độ chịu nén so với mẫu đối chứng. Do đó có thể thấy môi trường dưỡng hộ có ảnh hưởng nhiều đến sự phát triển cường độ chịu nén của bê tông có silicafume trong thành phần cấp phối.



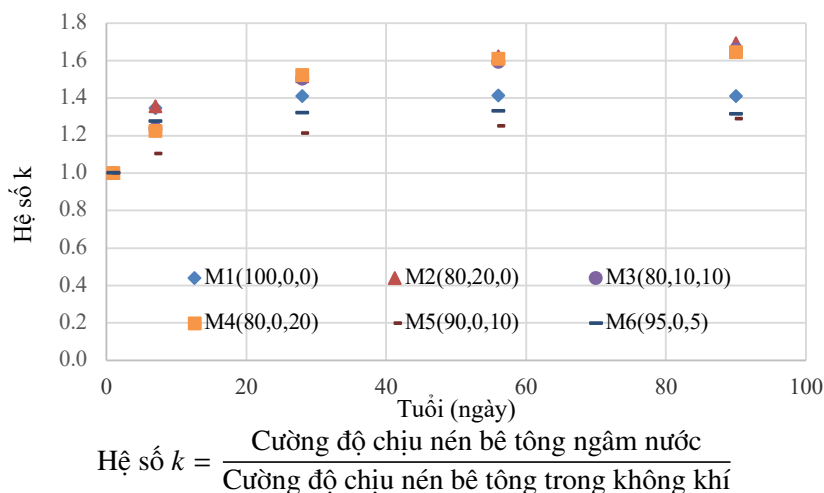
Hình 7. Cường độ chịu nén bê tông khi dưỡng hộ trong không khí

Tương tự như nhóm mẫu dưỡng hộ trong nước, xu hướng tương tự cũng diễn ra cho cường độ chịu nén của các mẫu bê tông tại 56 và 90 ngày. Tại 90 ngày cường độ chịu nén của các mẫu M2 (20% tro bay); M3 (10% tro bay và 10% silicafume), M4 (20% silicafume), M5 (10% silicafume) và M6 (5% silicafume) lần lượt là 23,63MPa, 26,1 MPa, 24,48 MPa, 34,2 MPa, 35,53 MPa đạt tương ứng 71%, 79%, 74%, 103% và 107% so với mẫu đối chứng M1 (33,08 MPa). So với việc dưỡng hộ trong nước thì cường độ chịu nén các mẫu bê tông dưỡng hộ trong không khí chỉ tăng đến 28 ngày, sau đó dường như tăng rất bé hoặc không đổi đến 90 ngày tuổi.

c. Quan hệ giữa môi trường dưỡng hộ và cường độ chịu nén của bê tông

Hệ số tỉ lệ k giữa cường độ chịu nén của bê tông dưỡng hộ trong nước và bê tông dưỡng hộ trong không khí tại các thời điểm thí nghiệm đến 90 ngày được trình bày tại Hình 8. Tổng thể, cường độ của tất cả các mẫu bê tông có và không có tro bay hay silicafume thay thế xi măng khi được dưỡng hộ trong nước lớn hơn so với các mẫu bê tông tương ứng dưỡng hộ trong môi trường không khí. Trong tất cả các trường hợp, hệ số k dao động trong khoảng từ 1,2 đến 1,7 ngoại trừ mẫu M5 tại 7 ngày. Sự khác biệt lớn nhất giữa hai môi trường dưỡng hộ là đối với mẫu M2 khi 20% tro bay thay thế xi măng, với k từ 1,36 đến 1,69 tương ứng ở tuổi 7 ngày đến 90 ngày. Sự khác biệt nhỏ nhất thuộc mẫu M5 khi 10% silicafume được sử dụng để thay thế xi măng, với k từ 1,1 đến 1,29. Hình 8 cũng cho thấy rằng

sự khác biệt cường độ chịu nén giữa hai môi trường dưỡng hộ k tăng theo tuổi của bê tông đặc biệt sau 28 ngày, điều đó có nghĩa là với bê tông dưỡng hộ trong môi trường nước, cường độ sẽ tiếp tục phát triển ở tuổi lâu dài trong khi bê tông dưỡng hộ trong không khí sự phát triển cường độ rất bé sau 28 ngày.



Hình 8. Tỷ lệ cường độ chịu nén của bê tông dưỡng hộ trong hai môi trường nước và không khí

4. Kết luận

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

- Tro bay làm tăng độ sụt trong khi silicafume làm giảm độ sụt của bê tông.
- Silicafume làm giảm khối lượng thể tích của bê tông.
- Trong cả hai môi trường dưỡng hộ thì 20% tro bay thay thế xi măng làm giảm cường độ chịu nén của bê tông tại thời điểm khảo sát ở 90 ngày, tuy nhiên cường độ vẫn tiếp tục phát triển theo thời gian. Silicafume góp phần tăng cường độ chịu nén bê tông khi được thay thế xi măng ở một tỷ lệ khối lượng thích hợp từ 5-10% và phụ thuộc vào môi trường dưỡng hộ. Sự kết hợp giữa silicafume và tro bay góp phần tăng cường độ chịu nén so với bê tông chỉ có tro bay và silicafume riêng lẻ thay thế xi măng.

- Các mẫu bê tông dù có hay không có tro bay, silicafume đều có cường độ chịu nén tiếp tục tăng sau 28 ngày đến thời điểm khảo sát 90 ngày khi được dưỡng hộ trong nước. Ngược lại, cường độ chịu nén các mẫu bê tông dưỡng hộ trong không khí chỉ tăng đến 28 ngày, sau đó tăng không đáng kể.

- Cường độ của bê tông có và không có tro bay hay silicafume thay thế xi măng khi được dưỡng hộ trong nước lớn hơn so với các mẫu bê tông tương ứng dưỡng hộ trong môi trường không khí. Hệ số tỷ lệ k giữa cường độ chịu nén khi dưỡng hộ trong nước và trong không khí dao động trong khoảng từ 1,2 đến 1,7.

- Sự khác biệt về cường độ chịu nén lớn nhất giữa hai môi trường dưỡng hộ là khi 20% tro bay thay thế xi măng, với $k = 1,36-1,69$. Sự khác biệt nhỏ nhất khi 10% silicafume được sử dụng để thay thế xi măng, với $k = 1,1-1,29$.

Tài liệu tham khảo

- [1] ACI 234R-96 (2000). *Guide for the use of silica fume in concrete*. American Concrete Institute, Detroit.

- [2] 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](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 12 (2):86–91.
- [3] Davis, R. E., Carlson, R. W., Kelly, J. W., Davis, H. E. (1937). Properties of cements and concretes containing fly ash. *Proceedings American Concrete Institute*, 33(5):577–612.
- [4] Helmuth, R. (1987). *Fly ash in cement and concrete*. Portland Cement Association, Skokie, Ill.
- [5] Malhotra, V. M., Ramezani-pour, A. A. (1994). *Fly ash in concrete*. second edition, CANMET, Ottawa.
- [6] ACI 232.2R-96 (1996). *Use of fly ash in concrete*. American Concrete Institute, Detroit.
- [7] Tuấn, N. V., Thắng, N. C., Hanh, P. H. (2015). [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](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 9(2):11–18.
- [8] Lâm, N. T., Khánh, Đ. Đ. (2015). [Độ bền sulfat của xi măng póc lăng hỗn hợp sử dụng phụ gia khoáng tro bay](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 9(2):34–39.
- [9] Mehta, P. K. (2004). High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Iowa State University Ames, IA, USA, 3–14.
- [10] Corral, R., Arredondo, S., Almaral, J., Gómez, J. (2013). Chloride corrosion of embedded reinforced steel on concrete elaborated from recycled coarse aggregates and supplementary cement materials. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(1):21–35.
- [11] Nguyen, C. V., Lambert, P., Bui, V. N. (2020). [Effect of locally sourced pozzolan on corrosion resistance of steel in reinforced concrete beams](#). *International Journal of Civil Engineering*, 1–12.
- [12] 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.
- [13] Nguyễn, V. C., Đặng, V. M. (2019). [Ảnh hưởng của tro bay nhiệt điện Duyên Hải đến cường độ chịu nén và khả năng chống thấm của bê tông](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 17:11–14.
- [14] Fraay, A. L. A., Bijen, J. M., De Haan, Y. M. (1989). [The reaction of fly ash in concrete a critical examination](#). *Cement and Concrete Research*, 19(2):235–246.
- [15] Zemajtis, J. Z. [Role of concrete curing](#). PCA America's Cement Manufacturers.
- [16] James, T., Malachi, A., Gadzama, E. W., Anametemok, A. (2011). Effect of curing methods on the compressive strength of concrete. *Nigerian Journal of Technology*, 30(3):14–20.
- [17] Wedatalla, A. M. O., Jia, Y., Ahmed, A. A. M. (2019). [Curing effects on high-strength concrete properties](#). *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [18] Zeyad, A. M. (2019). [Effect of curing methods in hot weather on the properties of high-strength concretes](#). *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 31(3):218–223.
- [19] Aldea, C.-M., Young, F., Wang, K., Shah, S. P. (2000). [Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement](#). *Cement and Concrete Research*, 30(3):465–472.
- [20] Mohamed, H. A. (2011). [Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions](#). *Ain Shams Engineering Journal*, 2(2):79–86.
- [21] Kim, J. K., Han, S. H., Song, Y. C. (2002). [Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results](#). *Cement and Concrete Research*, 32(7):1087–1094.
- [22] TCVN 7570:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [23] TCVN 6260:2009. *Xi măng Pooc lăng hỗn hợp - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [24] 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.
- [25] TCVN 8827:2011. *Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa - ilicafume và tro trấu nghiền mịn*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [26] PCA Committee (2002). [Design and Control of Concrete Mixtures, Chapter 3: Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Natural Pozzolans](#). EB001.
- [27] TCVN 3106:1993. *Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

Nam.

- [28] BS EN 12390-7:2019. *Testing hardened concrete- Density of hardened concrete*. British Standard Institute, London.
- [29] TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng – Phương pháp xác định cường độ chịu nén*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [30] 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.
- [31] Ajileye, F. V. (2012). Investigations on microsilica (silica fume) as partial cement replacement in concrete. *Global Journal of Research In Engineering*, 12(1-E).
- [32] Thomas, M. D. A. (2007). *Optimizing the use of fly ash in concrete*, volume 5420. Portland Cement Association Skokie, IL.
- [33] <http://concretebasics.org/articles/chemical-nature-fly-ash-concrete/>.
- [34] Raveendran, K. G., Rameshkumar, V., Saravanan, M., Kanmani, P., Sudhakar, S. (2015). Performance of silica fume on strength and durability of concrete. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 4:10162–10166.
- [35] Mehta, P. K., Gjörv, O. E. (1982). [Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica-fume](#). *Cement and Concrete Research*, 12(5):587–595.
- [36] Carrette, G. G., Malhotra, V. M. (1983). [Mechanical properties, durability, and drying shrinkage of Portland cement concrete incorporating silica fume](#). *Cement, Concrete and Aggregates*, 5(1):3–13.