

Độ bền lâu của bê tông sử dụng xỉ hạt lò cao nghiền mịn làm phụ gia khoáng

Phan Văn Quỳnh^{1*}, Lê Việt Hùng¹, Phạm Hữu Thiên¹

¹Viện Vật liệu xây dựng, Số 235 Nguyễn Trãi, Q. Thanh Xuân, Hà Nội

TỪ KHOÁ

Bê tông xỉ hạt lò cao nghiền mịn
Xỉ hạt lò cao nghiền mịn
Xi
Độ bền lâu
Phụ gia khoáng

TÓM TẮT

Xi lò cao (GBFS) là sản phẩm phụ của quá trình luyện gang trong lò cao. Ở Việt Nam hiện nay, xỉ lò cao chủ yếu được nghiền cùng clanke để sản xuất xi măng pooc lăng hỗn hợp. Việc sử dụng xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GGBFS) làm phụ gia khoáng cho bê tông còn là vấn đề mới. Bài báo này trình bày ảnh hưởng của xỉ lò cao nghiền mịn khi sử dụng làm phụ gia khoáng đến một số tính chất liên quan đến độ bền lâu của bê tông như khả năng chống thấm nước, chống thấm ion clo, độ bền sun phát, độ co khô và phản ứng kiềm cốt liệu. Bê tông sử dụng GGBFS làm phụ gia khoáng với tỷ lệ GGBFS 20-70% và xi măng nền là PC40. Kết quả nghiên cứu cho thấy sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn thay thế một phần xi măng có thể cải thiện mức độ chống thấm ion clo, chống thấm nước và khả năng ngăn cản phản ứng kiềm cốt liệu của bê tông. Ngoài ra, sử dụng GGBFS còn giúp cải thiện độ bền sun phát của thanh vữa ngâm trong môi trường sun phát (Na_2SO_4).

KEYWORDS

Ground-granulated blast-furnace slag
concrete
Slag
Durability
Mineral admixture

ABSTRACT

Granulated blast-furnace slag (GBFS) is a by-product of iron and steel-making from a blast furnace. In Vietnam today, granulated blast furnace slag is mainly ground with clinker to produce portland blended cement. The use of ground-granulated blast furnace slag (GGBFS) as a mineral admixture for concrete is still a new issue. This paper presents the effect of ground-granulated blast furnace slag, which was used as a mineral admixture on some properties related to the durability of concrete such as waterproofing, chloride ion impermeability, sulfate resistance and aggregate alkali reactivity. Concrete use GGBFS as a mineral admixture with the ratio of GGBFS 20 - 70% with the control-cement PC40. Research results show that using GGBFS to partially replace cement can improve chloride ion impermeability resistance, waterproofing and ability to prevent the aggregate alkaline reaction of concrete. In addition, using GGBFS also improves the sulfate resistance of mortar specimens, which were immersed in a sulfate solution (Na_2SO_4).

1. Giới thiệu

Mặc dù bê tông được sử dụng rất phổ biến trong xây dựng hàng trăm năm qua nhưng nó vẫn có những yếu điểm như dòn, dễ bị nứt, suy giảm độ bền trong các điều kiện môi trường biển, hóa chất, thay đổi nhiệt độ, độ ẩm... Đồng thời, bê tông truyền thống được cho là chưa có tính bền vững vì sử dụng nhiều xi măng dẫn đến làm tăng lượng phát thải khí nhà kính trên trái đất do sản xuất xi măng gây ra. Vì vậy, từ giữa thế kỷ XX việc nghiên cứu và sử dụng các loại phụ gia bao gồm cả phụ gia hóa học và phụ gia khoáng cho xi măng và bê tông đã được tiến hành rộng rãi ở nhiều nước trên thế giới nhằm nâng cao chất lượng, đồng thời khắc phục các nhược điểm của bê tông. Các loại phụ gia khoáng có nguồn gốc từ chất thải của các ngành công nghiệp nặng bao gồm silica fume, tro bay nhiệt điện, xỉ lò cao nghiền mịn và chất thải nông nghiệp như tro trấu được xem là các loại phụ gia khoáng “xanh” và “bền vững” bởi vì chúng vừa có tác dụng cải thiện tính năng của bê tông giúp gián tiếp giảm lượng phát thải khí nhà kính phát sinh từ ngành công nghiệp sản xuất xi măng. Bê tông hiện đại có thành phần không chỉ cốt liệu, xi măng và nước

mà thường bao gồm thêm thành phần nguyên liệu thứ tư là phụ gia (hóa và khoáng) [1].

Trên thế giới, sự phát triển công nghiệp và năng lượng ngày càng tăng dẫn tới phát sinh khối lượng lớn các loại phế thải công nghiệp, đặc biệt là phế thải ngành công nghiệp luyện gang, thép và nhiệt điện sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Căn cứ theo số liệu công bố về sản lượng sản xuất gang thép trên thế giới năm 2017 của Hiệp hội thép thế giới, tổng sản lượng gang lò cao sản xuất ra trong năm 2016 và 2017 khoảng 1163 triệu tấn/năm, lượng xỉ hạt lò cao phát sinh ước tính khoảng 30% sản lượng gang, tức khoảng 350 triệu tấn/năm. Đây là lượng chất thải khổng lồ, nhưng cũng đồng thời là nguồn nguyên liệu dồi dào để sử dụng làm nguyên vật liệu thay thế tài nguyên thiên nhiên.

Tại Việt Nam, vấn đề nghiên cứu sử dụng xỉ hạt lò cao (GBFS) cho sản xuất xi măng, bê tông được quan tâm, nghiên cứu từ khoảng những năm 1970. Tuy nhiên, số lượng và phạm vi các nghiên cứu còn hạn chế, chỉ dừng lại ở mức thử nghiệm một số tỷ lệ pha trộn xỉ vào xi măng để đánh giá các tính chất thông thường của xi măng. Chưa có công trình nghiên cứu nào thực hiện đầy đủ, có hệ thống về đặc tính kỹ thuật của xỉ nghiền, đặc biệt là bê tông sử dụng xỉ nghiền xi hoặc

*Liên hệ tác giả: phanvanquynh.nuce@gmail.com

Nhận ngày 04/10/2021, sửa xong ngày 21/10/2021, chấp nhận đăng 04/11/2021

GGBFS làm phụ gia khoáng. Trong những năm trước đây, xi hạt lò cao của các nhà máy luyện gang chủ yếu được bán ở dạng nguyên khai cho các nhà máy xi măng để nghiền cùng với clanhke xi măng tạo thành xi măng poóc hỗn hợp tại nhà máy. Do đặc tính của xi hạt lò cao là khó nghiền hơn khá nhiều so với clanhke xi măng, nên khi nghiền chung với clanhke trong máy nghiền bi thì độ mịn của xi ở mức thấp hơn so với xi măng [2]. Điều này làm hạn chế các ưu điểm của GGBFS, đồng thời làm giảm nhiều cường độ tuổi sớm cũng như dễ gây hiện tượng tách nước của hỗn hợp bê tông. Hiện nay ở nước ta, sản phẩm GGBFS đã bắt đầu được sản xuất ở quy mô công nghiệp và đã được đưa ra sử dụng tại một số công trình xây dựng. Hiện tại có hai nhà máy nghiền GBFS quy mô lớn là nhà máy của Công ty Thép Hòa Phát tại Hải Dương và Quảng Ngãi và nhà máy nghiền GBFS của Công ty Tài nguyên CHC Việt Nam tại Bà Rịa-Vũng Tàu. Tổng công suất của 3 nhà máy theo thiết kế là 2,5 triệu tấn GGBFS/năm. Hiện nay số công trình xây dựng, nhà sản xuất bê tông sử dụng GGBFS vẫn còn ít. Công ty Hòa Phát mới chủ yếu cấp cho các dự án xây dựng do tập đoàn này xây dựng; sản phẩm của Công ty Công ty Tài nguyên CHC Việt Nam cũng mới chủ yếu cung cấp cho dự án xây dựng đầu tư nước ngoài, các nhà sản xuất bê tông, xi măng có vốn nước ngoài.

Bài báo này trình bày ảnh hưởng của xi lò cao nghiền mịn khi sử dụng làm phụ gia khoáng đến một số tính chất liên quan đến độ bền lâu của bê tông như cường độ nén, khả năng chống thấm nước, chống thấm ion clo, độ bền sun phát, và phản ứng kiềm cốt liệu. Bê tông sử dụng GGBFS làm phụ gia khoáng với tỷ lệ GGBFS 20 đến 70 % với xi măng nền là PC40. Kết quả nghiên cứu cho thấy sử dụng xi lò cao nghiền mịn

thay thế một phần xi măng có thể cải thiện mức độ chống thấm ion clo, chống thấm nước và khả năng ngăn cản phản ứng kiềm cốt liệu của bê tông. Ngoài ra, sử dụng GGBFS còn giúp cải thiện độ bền sun phát của thanh vữa ngâm trong môi trường natri sun phát.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Xi măng: xi măng poóc lăng PC40 Nghi Sơn có các tính chất kỹ thuật đạt yêu cầu theo TCVN 2682:2009.

Cốt liệu nhỏ: là cát sông, từ nguồn cát sông Lô, Việt Trì, Phú Thọ, có mô đun độ lớn ~ 2,6. Các chỉ tiêu kỹ thuật của mẫu cát phù hợp loại cát thô theo TCVN 7570:2006.

Cốt liệu lớn: là đá dăm từ đá vôi cỡ hạt 5 đến 20 mm từ mỏ đá khu vực Phù Lý, Hà Nam. Các chỉ tiêu kỹ thuật của mẫu đá phù hợp cốt liệu lớn loại 5 đến 20 mm theo TCVN 7570:2006.

Phụ gia siêu dẻo: loại phụ gia siêu dẻo phổ biến trên thị trường gốc Polycarboxylate (PCE). Loại lựa chọn sử dụng cho nghiên cứu là phụ gia MasterGlenium® SKY 8735 của hãng BAFS. Đây là loại phụ gia gốc polycarboxylate, có độ giảm nước 15 đến 20 %, phù hợp với loại G theo TCVN 8826:2011.

Xi hạt lò cao nghiền mịn sử dụng trong đề tài được lấy từ nhà máy thép Formosa Hà Tĩnh, có tỷ diện > 4000 cm²/g. Thành phần khoáng của xi hạt lò cao nghiền mịn Formosa chủ yếu là pha vô định hình (~ 98 %). Các chỉ tiêu cơ lý và thành phần hóa của xi hạt lò cao được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa xi lò cao sử dụng cho nghiên cứu.

MKN	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Cl ⁻	S ₂	Hệ số K
0,07	34,49	40,07	14,10	0,23	7,51	0,20	0,24	0,82	0,12	<0,001	0,63	1,88

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Công tác thử nghiệm và xác định các tính chất của vật liệu và bê tông được sử dụng chủ yếu theo các phương pháp tiêu chuẩn trong hệ thống TCVN. Độ thấm nước, thấm ion clo, phản ứng kiềm – cốt liệu, độ bền sun phát được xác định theo các tiêu chuẩn TCVN 3116:1993, TCVN 9337:2012, TCVN 7572-14:2006, TCVN 7713:2007 tương ứng.

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

Độ bền lâu của bê tông được định nghĩa là khả năng chống lại sự thâm nhập của các tác nhân xâm thực từ bên ngoài môi trường cũng như các tác nhân từ bên trong bản thân bê tông mà vẫn đảm bảo được các tính chất kỹ thuật yêu cầu. Trong nghiên cứu này đã khảo sát ảnh hưởng của GGBFS đến các chỉ tiêu độ chống thấm nước, độ chống thấm ion clo, độ bền sun phát và phản ứng kiềm – cốt liệu của bê tông.

3.1. Khả năng chống thấm

Khả năng chống thấm của bê tông được đánh giá thông qua mức độ thâm nhập ion clo bằng phương pháp đo điện lượng theo tiêu chuẩn ASTM C1202 (TCVN 9337:2012) và độ thấm nước theo tiêu chuẩn TCVN 3116:1993. Cấp phối bê tông được cho trên Bảng 2, với hàm lượng GGBFS thay thế xi măng từ 0 đến 50 %, sử dụng xi măng PC40 Nghi Sơn. Bê tông có độ sụt (16 ÷ 18) cm. Kết quả thí nghiệm thể hiện trong Bảng 3 và Hình 1 cho thấy, khả năng chống thấm nước cũng như khả năng chống thấm ion clo được cải thiện đáng kể khi sử dụng GGBFS thay thế xi măng. Mức độ cải thiện khả năng chống thấm tăng lên khi tăng hàm lượng GGBFS. Khi sử dụng đến 50 % GGBFS thay thế xi măng, điện lượng truyền qua mẫu theo ASTM C1202 giảm từ 1527 (Culong) của mẫu đối chứng xuống còn 528 (Culong) và độ chống thấm nước tăng từ B12 lên đến B16.

Khả năng cải thiện tính chống thấm ion clo của bê tông khi sử dụng GGBFS theo các kết quả thí nghiệm đã chỉ ra cũng phù hợp với các kết quả của nhiều nghiên cứu được tổng hợp trong ACI 233 [3]. Theo đó, sự có mặt của xi làm cải thiện khả năng chống thấm của bê tông do phản ứng thủy hóa làm giảm bớt hàm lượng Ca(OH)₂ trong hệ thống lỗ

rỗng của đá xi măng, đồng thời tạo sản phẩm CSH làm giảm kích thước các lỗ rỗng trong đá xi măng và cải thiện vùng tiếp xúc giữa đá xi măng và cốt liệu, do đó làm tăng tính chống thấm của bê tông. Tác dụng nâng

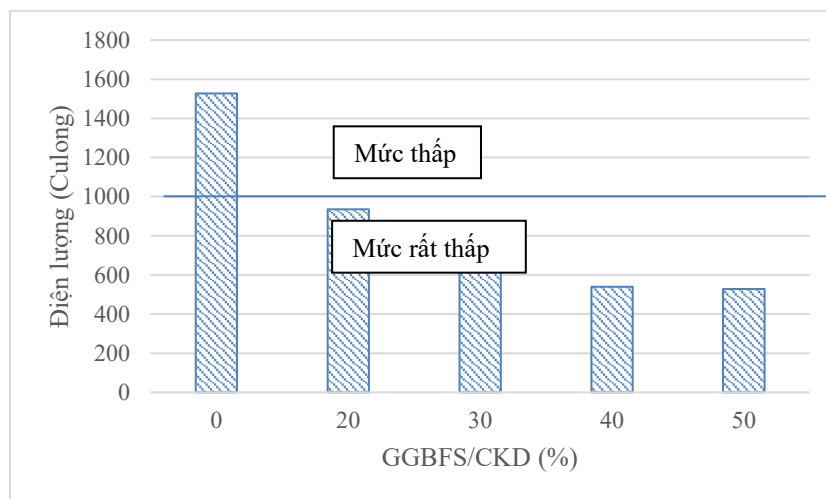
cao tính chống thấm của bê tông khi có mặt của xi cũng là nguyên nhân làm tăng khả năng chống ăn mòn cốt thép và khả năng bền trong môi trường sulfate của bê tông chứa xi.

Bảng 2. Các cấp phối bê tông sử dụng xi măng PC40.

STT	Ký hiệu mẫu	Tỷ lệ GGBFS (%)	Thành phần cấp phối một m ³ bê tông theo thiết kế						Độ sụt yêu cầu (cm)
			Xi măng (kg)	GGBFS (kg)	Cát sông (kg)	Đá dăm (kg)	PGHH (lít)	Nước (lít)	
1	PC40S0	0	360	0	789	1079	3,60	170	16-18
2	PC40S20	20	288	72	784	1079	3,60	170	16-18
3	PC40S30	30	252	108	784	1079	3,60	170	16-18
4	PC40S40	40	216	144	784	1079	3,60	170	16-18
5	PC40S50	50	180	180	784	1079	3,60	170	16-18

Bảng 3. Độ thấm ion clo theo phương pháp đo điện lượng của bê tông với tỷ lệ sử dụng GGBFS và tỷ lệ N/CKD khác nhau.

STT	Ký hiệu mẫu	Hàm lượng GGBFS (%)	Hàm lượng CKD (kg)	Điện lượng truyền qua (cu lông)	Đánh giá theo ASTM C1202	Độ thấm nước (cấp B)
1	PC40	0	360	1527	thấp	12
2	PC40S20	20	360	935	rất thấp	14
3	PC40S30	30	360	631	rất thấp	16
4	PC40S40	40	360	539	rất thấp	16
5	PC40S50	50	360	528	rất thấp	16



Hình 1. Độ thấm ion clo của bê tông sử dụng GGBFS.

3.2. Độ bền sun phát

Trong nghiên cứu này, khả năng bền trong môi trường sun phát của bê tông sử dụng chất kết dính chứa GGBFS và so sánh với mẫu xi măng PC40 được đánh giá trên mẫu thanh vữa thử nghiệm theo

TCVN 7713:2007 và được đánh giá so sánh với qui định kỹ thuật của xi măng poóc lăng phát hỗn hợp bền sun phát phù hợp theo TCVN 7711:2013. CKD chứa là xi măng hỗn hợp PC40-GGBFS, với tỷ lệ GGBFS là 20, 30, 40, 50, 60 và 70 % theo khối lượng CKD. Ngoài ra, theo nhiều kết quả nghiên cứu trước đây [2] thì khả năng bền sun

phát của CKD chứa GGBFS còn phụ thuộc vào hàm lượng thạch cao (quy về SO₃) trong CKD. Đề tài này khảo sát ảnh hưởng của loại và tỷ lệ GGBFS với hàm lượng thạch cao (quy về SO₃) trong CKD 2,5 %. Các mẫu được ngâm trong dung dịch Na₂SO₄ 5 %. Chi tiết cấp phối vật liệu đúc thành vữa cho thử nghiệm thể hiện trong Bảng 4.

Từ kết quả thí nghiệm cho thấy, độ nở của thanh vữa tăng lên

theo thời gian ngâm mẫu với tất cả các mẫu thử nghiệm. Khi tăng hàm lượng GGBFS thay thế xi măng, độ nở sun phát của mẫu thử giảm xuống rõ rệt. Cụ thể ở tuổi 6 tháng, độ nở sun phát của mẫu đối chứng là 0,92 % còn các mẫu sử dụng từ 30 đến 70 % GGBFS có độ nở sun phát lần lượt là 0,197 %; 0,084 %; 0,109 %; 0,058 % và 0,024 % tương ứng với hàm lượng GGBFS là 30 %; 40 %; 50 %; 60 % và 70 %.

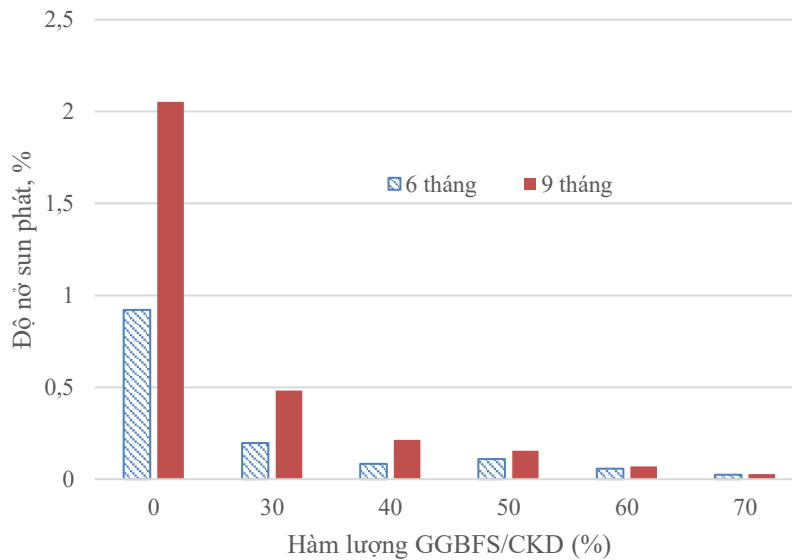
Bảng 4. Cấp phối vật liệu đúc thành vữa đo độ nở ngâm trong dung dịch Na₂SO₄ 5 %.

TT	Ký hiệu mẫu	Tỷ lệ GGBFS (%)	Hàm lượng SO ₃ (%)	Tỷ lệ cát/CKD	Tỷ lệ N/CKD
1	PC40	0	2,4	2,75	0,485
2	PC40S30	30	2,5	2,75	0,502
3	PC40S40	40	2,5	2,75	0,505
4	PC40S50	50	2,5	2,75	0,511
5	PC40S60	60	2,5	2,75	0,524
6	PC40S70	70	2,5	2,75	0,531

Bảng 5. Kết quả độ nở sun phát của thanh vữa ngâm trong dung dịch Na₂SO₄ 5 %.

STT	Mã hóa cấp phối	Độ nở thanh vữa ngâm trong dung dịch Na ₂ SO ₄ (%)						
		1 tuần	2 tuần	1 tháng	2 tháng	3 tháng	6 tháng	9 tháng
1	PC40	-0,049	0,005	0,011	0,072	0,293	0,920	2,052*
2	PC40S30	0,011	0,034	0,038	0,051	0,082	0,197	0,482
3	PC40S40	0,005	0,042	0,044	0,041	0,059	0,084	0,213
4	PC40S50	0,015	0,041	0,044	0,040	0,057	0,109	0,154*
5	PC40S60	0,008	0,020	0,027	0,037	0,051	0,058	0,069
6	PC40S70	0,009	0,013	0,018	0,026	0,028	0,024	0,027

* Mẫu cong vênh



Hình 2. Độ nở sun phát sau 6 tháng và 9 tháng của bê tông sử dụng GGBFS.

3.3. Phản ứng kiềm – cốt liệu

Để đánh giá khả năng hạn chế khả năng gây phản ứng kiềm cốt liệu của bê tông sử dụng GGBFS, đề tài đã tiến hành đánh giá độ nở thanh vữa sử dụng chất kết dính xi măng PC40 và bổ sung Na₂O để tổng lượng kiềm tương đương là 1 % (xi măng cao kiềm), hỗn hợp xi măng kiềm cao và GGBFS và cốt liệu là thủy tinh pyrex nghiền theo cấp hạt quy định theo tiêu chuẩn ASTM C441 [4]. Các thanh vữa sau đó được bảo dưỡng ở môi trường nhiệt ẩm 38±1 °C để tăng tốc khả năng phản ứng kiềm cốt liệu. Kết quả thí nghiệm độ nở thanh vữa sử dụng xi măng cao kiềm và xi măng cao kiềm - GGBFS được thể hiện trong Bảng 6.

Từ kết quả thí nghiệm cho thấy độ nở thanh vữa do phản ứng kiềm - silic giảm dần khi tăng hàm lượng sử dụng GGBFS. Điều này có thể giải thích là do trong quá trình thủy hóa rắn chắc, GGBFS sẽ phản ứng với Ca(OH)₂ và kiềm trong xi măng tạo các sản phẩm

khoáng CSH bền vững, lượng kiềm còn lại phản ứng với thủy tinh pyrex tạo khoáng gây nở thể tích không nhiều, dẫn đến độ nở do phản ứng kiềm – silic giảm đáng kể.

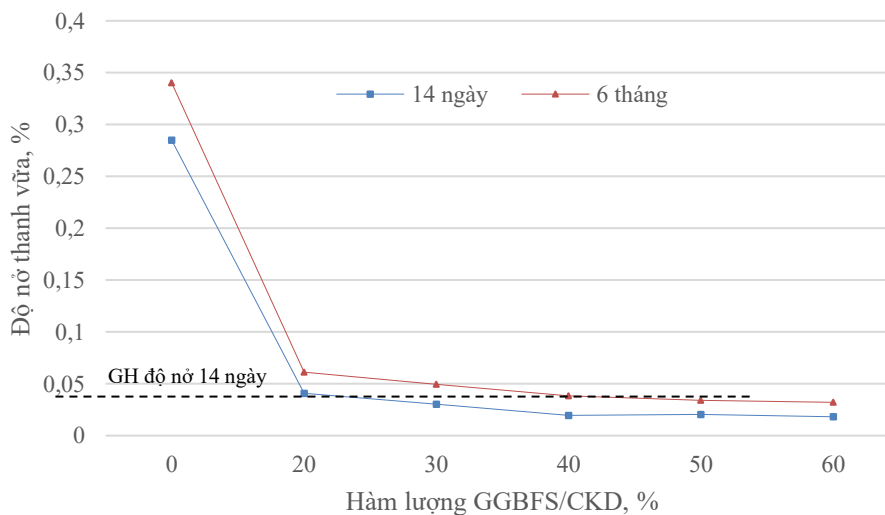
Hiệu quả giảm nở thể tích do phản ứng kiềm - silic thường được đánh giá thông qua độ nở thanh vữa ở tuổi 14 ngày. Do thủy tinh pyrex rất nhạy cảm với xi măng có hàm lượng kiềm cao, nên đến tuổi 14 ngày phản ứng kiềm - silic đã xảy ra gần như hoàn toàn, điều này thể hiện rõ qua độ nở thanh vữa của xi măng poóc-lăng cao kiềm. Độ nở thanh vữa ở tuổi 14 ngày không lớn hơn 0,02 % được coi là có khả năng hạn chế sự nở do phản ứng kiềm - silic (ASTM C989). Độ nở thanh vữa ở các tuổi dài ngày tăng hầu như không đáng kể do phản ứng kiềm – silic đã xảy ra cơ bản trong thời gian ở tuổi sớm.

Khi sử dụng GGBFS ở tỷ lệ 40 % trở lên, độ nở thanh vữa sử dụng GGBFS thấp hơn 0,02 %, điều này cho thấy hiệu quả của GGBFS trong việc ngăn ngừa được sự nở thể tích do phản ứng kiềm - silic.

Bảng 6. Kết quả thí nghiệm độ nở do phản ứng kiềm – silic.

TT	Mẫu	Tỷ lệ GGBFS, %	Độ nở thanh vữa, %				
			14 ngày	28 ngày	2 tháng	3 tháng	6 tháng
1	Xi măng cao kiềm	0	0,2848	0,3372	0,3372	0,3396	0,3401
2	GGBFS	20	0,0408	0,0528	0,0586	0,0602	0,0612
		30	0,0304	0,0432	0,0468	0,0484	0,0495
		40	0,0196	0,0244	0,0324	0,0369	0,0383
		50	0,0206	0,0252	0,0319	0,0326	0,0341
		60	0,0182	0,0231	0,0300	0,0314	0,0321

Độ nở phản ứng kiềm - cốt liệu



Hình 3. Ảnh hưởng hàm lượng GGBFS đến khả năng nở do phản ứng kiềm cốt liệu của bê tông theo ASTM C441.

4. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của xi hạt lò cao nghiền mịn (GGBFS) đến một số tính chất liên quan đến độ bền lâu của bê tông, có thể rút ra một số kết luận sau:

- Mức độ chống thấm ion clo và chống thấm nước của bê tông được cải thiện đáng kể khi sử dụng GGBFS so với bê tông chỉ sử dụng xi măng poóc lăng. Khi sử dụng GGBFS ở tỷ lệ 20 đến 50 % trong chất kết dính, mức độ chống thấm của bê tông tăng tỷ lệ thuận với hàm lượng GGBFS trong chất kết dính.

- Độ nở thanh vữa do phản ứng kiềm - silic giảm dần khi tăng hàm lượng sử dụng GGBFS từ 20 đến 60 %, ở tỷ lệ GGBFS 40 % trở lên, độ nở thanh vữa sử dụng GGBFS thấp hơn 0,02 %, điều này cho thấy hiệu quả của GGBFS trong việc ngăn ngừa được sự nở thể tích do phản ứng kiềm - silic.

- Sử dụng GGBFS thay thế một phần xi măng có khả năng cải thiện độ bền sun phát của thanh vữa ngâm trong môi trường sun phát (Na_2SO_4), mức độ cải thiện phụ thuộc vào tỷ lệ GGBFS. CKD xi măng -

GGBFS với tỷ lệ thạch cao (SO_3) 2,5 % đạt được loại xi măng hỗn hợp bền sun phát trung bình khi sử dụng GGBFS với hàm lượng 40 đến 60 % và đạt loại xi măng hỗn hợp bền sun phát cao khi sử dụng đến 70 % GGBFS.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Lê Trung Thành, Nguyễn Văn Tuấn, Lê Việt Hùng, Nguyễn Công Thắng, *Phụ gia khoáng cho xi măng và bê tông*, Nhà xuất bản Xây dựng, 2019
- [2]. Lương Đức Long và nnk, Báo cáo tổng kết đề tài "Nghiên cứu xi măng xi và sản xuất thử nghiệm tại Công ty xi măng Nghi Sơn", Viện Vật liệu xây dựng, 2005-2006.
- [3]. American Institute of Concrete (ACI), "ACI 233R-17 Guide to the Use of Slag Cement in Concrete and Mortar," 2017.
- [4]. ASTM International, "ASTM C441-11 Standard Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction".