■Ngày nhận bài: 10/4/2022 ■Ngày sửa bài: 03/5/2022 ■Ngày chấp nhận đăng: 07/6/2022

Ảnh hưởng của Nanosilica đến cường độ bê tông Geopolymer cốt liệu nhỏ

Influence of nanosilica on the strength of fine-aggregate geopolymer concrete

> **TS PHẠM ĐỨC THIỆN, THS TRƯƠNG ĐÌNH TƯỜNG**
Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM
Email: thienpd@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT:

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của hàm lượng và cấp độ mịn của phụ gia nanosilica (khi thay thế một phần tro bay) đến cường độ của bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ. Nghiên cứu cũng đồng thời được thực hiện để khảo sát ảnh hưởng của thời gian dưỡng hộ nhiệt và tỷ lệ cốt liệu đến cường độ của bê tông. Kết quả thực nghiệm chỉ ra hàm lượng phụ gia nanosilica và tỷ lệ cốt liệu hợp lý để làm gia tăng cường độ của bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ.

Từ khóa: Bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ; nanosilica; cường độ chịu nén; cường độ chịu kéo.

ABSTRACT:

This paper presents an experimental study on the influence of the content and fine-level of nanosilica (when partially replacing fly ash) on the strength of fine-aggregate geopolymer concrete. The study was also carried out to investigate the effect of heat curing time and aggregate ratio on the strength of concrete. Experimental results indicate the appropriate nanosilica content and reasonable aggregate ratio to increase the strength of fine-aggregate geopolymer concrete.

Keywords: Fine-aggregate geopolymer concrete; nanosilica; compressive strength; tensile strength.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhằm mục tiêu giảm thiểu tác động đến tài nguyên thiên nhiên và giảm gây ô nhiễm môi trường, trong ngành Xây dựng rất nhiều hướng nghiên cứu được mở ra nhằm tìm cách cải tiến và tối ưu công nghệ sản xuất, tìm các nguyên liệu thay thế việc khai thác và sử dụng tài nguyên thiên nhiên,… trong đó hướng nghiên cứu ứng dụng bê tông geopolymer thay thế bê tông xi măng trong xây dựng đang ngày càng chứng minh được tính hiệu quả.

Khác với chất kết dính xi măng đang được dùng trong bê tông truyền thống, chất kết dính geopolymer là sản phẩm của quá trình polymer hóa của dung dịch hoạt hóa (chủ yếu là Na_2SiO_3 và NaOH) và các thành phần khoáng trong tro bay [1-7]. Việc ứng dụng chất kết dính geopolymer thay thế xi măng sẽ cùng lúc giải quyết được 3 vấn đề môi trường khá cấp bách: giảm khai thác tài nguyên thiên nhiên để sản xuất xi măng (đá vôi, đất sét); giảm phát thải khí CO_2 (do nung clinker trong sản xuất xi măng) và tiêu thụ phế phẩm tro bay của các nhà máy nhiệt điện.

Rất nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước trong thời gian dài đã minh chứng rằng bê tông geopolymer có các chỉ tiêu cơ lý và các đặc tính cơ học như cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi, khả năng chống thấm, khả năng chống ăn mòn, khả năng ứng dụng vào kết cấu…tương đương hoặc có phần vượt trội hơn so với bê tông xi măng truyền thống [8-16].

Nhằm gia tăng hơn nữa khả năng chịu lực của vật liệu bê tông, nhiều phương pháp đã được nghiên cứu và đề xuất, trong đó có việc thêm những hạt cốt liệu siêu nhỏ để lấp đầy các lỗ rỗng còn lại trong bê tông, gia tăng sự đặc chắc và nâng cao đặc tính cơ học cho bê tông. Trong nghiên cứu công bố năm 2012, Zhang và cộng sự đã chỉ ra rằng phụ gia nanosilica có thể giúp làm giảm thời gian đông kết và gia tăng cường độ sớm ở tuổi 3 và 7 ngày đối với bê tông xi măng xỉ thép [17]. Nghiên cứu của Shaikh và cộng sự (2014) cũng cho thấy phụ gia nanosilica có thể giúp làm tăng cường độ của bê tông xi măng khi được thêm vào một hàm lượng phù hợp [18].

Nghiên cứu này được thực hiện để khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia nanosilica đến cường độ chịu nén và chịu kéo của bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ và nhằm tìm ra hàm lượng phụ gia nanosilica hợp lý nhất để gia tăng cường độ bê tông geopolymer. Nghiên cứu cũng đồng thời được thực hiện để khảo sát ảnh hưởng của cấp độ mịn của nanosilica, của thời gian dưỡng hộ nhiệt và tỷ lệ cốt liệu đến cường độ của bê tông geopolymer.

2. NGUYÊN LIỆU VÀ THÍ NGHIỆM

Thành phần bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ bao gồm đá mi, cát, chất kết dính từ tro bay và dung dịch hoạt hóa. Ngoài ra nanosilica với 2 cấp độ mịn cũng được thêm vào các cấp phối bê tông để nghiên cứu ảnh hưởng đến cường độ của sản phẩm.

2.1. Cốt liệu

Bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ sử dụng đá mi có Dmax = 5 mm, khối lượng riêng 2730 kg/m^3, khối lượng thể tích 1450 kg/m^3 và các tính chất cơ lý thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 về cốt liệu cho bê tông và vữa [19].

Cát dùng trong hỗn hợp bê tông là cát xây dựng có các tính chất cơ lý và thành phần hạt phù hợp tiêu chuẩn xây dựng TCVN 7570:2006. Cát có môđul độ lớn là M_{dl} = 2.1 và lượng sót sàng tích lũy $A_{0.63}$ = 21.95% thuộc cát hạt trung bình-nhỏ. Kết quả thí nghiệm cho thấy cát có khối lượng riêng 2610 kg/m^3 và khối lượng thể tích 1450 kg/m^3.

2.2. Tro bay

Bảng 1. Thành phần hóa học của tro bay

Thành phần hóa học	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	$K_2O + Na_2O$	MgO	SO_3	MKN(*)
% khối lượng	51.7	31.9	3.48	1.21	1.02	0.81	0.25	9.63

(*) MKN: mất khi nung

Bảng 2. Tính chất vật lí của Nanosilica

Tên mẫu	Đặc điểm mẫu	Độ ẩm (%)	Trọng lượng riêng (g/ml)	Kích thước hạt (µm)			pH	Hàm lượng SiO_2 (%)
				D(10)	D(50)	D(90)		
NS.32	Nghiền mịn	4.67	0.117	3.067	7.627	31.88	6	99.6
NS.09	Nghiền siêu mịn	4.67	0.105	3.175	5.554	9.598	6	99.6

Bảng 3. Cấp phối bê tông geopolymer

Ký hiệu	Đá mi	Cát	Đá mi:Cát	Tro bay	SS	SH	NS.32		NS.09	
	(kg/m^3)	(kg/m^3)		(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(%)	(kg/m^3)	(%)	(kg/m^3)
CP0.0	1200.07	399.967	75:25	347.215	132.615	75.780	-	-	-	-
CP1.1	1200.07	399.967		343.743	132.615	75.780	1	3.472	-	-
CP1.2				340.271			2	6.944	-	-
CP1.3				336.799			3	10.416	-	-
CP1.4				333.326			4	13.889	-	-
CP1.5				329.854			5	17.361	-	-
CP2.1	1200.07	399.967		343.743	132.615	75.780	-	-	1	3.472
CP2.2				340.271			-	-	2	6.944
CP2.3				336.799			-	-	3	10.416
CP2.4				333.326			-	-	4	13.889
CP2.5				329.854			-	-	5	17.361
CP3.1	1280.09	319.941	80:20	336.799	132.615	75.780	3	10.416	-	-
CP3.2							-	-	3	10.416
CP4.1	1120.04	479.993	70:30	336.799	132.615	75.780	3	10.416	-	-
CP4.2							-	-	3	10.416

Tro bay sử dụng trong thí nghiệm là tro bay loại F, có hàm lượng CaO thấp hơn 6%, theo tiêu chuẩn ASTM C618 [20]. Hàm lượng các oxit trong tro bay được trình bày trong Bảng 1. Thành phần chủ yếu của tro bay là SiO_2 (chiếm 51.7%) và Al_2O_3 (chiếm 31.9%), lượng mất khu nung khá cao ở mức 9.63%. Thành phần hóa học của tro bay được trình bày trong bảng 1.

2.3. Dung dịch hoạt hóa

Dung dịch hoạt hóa là sự kết hợp giữa sodium hydroxide NaOH và sodium silicate Na_2SiO_3. Dung dịch sodium hydroxide (SH) được pha chế từ tinh thể rắn độ tinh khiết trên 90%, khối lượng riêng 2130 kg/m^3 và có nồng độ là 14 mol/l. Dung dịch sodium silicate (SS) sử dụng với hàm lượng Na_2O và SiO_2 dao động từ 36-38 %, tỷ trọng 1.42 ± 0.01g/ml.

2.4. Phụ gia Nanosilica

Nanosilica sử dụng 2 cấp độ nghiền mịn và nghiền siêu mịn. Thành phần tính chất vật lí được trình bày trong bảng 2, trong đó D(10), D(50) và D(90) là phân bố kích thước hạt tích lũy của mẫu tỷ lệ đạt tương ứng 10%, 50% và 90%.

2.5. Cấp phối bê tông geopolymer

Các cấp phối bê tông geopolymer dùng cho nghiên cứu này được trình bày trong Bảng 3. Để nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia nanosilica, các cấp phối CP0, CP1 và CP2 dùng chung tỷ lệ cốt liệu 75:25 và tỷ lệ SS/SH = 1.75, hàm lượng nanosilica NS.32 hoặc NS.09 thay thế tro bay lần lượt từ 1% đến 5% khối lượng. Ngoài ra các cấp phối CP3 và CP4 với tỷ lệ cốt liệu lần lượt là 80:20 và 70:30 cũng được thiết kế thực nghiệm để khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ cốt liệu đến tính chất cơ học của bê tông geopolymer.

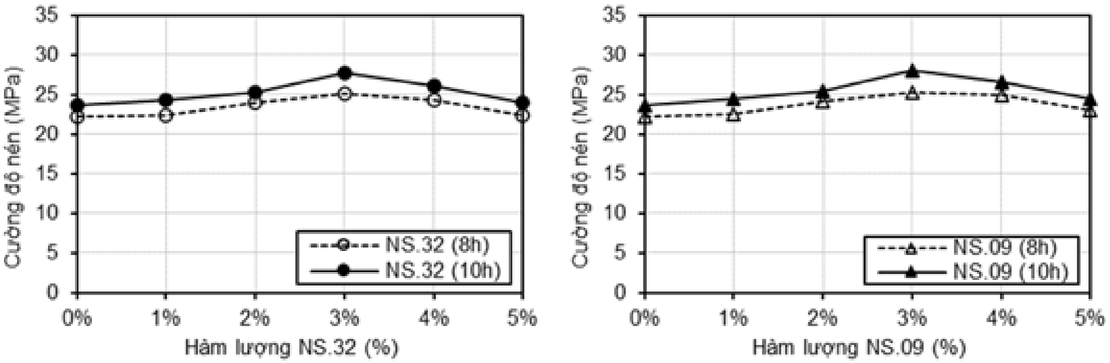
Mẫu thí nghiệm sau khi được đúc khuôn sẽ được bảo quản ở nhiệt độ phòng trong 24 giờ, sau đó được dưỡng hộ ở nhiệt độ 100^{0}C trong thời gian 8 hoặc 10 giờ để tạo cường độ. Cường độ chịu nén của bê tông geopolymer được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 3118:1993 "Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén" [21], trong khi cường độ chịu kéo được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 8862:2011 "Quy trình thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chẻ của vật liệu hạt liên kết bằng các chất kết dính" [22].

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

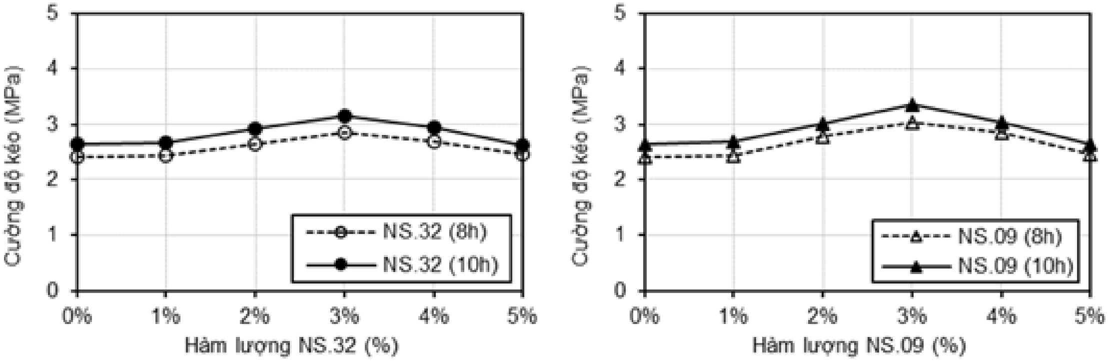
3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng nanosilica đến cường độ bê tông geopolymer

Ảnh hưởng của hàm lượng nanosilica đến cường độ chịu nén và chịu kéo của các cấp phối bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ được trình bày trong Hình 1 và Hình 2. Kết quả thực nghiệm cho thấy, khi thay thế tro bay đến 5% khối lượng, nanosilica làm gia tăng cường độ chịu nén của bê tông geopolymer từ 0.8% đến 18.3% và làm gia tăng cường độ chịu kéo đến 26.9%. Ngoài ra, cường độ chịu nén cũng như chịu kéo của các cấp phối luôn đạt giá trị cao nhất tại hàm lượng nanosilica 3%.

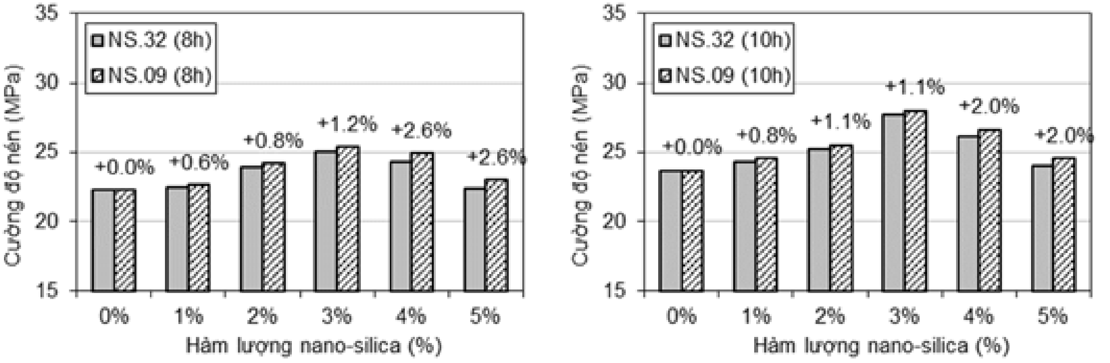
Ta có thể thấy, nanosilica - với kích thước hạt rất nhỏ - khi được thêm vào hỗn hợp bê tông với một tỷ lệ phù hợp sẽ lấp đầy các lỗ rỗng trong vi cấu trúc của vật liệu [18,23], làm tăng tính đặc chắc cũng như tăng liên kết hạt từ đó làm gia tăng cường độ chịu nén cũng như chịu kéo của bê tông. Kết quả thực nghiệm đồng nhất cũng khẳng định độ tin cậy cho nhận xét hàm lượng nanosilica khoảng 3% là tối ưu để tăng cường khả năng chịu nén cũng như chịu kéo của các cấp phối bê tông geopolymer. Khi hàm lượng nanosilica vượt quá 3%, lượng nanosilica "thừa" và khó phân tán lại có tác dụng ngược làm cản trở hoặc phá vỡ liên kết hạt, lượng nanosilica "thừa" sẽ tạo ra các vùng yếu dưới dạng lỗ rỗng bên trong cấu trúc vật liệu [24] làm giảm tính đặc chắc của cấu trúc từ đó làm giảm cường độ của bê tông geopolymer như có thể quan sát trong Hình 1 và 2.



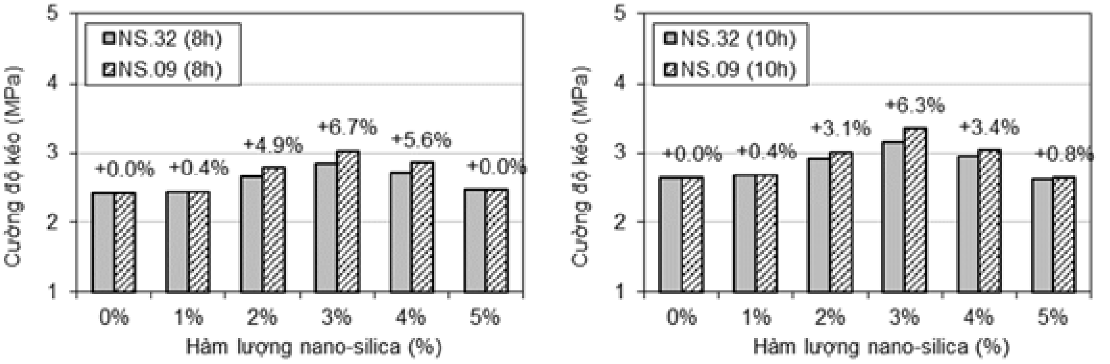
Hình 1. Ảnh hưởng của hàm lượng nanosilica đến cường độ chịu nén của bê tông geopolymer.



Hình 2. Ảnh hưởng của hàm lượng nanosilica đến cường độ chịu kéo của bê tông geopolymer.



Hình 3. Ảnh hưởng của độ mịn nanosilica đến cường độ chịu nén của bê tông geopolymer.



Hình 4. Ảnh hưởng của độ mịn nanosilica đến cường độ chịu kéo của bê tông geopolymer.

3.2. Ảnh hưởng của độ mịn nanosilica đến cường độ bê tông geopolymer

Ảnh hưởng của độ mịn nanosilica đến cường độ bê tông geopolymer được thể hiện thông qua các kết quả thực nghiệm được trình bày trong Hình 3 và Hình 4. Kết quả thực nghiệm cho thấy, với cùng hàm lượng thay thế, nanosilica nghiền siêu mịn NS.09 có khả năng làm gia tăng cường độ chịu nén tốt hơn nanosilica nghiền mịn NS.32 từ 0.6% đến 2.6%. Nanosilica NS.09 cũng làm tăng cường độ chịu kéo tốt hơn NS.32 đến 6.7%. Khi hàm lượng nanosilica trong bê tông càng lớn, chênh lệch cường độ giữa mẫu dùng NS.09 và NS.32 càng được thể hiện rõ ràng hơn.

Kết quả phân tích ở Bảng 2 cho thấy nanosilica NS.09 có đa số kích thước hạt rất nhỏ (D(90) = 9.598 µm) so với nanosilica NS.32 (D(90) = 31.88 µm), do đó NS.09 có thể dễ dàng phân tán và lấp đầy các lỗ rỗng trong vi cấu trúc của bê tông geopolymer hơn, ngoài ra hạt nano-slica kích thước nhỏ có thể tham gia phản ứng pozzolanic dễ dàng và triệt để hơn, từ đó làm tăng cường độ bê tông geopolymer tốt hơn so với NS.32.

3.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ cốt liệu đến cường độ bê tông geopolymer

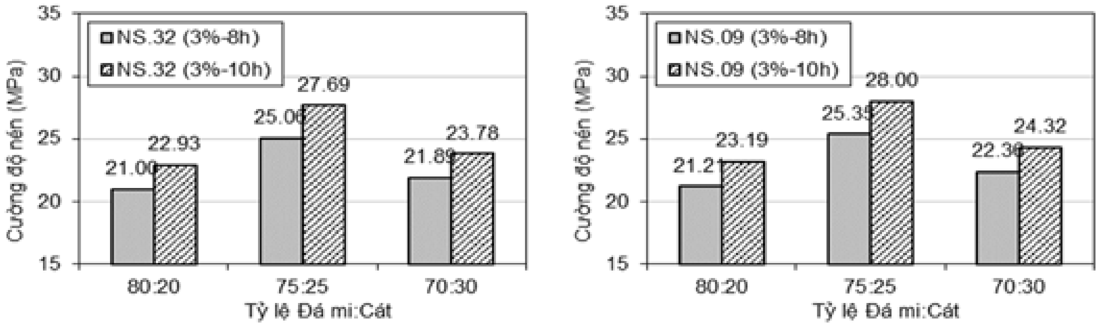
Hình 5 và Hình 6 trình bày kết quả thí nghiệm xác định cường độ chịu nén và chịu kéo của các cập phối bê tông geopolymer khi tỷ lệ cốt liệu Đá-mi:Cát lần lượt là 80:20, 75:25 và 70:30. Kết quả thực nghiệm cho thấy, cường độ chịu kéo và chịu nén của tất cả các cấp phối bê tông geopolymer luôn đạt giá trị cao nhất ở tỷ lệ cốt liệu 75:25. Bê tông geopolymer dùng tỷ lệ cốt liệu 75:25 cho cường độ chịu nén cao hơn từ 13.4% đến 20.8% và cường độ chịu kéo cao hơn từ 3.3% đến 13.9% so với các cấp phối còn lại. Bê tông geopolymer dùng tỷ lệ cốt liệu 70:30 cho khả năng chịu nén và kéo xấp xỉ hoặc cao hơn không nhiều so với bê tông dùng tỷ lệ cốt liệu 80:20.

Có thể nhận xét tỷ lệ cốt liệu Đá-mi: Cát khoảng 75:25 là tối ưu dùng cho các cấp phối bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ, khi đó lượng đá mi là vừa đủ để tạo thành bộ khung chịu lực cho bê tông geopolymer, lượng cát cũng vừa đủ để lấp đầy lỗ rỗng của đá mi từ đó giảm thiểu độ rỗng và làm gia tăng cường độ của vật liệu. Khi tăng hàm lượng đá mi và giảm cát (tỷ lệ 80:20) sẽ hình thành thêm nhiều lỗ rỗng giữa các hạt đá và không có đủ lượng cát để lấp đầy; còn khi giảm lượng đá mi và tăng cát (tỷ lệ 70:30) thì sẽ không đủ đá để hình thành bộ khung chịu lực, ngoài ra lượng cát thừa tạo nên những vùng giảm yếu bên trong bê tông geopolymer; cả 2 trương hợp đều dẫn đến kết quả làm giảm cường độ của vật liệu.

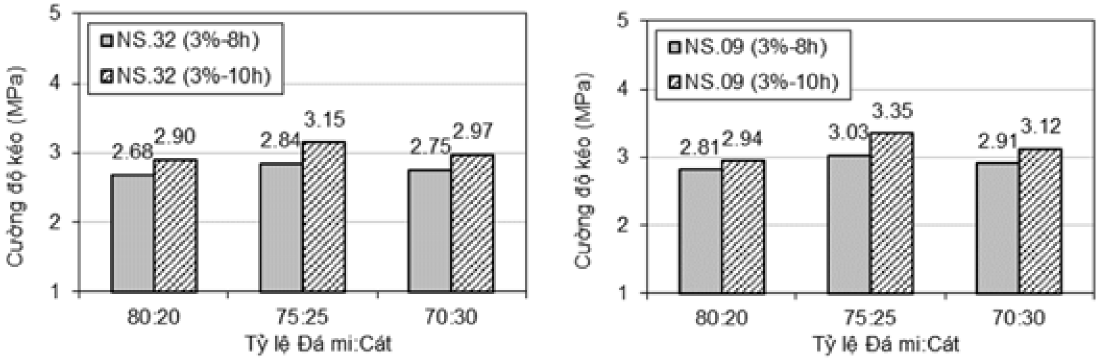
3.4. Ảnh hưởng của thời gian dưỡng hộ nhiệt đến cường độ bê tông geopolymer

Ảnh hưởng của thời gian dưỡng hộ nhiệt đến cường độ chịu kéo và nén của bê tông geopolymer dùng phụ gia nanosilica cũng được khảo sát trong nghiên cứu này. Kết quả thực nghiệm cho thấy khi tăng thời gian dưỡng hộ nhiệt từ 8 giờ lên 10 giờ, cường độ chịu nén của bê tông geopolymer tăng từ 5.3% đến 10.5% và cường độ chịu kéo cũng tăng từ 6.5% đến 10.9%. Sự gia tăng cường độ chịu nén và kéo lớn nhất vẫn được tìm thấy ở các cấp phối có hàm lượng nanosilica 3%.

Như đã được khẳng định trong rất nhiều nghiên cứu trước đó, nhiệt lượng đóng vai trò rất quan trọng cho phản ứng geopolymer-hóa tạo chất kết dính và phát triển cường độ cho bê tông geopolymer [8-12]. Xu hướng tiếp tục gia tăng cả về khả năng chịu nén và chịu kéo của loạt cấp phối bê tông geopolymer này là hoàn toàn phù hợp. Tuy nhiên, để tăng thêm khoảng 10% cường độ chịu kéo và nén, ta phải cung cấp thêm 25% nhiệt lượng (thêm 2 giờ dưỡng hộ), đây là một vấn đề cần cân nhắc trong bài toán kinh tế và tổng thể khi lựa chọn quy trình sản xuất cấu kiện bê tông geopolymer.



Hình 5. Ảnh hưởng của tỷ lệ cốt liệu đến cường độ chịu nén của bê tông geopolymer.



Hình 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ cốt liệu đến cường độ chịu kéo của bê tông geopolymer.

4. KẾT LUẬN

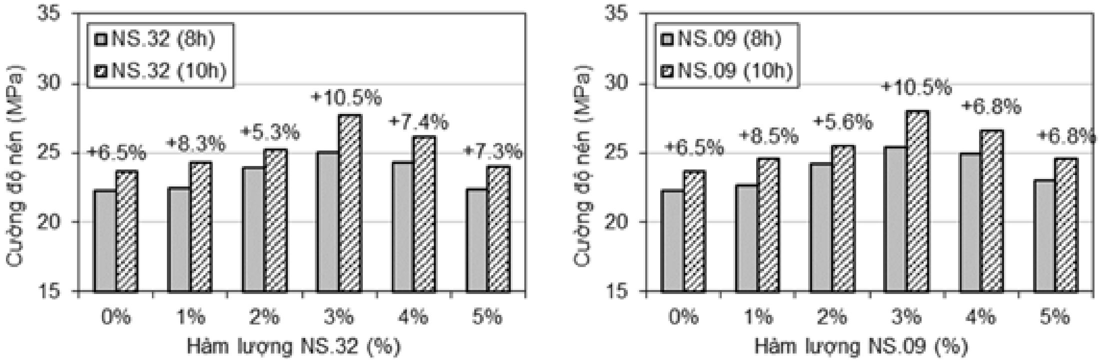
Bài báo đã trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng và độ mịn của phụ gia nanosilica đến tính chất cơ học của bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ. Bài viết cũng đồng thời trình bày kết quả khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ cốt liệu Đá-mi: Cát và thời gian dưỡng hộ nhiệt đến cường độ của vật liệu. Một số kết luận được đúc kết như sau:

– Khi thay thế tro bay đến 5% khối lượng, nanosilica làm gia tăng cường độ chịu nén của bê tông geopolymer từ 0.8% đến 18.3% và làm gia tăng cường độ chịu kéo đến 26.9%.

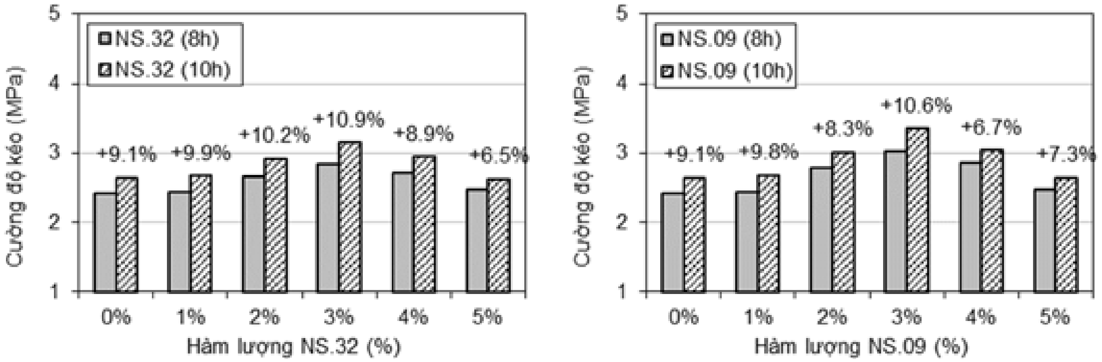
– Cường độ chịu nén và chịu kéo của các cấp phối bê tông geopolymer đạt giá trị cao nhất khi hàm lượng nanosilica là 3%.

– Với cùng hàm lượng thay thế, nanosilica nghiền siêu mịn NS.09 có khả năng làm gia tăng cường độ chịu nén tốt hơn nanosilica nghiền mịn NS.32 đến 2.6% và làm tăng cường độ chịu kéo tốt hơn NS.32 đến 6.7%.

– Bê tông geopolymer dùng tỷ lệ cốt liệu 75:25 cho cường độ chịu nén cao hơn từ 13.4% đến 20.8% và cường độ chịu kéo cao hơn từ 3.3% đến 13.9% so với các cấp phối dùng tỷ lệ cốt liệu 80:20 và 70:30.



Hình 7. Ảnh hưởng của thời gian dưỡng hộ nhiệt đến cường độ chịu nén của bê tông geopolymer.



Hình 8: Ảnh hưởng của thời gian dưỡng hộ nhiệt đến cường độ chịu kéo của bê tông geopolymer.

– Cung cấp thêm 25% nhiệt lượng làm cho các cấp phối bê tông geopolymer cốt liệu nhỏ gia tăng đến khoảng 10% cường độ chịu nén và chịu kéo.

Lời cảm ơn

This work belongs to the project grant No: T2021-114TĐ funded by Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J. Davidovits (1991), Geopolymers - Inorganic polymeric new materials, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 37.

[2] J. Davidovits (1994), Properties of Geopolymer cement, Proceding first International conference on Akaline cements and concretes.

[3] J. Davidovits (2015), Geopolymer Chemistry and Applications, Geopolymer Science and Technics, Geopolymer Institute Library.

[4] A. Palomo et al. (1992), Physical, chemical and mechanical characterization of Geopolymers, 9th International Congress on Chemistry of Cements.

[5] J.L. Provis et al. (2009), Valorisation of fly ash by Geopolymerisation, Global NEST Journal, Vol. 11(2).

[6] A. M. Mustafa, Al Bakri Abdullah et al. (2011), Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based green polymeric cement, Journal of Engineering and Technology Research, Vol. 3(2).

[7] J.L. Provis, J.S.J van Devente (2009), Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications, Woodhead Publishing.

[8] Phạm Đức Thiện, Phan Đức Hùng, Nguyễn Trọng Nam (2021), Ảnh hưởng của một số phế phẩm công nghiệp đến cường độ chịu nén của bê tông geopolymer, Tạp chí Xây dựng.

[9] Phạm Đức Thiện, Phan Đức Hùng (2020), Nghiên cứu ứng xử chịu uốn của dầm bán lắp ghép 2 lớp dùng bê tông geopolymer và bê tông xi măng, Tạp chí Xây dựng.

[10] Phạm Đức Thiện, Lê Hữu Hoàng Dự (2019), Ảnh hưởng của dạng đầu neo đến sự làm việc chung của bê tông geopolymer và cốt thép, Tạp chí Xây dựng.

[11] Phạm Đức Thiện, Tạ Tuấn Anh, Phan Đức Hùng (2017), Nghiên cứu sự bám dính giữa bê tông geopolymer và cốt thép, Tạp chí Xây dựng.

[12] Phạm Đức Thiện, Lê Quốc Thái ((2017), Nghiên cứu ảnh hưởng của sợi thủy tinh gia cường đến tính chất của vữa geopolymer", Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Tập 3-Cơ học Vật rắn, Quyển 1, Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ.

[13] J. Davidovits and M. Davidovits (1987), Geopolymer poly(sialate)/poly(sialate-siloxo) mineral matrices for composite materials, 6th International Conference on Composite Materials.

[14] A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco (1999), Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. Cement and Concrete Research, Vol. 29.

[15] J.G.S. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer, G.C. Lukey (2002), The effect off composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers. Chemical Engineering Journal, Vol. 89.

[16] Djwantoro Hardjito, Steenie E. Wallah, Dody M.J. Sumajouw, B.V. Rangan (2004), Factors influencing the compressive strength of fly ash based Geopolymer concrete. Civil Engineering Dimension, Vol 6(2).

[17] Min-Hong Zhang, Jahidul Islam, Sulapa Peethamparan (2012), Use of nanosilica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. Cement & Concrete Composites, Vol. 34.

[18] F.U.A. Shaikh, S.W.M. Supit, P.K. Sarker (2014), A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes. Materials and Design, Vol. 60.

[19] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7570:2006, Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[20] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials.

[21] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 3118:1993, Bê tông nặng - phương pháp xác định cường độ nén. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[22] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 8862:2011, Quy trình thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chẻ của vật liệu hạt liên kết bằng các chất kết dính. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[23] Khater H.M. (2016), Physicomechanical properties of nanosilica effect on geopolymer composites, Journal of Building Material and Structural.

[24] Hui Li, Jie Yuan Hui-gang Xiao, Jinping Ou (2003), Microstructure of cement mortar with nano-particles, Composite Part B: Engineering.