

Khả năng chế tạo bê tông hạt mịn cường độ cao sử dụng chất kết dính không xi măng

Tăng Văn Lâm^{1*}, Bulgakov Boris Igorevich²

¹Trường Đại học Mỏ-Địa chất

²Đại học Xây dựng Quốc gia Mát-cơ-va, Liên bang Nga

TỪ KHÓA

Bê tông cường độ cao hạt mịn
Tro bay
Xi hạt lò cao nghiền mịn
Dung dịch hoạt hóa
Bột ôxít nhôm
Cường độ nén

TÓM TẮT

Bài viết này đã cho thấy tiềm năng chế tạo bê tông hạt mịn cường độ cao sử dụng chất kết dính không xi măng từ hỗn hợp phế thải công nghiệp ở Việt Nam. Trong đó, tro bay nhiệt điện Phả Lại và xi hạt lò cao nghiền mịn Hòa Phát được sử dụng như là vật liệu alumino-silicat, dung dịch NaOH với nồng độ mol/lít là 12 M và Na₂SiO₃ có mô đun silic 2,5 được sử dụng như là dung dịch kiềm kích hoạt. Ngoài ra, để khử lượng kiềm dư trong nghiên cứu này đã sử dụng 1% bột ôxít nhôm. Tỷ lệ giữa dung dịch hoạt hóa với vật liệu alumino-silicat được khảo sát là 0,32. Hàm lượng tro bay/xi đã khảo sát lần lượt là 60/40, 50/50 và 40/60. Tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định bằng độ xòe trong côn vữa và cường độ của mẫu thí nghiệm được xác định trên khuôn hình lăng trụ kích thước 40x40x160 mm. Kết quả thực nghiệm đã thu được hỗn hợp bê tông có độ chảy xòe từ 20,5 cm đến 23,5 cm và cường độ nén ở tuổi 28 ngày lần lượt là 75,8; 81,9 và 85,2 MPa.

KEYWORDS

High-strength fine-grained concrete
Fly ash
Granulated blast furnace slag
Alkali-activator
Aluminum Oxide
Compressive strength

ABSTRACT

This paper has shown the potential of manufacturing of high-strength fine-grained concrete without cement from industrial wastes in Vietnam. In which, fly ash "Phả Lại" (FA) and granulated blast furnace slag "Hoa Phat" (GBFS) are used as alumino-silicate materials, NaOH 12 M and Na₂SiO₃ solutions are used as the alkali-activator solution. The ratio between the activator solution and the alumino-silicate material is 0.32. The content of FA/GBFS was surveyed at 60/40, 50/50, and 40/60, respectively. The workability of the concrete mixture is determined by the flow of a truncated cone and the strength of the test specimen is determined on a prismatic mold with dimensions of 40x40x160 mm. The experimental results have obtained the fine-grained concrete mixture with spreading flow from 20.5 cm to 23.5 cm and its compressive strength at the age of 28 days is 75.8; 81.9 and 85.2 MPa, respectively.

1. Đặt vấn đề

Những năm gần đây trên thế giới cũng như ở Việt Nam, việc tìm kiếm các giải pháp làm giảm thiểu ô nhiễm môi trường thông qua xử lý các nguồn chất thải rắn công nghiệp đang ngày càng được nhiều nhà khoa học quan tâm [1, 2, 3]. Theo đó, việc giải quyết các nguồn thải phẩm phát sinh từ nhiều hoạt động sản xuất công nghiệp khác nhau đang là một trong những vấn đề cấp bách được đặt ra nhằm hạn chế rủi ro về môi trường, cũng như các kho bãi chứa chất thải và mang lại hiệu quả sử dụng cao nhất không chỉ trong lĩnh vực xây dựng mà còn ở nhiều lĩnh vực khác [4, 5].

Tại nhiều nước phát triển trên thế giới, việc sử dụng các loại phế thải công nghiệp vào chế tạo các loại bê tông sử dụng chất kết dính không xi măng (BT-KXM) đang là một giải pháp mang lại kết quả khả quan nhất vì nó không chỉ giải quyết được triệt để hơn các nguồn chất thải rắn mà còn góp phần giảm phát thải khí nhà kính, khói bụi và giảm sử dụng các

nguồn tài nguyên thiên nhiên trong quá trình sản xuất các loại xi măng Portland [6, 7, 8].

Hướng nghiên cứu BT-KXM đã bắt đầu được triển khai ở Việt Nam những năm gần đây như là một giải pháp tạo ra sản phẩm vật liệu xây dựng bền vững với nhiều ưu điểm như: phát triển cường độ nhanh và ít tỏa nhiệt, tính chống thấm tốt, khả năng chống ăn mòn hóa học tốt, đồng thời có thể sử dụng một phần nước biển khi chế tạo [9-12].

Mặt khác, nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước đã cho thấy nhược điểm chính của TB-KXM từ tro bay nhiệt điện kết hợp với dung dịch kiềm hoạt hóa là khả năng đóng rắn và phát triển cường độ chậm ở nhiệt độ phòng, sản phẩm thu được có cường độ không cao [3, 13]. Còn nhược điểm chính của BT-KXM từ xi hạt lò cao nghiền mịn hoạt tính kết hợp với dung dịch kiềm hoạt hóa là có hiện tượng co khô lớn khi đông cứng và rắn chắc [4, 12, 14]. Nhưng sự kết hợp giữa xi lò cao và tro bay trong thành phần bê tông có thể giải quyết vấn đề này. Đặc biệt, nhiều nghiên cứu trong nước [3, 4, 14] đã chỉ ra với tỷ lệ tro bay trên xi hạt lò cao nghiền mịn dao động từ 30/70 đến 70/30, mẫu thí nghiệm phát triển

*Liên hệ tác giả: lamvantang@gmail.com

Nhận ngày 20/06/2022, sửa xong ngày 28/07/2022, chấp nhận đăng 08/09/2022

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2022.400>

cường độ tốt ở nhiệt độ môi trường. Hơn nữa, nhược điểm chính của các loại BT-KXM là hiện tượng dư kiềm kích hoạt trên bề mặt của mẫu. Với lượng kiềm dư, sản phẩm khi chế tạo từ bê tông không xi măng có hiện tượng bị rêu mốc và “mọc lông” trên bề mặt của kết cấu. Nhược điểm này đã ảnh hưởng rất lớn đến khả năng ứng dụng các chủng loại BT-KXM trong các công trình thực tế [15, 16]. Bên cạnh đó, ở Việt Nam việc nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao hạt mịn trên cơ sở các loại chất kết dính hoàn toàn không có xi măng Portland đến nay còn nhiều hạn chế.

Vì vậy, mục đích chính của nghiên cứu này là sử dụng tro bay nhiệt điện Phả Lại kết hợp với xi hạt lò cao nghiền mịn Hòa Phát để chế tạo bê tông cường độ cao hạt mịn hoàn toàn không sử dụng xi măng Portland. Trong đó, tro bay và xi được sử dụng như là vật liệu alumino-silicat giàu nhôm và silic, dung dịch NaOH 12M và Na₂SiO₃ với mô đun Silica M_{Si} = 2,5 được sử dụng như dung dịch kiềm kích hoạt các hạt tro xỉ. Nghiên cứu này đã khảo sát tỷ lệ giữa tro bay nhiệt điện và xi hạt lò cao nghiền mịn lần lượt là 60/40, 50/50 và 40/60. Ngoài ra, tỷ lệ giữa dung dịch kiềm kích hoạt với vật liệu alumino-silicat được khảo sát tại giá trị 0,35. Những kết quả thu được cho thấy triển vọng tái sử dụng triệt để các chất thải rắn công nghiệp để chế tạo bê tông cường độ cao không sử dụng chất kết dính xi măng.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

2.1.1. Vật liệu Alumino-silicate (ALS)

Là các loại vật liệu giàu Al và Si. Trong nghiên cứu này đã sử dụng tro bay nhiệt điện Phả Lại và xi hạt lò cao nghiền mịn Hòa Phát kết hợp với bột mịn ôxít nhôm - Al₂O₃.

(i). Bột ôxít nhôm có công thức là Al₂O₃.2H₂O, kích thước hạt trung bình khoảng 55 μm. Khối lượng riêng của Al₂O₃ là 3.95 g/cm³. Nhôm oxít được thử nghiệm nhằm mục đích bổ sung hàm Al₂O₃ để tạo thành các Al₂O₃ – CaO – SiO₂ – Na₂O. Khoáng vật này là nguyên nhân thúc đẩy cường độ của bê tông sau khi đông kết và rắn chắc. Mặt khác, Al₂O₃ có phản ứng với NaOH ngay ở nhiệt độ thường để tạo thành muối NaAlO₂. Với hiệu ứng này, hàm lượng kiềm dư trong sản phẩm sau khi tạo hình đã giảm đáng kể và kết quả là sản phẩm thu được không có hiện tượng rêu mốc, mọc lông trên bề mặt.

(ii). Tro bay (TB) loại F của nhà máy nhiệt điện Phả Lại, thỏa mãn các yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 10302:2014 và ASTM C618. Đây là loại tro bay đã qua tuyển để loại bỏ bột hàm lượng tạp chất không có lợi cho bê tông và lượng than chưa cháy.

(iii). Xi hạt lò cao nghiền mịn S95 (Xi) được mua từ Khu liên hợp gang thép "Hòa Phát", thỏa mãn yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 11586:2016.

Các tính chất vật lý cơ bản và thành phần hóa học của tro bay và xi hạt lò cao nghiền mịn được thể hiện trong Bảng 1.

Các loại vật liệu sử dụng trong nghiên cứu đã được mô tả trên Hình 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học và tính chất vật lý của tro bay nhiệt điện Phả Lại và xi hạt lò cao nghiền mịn Hòa Phát.

Loại vật liệu		Tro bay	Xi hạt lò cao nghiền mịn
Ký hiệu		TB	Xi
Thành phần hóa học (%) của vật liệu	SiO ₂	54,2	36,3
	Al ₂ O ₃	23,3	12,6
	Fe ₂ O ₃	9,8	3,4
	SO ₃	2,5	5,7
	K ₂ O	1,4	0,4
	Na ₂ O	1,1	0,3
	MgO	0,6	-
	CaO	1,2	40,1
	P ₂ O ₅	1,4	-
	Lượng mất khi nung	4,5	1,2
Tính chất vật lý của vật liệu	Tỷ diện bề mặt riêng (m ² /g)	0,58	0,37
	Khối lượng riêng (g/cm ³)	2,35	2,92
	Khối lượng thể tích khô ở trạng thái nèn chặt (kg/m ³)	1480	1450



Hình 1. Các loại vật liệu sử dụng.

2.1.2. Dung dịch kiềm kích hoạt

Do thành phần của loại bê tông nghiên cứu không chứa xi măng Portland, đồng thời các loại tro xỉ không có phản ứng thủy hóa với nước trong điều kiện thường. Vì vậy, trong thành phần loại bê tông này phải sử dụng dung dịch kiềm mạnh để hòa tan vật liệu Alumino-silicat.

Hỗn hợp dung dịch kiềm kích hoạt có vai trò là chất hoạt hóa, thúc đẩy quá trình geopolymer hóa, khử nguyên tử Al, Si trong Al₂O₃ và SiO₂, đồng thời hòa tan các hạt tro bay và xi trong nguyên vật liệu alumino-silicate để tạo thành các khoáng có tính chất kết dính trong thành phần của hỗn hợp bê tông.

Dung dịch hoạt hóa trong nghiên cứu này sử dụng là hỗn hợp của Natri hydroxit – NaOH (dạng rắn) và dung dịch Natri silicat – Na₂SiO₃.

(a). Natri hydroxyt (NaOH) sử dụng ở dạng rắn (dạng vảy khô) có tên là "Caustic Soda Flake 99 %" được đặt mua tại công ty hóa chất Việt Nhật. Natri hydroxyt có màu trắng đục và độ tinh khiết 99%. Natri hydroxit thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn TCVN 3794: 2009 và TCVN 3793:1983. Dung dịch Natri hydroxyt thu được bằng cách pha NaOH dạng dạng rắn vào nước để đạt được nồng độ mol theo yêu cầu (Hình 2). Quá trình chuẩn độ dung dịch này nhằm mục đích tạo ra dung dịch NaOH với nồng độ mol/lít là 12 M với thành phần được xác định là 36,1 % NaOH (dạng rắn) được pha chế với 63,9 %

nước. Khối lượng riêng của dung dịch NaOH 12 M được xác định bằng thực nghiệm là 1,319 g/cm³.



Hình 2. Pha chế dung dịch NaOH 12M.

(b). Dung dịch Natri silicat (Na₂SiO₃) được mua có nguồn gốc từ nhà máy hóa chất Việt Nhật có mô đun silic SiO₂/Na₂O = 2,5. Dung dịch Natri silicat có thành phần gồm 11,8% Na₂O; 29,5% SiO₂ và 58,7% H₂O, thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn 64TCN 38:198. Khối lượng riêng của dung dịch Na₂SiO₃ được xác định bằng thực nghiệm là 1,55 g/cm³.

2.1.3. Cốt liệu nhỏ

Cốt liệu nhỏ sử dụng trong nghiên cứu này là cát vàng sông Lô (C), loại hạt thô, chất lượng tốt, thành phần hạt thỏa mãn yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 7570:2006. Do trong thành phần của bê tông hạt mịn không có cốt liệu thô, nên cát vàng sông Lô là thành phần cốt liệu chính trong loại bê tông này.

2.1.4. Phụ gia siêu dẻo

Phụ gia siêu dẻo được sử dụng là loại SR 5000F «SilkRoad» SR5000. Đây là loại phụ gia giảm nước tầm cao, thế hệ 3, có thành phần dựa trên gốc Polycarboxylate. Phụ gia siêu dẻo SR 5000F thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của TCVN 8826:2011.

Các thông số kỹ thuật:

- + Trạng thái và màu sắc: Là chất lỏng có màu vàng đậm.
- + Tỷ trọng: 1,1 g/cm³ ở nhiệt độ 25 ± 5°C.
- + pH: 06 ở nhiệt độ 25 ± 5°C.

2.1.5. Nước

Nước sạch (N) được sử dụng để làm dung môi để chuẩn độ dung dịch kiểm hoạt hóa, đồng thời được dùng để bảo dưỡng mẫu sau khi thí nghiệm, thỏa mãn của tiêu chuẩn TCVN 4506:2012.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp nghiên cứu theo các tiêu chuẩn sau:

- 1 - Thành phần hạt của cát được xác định trên bộ sàng tiêu chuẩn có kích thước mắt sàng lần lượt là: 0,14 mm; 0,315 mm; 0,63 mm; 1,25 mm; 2,5 mm; 5 mm theo tiêu chuẩn TCVN 7572-2:2006.
- 2 - Thành phần hỗn hợp bê tông không xi măng được tính toán và xác định theo phương pháp thể tích tuyệt đối và kết hợp với điều chỉnh bằng thực nghiệm.
- 3 - Do thành phần bê tông hạt mịn chỉ chứa cốt liệu có kích thước từ 0,14 mm đến 5 mm nên tính công tác của hỗn hợp bê tông hạt mịn thí nghiệm được xác định bằng độ xòe của côn hình nón cụt có kích thước 100x70x60 mm theo phương pháp xác định độ lưu động của vữa tươi, phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 3121-3:2003.
- 4 - Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông được xác định bằng phương pháp cân khối lượng và đo thể tích trong thùng đong tiêu chuẩn (thùng đong có thể tích 1 lít), phù hợp với TCVN 3108:1993. Bên cạnh đó, khối lượng thể tích của mẫu thí nghiệm sau khi đã cứng rắn được xác định bằng phương pháp cân mẫu và đo thể tích trực tiếp trên mẫu thí nghiệm, phù hợp với TCVN 3115: 1993.
- 5 - Độ hút nước theo khối lượng được xác định theo TCVN 3113: 1993.
- 6 - Vì loại bê tông thí nghiệm không chứa thành phần cốt liệu thô, nên cường độ kéo khi uốn và cường độ nén của mẫu thí nghiệm được xác định trên khuôn vữa tiêu chuẩn kích thước 40x40x160 mm (Hình 3), phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 6016: 2011. Kết quả thí nghiệm cường độ của mẫu thí nghiệm được xác định trên hệ thống máy nén uốn tự động ADVANTEST 9 (Controls - Italia).



Hình 3. Mẫu bê tông kích thước 40x40x160 mm.

2.3. Xác định cấp phối nghiên cứu của hỗn hợp bê tông không xi măng

2.3.1. Mục tiêu đối với hỗn hợp bê tông và bê tông cường độ cao không xi măng

(i). Mục tiêu về tính công tác là hỗn hợp bê tông không chứa xi măng có tính công tác tốt với độ xòe bằng côn vữa dao động từ 20 cm đến 25 cm. Hỗn hợp bê tông này có thể được thi công toàn khối theo phương pháp bê tông bơm, phương pháp vữa dâng hoặc phương pháp đúc rót trong xây dựng các công trình hạ tầng ở Việt Nam.

(ii). Mục tiêu về tính chất cơ học của loại bê tông này là có cường độ nén thiết kế ở tuổi 28 ngày đạt trên 70 MPa, được xác định trên các viên mẫu hình lăng trụ kích thước 40x40x160 mm.

2.3.2. Cơ sở lý thuyết của phương pháp thể tích tuyệt đối

Bê tông cường độ cao sử dụng chất kết dính không xi măng, chứa lượng lớn thành phần phế thải công nghiệp đã được nhiều nước tiên tiến trên thế giới quan tâm và nghiên cứu. Tuy nhiên, do thành phần có chứa 100 % phế thải rắn công nghiệp đến hiện nay chưa có phương pháp hay chỉ dẫn thiết kế thành phần tiêu chuẩn.

Bên cạnh đó, phương pháp thể tích tuyệt đối là phương pháp nền tảng, dựa trên tổng thể tích đặc của các vật liệu thành phần, đã được áp dụng trong nhiều nghiên cứu về bê tông hạt mịn, bê tông bột mịn hoạt tính, bê tông chất lượng siêu cao ở Việt Nam [3, 4, 11, 12, 17] cũng như trên thế giới [18 - 20]. Theo phương pháp thể tích tuyệt đối, tổng thể tích của 1 m³ hỗn hợp bê tông hạt mịn đã được lên chặt coi như là tổng thể tích của nước, bột ôxít nhôm, vật liệu Alumino-silicate, cốt liệu, dung dịch kiềm hoạt hóa, phụ gia siêu dẻo và thể tích không khí cuốn vào trong quá trình nhào trộn.

Bảng 2. Khối lượng riêng của các vật liệu sử dụng.

Loại vật liệu	Al ₂ O ₃	TB	Xi	SF90	NaOH 12M	Na ₂ SiO ₃	C	N	SR5000
Khối lượng riêng của vật liệu, g/cm ³	3,95	2,35	2,92	2,15	1,319	1,55	2,65	1,0	1,12

2.3.3. Lựa chọn các tỷ lệ của nguyên vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

Các tỷ lệ nguyên vật liệu cơ sở trong nghiên cứu này đã được lựa chọn dựa trên kết quả của các nghiên cứu về bê tông hạt mịn cường độ cao ở Việt Nam và ở nhiều nước trên thế giới.

Về vật liệu Alumino-silicate (ALS) là một tổ hợp bao gồm: Tro bay (TB nhiệt điện Phá Lại và xi (Xi) hạt lò cao nghiền mịn của Hòa Phát và ôxít nhôm Al₂O₃.

Như vậy: $ALS = TB + Xi + Al_2O_3$ (2)

Trong nghiên cứu này, hàm lượng của xi hạt lò cao nghiền mịn Hòa Phát trong khoảng từ 40%, 50% và 60% để thu được cấp phối hỗn hợp bê tông hạt mịn có tính công tác tốt và giá trị cường độ nén theo yêu cầu trên 70 MPa.

Hàm lượng Al₂O₃ được khảo sát là 1% hàm lượng vật liệu Alumino-silicate (ALS). Đây là hàm lượng đã được lựa chọn dựa vào các thí nghiệm thăm dò.

+ Nếu hàm lượng Al₂O₃ lớn thì sẽ xảy ra hiện tượng Al₂O₃ tác dụng với NaOH để tạo thành sản phẩm NaAlO₂ gây ra hiện tượng giảm hàm lượng NaOH trong thành phần cấp phối của hỗn hợp bê tông.

+ Nếu hàm lượng Al₂O₃ nhỏ hơn 1% thì hiệu quả tăng cường độ, giảm hiện tượng rêu mốc của sản phẩm bê tông sau khi cứng rắn là không đáng kể.

Về hàm lượng cốt liệu, trong nghiên cứu này đã lựa chọn tỷ lệ cát/vật liệu Alumino-silicate (C/ALS) là 1,3 theo kết quả nghiên cứu của các nghiên cứu đã thực hiện [4, 11, 12].

Về dung dịch kiềm kích hoạt, hàm lượng dung dịch hoạt hóa (DDHH) hợp lý là một vấn đề rất quan trọng, sẽ giảm bớt được lượng NaOH còn dư lại trong cấu trúc sản phẩm sau khi tạo hình. Tuy nhiên, nếu hàm lượng của dung dịch kiềm hoạt hóa nhỏ sẽ ảnh hưởng đến quá

Do đó:

$$\frac{Al_2O_3}{Y_{Al_2O_3}} + \frac{N}{Y_N} + \frac{TB}{Y_{TB}} + \frac{Xi}{Y_{Xi}} + \frac{C}{Y_C} + \frac{NaOH}{Y_{NaOH}} + \frac{Na_2SiO_3}{Y_{Na_2SiO_3}} + \frac{SR5000}{Y_{SR5000}} + A = 1000 \quad (1)$$

Trong đó:

- Al₂O₃, N, TB, Xi, C, NaOH, Na₂SiO₃, SR5000: là khối lượng bột ôxít nhôm, nước, tro bay, xi hạt lò cao nghiền mịn, cát, Natri hydroxit, Natri silicat và phụ gia siêu dẻo SR5000F.

- Y_{Al₂O₃}, Y_N, Y_{TB}, Y_{Xi}, Y_C, Y_{NaOH}, Y_{Na₂SiO₃}, Y_{SR5000}: là khối lượng riêng của bột ôxít nhôm, nước, tro bay, xi hạt lò cao nghiền mịn, cát, Natri hydroxit, Natri silicat và phụ gia siêu dẻo SR5000F.

- A: là thể tích rỗng do không khí cuốn vào trong bê tông thí nghiệm. Vì trong điều kiện thí nghiệm không có thiết bị hút và khử lượng khí trong hỗn hợp bê tông nên hàm lượng không khí được chọn là A = 3 % thể tích hỗn hợp bê tông [18, 19].

Các giá trị khối lượng riêng của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này đã được xác định và trình bày trong Bảng 2.

trình tạo thành các ion [SiO(OH)₃]⁻ và [Al(OH)₄]⁻, cũng như ảnh hưởng đến quá trình hòa tan bề mặt của các hạt tro bay và xi. Với nhiều nghiên cứu [13, 14], tỷ lệ DDHH/ALS dao động trong khoảng khá rộng từ 0,3 đến 0,45. Trong nghiên cứu này đã khảo sát tỷ lệ DDHH/ALS không đổi và bằng 0,32.

Tỷ lệ Na₂SiO₃/NaOH, theo nhiều kết quả nghiên cứu về bê tông không xi măng trên nền tảng Geopolymer đã cho thấy, tỷ lệ Na₂SiO₃/NaOH trong thành phần của bê tông kiềm hoạt hóa dao động trong phạm vi khá rộng từ 0,4 đến 2,5 [3, 5, 8, 16]. Trong giới hạn của nghiên cứu tỷ lệ Na₂SiO₃/NaOH được giữ cố định và bằng 2,5. Tỷ lệ Na₂SiO₃/NaOH = 2,5 còn được biện giải một phần là do chi phí của dung dịch Natri silicat rẻ hơn đáng kể so với của dung dịch Natri hydroxit.

Về lượng nước nhào trộn, do bê tông sử dụng chất kết dính không chứa xi măng Portland, nên lượng nước sử dụng chỉ là phần nước dùng để pha loãng NaOH (dạng rắn) thành dung dịch kiềm với nồng độ mol/lít là 12 M. Trong đó thành phần của của dung dịch NaOH 12 M gồm 36,1 % NaOH dạng rắn và 63,9 % nước về khối lượng. Tuy nhiên, một phần nhỏ lượng nước cũng được dùng để cho xi hạt lò cao nghiền mịn thủy hóa và 5 % lượng nước trộn để thấm ướt bề mặt của cốt liệu nhỏ.

Về phụ gia siêu dẻo, nghiên cứu này đã chọn hàm lượng phụ gia giảm nước tầm cao SR5000F cố định và bằng 1% tổng hàm lượng của ALS [4, 12].

2.3.3. Cấp phối bê tông cường độ cao hạt mịn không sử dụng xi măng

Tính toán theo phương pháp thể tích tuyệt đối dựa trên các giá trị tỷ lệ vật liệu đã lựa chọn và hiệu chỉnh cấp phối phù hợp với các tính chất của vật liệu sử dụng, nghiên cứu này đã khảo sát 03 cấp phối

của hỗn hợp bê tông cường độ cao hạt mịn có thành phần như trong Bảng 3.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Tính chất hỗn hợp bê tông hạt mịn sử dụng chất kết dính không xi măng

Thực nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm theo các tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành, đã xác định khối lượng thể tích và độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông cường độ cao hạt mịn, kết quả thu được đã thể hiện trong Bảng 4.

Từ số liệu trong Bảng 4 cho thấy, khi thay đổi tỷ lệ tro bay/xi hạt lò cao nghiền mịn từ 60/40 đến 40/60 thì tính công tác của hỗn hợp bê tông thay đổi đáng kể. Độ xòe ngay sau khi nhào trộn của hỗn hợp bê tông giảm từ 23,5 cm xuống 20,5 cm.

Bên cạnh đó, tỷ lệ 1 % bột Al_2O_3 không ảnh hưởng đáng kể đến tính công tác của hỗn hợp bê tông sau khi nhào trộn. Hỗn hợp thu được có tính công tác tốt hơn bê tông xi măng truyền thống mặc dù với tỷ lệ Nước/Rắn = 0,171. Điều này được giải thích một phần do không có xi măng Portland, lượng nước không bị mất do xi măng thủy hóa, đồng thời do tác động tương hỗ của phụ gia siêu dẻo SR 5000F và hỗn hợp bê tông không có cốt liệu lớn, nên hỗn hợp sau khi nhào trộn vẫn có tính công tác rất tốt, độ dẻo cao, độ đồng nhất tốt, không có hiện tượng phân tầng tách lớp giữa các thành phần trong bê tông sau khi nhào trộn.

Từ số liệu trong Bảng 4 cho thấy, khi thay đổi tỷ lệ tro bay/xi hạt lò cao nghiền mịn từ 60/40 đến 40/60 thì tính công tác của hỗn hợp bê tông thay đổi đáng kể. Độ xòe ngay sau khi nhào trộn của hỗn hợp bê tông giảm từ 23,5 cm xuống 20,5 cm.

Bên cạnh đó, tỷ lệ 1 % bột Al_2O_3 không ảnh hưởng đáng kể đến tính công tác của hỗn hợp bê tông sau khi nhào trộn. Hỗn hợp thu được có tính công tác tốt hơn bê tông xi măng truyền thống mặc dù với tỷ lệ Nước/Rắn = 0,171. Điều này được giải thích một phần do không có xi

măng Portland, lượng nước không bị mất do xi măng thủy hóa, đồng thời do tác động tương hỗ của phụ gia siêu dẻo SR 5000F và hỗn hợp bê tông không có cốt liệu lớn, nên hỗn hợp sau khi nhào trộn vẫn có tính công tác rất tốt, độ dẻo cao, độ đồng nhất tốt, không có hiện tượng phân tầng tách lớp giữa các thành phần trong bê tông sau khi nhào trộn.

Hơn nữa, giá trị độ chảy xòe trung bình của hỗn hợp bê tông không xi măng thay đổi khá lớn khi hàm lượng xi hạt lò cao nghiền mịn tăng từ 40 % đến 60 % trong thành phần cấp phối. Điều này được giải thích bởi xi hạt lò cao nghiền mịn có phản ứng thủy hóa với nước ở nhiệt độ thường. Phản ứng này được gọi là hiệu ứng thủy lực của xi luyện kim. Chính vì hiệu ứng thủy lực này xi luyện kim đã sử dụng một lượng nước để thủy hóa, dẫn đến lượng nước dùng để tạo ra tính công tác của hỗn hợp bê tông giảm, kết quả là độ xòe trung bình đã giảm từ 23,5 cm (M-01 có 40 % xi hạt lò cao nghiền mịn) xuống 20,5 cm (M-03 có 60 % xi hạt lò cao nghiền mịn) (Hình 4). Bên cạnh đó, đặc tính bề mặt nhám, nhiều góc cạnh của xi hạt lò cao nghiền mịn cũng là một phần nguyên nhân dẫn đến tính công tác của hỗn hợp bê tông giảm khi tăng hàm lượng xi.

Để đánh giá tốc độ đông kết và rắn chắc của hỗn hợp bê tông sau khi nhào trộn, trong thí nghiệm này đã đánh giá bằng thời gian tháo khuôn của viên mẫu sau khi đổ. Với viên mẫu M-01 (hàm lượng xi là 40 %) có thể tháo khuôn sau 24 giờ. Mẫu sau khi tháo có bề mặt nhẵn, không nứt nẻ. Với các mẫu M-02 và M-03 thì có thể tháo khuôn mẫu sau khoảng $06 \pm 0,5$ giờ sau khi đổ. Từ đó cho thấy với sự kết hợp của tro bay và xi lò cao nghiền mịn, mẫu bê tông không xi măng sau khi thí nghiệm có tốc độ rắn chắc tương đối nhanh trong điều kiện nhiệt độ thường. Hiện tượng này một phần cũng do phản ứng của Al_2O_3 với NaOH đã thúc đẩy nhanh hơn quá trình đông kết và rắn chắc của sản phẩm sau khi tạo hình. Do đó chúng đã khắc phục được nhược điểm về tốc độ rắn chắc của hỗn hợp bê tông không xi măng từ tro bay.

Bảng 3. Cấp phối sơ bộ của hỗn hợp bê tông hạt mịn không xi măng.

Ký hiệu mẫu	$\frac{TB}{Xi}$	ALS (kg)	Al_2O_3	TB	Xi	C	SR5000	Dung dịch		Nước	Rắn
								NaOH	Na_2SiO_3		
M-01	60/40	876	8,8	517	351	1139	8,8	80	200	169	988
M-02	50/50	883	8,8	437	437	1147	8,8	81	202	170	995
M-03	40/60	890	8,9	347	534	1157	8,9	81	203	171	1003

Trong đó: Thành phần "rắn" gồm hỗn hợp tro bay (TB), xi hạt lò cao nghiền mịn (Xi); Al_2O_3 và phần rắn của dung dịch hoạt hóa (NaOH và Na_2SiO_3) được coi như là "xi măng" trong loại bê tông này.

Bảng 4. Khối lượng thể tích và độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông không xi măng.

STT	Tỷ lệ của hỗn hợp vật liệu	$\frac{DDHH}{ALS}$	Tính chất của bê tông cường độ cao hạt mịn		
			Khối lượng thể tích	Độ chảy xòe ngay	Thời gian tháo
M-01	60/40	0,32	2305	23,5	$24 \pm 0,5$ giờ
M-02	50/50		2321	21	$6 \pm 0,5$ giờ
M-03	40/60		2340	20,5	$6 \pm 0,5$ giờ



Hình 4. Xác định độ xòe của hỗn hợp bê tông cường độ cao hạt mịn trong côn vữa.

Ngoài ra, khối lượng thể tích của hỗn hợp chất kết dính được xác định theo phương pháp tiêu chuẩn trong thùng đong có thể tích 1 lít. Giá trị khối lượng thể tích trung bình của hỗn hợp chất kết dính không xi măng là 2,32 tấn/m³, giá trị này nhỏ hơn nhiều so với giá trị khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông xi măng Portland. Điều này được giải thích là do trong thành phần không có cốt liệu lớn và khối lượng riêng của tro xỉ trong hỗn hợp bê tông này đều nhỏ hơn khối lượng riêng của xi măng.

3.2. Tính chất cơ lý của hỗn hợp bê tông cường độ cao hạt mịn sử dụng chất kết dính không xi măng sau khi rắn chắc

Trong giới hạn của nghiên cứu này, tính chất cơ lý của mẫu bê tông cường độ cao hạt mịn được khảo sát gồm có:

- Khối lượng thể tích của bê tông cường độ cao hạt mịn được xác định ở tuổi 28 ngày. Mẫu được vớt ra khỏi bể dưỡng hộ, lau khô bề mặt bằng vải khô, sau đó cân ngay để xác định khối lượng của mẫu ở

trạng thái ẩm. Sau đó thể tích của mẫu được xác định bằng phương pháp đo kích thước trên ba cạnh khác nhau của viên mẫu.

- Độ hút nước theo khối lượng ở tuổi 28 ngày.

- Cường độ kéo khi uốn của mẫu được xác định ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày trên hệ thống máy nén uốn tự động ADVANTEST 9. Tốc độ gia tải trong trường hợp này là 50 N/s theo yêu cầu kỹ thuật của TCVN 3121-11:2003. Mỗi tổ mẫu uốn gồm 03 viên, sau khi thí nghiệm sẽ thu được 03 kết quả cường độ kéo khi uốn.

- Cường độ nén của mẫu được xác định ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày trên hệ thống máy nén uốn tự động ADVANTEST 9. Tốc độ gia tải trong trường hợp này là 500 N/s theo yêu cầu kỹ thuật của TCVN 3121-11:2003. Các viên mẫu hình dầm sau khi uốn gãy, được đặt vào bộ má nén của máy thủy lực, kích thước của má nén là 40x40 mm. Như vậy, với tổ mẫu 03 viên uốn sẽ thu được 06 nửa viên mẫu nén và 06 kết quả cường độ nén của mẫu bê tông thí nghiệm.

Kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này đã được trình bày trên Bảng 5.

Bảng 5. Tính chất cơ lý của mẫu bê tông cường độ cao hạt mịn sau khi rắn chắc.

STT	Tính chất	M-01		M-02		M-03	
		Trung bình	Độ lệch chuẩn	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Trung bình	Độ lệch chuẩn
1	Khối lượng thể tích của bê tông ở tuổi 28 ngày (kg/m ³)	2245	16,24	2278	15,67	2305	14,38
2	Độ hút nước theo khối lượng ở tuổi 28 ngày (%)	6,48	0,47	5,45	0,39	4,52	0,44
3	Cường độ kéo khi uốn (MPa) tại tuổi:						
	3 ngày	2,25	0,65	2,85	0,65	2,95	0,65
	7 ngày	4,61	0,91	4,28	0,78	5,35	0,78
	14 ngày	5,26	1,36	6,45	1,61	6,24	1,61
4	Cường độ nén (MPa) tại tuổi:						
	3 ngày	29,1	2,01	31,1	2,15	37,8	2,35
	7 ngày	48,5	3,12	51,9	3,25	56,2	3,48
	14 ngày	61,2	3,42	67,8	3,51	70,4	3,55
	28 ngày	75,8	3,08	81,9	3,75	85,2	3,80

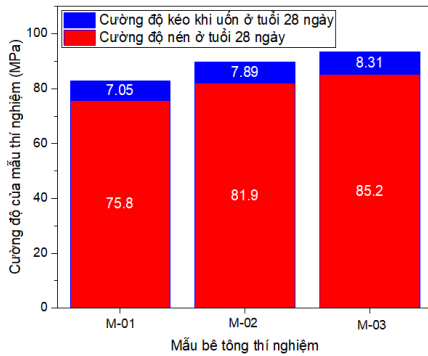
Từ số liệu trong Bảng 5 cho thấy rằng, ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và xi hạt lò cao nghiền mịn đến cường độ của bê tông cường độ cao hạt mịn là đáng kể. Hàm lượng Al₂O₃ đã ảnh hưởng tích cực trong việc tăng cường độ trung bình của các mẫu thí nghiệm ở tất cả các tuổi thí nghiệm.

Cả 03 cấp phối bê tông cường độ cao không chứa xi măng đều

có giá trị cường độ nén trung bình đạt trên 70 MPa tại tuổi 28 ngày, vượt mục tiêu thiết kế về cường độ nén đề ra.

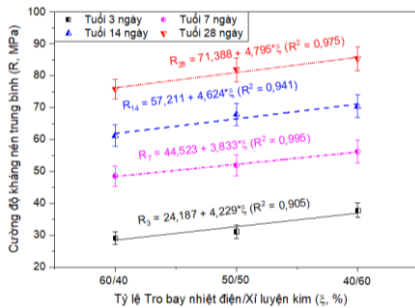
Tuy nhiên, giá trị trung bình của cường độ kéo khi uốn bằng 1/9 ÷ 1/11 giá trị cường độ nén của các mẫu thí nghiệm (Hình 5). Tỷ số này tương đồng so với bê tông xi măng truyền thống [17- 19]. Điều này cho thấy giá trị cường độ kéo khi uốn của loại bê tông này tuy được

gia tăng nhưng tỷ số cường độ kéo/cường độ nén thay đổi không đáng kể, hàm lượng Al_2O_3 không cải thiện nhiều tỷ số cường độ kéo/cường độ nén.



Hình 5. Cường độ kéo khi uốn và cường độ nén của mẫu ở tuổi 28 ngày.

Mặt khác, ảnh hưởng của tỷ lệ tro bay nhiệt điện/xi hạt lò cao nghiền mịn đến cường độ nén của bê tông cường độ cao không xi măng được trình bày trên Hình 6.



Hình 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ tro bay nhiệt điện/xi hạt lò cao nghiền mịn đến cường độ nén của mẫu bê tông cường độ cao không xi măng.

Từ Hình 6 cho thấy hàm lượng xi hạt lò cao nghiền mịn tăng từ 40 % lên 60 % thì cường độ nén của các mẫu thí nghiệm ở các tuổi 3, 7, 14, 28 ngày đều tăng lên tương ứng. Hiệu ứng tăng tính chất cơ học khi hàm lượng xi hạt lò cao nghiền mịn tăng trong bê tông cường độ cao sử dụng chất kết dính kiềm hoạt hóa đã được biện giải bởi nhiều nguyên nhân như sau:

(i)- Tro bay nhiệt điện và xi hạt lò cao nghiền mịn đóng vai trò chính là vật liệu giàu nhôm và silic, cung cấp nguyên tử Si và Al cho quá trình polymer hóa và tạo ra các thành phần hoạt tính $[SiO(OH)_3]$ và $[Al(OH)_4]$. Kết quả của quá trình này là hình thành các gel Geopolymer có dạng $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (C-(A)-S-H) và $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (N-A-S-H), liên kết các thành phần hạt cốt liệu rời rạc lại với nhau [3, 5, 11, 16].

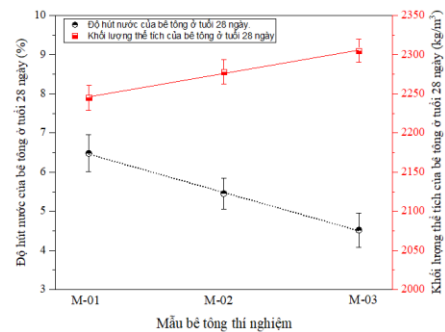
(ii)- Trong quá trình geopolymer hoá của bê tông, ôxit canxi trong xi hạt lò cao nghiền mịn bị hòa tan tạo thành ion Ca^{2+} , cation này có vai trò hỗ trợ quá trình hòa tan SiO_2 và Al_2O_3 . Cụ thể là cation Ca^{2+} từ

CaO bị hòa tan trong dung dịch kiềm hoạt, làm phá vỡ cấu trúc của các pha vô định hình, và kết quả là làm cho thành phần tro xi hòa tan triệt để hơn [8, 16].

(iii)- Bê tông cường độ cao sử dụng chất kết dính gồm hỗn hợp tro bay và xi lò cao sau khi hoạt hóa bởi dung dịch NaOH và Na_2SiO_3 sẽ cho sản phẩm gồm cả hai loại poly-sialates gel gồm: N-A-S-H) (sản phẩm chính của phản ứng kiềm hoạt hóa tro bay) và C-(A)-S-H gel với tỷ lệ Ca/Si thấp và có cấu trúc không gian với mật độ cao (sản phẩm chính của phản ứng kiềm hoạt hóa xi hạt lò cao nghiền mịn) [21, 22]. Các sản phẩm này lấp đầy các lỗ rỗng xuất hiện trong vi cấu trúc của sản phẩm nên đã tăng tính chất cơ học của sản phẩm. Nhận xét này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Wardhono và các cộng sự [23].

Hơn nữa, khối lượng thể tích trung bình của các mẫu thí nghiệm sau khi rắn chắc 28 ngày được xác định ở trạng thái bão hòa nước khô mặt là $2,28 \text{ tấn/m}^3$. Từ giá trị khối lượng thể tích này có thể khẳng định loại bê tông cường độ cao hạt mịn không xi măng được xếp vào loại đá nhân tạo tương đối nặng. Tuy nhiên, giá trị này đã giảm được khoảng $5 \div 10 \%$ so với khối lượng thể tích của bê tông truyền thống được quy định trong TCVN 2737:2020.

Với việc bổ sung thêm hàm lượng bột ôxit nhôm kết hợp với thành phần xi hạt lò cao nghiền mịn đã từng tạo ra khối bê tông có vi cấu trúc đặc chắc, ít lỗ rỗng hơn. Và kết quả là độ hút nước ở tuổi 28 ngày giảm dần, đồng thời khối lượng thể tích của mẫu cũng tăng dần (Hình 7).



Hình 7. Giá trị trung bình của độ hút nước và khối lượng thể tích của mẫu bê tông.

Theo nhiều kết quả nghiên cứu về bê tông sử dụng chất kết dính không xi măng [3, 4, 14], sau khi chế tạo và bảo dưỡng trong môi trường không khí, các mẫu thí nghiệm có hiện tượng bị rêu mốc, "mọc lông"... trên bề mặt (Hình 8). Hiện tượng này do nguyên nhân là dung dịch kiềm kích hoạt còn dư thừa, tồn đọng trong các lỗ rỗng hờ và trên bề mặt của mẫu thí nghiệm. Trong môi trường ẩm và chứa khí cacbonic (CO_2), NaOH tác dụng với khí CO_2 ... có sẵn trong không khí để tạo thành các muối - sản phẩm làm rêu mốc, "mọc lông"... trên bề mặt của mẫu thí nghiệm. Nhưng trong thí nghiệm này, với mẫu có chứa 1% bột ôxit nhôm thì hiện tượng rêu mốc, "mọc lông" trên bề mặt sau khi tạo hình đã giảm, thậm chí không còn hiện tượng này.



Hình 8. Hiện tượng rêu mốc trên bề mặt mẫu thí nghiệm.

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu trong phạm vi của phòng thí nghiệm đã rút ra được một số kết luận như sau:

- Trên cơ sở thực nghiệm và các nguồn vật liệu, thải phẩm hiện có trong nước như: tro bay nhiệt điện Phà Lại, xi hạt lò cao nghiền mịn Hòa Phát, ôxít nhôm – Al_2O_3 ; cát vàng sông Lô kết hợp với dung dịch hoạt hóa (NaOH 12 M và Na_2SiO_3 với modun silic 2,5) và phụ gia siêu dẻo SR 5000F “SilkRoad” hoàn toàn có thể chế tạo được bê tông cường độ cao hạt mịn không xi măng có độ chảy xèo trong côn vừa trong khoảng 20,5 ÷ 23,5 cm, cường độ nén ở tuổi 28 ngày dao động trong khoảng 75,8 ÷ 85,2 MPa và cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày trong khoảng 7,05 ÷ 8,31 MPa, phù hợp để sử dụng trong xây dựng các công trình ở Việt Nam.

- Hàm lượng 1 % Al_2O_3 không ảnh hưởng nhiều đến tính công tác của hỗn hợp bê tông, nhưng có ảnh hưởng tích cực đến tốc độ rắn chắc và tăng cường độ của mẫu bê tông ở các tuổi mẫu thí nghiệm khác nhau.

- Khi hàm lượng xi hạt lò cao nghiền mịn tăng từ 40 % đến 60 % trong thành phần bê tông thì độ xèo của hỗn hợp giảm từ 23,5 cm xuống còn 20,5 cm, nhưng khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông tăng từ 2305 kg/m^3 đến 2340 kg/m^3 . Đồng thời, với việc bổ sung bột ôxít nhôm kết hợp với xi hạt lò cao nghiền mịn đã tăng tốc độ rắn chắc của hỗn hợp bê tông trong điều kiện nhiệt độ thường.

- Từ kết quả thực nghiệm cho thấy, khối lượng thể tích trung bình của hỗn hợp bê tông là 2,32 tấn/ m^3 và khối lượng thể tích mẫu bê tông sau khi rắn chắc 28 ngày khoảng 2,28 tấn/ m^3 . Nhưng độ hút nước theo khối lượng của mẫu bê tông ở tuổi 28 ngày đã giảm từ 6,48 % xuống 4,52 %.

- Mặt khác, khi giảm tỷ lệ tro bay/xi hạt lò cao nghiền mịn từ 60/40 xuống 40/60 thì các mẫu bê tông hạt mịn có cường độ nén trung bình dao động từ 75,8 MPa đến 85,2 MPa tại tuổi 28 ngày. Nhưng tỷ số giữa cường độ kéo khi uốn với cường độ nén của loại bê tông này vẫn tương đồng so với bê tông truyền thống, dao động khoảng 1/9 đến 1/11.

- Kết quả thực nghiệm cho thấy với mẫu thí với mẫu có chứa 1 % bột ôxít nhôm thì hiện tượng rêu mốc, “mọc lông” trên bề mặt sau khi tạo hình đã giảm, thậm trí không còn hiện tượng này.

5. Lời cảm ơn

Nội dung của bài báo là một phần kết quả nghiên cứu của đề tài cấp Bộ năm 2021, mã số 2021-MDA-11 “**Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng chất kết dính không xi măng dùng trong xây dựng công trình chịu tác động ăn mòn của nước biển**”. Tác giả xin chân thành cảm ơn Phòng thí nghiệm Bộ môn Xây dựng công trình ngầm, Khoa Xây dựng cùng các em sinh viên Nguyễn Trung Hiếu và Nguyễn Xuân Công – Trường Đại học Mỏ-Địa chất đã tham gia giúp đỡ thực hiện các thí nghiệm trong nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Rangan B.V. *Low-calcium, fly-ash-based geopolymer concrete*. Concrete construction engineering handbook, Chapter 26, Taylor & Francis, 2008.
- [2]. Ferdous M.W., Kayali O., Khennane A. “A detailed procedure of mix design for fly ash based geopolymer concrete”. *Conference on FRP in Structures (APFIS 2013)*, 2013. Melbourne Australia (11-13).
- [3]. Nguyễn Thanh Bằng, Đinh Hoàng Quân, Nguyễn Tiến Trung. “Nghiên cứu sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện và xi lò cao để chế tạo bê tông chất kết dính kiềm hoạt hóa (không sử dụng xi măng) dùng cho các công trình thủy lợi làm việc trong môi trường biển góp phần bảo vệ môi trường”. Đề tài NCKH cấp Quốc gia mã số KC.08.21/16-20, 2021.
- [4]. Tăng Văn Lâm, Vũ Kim Điển, Bulgakov Boris Igorevich. “Nghiên cứu sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện với xi lò cao để chế tạo bê tông cường độ cao hạt mịn không xi măng”. *Tạp chí Xây dựng*, 2021, số 10/2021. Trang 183-190
- [5]. Sarker. P. “A constitutive model for fly ash based Geopolymer concrete”. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2008.
- [6]. Hwang, Chao-Lung, Trong-Phuoc Huynh. “Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymer”. *Construction and Building Materials*, 2015, 101 (2015): 1-9.
- [7]. Davidovits. J. “Properties of Geopolymer Cement”. *Proceedings first International conference on Alkaline cements and concretes*. 1994.
- [8]. Wallah, S., & Rangan, B. V. “Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties”. *Research Report GC 2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia*.
- [9]. Kiều Quý Nam, Nguyễn Ánh Dương. “Chất kết dính geopolymer trong sản xuất vật liệu xây dựng không nung”. *Tạp chí Địa chất*, loạt A năm 2020, tr.647 -659.
- [10]. Nguyễn Thắng Xiêm. “Khả năng ứng dụng tro bay làm phụ gia trong vữa và bê tông trên nền geopolymer”. *Tạp chí khoa học – công nghệ thủy sản*. Số 1/2013.
- [11]. Tăng Văn Lâm, Phạm Văn Ngan, Nguyễn Đức Bình Minh. “Effect of Liquid-to-Alumino-Silicate Material Ratio and Rice Husk Ash Content on the Properties of Geopolymer Concrete”. *Proceedings of FORM 2021*. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 170. 2021, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79983-0_9.
- [12]. Tăng Văn Lâm, Nguyễn Đình Trinh. “Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và xi lò cao hoạt tính đến tính chất của bê tông cường độ cao hạt mịn không sử dụng chất kết dính xi măng”. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*. Số 76/12-2021.
- [13]. Trần Việt Hưng. “Nghiên cứu thành phần, đặc tính cơ lý của bê tông Geopolymer tro bay và ứng dụng cho kết cấu cầu hầm”. Luận án tiến sĩ kỹ thuật năm 2017, 149 trang.
- [14]. Nguyễn Thanh Bằng, Nguyễn Tiến Trung, Đinh Hoàng Quân. “Ảnh hưởng của độ mịn xi lò cao đến cường độ bê tông chất kết dính kiềm hoạt hóa”. *Tạp chí KH&CN Thủy lợi*, Số 61, 2020, trang 16-23.

- [15]. Tống Tôn Kiên và nnk. “Bê tông geopolimer – những thành tựu, tính chất và ứng dụng”. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị khoa học kỷ niệm 50 năm thành lập Viện khoa học xây dựng*. Nhà xuất bản Xây dựng, ISBN 978-604-82-0064-0.
- [16]. Hwang, Chao-Lung, Trong-Phuoc Huynh. “Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolimer”. *Construction and Building Materials*, 2015, 101, 1-9.
- [17]. Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh, Nguyễn Công Thắng, Lê Trung Thành, Văn Việt Thiên Ân, Hoàng Tuấn Nghĩa. *Bê tông chất lượng siêu cao*, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2018, 300 Tr.
- [18]. Баженов Ю.М., Магдеев У.Х., Алимов Л.А., Воронин В.В., Гольденберг Л.Б. *Мелкозернистый бетон*. М.: Изд. АСВ., 1998, 148 с.
- [19]. Баженов Ю.М. *Технология бетона*. М.: Изд. АСВ., 2011, 528 с.
- [20]. Olivia M., (2011). *Durability Related Properties of Low Calcium Fly ash based Geopolymer Concrete*, in Civil Engineering 2011, Curtin University of Technology.
- [21]. Rattanasak U., Chindaprasirt P. “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolimer”. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078.
- [22]. Kumar S., Kumar R., Mehrotra S.P. “Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolimer”. *Journal of materials science*, 2008, 45(3), 607-615.
- [23]. Barbosa V.F.F. and MacKenzie K.J.D. “Synthesis and Thermal Behavior of Potassium Sialate Geopolymer”, *Materials Letters*, 2011, 57, 1477-1482.