

Khả năng chế tạo bê tông nặng sử dụng bụi nhôm phế thải và chất kết dính

Geopolymer từ nguồn vật liệu ở Việt Nam

Possibility of making heavyweight concrete using waste aluminum dust and geopolymer binder from material sources in Vietnam

> VŨ NGỌC TRỤ¹

¹Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội; Email: trunv@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài viết cho thấy tiềm năng chế tạo bê tông nặng sử dụng bụi nhôm phế thải và chất kết dính Geopolymer từ hỗn hợp phế thải công nghiệp ở Việt Nam. Trong đó, các thành phần bụi nhôm, tro bay nhiệt điện Mông Dương 2 và xỉ hạt lò cao nghiền mịn Hòa Phát được sử dụng như là vật liệu khoáng, dung dịch NaOH với nồng độ 12 M và Na_2SiO_3 có mô-đun silic 2,75 được sử dụng như là dung dịch kích hoạt. Ngoài ra, bụi nhôm cũng được sử dụng để khử bớt thành phần kiềm dư trong nghiên cứu này. Tỷ lệ giữa dung dịch kích hoạt với vật liệu khoáng được khảo sát là 0,40. Hàm lượng bụi nhôm, xỉ lò cao và tro bay đã khảo sát lần lượt là 10%, 30% và 60% hàm lượng vật liệu khoáng. Tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định bằng độ sụt trong côn hình nón cụt tiêu chuẩn và cường độ của mẫu thí nghiệm được xác định trên mẫu hình trụ kích thước 150x300 mm. Đồng thời, lực bám dính giữa bê tông và cốt thép được xác định theo 22 TCN 60-84. Kết quả thực nghiệm đã thu được hỗn hợp bê tông có độ sụt trung bình khoảng 14 cm, cường độ nén ở tuổi 28 ngày khoảng 49,02 MPa và cường độ lực dính giữa bê tông và cốt thép trung bình khoảng 15,66 MPa.

Từ khóa: Bê tông nặng; bụi nhôm; tro bay; xỉ hạt lò cao nghiền mịn; dung dịch kích hoạt; cường độ nén.

ABSTRACT

This article has shown the potential for making heavyweight concrete using waste aluminum dust and Geopolymer adhesive from a mixture of Vietnamese industrial waste. In particular, aluminum dust, fly ash from Mong Duong 02 thermal power plant, and Hoa Phat finely ground blast furnace slag are used as mineral materials. While NaOH solution with a concentration of 12 M and Na_2SiO_3 has a silicon module. 2.75 was used as the activating solution. In addition, aluminum dust was also used to reduce residual alkalinity in this study. The ratio between the activated solution and the mineral material investigated was 0.40. The investigated contents of aluminum dust, blast furnace slag, and fly ash were 10%, 30%, and 60% mineral material content, respectively. The workability of the concrete mixture is determined by the slump in a standard cone, and the strength of the test samples is determined on a cylindrical sample measuring 150x300 mm. At the same time, the adhesion force between heavyweight concrete and reinforcement is determined according to 22 TCN 60-84. Experimental results have shown that the concrete mixture has an average slump of about 14 cm, compressive strength at 28 days is about 49.02 MPa and average bond strength between concrete and reinforcement is about 15.66 MPa.

Keywords: Heavyweight concrete; fly ash; granulated blast furnace slag; alkali-activator; compressive strength.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Với khung công ước khung Liên hợp quốc về Biến đổi khí hậu - COP28, Việt Nam ngày càng quan tâm và tìm kiếm các giải pháp làm giảm thiểu ô nhiễm môi trường thông qua hoạt động xử lý các nguồn chất thải rắn công nghiệp [1, 2]. 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 giảm diện tích và số lượng các kho bãi chứa chất thải. Quá trình này mang lại hiệu

quả sử dụng cao nhất, thúc đẩy tăng trưởng xanh bền vững, không chỉ trong lĩnh vực xây dựng mà còn ở nhiều lĩnh vực khác của nền kinh tế.

Một trong những nguồn gốc gây ra thảm họa môi trường đó là bụi nhôm của các làng nghề như cô đúc và tái chế nhôm phế thải. Có thể thấy rằng, việc cô đúc nhôm phế thải đã mang lại điều kiện kinh tế tốt cho người dân ở các làng nghề tái chế nhôm như làng nghề Mãn Xá (Yên Phong, Bắc Ninh). Xã Văn Môn là một trong những khu vực làng nghề tái chế nhôm có quy mô lớn nhất miền

Bắc với khoảng 400 lò nấu và đúc nhôm phế liệu. Quá trình sản xuất với công nghệ thủ công này đã gây ra nhiều hệ lụy về môi trường rất nghiêm trọng, tạo ra các loại khói bụi, khí độc, nước thải... phá hủy môi trường và gây bệnh cho người dân [3]. Nguồn gây ô nhiễm môi trường lớn nhất trong hoạt động tái chế nhôm phế thải chính là bụi nhôm. Khối lượng bụi nhôm tạo ra trong quá trình nấu nhôm là rất lớn. Theo báo cáo của Công ty môi trường Ngôi sao xanh [4], khi tái chế khoảng 30 tấn nhôm thành phẩm đã thải ra môi trường khoảng 3-4 tấn bụi nhôm các loại. Vì vậy, việc tái sử dụng bụi nhôm tại các làng nghề đóng vai trò quan trọng trong việc giảm ô nhiễm môi trường và tận dụng lại tài nguyên, giảm khói bụi và các chất độc hại ra môi trường.

Mặt khác, trong giai đoạn hiện nay Việt Nam đã và đang định hướng theo nền kinh tế tuần hoàn, tiết kiệm nguồn tài nguyên, giảm trách nhiệm pháp lý về bảo vệ môi trường, quản lý chất thải. Trước những tác động tiêu cực của quá trình sản xuất và sử dụng xi măng Portland truyền thống [5]. Đồng thời xử lý triệt để hơn loại phế thải rắn từ các hoạt động công nghiệp như tro bay, xỉ lò cao, đá thải khai thác khoáng sản... thì việc nghiên cứu chế tạo các loại vật liệu xanh, bê tông dùng chất kết dính Geopolymer, thân thiện môi trường từ hỗn hợp các loại phế thải rắn là một giải pháp tất yếu để phát triển ngành công nghiệp xây dựng bền vững [6].

Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra rằng thành phần chủ yếu tạo ra chuỗi mạng lưới cấu trúc của chất kết dính Geopolymer gồm thành phần chất kích hoạt (dung dịch kiềm đặc) và thành phần vật liệu khoáng giàu nhôm và Silic. Dung dịch kích hoạt phổ biến hiện nay là hỗn hợp của NaOH đặc và Na_2SiO_3 có mô đun silicat từ 1,5 – 2,5 [7, 8]. Bên cạnh đó, vật liệu khoáng giàu nhôm và Silic được sử dụng trong thành phần chất kết dính không xi măng chủ yếu là các loại phế thải rắn công nghiệp có độ hoạt tính cao. Nói chung, bất kỳ vật liệu khoáng tự nhiên hay nhân tạo có chứa hàm lượng SiO_2 và Al_2O_3 hoạt tính cao đều có thể được pha loãng vào các dung dịch kiềm mạnh (NaOH hoặc KOH) để tạo một chuỗi phản ứng tỏa nhiệt của quá trình geopolymer hóa để tạo thành chất kết dính Geopolymer [9, 10].

Mặt khác, tro bay và xỉ lò cao là hai trong số những vật liệu nhân tạo phức tạp và phong phú nhất hiện nay trên thế giới. Tro bay là bụi khí thải dưới dạng hạt mịn thu được từ quá trình đốt cháy nhiên liệu than đá trong các nhà máy nhiệt điện chạy than, là phế thải thoát ra từ buồng đốt qua ống khói nhà máy [11, 12]. Tro bay được tận thu từ ống khói qua hệ thống nổi hơi tinh luyện loại bỏ bớt các thành phần than chưa cháy hết. Thành phần của tro bay thường chứa các silic oxit, nhôm oxit, canxi oxit, sắt oxit, magie oxit và lưu huỳnh oxit, ngoài ra có thể chứa một lượng than chưa cháy hết. Xỉ lò cao là phế thải của ngành công nghiệp luyện gang thép, thải phẩm ở dạng hạt có đường kính từ $10 \div 200 \mu\text{m}$. Đây là sản phẩm phụ của quá trình luyện quặng oxit sắt thành gang. Cùng với quá trình CNH, HĐH đang phát triển vượt bậc ở nước ta, nhu cầu sử dụng năng lượng điện than và gang thép ngày càng cao. Điều này dẫn tới lượng phát thải tro bay và xỉ lò cao ngày càng lớn [13-15]. Nếu không được xử lý đúng cách, nó có thể gây ô nhiễm nước và đất, phá vỡ các chu kỳ sinh thái và gây nguy hiểm cho môi trường sống của con người và động vật. Do đó, các nguồn chất thải này rất cần tái sử dụng để thúc đẩy tăng trưởng "xanh" theo đúng chủ trương chính sách của Nhà nước ta hiện nay.

Mục đích của nghiên cứu này là kết hợp bụi nhôm phế thải với tro bay nhiệt điện Mông Dương 2 và xỉ lò cao Hòa Phát để tái sử dụng tối đa các nguồn phế thải công nghiệp, thu được sản phẩm bê tông nặng dùng trong xây dựng các công trình hạ tầng cơ sở. Đồng thời, thành phần bụi nhôm có vai trò tạo thành thêm các gel $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ vừa tăng cường độ sản phẩm, vừa có vai trò

giảm bớt hàm lượng kiềm dư, từ đó hạn chế được hiện tượng rêu mốc trên bề mặt của sản phẩm bê tông nặng sử dụng chất kết dính Geopolymer.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu sử dụng

a). *Vật liệu khoáng (VLK) gồm:* Bụi nhôm phế thải của các làng nghề tái chế nhôm phế liệu ở Yên Phong-Bắc Ninh kết hợp với tro bay nhiệt điện Mông Dương 2 và xỉ hạt lò cao nghiên mìn Hòa Phát.

(i). Bụi nhôm (BN) do Công ty môi trường Ngôi sao xanh cung cấp, đây là loại bụi phế thải phát sinh từ ống khói của các lò nấu nhôm khu vực làng nghề Bắc Ninh. Kích thước hạt bụi nhôm trung bình khoảng $50 \mu\text{m}$. Khối lượng riêng bụi nhôm là $2,15 \text{ g/cm}^3$. Bụi nhôm được sử dụng nhằm mục đích bổ sung hàm Al_2O_3 để tạo thành các $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$. Khoáng vật này là nguyên nhân thúc đẩy cường độ của bê tông sau khi đông kết và rắn chắc. Mặt khác, thành phần Al, Al_2O_3 có phản ứng với NaOH ngay ở nhiệt độ thường để tạo thành muối NaAlO_2 . 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 Mông Dương 2, 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 bớt hàm lượng tạp chất không có lợi cho bê tông và lượng than chưa cháy.

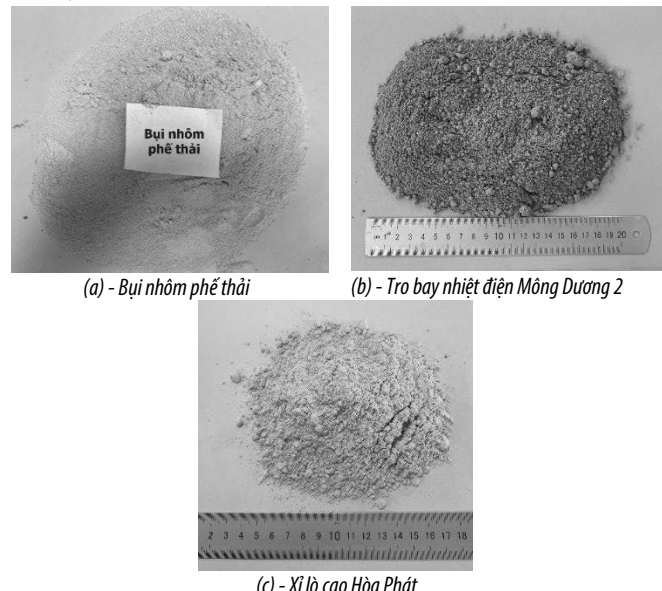
(iii). Xỉ hạt lò cao nghiên mìn S95 (Xi) được mua từ Khu liên hợp gang thép "Hòa Phát", thỏa mãn yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 11586:2016.

Các tính chất vật lý cơ bản của bụi nhôm phế thải, tro bay và xỉ hạt lò cao nghiên mìn được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Tính chất vật lý của bụi nhôm phế thải, tro bay nhiệt điện Mông Dương 02 và xỉ hạt lò cao nghiên mìn Hòa Phát

Loại vật liệu	Bụi nhôm	Tro bay	Xỉ lò cao
Ký hiệu	BN	TB	Xi
Lượng mất khi nung (%)	8,5	4,5	1,2
Tỷ diện bề mặt riêng (cm^2/g)	2800	3700	5250
Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,15	2,38	2,90
Khối lượng thể tích (kg/m^3)	1610	1575	1520

Vật liệu khoáng sử dụng trong nghiên cứu đã được mô tả trên Hình 1.



Hình 1. Vật liệu khoáng sử dụng trong nghiên cứu

b). Dung dịch kích hoạt

Do bê tông sử dụng chất kết dính Geopolymer, trong đó các loại vật liệu 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 kích hoạt để hòa tan các thành phần vật liệu khoáng. Hỗn hợp dung dịch kích hoạt (DDKH) có vai trò là chất kích hoạt, thúc đẩy quá trình geopolymer hóa, khử nguyên tử Al, Si trong Al_2O_3 và SiO_2 , đồng thời hòa tan một phần các hạt tro bay, xỉ và bụi nhôm trong vật liệu khoáng để tạo ra các thành phần có tính chất kết dính trong hỗn hợp bê tông.

DDKH trong nghiên cứu này sử dụng là hỗn hợp của Natri hydroxit - NaOH (dạng rắn) và dung dịch Natri silicat - Na_2SiO_3 .

(i). Natri hydroxit (NaOH) sử dụng ở dạng vảy khô có tên thương mại là "Caustic Soda Flake 99%" được đặt mua tại Công ty hóa chất Việt Nhật. Natri hydroxit 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. 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 1,32 g/cm³.

(ii). Dung dịch Natri silicat (Na_2SiO_3) được mua có nguồn gốc từ nhà máy hóa chất Việt Nhật có mô đun silic $SiO_2/Na_2O = 2,5$. Dung dịch Natri silicat có thành phần gồm 11,8% Na_2O ; 29,5% SiO_2 và 58,7% H_2O , thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn 64TCN 38:198. Khối lượng riêng của dung dịch Na_2SiO_3 được xác định bằng thực nghiệm là 1,55 g/cm³.

c). **Cốt liệu.** Trong nghiên cứu này sử dụng cốt liệu lớn là đá dăm và cốt liệu nhỏ là cát vàng sông Lô:

(i). Cốt liệu lớn sử dụng là loại đá dăm (D) có $D_{max}=20$ mm được lấy từ mỏ đá Kiện Khê (Hà Nam) thỏa mãn yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 7570:2006. Kết quả thí nghiệm khối lượng riêng của hai loại đá này là 2,67 g/cm³ và khối lượng thể tích đầm chặt là 1,71 g/cm³.

(ii). 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. Đây là loại cát có thành phần hạt thô với mô-đun độ lớn $M_k = 2,5$. Khối lượng riêng và khối lượng thể tích đầm chặt của cát vàng sông Lô lần lượt là 2,65 g/cm³ và 1,67 g/cm³.

d). Phụ gia siêu dẻo

Phụ gia siêu dẻo được sử dụng là loại SR 5000F «SilkRoad». Đây là loại phụ gia giảm nước tầm cao, thế hệ 3, có thành phần dựa trên gốc Polycarboxylate, tỷ trọng: 1,12 g/cm³ ở nhiệt độ 25±5°C. Phụ gia siêu dẻo SR 5000F thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của TCVN 8826:2011.

e). Nước

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

2.2. Phương pháp nghiên cứu

a). Các tiêu chuẩn thực nghiệm

Trong nghiên cứu đã sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với kiểm chứng bằng thực nghiệm để điều chỉnh tính chất của hỗn hợp bê tông thu được. Các tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông được xác định theo các tiêu chuẩn thí nghiệm như sau:

+ Lấy mẫu, đúc mẫu và bảo dưỡng mẫu bê tông được thực hiện theo TCVN 3105:2022;

+ Xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông được thực hiện theo TCVN 3106:2022;

+ Khối lượng thể tích của bê tông được xác định theo TCVN 3115:2022;

+ Giá trị trung bình của mô đun đàn hồi khi nén tĩnh thực hiện theo yêu cầu của TCVN 5726:2022;

+ Lực dính giữa bê tông và cốt thép được xác định theo tiêu chuẩn ngành 22 TCVN 60-84.

+ Cường độ chịu nén của bê tông nặng được xác định theo TCVN 3118:2022.

Cường độ nén của mẫu được xác định ở các tuổi 7 ngày; 14 ngày, 28 ngày và 56 ngày trên hệ thống máy nén uốn tự động ADVANTEST 9 với tốc độ tăng tải trọng nghiên cứu này là 3000 N/s. Các viên mẫu hình trụ tròn kích thước 15x30cm được bảo dưỡng theo tiêu chuẩn cho đến các tuổi thí nghiệm. Mỗi tổ mẫu gồm 06 viên mẫu thí nghiệm theo tiêu chuẩn.

b). Các yêu cầu kỹ thuật đối với hỗn hợp bê tông và bê tông sau khi cứng rắn

(i). Hỗn hợp bê tông có tính công tác tốt với độ sụt từ 10 ÷ 15 cm, được xác định trên thiết bị côn thử độ chảy với kích thước 10x20x30 cm phù hợp theo TCVN 3106:2022 (Hình 2). Hỗn hợp được sử dụng để thi công kết cấu khung bê tông cốt thép trong nhà cao tầng bằng phương pháp bơm.



a) - Bộ dụng cụ côn hình nón cắt tiêu chuẩn



b) - Xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông

Hình 2. Xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông trong côn hình nón cắt tiêu chuẩn

(ii). Cường độ nén ở tuổi 28 ngày được thiết kế dao động trong khoảng từ 40 MPa đến 50 MPa, trên cơ sở lực nén phá hoại mẫu thí nghiệm hình lập phương tiêu chuẩn kích thước 150x150x150 mm phù hợp với yêu cầu kỹ thuật của TCVN 3118:2022.

2.3. Xác định cấp phối hỗn hợp bê tông dùng chất kết dính Geopolymer

+ Xác định, lựa chọn các tỷ lệ cơ sở của nguyên vật liệu sử dụng

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 nặng dùng chất kết dính Geopolymer ở nhiều nước tiên tiến trên thế giới [7-12] và ở Việt Nam [13-16].

* **Về vật liệu khoáng (VLK)** là một tổ hợp bao gồm: BN phế thải, TB của nhà máy nhiệt điện Mông Dương 2 và Xi của gang thép Hòa Phát.

Trong nghiên cứu này đã kết hợp 10% BN, 30% Xi và hàm lượng TB nhiệt điện Mông Dương 2 là 60% trong thành phần của VLK.

Như vậy, tổng hàm lượng VLK được xác định theo công thức (1):

$$VLK = BN + TB + Xi \quad (1)$$

* **Về hàm lượng cốt liệu**, trong nghiên cứu này hỗn hợp cốt liệu gồm cốt liệu nhỏ (cát vàng sông Lô - C) và cốt liệu lớn (đá dăm - D) đã được lựa chọn bằng 70% thể tích của hỗn hợp bê tông [19, 20]. Hàm lượng cốt liệu nhỏ được lựa chọn bằng 30% tổng hàm lượng cốt liệu sử dụng, theo kết quả nghiên cứu của các nghiên cứu đã thực hiện. Như vậy, tổng hàm lượng cốt liệu sẽ được tính theo công thức (2):

$$CL = C + D \quad (2)$$

* **Về dung dịch kích hoạt**, hàm lượng DDKH 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 tỷ lệ nhỏ của DDKH sẽ ảnh hưởng đến quá trình khử các ion Si và Al, cũng như ảnh hưởng đến quá trình hòa tan bề mặt của các bụi nhôm, hạt tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn [6, 14]. Trong nghiên cứu này khảo sát tỷ lệ của DDKH/VLK là 0,40.

* Về tỷ lệ $Na_2SiO_3/NaOH$, trong giới hạn của phạm vi nghiên cứu tỷ lệ $Na_2SiO_3/NaOH$ được giữ cố định và bằng 2,5 [14, 20].

* 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 với nồng

độ mol/lít là 12 M. Trong đó thành phần của của dung dịch NaOH 12 M gồm 36,1% NaOH và 63,9% nước.

* Về phụ gia siêu dẻo, nghiên cứu này đã chọn hàm lượng phụ gia giảm nước tẩm cao SR5000F cố định và bằng 1% tổng hàm lượng của VLK [6, 13]

Từ những cơ sở trên kết hợp với các kết quả khảo sát thực nghiệm sơ bộ, nghiên cứu này đã chọn gốc các hệ số tỷ lệ vật liệu như trong Bảng 2:

Bảng 2. Các tỷ lệ vật liệu sử dụng để xác định cấp phối hỗn hợp bê tông

Tỷ lệ vật liệu	$\frac{C}{CL}$	$\frac{CL}{HHBT}$	$\frac{BN}{VLK}$	$\frac{TB}{VLK}$	$\frac{Xi}{VLK}$	$\frac{SR5000}{VLK}$	$\frac{DDKH}{VLK}$	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$	A
Giá trị	30%	70%	10%	60%	30%	1%	0,40	2,5	3%

Để xác định được thành phần cấp phối, trong nghiên cứu này đã sử dụng phương pháp thể tích tuyệt đối kết hợp với việc hiệu chỉnh bằng thực nghiệm theo tính chất và chất lượng của vật liệu hiện có. Theo phương pháp thể tích tuyệt đối, tổng thể tích của 1m³ hỗn hợp bê tông nặng đã được lên chặt coi như là tổng thể tích của nước, vật liệu khoáng, cốt liệu, dung dịch kích hoạt, phụ gia siêu dẻo và thể tích không khí cuốn vào trong quá trình nhào trộn [16, 19].

Do đó:

$$\frac{BN}{\gamma_{BN}} + \frac{TB}{\gamma_{TB}} + \frac{Xi}{\gamma_{Xi}} + \frac{D}{\gamma_D} + \frac{C}{\gamma_C} + \frac{NaOH}{\gamma_{NaOH}} + \frac{Na_2SiO_3}{\gamma_{Na_2SiO_3}} + \frac{N}{\gamma_N} + \frac{SR5000}{\gamma_{SR5000}} + A = 1000 \quad (3)$$

Trong đó:

BN, TB, Xi, D, C, NaOH, Na₂SiO₃, N, SR5000: là khối lượng bụi nhôm, tro bay, xỉ lò cao, đá dăm, cát vàng, Natri hydroxit, Natri silicat, nước và phụ gia siêu dẻo SR5000F (kg).

$\gamma_{BN}, \gamma_{TB}, \gamma_{Xi}, \gamma_D, \gamma_C, \gamma_{NaOH}, \gamma_{Na_2SiO_3}, \gamma_N, \gamma_{SR5000}$: là khối lượng riêng của bụi nhôm, tro bay, xỉ lò cao, đá dăm, cát vàng, Natri hydroxit, Natri silicat, nước và phụ gia siêu dẻo SR5000F (kg/lít).

A: là thể tích rỗng do không khí cuốn vào trong hỗn hợp vật liệu thí nghiệm, theo tài liệu [17, 18] thể tích không khí cuốn vào là A = 3%.

Các giá trị khối lượng riêng của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này đã được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Khối lượng riêng của các vật liệu sử dụng

Loại vật liệu	BN	TB	Xi	NaOH 12M	Na ₂ SiO ₃	C	D	N	PGSD
Khối lượng riêng γ (kg/lít)	2,15	2,38	2,90	1,32	1,55	2,65	2,67	1,0	1,12

Tính toán theo phương pháp thể tích tuyệt đối dựa trên các giá trị tỷ lệ vật liệu lựa chọn (trong Bảng 3), đã thu được cấp phối sơ bộ của hỗn hợp bê tông có thành phần như trong Bảng 4.

Bảng 4. Cấp phối của hỗn hợp bê tông sử dụng chất kết dính Geopolymer

Ký hiệu	VLK (kg)	BN	TB	Xi	D	C	SR5000	Dung dịch kích hoạt		Nước	Nước/Rắn
								NaOH	Na ₂ SiO ₃		
BT-G	514	51	309	154	1183	507	5,1	59	147	124	0,208

Trong đó: Thành phần "rắn" gồm hỗn hợp gồm: BN, TB, Xi và phần rắn của dung dịch kích hoạt (NaOH và Na₂SiO₃) được coi như là "xi măng" trong loại bê tông này.

Từ bảng cấp phối trên thu được các tỷ lệ về vật liệu sử dụng đã được thống kê như trong Bảng 5.

Bảng 5. Cấp phối của hỗn hợp bê tông nặng sử dụng chất kết dính Geopolymer

Ký hiệu	$\frac{CL}{HHBT}$	$\frac{DDKH}{VLK}$	Hàm lượng VLK	Thành phần "rắn"	Nước	Nước/Rắn	Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông
BT-G	0,70	0,40	514	596	124	0,208	2414

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

3.1. Tính chất của hỗn hợp bê tông

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 sụt của hỗn hợp bê tông nặng sử dụng bụi nhôm và chất kết dính Geopolymer, kết quả thu được đã thể hiện trong Bảng 6.

Bảng 6. Khối lượng thể tích và độ chảy xèo của hỗn hợp bê tông nặng sử dụng chất kết dính Geopolymer

Ký hiệu	Tỷ lệ vật liệu sử dụng		Tính chất của hỗn hợp bê tông nghiên cứu			
	$\frac{CL}{HHBT}$	$\frac{DDKH}{VLK}$	Khối lượng thể tích (kg/m ³)	Độ sụt trung bình của hỗn hợp bê tông (cm)		
				Sau khi trộn xong	Sau 15 phút	Sau 30 phút
BT-G	0,70	0,40	2410	14±2	13±2	10±1

Từ kết quả thực nghiệm trong Bảng 6 cho thấy, với tỷ lệ BN, Xi và TB lượt lượt bằng 10%, 30% và 60% hàm lượng VLK thì tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định, với độ sụt ngay sau khi nhào trộn của hỗn hợp bê tông là 14±2 cm. Hỗn hợp thu được có tính công tác tốt hơn bê tông xi măng truyền thống mặc dù với tỷ lệ Nước/Rắn = 0,203. 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.

Mặt khác, từ kết quả trên Bảng 6 cho thấy, sau 30 phút sau khi nhào trộn xong, tính công tác của hỗn hợp bê tông đã tổn thất khoảng từ 12÷15%, nhưng vẫn có độ chảy dẻo tốt. Tính công tác giảm sau 30 phút là một chỉ số quan trọng để đánh giá khả năng vận chuyển hỗn hợp bê tông đi xa và thi công hỗn hợp bê tông Geopolymer trong điều kiện khó khăn, mặt bằng chật hẹp.

Bên cạnh đó, khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông Geopolymer được xác định theo phương pháp tiêu chuẩn trong thùng đong có thể tích 5 lít. Giá trị khối lượng thể tích trung bình của các cấp phối bê tông

Bảng 1. Tính chất cơ lý của mẫu bê tông nặng dùng chất kết dính Geopolymer sau khi rắn chắc ở tuổi 28 ngày

Ký hiệu	$\frac{CL}{HHBT}$	$\frac{DDKH}{VLK}$	Khối lượng thể tích (kg/m ³)	Mô đun đàn hồi khi nén tĩnh (GPa)	Cường độ chịu kéo khi uốn trung bình (MPa)
BT-G	0,70	0,40	2350	31,13	5,45

Bảng 2. Cường độ nén của mẫu bê tông nặng dùng chất kết dính Geopolymer theo thời gian

Ký hiệu	$\frac{CL}{HHBT}$	$\frac{DDKH}{VLK}$	Cường độ nén (MPa) tại tuổi:					
			1 ngày	3 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày	56 ngày
BT-G	0,70	0,40	8,8	17,5	32,3	42,7	49,08	53,5

Từ số liệu trong Bảng 8 cho thấy, giá trị cường độ nén trung bình và cường độ chịu kéo khi uốn của mẫu bê tông thu được lần lượt là 49,08 MPa và 5,45 MPa tại tuổi 28 ngày, đạt mục tiêu thiết kế về cường độ nén.

Hơn nữa, tỷ số cường độ kéo khi uốn và cường độ nén của các mẫu thí nghiệm dao động khoảng 1/11÷1/9. Tỷ số này tương đồng so với bê tông xi măng truyền thống [21]. 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.

Mặt khác, 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 2,35 tấn/m³. Từ giá trị khối lượng thể tích này có thể khẳng định loại bê tông nặng dùng chất kết dính Geopolymer được xếp vào loại đá nhân tạo tương đối nặng. Tuy nhiên, giá trị này đã giảm được khoảng 5÷10% so với khối lượng thể tích của bê tông truyền thống được quy định trong TCVN 2737:2020.

Hiệu quả của sự kết hợp tro bay nhiệt điện và xỉ lò cao trong thành phần cấp phối bê tông nặng dùng chất kết dính Geopolymer được thể hiện bằng các hiệu ứng như sau:

(i) - BN, TB và Xi đóng vai trò chính là vật liệu khoáng, 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-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (C-A-S-H) và Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (N-A-S-H), liên kết các thành phần hạt cốt liệu rời rạc lại với nhau [5, 11, 12].

(ii) - Xỉ luyện kim có chứa một phần các khoáng vật ở dạng canxi-silicat (CaO.xSiO₂) có khả năng phản ứng thủy hoá với nước ngay trong điều kiện thường. Đặc tính này được gọi là hiệu ứng thủy lực của xỉ luyện kim trong quá trình nhào trộn với nước. Với hiệu ứng thủy lực, xỉ luyện

này vào khoảng 2,41 tấn/m³, giá trị này nhỏ hơn so với khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông xi măng truyền thống. Điều này được giải thích là do trong thành phần tro bay và xỉ có khối lượng riêng đều nhỏ hơn khối lượng riêng của xi măng.



Hình 3. Các mẫu thử kiểm tra cường độ của các cấp phối GPC nghiên cứu

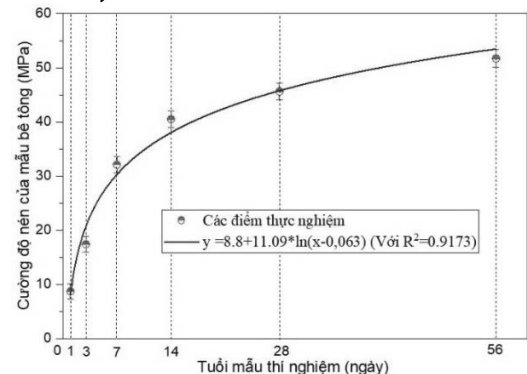
3.2. Tính chất cơ lý của bê tông nặng

Kết quả thực nghiệm tính chất cơ lý của bê tông nặng ở trạng thái rắn được trình bày trên Bảng 7 và Bảng 8.

kim đã tạo thành khoáng hidro-silicat- canxi (xCaO.ySiO₂.zH₂O – C-S-H) vừa tăng tốc độ rắn chắc của hỗn hợp bê tông ở nhiệt độ thường vừa tăng cường độ cho mẫu thí nghiệm [8, 9, 14, 15].

Trong phạm vi nghiêm cứu và từ Bảng 8 đã chỉ ra, cường độ nén trung bình của mẫu thí nghiệm ở tuổi 1, 3, 7, 14 và 56 ngày lần lượt đạt khoảng 18%, 36%, 66%, 87% và 109% so với cường độ ở tuổi 28 ngày. Các giá trị cường độ ở tuổi sớm này có sự giảm thấp hơn so với cường độ của bê tông xi măng Portland. Nhiều nghiên cứu trước đây với bê tông xi măng cường độ cao thì ở tuổi 14 ngày có thể đạt trên 90% cường độ ở tuổi 28 ngày [21]. Điều này có thể thấy rằng, quá trình geopolymer hóa của bê tông nặng sử dụng bụi nhôm và chất kết dính Geopolymer đã xảy ra chậm hơn so với quá trình thủy hóa của xi măng Portland với nước.

Quan hệ giữa cường độ nén trung bình của các mẫu bê tông nặng thí nghiệm phụ thuộc theo thời gian bảo dưỡng đã được xác định và trình bày trên Hình 4.



Hình 4. Tốc độ phát triển cường độ của mẫu bê tông theo thời gian

Từ hình 4 cho thấy tốc độ phát triển cường độ kháng nén của mẫu bê tông nặng dùng bụi nhôm và chất kết dính Geopolymer khá giống với các loại bê tông xi măng Portland truyền thống. Quan hệ giữa cường độ nén của các mẫu bê tông với tuổi mẫu thí nghiệm tuân theo quy luật hàm số Logarit số (4), cụ thể là:

$$y = 8,8 + 11,09 \cdot \ln(x - 0,063) \text{ với } R^2 = 0,9173. \quad (4)$$

Trong đó:

y - Cường độ nén trung bình của mẫu bê tông nặng thí nghiệm (MPa).

x - Tuổi mẫu bê tông thí nghiệm (ngày) (giá trị của x = 1, 3, 7, 14, 28 và 56 ngày).



Hình 5. Bê mặt mẫu bê tông thí nghiệm bị phá hoại khi nén

Ngoài ra, trong quá trình bảo dưỡng mẫu trong môi trường không khí ở nhiệt độ phòng, các mẫu thí nghiệm có hiện tượng bị rêu mốc, "mọc lông"... trên bề mặt. Hiện tượng này do nguyên nhân là dung dịch kích hoạt còn dư thừa, tồn đọng trong các lỗ rỗng hở và trên bề mặt của mẫu thí nghiệm. Trong môi trường ẩm và chứa khí Cacbonic, NaOH tác dụng với khí CO₂ có sẵn trong không khí để tạo thành các muối - sản phẩm làm rêu mốc, "mọc lông"... trên bề mặt của mẫu thí nghiệm. Tuy nhiên, khi các mẫu bê tông thí nghiệm khô bề mặt, hiện tượng rêu mốc trên bề mặt mẫu đã giảm đáng kể.

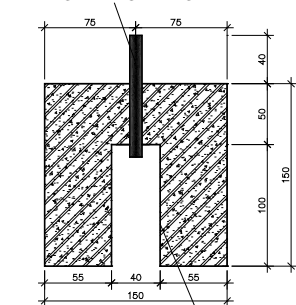
3.3. Lực dính bám giữa bê tông và cốt thép

Lực dính là nhân tố quan trọng bảo đảm sự làm việc chung giữa cốt thép và bê tông, đảm bảo cho cốt thép và bê tông cùng biến dạng cũng như sự đồng nhất trong quá trình chịu lực, truyền lực giữa hai thành phần vật liệu này [22]. Các nhân tố ảnh hưởng đến lực dính giữa bê tông và cốt thép gồm có:

- Đặc tính bề mặt của thanh thép (tròn trơn hay thép có gờ);
- Chất lượng của bê tông (cường độ, độ đặc, độ đồng nhất của bê tông);
- Sự co ngót của bê tông trong quá trình đông kết và rắn chắc, làm cho bê tông ôm chặt cốt thép.

Mô hình xác định lực dính giữa bê tông và cốt thép được trình bày trên hình số 6 và hình số 7.

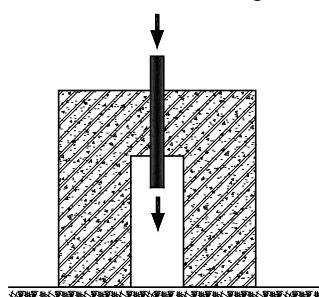
Thanh thép đường kính $\Phi = 10 \text{ mm}$ với đoạn ngầm trong bê tông dài 50 mm



Ông nhựa PVC có đường kính $\Phi = 37 \text{ mm}$

Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm xác định lực dính giữa bê tông nặng và cốt thép

F - Lực nén đẩy thanh thép ra khỏi mẫu bê tông



Hình 7. Quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm xác định lực dính giữa bê tông và cốt thép. Theo nhiều nghiên cứu [22, 23] cho thấy, cường độ lực dính (MPa) giữa bê tông và cốt thép được xác định theo công thức số (5):

$$\tau_{tb} = \frac{N}{\pi \times d \times l} \quad (5)$$

Trong đó:

N- lực kéo (nén) tuột cốt thép ra khỏi mẫu bê tông (N);

d - đường kính danh nghĩa của thanh cốt thép chôn trong mẫu bê tông, d = 10 mm;

l - chiều dài thanh cốt thép chôn trong mẫu bê tông, l = 50 mm;

Kết quả tính cường độ bám dính giữa bê tông thí nghiệm với cốt thép ở tuổi 28 ngày được trình bày trong Bảng 9.

Bảng 9. Kết quả thí nghiệm xác định cường độ bám dính giữa bê tông nặng với cốt thép

Mẫu thí nghiệm	Lực đẩy N (kN)	Cường độ lực dính (MPa)	Cường độ lực dính trung bình (MPa)	Độ lệch chuẩn
BT-G-01	23,67	15,07	15,66	0,40
BT-G-02	24,47	15,58		
BT-G-03	25,37	16,15		
BT-G-04	24,93	15,87		
BT-G-05	25,04	15,94		
BT-G-06	24,13	15,36		

So sánh kết quả cường độ bám dính của bê tông nặng sử dụng bụi nhôm và chất kết dính Geopolymer với cốt thép, có thể loại bê tông này có giá trị cường độ bám dính tương đối lớn với cốt thép. Giá trị này tương đương như kết quả của nhiều công bố trước đây về bê tông nặng sử dụng bụi nhôm và chất kết dính Geopolymer ở Việt Nam và trên thế giới [16, 22].

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đưa ra một số kết quả thực nghiệm khi sử dụng bụi nhôm phế thải trong chế tạo bê tông nặng sử dụng chất kết dính Geopolymer.

- Trên cơ sở nguồn vật liệu, thải phẩm hiện có trong nước như: bụi nhôm phế thải, tro bay nhiệt điện Mông Dương 2, xỉ lò cao Hòa

Phát; đá dăm $D_{max}=20$ mm, cát vàng sông Lô kết hợp với dung dịch kích hoạt (NaOH 12M và Na_2SiO_3 với mô-đun silic 2,75) và phụ gia siêu dẻo SR 5000F «SilkRoad» có thể chế tạo được bê tông nặng có độ sụt trung bình khoảng 14 cm, cường độ nén và cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày lần lượt là 49,02 MPa và 5,45 MPa. Cường độ lực dính giữa bê tông nặng và cốt thép trung bình khoảng 15,66 MPa, phù hợp để sử dụng trong xây dựng các công trình ở Việt Nam.

- Từ kết quả thực nghiệm cho thấy, khối lượng thể tích trung bình của hỗn hợp bê tông là 2,41 tấn/m³ và khối lượng thể tích mẫu bê tông sau khi rắn chắc 28 ngày khoảng 2,35 tấn/m³. Giá trị mô đun đàn hồi khi nén tĩnh ở tuổi 28 ngày đạt 31,13 GPa.

- Quá trình Geopolymer hóa của bê tông sử dụng chất kết dính không xi măng đã xảy ra tương tự như quá trình thủy hóa của xi măng Portland với nước. Do đó, cường độ nén trung bình của mẫu thí nghiệm ở tuổi 1, 3, 7, 14 và 56 ngày lần lượt đạt khoảng 18%, 36%, 66%, 87% và 109% với cường độ ở tuổi 28 ngày.

- Kết quả thực nghiệm cho thấy quan hệ giữa cường độ kháng nén của các mẫu bê tông nặng thí nghiệm với thời gian tuân theo quy luật hàm số Logarit. Quy luật này giống với quy luật phát triển cường độ trong bê tông xi măng Portland hiện nay.

Nghiên cứu này có ý nghĩa khoa học và thực tiễn. Một mặt góp phần làm giảm đáng kể những tác động tiêu cực do quá trình sản xuất và sử dụng xi măng Poóc lăng gây ra như: ô nhiễm môi trường; cạn kiệt nguồn tài nguyên thiên nhiên; gây ra khói bụi, khí độc và hiệu ứng nhà kính...; mặt khác góp phần xử lý và tái chế một cách triệt để hơn các nguồn phế thải rắn (bụi nhôm phế thải, xỉ luyện kim, tro bay nhiệt điện...) từ các hoạt động công nghiệp làm giảm giá thành sản phẩm, không gây ô nhiễm thứ cấp và mang lại những hiệu quả tích cực về mặt kinh tế - xã hội.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Tăng Văn Lâm, Nguyễn Văn Mạnh, Bulgakov Boris Igorevich. Ảnh hưởng bột gốm sứ TOTO đến các tính chất của bê tông cường độ cao hạt mịn sử dụng cát nghiền từ đá vôi. Tạp chí Vật liệu và xây dựng - Bộ Xây dựng, 13(06), Trang 48 - Trang 55. <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2023.559>

[2]. Тан Ван Лам, Фам Дык Луонг, Во Динь Тронг, Б.И. Булгаков. Исследование возможности использования многотоннажных отходов для изготовления пенобетона во Вьетнаме. Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. 01/2024

[3]. <https://vov.vn/kinh-te/lang-ung-thu-tai-che-nhom-o-bac-ninh-danh-doi-suc-khoe-lay-kinh-te-post1046793.vov>

[4]. Nhà máy điện rác Ngôi sao xanh (2023). Báo cáo sản xuất của Nhà máy điện rác Ngôi sao xanh-GCEP (Bắc Ninh), đơn vị vận hành Nhà máy điện rác Ngôi sao xanh (Greenstar) năm 2023.

[5]. Nguyễn Thanh Bằng, Đinh Hoàng Quân, Nguyễn Tiến Trung. “Nghiên cứu sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện và xỉ lò cao để chế tạo bê tông chất kết dính kiểm 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.

[6]. Tăng Văn Lâm, Vũ Kim Điển, Bulgakov Boris Igorevich. “Nghiên cứu sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện với xỉ 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

[7]. Rangan B.V. *Low-calcium, fly-ash-based geopolymer concrete*. Concrete construction engineering handbook, Chapter 26, Taylor & Francis, 2008.

[8]. 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).

[9]. Sarker. P. “A constitutive model for fly ash based Geopolymer concrete”. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2008.

[10]. 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.

[11]. Davidovits. J. “Properties of Geopolymer Cement”. *Proceedings first International*

conference on Alkaline cements and concretes. 1994.

[12]. 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*.

[13]. Tăng Văn Lâm, Nguyễn Đình Trinh. “Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và xỉ 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.

[14]. 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 sỹ kỹ thuật năm 2017, 149 trang.

[15]. Nguyễn Thanh Bằng, Nguyễn Tiến Trung, Đinh Hoàng Quân. “Ảnh hưởng của độ mịn xỉ lò cao đến cường độ bê tông chất kết dính kiểm hoạt hóa”. *Tạp chí KH&CN Thủy lợi*, Số 61, 2020, trang 16-23.

[16]. 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.

[17]. Баженов Ю.М., Магдеев У.Х., Алимов Л.А., Воронин В.В., Гольденберг Л.Б. *Мелкозернистый бетон*. М.: Изд. АСВ., 1998, 148 с.

[18]. Баженов Ю.М. *Технология бетона*. М.: Изд. АСВ., 2011, 528 с.

[19]. Tăng Văn Lâm. Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao hạt mịn không xi măng sử dụng hỗn hợp tro bay nhiệt điện và xỉ lò cao hoạt tính. Hội nghị Khoa học Cán bộ trẻ lần thứ XVI. NXB Xây dựng. 01/2022.

[20]. Tống Tôn Kiên và nnk (2013), ‘Bê tông geopolymer - 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. NXB Xây dựng, ISBN 978-604-82-0064-0.

[21]. Nguyễn Như Quý, Mai Quế Anh, (2020). Lý thuyết bê tông, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2020, 210 Tr.

[22]. Nguyễn Lê Thị, Nguyễn Hoàng Bảo Linh. Sự phát triển cường độ bám dính của cốt thép với bê tông trong môi trường tự nhiên ven biển đồng bằng sông cửu long. Tạp chí KHCN Xây dựng - số 3/2020. 48-56.

[23]. Tiêu chuẩn ngành. 22 TCN 60-84. Quy trình thí nghiệm bê tông xi măng Lực dính giữa bê tông và cốt thép.