

Nghiên cứu thành phần cấp phối bê tông sử dụng phụ gia khoáng và chất ức chế tăng nhiệt độ cho kết cấu bê tông khối lớn của công trình giao thông

Lê Văn Hưng¹, Nguyễn Trọng Chức^{1,*} Hoàng Quốc Long¹, Lê Hồng Hà²

¹Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Bê tông
Tro bay
Xi lò cao
Chất ức chế tăng nhiệt độ
Bê tông khối lớn
Nứt nhiệt

TÓM TẮT

Trong kết cấu bê tông khối lớn, bên cạnh vấn đề về kiểm soát nhiệt độ để tránh vết nứt nhiệt thì việc đảm bảo cường độ thiết kế là hết sức quan trọng. Cùng với sự tiến bộ của ngành xây dựng, công nghệ phụ gia cho bê tông cũng ngày càng phát triển để cải thiện tính chất của bê tông theo mục đích sử dụng khác nhau. Trong phạm vi bài báo, tác giả tiến hành đánh giá ảnh hưởng của hỗn hợp phụ gia gồm tro bay, xi lò cao nghiền mịn và chất ức chế tăng nhiệt độ tới sự phát triển cường độ của bê tông sử dụng trong công trình giao thông. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm đã được sử dụng với hàm lượng phụ gia tro bay thay đổi từ 15% đến 35%, xi lò cao thay đổi từ 15% đến 40% và chất ức chế tăng nhiệt độ thay đổi từ 0,3% đến 1%. Kết quả thu được là các phương trình hồi quy toán học với hàm mục tiêu là cường độ chịu nén ở tuổi 3 ngày (Rn3), 7 ngày (Rn7) và 28 ngày (Rn28) chịu ảnh hưởng bởi các biến độc lập là hàm lượng tro bay, xi lò cao và chất ức chế tăng nhiệt độ. Từ đó, có thể xác định được cấp phối bê tông hợp lý khi thi công kết cấu bê tông khối lớn trong công trình giao thông.

KEYWORDS

Concrete
Fly ash
Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS)
Temperature rise inhibitor
Mass concrete
Thermal cracking

ABSTRACT

In mass concrete structures, in addition to temperature control to prevent thermal cracking, ensuring the design strength is of paramount importance. Along with the advancement of the construction industry, concrete admixture technology has continuously evolved to improve the properties of concrete for various applications. Within the scope of this study, the authors evaluate the effects of a blended admixture consisting of fly ash, ground granulated blast-furnace slag (GGBFS), and a temperature rising inhibitors (TRI) on the strength development of concrete used in transportation structures. The experimental design method was employed, with fly ash content varying from 15% to 35%, GGBFS from 15% to 40%, and TRI from 0.3% to 1%. The results produced mathematical regression equations, in which the objective functions were the compressive strengths at 3 days (Rn3), 7 days (Rn7), and 28 days (Rn28), determined by the independent variables of fly ash, GGBFS, and inhibitor content. Based on these findings, an appropriate concrete mix proportion can be established for the construction of mass concrete structures in traffic works.

1. Giới thiệu

Bê tông khối lớn (BTKL) ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng, đặc biệt các công trình có kích thước lớn như mố, trụ cầu, tường dày và đập [1]. Trong xây dựng công trình giao thông khối lượng bê tông được sử dụng rất lớn, từ hàng chục đến hàng nghìn mét khối. Để có được kết cấu không chỉ đảm bảo cường độ mà còn đáp ứng tuổi thọ lâu dài thì kết cấu BTKL phải được thiết kế, trộn, đổ và bảo dưỡng đúng quy trình [2]. Thời gian bảo dưỡng của mọi kết cấu BTKL cần phải được thực hiện liên tục không dưới 7 ngày (bảo dưỡng điều kiện tự nhiên) và đảm bảo đạt được cường độ bảo dưỡng tới hạn [3]. Bên cạnh đó, quá trình thi công cũng cần phải đảm bảo kết cấu không bị nứt do hiệu ứng nhiệt thủy

hóa của xi măng gây ra [4]. Chính vì vậy, sử dụng phụ gia khoáng trong đó có tro bay (TB) và xi lò cao (XLC) để thay thế một phần xi măng trong kết cấu BTKL của công trình giao thông là rất cần thiết.

Khi thay thế một phần xi măng bằng TB sẽ giúp cải thiện khả năng làm việc, giảm giá thành, giảm nhiệt thủy hóa của bê tông nên tốt cho kết cấu bê tông khối lớn. Tuy nhiên tốc độ phát triển cường độ ban đầu của bê tông thường diễn ra chậm [5-7]. Theo chỉ dẫn kỹ thuật “Sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn làm phụ gia khoáng cho sản xuất bê tông” thì khả năng duy trì tính công tác của hỗn hợp bê tông có XLC tốt hơn bê tông xi măng thông thường, quá trình phát triển cường độ mặc dù diễn ra chậm ở tuổi sớm, nhưng đạt hoặc vượt cường độ bê tông xi măng thông thường sau tuổi 28 ngày [8]. Hiện nay, hỗn hợp vật liệu chất kết dính ba hoặc bốn thành phần thường

*Liên hệ tác giả: trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn

Nhận ngày 25/08/2025, sửa xong ngày 27/09/2025, chấp nhận đăng ngày 29/09/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2025.1144>

được thiết kế để bù đắp những thiếu sót về tính chất của xi măng Portland hoặc hỗn hợp xi măng hai thành phần, nhằm tạo ra bê tông có tính chất cơ lý theo yêu cầu của công trình xây dựng [9]. Trong đó, sự kết hợp giữa xi măng với TB và XLC đang được sử dụng phổ biến và có xu hướng ngày càng gia tăng [10]. Bên cạnh phụ gia khoáng, TRI cũng được sử dụng ngày càng phổ biến trong các kết cấu BTKL. TRI có tác dụng làm cho quá trình nhiệt thủy hóa của xi măng bị chậm lại, làm giảm tốc độ giải phóng nhiệt, giúp cho kết cấu giảm nguy cơ nứt nhiệt [11]. Tuy nhiên, vẫn còn ít nghiên cứu xem xét, đánh giá ảnh hưởng của hỗn hợp gồm TB, XLC và TRI tới sự phát triển cường độ của bê tông.

Chính vì vậy, để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố nói trên tới sự phát triển cường độ của bê tông sử dụng cho kết cấu BTKL trong công trình giao thông. Trong nghiên cứu này, bài báo sẽ tiến hành thiết kế thành phần cấp phối bê tông, sau đó quy hoạch thực nghiệm với hàm mục tiêu là cường độ chịu nén của bê tông ở các độ tuổi 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày. Các biến độc lập là hàm lượng TB, XLC và TRI. Từ đó, phân tích, nhận xét và đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố tới cường độ của hỗn hợp bê tông.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

2.1.1. Xi măng (XM)

Theo tiêu chuẩn TCVN 9035:2011 với kết cấu BTKL trong các công trình xây dựng thông thường loại xi măng sử dụng là xi măng poóc lăng ít tỏa nhiệt hoặc xi măng poóc lăng hỗn hợp ít tỏa nhiệt [12]. Bên cạnh đó, theo TCVN 7712:2013 [13] và TCVN 6260:2009 [14] thì xi măng poóc lăng hỗn hợp ít tỏa nhiệt có thể được tạo ra bằng cách trộn đều các phụ gia khoáng đã nghiền mịn với xi măng poóc lăng. Do đó, nghiên cứu chọn xi măng poóc lăng PC40 để thiết kế thành phần cấp phối bê tông. Xi măng sử dụng là xi măng poóc lăng PC40 Bút Sơn, có khối lượng riêng 3,15 (g/cm³), tỷ diện bề mặt riêng 0,364 (m²/g), thành phần hóa học như Bảng 1.

2.1.2. Tro bay (TB)

Nghiên cứu sử dụng tro bay Phả Lại loại F đáp ứng theo yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 10302:2014 [15]. Tro bay có khối lượng riêng 2,35 (g/cm³), tỷ diện bề mặt riêng 0,58 (m²/g), khối lượng thể tích khô ở trạng thái nền chặt 1480 (kg/m³) và thành phần hóa học của tro bay được thể hiện trong Bảng 1.

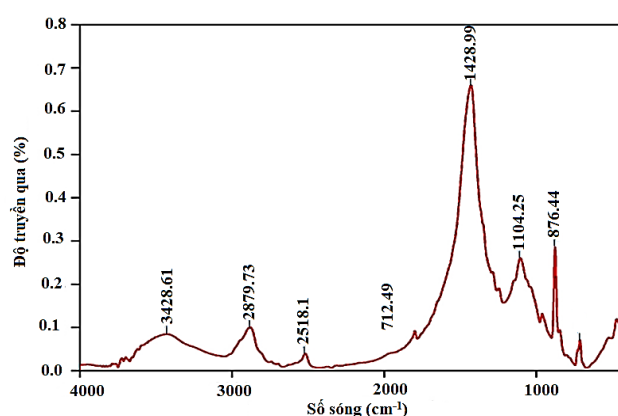
2.1.3. Xi lò cao nghiền mịn (XLC)

Xi hạt lò cao nghiền mịn S95 Hòa Phát được sử dụng trong nghiên cứu. nó đáp ứng các yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 11586:2016 [16]. Xi lò cao nghiền mịn S95 có khối lượng riêng 2,92 (g/cm³), tỷ diện bề mặt riêng 0,37 (m²/g), khối lượng thể tích khô ở trạng thái

nền chặt 1450 (kg/m³) và thành phần hóa học của xi hạt lò cao được thể hiện trong Bảng 1.

2.1.4. Chất ức chế nhiệt thủy hóa (TRI)

TRI được sử dụng trong nghiên cứu này là hỗn hợp polyme hữu cơ dextrin do Công ty TNHH Vật liệu xây dựng Guangzhou Huakeli sản xuất. TRI có nhiều cấu trúc đại phân tử liên kết chéo cyclodextrin hình thành trong phản ứng β -cyclodextrin. Hình 1 cho thấy phổ hồng ngoại biến đổi Fourier của TRI, theo đó chất này chủ yếu bao gồm dextrin, một polysaccharide (một loại tinh bột) làm từ các phân tử glucose, với các nhóm hydroxyl (-OH), các nhóm methylene (-CH₂), liên kết glycosidic (C-O-C) và các liên kết carbon-hydro (C-H) [17].

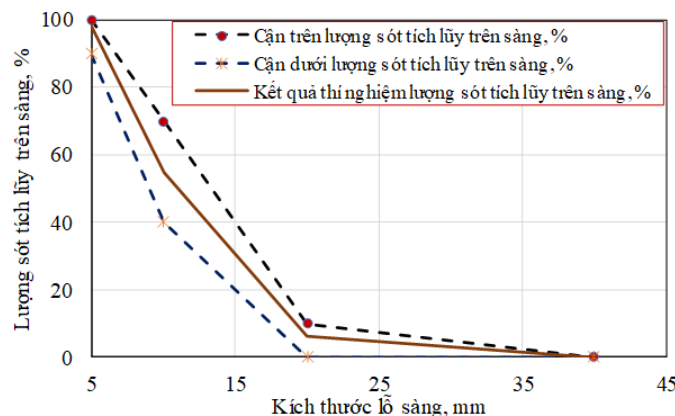


Hình 1. Phổ FTIR của TRI [17].

2.1.5. Phụ gia siêu dẻo (SD)

Phụ gia siêu dẻo được sử dụng là MasterGlenium SKY 8613. Lượng dùng khuyến nghị là 0,5 lít đến 2,0 lít với 100 kg chất kết dính. Liều lượng điển hình là 1,0 lít đến 1,8 lít với 100 kg chất kết dính.

2.1.6. Cốt liệu lớn (đá dăm)

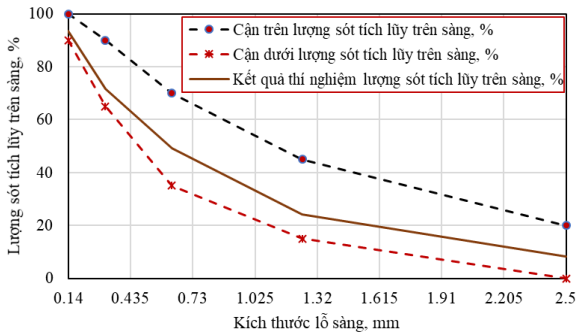


Hình 2. Biểu đồ cấp phối hạt của đá theo TCVN 7570-2006.

Đá dăm tại mỏ đá Phú Lý, Hà Nam được sử dụng để làm thí nghiệm. Nghiên cứu chọn đá có $D_{max}=20$ mm để thiết kế thành phần cấp phối bê tông. Chỉ tiêu cơ lý được thể hiện trong Bảng 2, thành phần hạt của đá được thể hiện như đồ thị tại Hình 2.

g. Cốt liệu nhỏ (cát)

Các thí nghiệm sử dụng cốt liệu nhỏ là cát vàng hạt thô. Các chỉ tiêu cơ lý được trình bày trong Bảng 2, thành phần hạt của cát được thể hiện như đồ thị tại Hình 3.



Hình 3. Biểu đồ cấp phối hạt của cát theo TCVN 7570-2006.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp quy hoạch thực nghiệm thực hiện theo kế hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay [18].

2.2.1. Biến số

Nghiên cứu khảo sát các hàm mục tiêu với các biến số là hàm lượng TRI và hàm lượng TB, XLC thay thế một phần xi măng. Mức trên, mức dưới của TB, XLC, TRI được bài báo tiến hành khảo sát lần lượt là: 35 % và 15 %, 40 % và 15 %, 1 % và 0,3 % chất kết dính. Các điểm sao, mức trên, mức dưới và khoảng biến thiên của các biến số được tính toán và được trình bày trong Bảng 3.

Khi biết được biến mã hóa có thể xác định được hàm lượng phụ gia theo công thức (1):

$$Z = Z_0 + \delta \cdot X_i \quad (1)$$

Trong đó: Z – là hàm lượng phụ gia sử dụng; Z_0 – là hàm lượng phụ gia tại điểm tâm; δ – là khoảng biến thiên; X_i – là biến mã hóa ứng với phụ gia Z .

2.2.2. Số hàm mục tiêu

Cường độ nén: 3 ngày (Y_{n3}), 7 ngày (Y_{n7}), 28 ngày (Y_{n28}).

Theo kế hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay các hàm mục tiêu có dạng:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 \quad (2)$$

Trong đó: Y – là giá trị hàm mục tiêu; X_i – là các biến số; a_j, a_{jj}, a_{jjj} – là các hệ số của phương trình.

2.2.3. Kế hoạch thí nghiệm

- Số thí nghiệm của kế hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay là:

$$N = 2^k + 2 \times k + n = 2^3 + 2 \times 3 + 6 = 20 \quad (3)$$

Trong đó: N – là số thí nghiệm; k – là số biến số; n – là số thí nghiệm tại tâm.

Các thí nghiệm được thực hiện theo kế hoạch như ở Bảng 4.

2.2.4. Tiêu chuẩn thí nghiệm

Cường độ chịu nén được thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN 3118:2022 [19], thực hiện trên mẫu hình lập phương 15 cm x 15 cm x 15 cm.

2.3. Thiết kế cấp phối bê tông

Các loại phụ gia sử dụng trong nghiên cứu là TB, XLC, TRI và phụ gia siêu dẻo. Trong đó, phụ gia siêu dẻo được giữ cố định là 1 %, các cấp phối được thiết kế với tổng hàm lượng chất kết dính không thay đổi và tỷ lệ nước với chất kết dính được giữ cố định. Các phụ gia thay đổi hàm lượng gồm: TB, XLC và TRI.

Căn cứ vào cường độ chịu nén của bê tông sử dụng trong kết cấu BTKL trong các công trình giao thông được liệt kê trong nghiên cứu [20, 21] và theo TCVN 9346:2012 [22] thông thường cường độ nén của bê tông không vượt quá 50 MPa. Vì vậy, nghiên cứu tiến hành thiết kế thành phần cấp phối bê tông đạt cường độ chịu nén yêu cầu là 50MPa với cấp phối cơ sở (CPO) chỉ sử dụng xi măng, không có phụ gia khoáng và TRI. Từ cấp phối này, sẽ tính toán xác định thành phần các cấp phối khi thay thế một phần xi măng bằng hỗn hợp TB, XLC và có sử dụng TRI. Từ cường độ nén yêu cầu tính toán được cường độ nén thiết kế trong phòng thí nghiệm cần đạt là 60MPa [23].

Tiêu chuẩn ACI 211.1-91 về “Lựa chọn thành phần cấp phối bê tông thông thường, bê tông nặng, bê tông khối lớn” của Mỹ được sử dụng để thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông [23]. Cường độ chịu nén thiết kế trong phòng thí nghiệm là 60 MPa được quy đổi từ mẫu lập phương sang mẫu hình trụ để làm căn cứ thiết kế theo ACI 211.1-91. Kết quả tính toán thành phần của cấp phối CPO và các cấp phối theo kế hoạch thực nghiệm ở Bảng 4 được thể hiện như Bảng 5.

3. Kết quả và thảo luận

Quá trình chuẩn bị vật liệu, đúc mẫu, bảo dưỡng, nén và ép mẫu được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm và Nghiên cứu Vật liệu Xây dựng, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Mỗi cấp phối bê tông được đúc gồm 3 tổ mẫu, mỗi tổ mẫu đúc 3 viên mẫu. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén được thực hiện như Hình 4 và tổng hợp tại Bảng 6.

Độ tin cậy của các kết quả thí nghiệm được kiểm tra theo phép kiểm nghiệm Cochran, kết quả tính toán được tổng hợp trong Bảng 7 [24].

Như vậy kết quả thí nghiệm đảm bảo độ tin cậy để tiến hành phân tích, đánh giá.

Sử dụng phần mềm Minitab để phân tích hồi quy kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén tuổi 3 ngày theo kế hoạch thí nghiệm bậc hai tâm xoay, sau khi loại bỏ các hệ số không có ý nghĩa, phương trình hồi quy thu được như phương trình (4), kết quả phân tích phương sai thể hiện tại Bảng 8.

$$Y_{n3} = 24,577 - 6,946X_1 - 8,495X_2 - 0,928X_3 - 1,208X_1^2 - 1,599X_2^2 + 1,665X_1X_2 \quad (4)$$

Các hệ số hệ số quyết định (R-sq), hệ số điều chỉnh R-sq(adj), hệ số dự đoán R-sq(pred) đều lớn hơn 90 % và mức độ không phù hợp của mô hình (Lack-of-Fit) có giá trị xác suất (P) lớn hơn nhiều mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$ cho thấy dạng mô hình là phù hợp và rất khớp với kết quả thí nghiệm. Các hệ số đều có giá trị xác suất (P) nhỏ hơn rất nhiều so với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$ nên các hệ số của mô hình đều có ý nghĩa thống kê. Như vậy phương trình hồi quy (4) thể hiện đúng ảnh hưởng của các yếu tố đang xét đến cường độ chịu nén tuổi 3 ngày của hỗn hợp bê tông.

Sử dụng phần mềm Minitab phân tích tương tự với kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén tuổi 7 ngày và 28 ngày, thu được các phương trình hồi quy như sau:

+ Cường độ nén ở tuổi 7 ngày:

$$Y_{n7} = 42,836 - 7,922X_1 - 4,822X_2 - 1,118X_3 - 1,961X_1^2 - 1,358X_2^2 - 1,257X_3^2 \quad (5)$$

+ Cường độ nén ở tuổi 28 ngày:

$$Y_{n28} = 57,17 - 6,273X_1 - 3,71X_2 + 1,929X_3 - 1,858X_1^2 - 1,189X_2^2 + 1,464X_3^2 - 3,215X_1X_2 \quad (6)$$

Ảnh hưởng độc lập của từng yếu tố và của tương tác giữa các cặp yếu tố tới cường độ chịu nén của bê tông được thể hiện tại hình 5 và hình 6. Theo phương trình (4), (5) và (6) cho thấy ở tuổi 7 ngày không có sự tương tác nào của các cặp yếu tố ảnh hưởng tới cường độ nén, còn ở tuổi 3 ngày và 28 ngày có sự tương tác giữa hai yếu tố X_1X_2 . Trong giai đoạn tuổi sớm 3 ngày và 7 ngày, tác động của các yếu tố tới cường độ bê tông đều có xu hướng nghịch biến. Khi tăng hàm lượng các yếu tố, cường độ có xu hướng giảm, nhưng sự ảnh hưởng của từng yếu tố có sự thay đổi và giảm dần theo thời gian. Ở tuổi 3 ngày yếu tố X_2 ảnh hưởng độc lập nhiều nhất tới xu hướng làm giảm cường độ của bê tông, sau đó tới X_1 và cuối cùng là X_3 . Tới tuổi 7 ngày thì X_1 là yếu tố ảnh hưởng nhiều nhất, sau đó lần lượt tới X_2 và X_3 . Cụ thể, theo Bảng 9 cho thấy khi X_1 thay đổi từ -1 đến +1 mức giảm cường độ nén từ 45,83 % ở tuổi 3 ngày xuống 32,47 % ở tuổi 7 ngày, yếu tố X_2 gây ra mức giảm cường độ nén nhanh nhất từ 53,98 % xuống 20,83 % và yếu tố X_3 là tương đối ổn định từ 7,28 % xuống 5,22 %. Theo thời gian, sự thay đổi hàm lượng các yếu tố gây ảnh hưởng tới cường độ giảm dần [25], kết quả của nghiên cứu cũng thể hiện rõ điều này và được thể hiện ở Bảng 9.

Ảnh hưởng độc lập và tương tác của các yếu tố tới cường độ ở tuổi 28 ngày được thể hiện ở hình 5.c và hình 6.b. Theo đó yếu tố ảnh hưởng độc lập lớn nhất tới cường độ bê tông là X_1 , rồi lần lượt tới X_2 và X_3 . Trong đó, X_1 và X_2 vẫn có xu hướng làm giảm cường độ bê tông khi tăng hàm lượng TB, XLC nhưng sự ảnh hưởng này đã giảm đáng kể so với tuổi 7 ngày và có xu hướng giảm dần khi tăng tuổi bê tông. Sự tương tác giữa hai yếu tố X_1 và X_2 cho thấy khi tuổi bê tông tăng lên thì yếu tố X_2 có tác động tích cực hơn so với yếu tố X_1 đối với sự phát triển cường độ của bê tông. Kết quả này cũng phù hợp với các nghiên cứu [26, 27] về đánh giá cường độ bê tông khi thay thế một phần xi măng bằng TB và XLC. Còn đối với X_3 tới tuổi 28 ngày nó còn có tác động làm tăng cường độ của bê tông khi tăng hàm lượng TRI. Điều này là do sau một thời gian TRI mất dần tác dụng ức chế quá trình thủy hóa, các phân tử glucose và các sản phẩm thủy phân của TRI có thể tham gia vào các phản ứng pozzolanic (giống như tro bay hay xi lò cao) tạo ra các hợp chất C-S-H mới, giúp lấp đầy các lỗ mao mạch trong bê tông, làm tăng cường độ của bê tông [17].

Từ Hình 6 cho thấy, nếu tìm cấp phối hợp lý theo một mục tiêu duy nhất về cường độ thiết kế thì sẽ không xác định được, vì đồ thị bề mặt không có điểm cực trị trong miền đang xét. Tuy nhiên, khi cường độ tăng lên thì thường yêu cầu hàm lượng xi măng tăng theo, trong khi mong muốn của BTKL là giảm lượng dùng xi măng. Tức là sự phát triển cường độ bê tông có xu hướng tỷ lệ thuận với hàm lượng xi măng sử dụng, trong khi thực tế thi công kết cấu BTKL lại mong muốn điều ngược lại. Do đó, khi không chế cường độ và yêu cầu về lượng xi măng thì hoàn toàn có thể xác định được cấp phối hợp lý sử dụng cho kết cấu BTKL trong công trình giao thông.

Trong kết cấu BTKL, vấn đề kiểm soát vết nứt nhiệt ở tuổi sớm là hết sức quan trọng. Khi ứng suất nhiệt vượt quá cường độ chịu kéo cho phép của bê tông vết nứt nhiệt sẽ xuất hiện. Do đó, để hạn chế vết nứt nhiệt nên thiết kế cấp phối bê tông với lượng xi măng sử dụng ít nhất nhưng vẫn đảm bảo cường độ thiết kế ở tuổi 28 ngày. Bên cạnh đó, cũng cần đảm bảo cường độ chịu nén ở tuổi 7 ngày đạt được trên 70 % cường độ thiết kế tại tuổi 28 ngày [3]. Chính vì vậy, bài báo xác định cấp phối hợp lý cần đạt được đồng thời 3 mục tiêu sau:

Mục tiêu một: Đạt được cường độ nén thiết kế ở tuổi 28 ngày trong phòng thí nghiệm là 60 MPa.

Mục tiêu hai: Hàm lượng xi măng sử dụng nhỏ nhất (Tổng hàm lượng TB và XLC ($X_1 + X_2$) thay thế xi măng lớn nhất).

Mục tiêu ba: Cường độ nén ở tuổi 7 ngày $R_{n7} \geq 60 \times 70 \% = 42$ (Mpa).

Sử dụng công cụ Solver trong Excel để xác định cấp phối hợp lý với ba mục tiêu đã nêu ở trên. Kết quả phân tích thu được cấp phối hợp lý đạt được khi $X_1 = -0,237$ (hàm lượng TB là 22,5 %), $X_2 = -0,15$ (hàm lượng XLC là 25,5 %) và $X_3 = 0,41$ (hàm lượng TRI là 0,8 %), với kết quả thể hiện tại Bảng 10.

Bảng 1. Thành phần hóa học của xi măng, tro bay và xỉ hạt lò cao nghiền mịn, %.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	Lượng mất khi nung
XM	20,4	4,4	5,4	3,4	1,2	0,3	2,5	60,2	-	2,2
TB	54,2	23,3	9,8	2,5	1,4	1,1	0,6	1,2	1,4	4,5
XLC	36,6	12,6	3,4	5,7	0,4	0,3	-	40,1	-	1,2

Bảng 2. Chỉ tiêu cơ lý của đá và cát.

STT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Tiêu chuẩn (TCVN)	Kết quả thí nghiệm của đá	Kết quả thí nghiệm của cát
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	7572:2006	2,72	2,62
2	Khối lượng thể tích khô	g/cm ³	7572:2006	2,605	2,472
3	Khối lượng thể tích bão hòa	g/cm ³	7572:2006	2,632	2,526
4	Khối lượng thể tích xốp	g/cm ³	7572:2006	1,482	1,470
5	Khối lượng thể tích lèn chặt hoàn toàn khô	g/cm ³	7572:2006	1,69	1,650
6	Độ hút nước	%	7572:2006	0,62	1,15

Bảng 3. Mức trên, mức dưới và khoảng biến thiên của các biến số.

Biến số thực	TB (%)	XLC (%)	TRI (%)
Biến mã hóa	X ₁	X ₂	X ₃
Điểm sao (+α = 1,682)	41,8	48,5	1,2
Mức trên (+1)	35	40	1,0
Tâm (0)	25	27,5	0,65
Mức dưới (-1)	15	15	0,3
Điểm sao (-α = -1,682)	8,2	6,5	0,06
Khoảng biến thiên (δ)	10	12,5	0,35

Bảng 4. Kế hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay.

TN	Biến mã hóa			Biến thực		
	X ₁	X ₂	X ₃	TB (%)	XLC (%)	TRI (%)
CP1	-1	-1	-1	15	15	0,3
CP2	1	-1	-1	35	15	0,3
CP3	-1	1	-1	15	40	0,3
CP4	1	1	-1	35	40	0,3
CP5	-1	-1	1	15	15	1
CP6	1	-1	1	35	15	1
CP7	-1	1	1	15	40	1
CP8	1	1	1	35	40	1
CP9	-1,682	0	0	8,18	27,5	0,65
CP10	1,682	0	0	41,82	27,5	0,65
CP11	0	-1,682	0	25	6,475	0,65
CP12	0	1,682	0	25	48,525	0,65
CP13	0	0	-1,682	25	27,5	0,061
CP14	0	0	1,682	25	27,5	1,239
CP15	0	0	0	25	27,5	0,65
CP16	0	0	0	25	27,5	0,65

TN	Biến mã hóa			Biến thực		
	X ₁	X ₂	X ₃	TB (%)	XLC (%)	TRI (%)
CP17	0	0	0	25	27,5	0,65
CP18	0	0	0	25	27,5	0,65
CP19	0	0	0	25	27,5	0,65
CP20	0	0	0	25	27,5	0,65

Bảng 5. Thành phần của các cấp phối bê tông.

Cấp phối	Thành phần của các cấp phối bê tông							
	XM, kg	TB, kg	XLC kg	Cát, kg	Đá, kg	Nước, kg	SD, kg	TRI, kg
CP0	470	0	0	772	1012	164	4,7	0
CP1	329	71	71	761	998	164	4,7	1,41
CP2	235	165	71	750	982	164	4,7	1,41
CP3	212	71	188	758	993	164	4,7	1,41
CP4	118	165	188	746	978	164	4,7	1,41
CP5	329	71	71	761	998	164	4,7	4,70
CP6	235	165	71	750	982	164	4,7	4,70
CP7	212	71	188	758	993	164	4,7	4,70
CP8	118	165	188	746	978	164	4,7	4,70
CP9	302	38	129	764	1001	164	4,7	3,06
CP10	144	197	129	744	975	164	4,7	3,06
CP11	322	118	30	757	992	164	4,7	3,06
CP12	124	118	228	751	984	164	4,7	3,06
CP13	223	118	129	754	988	164	4,7	0,29
CP14	223	118	129	754	988	164	4,7	5,82
CP15	223	118	129	754	988	164	4,7	3,06
CP16	223	118	129	754	988	164	4,7	3,06
CP17	223	118	129	754	988	164	4,7	3,06
CP18	223	118	129	754	988	164	4,7	3,06
CP19	223	118	129	754	988	164	4,7	3,06
CP20	223	118	129	754	988	164	4,7	3,06



a) Trộn vật liệu



b) Tháo mẫu ra khỏi khuôn



c) Nén mẫu bê tông

Hình 4. Quá trình đúc mẫu và thí nghiệm cường độ chịu nén của bê tông.

Bảng 6. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của các cấp phối bê tông tại Bảng 5.

Cấp phối	R_{n3}				R_{n7}				R_{n28}			
	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Trung bình	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Trung bình	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Trung bình
CP0	45,10	43,60	41,50	43,40	57,30	56,20	50,30	54,60	67,41	66,87	69,54	67,94
CP1	38,70	40,90	39,98	39,86	51,78	52,58	49,50	51,29	60,78	58,58	61,06	60,14
CP2	21,93	20,52	23,16	21,87	34,20	36,30	34,20	34,90	54,20	54,30	53,02	53,84
CP3	17,70	18,00	17,16	17,62	40,62	40,88	42,50	41,33	60,02	58,88	58,43	59,11
CP4	7,30	7,50	7,01	7,27	28,23	27,90	27,37	27,83	43,23	42,90	43,47	43,20
CP5	34,93	35,79	37,04	35,92	50,60	52,80	52,28	51,89	65,10	64,80	64,20	64,70
CP6	21,13	20,10	19,67	20,30	32,03	33,56	33,61	33,07	57,03	55,56	56,70	56,43
CP7	16,82	17,22	15,46	16,50	40,05	41,19	39,93	40,39	65,05	66,19	64,00	65,08
CP8	6,30	7,00	6,41	6,57	19,92	20,81	22,21	20,98	39,32	40,81	41,97	40,70
CP9	35,90	34,50	34,00	34,80	48,92	49,95	51,07	49,98	61,92	60,95	61,15	61,34
CP10	10,23	9,98	11,11	10,44	26,89	26,10	25,47	26,15	43,89	42,10	43,07	43,02
CP11	34,21	36,58	34,81	35,20	46,31	47,82	47,70	47,28	60,31	60,82	62,17	61,10
CP12	8,00	8,10	7,40	7,83	33,07	32,69	31,04	32,27	47,07	46,69	47,36	47,04
CP13	26,37	26,05	27,38	26,60	40,96	42,62	42,17	41,92	56,66	57,62	56,42	56,90
CP14	23,80	23,20	23,26	23,42	38,10	39,10	37,40	38,20	66,10	65,30	67,35	66,25
CP15	24,62	23,65	24,93	24,40	40,92	41,66	40,63	41,07	57,87	58,10	59,05	58,34
CP16	25,94	24,96	24,16	25,02	41,55	42,96	43,53	42,68	55,86	54,38	55,15	55,13
CP17	22,64	23,02	24,45	23,37	42,87	43,68	44,01	43,52	56,83	57,9	56,87	57,20
CP18	24,86	23,88	24,16	24,30	42,67	42,85	43,57	43,03	55,87	55,95	53,24	55,02
CP19	27,64	25,02	25,94	26,20	43,71	45,36	44,43	44,50	57,91	58,86	60,05	58,94
CP20	25,94	26,42	24,83	25,73	42,87	40,82	42,16	41,95	57,67	58,82	58,41	58,30

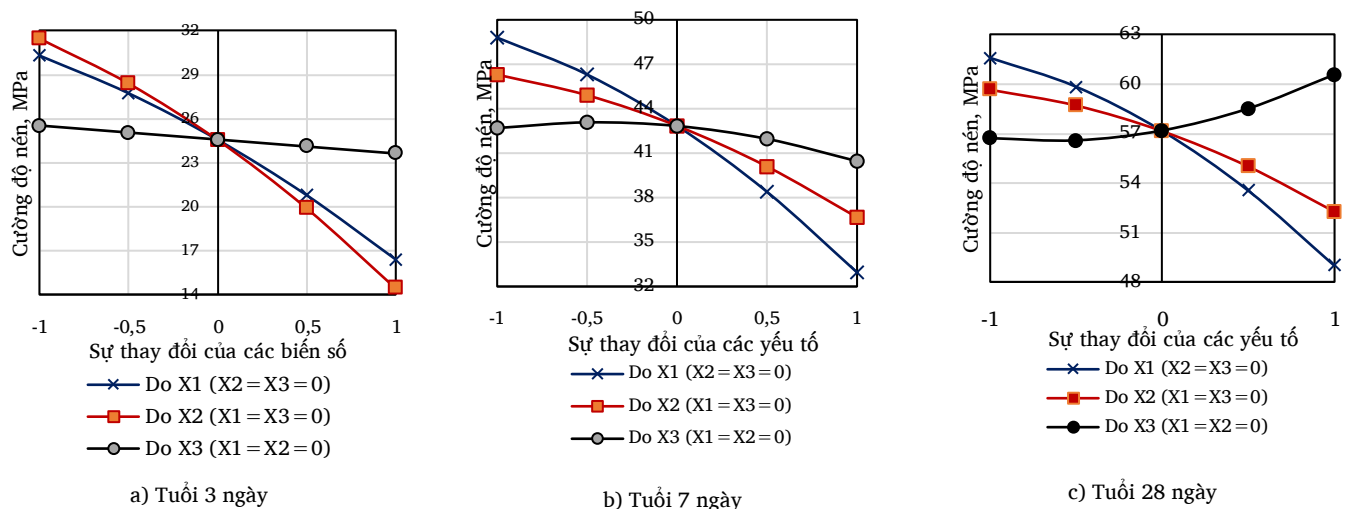
Bảng 7. Đánh giá độ tin cậy của kết quả thí nghiệm theo chuẩn Cochran.

Thông số	R_{n3}	R_{n7}	R_{n28}
Độ lệch chuẩn lớn nhất ($S^2_{\max}$)	3,534	5,105	4,756
Tổng phương sai lặp ($S^2_{\text{lặp}}$)	28,61	35,70	31,243
Chuẩn Cochran của thí nghiệm (G_{tn})	0,124	0,143	0,152
Bậc tự do lặp của thí nghiệm (f_1)	2	2	2
Bậc tự do của kế hoạch thí nghiệm (f_2)	20	20	20
Tra bảng chuẩn Cochran (G_b) theo f_1 và f_2	0,2705 [18]		
So sánh G_b với G_{tn}	$G_b > G_{\text{tn}}$	$G_b > G_{\text{tn}}$	$G_b > G_{\text{tn}}$
Độ tin cậy	Đảm bảo	Đảm bảo	Đảm bảo

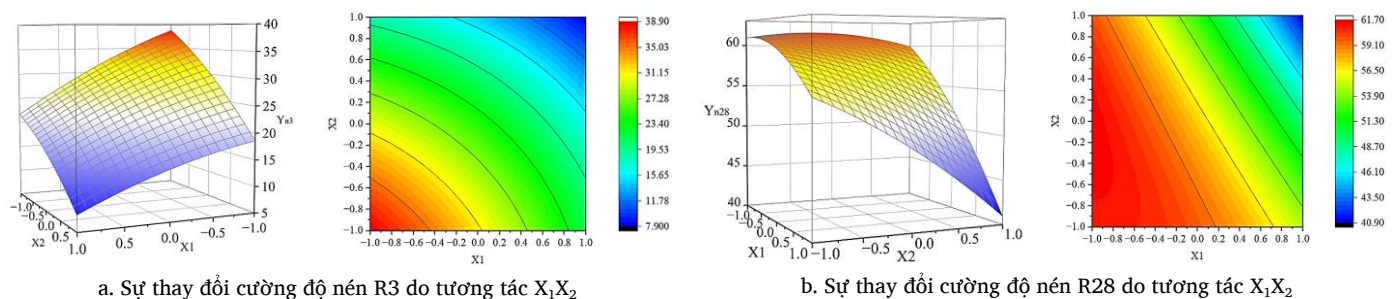
Bảng 8. Kết quả phân tích phương sai của phương trình hồi quy (4).

Nguồn (Source)	Bậc tự do (DF)	Tổng bình phương (Adj SS)	Bình phương trung bình (Adj MS)	Giá trị phân phối F (F-Value)	Giá trị xác suất (P-Value)
Mô hình (Model)	6	1732,20	288,699	132,19	0,000
Tuyến tính (Linear)	3	1656,19	552,064	252,78	0,000
X1	1	658,87	658,873	301,69	0,000
X2	1	985,55	985,549	451,27	0,000
X3	1	11,77	11,769	5,39	0,037
Bình phương (Square)	2	53,79	26,897	12,32	0,001
X1*X1	1	21,25	21,249	9,73	0,008
X2*X2	1	37,18	37,184	17,03	0,001
Tương tác 2 chiều (2-Way Interaction)	1	22,21	22,211	10,17	0,007
X1*X2	1	22,21	22,211	10,17	0,007
Mức độ không phù hợp của mô hình (Lack-of-Fit)	8	23,07	2,884	2,71	0,144
Sai số thuần (Pure Error)	5	5,32	1,064		
Tổng (Total)	19	1760,59			

S = 1,47781 ; Hệ số quyết định (R-sq) = 98,39 % ; Hệ số điều chỉnh R-sq(adj) = 97,64 %



Hình 5. Ảnh hưởng của từng yếu tố tới cường độ chịu nén của bê tông ở các độ tuổi.



Hình 6. Ảnh hưởng của sự tương tác giữa các cặp yếu tố tới cường độ chịu nén của bê tông.

Bảng 9. Mức độ giảm cường độ nén theo tuổi bê tông do ảnh hưởng độc lập của các yếu tố khi thay đổi từ cận dưới (-1) đến cận trên (+1).

	Yếu tố	3 Ngày	7 Ngày	28 Ngày
Mức giảm cường độ do X_1 ($X_2 = X_3 = 0$), %	$X_1 = -1$	30,16	48,80	61,59
	$X_1 = 1$	16,42	32,95	49,04
	Giảm	45,83 %	32,47 %	20,37 %
Mức giảm cường độ do X_2 ($X_1 = X_3 = 0$), %	$X_2 = -1$	31,47	46,30	59,69
	$X_2 = 1$	14,48	36,66	52,27
	Giảm	53,98 %	20,83 %	12,43 %
Mức giảm cường độ do X_3 ($X_1 = X_2 = 0$), %	$X_3 = -1$	25,51	42,80	56,70
	$X_3 = 1$	23,65	40,56	60,56
	Giảm	7,28 %	5,22 %	-6,80 %

Bảng 10. Thành phần cấp phối bê tông hợp lý và kết quả tối ưu thu được.

Cấp phối	Thành phần của các cấp phối bê tông								Kết quả các mục tiêu			
	XM, kg	TB, kg	XLC, kg	Cát, kg	Đá, kg	Nước, kg	SD, kg	TRI, kg	XM, %	R_{n3} , MPa	R_{n7} , MPa	R_{n28} , MPa
	245	105	120	723	967	164	4,7	3,76	52	27	45	60

4. Kết luận

Theo kết quả nghiên cứu đã trình bày ở trên, có thể đưa ra một số kết luận sau:

- TB, XLC và TRI đều có ảnh hưởng không tốt tới sự phát triển cường độ bê tông ở tuổi sớm. Tuy nhiên, khi tuổi bê tông càng tăng thì sự ảnh hưởng này càng giảm. Đối với phụ gia khoáng, XLC có tốc độ giảm ảnh hưởng tới cường độ bê tông nhanh hơn TB. Cụ thể, là mức độ giảm cường độ của XLC từ 53,98 % ở tuổi 3 ngày xuống 12,43 % ở tuổi 28 ngày, so với của TB lần lượt từ 45,83 % xuống 20,37 %. Trong tương tác giữa XLC và TB thì XLC cũng có tác động tích cực hơn TB đối với sự phát triển cường độ của bê tông. Đối với TRI, nó ảnh hưởng hoàn toàn độc lập tới cường độ bê tông, khi tăng hàm lượng TRI, tuổi bê tông càng tăng thì cường độ bê tông càng được cải thiện. Tới tuổi 28 ngày, việc sử dụng hàm lượng TRI lớn nhất là 1 % còn có tác động tăng cường độ lên 6,8 % so với sử dụng hàm lượng TRI nhỏ nhất là 0,3 %.

- Thành phần cấp phối hợp lý của hỗn hợp bê tông sử dụng trong kết cấu BTKL của công trình giao thông, với nhiều mục tiêu khác nhau nhằm hạn chế vết nứt nhiệt đã được xác định. Đó là sử dụng hàm lượng TB, XLC, TRI lần lượt bằng: 22,5 %, 25,5 % và 0,8 % hỗn hợp chất kết dính. Kết quả các mục tiêu thu được là: Cường độ nén ở tuổi 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày lần lượt là: 27 MPa (bằng 62,2 % CP0), 45 MPa (bằng 82,4 % CP0), 60 MPa (bằng 88,3 % CP0) và lượng xi măng sử dụng là 245 kg/m³ giảm được 225 kg/m³ (giảm được 48 %) so với cấp phối đối chứng CP0.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Bofang Z. 2014. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete (Elsevier).
- [2]. Yin, J., Yang, J., Zhang, X., & Lv, T, (2020), Research on Application of Mass Concrete Structure in Civil Building Construction, The Frontiers of Society, Science and Technology, 2(8).
- [3]. TCVN 8828 : 2011 – Bê tông – Yêu cầu bảo dưỡng ẩm tự nhiên.
- [4]. TCVN 9341 : 2012 – Bê tông khối lớn – Thi công và nghiệm thu.
- [5]. Li, Z., Zhou, X., Ma, H., & Hou, D, (2022), Advanced concrete technology, John Wiley & Sons.
- [6]. Niemuth, M, D, (2012), Effect of fly ash on the optimum sulfate of Portland Cement, Purdue University.
- [7]. Viện vật liệu xây dựng, Bộ Xây Dựng, (2021), Chi dẫn kỹ thuật “Sử dụng tro bay và cát nghiền, cát biển cho sản xuất bê tông”.
- [8]. Viện vật liệu xây dựng, Bộ Xây dựng, (2021), Chi dẫn kỹ thuật “Sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn làm phụ gia khoáng cho sản xuất bê tông”.
- [9]. ACI Committee, (2008), Guide for selecting proportions for high-strength concrete using portland cement and other cementitious materials, American Concrete Institute.
- [10]. Reported by ACI Committee 233, ACI 233R-03 “Slag Cement in Concrete and Mortar”.
- [11]. Major building materials standards of the People's Republic of China, (2021), JC/T 2608-2021 “Concrete hydration temperature increase inhibitor”.
- [12]. TCVN 9035:2011 - Hướng dẫn lựa chọn xi măng trong xây dựng.
- [13]. TCVN 7712:2013 - Xi măng poóc lăng hỗn hợp ít tỏa nhiệt.
- [14]. TCVN 6260: 2009 - Xi măng poóc lăng hỗn hợp - yêu cầu kỹ thuật.
- [15]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 10302:2014 “Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng”
- [16]. TCVN 11586:2016 - Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa.
- [17]. Shao, X., Ning, J., Tang, R., Fang, Z., Zhao, B., Xu, B., ... & Wang, Z, (2023), Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and

- performance of cemented paste-filling material, Case Studies in Construction Materials, 19, e02680.
- [18]. Nguyễn Minh Tuyền. (2021). Quy hoạch thực nghiệm. Nhà xuất bản xây dựng.
- [19]. TCVN 3118:2022 - Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén.
- [20]. Edwards, A, J, (2013), Early Age Thermal Cracking of Mass Concrete Footings on Bridges in Coastal Environments.
- [21]. D'ALOIA, L., Légeron, F., Le Roy, R., Runfola, P., & Toutlemonde, F, (2003), Valorisation des betons a hautes performances dans les piles et pylones de grande hauteur des ouvrages d'art, TECHNIQUES ET METHODES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES-GUIDE TECHNIQUE, (BETPIL),
- [22]. TCVN 9346:2012 - Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Yêu cầu bảo vệ chống ăn mòn trong môi trường biển.
- [23]. Standard, A, C, I, (1996), Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, ACI Man, Concr, Pract, 1996, 1-38.
- [24]. TCVN 6910-2:2001. (2001). Độ chính xác (độ đúng và độ chụm) của phương pháp đo và kết quả đo – Phần 2: Phương pháp cơ bản xác định độ lặp lại và độ tái lập của phương pháp đo tiêu chuẩn.
- [25]. Lu, S., Liu, J., Peng, C., Zhang, J., & Sun, H. (2024). Multi-objective optimization of mix proportions for mass concrete with enhanced resistance to cracking and reduced temperature rise. Case Studies in Construction Materials, 20, e02810.
- [26]. Becknell, N. P., & Hale, M. (2006). Ground Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ash in Concrete Mixtures (No. AHTD TRC 0405).
- [27]. Zhou, Y., Yan, Y., Qin, Y., Yu, C., Wang, W., Liu, J., & Wang, K. (2023). The effect of temperature rise inhibitor on the hydration and strength development of slag/fly ash blended cement paste. Construction and Building Materials, 395, 132307.