

# Ảnh hưởng của xi măng xỉ lò cao PCBBFs 40% đến nhiệt thủy hóa của bê tông khối lớn

## Effect of PCBBFs 40% blast furnace slag cement on the heat of hydration of mass concrete

> HOÀNG TRỌNG LÂM<sup>1,\*</sup>, VÕ DUY HÙNG<sup>1</sup>, PHẠM NGỌC NAM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

<sup>2</sup>Trung tâm Kỹ thuật vận hành đường cao tốc Đà Nẵng - Quảng Ngãi

\*Email: htlam@dut.udn.vn

### TÓM TẮT

Việc kiểm soát nhiệt thủy hóa trong bê tông khối lớn là một thách thức kỹ thuật quan trọng nhằm hạn chế nguy cơ nứt nhiệt trong giai đoạn đầu sau khi đổ bê tông. Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của việc thay thế 40% xi măng PCB40 bằng xỉ lò cao (PCBBFs 40%) đến sự phát triển nhiệt độ, ứng suất nhiệt và chuyển vị trong bê tông khối lớn. Phân tích được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm Midas Civil, với mô hình bộ trụ cầu có kích thước thực tế 8 m × 4 m × 2 m. Kết quả cho thấy việc sử dụng PCBBFs 40% giúp giảm nhiệt độ tối đa tại tâm khối bê tông từ 70,08°C xuống 52,1°C (giảm 25,66%), ứng suất kéo lớn nhất tại bề mặt giảm từ 7,94 MPa xuống 4,76 MPa (giảm 40,05%) và chuyển vị giảm khoảng 0,5 mm. Những phát hiện này khẳng định hiệu quả của xi măng xỉ lò cao trong việc kiểm soát nhiệt thủy hóa, giảm ứng suất kéo và nâng cao tính ổn định cấu kiện. Kết quả nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc thiết kế và thi công bền vững các công trình bê tông khối lớn trong điều kiện khí hậu nóng ẩm của Việt Nam.

**Từ khóa:** Nhiệt thủy hóa; bê tông khối lớn; ứng suất thủy nhiệt; xi măng xỉ lò cao; PCBBFs 40%.

### ABSTRACT

Controlling the heat of hydration in mass concrete is a critical engineering challenge to minimize the risk of early-age thermal cracking. This study investigates the effects of replacing 40% of PCB40 cement with blast furnace slag cement (PCBBFs 40%) on the development of temperature, thermal stress, and displacement in mass concrete. The analysis was conducted using the finite element method via Midas Civil software, with a full-scale bridge pier footing model (8 m × 4 m × 2 m). The results show that the use of PCBBFs 40% reduced the peak core temperature from 70,08°C to 52,1°C (a 25,66% decrease), the maximum surface tensile stress from 7,94 MPa to 4,76 MPa (a 40,05% decrease), and displacement by approximately 0,5 mm. These findings confirm the effectiveness of blast furnace slag cement in controlling heat of hydration, reducing tensile stress, and enhancing the structural stability of mass concrete. The results of this study provide a valuable scientific basis for the sustainable design and construction of mass concrete structures, especially under hot and humid climate conditions in Vietnam.

**Keywords:** Hydration heat; mass concrete; stress; blast furnace slag cement; PCBBFs 40%.

### 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Sự phát triển nhanh chóng của ngành Xây dựng, đặc biệt trong lĩnh vực cầu đường và các công trình hạ tầng quy mô lớn, đã đặt ra yêu cầu ngày càng cao đối với việc sử dụng bê tông khối lớn trong những kết cấu quan trọng như bộ trụ cầu, đập thủy điện, móng công trình cao tầng và các công trình giao thông. Tuy nhiên, một trong những thách thức kỹ thuật quan trọng khi thi công bê tông khối lớn là kiểm soát nhiệt thủy hóa, tức quá trình sinh nhiệt trong bê tông do phản ứng hóa học giữa xi măng và nước. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt bê tông có thể tạo ra ứng suất nhiệt lớn, dẫn đến nguy cơ xuất hiện các vết nứt trong kết cấu, làm suy giảm độ bền lâu dài và khả năng chịu tải của công trình [1], [2]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng các vết nứt do nhiệt không chỉ làm giảm độ bền kết cấu mà còn làm tăng khả năng thấm nước, từ đó thúc đẩy sự xâm thực của các ion có hại như  $Cl^-$  và  $SO_4^{2-}$ , ảnh hưởng

tiêu cực đến tuổi thọ của công trình [3], [4].

Để kiểm soát nhiệt thủy hóa trong bê tông khối lớn, nhiều giải pháp đã được đề xuất. Một số phương pháp phổ biến bao gồm sử dụng hệ thống làm mát trong khối bê tông bằng các ống nước luân chuyển, giúp giảm nhiệt độ lõi trong quá trình đóng rắn [5]; điều chỉnh thành phần hỗn hợp bê tông bằng cách giảm tỷ lệ xi măng hoặc sử dụng cốt liệu có kích thước lớn hơn nhằm hạn chế nhiệt sinh [6]; ứng dụng phương pháp thi công theo giai đoạn nhằm kiểm soát sự gia tăng nhiệt độ một cách có kiểm soát [7]; và thay thế một phần xi măng poóc lăng bằng các vật liệu bổ sung như tro bay, silica fume, metakaolin hoặc xỉ lò cao [8], [9]. Ngoài ra, phương pháp làm lạnh vật liệu trước khi trộn, như sử dụng cốt liệu hoặc nước trộn đã được làm lạnh, cũng được áp dụng nhằm giảm nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông, nhằm hạn chế đỉnh nhiệt độ trong quá trình thủy hóa và giảm nguy cơ nứt nhiệt. Trong các

giải pháp kể trên, việc thay thế xi măng poóc lăng bằng xi lò cao được xem là một trong những phương án tối ưu để kiểm soát nhiệt thủy hóa mà vẫn đảm bảo tính chất cơ học và độ bền lâu dài của bê tông [10].

Xi măng poóc lăng xi lò cao được chế tạo bằng cách nghiền mịn hỗn hợp clanhke xi măng poóc lăng với xi hạt lò cao và một lượng thạch cao thích hợp; hoặc trộn đều xi hạt lò cao đã nghiền mịn với xi măng poóc lăng. Xi lò cao là sản phẩm phụ của quá trình luyện gang thép, với thành phần chủ yếu gồm CaO, SiO<sub>2</sub> và Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Việc sử dụng xi lò cao không chỉ giúp giảm hàm lượng clanhke trong xi măng, giảm nhiệt thủy hóa, mà còn cải thiện khả năng chống xâm thực, tăng độ bền sunfat và giảm tính thấm nước của bê tông [11], [12]. Các nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra rằng khi thay thế một phần xi măng poóc lăng bằng xi lò cao, nhiệt độ tối đa trong bê tông có thể giảm đáng kể, giúp hạn chế ứng suất nhiệt và giảm nguy cơ nứt [13], [14]. Ngoài ra, bê tông sử dụng xi măng poóc lăng xi lò cao còn có tính bền vững cao hơn so với bê tông thông thường nhờ vào khả năng giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong quá trình sản xuất, góp phần vào xu hướng phát triển vật liệu xây dựng thân thiện với môi trường [15], [16].

Mặc dù các nghiên cứu trên thế giới đã đánh giá tác động của xi lò cao đến nhiệt thủy hóa bê tông khối lớn, tại Việt Nam, số lượng nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng [17] về ảnh hưởng của xi măng xi lò cao đến sự phát triển nhiệt độ, ứng suất nhiệt và nguy cơ nứt trong bê tông khối lớn vẫn còn rất hạn chế [18], [19]. Phần lớn các nghiên cứu trong nước tập trung vào ảnh hưởng của tro bay hoặc các phụ gia khoáng đến tính chất cơ học của bê tông, trong khi đó, tác động của xi măng xi lò cao đến nhiệt thủy hóa và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn chưa được phân tích chi tiết [20], [21]. Điều này tạo ra một khoảng trống trong nghiên cứu và thực tiễn ứng dụng tại Việt Nam, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nóng ẩm, nơi nguy cơ nứt nhiệt trong bê tông khối lớn có thể xảy ra ở mức độ cao hơn so với các khu vực có khí hậu ôn đới [22], [23].

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của việc thay thế 40% xi măng poóc lăng bằng xi lò cao đối với sự phát triển nhiệt độ, ứng suất nhiệt và chuyển vị trong bê tông khối lớn. Tỷ lệ thay thế 40% được lựa chọn dựa trên cơ sở thư viện vật liệu hiện có trong phần mềm Midas Civil và xi măng poóc lăng xi lò cao thương phẩm có trên thị trường, trong đó tỷ lệ này là mức sẵn có để mô phỏng, đồng thời cũng là tỷ lệ phổ biến được khuyến nghị trong thực tế nhằm cân bằng giữa hiệu quả giảm nhiệt thủy hóa và duy trì các đặc tính cơ học cần thiết của bê tông [24]. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được áp dụng để mô phỏng và phân tích quá trình này thông qua phần mềm Midas Civil, với mô hình mô phỏng bộ trụ cầu có kích thước thực tế. Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp xác định mức giảm nhiệt độ lớn nhất trong bê tông khi sử dụng xi măng xi lò cao, mà còn cung cấp dữ liệu chi tiết về sự phân bố ứng suất nhiệt trong kết cấu, giúp đánh giá mức độ giảm ứng suất kéo - yếu tố chính gây ra nứt nhiệt [26]. Đồng thời, nghiên cứu cũng đưa ra các khuyến nghị kỹ thuật nhằm tối ưu hóa việc sử dụng xi măng xi lò cao trong thi công bê tông khối lớn tại Việt Nam [27-31].

Những kết quả đạt được từ nghiên cứu này không chỉ làm rõ thêm về ảnh hưởng của xi măng xi lò cao đến nhiệt thủy hóa trong bê tông khối lớn, mà còn cung cấp cơ sở khoa học quan trọng để tối ưu hóa thiết kế và thi công các công trình hạ tầng tại Việt Nam. Việc sử dụng xi măng xi lò cao trong bê tông khối lớn hứa hẹn sẽ là một giải pháp kỹ thuật hiệu quả giúp giảm thiểu rủi ro nứt nhiệt, nâng cao tuổi thọ công trình, đồng thời góp phần vào xu hướng phát triển bền vững trong ngành xây dựng.

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN THỦY HOÁ

### 2.1. Phân tích truyền nhiệt [32]

2.1.1. *Dẫn nhiệt*: là một dạng truyền nhiệt có quan hệ với sự trao đổi năng lượng từ vùng có nhiệt độ cao đến vùng có nhiệt độ thấp. Tốc độ

dẫn nhiệt tỷ lệ với diện tích vuông góc với phương dẫn, gradient nhiệt theo phương đó. Theo định luật Fourier:

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Với:  $Q_x$  là lượng nhiệt được truyền, đơn vị là kcal/h.m.°C;  $k$  là hệ số dẫn nhiệt, đối với bê tông bảo hòa,  $k = 1,21-3,11$ ;  $A$  là diện tích dẫn nhiệt, vuông góc phương dẫn nhiệt;  $\frac{\partial T}{\partial x}$ : là gradient nhiệt

2.1.2. *Đối lưu nhiệt*: nhiệt được trao đổi từ bề mặt các khối rắn lên môi trường chất lỏng hay chất khí thông qua chuyển động của các phân tử chất lỏng hay khí. Lượng nhiệt được truyền  $q$  do đối lưu trên một đơn vị diện tích khối rắn được tính toán như sau:

$$q = h_c (T - T_\infty) \quad (2)$$

Với:  $h_c$  là hệ số truyền nhiệt giữa chất rắn và chất lỏng/chất khí.  $h_c$  phụ thuộc vào nhiều yếu tố như cấu tạo hình học của bề mặt, tính chất vật lý của chất lỏng/chất khí, nhiệt độ trung bình của bề mặt chất lỏng, v.v... khi tính toán các khối bê tông trong không khí,  $h_c$  có thể được tính toán như sau:  $h_c = 5,2+3,5v$  ( $v$  là vận tốc gió; được tính bằng m/s).  $T$  là nhiệt độ bề mặt chất rắn và  $T_\infty$  là nhiệt độ môi trường chất lỏng/khí.

2.1.3. *Nguồn nhiệt*: nguồn nhiệt thể hiện lượng nhiệt phát sinh trong quá trình thủy hóa. Lượng nhiệt bên trong bê tông phát sinh do quá trình thủy hóa trong một đơn vị thời gian và đơn vị thể tích là:

$$g = \frac{1}{24} \cdot \rho \cdot C \cdot K \cdot \alpha \cdot e^{-at/24} \quad (3)$$

Phương trình tăng nhiệt độ đoạn nhiệt là:

$$T = K(1 - e^{-at}) \quad (4)$$

Trong đó:  $T$  là nhiệt độ đoạn nhiệt (°C);  $K$  là sự tăng nhiệt độ đoạn nhiệt lớn nhất (°C);  $a$  là hệ số tốc độ phản ứng;  $\rho$  là khối lượng thể tích của bê tông (kg/m<sup>3</sup>);  $t$  là thời gian (ngày);  $C$ : tỷ nhiệt của bê tông (kcal/(kg.°C)).

### 2.2. Phân tích ứng suất nhiệt [32]

Ứng suất trong bê tông khối lớn tại mỗi giai đoạn thi công được tính toán với việc sử dụng các kết quả của phân tích truyền nhiệt, sự phân bố nhiệt độ theo nút, cũng như xét đến sự thay đổi các thuộc tính vật liệu theo thời gian và nhiệt độ, sự co ngót theo thời gian, từ biến phụ thuộc thời gian và ứng suất, v.v...

Cường độ chịu nén của bê tông tính theo tuổi tương đương và nhiệt độ cộng dồn, được tính theo công thức sau:

$$\text{Theo AIC: } f'_c(t) = \frac{t}{a + bt_{eq}} f'_c(28) \quad (5)$$

Với:  $f'_c(t)$  là cường độ bê tông tại thời điểm tính toán;  $f'_c(28)$ : là cường độ bê tông tại tuổi 28 ngày;  $a, b$ : là các hệ số phụ thuộc vào loại xi măng;  $t$  là thời gian tính toán (ngày);  $t_{eq}$  là tuổi tương đương của bê tông.

## 3. PHÂN TÍCH NHIỆT THỦY HOÁ TRONG BÊ TÔNG KHỐI LỚN

### 3.1. Xác thực mô hình

Để đảm bảo độ tin cậy của mô hình phân tích, nghiên cứu này tiến hành xác thực mô hình mô phỏng nhiệt thủy hóa và ứng suất nhiệt của bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) thông qua phần mềm Midas Civil. Mô hình được kiểm tra bằng cách so sánh kết quả phân tích số với dữ liệu thực nghiệm thu thập từ các nghiên cứu trước đây, trong đó có nghiên cứu của Hồ Ngọc Khoa và Vũ Chí Công về phân tích trường nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn [1]. Chi tiết các tính chất cơ lý của bê tông và môi trường xung quanh được trình bày ở Bảng 1.

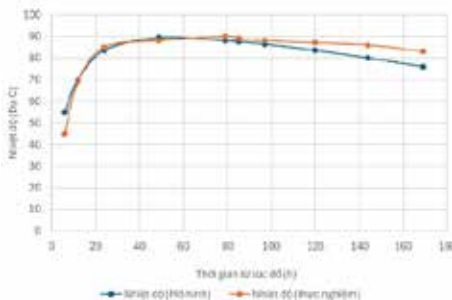
Mô hình bê tông được xây dựng với kích thước 4,6 m × 4,6 m × 4 m. Mô hình sử dụng các thông số vật liệu thực tế của bê tông bộ trụ, trong

đó xi măng poóc lăng được dùng làm chất kết dính chính. Phương pháp xác thực được thực hiện thông qua các bước sau: (i) Thiết lập mô hình phần tử hữu hạn với các thông số nhiệt và cơ lý phù hợp; (ii) Tiến hành phân tích nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn; và (iii) So sánh kết quả mô phỏng với dữ liệu thực nghiệm để đánh giá độ chính xác của mô hình.

Bảng 1. Các thông số tính toán vật liệu sử dụng trong phân tích [1]

Đặc điểm	Phần	Bê tông B40	Nền đất
Tỷ lệ nhiệt C, [kcal/kg.°C]		0,27	0,2
Khối lượng thể tích, [kG/m <sup>3</sup> ]		2400	1800
Hệ số dẫn nhiệt, [kcal/m.h.°C]		2,5	1,7
Hệ số trao đổi nhiệt, [kcal/m <sup>2</sup> h.°C]		12	12
Cường độ chịu nén, [kG/ m <sup>2</sup> ]		6000000	
Hệ số giãn nở nhiệt		1,0x10 <sup>-5</sup>	
Hệ số Poisson		0,2	0,2
Loại xi măng		Tòa nhiệt thấp	
Hàm lượng xi măng, [kG.m <sup>3</sup> ]		445	
Tỷ lệ N/X		0,375	
Nhiệt độ bê tông khi đổ, [°C]		30	
Mô đun đàn hồi, [GPa]		35,2	
Hằng số hàm tăng nhiệt độ đoạn nhiệt		K=59,6 °C α = 1,113	
Nhiệt độ môi trường, [°C]		28,7	

Hình 1 thể hiện so sánh giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng. Kết quả so sánh giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm [1] cho thấy mô hình có độ chính xác cao, với các chỉ số thống kê đánh giá sai số bao gồm hệ số tương quan  $R^2 = 0,9616$ , sai số trung bình bình phương (RMSE) = 2,19°C, sai số tuyệt đối trung bình (MAE) = 1,44°C; và sai số phần trăm trung bình (MER) = 1,96%. Những giá trị này chứng minh rằng mô hình mô phỏng có khả năng dự đoán chính xác sự phát triển của trường nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn theo thời gian, qua đó đảm bảo độ tin cậy khi áp dụng vào các phân tích tiếp theo. Việc xác thực mô hình không chỉ đảm bảo tính chính xác của phương pháp phân tích mà còn cung cấp cơ sở khoa học vững chắc để áp dụng mô hình vào việc đánh giá ảnh hưởng của xi măng xi lò cao trong kiểm soát nhiệt thủy hóa. Kết quả thu được từ quá trình xác thực cho phép mở rộng nghiên cứu bằng cách mô phỏng và so sánh hai trường hợp: Bê tông sử dụng xi măng poóc lăng thông thường PCB40 và bê tông sử dụng PCB<sub>BFs</sub> 40%.



Hình 1. Kết quả so sánh sự thay đổi nhiệt độ tại tâm giữa thực nghiệm và mô hình

### 3.2. Phân tích ảnh hưởng của xi lò cao đến nhiệt thủy hóa trong bê tông khối lớn

#### 3.2.1. Thiết lập mô hình

Mô hình phân tích được thiết lập nhằm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt thủy hóa đến bê tông khối lớn khi sử dụng PCB<sub>BFs</sub> 40%. Phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng thông qua phần mềm Midas Civil để mô phỏng quá trình phát triển nhiệt độ, ứng suất nhiệt và chuyển vị trong bê tông bê trụ cầu có kích thước thực tế 8 m x 4 m x 2 m, với tổng khối lượng bê tông khoảng 64 m<sup>3</sup>. Kích thước này được lựa chọn dựa

trên thực tiễn thi công của các công trình có kết cấu tương tự, như bê trụ cầu Giao Thủy Quảng Nam (cũ), nhằm đảm bảo mô hình phản ánh chính xác điều kiện thực tế. Mô phỏng được thực hiện với hai trường hợp: bê tông sử dụng xi măng poóc lăng thông thường PCB40 và bê tông sử dụng PCB<sub>BFs</sub> 40%. Các đặc tính cơ lý của vật liệu được xác định dựa trên các tiêu chuẩn thiết kế và kết quả nghiên cứu thực nghiệm trước đây [1], [32].

Bảng 2. Thông số đầu vào mô hình FEM

Đặc trưng cơ lý	Bộ phận kết cấu	Bê trụ
Loại bê tông		C3000
Nhiệt dung riêng, [kcal.g/kg.°C]		0,25
Khối lượng riêng, [kg/m <sup>3</sup> ]		2400
Hệ số đối lưu nhiệt, [kcal/m <sup>2</sup> .°C]	Ván khuôn thép	12
	Không khí có gió	15
Nhiệt độ môi trường, [°C]		25
Nhiệt độ lúc đổ bê tông, [°C]		20
Cường độ chịu nén bê tông 28 ngày, [kG/m <sup>2</sup> ]		3.e <sup>6</sup>
Mô đun đàn hồi của bê tông 28 ngày, [kG/m <sup>2</sup> ]		2,8.e <sup>9</sup>
Hệ số giãn nở nhiệt		1,0.e <sup>-5</sup>
Hệ số Poisson		0,18
Hàm lượng xi măng, [kg/m <sup>3</sup> ]		400

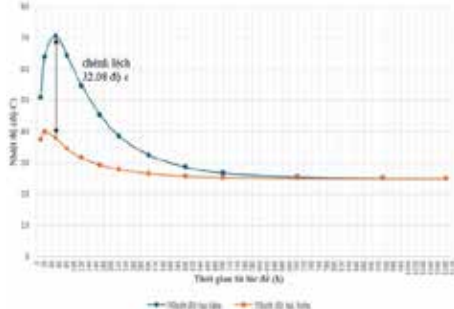
Các thông số quan trọng bao gồm: cường độ chịu nén bê tông 30 MPa, hệ số dẫn nhiệt 2,5 kcal/m.h.°C đối với bê tông thông thường và 2,0 kcal/m.h.°C. Đối với bê tông xi lò cao, hệ số giãn nở nhiệt 1,0 x 10<sup>-5</sup>/°C, nhiệt độ môi trường 25°C, nhiệt độ bê tông khi đổ 20°C, hệ số đối lưu nhiệt 12 kcal/m<sup>2</sup>.h.°C đối với ván khuôn thép và 15 kcal/m<sup>2</sup>.h.°C đối với không khí có gió [1]. Bê tông trong mô hình được chia thành các phần tử hữu hạn nhỏ nhằm đảm bảo tính chính xác trong mô phỏng quá trình truyền nhiệt và phát triển ứng suất nhiệt. Quá trình phân tích được thực hiện theo các bước gồm thiết lập mô hình 3D của bê trụ cầu với các đặc tính vật liệu phù hợp, gán các điều kiện nhiệt độ ban đầu vào mô hình, xác định nguồn nhiệt phát sinh do phản ứng thủy hóa của xi măng thông qua hàm tăng nhiệt độ đoạn nhiệt, thiết lập điều kiện biên mô phỏng sự truyền nhiệt qua bề mặt bê tông ra môi trường xung quanh, tính toán sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian, xác định vùng có nguy cơ xuất hiện ứng suất kéo lớn nhất và so sánh hai mô hình để đánh giá hiệu quả của xi măng xi lò cao trong việc giảm nhiệt độ cực đại và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn.

#### 3.2.2. Nhiệt thủy hóa và ứng suất nhiệt của bê tông thông thường

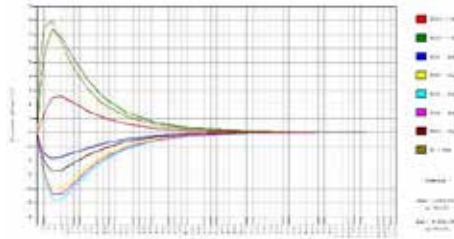
Hình 2 minh họa quá trình phát triển nhiệt độ theo thời gian trong khối bê tông sử dụng xi măng poóc lăng thông thường. Kết quả cho thấy nhiệt độ tại tâm khối bê tông tăng nhanh chóng và đạt giá trị cực đại 70,08°C sau khoảng 50 giờ kể từ thời điểm đổ bê tông, trong khi nhiệt độ tại bề mặt chỉ đạt 38,0°C. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt lên tới 32,08°C đã tạo nên một độ dốc nhiệt lớn trong khối bê tông. Đây là nguyên nhân chính dẫn đến ứng suất kéo đáng kể tại bề mặt và làm tăng nguy cơ nứt nhiệt trong giai đoạn đầu đóng rắn. Đường cong nhiệt độ cho thấy hơn 85% nhiệt độ cực đại được hình thành trong 30 giờ đầu tiên, phản ánh tốc độ thủy hóa nhanh và cường độ phát nhiệt lớn của xi măng poóc lăng.

Kết quả mô phỏng ứng suất do thủy nhiệt được trình bày trong Hình 3. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt khiến bê tông giãn nở không đều, dẫn đến ứng suất nén trong lõi và ứng suất kéo tại bề mặt. Tại thời điểm 50 giờ, ứng suất kéo cực đại tại bề mặt đạt 7,94 MPa - vượt quá khả năng chịu kéo sớm của bê tông, tạo điều kiện phát sinh các vết nứt nhiệt. Các vị trí chịu ứng suất kéo lớn nhất thường xuất hiện tại các cạnh và góc bê trụ, nơi khả năng tản nhiệt cao hơn. Sau giai đoạn đỉnh nhiệt, ứng suất có xu hướng giảm dần nhưng vẫn tồn tại ở mức đáng kể trong suốt quá trình làm nguội.

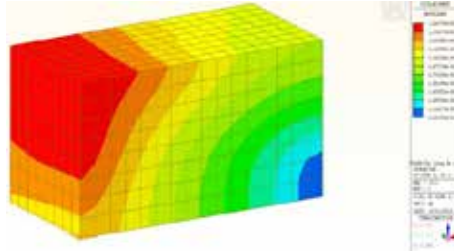
Hình 4 cho thấy chuyển vị lớn nhất của khối bê tông xảy ra trong giai đoạn phát triển nhiệt mạnh nhất, với giá trị lên đến 1,26 mm tại các vị trí biên và góc bề mặt bê tông trong khoảng thời gian từ 20 đến 50 giờ sau khi đổ. Chuyển vị này là hệ quả trực tiếp của biến dạng nhiệt không đồng đều, chủ yếu do sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt. Khi nhiệt độ giảm, chuyển vị cũng giảm theo. Kết quả này cho thấy biến thiên nhiệt độ trong quá trình thủy hóa ảnh hưởng đáng kể đến biến dạng cấu trúc, đặc biệt tại các khu vực dễ tổn thương như bề mặt và góc cạnh kết cấu.



Hình 2. Thay đổi nhiệt độ tại tâm bệ trụ và tại biên bệ trụ



Hình 3. Biểu đồ ứng suất do nhiệt thủy hóa gây ra



Hình 4. Biểu đồ chuyển vị bệ trụ lúc 50 giờ

### 3.3. Phân tích ảnh hưởng của xi măng xỉ lò cao hàm lượng thay thế 40%

#### 3.3.1. Mô hình hoá khối BTCT sử dụng PCB<sub>BFs</sub> 40%

Để phân tích ảnh hưởng của việc sử dụng xi măng xỉ lò cao với hàm lượng thay thế 40% xi măng PCB40 đến quá trình phát triển nhiệt độ, ứng suất nhiệt và chuyển vị trong bê tông khối lớn, một mô hình phần tử hữu hạn đã được thiết lập trên phần mềm Midas Civil (2004) phiên bản 7.0.1. Mô hình mô phỏng bệ trụ cầu có kích thước thực tế 8 m × 4 m × 2 m, với các điều kiện biên và tải nhiệt tương tự như trong trường hợp mô phỏng sử dụng xi măng PCB40 thông thường. Các thông số đầu vào như hệ số dẫn nhiệt, hệ số giãn nở nhiệt, nhiệt dung riêng, hệ số đối lưu và điều kiện môi trường đều được giữ nguyên, nhằm đảm bảo tính so sánh giữa hai phương án vật liệu. Khác biệt duy nhất nằm ở việc thay thế thành phần xi măng trong mô hình bằng PCB<sub>BFs</sub> 40%, với hàm đặc trưng nhiệt thủy hóa phản ánh đúng đặc tính sinh nhiệt thấp và phản ứng chậm của xi măng xỉ lò cao. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá một cách toàn diện hiệu quả của PCB<sub>BFs</sub> 40% trong việc kiểm soát nhiệt thủy hóa, giảm ứng suất kéo và hạn chế biến dạng sớm trong bê tông khối lớn.

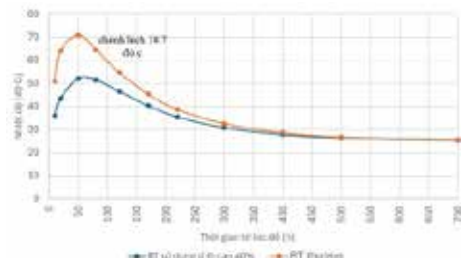
#### 3.3.2. Kết quả phân tích

##### a. Nhiệt thủy hóa

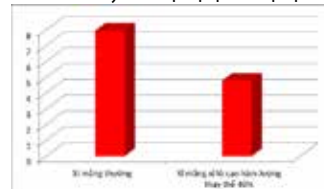
Hình 5 thể hiện quá trình phát triển nhiệt độ trong khối bê tông sử dụng xi măng xỉ lò cao PCB<sub>BFs</sub> 40%. Kết quả cho thấy phản ứng thủy hóa diễn ra chậm hơn và nhiệt độ cực đại thấp hơn đáng kể so với trường hợp sử dụng xi măng PCB40. Cụ thể, tại thời điểm 50 giờ, nhiệt độ lớn nhất tại tâm khối bê tông chỉ đạt 52,1°C (so với bê tông sử dụng xi măng poóc lăng thông thường là 70,08°C), trong khi tại bề mặt là 33,1°C, tạo ra độ chênh lệch nhiệt độ là 19,0°C - thấp hơn 40,8% so với mức chênh lệch 32,08°C ở mô hình sử dụng xi măng thông thường. Sự giảm cả về giá trị nhiệt độ cực đại lẫn độ chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt cho thấy khả năng kiểm soát tốt hơn của PCB<sub>BFs</sub> 40% đối với hiện tượng tích nhiệt trong khối bê tông. Trong 30 giờ đầu tiên, nhiệt độ trong bê tông chỉ đạt khoảng 70% giá trị cực đại, phản ánh quá trình thủy hóa diễn ra chậm - đặc điểm điển hình của xi măng xỉ lò cao do hàm lượng Clanhke thấp và phản ứng pozzolanic chậm. Ngoài ra, việc bề mặt bê tông có nhiệt độ thấp hơn (33,1°C so với 38,0°C ở bê tông poóc lăng thông thường) cho thấy hiện tượng tản nhiệt ra môi trường diễn ra hiệu quả hơn và không bị cản trở bởi tốc độ phát nhiệt nội tại quá nhanh. Kết quả này khẳng định rằng việc sử dụng PCB<sub>BFs</sub> 40% không chỉ giúp giảm nhiệt độ tối đa trong khối bê tông, mà còn góp phần giảm độ dốc nhiệt, từ đó hạn chế nguy cơ xuất hiện nứt và nguy cơ nứt trong giai đoạn đầu sau khi thi công.

##### b. Ứng suất thủy nhiệt

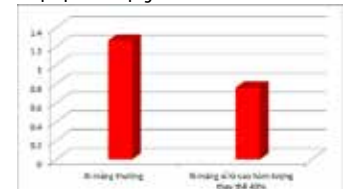
Hình 6 thể hiện so sánh giá trị ứng suất kéo lớn nhất do thủy nhiệt giữa hai loại bê tông sau 50 giờ kể từ thời điểm đổ. Với bê tông sử dụng xi măng poóc lăng thông thường, ứng suất kéo cực đại tại bề mặt đạt 7,94 MPa. Trong khi đó, khi sử dụng xi măng xỉ lò cao với hàm lượng thay thế 40% (PCB<sub>BFs</sub> 40%), ứng suất kéo giảm còn 4,76 MPa, tương ứng mức giảm khoảng 3,18 MPa (giảm 40,05%). Kết quả này cho thấy rằng PCB<sub>BFs</sub> 40% có hiệu quả rõ rệt trong việc làm giảm ứng suất kéo phát sinh trong quá trình thủy hóa, từ đó hạn chế nguy cơ xuất hiện nứt nhiệt.



Hình 5. Thay đổi nhiệt độ tại tâm bệ trụ và tại biên bệ trụ khi sử dụng PCB<sub>BFs</sub> 40%



Hình 6. So sánh ứng suất kéo lớn nhất trong khối bê tông



Hình 7. So sánh chuyển vị lớn nhất trong khối bê tông

Nguyên nhân chính là do PCB<sub>BFs</sub> có tốc độ phát nhiệt chậm và giá trị nhiệt độ cực đại thấp hơn, giúp làm giảm sự chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt khối bê tông - yếu tố trực tiếp gây ứng suất kéo nội bộ. Sự suy giảm rõ rệt về ứng suất kéo cho thấy tiềm năng ứng dụng của xi măng xỉ lò cao trong việc cải thiện độ bền, độ ổn định và tuổi thọ của các kết cấu bê tông khối lớn, đặc biệt trong môi trường nhiệt độ cao và độ ẩm lớn như ở Việt Nam.

##### c. Chuyển vị do nhiệt thủy hóa

Kết quả phân tích chuyển vị tại thời điểm 50 giờ sau khi đổ bê tông được thể hiện trong Hình 7. Theo đó, khi sử dụng xi măng poóc lăng thông thường, chuyển vị lớn nhất trong khối bê tông đạt giá trị

1,26 mm. Trong khi đó, với trường hợp sử dụng xi măng PCBBFs 40%, chuyển vị lớn nhất giảm xuống còn 0,76 mm, tương ứng với mức giảm khoảng 0,5 mm. Sự giảm này phản ánh rõ hiệu quả của việc sử dụng PCBBFs 40% trong việc hạn chế biến dạng tổng thể của kết cấu bê tông trong giai đoạn đầu sau khi thi công. Nguyên nhân chủ yếu đến từ khả năng kiểm soát nhiệt độ tốt hơn của xi măng xi lò cao, làm giảm chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt khối bê tông, từ đó giảm ứng suất nội sinh và biến dạng nhiệt. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc nâng cao độ ổn định ban đầu của công trình và giảm thiểu nguy cơ xuất hiện các khe nứt do chuyển vị không đều trong quá trình đóng rắn.

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng quá trình phát triển nhiệt thủy hóa, ứng suất nhiệt và chuyển vị trong bê tông khối lớn khi thay thế 40% xi măng PC40 bằng xi măng xi lò cao (PCBBFs 40%) thông qua phương pháp phần tử hữu hạn bằng phần mềm Midas Civil. Mô hình mô phỏng được thiết lập với các thông số thực tế, phản ánh đúng điều kiện thi công và đặc tính vật liệu, cho phép đánh giá hiệu quả của việc sử dụng xi măng xi lò cao trong việc kiểm soát hiện tượng nứt nhiệt - một trong những vấn đề thường gặp trong thi công bê tông khối lớn. Kết quả cho thấy bê tông sử dụng PCBBFs 40% có nhiều ưu điểm vượt trội so với bê tông sử dụng xi măng poóc lăng thông thường. Nhiệt độ cực đại tại tâm khối bê tông giảm từ 70,08°C xuống 52,1°C, tương ứng mức giảm 25,66%. Đồng thời, chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt giảm đáng kể từ 32,08°C xuống còn 19,0°C, góp phần làm giảm độ dốc nhiệt trong kết cấu - nguyên nhân chính gây ra ứng suất kéo nguy hiểm tại bề mặt. Ứng suất kéo lớn nhất tại bề mặt bê tông sử dụng PCBBFs 40% cũng giảm 40,05% (từ 7,94 MPa xuống còn 4,76 MPa), cho thấy khả năng hạn chế rui ro nứt nhiệt rất rõ rệt. Về biến dạng kết cấu, chuyển vị lớn nhất giảm 39,7% (từ 1,26 mm xuống còn 0,76 mm), phản ánh hiệu quả của vật liệu trong việc kiểm soát biến dạng và duy trì tính ổn định của khối bê tông trong giai đoạn đầu đóng rắn.

Các kết quả đạt được khẳng định rằng việc sử dụng xi măng xi lò cao không chỉ giúp kiểm soát tốt hơn quá trình phát triển nhiệt độ bên trong kết cấu mà còn góp phần giảm ứng suất nội sinh và hạn chế chuyển vị, từ đó nâng cao tuổi thọ và độ bền của công trình. Đây là một giải pháp vật liệu phù hợp cho các kết cấu bê tông khối lớn, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới nóng ẩm như tại Việt Nam, nơi mà nguy cơ nứt nhiệt và biến dạng sớm là rất cao nếu không có biện pháp kiểm soát hiệu quả. Ngoài giá trị ứng dụng thực tiễn, nghiên cứu còn đóng vai trò làm cơ sở khoa học cho việc đề xuất các giải pháp thiết kế kết cấu, lựa chọn vật liệu và kỹ thuật thi công phù hợp nhằm giảm thiểu rui ro do nhiệt thủy hóa gây ra trong các công trình quy mô lớn. Trong thời gian tới, việc kết hợp mô phỏng số với các thí nghiệm thực nghiệm là cần thiết để hiệu chuẩn, xác thực mô hình và mở rộng khả năng ứng dụng của xi măng xi lò cao trong các loại kết cấu khác như đập bê tông, móng trụ cầu, hay khối móng nhà cao tầng. Đồng thời, nghiên cứu cũng mở ra hướng tiếp cận tích hợp giữa mô hình nhiệt - cơ và mô phỏng nứt nhằm dự báo chính xác hơn sự phát triển vết nứt trong bê tông khối lớn theo thời gian.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hồ Ngọc Khoa, *Nghiên cứu biến dạng lớp của kết cấu bê tông, thi công theo phương pháp toàn khối trong thời gian đầu đóng rắn*, Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp Trường, Trường Đại học Xây dựng, 2011.  
 [2] Nguyễn Tiến Đích, *Công tác bê tông trong điều kiện khí hậu nóng ẩm Việt Nam*, Nhà Xuất bản Xây dựng, Hà Nội, 2010.  
 [3] Bazenov I.U.M., Bạch Đình Thiên, Trần Ngọc Tĩnh, *Công nghệ bê tông*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội, 2004.

[4] Đoàn Viết Long, Nguyễn Văn Hường, Võ Thị Thu Hiền, "Nghiên cứu ảnh hưởng của tro bay đến nhiệt thủy hóa và cường độ nén của vữa", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, số 1(98), 2016.

[5] Nguyễn Thanh Bằng, Nguyễn Tiến Trung, Đinh Hoàng Quân, "Nghiên cứu đánh giá chất lượng tro bay, xi lò cao của nhà máy nhiệt điện và luyện kim ở Việt Nam", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Thủy lợi*, số 57, 2019.

[6] Hoàng Minh Đức, Trần Quốc Toàn, "Nghiên cứu ảnh hưởng của xi hạt lò cao nghiên cứu mìn và tro bay đến tính chất của hỗn hợp bê tông", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 3, 2020.

[7] ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)*, American Concrete Institute, 2005.

[8] ASTM C150-02, *Standard Specification for Portland Cement*, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.02, 2002.

[9] ASTM C305-02, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.02, 2002.

[10] ASTM C204-02, *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus*, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.02, 2002.

[11] Abdallah I. Husein Malkawi et al., "Thermal-Structural Modeling and Temperature Control of Roller Compacted Concrete Gravity Dam", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 17, no. 4, pp. 177–187, 2003.

[12] M. Ahmaruzzaman, "A review on the utilization of fly ash", *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, pp. 327–363, 2010.

[13] M. Broda, E. Wirquin, B. Duthoit, "Conception of an isothermal calorimeter for concrete - Determination of the apparent activation energy", *Materials and Structures*, vol. 35, pp. 389–394, 2002.

[14] G. Baert, S. Hoste et al., "Reactivity of fly ash in cement paste studied by thermogravimetry and isothermal calorimetry", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 94, no. 2, pp. 485–492, 2008.

[15] Y. Ballim, P.C. Graham, "Early-age heat evolution of clinker cements in relation to microstructure and composition", *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp. 417–426, 2004.

[16] J.E. Akin, *Finite Element for Analysis and Design*, Academic Press, 1994.

[17] Hồ Ngọc Khoa, Vũ Chí Công, "Phân tích trường nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 14, 12/2012.

[18] B. Gebhart, *Heat Conduction and Mass Diffusion*, McGraw-Hill, 1993.

[19] JCI, VCA, *Hướng dẫn kiểm soát nứt trong bê tông khối lớn - Phiên bản 2008*, VCA, Hà Nội, 2011.

[20] JSCE, *Standard Specifications for Concrete Structures - 2007 "Materials and Construction"*, Japan Society of Civil Engineers, 2007.

[21] P.P. Bamforth, D. Chisholm, J. Gibbs, T. Harrison, *Properties of Concrete for Use in Eurocode 2*, The Concrete Centre, 2008.

[22] MIDAS Information Technology, *Heat of Hydration Analysis Manual*, Version 7.0.1, 2004.

[23] A. Oner, S. Akyuz, R. Yildiz, "An experimental study on strength development of concrete containing fly ash", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1165–1171, 2005.

[24] TCVN 4316:2007 – *Xi măng poóc lăng xi lò cao*, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng Việt Nam, 2007.

[25] V.G. Papadakis, "Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 11, pp. 1727–1736, 1999.

[26] M. Thomas, *Supplementary Cementing Materials in Concrete*, CRC Press, p. 179, 2013.

[27] M. Shariq, J. Prasad, A. Masood, "Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 8, pp. 1469–1478, 2010.

[28] V.G. Papadakis, S. Tsimas, "Supplementary cementing materials in concrete: Part I", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 10, pp. 1525–1532, 2002.

[29] H.S. Chore, M.P. Joshi, "Strength evaluation of concrete with fly ash and GGBFS", *Advances in Concrete Construction*, vol. 3, no. 3, pp. 223–236, 2015.

[30] Y. Jin, N. Yazdani, "Substitution of Fly Ash, Slag, and Chemical Admixtures in Concrete Mix Designs", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 15, no. 6, pp. 602–608, 2003.

[31] N. Bouzoubaâ, S. Foo, *Use of Fly Ash and Slag in Concrete: A Best Practice Guide*, MTL (TR-R), p. 40, 2005.

[32] *Mô hình hóa và phân tích kết cấu cầu với MIDAS/Civil*, Ngô Đăng Quang (chủ biên); Trần Ngọc Linh, Bùi Công Độ, Nguyễn Trọng Nghĩa, Tập 2.