

# Khảo sát trường nhiệt độ bên trong cấu kiện tấm sàn phẳng ở giai đoạn tuổi sớm

Examination of temperature field in concrete slab at early age

> THS NGUYỄN KHÁNH HÙNG<sup>1\*</sup>, PGS.TS PHẠM THANH TÙNG<sup>2</sup>,  
PGS.TS NGUYỄN TUẤN TRUNG<sup>2</sup>, THS TRẦN THÁI DƯƠNG<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật Công trình, Trường Đại học Lạc Hồng; Email: nguyengkhanhhung@lhu.edu.vn

<sup>2</sup>Khoa Xây dựng DD&CN, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội; Email: tungpt@nuce.edu.vn, trungnt@nuce.edu.vn

## TÓM TẮT

Trong bài báo này, mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) được thiết lập để dự đoán trường nhiệt độ trong cấu kiện tấm sàn phẳng ở tuổi sớm dựa trên kết quả thí nghiệm của nghiên cứu khác về đo nhiệt độ đoạn nhiệt của mẫu bê tông. Để đánh giá độ chính xác của mô hình, nhiệt độ tại ba độ sâu của tấm sàn bê tông được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm. Các kết quả thu được từ mô hình số phù hợp tốt với các kết quả thí nghiệm về sự phát triển của nhiệt độ theo tuổi bê tông. Mô hình PTHH đề xuất có thể sử dụng được trong tính toán trường nhiệt độ của các cấu kiện bê tông ở giai đoạn tuổi sớm.

**Từ khóa:** Bê tông tuổi sớm; nhiệt thủy hóa; độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt; PTHH.

## ABSTRACT

In this paper, the finite element model (FEM) is proposed to predict the temperature field in flat slab structures at an early age based on the previous experiment in literature of measuring the adiabatic temperature of the concrete sample. To evaluate the accuracy of the model, the temperatures at three points through slab depth were examined. The numerical results obtained from the model are in good agreement with the experimental results on the development of temperature with concrete age. The developed model can be used to calculate the temperature field of early age concrete structures.

**Keywords:** Early-age concrete; heat of hydration; adiabatic temperature rise; FEM.

## GIỚI THIỆU

Có nhiều nguyên nhân dẫn đến nứt bê tông ở tuổi sớm, trong đó ứng suất nhiệt do thay đổi nhiệt độ và ứng suất co ngót do thay đổi độ ẩm là hai yếu tố ảnh hưởng quan trọng nhất [1, 2]. Trong giai đoạn tuổi sớm, sự tỏa nhiệt của quá trình thủy hóa xi măng và sự thay đổi của nhiệt độ môi trường bên ngoài [3] làm cho trường nhiệt độ bên trong kết cấu thay đổi và gây ra ứng suất nhiệt. Các yếu tố bên trong: loại xi măng, hàm lượng xi măng, độ mịn xi măng, tỷ lệ xi măng/nước, phụ gia, v.v. sẽ làm cho quá trình giải phóng nhiệt thủy hóa xi măng khác nhau. Đồng thời, những thay đổi về nhiệt độ môi trường, độ ẩm, tốc độ gió, bức xạ mặt trời, v.v dẫn đến sự truyền nhiệt giữa bên trong bê tông và môi trường bên ngoài cũng bị thay đổi. Ngoài ra, do nhiệt độ môi trường tại chỗ khác với các điều kiện thử nghiệm tăng nhiệt độ đoạn nhiệt trong phòng thí nghiệm, nên cần xem xét ảnh hưởng của nhiệt độ khi tính toán sự giải phóng nhiệt do thủy hóa xi măng tại chỗ.

Để đánh giá rủi ro nứt do ứng suất nhiệt gây ra, cần phải dự đoán được sự thay đổi nhiệt độ trong kết cấu. Do sự phức tạp của các yếu tố ảnh hưởng đến nhiệt thủy hóa ở độ tuổi sớm, các phương pháp số như phương pháp PTHH [4-7] hoặc phương pháp sai phân hữu hạn [1] đã được sử dụng rộng rãi để phân tích nhiệt của bê tông tuổi sớm. Al-Manaseer và Elias [8] đã sử dụng ABAQUS mô phỏng quá trình truyền nhiệt trong bê tông ở độ tuổi sớm; tuy

nhien, các đặc tính nhiệt của bê tông được cho là không đổi và nhiệt độ bề mặt bên ngoài được đơn giản hóa (bằng với nhiệt độ môi trường). Wu và cộng sự [9] đã tạo ra mô hình truyền nhiệt cho bê tông bằng ANSYS với sự đối lưu bề mặt có thể mô hình hóa sự mất nhiệt bề mặt ra môi trường xung quanh một cách thực tế. Lawrence và cộng sự [10] đã đánh giá ảnh hưởng của sự phát triển cường độ bê tông ở giai đoạn tuổi sớm đến sự xuất hiện vết nứt trong kết cấu móng cầu bằng phần mềm TNO DIANA; các tác giả đã xem xét những thay đổi về tính chất vật liệu, tải nhiệt thay đổi dựa trên mức độ hydrat hóa của bê tông, và sử dụng mô hình đối lưu nhiệt để tính đến sự mất nhiệt bề mặt.

Trong bài báo này, mô hình PTHH (DIANA FEA) được xây dựng để tính toán trường nhiệt độ của bê tông tuổi sớm dựa trên thí nghiệm độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông. Ảnh hưởng của nhiệt độ đối với sự giải phóng nhiệt của quá trình thủy hóa xi măng được hiệu chỉnh bằng phương pháp tuổi tương đương. Mối tương quan giữa nhiệt thủy hóa xi măng và tuổi tương đương được thiết lập, do đó ảnh hưởng của nhiệt độ (từ môi trường xung quanh, nhiệt độ đổ bê tông khác nhau, v.v...) đến trường nhiệt độ trong bê tông có thể được phản ánh trong mô hình. Ảnh hưởng của các yếu tố bên trong đối với trường nhiệt độ trong bê tông được phản ánh bằng dữ liệu từ thí nghiệm đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt. Nhiệt độ tại ba độ sâu của tấm sàn bê tông trong điều

kiện truyền nhiệt một chiều từ quá trình đổ bê tông đến một độ tuổi nhất định được đo bằng thực nghiệm. Dựa trên thí nghiệm đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt bê tông được tiến hành độc lập, sự phát triển nhiệt độ của cấu kiện tấm sàn phẳng được tính toán bằng mô hình đã thiết lập. Kết quả tính toán phù hợp tốt với kết quả đo được.

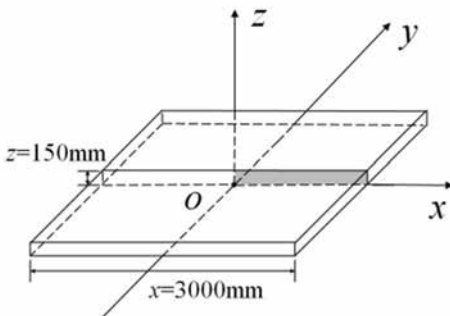
**1. TRƯỜNG NHIỆT ĐỘ TRONG TẤM SÀN PHẪNG**

**1.1. Phương trình vi phân dẫn nhiệt**

Xét tấm sàn phẳng trong Hình 1. Đối với cấu kiện dạng tấm, bề dày (z) được xem là nhỏ so với kích thước hai phương còn lại (x, y), do đó bài toán truyền nhiệt được xem xét là dẫn nhiệt một chiều theo phương z. Trong bài toán này, cần xét đến quá trình sinh nhiệt do phản ứng thủy hóa của xi măng (nguồn nhiệt bên trong), sự dẫn nhiệt trong bê tông và quá trình trao đổi nhiệt giữa bề mặt bê tông và môi trường xung quanh. Trường nhiệt độ trong tấm sàn ở dạng một chiều được cho bởi biểu thức (1) [11]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_h(t, T) \tag{1}$$

trong đó:  $\rho$  - khối lượng riêng (kg/m<sup>3</sup>);  $c$  - nhiệt dung riêng (J/kg-K);  $\lambda$  - hệ số dẫn nhiệt (W/m-K);  $T$  - nhiệt độ (°C);  $t$  - thời gian (s);  $Q_h(t, T)$  - tốc độ nhiệt lượng sinh ra trong một đơn vị thể tích (W/m<sup>3</sup>)

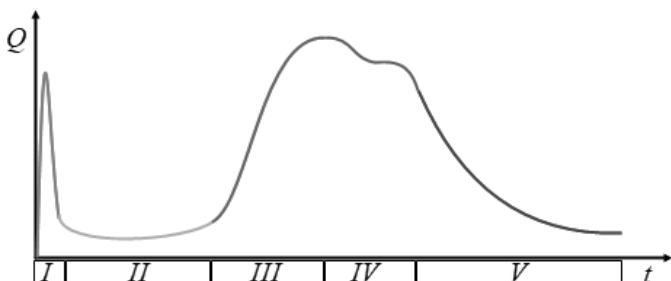


Hình 1. Mô hình tấm sàn phẳng

**1.2. Nhiệt thủy hóa của bê tông**

**1.2.1. Sự phát triển nhiệt độ trong quá trình thủy hóa**

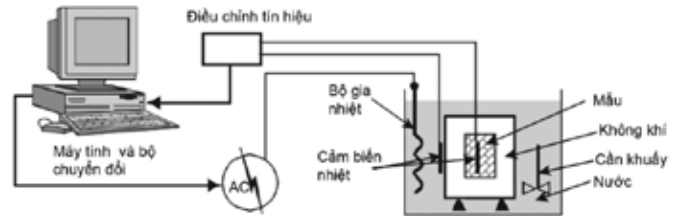
Quá trình hydrat hóa của một hỗn hợp bê tông điển hình có thể được nghiên cứu với nhiệt lượng kế đo tốc độ giải phóng nhiệt của xi măng ở nhiệt độ cụ thể. Hình 2 cho thấy quá trình hydrat hóa điển hình với năm giai đoạn khác nhau [12, 13]. *Giai đoạn I*: xảy ra ngay sau khi tiếp xúc với nước, tốc độ sinh nhiệt cao, kéo dài khoảng 15 đến 30 phút. *Giai đoạn II*: tốc độ hydrat hóa rất nhỏ là giai đoạn ngủ đông, khoảng thời gian này thường kéo dài dưới 5 giờ. *Giai đoạn III*: quá trình hydrat hóa diễn ra tích cực khi tốc độ sinh nhiệt tăng lên. *Giai đoạn IV*: tốc độ sinh nhiệt chậm dần. *Giai đoạn V*: tốc độ hydrat hóa giảm đáng kể do lớp hydrat dày hơn xung quanh các hạt. *Giai đoạn IV* và *V* được gọi là giai đoạn kiểm soát khuếch tán.



Hình 2. Các giai đoạn hydrat hóa điển hình

**1.2.2. Thực nghiệm đo nhiệt độ đoạn nhiệt cho hỗn hợp bê tông**

Để dự đoán sự thay đổi nhiệt độ, đường cong nhiệt tự sinh của bê tông có thể được xác định từ độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt (adiabatic temperature rise - ATR). Nhiệt lượng kế đoạn nhiệt cho vật liệu bê tông đã được phát triển sử dụng khái niệm được mô tả bởi Gibbon và cộng sự [14], sau đó được cải tiến bởi Lin và Chen [7]. Nhiệt lượng kế được Do và cộng sự [15] sử dụng để đo ATR của bê tông được mô tả trong Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm đo nhiệt lượng đoạn nhiệt

Trong cấu hình thí nghiệm này, mẫu bê tông được đặt vào một hộp cách nhiệt (ở đây sử dụng vật liệu xốp thay cho không khí), hộp này lại được đặt trong một thùng có vỏ cách nhiệt chứa đầy nước. Một cảm biến nhiệt độ (T1) đặt ở tâm của mẫu bê tông và một cảm biến khác (T2) đặt trong nước để đo nhiệt độ của bê tông và nước liên tục theo thời gian. Tín hiệu nhiệt độ từ cảm biến T1 sẽ được theo dõi bởi máy tính thông qua thẻ chuyển đổi tín hiệu tương tự (analog) sang tín hiệu số (digital). Một bộ gia nhiệt đặt trong thùng nước sẽ được điều khiển tự động bật/tắt để luôn giữ cho nhiệt độ của nước bằng với nhiệt độ của khối bê tông. Điều này đảm bảo rằng không xảy ra sự trao đổi nhiệt giữa mẫu bê tông và môi trường xung quanh. Thí nghiệm này thường được tiến hành từ khi trộn bê tông xong cho đến thời điểm nhiệt độ của mẫu thí nghiệm ổn định, thông thường là trong khoảng thời gian từ 2 đến 5 ngày. Thiết bị đo nhiệt lượng có thể được căn chỉnh thông qua các thông số cài đặt sẵn trong phần mềm điều khiển.

**1.2.3. Xác định tốc độ sinh nhiệt do thủy hóa và các tham số**

Nhiệt lượng được giải phóng trong quá trình thủy hóa xi măng là nguồn nhiệt khi xét đến sự truyền nhiệt trong bê tông. Tốc độ sinh nhiệt thủy hóa phụ thuộc vào bản thân hỗn hợp bê tông và lịch sử nhiệt độ của bê tông. Khi được đúc trong môi trường nhiệt độ khác nhau, hai kết cấu bê tông giống nhau có thể có tải trọng nhiệt khác nhau. Tốc độ sinh nhiệt cũng có thể thay đổi trong một cấu kiện bê tông do sự phân bố nhiệt độ bên trong không đồng đều [7]. Để xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ, khái niệm tuổi tương đương [16] được sử dụng trong mô hình hydrat hóa biểu thị bằng biểu thức (2) [17]:

$$\alpha(t_e) = \alpha_u \exp\left(-\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta \tag{2}$$

trong đó:  $\alpha_u$  - mức độ thủy hóa tới hạn;  $\tau, \beta$  - hằng số thực nghiệm, có thể được xác định qua các kết quả thí nghiệm đoạn nhiệt;  $t_e$  - tuổi tương đương (h).

Trong phương trình (2), các tham số hydrat hóa ( $\tau, \beta$ ) kiểm soát hình dạng của đường cong mức độ hydrat hóa và được xác định bằng phương pháp bình phương tối thiểu, sử dụng đường cong ATR sau khi chuyển đổi trực thời gian sang tuổi tương đương ( $t_e$ ). Tuổi tương đương ( $t_e$ ) và mức độ hydrat hóa tới hạn ( $\alpha_u$ ) có thể được tính bằng biểu thức (3) [16] và biểu thức (4) [18]:

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_c(t)}\right)\right) dt \tag{3}$$

$$\alpha_u = \frac{1,031w/c}{0,194 + w/c} \quad (4)$$

trong đó:  $E_a$  - năng lượng kích hoạt biểu kiến, (J/mol);  $R$  - hằng số khí lý tưởng;  $T_c(t)$  - nhiệt độ trung bình của bê tông trong khoảng thời gian  $\Delta t_i$ , (°C);  $T_r$  là nhiệt độ tham chiếu (thông thường 20°C hoặc 23°C);  $w/c$  - tỷ lệ nước/xi măng.

Xét một đơn vị thể tích bê tông, tổng nhiệt lượng tỏa ra  $Q(t_e)$  theo tuổi tương đương bằng tích của tổng nhiệt khả dụng ( $Q_c$ ) và mức độ hydrat hóa  $\alpha(t_e)$ , biểu thức (5). Tốc độ sinh nhiệt  $q(t_e)$  có thể được tính là đạo hàm bậc nhất của  $Q(t_e)$  như trong biểu thức (6), và tốc độ sinh nhiệt thủy hóa theo thời gian thực  $q(t)$  được tính theo biểu thức (8).

$$Q(t_e) = Q_c \cdot \alpha(t_e) \quad (5)$$

$$Q_c = H_u \cdot C_c \quad (5)$$

$$q(t_e) = \frac{dQ}{dt_e} = Q_c \cdot \alpha(t_e) \cdot \left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta \frac{\beta}{t_e} \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dt_e} \cdot \frac{dt_e}{dt} = q(t) \quad (7)$$

$$q(t) = Q_c \cdot \alpha(t_e) \cdot \left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta \cdot \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_c(t)}\right)\right] \quad (8)$$

trong đó:  $H_u$  - tổng nhiệt lượng tỏa ra ở thời điểm cuối cùng của quá trình thủy hóa (J/kg);  $C_c$  - tổng khối lượng của hỗn hợp chất kết dính (kg/m<sup>3</sup>).

Năng lượng kích hoạt biểu kiến ( $E_a$ ) của hỗn hợp bê tông có thể được tính toán theo tiêu chuẩn ASTM C 1074 [19], hoặc theo công thức đề xuất bởi Schindler [20]. Tổng năng lượng hydrat hóa trên mỗi kilôgam trong xi măng Portland ( $H_u$ ) được tính theo ASTM C 150 [21, 22]. Tổng năng lượng thủy hóa trên một đơn vị thể tích ( $Q_c$ , J/m<sup>3</sup>) là tích của ( $H_u$ ) và khối lượng xi măng trên một đơn vị thể tích ( $C_c$ ). Biểu thức (3) để tính tuổi tương đương được quy về theo bước thời gian theo phương pháp số theo biểu thức (9) (ASTM C 1074, [19]):

$$t_e = \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273 + T_c(t)} - \frac{1}{273 + T_r}\right)\right] \Delta t_i \quad (9)$$

**1.2.4. Độ dẫn nhiệt và nhiệt dung riêng**

Ở tuổi sớm, tính chất vật liệu bê tông và tính chất nhiệt liên tục thay đổi. Theo Van Breugel [23], nhiệt dung riêng ( $C_p$ , J/kg-K) của bê tông phụ thuộc vào tỷ lệ cấp phối, mức độ thủy hóa, nhiệt độ bê tông và được tính theo biểu thức (10). Độ dẫn nhiệt của bê tông ( $K_c$ , W/m-K) phụ thuộc vào mức độ thủy hóa theo biểu thức (11):

$$C_p(\alpha_r, T(t)) = \frac{1}{\rho} (W_c \alpha_r C_{cef} + W_c (1 - \alpha_r) C_{cem} + W_a C_a + W_w C_w) \quad (10)$$

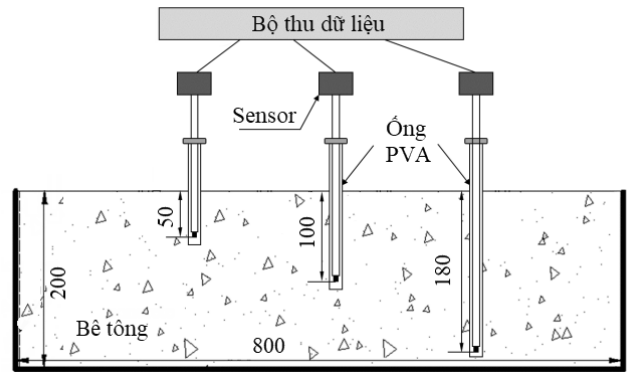
$$K_c(\alpha_r) = K_{uc} (1,33 - 0,33\alpha_r(t)) \quad (11)$$

trong đó:  $\alpha_r = \alpha / \alpha_u$ ;  $\rho$  - khối lượng riêng của bê tông, kg/m<sup>3</sup>;  $W_c$  - khối lượng riêng xi măng, kg/m<sup>3</sup>;  $W_a$  - khối lượng riêng cốt liệu, kg/m<sup>3</sup>;  $W_w$  - khối lượng riêng nước, kg/m<sup>3</sup>;  $C_{cem}$  - nhiệt dung riêng của xi măng, J/kg-K;  $C_a$  - nhiệt dung riêng của cốt liệu, J/kg-K;  $C_w$  - nhiệt dung riêng của nước, J/kg-K;  $C_{cef}$  - nhiệt dung riêng giả định của xi măng thủy hóa, J/kg-K;  $K_{uc}$  - hệ số dẫn nhiệt của bê tông đông cứng, W/m-K.

**2. THÍ NGHIỆM TẮM SÀN [24]**

Thí nghiệm được thực hiện bởi Zhang và cộng sự [24] với mẫu thử có kích thước 200mm×200mm×800mm. Bề mặt bên trong của

khôn thí nghiệm được phủ một lớp màng nhựa và bề mặt bên ngoài được phủ một tấm cách nhiệt dày 50mm để hạn chế tối đa sự truyền nhiệt qua mặt đáy và mặt bên của khuôn, mặt trên khuôn được để trống và tiếp xúc tự do với môi trường bên ngoài. Với cấu hình như vậy, quá trình trao đổi nhiệt giữa bê tông và môi trường có thể được xem là truyền nhiệt một chiều dọc theo hướng độ dày của tấm. Để thực hiện phép đo nhiệt độ của bê tông ở độ tuổi sớm, các ống nhựa được chôn ở vị trí đã định khi đổ bê tông. Ống nhựa có đáy được bịt kín và có một lỗ rỗng 3mm được tạo sẵn trên thành ống để đảm bảo rằng cảm biến nhiệt độ có thể đo chính xác nhiệt độ của bê tông liền kề. Nhiệt độ được đo đồng thời ở 3 độ sâu khác nhau (50mm, 100mm và 180mm tính từ bề mặt trên) bởi các cảm biến nhiệt độ điện dung (phạm vi đo 0°C-120°C, sai số ±0,5°C). Dữ liệu do cảm biến thu thập được kết nối với bộ thu và máy tính, dữ liệu nhiệt độ được ghi lại với tần suất 10 phút trong quá trình thử nghiệm. Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện trong Hình 4.



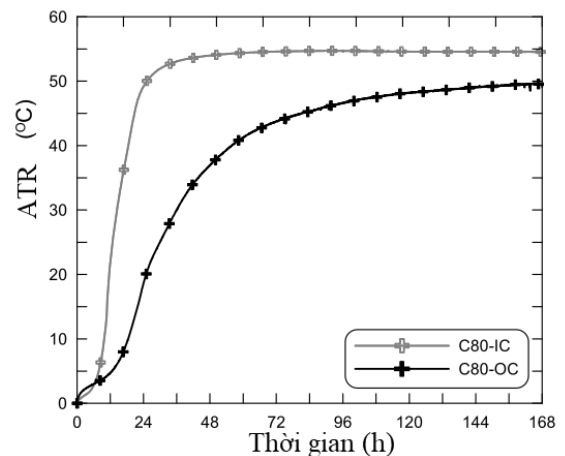
**Hình 4.** Sơ đồ thí nghiệm đo nhiệt độ

Xi măng sử dụng trong thí nghiệm là xi măng P.O.42.5, tỷ trọng 3,1g/cm<sup>3</sup>; cát tự nhiên, mô đun độ mịn 2,64; đá vôi dăm, cỡ hạt 5mm-25mm; nước máy bình thường. Thành phần cấp phối cho hỗn hợp bê tông được thể hiện trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Thành phần cấp phối bê tông.

BT	Xi măng (kg/m <sup>3</sup> )	Nước (kg/m <sup>3</sup> )	Cát (kg/m <sup>3</sup> )	Đá (kg/m <sup>3</sup> )	Silica (kg/m <sup>3</sup> )	Tro bay (kg/m <sup>3</sup> )	Phụ gia (kg/m <sup>3</sup> )
C80	450,0	150,0	572,0	1184,0	50,0	-	4,4

Để tính toán nhiệt thủy hóa của bê tông, thí nghiệm đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt đã được thực hiện [25]. Đường cong phát triển nhiệt độ đoạn nhiệt của các hỗn hợp được thể hiện trong Hình 5, các thông số nhiệt liên quan được liệt kê trong Bảng 2.



**Hình 5.** Độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt của mẫu hỗn hợp

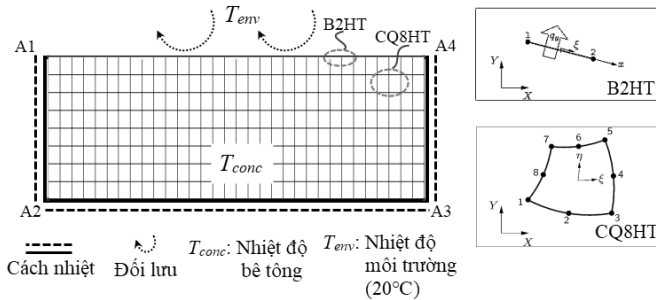
Bảng 2. Các thông số nhiệt bê tông C80

BT	Hệ số dẫn nhiệt (kJ/m-h-°C)	Nhiệt dung riêng (kJ/kg-°C)	Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )
C80	8,8520	0,9464	2366,3

**3. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN (DIANA FEA)**

**3.1. Thiết lập mô hình PTHH**

Phân tích PTHH được thực hiện thông qua phần mềm DIANA FEA. Phân tích truyền nhiệt phi tuyến tính được thực hiện để nghiên cứu quá trình đông cứng và từ đó xác định sự phát triển của nhiệt độ do quá trình đông cứng gây ra theo thời gian. Để mô phỏng điều kiện thí nghiệm với giả thiết gradient nhiệt chủ yếu phát triển theo bề dày tấm sàn, mô hình hai chiều biến dạng phẳng được thiết lập (Hình 6). Bê tông được mô hình hóa bằng các phần tử đẳng tham số tứ giác (CQ8HT). Các phần tử biên hai nút (B2HT) được đặt dọc theo chu vi để mô hình điều kiện biên. Điều kiện đoạn nhiệt được áp đặt dọc theo các biên A1-A2, A2-A3 và A3-A4. Điều kiện biên đối lưu được áp dụng cho biên A1-A4. Lưới phần tử và điều kiện biên được thể hiện trên Hình 6. Các thông số vật liệu được xác định từ Bảng 1 và Bảng 2.

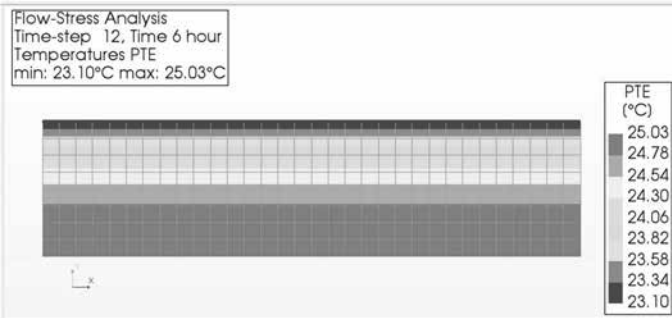


Hình 6. Mô hình PTHH và điều kiện biên trao đổi nhiệt dựa theo thí nghiệm

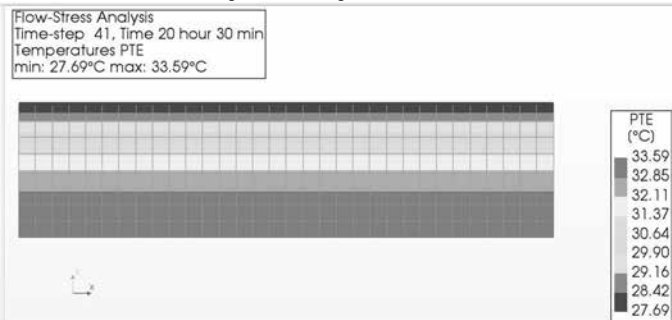
**3.2. Kết quả mô phỏng**

**Trường nhiệt độ trong tấm sàn**

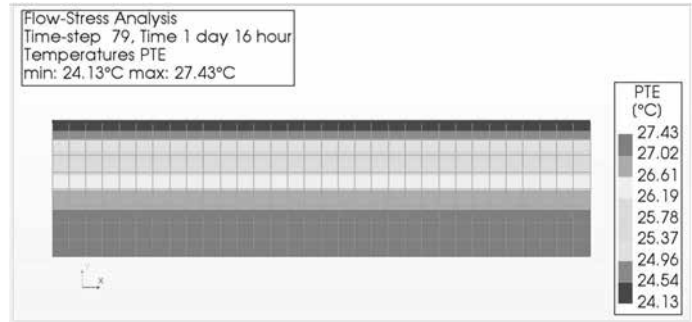
Hình 7 đến Hình 9 cho thấy các giá trị nhiệt độ từ kết quả tính toán mô hình PTHH của ở các thời điểm khác nhau (6h, 20h và 40h) sau khi đổ bê tông.



Hình 7. Trường nhiệt độ trong tấm sàn tại thời điểm 6h (Diana)

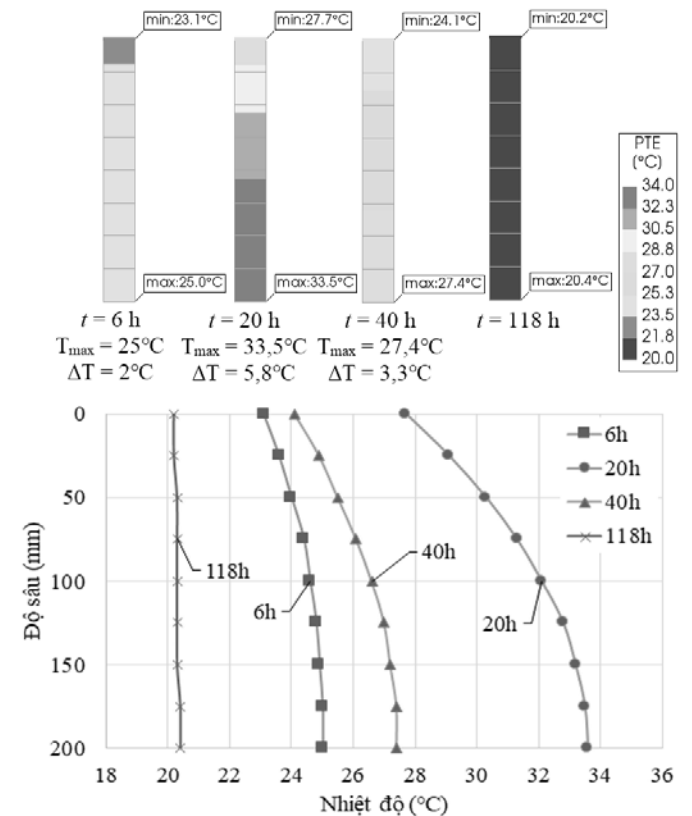


Hình 8. Trường nhiệt độ trong tấm sàn tại thời điểm 20h (Diana)



Hình 9. Trường nhiệt độ trong tấm sàn tại thời điểm 40h (Diana)

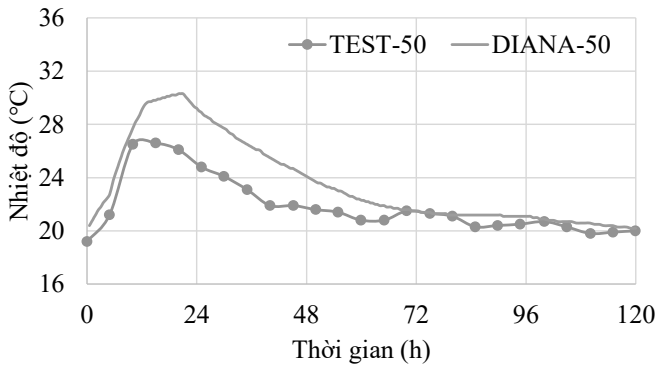
Hình 10 thể sự thay đổi của trường nhiệt độ ở giai đoạn tuổi sớm. Độ chênh lệch nhiệt độ (theo độ sâu) trước giai đoạn "tăng tốc" (6h) và trong giai đoạn "giảm tốc" (40h) của quá trình thủy hóa là không đáng kể (2-3°C). Trong giai đoạn "tăng tốc" (20h), độ chênh lệch nhiệt độ trở nên rõ ràng hơn (~6°C). Sau đó nhiệt độ trong tấm sàn phân bố đều và tương đương với nhiệt độ môi trường khi quá trình truyền nhiệt trở nên cân bằng (118h). Sự thay đổi này phản ánh rõ ràng bởi độ dốc của các đường cong nhiệt độ tại các thời điểm tương ứng (6h, 20h, 40h và 118h).



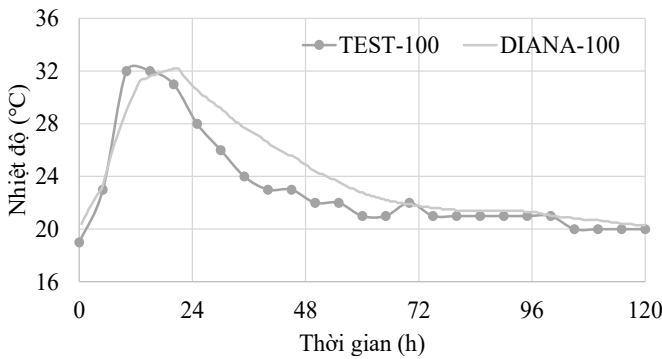
Hình 10. Trường nhiệt độ trong tấm sàn theo thời gian

**So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm**

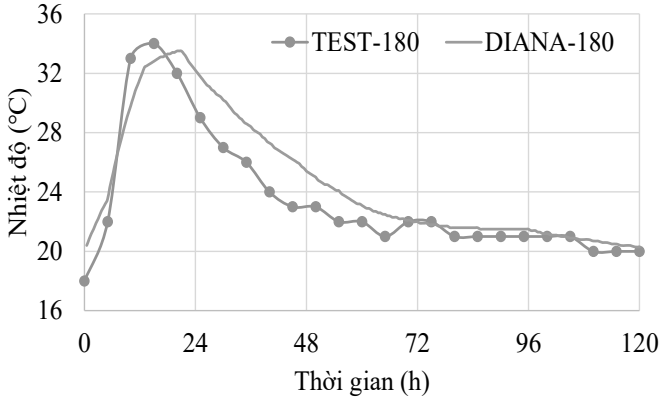
Hình 11 đến Hình 13 cho thấy các giá trị đo được từ thí nghiệm và kết quả tính toán mô hình PTHH của nhiệt độ ở các độ sâu khác nhau (50mm, 100mm và 180mm từ bề mặt trên) của tấm bê tông cường độ C80 trong điều kiện bảo dưỡng tự nhiên trong nhà. Có thể thấy rằng, do tác dụng tỏa nhiệt của quá trình hydrat hóa, nhiệt độ bên trong của bê tông tăng nhanh sau khi đổ trong các điều kiện bảo dưỡng tự nhiên, và đạt cực đại trong khoảng từ 12 giờ đến 21 giờ. Nhiệt độ cực đại ở mức 50mm là thấp nhất, nhiệt độ cực đại ở mức 180mm là cao nhất. Sau đó, nhiệt độ bên trong bê tông giảm dần về mức nhiệt độ môi trường.



Hình 11. Nhiệt độ tại độ sâu 50mm



Hình 12. Nhiệt độ tại độ sâu 100mm



Hình 13. Nhiệt độ tại độ sâu 180mm

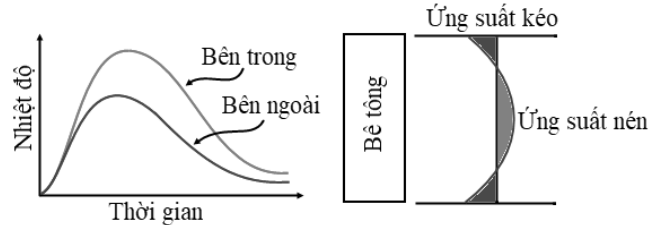
Thời điểm nhiệt độ đạt mức cao nhất giữa mô phỏng và thực nghiệm có độ chênh lệch khoảng 6h và nhiệt độ trong giai đoạn suy giảm nhiệt độ thu được từ mô phỏng ở mức cao hơn so với giá trị thực nghiệm. Các sai lệch này có thể đến từ hai nguyên nhân: (i) Giai đoạn "ngủ đông" khi bắt đầu quá trình hydrat hóa không được mô phỏng chính xác, dẫn đến sự khác biệt trong giai đoạn "tăng tốc". (ii) Các giả định đơn giản hóa được thực hiện: điều kiện biên tại các biên A1-A2, A2-A3 và A3-A4 được xem là cách nhiệt tuyệt đối trong mô hình PTHH, trong khi thực tế lớp cách nhiệt không thể đảm bảo điều kiện này; hệ số đối lưu ở ranh giới trên giữa tấm sàn và môi trường (biên A1-A4) chưa được xác định một cách chính xác.

Nhìn chung, các kết quả từ tính toán mô phỏng phù hợp với kết quả đo được và có thể phản ánh đầy đủ các đặc điểm phát triển nhiệt độ bên trong của bê tông ở tuổi sớm. Mô hình PTHH dùng để tính toán trường nhiệt độ với thông số đầu vào là độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt được thực lập trong bài báo này có thể dự đoán một cách đáng tin cậy sự phát triển nhiệt độ trong cấu trúc

bê tông và cung cấp dữ liệu về trường nhiệt độ để tính toán ứng suất nhiệt của bê tông tuổi sớm.

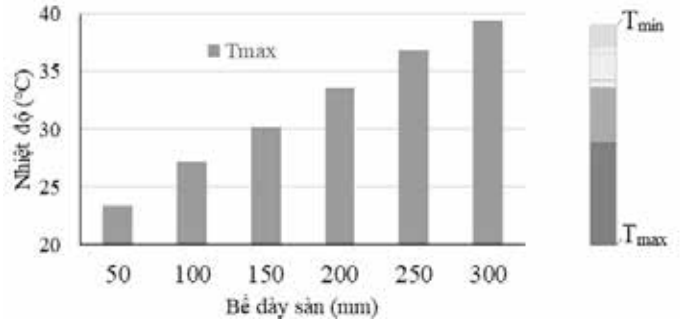
**Ảnh hưởng yếu tố chiều dày đến trường nhiệt độ**

Khi đổ bê tông, nhiệt độ bên trong tăng nhanh do nhiệt thủy hóa và thể tích bên trong nở ra, nhưng biến dạng của bề mặt bê tông nhỏ và thể tích bề mặt co lại do nhiệt độ môi trường như trong Hình 14. Sự chênh lệch nhiệt độ trong bê tông tuổi sớm giữa lõi và bề mặt của thể tích bê tông có thể gây ra ứng suất nhiệt và nứt nhiệt khi ứng suất kéo lớn hơn cường độ chịu kéo. Các vết nứt nhiệt thường phát sinh khi nhiệt độ đạt cực đại trong vòng 1-5 ngày sau khi đổ bê tông [26].



Hình 14. Phân bố ứng suất trong bê tông khối lớn do chênh lệch nhiệt độ

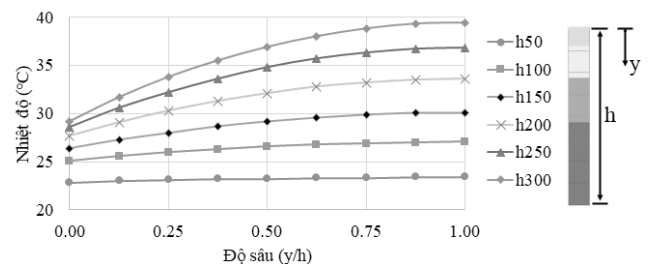
Để ngăn ngừa sự hình thành vết nứt trong kết cấu bê tông khối lớn ở tuổi sớm ngay cần giảm sự chênh lệch nhiệt độ ( $\Delta T$ ) sao cho chúng nhỏ hơn giá trị cho phép. Hình 15. thể hiện sự thay đổi của nhiệt độ lớn nhất ( $T_{max}$ ) tại đáy sàn ứng với các bề dày sàn ( $h$ ) khác nhau (50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm và 300mm). Khi  $h$  càng lớn thì  $T_{max}$  càng lớn.



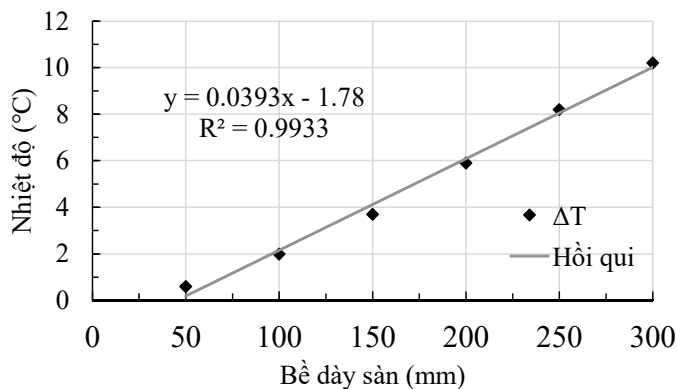
Hình 15. Nhiệt độ lớn nhất theo bề dày sàn

Hình 16. mô tả sự thay đổi của trường nhiệt độ theo độ sâu (tại thời điểm nhiệt độ đạt mức cao nhất) khi bề dày tấm sàn ( $h$ ) thay đổi. Khi  $h \leq 100\text{mm}$ , trường nhiệt độ trong tấm tương đối đồng đều ( $\Delta T \sim 2^\circ\text{C}$ ). Khi  $h \geq 200\text{mm}$ , trường nhiệt độ trong tấm thể hiện sự chênh lệch khá rõ, thể hiện qua sự phi tuyến của đường cong phân bố nhiệt độ; khi  $h$  càng tăng thì độ chênh lệch nhiệt độ ( $\Delta T$ ) càng lớn. Ảnh hưởng của bề dày sàn ( $h$ ) đến chênh lệch nhiệt độ trong các khối bê tông được trình bày trong hình 17. Từ kết quả mô phỏng, có thể nhận thấy rằng, việc tăng bề dày sàn dẫn đến độ chênh lệch nhiệt độ trong khối bê tông càng lớn, giữa  $h$  và  $\Delta T$  có mối quan hệ tuyến tính theo biểu thức (12)

$$\Delta T = 0,0393h - 1,78 \quad (R^2 = 0,9933) \quad (12)$$



Hình 16. Phân bố nhiệt độ trong các tấm sàn có bề dày khác nhau



Hình 17. Độ chênh lệch nhiệt độ theo bề dày sàn

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo này để xuất một mô hình tính toán PTHH (DIANA FEA) cho trường nhiệt độ của bê tông ở tuổi sớm dựa trên thí nghiệm đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt. Kết quả tính toán phát triển nhiệt độ của bê tông (C80) trong các điều kiện truyền nhiệt một chiều và bảo dưỡng tự nhiên được so sánh với dữ liệu thu được thông qua thí nghiệm từ nghiên cứu của Zhang và cộng sự [24].

Mô hình có thể được sử dụng để tính toán trường nhiệt độ của các cấu kiện bê tông tuổi sớm. Tuy nhiên, bộ thông số đầu vào cho bài toán nhiệt (hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng, đường cong nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông) cần được xác định chính xác từ phòng thí nghiệm. Đối với các kết cấu phức tạp về hình học và điều kiện môi trường, kết quả đo đạc nhiệt độ từ khối đổ mẫu (mock-up) là rất cần thiết để hiệu chỉnh các tham số đầu vào của mô hình.

Các kết quả tính toán mô hình PTHH (DIANA FEA) phù hợp tốt với kết quả đo thực nghiệm. Do vậy, mô hình dùng để mô phỏng trong nghiên cứu này hoàn toàn có thể dùng để mô phỏng sự phân phát triển và phân bố nhiệt độ trong cấu kiện tấm sàn phẳng nhằm tránh được hiện tượng nứt do nhiệt thủy hóa.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ballim Y. A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(6):695-703.
- [2]. Schindler A, Ruiz J, Rasmussen R, Chang G, Wathne L. Concrete pavement temperature prediction and case studies with the FHWA HIPERPAV models. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(5):463-71.
- [3]. Kim JK, Han SH, Lee KM. Estimation of compressive strength by a new apparent activation energy function. *Cement and Concrete Research*. 2001;31(2):217-25.
- [4]. Bombich AA, Garner S, Norman CD. Evaluation of parameters affecting thermal stresses in mass concrete. *CONCRETE TECHNOLOGY INFORMATION ANALYSIS CENTER VICKSBURG MS*; 1991.
- [5]. Kim JK, Kim KH, Yang JK. Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system. *Computers & Structures*. 2001;79(2):163-71.
- [6]. Waller V, d'Aloia L, Cussigh F, Lecrux S. Using the maturity method in concrete cracking control at early ages. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(5):589-99.
- [7]. Lin Y, Chen H-L. Thermal analysis and adiabatic calorimetry for early-age concrete members. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015;122:937-45.
- [8]. Al-Manaseer A, Elias N. Placement of mass concrete for cast-in-place concrete piling: the effects of heat of hydration of mass concrete for cast-in-place piles. California. Dept. of Transportation. Division of Research and Innovation; 2008.
- [9]. Wu S, Huang D, Lin F-B, Zhao H, Wang P. Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011;105(1):171-86.

[10]. Lawrence AM, Tia M, Ferraro CC, Bergin M. Effect of early age strength on cracking in mass concrete containing different supplementary cementitious materials: experimental and finite-element investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012;24(4):362-72.

[11]. Holman JP. *Heat transfer*: McGraw Hill Higher Education; 2010.

[12]. Ge Z. Predicting temperature and strength development of the field concrete: Iowa State University; 2005.

[13]. Mindess S, Young JF, Darwin D. *Concrete* Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ. 1981;481.

[14]. Gibbon G, Ballim Y, GRIEVE GH. A low-cost, computer-controlled adiabatic calorimeter for determining the heat of hydration of concrete. *Journal of Testing and Evaluation*. 1997;25(2):261-6.

[15]. Anh TĐ, Xuân TV, Việt HH, Thị TH, Hoài NN. Mức độ thủy hóa và sự phát triển cường độ trong bê tông cường độ cao. *Tạp chí khoa học Giao thông vận tải*. 2019;70(2):85-94.

[16]. Hansen PF, Pedersen E. *Curing of concrete structures*: BKI; 1984.

[17]. Hansen PF, Pedersen EJ. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete. 1977.

[18]. Mills R. Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes. *Highway Research Board Special Report*. 1966(90).

[19]. ASTM C-. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. *ASTM Standards*. 2004;4.

[20]. Schindler AK. Effect of temperature on hydration of cementitious materials. *Materials Journal*. 2004;101(1):72-81.

[21]. ASTM C. Standard specification for Portland cement. *ASTM Philadelphia, PA, USA*; 2001.

[22]. Robbins ME, editor *Predicting the early age temperature response of concrete using isothermal calorimetry* 2007.

[23]. Van Breugel K. *Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-based Materials*. PhD thesis. Delft University of Technology, Delft. 1991.

[24]. Jun Z, Kun Q, Dong-wei H. Calculation of temperature fields in early age concrete based on adiabatic test. *工程力学*. 2009;26(8):155-60.

[25]. Wang J, Zhang J, Zhang J. Cement hydration rate of ordinarily and internally cured concretes. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2018;16(7):306-16.

[26]. Kim SG. Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. 2010.