

PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA SỰ SINH NHIỆT TỪ QUÁ TRÌNH THỦY HÓA XI MĂNG LÊN BÊ TÔNG KHỐI LỚN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Analysis of the Effect of Heat Generation from Cement Hydration on Mass Concrete Using the Finite Element Method

Nguyễn Võ Tấn Phúc¹ và Trương Tích Thiện²

¹Học viên cao học Trường Đại học Kinh tế Công nghiệp Long An, Tây Ninh, Việt Nam
tanphuc17xd@gmail.com

²Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG TP.HCM, TP.HCM, Việt Nam
ttruong@hcmut.edu.vn

Tóm tắt — Các kết cấu bê tông khối lớn đối mặt với nguy cơ nứt do nhiệt sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng. Sự chênh lệch nhiệt độ bên trong bê tông tạo ra ứng suất kéo lớn, có thể vượt quá cường độ chịu kéo của vật liệu, dẫn đến hiện tượng nứt. Nghiên cứu này phân tích ảnh hưởng của nhiệt thủy hóa lên bê tông khối lớn bằng Phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM). Một mô hình số được xây dựng để mô phỏng quá trình truyền nhiệt, có tính đến sự phát sinh nhiệt từ thủy hóa, khả năng dẫn nhiệt của vật liệu và điều kiện biên. Phương trình truyền nhiệt được giải bằng quy tắc hình thang tổng quát. Sau đó, phân bố ứng suất nhiệt được đánh giá để xác định nguy cơ nứt dựa trên chỉ số nứt nhiệt. Kết quả cung cấp hiểu biết quan trọng về sự phát triển nhiệt độ và xu hướng nứt trong bê tông khối lớn dưới các điều kiện khác nhau, hỗ trợ kỹ sư trong việc tối ưu hóa thành phần bê tông, quy trình thi công và các biện pháp kiểm soát nhiệt nhằm giảm thiểu nguy cơ nứt trong các công trình quy mô lớn.

Abstract — Mass concrete structures are prone to thermal cracking due to the heat generation from cement hydration. The temperature gradients that develop within the concrete can lead to significant tensile stresses, exceeding the material's tensile strength and causing cracking. This study aims to analyze the effects of cement hydration heat on mass concrete using the finite element method (FEM). A numerical model is developed to simulate the heat transfer process within mass concrete, incorporating heat generation due to hydration, thermal conductivity, and boundary conditions. The governing heat transfer equation is solved using an implicit time-stepping scheme, specifically the generalized trapezoidal rule. The thermal stress distribution is then evaluated to assess the risk of cracking based on thermal crack indices. The findings provide insights into the temperature evolution and cracking tendency of mass concrete structures under different conditions. The results can assist engineers in optimizing mix design, construction procedures, and cooling strategies to mitigate thermal cracking risks in large-scale concrete projects.

Từ khóa — Bê tông khối lớn, thủy hóa xi măng, ứng suất nhiệt, phần tử hữu hạn, nứt nhiệt.

1. Giới thiệu

Bê tông khối lớn là thành phần thiết yếu trong các công trình như đập thủy điện, móng nhà cao tầng, cầu lớn. Đặc tính nổi bật của loại bê tông này là khả năng sinh nhiệt cao do quá trình thủy hóa xi măng, có thể dẫn đến trạng thái đoạn nhiệt cục bộ do hạn chế tản nhiệt ra môi trường. Khi nhiệt độ bên trong và bề mặt bê tông chênh lệch lớn, ứng suất nhiệt phát sinh, vượt quá cường độ chịu kéo của vật liệu, gây ra nứt vỡ. Việc kiểm soát nhiệt độ và ứng suất trong bê tông khối lớn là tối quan trọng để đảm bảo chất lượng và tuổi thọ công trình.

Hiện tượng nứt nhiệt trong bê tông khối lớn chịu ảnh hưởng bởi các yếu tố nội tại (như loại và hàm lượng xi măng, tính chất nhiệt vật liệu, nhiệt

độ đổ bê tông, cấp phối) và yếu tố bên ngoài (như điều kiện biên nhiệt độ, độ ẩm, tốc độ gió, phương pháp bảo dưỡng). Phân tích trường nhiệt độ và ứng suất là phức tạp do khối tích lớn và điều kiện biên đa dạng [1, 2]. Phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM) đã chứng tỏ là công cụ hiệu quả và đáng tin cậy trong việc mô phỏng và dự đoán quy luật phát triển nhiệt độ, ứng suất, từ đó đề xuất biện pháp thi công phù hợp [3, 4].

Nghiên cứu này tập trung vào phân tích ảnh hưởng của sự sinh nhiệt từ quá trình thủy hóa xi măng lên bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mục tiêu chính là nghiên cứu ứng suất nhiệt trong đập bê tông khối lớn và xem xét khả năng sử dụng xi măng có bổ sung tro bay để giảm nhiệt độ, dựa trên mô hình một khối bê

<https://doi.org/10.63783/dla.2025.052>

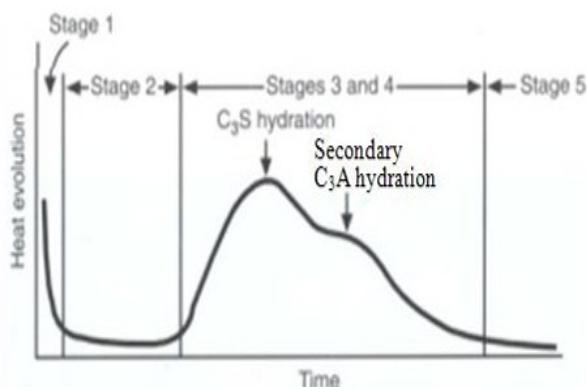
Ngày nộp bài: 18/7/2025; **Ngày nhận bản chỉnh sửa:** 09/9/2025; **Ngày duyệt đăng:** 24/09/2025

tông đập, thực tế tại Hàn Quốc [5]. Nghiên cứu lý thuyết nhiệt thủy hóa, xây dựng quy trình mô phỏng trong ANSYS cho bài toán truyền nhiệt và trường cặp đôi cơ-nhiệt, và đề xuất giải pháp hạn chế nứt.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Thủy hóa xi măng và bê tông khối lớn

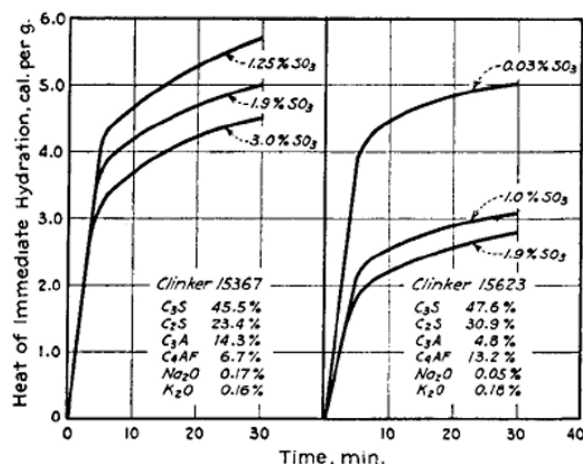
Xi măng Portland thông thường (OPC) là vật liệu liên kết thủy lực chủ yếu trong bê tông, bao gồm bốn hợp chất chính: C_3S , C_2S , C_3A và C_4AF . Quá trình thủy hóa xi măng là phản ứng tỏa nhiệt giữa xi măng và nước, tạo thành các sản phẩm như C-S-H và $Ca(OH)_2$. Tốc độ tỏa nhiệt trải qua nhiều giai đoạn đặc trưng, thể hiện Hình 1. Quá trình thủy hóa xi măng có 5 giai đoạn chính. Giai đoạn hòa tan (stage I), các ion hòa tan trong nước, phản ứng với thạch cao, tạo ettringite nhưng chưa ảnh hưởng đến cường độ bê tông. Giai đoạn ngủ (stage II - dormant period), xi măng vẫn ở trạng thái dẻo, thuận lợi cho quá trình thi công. Giai đoạn tăng tốc (stage III - acceleration stage), C_3S và C_2S bắt đầu thủy hóa mạnh, sinh nhiệt nhanh, bê tông bắt đầu đóng rắn và phát triển cường độ sớm. Giai đoạn giảm tốc (stage IV - deceleration stage), tốc độ thủy hóa giảm, lớp sản phẩm thủy hóa dày lên, ettringite chuyển thành monosulfoaluminate. Giai đoạn ổn định (stage V - steady stage), lớp sản phẩm thủy hóa bao phủ hạt xi măng, làm chậm quá trình thủy hóa do hạn chế sự khuếch tán của nước và ion.



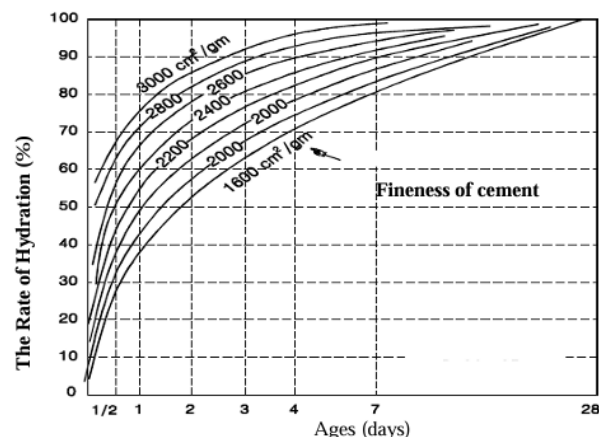
Hình 1. Tốc độ tỏa nhiệt trong quá trình thủy hóa xi măng Portland [6]

Quá trình thủy hóa xi măng bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố. Thành phần hóa học xi măng, hàm lượng clinker khoáng chính (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) quyết định tốc độ và tổng nhiệt tỏa ra. Hàm lượng sunfat, ảnh hưởng đến tốc độ hình thành ettringite và monosulfoaluminate, tác động đến quá trình tỏa nhiệt ban đầu, minh họa Hình 2. Độ mịn của xi măng càng mịn, diện tích bề mặt càng lớn, tốc độ thủy hóa càng nhanh và nhiệt tỏa ra càng nhiều trong giai đoạn đầu, xem Hình 3.

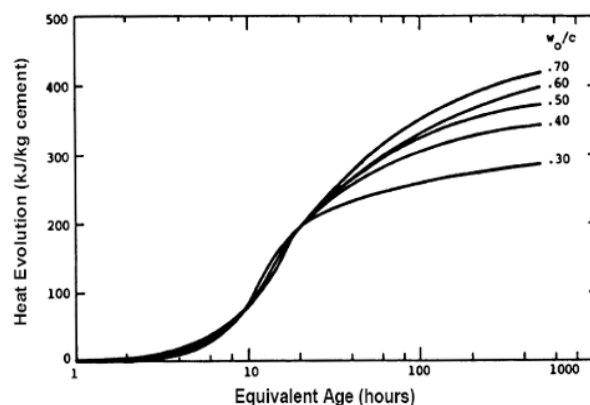
Tỷ lệ nước/xi măng (W/C ratio), tỷ lệ W/C thấp hơn sẽ làm tăng nồng độ ion và tăng tốc độ thủy hóa, thể hiện Hình 4. Nhiệt độ ban đầu (môi trường) cao thúc đẩy quá trình thủy hóa diễn ra nhanh hơn. Vật liệu thay thế xi măng (SCM), việc thay thế một phần xi măng bằng các vật liệu như tro bay có thể giảm tổng nhiệt thủy hóa và kéo dài thời gian tỏa nhiệt, giúp kiểm soát nhiệt độ hiệu quả hơn trong bê tông khối lớn.



Hình 2. Nhiệt thủy hóa tức thời với hàm lượng SO_3 thay đổi [7]



Hình 3. Tốc độ thủy hóa bị ảnh hưởng bởi độ mịn của xi măng [8]



Hình 4. Ảnh hưởng của tỷ lệ W/C đến quá trình phát nhiệt [9]

2.2. Lý thuyết bê tông khối lớn

Bê tông khối lớn có đặc điểm là sự chênh lệch nhiệt độ lớn giữa lõi và bề mặt, gây ra ứng suất nhiệt và nguy cơ nứt. Liên kết nội bộ (do nhiệt thủy hóa bên trong) và liên kết bên ngoài (do biến động nhiệt độ môi trường và ràng buộc từ nền móng/ván khuôn) là hai cơ chế chính gây nứt. Các vết nứt thường xuất hiện trong khoảng 1-5 ngày sau khi đổ bê tông.

Một số phương pháp làm mát bê tông như: Làm mát trước khi đổ, sử dụng nước lạnh, cốt liệu lạnh hoặc nơir lỏng để giảm nhiệt độ ban đầu của bê tông. Làm mát sau khi đổ, dùng ống làm mát bên trong kết cấu để giảm nhiệt độ bê tông nhanh chóng, nhưng phương pháp này tốn kém và yêu cầu tính toán chính xác. Phương trình dưới đây cho phép tính nhiệt độ bê tông dựa trên nhiệt lượng của từng thành phần trong cấp phối:

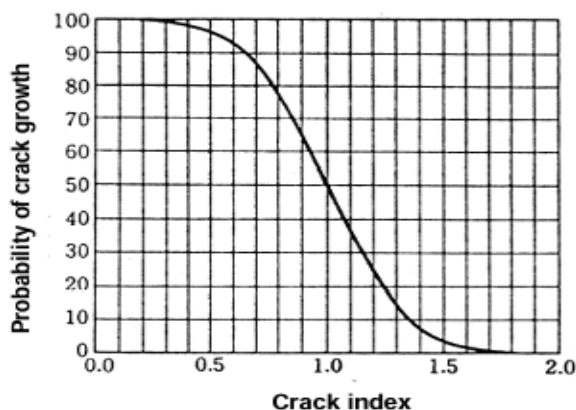
$$T = \frac{C_s (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w}{C_s (W_a W_c) + W_w} \quad (1)$$

Trong đó: T là nhiệt độ của bê tông; F , W là khối lượng của từng thành phần trên một đơn vị thể tích bê tông; α , c , w là các chỉ số tương ứng với cốt liệu, xi măng và nước.

Tại giai đoạn đầu, đánh giá nứt do nhiệt thủy hóa được thực hiện dựa trên nhiệt độ. Điều này được thể hiện thông qua phương trình bên dưới:

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_i(t)} \quad (2)$$

Trong đó: $f_{sp}(t)$ là cường độ kéo của bê tông tại thời điểm t ; $f_i(t)$ là ứng suất nhiệt tối đa tại thời điểm t . Mối quan hệ giữa xác suất xuất hiện vết nứt và chỉ số nứt được thể hiện trong Hình 5 và các tiêu chí đánh giá vết nứt được liệt kê trong Bảng 1.



Hình 5. Mối quan hệ giữa xác suất phát triển vết nứt và chỉ số nứt [10]

Bảng 1. Tiêu chí nứt do nhiệt [10]

Tiêu chí	Chỉ số nứt do nhiệt (I_{cr})
Để ngăn ngừa vết nứt	$I_{cr} \geq 1.5$
Để giới hạn vết nứt	$1.2 \leq I_{cr} < 1.5$
Để giới hạn vết nứt có hại	$0.7 \leq I_{cr} < 1.2$

2.3. Các phương trình cân bằng nhiệt

Phân tích truyền nhiệt trong bê tông khối lớn sử dụng phương trình cân bằng nhiệt Fourier, có tính đến sự phát nhiệt từ quá trình thủy hóa [11]:

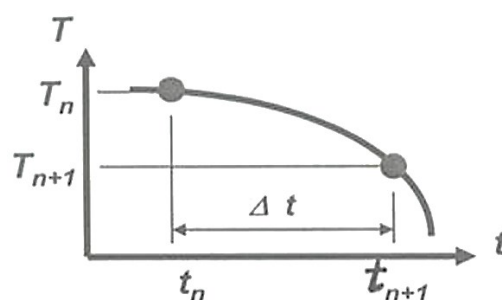
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Trong đó: ρ là khối lượng riêng của bê tông (kg/m^3); C_p là nhiệt dung riêng của bê tông ($\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$); t là thời gian; q là tốc độ sinh nhiệt nội tại trên một đơn vị thể tích ($\text{kcal/m}^3 \cdot \text{h}$); k_x , k_y , k_z là hệ số dẫn nhiệt theo các hướng x , y , z ($\text{kcal/m} \cdot \text{hr}^\circ\text{C}$).

Phương trình này được giải bằng phương pháp số, chẳng hạn như quy tắc hình thang tổng quát trong Phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM):

$$[C] \{ \dot{T} \} = \{ Q \} \quad (4)$$

Trong đó: $[C]$ là ma trận nhiệt dung riêng; $[K]$ là ma trận độ dẫn nhiệt (dẫn nhiệt, đối lưu); $\{Q\}$ là vector thông lượng nhiệt tổng hợp từ thủy hóa bê tông và đối lưu nhiệt; $\{T\}$ là vector nhiệt độ tại các nút; $\{ \dot{T} \}$ là đạo hàm theo thời gian của nhiệt độ tại các nút Hình 6.



Hình 6. Quy tắc hình thang tổng quát theo thời gian [11]

$$\{T_{n+1}\} = T_n + (1 - \theta) \Delta t \{ \dot{T} \} \quad (5)$$

Trong đó: T_n là nhiệt độ tại thời điểm n ; T_{n+1} là nhiệt độ tại thời điểm kế tiếp; Δt là bước thời gian; θ là hệ số nội suy (bằng $\frac{1}{2}$ trong phương pháp Crank – Nicolson).

Sau khi giải phương trình này theo miền thời gian, phương trình tổng quát có dạng:

$$[A_G]\{\Delta T\} = \{Q_G\} \quad (6)$$

Trong đó:

$$[A_G] = \frac{1}{\Delta t}[C] + \frac{1}{2}[K]$$

$$\{Q_G\} = \frac{1}{2}(\{Q_n\} + \{Q_{n+1}\} - 2[K]\{T_n\})$$

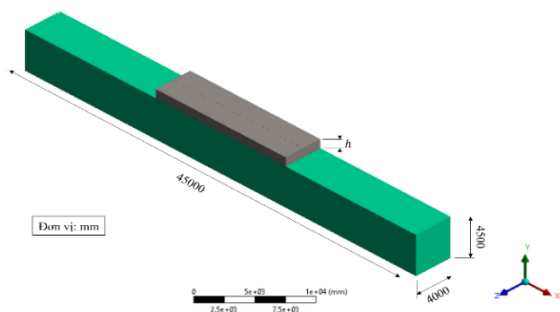
Δt là sự thay đổi nhiệt độ tại điểm nút theo bước thời gian. Từ đó, nhiệt độ tại bước thời gian kế tiếp có thể tính bằng:

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + \frac{1}{2}\{\Delta T\} \quad (7)$$

3. Kết quả mô phỏng số

3.1. Mô hình mô phỏng

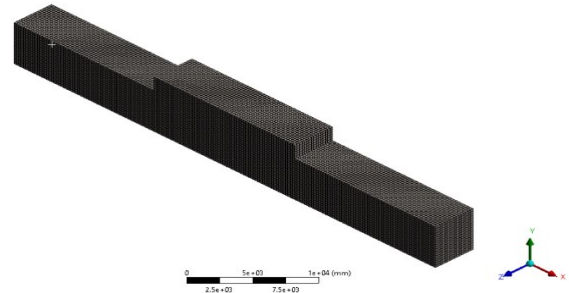
Một khối bê tông trong đê quây tại Hàn Quốc [5] được sử dụng để phân tích sự phát triển nhiệt trong quá trình thủy hóa xi măng. Trong khối bê tông này, các cặp nhiệt điện đã được lắp đặt để theo dõi nhiệt độ. Khối bê tông được đặt ở độ cao 4,5 m trong đê quây. Đê quây trọng lực bằng bê tông có tổng chiều cao 10,6 m, chiều rộng đỉnh 4,0 m, và tổng chiều dài 102 m. Trong quá trình thi công, mỗi khối bê tông có kích thước 1,5 m (chiều cao), 15 m (chiều dài), và 4 m (chiều rộng), với tổng khối lượng bê tông sử dụng là 3866 m³, tác giả tính toán số liệu thống kê mô phỏng. Sau 5 ngày bảo dưỡng, ván khuôn được tháo dỡ theo đúng kế hoạch xây dựng. Bố cục hình học của mô hình thể hiện trong Hình 7.



Hình 7. Mô hình mô phỏng

Nhiệt độ trong bê tông khối lớn thay đổi theo thời gian và vị trí. Kích thước và hình dạng của mô hình đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo kết quả hội tụ và chính xác. Để nâng cao độ chính xác, khối bê tông mục tiêu trong phân tích này được chia thành các lớp có chiều cao 15 cm. Mô hình số của khối bê tông được chia lưới bằng các phần tử khối ba chiều isoparametric, kích thước lưới là 250 mm. Mô hình lưới được thể

hiện ở Hình 8 và dữ liệu đầu vào được liệt kê trong Bảng 2.



Hình 8. Mô hình chia lưới

Bảng 2. Các giá trị đầu vào sử dụng cho phân tích nhiệt và phân tích ứng suất nhiệt [5]

Tham số	Đơn vị	Giá trị
Hệ số dẫn nhiệt	$kcal / m \cdot h / ^\circ C$	2,3
Nhiệt dung riêng	$kcal / kg / ^\circ C$	0,23
Khối lượng riêng	kg / m^3	2.400
Nhiệt độ khi đổ bê tông	$^\circ C$	16,5
Hệ số đối lưu (ván khuôn thép)	$kcal / m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$	12
Thời gian phân tích	hr	120
Hệ số giãn nở nhiệt	$/ ^\circ C$	1×10^{-6}
Hệ số Poisson	-	0,18

3.2. Điều kiện biên

Trong phân tích nhiệt thoáng qua, điều kiện biên bao gồm: Biên truyền nhiệt, biên cách nhiệt và biên nhiệt cố định. Do bề mặt bê tông chịu ảnh hưởng chủ yếu từ truyền nhiệt, mô hình sử dụng cơ chế đối lưu. Đối lưu là sự truyền nhiệt thông qua sự chuyển động của khối lưu chất (không khí hoặc nước), mang nhiệt ra khỏi nguồn nóng. Quá trình này phụ thuộc vào loại ván khuôn, phương pháp bảo dưỡng và tốc độ gió. Tỷ lệ trao đổi nhiệt do đối lưu được mô tả bằng định luật làm mát của Newton. Bảng 3 thể hiện thông số nhiệt đối lưu.

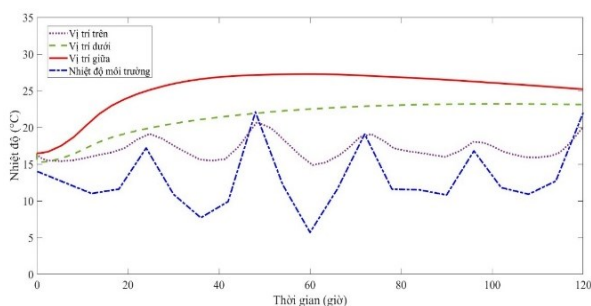
Bảng 3. Giá trị tham chiếu của hệ số đối lưu [10]

Phương pháp bảo dưỡng	Giá trị đối lưu $kcal / m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$
Cốp pha thép, nước	12
Bao rơm	7
Ván ép	7
Tấm phủ	7
Thảm bảo dưỡng	4,5
Xốp Styropore	1,5
Không che chắn (không khí)	4,3

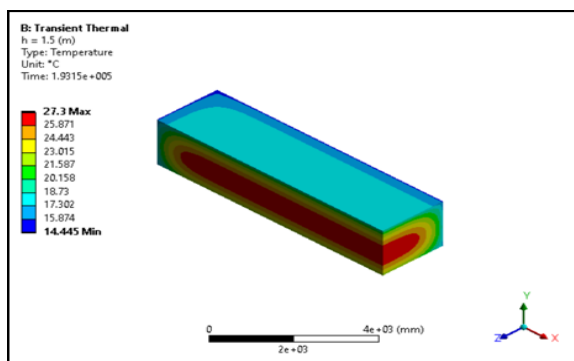
3.3. Kết quả mô phỏng

3.3.1. Kết quả phân bố nhiệt độ của chiều dày 1.5m

Hình 9 mô tả sự phân bố nhiệt độ tại các vị trí đỉnh, giữa và đáy ở trung tâm của khối bê tông có kích thước 4 m (rộng) $\times$ 15 m (dài) $\times$ 1,5 m (chiều dày lớp đổ). Kết quả cho thấy nhiệt độ cao nhất xuất hiện ở khu vực trung tâm của khối bê tông, trong khi đó nhiệt độ thấp nhất nằm tại bề mặt tiếp xúc với không khí. Cụ thể, nhiệt độ cao nhất đo được tại trung tâm là 27,3°C, còn nhiệt độ thấp nhất tại bề mặt là 18,5°C, vào thời điểm 54 giờ sau khi đổ bê tông (Hình 10).



Hình 9. Thay đổi nhiệt độ của lớp bê tông có chiều dày 1,5 m



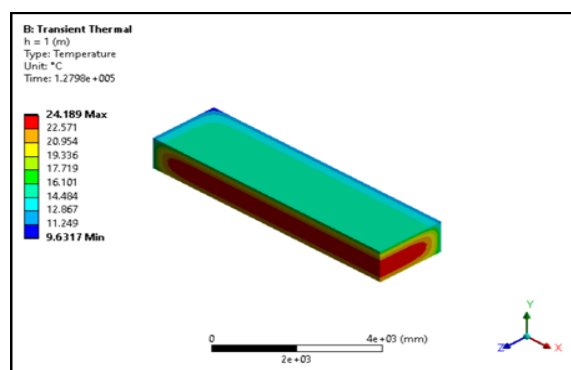
Hình 10. Thay đổi nhiệt độ của lớp bê tông có chiều dày 1,5 m

Chênh lệch nhiệt độ giữa trung tâm và bề mặt đạt mức 9,4°C. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy nhiệt độ tại bề mặt bị ảnh hưởng đáng kể bởi điều kiện môi trường xung quanh, trong khi nhiệt độ bên trong lõi bê tông hầu như không chịu tác động từ nhiệt độ môi trường. Bên cạnh đó, kết quả nhiệt độ được sử dụng để so sánh với nghiên cứu [5] với sai số 2,15% khi đạt 54 giờ tại trung tâm của lớp bê tông có chiều dày 1,5 m. Từ đó cho thấy việc mô phỏng là đáng tin cậy.

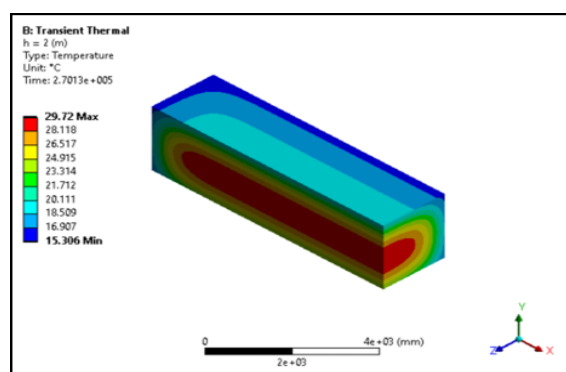
3.3.2. Kết quả phân bố nhiệt độ ở các chiều dày khác nhau

Nhiệt độ sinh ra tại lớp bê tông có chiều dày 1.5 m được so sánh với lớp bê tông có chiều dày khác để đánh giá khả năng tăng chiều dày mỗi lớp đổ. Hình 11-14 thể hiện sự phát triển nhiệt độ

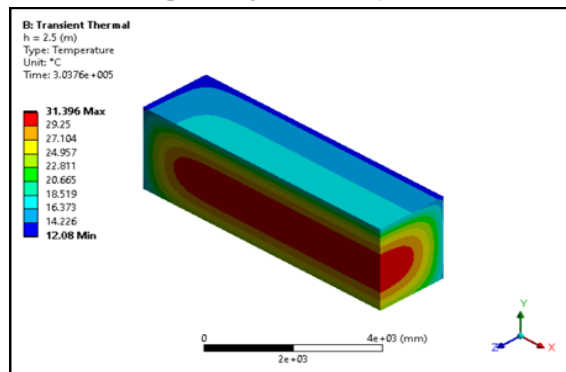
tại điểm trung tâm của các lớp bê tông có chiều dày khác nhau tại thời điểm có nhiệt độ cao nhất.



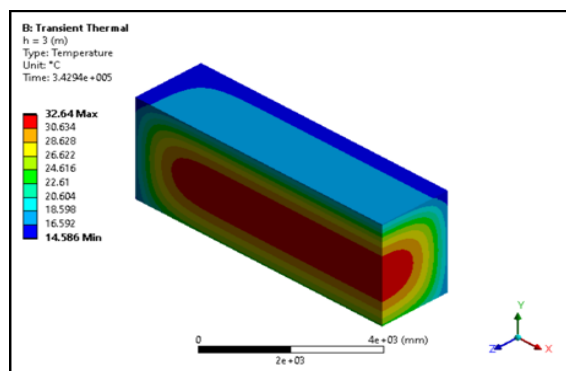
Hình 11. Sự phát triển nhiệt tại điểm trung tâm của các lớp bê tông có chiều dày 1 m



Hình 12. Sự phát triển nhiệt tại điểm trung tâm của các lớp bê tông có chiều dày 2 m

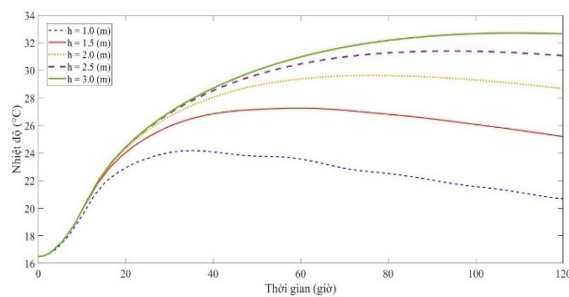


Hình 13. Sự phát triển nhiệt tại điểm trung tâm của các lớp bê tông có chiều dày 2,5 m



Hình 14. Sự phát triển nhiệt tại điểm trung tâm của các lớp bê tông có chiều dày 3 m

Từ Hình 11-14, nhận thấy khu vực lõi bê tông luôn có nhiệt độ cao hơn đáng kể so với lớp bề mặt, do hiệu ứng cách nhiệt tự nhiên của bê tông và đặc tính sinh nhiệt từ phản ứng thủy hóa. Khi chiều dày lớp bê tông tăng, nhiệt độ cực đại tại lõi bê tông tăng dần và phạm vi có cùng nhiệt độ cao cũng mở rộng. Chứng tỏ khi tăng bề dày, sự tản nhiệt từ lõi bê tông ra môi trường kém hiệu quả hơn, tốc độ thoát nhiệt bị cản trở bởi chiều dày và bề mặt tiếp xúc trực tiếp với môi trường xung quanh có nhiệt độ thấp nhất trong tất cả mô hình bởi quá trình đối lưu diễn ra mượt mà hơn ở các lớp bề mặt này. Cụ thể, Hình 11 vùng nhiệt độ cao tập trung hẹp ở giữa, Hình 12 và Hình 13, vùng nhiệt độ cao mở rộng đáng kể về cả chiều sâu và chiều ngang. Cuối cùng, Hình 14, nhiệt độ tại lõi tăng rõ rệt và chiếm phần lớn thể tích khối, cho thấy hiệu ứng giữ nhiệt mạnh mẽ.



Hình 15. Sự phát triển nhiệt tại điểm trung tâm của các lớp bê tông tại 5 chiều dày khác nhau

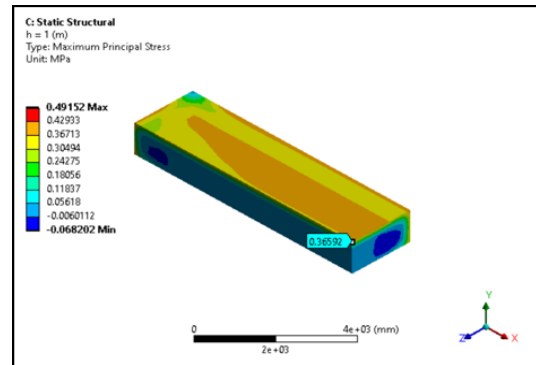
Nhiệt độ cũng tăng theo sự gia tăng chiều dày lớp bê tông do nhiệt sinh ra từ quá trình thủy hóa, được thể hiện ở Hình 15. Tốc độ nhiệt ban đầu tăng nhanh và đỉnh nhiệt độ tăng theo chiều dày. Tuy nhiên, sau khi đạt đỉnh, tốc độ giảm nhiệt chậm hơn ở các lớp dày vì nhiệt tích tụ nhiều hơn và lớp bao cách ly vùng này dày hơn.

3.3.3. Kết quả phân tích ứng suất nhiệt

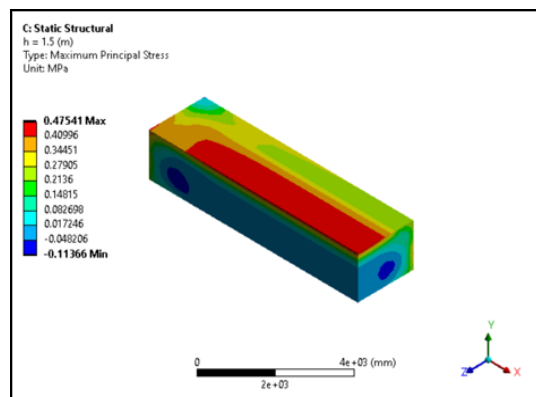
Hình 16-20 trình bày kết quả phân tích ứng suất nhiệt tại các độ dày lớp bê tông 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m và 3 m. Ứng suất kéo lớn nhất do phân bố nhiệt xảy ra chủ yếu xung quanh bề mặt của tất cả các lớp, trong khi ứng suất nén lớn nhất xuất hiện ở trung tâm và đáy. Ứng suất nén tại trung tâm tăng lên khi độ dày lớp bê tông tăng. Ứng suất tại trung tâm và đáy thay đổi theo tuổi của bê tông và có thể giảm dần sau khi nguội. Sự thay đổi ứng suất ở bề mặt có xu hướng tương tự với biến động nhiệt độ môi trường và cũng giảm dần theo thời gian.

Ở độ dày lớp 1,5 m (Hình 17) và 2 m (Hình 18), nứt nhiệt có thể không xảy ra vì ứng suất kéo nhỏ hơn cường độ kéo của bê tông. Tuy nhiên, khi xét đến chỉ số nứt theo Hình 5 và Bảng 1, xác suất xảy ra nứt ở lớp có độ dày 2 m khoảng 23%.

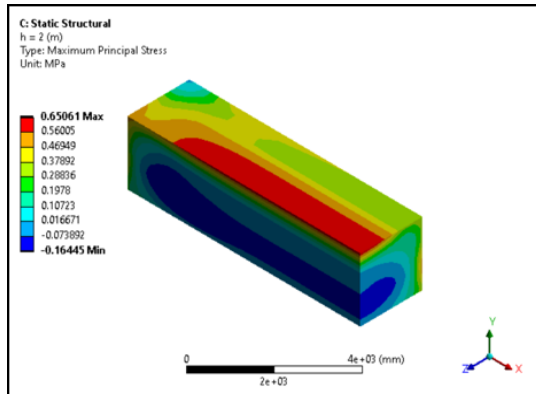
Giá trị chỉ số nứt nhỏ nhất để hạn chế vết nứt là 1,2 như thể hiện trong Hình 21. Nếu bê tông được đổ ở độ dày 2 m, nhiệt độ đổ bê tông cần được kiểm soát nghiêm ngặt để ngăn ngừa nứt.



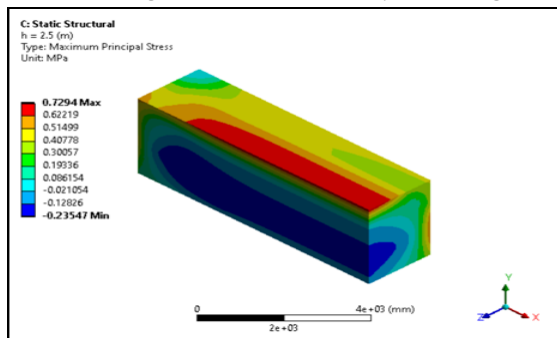
Hình 16. Ứng suất nhiệt tại chiều dày đổ bê tông 1 m



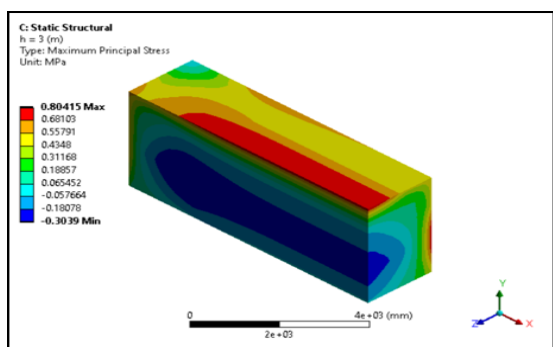
Hình 17. Ứng suất nhiệt tại chiều dày đổ bê tông 1.5 m



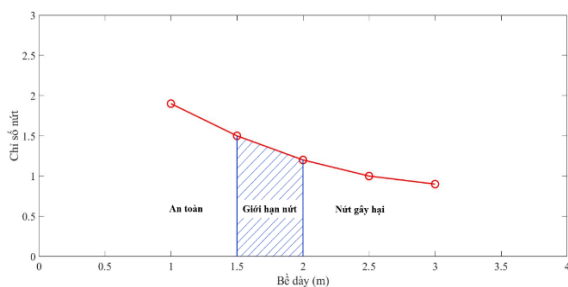
Hình 18. Ứng suất nhiệt tại chiều dày đổ bê tông 2 m



Hình 19. Ứng suất nhiệt tại chiều dày đổ bê tông 2.5 m



Hình 20. Ứng suất nhiệt tại chiều dày đổ bê tông 3 m



Hình 21. So sánh chỉ số nứt với độ dày lớp bê tông

Ở độ dày 2.5 m (Hình 19) và 3 m (Hình 20), nứt nhiệt có thể xảy ra do ứng suất kéo lớn hơn đáng kể so với cường độ kéo của bê tông. Khi xem xét chỉ số nứt, xác suất xảy ra nứt ở bề mặt các lớp này là trên 50% vì chỉ số nứt nhỏ hơn 1,2. Kết quả này cho thấy rằng việc đổ bê tông với độ dày lớp trên 2 m là không phù hợp.

4. Kết luận

Nghiên cứu này phân tích ảnh hưởng của nhiệt thủy hóa lên bê tông khối lớn và xác định độ dày lớp đổ tối ưu nhằm hạn chế nứt nhiệt. Kết quả mô phỏng bằng Phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM) cho thấy nhiệt sinh ra làm tăng nhiệt độ trong bê tông, đặc biệt tại lõi, trong khi bề mặt chịu tác động của môi trường nên có nhiệt độ thấp hơn. Sự chênh lệch nhiệt độ này gây ứng suất nhiệt, làm tăng nguy cơ nứt nếu không được kiểm soát hợp lý.

Ứng suất kéo lớn nhất tập trung ở bề mặt bê tông, trong khi ứng suất nén cao nhất xuất hiện tại lõi. Khi độ dày lớp bê tông tăng, nhiệt độ cực đại xuất hiện muộn hơn nhưng mức độ tăng không tỷ lệ thuận do bê tông dẫn nhiệt kém. Lớp đổ 1,5 m có nguy cơ nứt thấp, trong khi lớp 2 m có xác suất nứt 23%, đòi hỏi kiểm soát nhiệt độ chặt chẽ. Với lớp 2,5 m trở lên, nguy cơ nứt vượt 50%, cho thấy độ dày trên 2 m không tối ưu cho thi công thực tế.

Nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng đối với các công trình như đập bê tông, móng cầu và hạ

tầng quy mô lớn. Kiểm soát nhiệt độ khi thi công là yếu tố quan trọng giúp đảm bảo chất lượng và tuổi thọ công trình, đồng thời giảm chi phí sửa chữa do nứt nhiệt. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng sang tối ưu hóa cấp phối bê tông, cải tiến phương pháp làm mát và đánh giá tác động của điều kiện môi trường lên sự phát triển nhiệt độ trong bê tông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. Shafigh, I. Asadi, and N. B. Mahyuddin, "Concrete as a thermal mass material for building applications – A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 14-25, 2018.
- [2] S. L. Cha and S. S. Jin, "Prediction of thermal stresses in mass concrete structures with experimental and analytical results," *Construction and Building Materials*, vol. 258, 120367, 2020.
- [3] Z. Yunchuan, B. Liang, Y. Shengyuan, and C. Guting, "Simulation analysis of mass concrete temperature field," *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 5, pp. 5-12, 2012.
- [4] X. Liu, C. Zhang, X. Chang, W. Zhou, Y. Cheng, and Y. Duan, "Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 78, pp. 449-459, 2015.
- [5] S. G. Kim, *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement*, M.S. thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, United States, 2010.
- [6] H. Steven, *Design and Control of Concrete Mixtures*, 14th ed. PCA, 2006.
- [7] P. K. Mehta and D. Ravina, "Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash," *Cement and Concrete Research*, vol. 16, pp. 227-238, 1986.
- [8] American Concrete Institute, *Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*. Farmington Hills, Michigan, United States: American Concrete Institute, 2007.
- [9] S. Mindess, J. F. Young, and D. Darwin, *Concrete*. Upper Saddle River, New Jersey, United States: Pearson Education, Inc., 2002.
- [10] Korea Concrete Institute, *Standard Specification for Concrete*. Seoul, Korea: Korea Concrete Institute, 2003.
- [11] J. Y. Kim, *Heat Transfer Analysis*, 4th ed. Tae Sung Software & Engineering, Inc., 2005.