

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Mô hình cơ - nhiệt dự báo sự thay đổi hệ số truyền nhiệt của bê tông dưới tác dụng của nhiệt độ cao

A thermo-mechanical model for predicting the variation in thermal conductivity of concrete under elevated temperatures

➤ Nguyễn Lê Đạt¹, Phạm Đức Thọ*¹, Đặng Trung Thành²

¹Tập đoàn Công nghiệp - Viễn thông Quân đội

²Nhóm nghiên cứu GECS - Trường Đại học Mở - Địa chất

Email: phamductho@humg.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 25/5/2026

Ngày sửa bài: 09/6/2026

Ngày chấp nhận đăng: 18/6/2026

Ngày xuất bản Online: 22/6/2026

Tác giả liên hệ Email: phamductho@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày ảnh hưởng của nhiệt độ và ứng suất đến sự biến đổi hệ số truyền nhiệt của bê tông chịu nén. Các mẫu bê tông được khảo sát tại các mức nhiệt độ 20°C, 200°C, 400°C và 600°C nhằm đánh giá mối liên hệ giữa suy thoái do nhiệt, phát triển hư hỏng cơ học và hệ số truyền nhiệt của vật liệu.

Kết quả cho thấy hệ số truyền nhiệt không phải là đại lượng không đổi mà thay đổi theo quá trình biến dạng và mức độ phá hoại của bê tông. Ở giai đoạn biến dạng nhỏ, hệ số truyền nhiệt thay đổi không đáng kể do cấu trúc vật liệu còn tương đối liên tục và các vi nứt chưa phát triển rõ rệt. Khi biến dạng tăng, các vi nứt hình thành và mở rộng, đặc biệt tại vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu và hồ xi măng, làm gián đoạn đường truyền nhiệt và dẫn đến sự suy giảm hệ số truyền nhiệt. Ở giai đoạn sau đỉnh ứng suất, các vi nứt liên kết thành vùng hư hỏng cục bộ, làm suy giảm nhanh khả năng chịu tải và làm thay đổi rõ rệt đặc trưng truyền nhiệt của bê tông. Ảnh hưởng của nhiệt độ cao thể hiện thông qua sự gia tăng hư hỏng ban đầu, sự mất nước của hồ xi măng và suy yếu vùng chuyển tiếp ITZ, từ đó thúc đẩy quá trình phát triển vết nứt dưới tải nén.

Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế tương tác giữa nhiệt độ, biến dạng cơ học, quá trình phá hoại và hệ số truyền nhiệt của bê tông, là cơ sở cho việc đánh giá độ bền và khả năng làm việc của kết cấu bê tông trong điều kiện nhiệt độ cao.

Từ khóa: Mô hình lưới lattice, bê tông nhiệt độ cao, hệ số truyền nhiệt; cấp độ trung bình.

ABSTRACT

This paper presents the effects of temperature and strain state on the variation in the thermal conductivity of concrete under compression. Concrete specimens were investigated at temperatures of 20 °C, 200 °C, 400 °C, and 600 °C to evaluate the

relationship among thermal degradation, mechanical damage development, and the heat transfer characteristics of the material.

The results show that thermal conductivity is not a constant material parameter but varies with the deformation process and the degree of damage in concrete. At small strain levels, the thermal conductivity changes insignificantly because the material structure remains relatively continuous and microcracks have not yet developed markedly. As strain increases, microcracks initiate and propagate, particularly in the interfacial transition zone between aggregates and cement paste, thereby interrupting the heat transfer paths and leading to a reduction in thermal conductivity. In the post-peak stress stage, microcracks coalesce into localized damage zones, resulting in a rapid reduction in load-bearing capacity and a significant change in the thermal transfer characteristics of concrete. The effect of elevated temperature is reflected in the increase in initial defects, dehydration of the cement paste, and weakening of the interfacial transition zone, which further promotes crack development under compressive loading.

The findings contribute to clarifying the interaction mechanism among temperature, mechanical deformation, damage evolution, and the thermal conductivity of concrete, providing a basis for assessing the durability and service performance of concrete structures under elevated-temperature conditions..

Keywords: Lattice model, concrete under high temperature, thermal conductivity, Meso-scale.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trường nhiệt độ trong bê tông là một trong những yếu tố có vai trò quan trọng đối với quá trình làm việc lâu dài của kết cấu bê tông và bê tông cốt thép. Sự phân bố nhiệt độ không chỉ chi phối trạng thái truyền nhiệt bên trong vật liệu mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến các quá trình truyền ẩm, khuếch tán ion và các phản ứng hóa - lý diễn ra trong hệ lỗ rỗng của bê tông.

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng trường nhiệt độ trong bê tông có ảnh hưởng đáng kể đến sự vận chuyển độ ẩm [1], quá trình cacbonat hóa [2], sự xâm nhập của ion clorua [1], [3], [4] cũng như quá trình ăn mòn cốt thép trong bê tông [5]. Đây đều là những cơ chế suy giảm độ bền điển hình, có thể làm giảm tuổi thọ khai thác của kết cấu bê tông, đặc biệt đối với các công trình làm việc trong môi trường xâm thực, môi trường ven biển, công trình cầu, hầm, kết cấu khối lớn và các công trình chịu tác động nhiệt lặp lại.

Bên cạnh các vấn đề về độ bền lâu, trường nhiệt độ trong bê tông còn có ý nghĩa quan trọng trong phân tích ứng xử nhiệt - cơ của kết cấu. Nhiệt độ bê tông ảnh hưởng đến khả năng tích trữ và truyền năng lượng trong kết cấu bao che công trình, phân tích hiệu quả sử dụng năng lượng của tòa nhà, thiết kế lớp chắn bức xạ trong nhà máy điện hạt nhân, cũng như đánh giá ứng xử của cầu, mặt đường bê tông xi măng, đập bê tông khối lớn và các kết cấu bê tông chịu tải trọng nhiệt. Trong các trường hợp này, sự chênh lệch nhiệt độ theo thời gian và không gian có thể gây ra biến dạng nhiệt không đồng đều, từ đó hình thành ứng suất nhiệt. Nếu ứng suất nhiệt vượt quá khả năng chịu kéo cục bộ của vật liệu, các vết nứt có thể xuất hiện, phát triển và làm thay đổi đáng kể khả năng truyền nhiệt cũng như trạng thái cơ học của bê tông.

Hệ số truyền nhiệt của bê tông là thông số vật lý cơ bản biểu thị mức độ lan truyền nhiệt trong bê tông và là đại lượng đầu vào quan trọng trong các mô hình phân tích trường nhiệt độ. Đối với bê tông, hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm tỷ lệ nước/xi măng, loại cốt liệu, hàm lượng và phần thể tích cốt liệu, phụ gia khoáng, độ ẩm, nhiệt độ, trạng thái lỗ rỗng và mức độ hư hỏng của vật liệu. Các nghiên cứu trước đây cho thấy ảnh hưởng của các yếu tố như tỷ lệ nước/xi măng, loại và hàm lượng cốt liệu, phụ gia, độ ẩm và nhiệt độ đến hệ số dẫn nhiệt của bê tông đã được quan tâm đáng

kể. Kim et al. [6] đã đề xuất mô hình dự báo hệ số truyền nhiệt của bê tông có xét đến tỷ lệ cốt liệu lớn, nhiệt độ và tỷ lệ nước/xi măng. Kết quả nghiên cứu này cho thấy khả năng dẫn nhiệt của bê tông phụ thuộc vào thành phần cấp phối, đặc biệt là hàm lượng cốt liệu lớn, trong khi ảnh hưởng của tuổi bê tông đến hệ số dẫn nhiệt là không đáng kể.

Về bản chất vật liệu, bê tông có thể được xem như một vật liệu composite không đồng nhất gồm hai pha cơ bản: Pha vữa xi măng đóng vai trò là pha nền liên tục và pha cốt liệu lớn phân bố rời rạc trong nền vữa ở cấp độ mesoscale [7]. Sự khác biệt về tính chất nhiệt giữa cốt liệu, vữa xi măng, vùng chuyển tiếp tiếp xúc cốt liệu - hồ xi măng và hệ lỗ rỗng làm cho trường nhiệt độ trong bê tông có tính không đồng nhất rõ rệt. Trên cơ sở quan điểm composite này, nhiều mô hình lý thuyết về hệ số dẫn nhiệt có hiệu của bê tông đã được phát triển, trong đó có mô hình của Harmathy [8] (Harmathy, 1970). Các mô hình này cho phép xem xét vai trò tương đối của các pha vật liệu trong việc hình thành hệ số dẫn nhiệt vĩ mô của bê tông.

Khan, 2002 [9] nghiên cứu ảnh hưởng của thành phần cốt liệu và độ ẩm đến hệ số dẫn nhiệt của bê tông. Kết quả cho thấy độ ẩm trong hệ lỗ rỗng có thể làm thay đổi đáng kể khả năng dẫn nhiệt do nước có hệ số dẫn nhiệt lớn hơn không khí. Khi bê tông khô, các lỗ rỗng chứa không khí làm giảm khả năng truyền nhiệt; ngược lại, khi mức độ bão hòa tăng, sự hiện diện của nước trong lỗ rỗng làm tăng liên kết truyền nhiệt trong vật liệu.

Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu về hệ số dẫn nhiệt của bê tông thường xem xét vật liệu ở trạng thái chưa bị hư hỏng hoặc chưa xét đầy đủ ảnh hưởng của trạng thái ứng suất - biến dạng. Trong thực tế khai thác, bê tông thường chịu đồng thời các tác động cơ học, nhiệt, ẩm và môi trường. Dưới tác dụng của tải trọng ngoài, đặc biệt là tải trọng nén, bê tông không chỉ biến dạng đàn hồi mà còn xuất hiện quá trình phát triển vi nứt bên trong vật liệu. Ban đầu, các vi nứt thường hình thành tại vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu và vữa xi măng do sự không tương thích về độ cứng, cường độ và biến dạng giữa hai pha. Khi mức tải trọng nén tăng lên, các vi nứt phát triển, liên kết với nhau và có thể hình thành các dải hư hỏng cục bộ. Quá trình này làm thay đổi cấu trúc lỗ rỗng, tính liên tục của pha dẫn nhiệt và đường truyền nhiệt bên trong bê tông.

Các kết quả thực nghiệm đã chỉ ra rằng sau khi bê tông bị nứt, hệ số dẫn nhiệt giảm rõ rệt. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong phân tích bê tông khối lớn và các kết cấu chịu nhiệt, vì sự thay đổi hệ số dẫn nhiệt có thể làm thay đổi trường nhiệt độ, từ đó ảnh hưởng đến sự hình thành và phát triển ứng suất nhiệt. Nếu trong mô hình tính toán vẫn sử dụng hệ số dẫn nhiệt của bê tông nguyên vẹn, kết quả dự báo trường nhiệt độ và ứng suất nhiệt có thể không phản ánh đúng trạng thái làm việc thực tế của vật liệu đã bị hư hỏng. Do đó, việc hiểu rõ ảnh hưởng của nứt do tải trọng nén đến hệ số dẫn nhiệt của bê tông là cần thiết nhằm nâng cao độ tin cậy của các mô hình dự báo ứng xử nhiệt - cơ và đánh giá độ bền lâu của kết cấu bê tông.

Các nghiên cứu gần đây cho thấy sự xuất hiện của vết nứt trong bê tông có tác động đáng kể đến hệ số dẫn nhiệt, trong đó tải trọng là một trong những nguyên nhân chính gây ra hiện tượng nứt trong bê tông trong suốt thời gian khai thác. Sự hình thành vết nứt làm thay đổi cấu trúc của bê tông, dẫn đến sự thay đổi các thông số vật liệu, bao gồm mô đun đàn hồi, độ thấm, khả năng truyền ẩm và khả năng truyền nhiệt. Bary et al. [10] chỉ ra về mặt lý thuyết rằng hệ vi nứt đẳng hướng trong đá xi măng có thể gây ra sự suy giảm hệ số dẫn nhiệt trong điều kiện không bão hòa. Perkowski (Zbigniew Perkowski, n.d.) đã phân tích sự biến đổi của độ dẫn nhiệt do hư hỏng giòn trong bê tông chịu tải trọng nén đến trạng thái gần phá hoại và nhận thấy độ dẫn nhiệt trung bình của mẫu bê tông cường độ cao giảm khoảng 20%. Trong nghiên cứu thực nghiệm của Vejmekova et al. (Vejmeková et al., 2008), khi bê tông chịu tác động ở nhiệt độ 600°C, các vết nứt xuất hiện ngẫu nhiên trong vật liệu và hệ số dẫn nhiệt giảm tới 40%. Những kết quả này cho

thấy nứt là một yếu tố không thể bỏ qua khi đánh giá khả năng truyền nhiệt của bê tông đã bị hư hỏng.

Đối với bê tông chịu nén, cơ chế hình thành và phát triển nứt có tính phức tạp do chịu ảnh hưởng đồng thời của cấu trúc không đồng nhất, sự phân bố cốt liệu lớn, vùng chuyển tiếp ITZ và trạng thái ứng suất cục bộ. Dưới tác dụng của nén đơn trục, trường ứng suất trong bê tông không phân bố đồng đều. Cốt liệu lớn có độ cứng cao hơn vữa xi măng làm phát sinh tập trung ứng suất tại vùng tiếp xúc giữa hai pha. Đây là vị trí dễ khởi phát vi nứt, đặc biệt khi tải trọng đạt đến một ngưỡng nhất định. Khi mức tải tăng, các vết nứt phát triển dọc theo biên cốt liệu, xuyên qua vữa xi măng hoặc liên kết với các vết nứt lân cận để hình thành vùng hư hỏng liên tục. Sự thay đổi cấu trúc này làm cho đường truyền nhiệt trong bê tông trở nên gián đoạn, quanh co hơn và có thể tạo ra tính dị hướng trong hệ số dẫn nhiệt có hiệu.

Các nghiên cứu gần đây cho thấy sự xuất hiện và phát triển vết nứt có ảnh hưởng đáng kể đến hệ số dẫn nhiệt của bê tông. Bary [11] chỉ ra rằng các vi nứt trong hồ xi măng đã thủy hóa có thể làm suy giảm khả năng dẫn nhiệt của vật liệu. Perkowski [12] ghi nhận hệ số dẫn nhiệt của bê tông cường độ cao có thể giảm trung bình khoảng 20% dưới tác động của hư hỏng giòn do nén, trong khi Vejmelková [13] cho thấy bê tông bị nứt do gia nhiệt đến 600°C có thể giảm hệ số dẫn nhiệt tới 40%. Tang [14] sử dụng mô hình phần tử hữu hạn 2D để mô phỏng bê tông chịu nén và ghi nhận mức giảm hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng có thể đạt 24%. Kế thừa hướng tiếp cận trung mô, Shen và cộng sự [15] xây dựng mô hình bê tông ba pha gồm cốt liệu, nền vữa và ITZ để mô phỏng sự thay đổi hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng trong quá trình kéo một trục. Kết quả cho thấy ETC giảm mạnh ngay khi vi nứt xuất hiện do hiệu ứng “cầu nhiệt” qua cốt liệu bị suy yếu; sau khi vết nứt lớn hình thành, tốc độ suy giảm ETC chậm hơn. Đồng thời, bê tông nứt thể hiện tính dị hướng rõ rệt, trong đó hệ số dẫn nhiệt theo phương vuông góc với vết nứt giảm mạnh hơn so với phương song song với vết nứt.

Ngoài ra, sự phân bố ngẫu nhiên của cốt liệu lớn cũng làm cho trường nhiệt độ và trường hư hỏng trong bê tông mang tính không đồng nhất ở cấp độ mesoscale. Các hạt cốt liệu có thể đóng vai trò như các cầu truyền nhiệt nếu chúng có hệ số dẫn nhiệt cao hơn vữa xi măng; tuy nhiên, nếu xung quanh cốt liệu xuất hiện các vết nứt tại vùng ITZ, khả năng truyền nhiệt qua vùng này sẽ bị suy giảm. Do đó, ảnh hưởng của cốt liệu đến hệ số dẫn nhiệt không chỉ phụ thuộc vào hàm lượng và loại cốt liệu, mà còn phụ thuộc vào trạng thái liên kết giữa cốt liệu và nền vữa sau khi bê tông chịu nén. Đây là điểm cần được xem xét trong các mô hình số hoặc mô hình meso nhằm mô phỏng chính xác hơn ứng xử truyền nhiệt của bê tông bị nứt.

2. MÔ HÌNH SỐ

2.1. Mô hình truyền nhiệt trong bê tông

Phương trình truyền nhiệt trong vật liệu nói chung và bê tông nói riêng được xác định:

$$\rho_c C_T \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} q = Q \tag{1}$$

Trong đó, C_T là nhiệt dung riêng của vật liệu, ρ_c là khối lượng riêng của vật liệu, T là nhiệt độ, t là thời gian, Q là nguồn bên trong. Nhiệt lượng q truyền qua vật liệu được xác định theo định luật Fourier:

$$q = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2}$$

Trong đó, λ_t là độ dẫn nhiệt. Thay phương trình (1) vào (2) và bỏ qua ảnh hưởng của nguồn bên trong Q ta thu được phương trình:

$$\rho_c C_T \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\lambda_T \text{grad}T) = 0 \tag{3}$$

Khi các tham số C_T và λ_t không phụ thuộc vào nhiệt độ T , bài toán truyền nhiệt là tuyến tính. Phương trình (3) có thể thu gọn dưới dạng:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial \xi_x^2} \tag{4}$$

Trong đó: $D = \lambda_t / \rho_c C_t$ và ξ là tham số tọa độ truyền nhiệt theo một hướng x xác định. Phương trình truyền nhiệt đơn hướng và tuyến tính trong mô hình lưới lattice được rời rạc về dạng:

$$\alpha_e T + C_e \frac{\partial T}{\partial t} = f \tag{5}$$

Trong đó: α_e là ma trận dẫn nhiệt và C_e là ma trận nhiệt dung, $\alpha_e = \frac{h_e}{l_e} \lambda_T \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ và $C_e = \frac{h_e l_e}{12} C_T \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$.

Khi các tham số C_T và λ_t là hàm số của nhiệt độ T , bài toán truyền nhiệt là không phi tuyến. Theo Gawin et al. [16], các hàm số này được lấy như sau:

$$\lambda_T = \lambda_0 [1 + A_\lambda (T - T_0)] \tag{6}$$

Và:

$$C_T = C_0 [1 + A_c (T - T_0)] \tag{7}$$

Trong đó: λ_0 và C_0 là độ dẫn nhiệt và nhiệt dung riêng của bê tông ở nhiệt độ ban đầu T_0 . A_λ và A_c là các tham số của mô hình.

2.2. Mô hình cơ học phá hủy trong bê tông

Trong nghiên cứu này, mô hình ứng xử cơ học được sử dụng là mô hình Mazars áp dụng cho các phần tử lưới lattice. Ứng suất trong mô hình của Mazars được xác định như sau:

$$\sigma = (1 - d) D_e \varepsilon = (1 - d) \bar{\sigma} \tag{8}$$

Trong đó, D_e là ma trận độ cứng đàn hồi Hooke, E và γ là các thông số của mô hình, kiểm soát mô đun Young và hệ số Poisson của vật liệu; $\bar{\sigma} = (\bar{\sigma}_n, \bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_\phi)^T$; ε là biến dạng đàn hồi. Trong trường hợp ứng suất phẳng, và lưới lattice đều, hệ số Poisson ν được xác định như sau:

$$\nu = \frac{1 - \gamma}{3 + \gamma} \tag{9}$$

Biến phá hủy của vật liệu d là hàm số của biến lịch sử κ , được xác định bởi hàm tải trọng:

$$f(\varepsilon, \kappa) = \varepsilon_{eq}(\varepsilon) - \kappa \tag{10}$$

Điều kiện trạng thái gia tải và hạ tải được xác định như sau:

$$f \leq 0, \quad \dot{\kappa} \geq 0, \quad \dot{\kappa} f = 0 \tag{11}$$

Biến dạng tương đương ε_{eq} được xác định như sau:

$$\varepsilon_{eq}(\varepsilon_s, \varepsilon_n) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (1 - c) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 (1 - c) + \varepsilon_n\right)^2 + \frac{c \lambda^2 \varepsilon_s^2}{q}} \tag{12}$$

Trong đó, ε_0 , c và q là những thông số của mô hình. E_0 được tính từ ứng suất chịu kéo f_t ($\varepsilon_0 = f_t/E$); q là tỷ số giữa ứng suất chịu cắt và ứng suất chịu kéo ($q = f_s/f_t$) và c là tỷ số giữa ứng suất chịu nén và chịu kéo ($c = f_c/f_t$). Theo Grassl and Jirasek [7], biến dạng tương đương chỉ phụ thuộc vào hai thành phần biến dạng pháp tuyến và biến dạng trượt ε_n và ε_s .

2.3. Ảnh hưởng của nứt đến hệ số truyền nhiệt

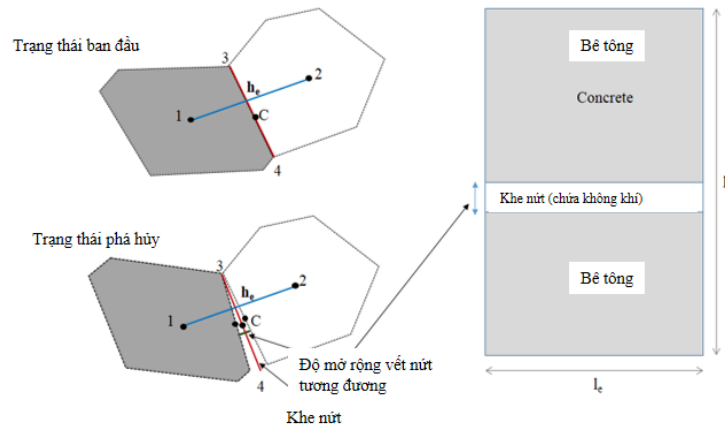
Trong nghiên cứu này, mô hình ứng xử nhiệt - cơ bằng lưới lattice được xây dựng dựa trên việc xem xét ảnh hưởng của sự phá hủy cơ học đến độ dẫn nhiệt của bê tông thông qua tham số độ mở rộng vết nứt tương đương $\bar{\omega} = \|\omega\|$ với ω là véc tơ độ mở rộng vết nứt được xác định theo công thức tổng quát. Với trường hợp mô hình cơ học phá hủy đàn hồi của Mazars, véc tơ này có thể được xác định dưới dạng hàm của biến dạng tổng ϵ và biến phá hủy d :

$$\omega = h_e d \epsilon \tag{13}$$

Giả thiết rằng lỗ rỗng được lấp đầy bởi không khí, khi đó độ dẫn nhiệt tương đương của từng phần tử lưới được xác định bởi:

$$\begin{cases} \lambda_T^* = \lambda_c & (\bar{\omega} = 0) \\ \lambda_T^* = \lambda^*(\bar{\omega}, \lambda_c, \lambda_a, h_e, l_e) & (\bar{\omega} \neq 0) \end{cases} \tag{14}$$

Trong đó: λ_a and λ_c lần lượt là độ dẫn nhiệt của không khí và bê tông, h_e và l_e là chiều rộng và chiều dài của phần tử lattice.



Hình 1. Phần tử lưới truyền nhiệt có vết nứt vuông góc với hướng truyền.

Giả thiết rằng, vết nứt vuông góc với hướng truyền nhiệt Hình 1. Độ dẫn nhiệt tương đương λ_T^* được xác định như sau:

$$\lambda_T^* = \frac{1}{\frac{1-\omega^*}{\lambda_c} + \frac{\omega^*}{\lambda_a}} \quad (\omega^* = \frac{\bar{\omega}}{h_e}) \tag{15}$$

Trong đó, độ dẫn nhiệt của bê tông được xác định theo mô hình của Gawin et al. [16]:

$$\lambda_c = \lambda_{dry} \left(1 + 4 \frac{S_I \varphi \rho_l}{(1-\varphi) \rho^s} \right) \tag{16}$$

Trong đó: φ là độ rỗng của bê tông, ρ_c là khối lượng riêng của bê tông, ρ_l là khối lượng riêng của pha lỏng trong bê tông, S_I là độ bão hòa của bê tông và λ_{dry} là hệ số truyền nhiệt của vật liệu khô. Bê tông được giả thiết là khô hoàn toàn dưới nhiệt độ cao nên $S_I=0$ dẫn tới $\lambda_c = \lambda_{dry}$ với $\lambda_{dry} = \lambda_0 [1 + A_\lambda (T - T_0)]$ ta có:

$$\lambda_c = \lambda_0 [1 + A_\lambda (T - T_0)] \tag{17}$$

Bên cạnh đó, dựa trên kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu của Stephan and Laesecker [17], độ dẫn nhiệt của không khí có thể được xấp xỉ bằng hàm đa thức của nhiệt độ:

$$\lambda_a = A_1 T^3 + A_2 T^2 + A_3 T + A_4 \tag{18}$$

Với: $A_1 = 1.5207 \times 10^{-11}$; $A_2 = -4.8574 \times 10^{-8}$; $A_3 = 1.0184 \times 10^{-4}$; $A_4 = -3.9333 \times 10^{-4}$.

Thay phương trình (17) và phương trình (18) vào phương trình (15) ta thu được:

$$\lambda_T^* (\omega^*) = \lambda_0 \frac{[1 + A_\lambda (T - T_0)]}{1 - \omega^* + \omega^* \cdot f(T)} \tag{19}$$

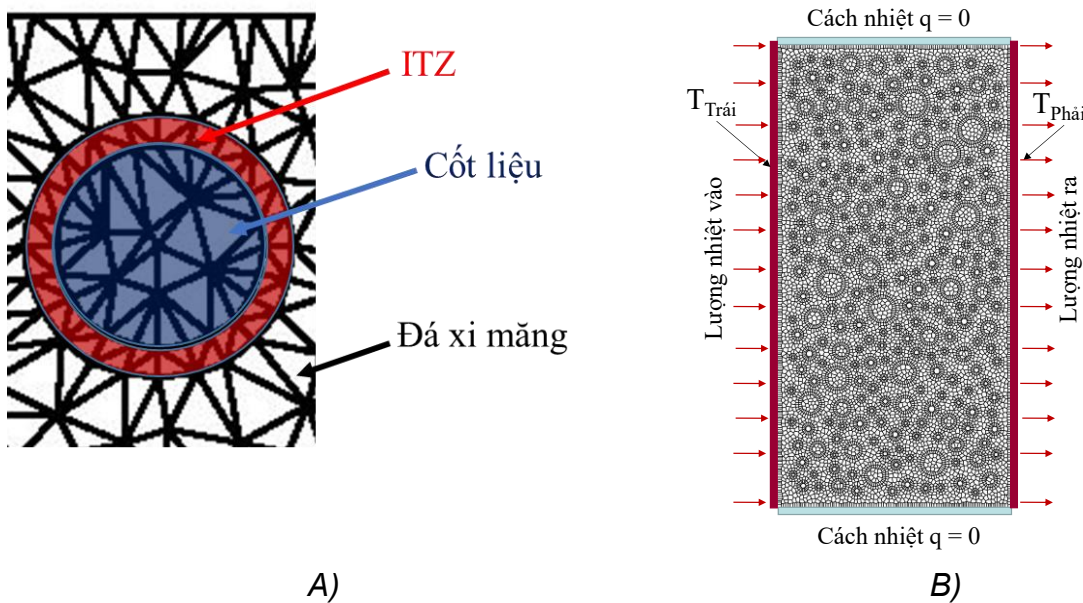
Trong đó:

$$f(T) = \frac{\lambda_c}{\lambda_a} = \frac{\lambda_0 [1 + A_\lambda (T - T_0)]}{A_1 T^3 + A_2 T^2 + A_3 T + A_4} \tag{20}$$

3. MÔ PHỎNG DỰ BÁO SỰ THAY ĐỔI HỆ SỐ TRUYỀN NHIỆT CỦA BÊ TÔNG

Mô hình lưới được xây dựng ở phần trên được số hóa và triển khai trong phần mềm mã nguồn mở OOFEM [18]. Quá trình thiết lập hình học và chia lưới miền nghiên cứu được thực hiện dựa trên các nguyên tắc xây dựng mô hình lưới đã được trình bày chi tiết trong các nghiên cứu [19], [20].

Trong nghiên cứu này, mẫu bê tông chịu tác dụng đồng thời của trường nhiệt độ và tải trọng đơn trục, bao gồm kéo hoặc nén. Tải trọng cơ học được áp đặt thông qua điều kiện điều khiển chuyển vị (u). Biến dạng trung bình của mẫu được xác định theo biểu thức $\epsilon = u/H$, trong đó (H) là chiều cao mẫu theo phương tác dụng tải. Ứng suất trung bình được xác định từ phản lực gối (P) sinh ra do chuyển vị áp đặt, theo quan hệ $\sigma = P/L$, với (L) là kích thước đặc trưng của tiết diện chịu tải. Kích thước hình học của mẫu và các điều kiện biên sử dụng trong mô phỏng được trình bày trong Hình 2. Các thông số vật liệu của các pha thành phần được tổng hợp trong Bảng 1 và Bảng 2.



Hình 2. a) Ba thành phần của vật liệu; b) điều kiện biên nhiệt học.

Bảng 1. Tính chất cơ học của các vật liệu thành phần.

	$E(\text{Pa})$	$\Gamma (-)$	$F_t (\text{Pa})$	$F_s (\text{Pa})$	$F_c (\text{Pa})$	$G_{fc} (\text{J/m}^2)$	$G_{ft} (\text{J/m}^2)$
Cốt liệu	60×10^9	0.08	-	-	-		
Đá xi măng	20×10^9	0.33	4×10^6	8×10^6	50×10^6	3×10^6	3×10^2
ITZ	25×10^9	0.20	2×10^6	4×10^6	45×10^6	3×10^6	3×10^2

Bảng 2. Tính chất nhiệt của các vật liệu thành phần.

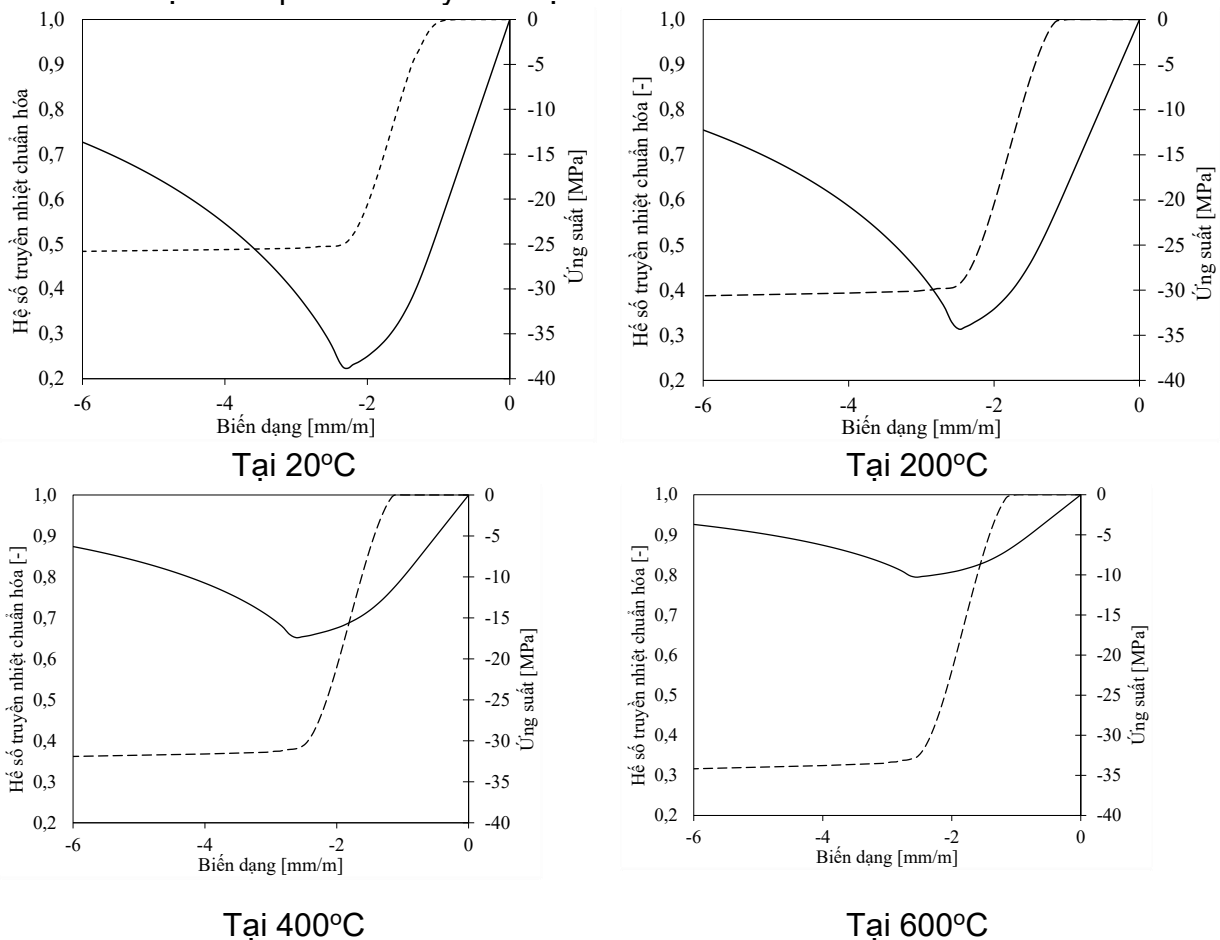
	$A_{t1} (^\circ\text{C}^{-1})$	$A_{t2} (^\circ\text{C}^{-2})$	$A_{t3} (^\circ\text{C}^{-3})$	$A_\lambda (\text{K}^{-1})$	$A_c (\text{K}^{-1})$
Cốt liệu	1.5×10^{-5}	7×10^{-8}	0	-5×10^{-4}	10^{-4}
Đá xi măng	1.5×10^{-6}	0	-6×10^{-11}	-2×10^{-4}	10^{-4}
ITZ	1.5×10^{-6}	0	-6×10^{-11}	-2×10^{-4}	10^{-4}

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

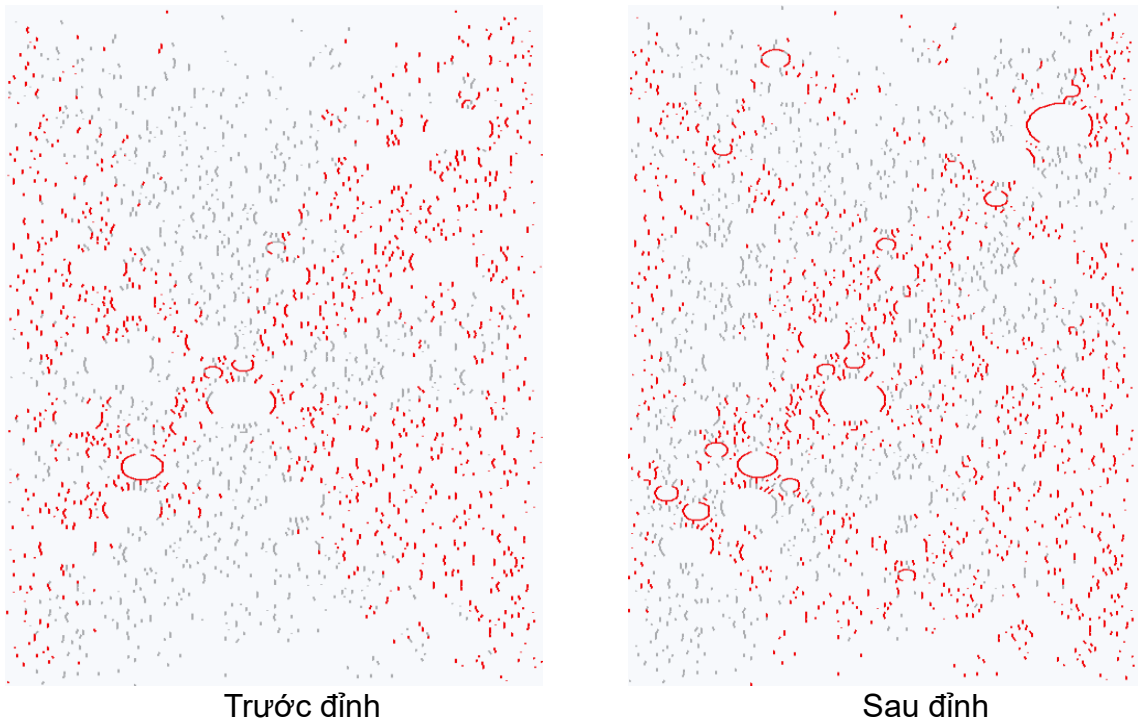
Hình 3 trình bày sự biến đổi của hệ số truyền nhiệt theo biến dạng của bê tông tại các mức nhiệt độ 20°C, 200°C, 400°C và 600°C. Kết quả cho thấy hệ số truyền nhiệt có xu hướng giảm khi biến dạng tăng, phản ánh ảnh hưởng của quá trình tích lũy hư hỏng cơ học đến khả năng truyền nhiệt của bê tông. Ở giai đoạn biến dạng nhỏ, hệ số truyền nhiệt thay đổi không đáng kể do mẫu bê tông vẫn làm việc chủ yếu trong miền đàn hồi, cấu trúc vật liệu chưa xuất hiện các vết nứt rõ rệt.

Khi biến dạng tăng, các vi nứt bắt đầu hình thành, trước hết tại vùng tiếp giáp giữa cốt liệu và đá xi măng, sau đó lan truyền vào nền vữa xi măng. Sự phát triển của hệ thống vết nứt làm gián đoạn đường truyền nhiệt liên tục trong vật liệu, dẫn đến hệ số truyền nhiệt suy giảm rõ rệt. Ở giai đoạn biến dạng lớn, khi các vết nứt đã phát triển và liên kết với nhau, tốc độ suy giảm hệ số truyền nhiệt có xu hướng chậm lại do cấu trúc truyền nhiệt chính của vật liệu đã bị phá vỡ đáng kể.

Ảnh hưởng của nhiệt độ đến hệ số truyền nhiệt cũng thể hiện rõ ràng. Khi nhiệt độ tăng từ 20°C lên 600°C, hệ số truyền nhiệt có xu hướng giảm và mức độ nhạy cảm với biến dạng tăng lên. Ở 20°C, sự suy giảm hệ số truyền nhiệt chủ yếu do nứt cơ học gây ra. Trong khi đó, tại các mức nhiệt độ cao hơn, đặc biệt là 400°C và 600°C, bê tông đã xuất hiện các hư hỏng nhiệt như mất nước trong hồ xi măng, suy giảm liên kết vùng ITZ và phát triển vi nứt do chênh lệch biến dạng nhiệt giữa cốt liệu và nền xi măng. Các hư hỏng nhiệt này làm giảm tính liên tục của vi cấu trúc và làm cho hệ số truyền nhiệt ban đầu thấp hơn. Khi kết hợp với biến dạng cơ học, các vi nứt có sẵn tiếp tục mở rộng và liên kết, dẫn đến sự suy giảm mạnh hơn của khả năng truyền nhiệt. Như vậy, hệ số truyền nhiệt của bê tông chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và trạng thái biến dạng, trong đó nhiệt độ cao làm gia tăng mức độ suy thoái vi cấu trúc và khuếch đại tác động bất lợi của nứt cơ học đến quá trình truyền nhiệt.



Hình 3. Sự thay đổi hệ số truyền nhiệt theo nhiệt độ và ứng suất.



Hình 4. Sự phá hủy mẫu khi chịu đồng thời nhiệt độ và tải trọng.

Hình 4 trình bày phân bố hư hỏng của mẫu bê tông chịu nén tại hai thời điểm trước và sau đỉnh ứng suất. Trước đỉnh, hư hỏng chủ yếu xuất hiện dưới dạng các vi nứt phân tán trong mẫu. Các vùng nứt chưa tạo thành dải phá hoại liên tục, cho thấy mẫu vẫn còn duy trì được tính toàn vẹn tương đối và khả năng truyền tải ứng suất. Các vi nứt ban đầu thường tập trung tại những vùng yếu của vật liệu, đặc biệt là quanh khuyết tật, lỗ rỗng và vùng tiếp giáp giữa cốt liệu và hồ xi măng. Dưới tác dụng của tải nén, các vi nứt phát triển dần nhưng chưa đủ để gây mất ổn định toàn cục của mẫu.

Sau đỉnh ứng suất, mật độ hư hỏng tăng rõ rệt, đồng thời các vi nứt có xu hướng mở rộng và liên kết với nhau. Sự phân bố của các vùng hư hỏng màu đỏ cho thấy quá trình phá hoại đã chuyển từ trạng thái phân tán sang trạng thái khu trú. Các cụm nứt phát triển mạnh tạo thành các vùng yếu kéo dài, làm gián đoạn đường truyền ứng suất trong mẫu và dẫn đến sự suy giảm nhanh khả năng chịu tải. Đây là cơ chế phá hoại đặc trưng của bê tông chịu nén, trong đó sau khi đạt cường độ cực đại, sự phát triển không ổn định của hệ thống vết nứt làm cho vật liệu mất dần độ cứng và khả năng chịu lực.

Ảnh hưởng của nhiệt độ thể hiện thông qua sự xuất hiện sớm và phân bố rộng của các vùng hư hỏng. Khi bê tông chịu nhiệt độ cao, quá trình mất nước trong hồ xi măng, suy giảm liên kết tại vùng chuyển tiếp ITZ và sự không tương thích biến dạng nhiệt giữa các pha vật liệu làm gia tăng số lượng vi nứt ban đầu. Vì vậy, dưới tác dụng của tải nén, các vi nứt nhiệt có sẵn dễ dàng mở rộng và liên kết hơn, làm tăng lan truyền nứt ở giai đoạn sau đỉnh. Kết quả này phù hợp với xu hướng suy giảm cường độ, mô đun đàn hồi và hệ số truyền nhiệt của bê tông khi nhiệt độ tăng.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng mô hình lưới cơ-nhiệt ở cấp độ trung bình dựa trên rời rạc hóa Voronoi-Delaunay để dự báo sự suy giảm tính chất nhiệt học của bê tông dưới tác dụng của tải trọng và nhiệt độ cao. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ số truyền nhiệt của bê tông sau khi chịu nhiệt độ không phải là đại lượng không đổi mà biến đổi rõ rệt theo trạng thái biến dạng và mức độ hư hỏng của vật liệu.

Ở giai đoạn trước đỉnh ứng suất, hư hỏng chủ yếu ở dạng vi nứt phân tán nên hệ số truyền nhiệt thay đổi không lớn. Khi biến dạng tăng và các vi nứt phát triển, liên kết với nhau, khả năng truyền nhiệt của bê tông suy giảm do sự mất liên tục của cấu trúc vật

liệu. Sau đỉnh ứng suất, quá trình phá hoại chuyển từ dạng phân tán sang khu trú, làm suy giảm nhanh khả năng chịu tải và làm thay đổi đáng kể đặc trưng truyền nhiệt. Nhiệt độ cao làm gia tăng các khuyết tật ban đầu trong hồ xi măng và vùng chuyển tiếp ITZ, do đó thúc đẩy sự phát triển vết nứt dưới tải nén và làm giảm hệ số truyền nhiệt mạnh hơn. Các kết quả này khẳng định mối quan hệ chặt chẽ giữa nhiệt độ, biến dạng cơ học, quá trình phá hoại và sự suy giảm hệ số truyền nhiệt của bê tông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Liu and R. W. Weyers, "Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 3, pp. 365-379, Mar, 1998. Doi: 10.1016/S0008-8846(98)00259-2.
- [2] A. V. Saetta, B. A. Schrefler, and R. V. Vitaliani, "The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, no. 4, pp. 761-772, Jul, 1993. Doi: 10.1016/0008-8846(93)90030-D.
- [3] Z. P. Bažant and L. J. Najjar, "Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete," *Matér. Constr.*, vol. 5, no. 1, pp. 3-20, Jan, 1972. Doi: 10.1007/BF02479073.
- [4] A. Djerbi, S. Bonnet, A. Khelidj, and V. Baroghel-bouny, "Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 6, Art. No. 6, Jun, 2008. Doi: 10.1016/j.cemconres.2007.10.007.
- [5] V. Živica, L. Krajči, L. Bágel', and M. Vargová, "Significance of the ambient temperature and the steel material in the process of concrete reinforcement corrosion," *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, no. 2, pp. 99-103, Mar, 1997. Doi: 10.1016/S0950-0618(97)00001-9.
- [6] K.-H. Kim, S.-E. Jeon, J.-K. Kim, and S. Yang, "An experimental study on thermal conductivity of concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 3, pp. 363-371, Mar, 2003. Doi: 10.1016/S0008-8846(02)00965-1.
- [7] P. Grassl and M. Jirásek, "Meso-scale approach to modelling the fracture process zone of concrete subjected to uniaxial tension," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 47, no. 7, pp. 957-968, Apr, 2010. Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2009.12.010.
- [8] T. Z. Harmathy, "Thermal properties of concrete at elevated temperatures," *J. Mater.*, vol. 5, no. 1, Art. No. 1, 1970.
- [9] M. I. Khan, "Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models," *Build. Environ.*, vol. 37, no. 6, pp. 607-614, Jun, 2002. Doi: 10.1016/S0360-1323(01)00061-0.
- [10] Benoît Bary, Jean-Pierre Bournazel, and Eric Bourdarot, "Poro-Damage Approach Applied to Hydro-Fracture Analysis of Concrete," *J. Eng. Mech.*, vol. 126, no. 9, Art. No. 9, 2000. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:9(937).
- [11] B. Bary, "Estimation of poromechanical and thermal conductivity properties of unsaturated isotropically microcracked cement pastes," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 35, no. 14, pp. 1560-1586, 2011. Doi: 10.1002/nag.969.
- [12] Z. Perkowski, "Change of thermal conductivity of concrete caused by brittle damage evolution," *Bauphysik*, vol. 30, no. 6, pp. 434-437, 2008. Doi: 10.1002/bapi.200810057.
- [13] E. Vejmelková, P. Padevět, and R. Černý, "Effect of cracks on hygric and thermal characteristics of concrete," *Bauphysik*, vol. 30, no. 6, pp. 438-444, 2008. Doi: 10.1002/bapi.200810058.
- [14] S. Tang, C. Tang, Z. Liang, and Y. Zhang, "Numerical Study of the Influence of Material Structure on Effective Thermal Conductivity of Concrete," *Heat Transf. Eng.*, vol. 33, no. 8, Art. No. 8, Jun. 2012, doi: 10.1080/01457632.2011.635988.

[15] L. Shen, Q. Ren, N. Xia, L. Sun, and X. Xia, "Mesoscopic numerical simulation of effective thermal conductivity of tensile cracked concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 95, pp. 467-475, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.117.

[16] D. Gawin, C. Majorana, and B. Schrefler, "Numerical analysis of hygro-thermal behaviour and damage of concrete at high temperature," *Mech. Cohesive-Frict. Mater.*, vol. 4, no. 1, pp. 37-74, Jan. 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-1484(199901)4:1<37::AID-CFM58>3.0.CO;2-S.

[17] K. Stephan and A. Laesecke, "The Thermal Conductivity of Fluid Air," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 14, no. 1, pp. 227-234, Jan. 1985, doi: 10.1063/1.555749.

[18] B. Patzák, "OOFEM — an Object-oriented Simulation Tool for Advanced Modeling of Materials and Structures," *Acta Polytech.*, vol. 52, no. 6, Art. No. 6, Jan. 2012, doi: 10.14311/1678.

[19] P. Grassl, "A lattice approach to model flow in cracked concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, pp. 454-460, 2009.

[20] P. Grassl, Hong S. Wong, and N. R. Buenfeld, "Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 2010, Art. No. 2010, 2010.