

# 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 tính chất của vật liệu bê tông dưới tác dụng của nhiệt độ cao**

Thermo - Mechanical modeling for predicting the properties of concrete under High temperature exposure

➤ **Nguyễn Lê Đạt<sup>1</sup>; Phạm Đức Thọ<sup>2</sup>; Vũ Minh Ngạn<sup>2</sup>; Đặng Trung Thành<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Tập đoàn Công nghiệp - Viễn thông Quân đội

<sup>2</sup>Nhóm nghiên cứu GECS, Trường Đại học Mở - Địa chất

\*Email: [nguyenledat@gmail.com](mailto:nguyenledat@gmail.com)

---

## **THÔNG TIN BÀI BÁO**

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 27/3/2026

Ngày sửa bài: 09/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 12/4/2026

Ngày xuất bản Online: 18/4/2026

Tác giả liên hệ:

Email: [nguyenledat@gmail.com](mailto:nguyenledat@gmail.com)

---

## **TÓM TẮT**

Dưới tác động của nhiệt độ cao và hỏa hoạn, bê tông xuất hiện nhiều biến đổi vật lý, hóa học và cơ học, như mất nước tự do và các sản phẩm thủy hóa, tính không tương thích giãn nở nhiệt giữa cốt liệu và hồ xi măng, sự hình thành và phát

triển vi nứt tại vùng chuyển tiếp (ITZ), từ đó làm suy giảm đáng kể các tính chất cơ học của vật liệu.

Bài báo này trình bày mô hình lưới cơ nhiệt ở cấp độ trung bình để dự báo sự suy giảm mô đun đàn hồi, cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo của bê tông khi chịu nhiệt độ cao. Trong mô hình này, bê tông được lý tưởng hóa như vật liệu ba pha gồm đá xi măng, cốt liệu và vùng chuyển tiếp ITZ; quá trình rời rạc hóa được xây dựng trên lưới Voronoi-Delaunay và được phát triển trong phần mềm mã nguồn mở OOFEM.

Kết quả mô phỏng cho thấy mô đun đàn hồi suy giảm mạnh ngay từ vùng nhiệt độ thấp đến trung bình, trong khi cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo giảm rõ rệt hơn khi nhiệt độ vượt khoảng 300 - 400°C. Các kết quả mô phỏng số thu được phù hợp tốt với thực nghiệm và một số mô hình như Eurocode và DTU, cho thấy mô hình đề xuất có khả năng mô tả ứng xử cơ - nhiệt và dự báo sự suy giảm tính chất cơ học của bê tông dưới tác dụng của nhiệt độ cao.

**Từ khóa:** Mô hình lưới lattice; bê tông nhiệt độ cao; ứng xử cơ - nhiệt; cấp độ trung bình.

## ABSTRACT

Under high-temperature exposure and fire conditions, concrete undergoes various physical, chemical, and mechanical transformations, such as moisture loss, dehydration of hydration products, thermal expansion mismatch between aggregates and cement paste, and the initiation and propagation of microcracks in the interfacial transition zone (ITZ), which significantly deteriorates the mechanical properties of concrete.

This paper presents a meso-scale thermo-mechanical lattice model for predicting the degradation of Young's modulus, compressive strength, and tensile strength of concrete subjected to elevated temperatures. In this model, concrete is idealized as a three-phase material consisting of the cement matrix, aggregates, and the ITZ; the discretization is constructed based on the Voronoi - Delaunay tessellation and implemented in the open-source OOFEM.

The simulation results show that Young's modulus decreases markedly from the low- to intermediate-temperature range, whereas the compressive and tensile strengths exhibit more pronounced reductions when the temperature exceeds approximately 300 - 400°C. The numerical results are in good agreement with experimental data and with reference models such as Eurocode and DTU, indicating that the proposed model is capable of describing the thermo - mechanical behavior and predicting the degradation of the mechanical properties of concrete under high-temperature exposure.

**Keywords:** Lattice model; concrete under high temperature; thermo - mechanical behavior; meso-scale.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông là vật liệu không cháy, tuy nhiên khi làm việc trong điều kiện nhiệt độ cao hoặc hỏa hoạn, tính chất cơ học của bê tông bị suy giảm mạnh. Sự suy giảm này bắt nguồn từ hàng loạt quá trình lý - hóa - cơ phức tạp diễn ra đồng thời trong bê tông, bao gồm giãn nở nhiệt của cốt liệu, co ngót và mất nước của hồ xi măng, biến đổi hóa học của các sản phẩm thủy hóa, sự gia tăng gradient nhiệt, tính không tương thích giãn nở nhiệt giữa cốt liệu và đá xi măng, sự tăng áp suất khí và ứng suất nén cục bộ ở vùng gần bề mặt chịu nhiệt, cũng như sự hình thành, phát triển vết nứt và hiện tượng từ biến ở nhiệt độ cao. Các tác động cơ - nhiệt này có thể dẫn đến nứt vỡ và bong tróc bê tông bảo vệ (spalling), với chiều dày lớp bong tróc có thể đạt tới 10 - 20 cm, từ đó làm suy giảm nghiêm trọng, thậm chí triệt tiêu hoàn toàn khả năng chịu lực và khả năng chống đỡ của công trình.

Theo Ma và cộng sự [1], khi bê tông chịu tác động của nhiệt độ cao, quá trình suy giảm cơ học bắt đầu từ sự mất nước tự do và nước hấp phụ trong hệ lỗ rỗng, sau đó phát triển thành vi nứt do chênh lệch giãn nở nhiệt giữa đá xi măng, cốt liệu và vùng chuyển tiếp ITZ. Ở các mức nhiệt cao hơn, sự phân hủy từng phần các sản phẩm thủy hóa làm cho cấu trúc nền xi măng trở nên rời rạc hơn, độ rỗng tăng lên và khả năng truyền ứng suất suy giảm. Kodur [2] cũng thấy rằng tính chất nhiệt, tính chất cơ học và các đặc trưng biến dạng của bê tông thay đổi đồng thời theo nhiệt độ; do đó, đánh giá bê tông sau cháy cần được tiếp cận như một bài toán

tổng hợp giữa truyền nhiệt, biến đổi vi cấu trúc và suy giảm khả năng chịu lực, thay vì chỉ xem xét riêng cường độ nén.

Nhiều nghiên cứu thực nghiệm [3], [4], [5], [6] cho thấy rằng ở khoảng  $300^{\circ}\text{C}$ , nhiệt độ chỉ có ảnh hưởng rất nhỏ đến cường độ chịu nén của bê tông. Ở mức nhiệt độ này, bê tông chỉ mất khoảng 10 - 15% cường độ chịu nén. Tuy nhiên, trong khoảng từ  $300^{\circ}\text{C}$  đến  $800^{\circ}\text{C}$ , gần như 80 - 90% cường độ chịu nén của bê tông bắt đầu bị suy giảm mạnh.

Để mô tả ứng xử của bê tông dưới tác dụng của nhiệt độ cao, nhiều mô hình hiện tượng học ở cấp vĩ và mô hình cơ học vi mô đã được đề xuất. Tuy nhiên, các cách tiếp cận này thường chưa phản ánh đầy đủ tính không đồng nhất của bê tông, tương tác giữa cốt liệu và nền xi măng, cũng như các cơ chế hư hỏng cục bộ. Vì vậy, các mô hình cấp độ trung bình (mesoscopic models) đã được phát triển nhằm mô tả chi tiết hơn sự thay đổi tính chất của bê tông theo quá trình hư hỏng và nứt [7], [8]. Theo cách tiếp cận này, bê tông được xem là vật liệu ba pha gồm cốt liệu, nền xi măng và vùng chuyển tiếp liên pha (interfacial transition zone - ITZ). Ngoài ra, khi sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn truyền thống, lời giải thường bị phụ thuộc lưới trong trường hợp mô hình vật liệu có xét đến hiện tượng mềm hóa (softening).

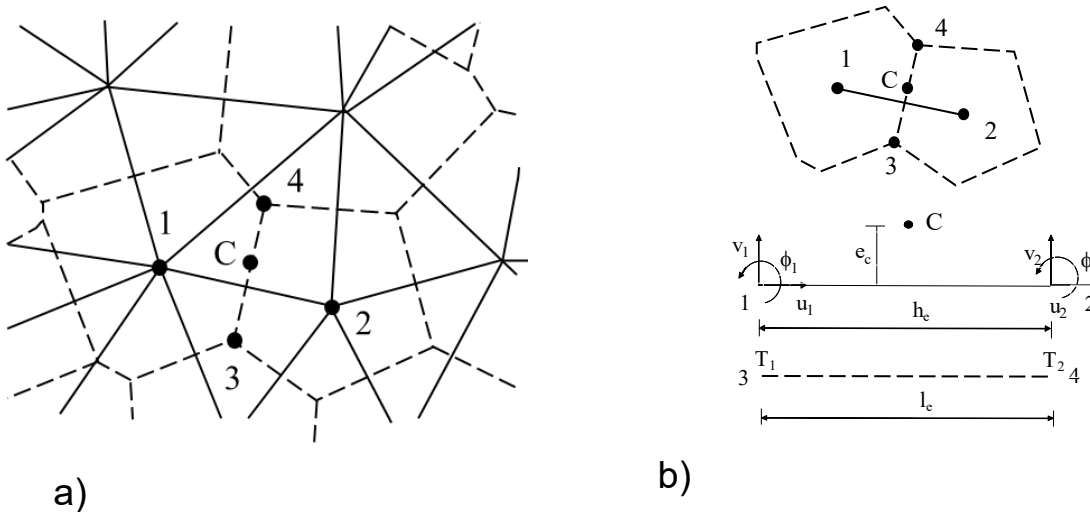
Bên cạnh đó, cách tiếp cận mô hình vết nứt rời rạc (discrete crack approach) cũng được áp dụng để mô tả sự suy giảm tính chất cơ - nhiệt của bê tông ở cấp độ trung bình. Trong phương pháp này, các phần tử tiếp xúc có bề dày bằng không được bố trí dọc theo các bề mặt tiếp giáp giữa cốt liệu và hồ xi măng nhằm mô phỏng quá trình phát sinh và phát triển vết nứt. Tuy nhiên, để hạn chế tính phụ thuộc lưới, phương pháp này đòi hỏi lưới chia rất mịn, dẫn đến chi phí tính toán lớn và thời gian phân tích đáng kể.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này xây dựng mô hình lưới cơ - nhiệt ở cấp độ trung bình dựa trên sơ đồ Voronoi và tam giác Delaunay [9] nhằm mô phỏng cấu trúc không đồng nhất của bê tông và mô phỏng sự thay đổi một số tính chất cơ học của vật liệu dưới tác dụng của nhiệt độ cao.

## 2. MÔ HÌNH LƯỚI NHIỆT - CƠ

### 2.1 Rời rạc phần tử

Rời rạc hóa các phần tử mô hình lưới (lattice discretization) cho bài toán nhiệt - cơ trên miền 2D được thực hiện bằng cách xây dựng cặp lưới đối ngẫu gồm các tam giác Delaunay và các đa giác Voronoi trên cơ sở các điểm được phân bố ngẫu nhiên [9]. Các phần tử cho bài toán 1D được đặt dọc theo các cạnh của đa giác Voronoi, trong khi các phần tử cơ học nằm dọc theo các cạnh của tam giác Delaunay. Hai bài toán mô phỏng nhiệt và cơ được tổ hợp tại trung điểm C của cạnh chung giữa hai đa giác Voronoi (Hình 1), tại đây xây dựng (constitutive responses) cho cả hai trường (nhiệt và cơ). Các quy tắc và quy trình sinh đỉnh (nút), cũng như hệ phương trình của phần tử mạng lưới vật lý, được trình bày chi tiết trong Grassl và cộng sự (Hình 2) [10], [11], [12].



a) Đa giác Voronoi và tam giác Delaunay, b) Phần tử hữu hạn

Hình 1. Rời rạc phần tử mô hình.

### 2.2. Mô hình toán học

Ứng suất  $\sigma = (\sigma_n, \sigma_s)^T$  được xác định từ biến dạng  $\epsilon_e = (\epsilon_{en}, \epsilon_{es})^T$  thông qua biến phá hủy  $d$  và ma trận đàn hồi  $D_e$  được biểu diễn như sau:

$$\sigma = (1-d)D_e\epsilon_e = (1-d)\begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & \gamma E \end{pmatrix}\epsilon_e \quad (1)$$

Trong đó:

$$E = \frac{\bar{E}}{1-\nu}; \quad \gamma = \frac{1-3\nu}{\nu+1} \quad (2)$$

$E$  và  $\gamma$  là các thông số của mô hình, kiểm soát mô-đun Young và hệ số Poisson của vật liệu;  $\bar{\sigma} = (\bar{\sigma}_n, \bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_\phi)^T$ ;  $\varepsilon$  là biến dạng đàn hồi. Trong trường hợp ứng suất phẳng, và phần tử lưới lattice đều, hệ số Poisson  $\nu$  được xác định như sau:

$$\nu = \frac{1-\gamma}{3+\gamma} \quad (3)$$

Sự tương tác nhiệt - cơ được thực hiện thông qua biến dạng như sau:

$$\varepsilon_e = \varepsilon - \varepsilon_T = \varepsilon - \alpha_T (T - T_0) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Ở đây  $\varepsilon$  là biến dạng tổng và  $\varepsilon_T$  là biến dạng nhiệt.

Theo nghiên cứu của Grassl and Pearce [1], iến dạng nhiệt là 1 hàm phụ thuộc và hệ số giãn nở nhiệt  $\alpha_T$ , nhiệt độ  $T$  và nhiệt độ ban đầu  $T_0$

$$\alpha_T(T) = \alpha_{T1} + \alpha_{T2}(T - T_0) + \alpha_{T3}(T - T_0)^2 \quad (5)$$

Ở đây,  $\alpha_{T1}$ ,  $\alpha_{T2}$ ,  $\alpha_{T3}$  là các tham số của vật liệu.

Biến phá hủy của vật liệu  $D$  là hàm số của biến lịch sử  $\kappa$ , được xác định bởi hàm tải trọng:

$$f(\varepsilon, \kappa) = \varepsilon_{eq}(\varepsilon) - \kappa \quad (6)$$

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

$$f \leq 0, \quad \dot{\kappa} \geq 0, \quad \dot{\kappa} f = 0 \quad (7)$$

Biến dạng tương đương  $\varepsilon_{eq}$  được xác định như sau:

$$\varepsilon_{eq}(\varepsilon_s, \varepsilon_n) = \frac{1}{2} \varepsilon_0(1-c) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \varepsilon_0(1-c) + \varepsilon_n\right)^2 + \frac{c\lambda^2 \varepsilon_s^2}{q^2}} \quad (8)$$

Trong đó:

-  $\varepsilon_0$ ,  $c$  và  $q$  là những thông số của mô hình.  $\varepsilon_0$  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 ( $q = f_s/f_t$ ).

-  $c$  là tỷ số giữa ứng suất chịu nén và chịu kéo ( $c = f_c/f_t$ ).

### 2.3. Biến dạng cơ - nhiệt

Trong mô hình cơ - nhiệt, biến dạng được xác định như sau:

$$\varepsilon_e = \varepsilon - \varepsilon_T = \varepsilon - \alpha_T (T - T_0) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Trong đó là biến dạng tổng, biến dạng nhiệt

Theo Hình 1b,  $\bar{u}_e = \{u_1, v_1, \phi_1, u_2, v_2, \phi_2\}^T$  là những ẩn nút của phần tử cơ học 1 - 2 và  $T_3, T_4$  là những ẩn nút của phần tử nhiệt 3 - 4.

Biến dạng  $\varepsilon_c = \{\varepsilon_{nc}, \varepsilon_{sc}\}^T$  tại điểm C có liên hệ với bước nhảy chuyển vị  $\bar{u}_c = \{u_c, v_c\}^T$  như sau:

$$\varepsilon_c = \frac{\bar{u}_c}{h_e} = \frac{1}{h_e} B \bar{u}_e = \frac{1}{h_e} \begin{bmatrix} -1 & 0 & e_c & 1 & 0 & -e_c \\ 0 & -1 & -h_e/2 & 0 & 1 & -h_e/2 \end{bmatrix} \bar{u}_e \quad (10)$$

Với  $h_e$  là chiều dài phần tử cơ học và  $e_c$  là độ lệch tâm của điểm C.

Trong phép nội suy tuyến tính đối với phần tử nhiệt:

$$T_e = \frac{T_4 - T_3}{2} \xi + \frac{T_4 + T_3}{2} \quad (11)$$

Ở đây  $\xi$  là tọa độ cục bộ ( $\xi = -1$  tại nút 3 và  $\xi=1$  tại nút 4). Vì thế, nhiệt độ tại trung điểm C ( $\xi = 0$ ) được xác định như sau:  $T_c = \frac{T_3 + T_4}{2}$ .

## 2.4. Truyền nhiệt phi tuyến

Phương trình truyền nhiệt phi tuyến tính được phát triển trong mô hình lưới để mô tả sự truyền nhiệt bên trong bê tông:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = 0 \quad (12)$$

Trong đó:  $T$  là nhiệt độ,  $\rho$  là trọng lượng riêng,  $t$  thời gian,  $\lambda$  hệ số truyền nhiệt và  $C$  là nhiệt dung riêng. Hai hệ số sau phụ thuộc và nhiệt độ, trong khuôn khổ luận án này sử dụng công thức trong [13]

$$\lambda = \lambda_0 [1 + A_\lambda (T - T_0)]; \quad C = C_0 [1 + A_C (T - T_0)] \quad (13)$$

Trong đó:  $\lambda_0$  và  $C_0$  lần lượt là hệ số truyền nhiệt và nhiệt dung riêng của vật liệu ở nhiệt độ ban đầu  $T_0$ ;  $A_\lambda$  và  $A_C$  là những tham số không đổi của vật liệu.

Sự thay đổi hệ số truyền nhiệt do phá hủy gây ra cũng được tính đến trong mô hình này. Để làm được điều này, hệ số truyền nhiệt của lưới phần tử nhiệt được xác định từ biến hư hỏng của phần tử cơ học. Mối quan hệ giữa độ truyền nhiệt và biến phá hủy có thể được thiết lập thông qua độ mở vết nứt tương đương  $\bar{e}$ . Giả sử vết nứt được lấp đầy hoàn toàn bằng không khí, hệ số truyền nhiệt tương đương của phần tử ống dẫn bị nứt  $\lambda^*$  được xác định bởi mô hình chuỗi.

$$\frac{1}{\lambda^*} = \left( \frac{\lambda_c}{1 - e^*} + \frac{\lambda_a}{e^*} \right) \quad (e^* = \frac{\bar{e}}{h_e}) \quad (14)$$

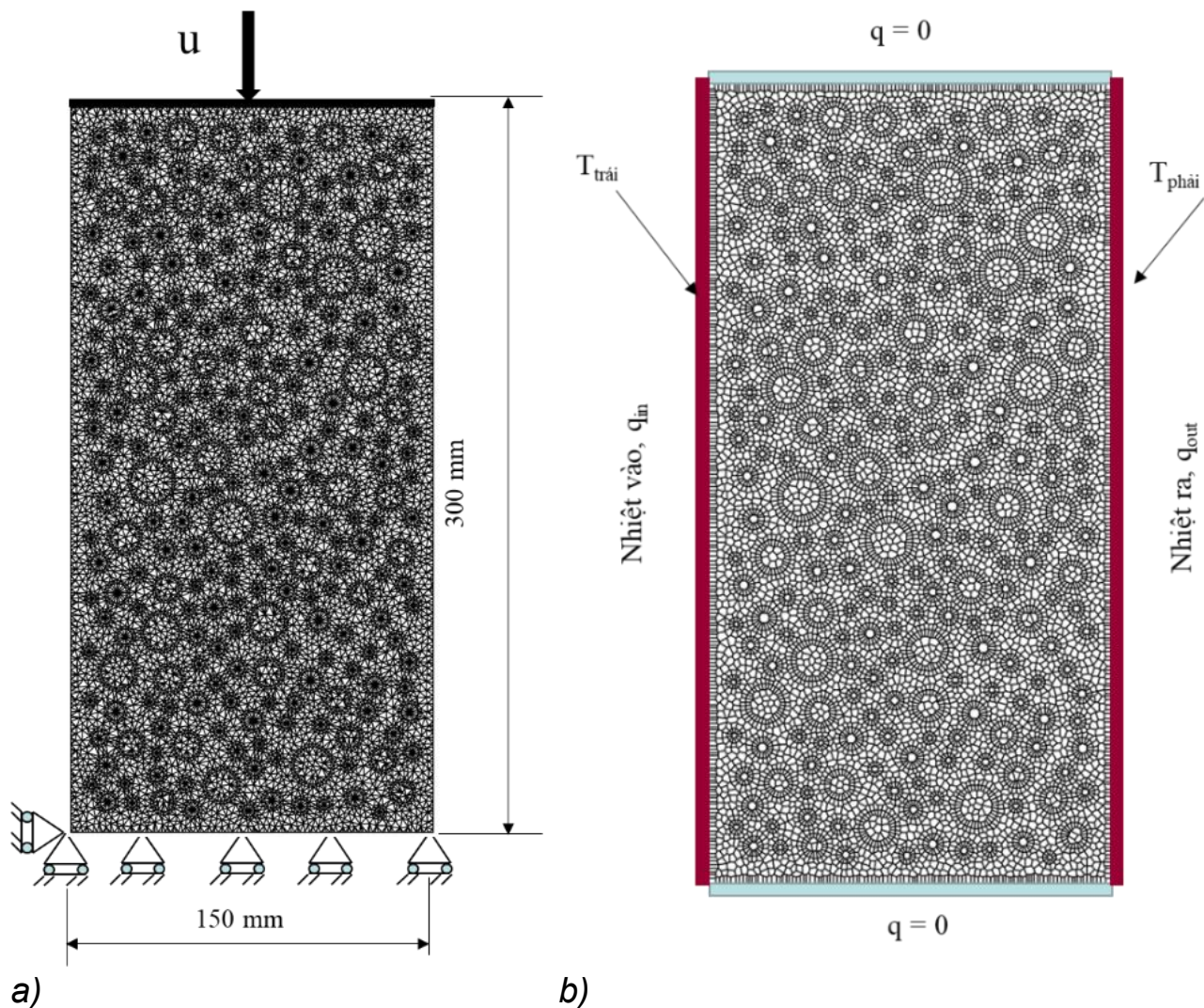
Trong đó:  $\lambda^*$  là một hàm số của hệ số truyền nhiệt của bê tông  $\lambda_c$  và của không khí  $\lambda_a$ , của độ mở rộng vết nứt tương đương  $\bar{e}$  và chiều cao  $h_e$ .

## 3. ỨNG DỤNG MÔ HÌNH LƯỚI NHIỆT - CƠ TRONG DỰ BÁO SUY GIẢM TÍNH CHẤT CƠ HỌC CỦA BÊ TÔNG

Mô hình lưới thiết lập ở phần trên được số hóa trong phần mềm mã nguồn mở OOFEM [14]. Việc thiết lập hình học và chia lưới miền nghiên cứu dựa trên các quy tắc về xây dựng mô hình lưới được giới thiệu chi tiết bởi các tác giả trong [11], [12]. Sau khi thiết lập bài toán mô phỏng số, kết quả mô phỏng sẽ được đối chiếu

với kết quả thí nghiệm thực tế của các nghiên cứu đã được công bố để kiểm chứng mô hình và dự báo một số tính chất cơ học của bê tông chịu nhiệt độ cao.

Mẫu thí nghiệm chịu tác dụng đồng thời của nhiệt độ và tải trọng đơn trục kéo hoặc nén. Tải trọng tác dụng được kiểm soát bởi chuyển vị  $u$ . Biến dạng trung bình được xác định  $\varepsilon = u/H$  và ứng suất được xác định từ phản lực gối  $P$  gây ra bởi chuyển vị  $\sigma = P/L$ . Kích thước và các điều kiện biên được thể hiện trong Hình 2. Tính chất của các vật liệu thành phần được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2.



Hình 2: a) điều kiện biên cơ học; b) điều kiện biên nhiệt học  
 Bảng 1. Tính chất cơ học của các vật liệu thành phần

	$E$ (Pa)	$\nu$ (-)	$f_t$ (Pa)	$f_s$ (Pa)	$f_c$ (Pa)	$G_{fc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_{ft}$ (J/m <sup>2</sup> )
<b>Cốt liệu</b>	60x10 <sup>9</sup>	0.08	-	-	-		
<b>Đá xi măng</b>	20x10 <sup>9</sup>	0.33	4x10 <sup>6</sup>	8x10 <sup>6</sup>	50x10 <sup>6</sup>	3x10 <sup>6</sup>	3x10 <sup>2</sup>
<b>ITZ</b>	25x10 <sup>9</sup>	0.20	2x10 <sup>6</sup>	4x10 <sup>6</sup>	45x10 <sup>6</sup>	3x10 <sup>6</sup>	3x10 <sup>2</sup>

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

	$\alpha_{T1}$ (°C <sup>-1</sup> )	$\alpha_{T2}$ (°C <sup>-2</sup> )	$\alpha_{T3}$ (°C <sup>-3</sup> )	$A_\lambda$ (K <sup>-1</sup> )	$A_c$ (K <sup>-1</sup> )
Cốt liệu	1.5x10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-8</sup>	0	-5x10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
Đá xi măng	1.5x10 <sup>-6</sup>	0	-6x10 <sup>-11</sup>	-2x10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
ITZ	1.5x10 <sup>-6</sup>	0	-6x10 <sup>-11</sup>	-2x10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>

## 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

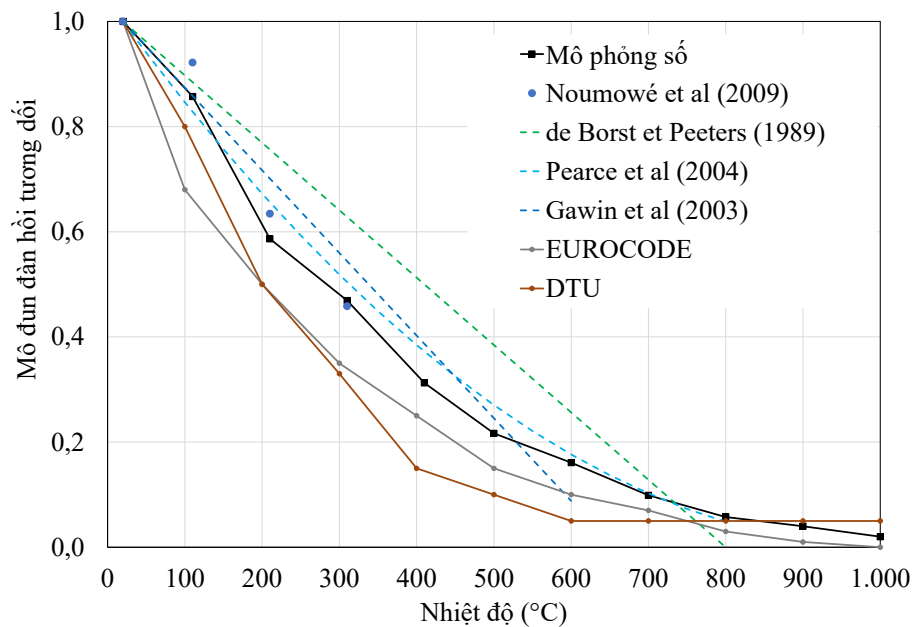
### 4.1. Mô đun đàn hồi

Ở nhiệt độ cao, do sự phân hủy của gel C-S-H và sự đứt gãy các liên kết trong vi cấu trúc của đá xi măng, mô-đun đàn hồi của bê tông suy giảm. Ở nhiệt độ môi trường, mô-đun đàn hồi của bê tông dao động trong khoảng 5 đến 35 GPa, phụ thuộc vào cường độ, tuổi bê tông, tỷ lệ nước/xi măng, loại cốt liệu...

Mô đun đàn hồi của mẫu bê tông được xác định từ quan hệ ứng suất-biến dạng, tương ứng với độ dốc của đường cong ứng suất-biến dạng ở chế độ đàn hồi (tức là ứng suất thấp hơn 40% cường độ). Hình 3 biểu diễn sự thay đổi mô đun đàn hồi tương đối ( $E_t/E_{20^\circ C}$ ) của bê tông theo nhiệt độ, kết quả mô phỏng số được so sánh với một số nghiên cứu đã được công bố và theo tiêu chuẩn Eurocode và DTU.

Kết quả cho thấy mô đun đàn hồi của bê tông giảm mạnh khi nhiệt độ tăng và sự suy giảm diễn ra theo nhiều giai đoạn. Từ nhiệt độ thường đến khoảng 300°C, mô đun giảm nhanh do xuất hiện vi nứt, mất nước tự do và sự không tương thích giãn nở nhiệt giữa cốt liệu và hồ xi măng. Trong khoảng 300 - 600°C, mức

suy giảm tiếp tục gia tăng do cấu trúc vi mô bị tổn thương mạnh hơn và các sản phẩm hydrat dần bị phân hủy. Trên 600°C, mô đun đàn hồi chỉ còn một phần rất nhỏ so với ban đầu, cho thấy độ cứng của bê tông gần như bị suy giảm nghiêm trọng. Kết quả mô phỏng số nhìn chung nằm trong khoảng giá trị của các mô hình và dữ liệu tham khảo, thể hiện xu hướng phù hợp với kết quả thực nghiệm. So với de Borst và Peeters (1989) [15], đường mô phỏng cho dự báo thấp hơn ở vùng nhiệt độ trung bình, trong khi ít thay đổi hơn hơn DTU và EUROCODE [16] ở một số khoảng nhiệt độ. Điều này cho thấy mô hình số có khả năng dự báo quy luật suy giảm mô đun đàn hồi của bê tông dưới tác động nhiệt độ cao. Mô hình cũng cho kết quả phù hợp với kết quả thực nghiệm do Noumowéa và cộng sự trình bày [3].

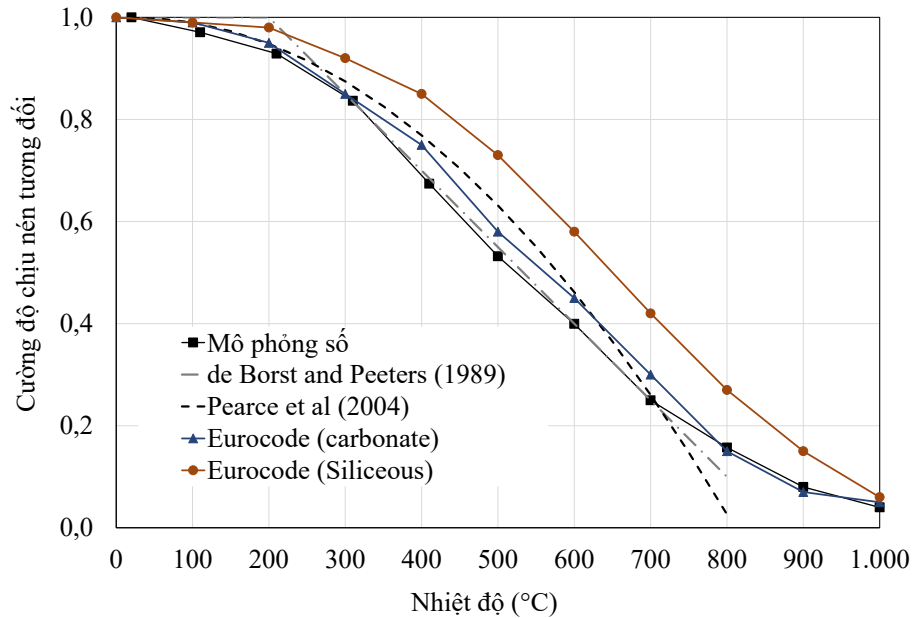


Hình 3. Sự thay đổi mô đun đàn hồi theo nhiệt độ.

#### 4.2. Cường độ chịu nén

Cường độ nén của mẫu bê tông tương ứng với giá trị ứng suất tại đỉnh đường cong ứng suất biến dạng trong. Sự thay đổi cường độ nén của bê tông theo nhiệt độ từ mô phỏng số và so sánh với các nghiên cứu của de Borst và Peeters (1989) [15], Pearce et al (2004) [17] và Eurocode được thể hiện trong Hình 4. Ở nhiệt độ dưới 200°C, cường độ gần như chưa giảm nhiều, cho thấy cấu trúc của bê tông vẫn còn tương đối ổn định. Từ 200°C đến 700°C, cường độ giảm liên tục do mất nước, phát triển vi nứt và phân hủy dần các sản phẩm hydrat, khi nhiệt độ vượt

quá khoảng 400°C, cường độ chịu nén của bê tông suy giảm mạnh. Trên 800°C, cường độ chỉ còn một phần rất nhỏ so với ban đầu, phản ánh sự suy yếu nghiêm trọng của vật liệu. Kết quả mô phỏng số phù hợp khá tốt với de Borst and Peeters (1989) [15] và Eurocode đối với bê tông cốt liệu carbonate. Điều này cho thấy mô hình có khả năng mô tả hợp lý quy luật suy giảm cường độ chịu nén của bê tông dưới tác động nhiệt độ cao.

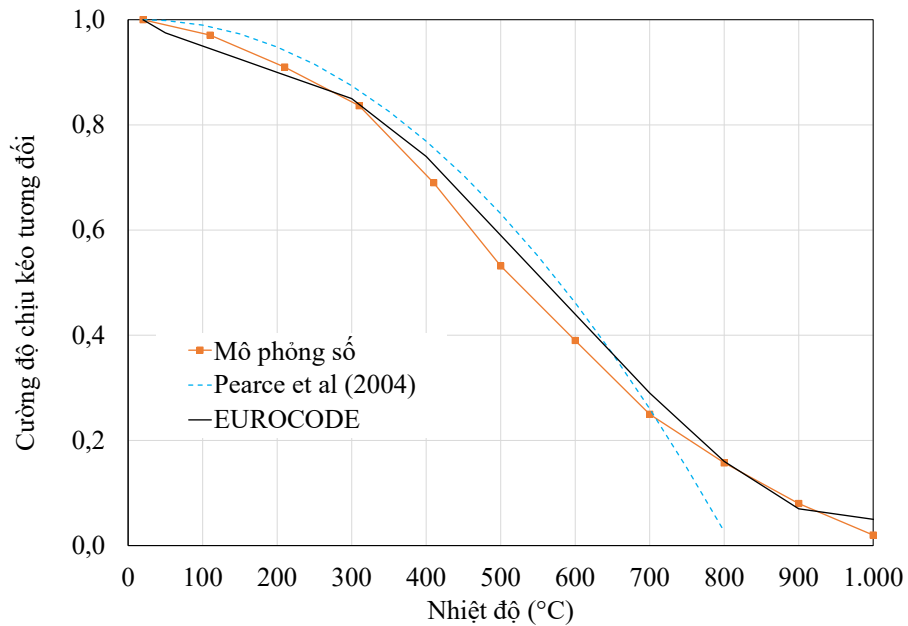


Hình 4. Sự thay đổi về cường độ chịu nén theo nhiệt độ

### 4.3. Cường độ chịu kéo

Tương tự, cường độ chịu kéo là ứng suất tại đỉnh của mối quan hệ ứng suất-biến dạng trong điều kiện kéo. Hình 5 minh họa sự giảm cường độ kéo theo sự tăng nhiệt độ. Kết quả cho thấy cường độ chịu kéo của bê tông suy giảm rõ rệt khi nhiệt độ tăng và mức độ suy giảm nhìn chung mạnh hơn so với cường độ chịu nén. Ở nhiệt độ khoảng 200 - 300°C, cường độ kéo chỉ giảm nhẹ, cho thấy nhiệt độ chưa ảnh hưởng đến cấu trúc vật liệu. Từ khoảng 300°C đến 600°C, cường độ chịu kéo giảm nhanh do sự phát triển vi nứt, mất nước của hồ xi măng và suy yếu vùng chuyển tiếp cốt liệu-hồ xi măng. Tại khoảng 700°C, cường độ kéo chỉ còn xấp xỉ 25% so với ban đầu, phản ánh sự suy giảm mạnh khả năng kháng nứt của vật liệu. Trên 800°C, cường độ chịu kéo còn lại rất nhỏ và gần như không còn khi nhiệt độ đạt 1000°C. So với các kết quả nghiên cứu, kết quả mô phỏng số phù hợp khá

tốt với EUROCODE trên hầu hết miền nhiệt độ và phù hợp kết quả thực nghiệm của Pearce et al. (2004) [17] trong vùng nhiệt độ trung bình. Điều này cho thấy mô hình số mô tả hợp lý quy luật suy giảm cường độ chịu kéo của bê tông dưới tác động nhiệt độ cao.



Hình 5. Sự thay đổi về cường độ chịu kéo theo nhiệt độ.

## 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 cơ học của bê tông dưới tác dụng của nhiệt độ cao. Kết quả mô phỏng cho thấy khi nhiệt độ tăng, mô đun đàn hồi, cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo của bê tông đều suy giảm rõ rệt. Trong đó, mô đun đàn hồi nhạy cảm nhất với nhiệt độ và giảm mạnh ngay từ vùng nhiệt độ thấp đến trung bình; cường độ chịu nén suy giảm đáng kể khi nhiệt độ vượt khoảng 400°C; còn cường độ chịu kéo giảm nhanh hơn cường độ chịu nén. Các kết quả mô phỏng số phù hợp tốt với thực nghiệm và các mô hình tham khảo như Eurocode, DTU và một số nghiên cứu đã công bố. Điều này cho thấy mô hình đề xuất có khả năng mô tả hợp lý ứng xử cơ-nhiệt và dự báo sự suy giảm tính chất cơ học của bê tông dưới tác dụng của nhiệt độ cao.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Q. Ma, R. Guo, Z. Zhao, Z. Lin, and K. He, "Mechanical properties of concrete at high temperature-A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 371-383, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131.
- [2] V. Kodur, "Properties of Concrete at Elevated Temperatures," *Int. Sch. Res. Not.*, vol. 2014, no. 1, p. 468510, 2014, doi: 10.1155/2014/468510.
- [3] A. Noumowé, R. Siddique, and G. Ranc, "Thermo-mechanical characteristics of concrete at elevated temperatures up to 310°C," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 239, no. 3, Art. no. 3, Oct, 2020.
- [4] Y. Anderberg and S. Thelandersson, "Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures. 1. General Discussion and Critical Review of Literature," *Bull. Div. Struct. Mech. Concr. Constr. Bull.* 34, vol. Bulletin 34, 1973, Accessed: Jul. 13, 2017. [Online]. Available: <http://lup.lub.lu.se/record/1245605>.
- [5] T. Z. Harmathy, "Thermal properties of concrete at elevated temperatures," *J. Mater.*, vol. 5, no. 1, Art. no. 1, 1970.
- [6] M. Y. L. Chew, "The assessment of fire damaged concrete," *Build. Environ.*, vol. 28, no. 1, Art. no. 1, Jan. 1993, doi: 10.1016/0360-1323(93)90010-Z.
- [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, Art. no. 7, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2009.12.010.
- [8] H. Sadouki and J. G. M. van Mier, "Meso-level analysis of moisture flow in cement composites using a lattice-type approach," *Mater. Struct.*, vol. 30, no. 10, Art. no. 10, Dec. 1997, doi: 10.1007/BF02486899.
- [9] G. Voronoi, "Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les paralléloèdres primitifs.," *J. Für Reine Angew. Math.*, vol. 134, pp. 198-287, 1908.

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

[11] D.-T. Pham, M.-N. Vu, H. T. Trieu, T. S. Bui, and T. Nguyen-Thoi, "A thermo-mechanical meso-scale lattice model to describe the transient thermal strain and to predict the attenuation of thermo-mechanical properties at elevated temperature up to 800 °C of concrete," *Fire Saf. J.*, vol. 114, p. 103011, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103011.

[12] D. T. Pham, T. D. Nguyen, M. N. Vu, and A. Chinkulkijniwat, "Mesoscale approach to numerical modelling of thermo-mechanical behaviour of concrete at high temperature," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 0, no. 0, pp. 1-20, Mar. 2019, doi: 10.1080/19648189.2019.1577762.

[13] D. Gawin, F. Pesavento, and B. A. Schrefler, "Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 192, no. 13-14, Art. no. 13-14, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0045-7825(03)00200-7.

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

[15] R. de Borst and P. P. J. M. Peeters, "Analysis of concrete structures under thermal loading," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 77, no. 3, pp. 293-310, Dec. 1989, doi: 10.1016/0045-7825(89)90079-0.

[16] Eurocode 2, "Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design," 2004.

[17] C. Pearce, C. Nielsen, and N. Bicanic, "Gradient enhanced thermo-mechanical damage model for concrete at high temperatures including transient thermal creep," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 28, pp. 715-735, Jun. 2004, doi: 10.1002/nag.376.