■Ngày nhận bài: 28/5/2026 ■Ngày sửa bài: 12/6/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/6/2026

# Mô phỏng ảnh hưởng của lớp bảo vệ và kịch bản cháy đến dầm bê tông cốt thép

## Numerical modelling the effects of concrete cover and fire scenarios on rc beams

**> TS NGUYỄN PHI LONG[1,*], LƯU HOÀNG PHONG[2], PGS.TS LÊ TRUNG PHONG[2]**
[1]Khoa xây dựng, Học viện Hàng không Việt Nam
[2]Khoa Công trình, Trường Đại học Thuỷ lợi
[*]Email: longnp@vaa.edu.vn

**TÓM TẮT**

Nghiên cứu tập trung đánh giá khả năng chịu hỏa hoạn của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) theo tiêu chuẩn Eurocode, nhằm đáp ứng yêu cầu an toàn cấp thiết cho hạ tầng đô thị Việt Nam. Bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên nền tảng ANSYS APDL, tác giả thực hiện phân tích tương tác nhiệt - cơ phi tuyến tuần tự để mô phỏng sự suy giảm đặc tính vật liệu dưới tác động của đường cong nhiệt ISO 834. Trọng tâm nghiên cứu là lượng hóa ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ (20-70 mm) và các kịch bản tiếp xúc lửa (1 và 3 mặt) đến giới hạn chịu lửa của cấu kiện. Việc tự động hóa mô phỏng qua ngôn ngữ kịch bản APDL giúp xác định chính xác cơ chế phá hoại do ứng suất nhiệt và thiết lập mối liên hệ giữa cấu tạo hình học với khả năng chịu lực cực hạn. Kết quả được hệ thống hóa thành các biểu đồ thiết kế đa biến và ma trận tra cứu nhanh, cung cấp công cụ hỗ trợ kỹ sư tối ưu hóa giải pháp kỹ thuật cho từng cấp chịu lửa cụ thể. Công trình không chỉ khẳng định hiệu quả của mô phỏng số trong kỹ thuật an toàn cháy mà còn góp phần nâng cao tính bền vững cho các công trình công cộng trọng điểm trước các kịch bản hỏa hoạn phức tạp.

**Từ khóa:** Kết cấu bê tông cốt thép; giới hạn chịu lửa; an toàn cháy kết cấu; chiều dày lớp bảo vệ.

**ABSTRACT**

This research focuses on evaluating the fire resistance of reinforced concrete (RC) structures in accordance with Eurocode standards, aiming to address the pressing safety requirements of Vietnam's urban infrastructure. Utilizing the Finite Element Method (FEM) implemented within the ANSYS APDL platform, a sequential non-linear thermo-mechanical coupling analysis is performed to simulate the degradation of material properties under the influence of the ISO 834 standard fire curve. The core of this study lies in quantifying the impact of concrete cover thickness (ranging from 20 to 70 mm) and various fire exposure scenarios (1-sided and 3-sided) on the fire resistance rating of the structural members. The automation of simulations via the APDL scripting language facilitates the precise identification of failure mechanisms induced by thermal stresses and establishes the correlation between geometric configurations and ultimate load-bearing capacity. The findings are systematized into multivariate design charts and rapid lookup matrices, providing robust engineering tools to optimize technical solutions for specific fire resistance levels. This work not only validates the efficacy of numerical simulation in fire safety engineering but also contributes to enhancing the resilience of key public infrastructures against complex fire scenarios.

**Keywords:** Reinforced concrete structures; fire resistance limit; structural fire safety; concrete cover thickness.

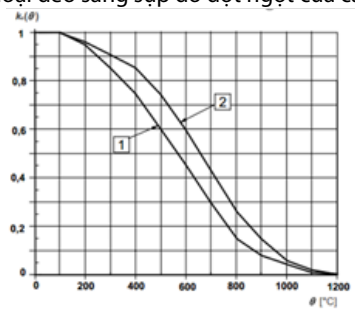
### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đô thị hóa tại Việt Nam, việc đảm bảo an toàn hỏa hoạn cho các công trình nhịp lớn đòi hỏi sự chuyển dịch từ thiết kế định tính sang phân tích dựa trên hiệu năng theo tiêu chuẩn Eurocode [1]. Sự suy giảm đặc tính cơ lý của ma trận bê tông và sự mất mát khả năng làm việc đồng thời giữa thép - bê tông ở nhiệt độ cực hạn là nguyên nhân cốt lõi dẫn đến các cơ chế phá hoại kết cấu đột ngột [2]. Nghiên cứu này ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên nền tảng ANSYS APDL để thực hiện phân tích nhiệt-cơ phi tuyến tuần tự. Quy trình này cho phép tái hiện trường nhiệt độ không ổn định và sự biến đổi trạng thái ứng suất-biến dạng của dầm bê tông cốt thép dưới tác động đồng thời của tải trọng và đường cong nhiệt tiêu chuẩn ISO 834. Việc khai thác ngôn ngữ kịch bản APDL để tự động hóa mô phỏng tham số không chỉ nâng cao độ tin cậy của mô hình qua kiểm chứng thực nghiệm mà còn cho phép khảo sát hệ thống các biến số hình học [3]. Trọng tâm nghiên cứu tập trung lượng hóa ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ (20-70 mm) đến giới hạn chịu lửa của cấu kiện. Kết quả được hệ thống hóa thành các biểu đồ thiết kế đa biến và ma trận tra cứu nhanh, hỗ trợ kỹ sư tối ưu hóa giải pháp kỹ thuật cho từng cấp chịu lửa cụ thể [1]. Những đóng góp này thiết lập cơ sở lý luận vững chắc cho công tác thiết kế và thẩm định an toàn cháy, góp phần nâng cao tính bền vững cho hệ thống hạ tầng quốc gia.

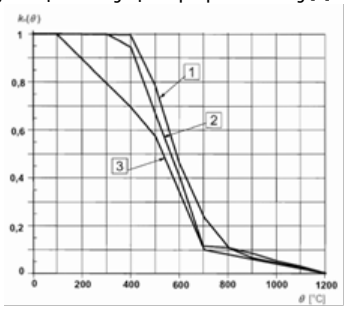
## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Cơ sở lý thuyết

Sự thoái hóa đặc tính cơ học của bê tông dưới tác động nhiệt là một quá trình phi tuyến phức tạp, hệ quả từ sự phá hủy cấu trúc ma trận đá xi măng và đặc tính hóa lý của cốt liệu. Theo hình 1, hệ số giảm cường độ nén $k_c(\theta)$ bắt đầu suy giảm mạnh khi nhiệt độ vượt ngưỡng 200°C do sự đứt gãy các liên kết hóa học và hình thành nứt vi mô [1]. Đặc biệt, bê tông cốt liệu silic thể hiện sự tổn thương nghiêm trọng hơn cốt liệu canxi do hiện tượng biến đổi pha và giãn nở thể tích đột ngột, dẫn đến sự triệt tiêu độ cứng chống uốn EI khi tiệm cận ngưỡng 500°C [2]. Đồng thời, ứng xử của cốt thép chịu lực cũng bộc lộ sự suy giảm đột ngột về giới hạn chảy và mô-đun đàn hồi khi nhiệt độ vượt quá 400°C. Theo hình 2, hệ số giảm cường độ $k_s(\theta)$ phụ thuộc chặt chẽ vào trạng thái biến dạng; trong đó, các cấu kiện khống chế biến dạng dưới 2% có tốc độ suy vong năng lực chịu tải nhanh hơn, chỉ còn dưới 40% tại 600°C. Sự kết hợp giữa thoái hóa ma trận bê tông và suy yếu cốt thép làm dịch chuyển nhanh chóng trục trung hòa lên phía trên, thu hẹp cánh tay đòn nội lực và triệt tiêu lực bám dính giữa hai vật liệu. Hệ quả tất yếu là sự chuyển đổi từ cơ chế phá hoại dẻo sang sụp đổ đột ngột của cấu kiện [3].

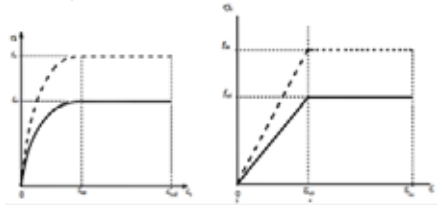



*Đường cong 1. Bê tông khối lượng thông thường với cốt liệu silic*
*Đường cong 2. Bê tông khối lượng thông thường với cốt liệu vôi*
Hình 1. Biểu đồ giảm hệ số cường độ cho phép của bê tông [4]

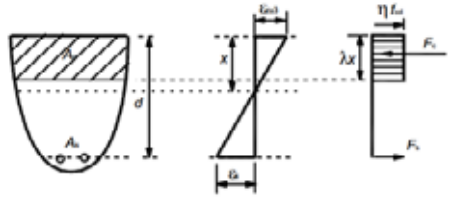



*Đường cong 1. Cốt thép chịu kéo (cán nóng) cho biến dạng $\varepsilon_{s,fi} > \geq 2\%$*
*Đường cong 2. Cốt thép chịu kéo (cán nguội) cho biến dạng $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$*
*Đường cong 3. Cốt thép chịu nén và cốt thép chịu kéo cho biến dạng $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$*
Hình 2. Biểu đồ giảm hệ số cường độ cho phép của cốt thép [4]

Theo Hình 3, dưới góc độ cơ học kết cấu, Eurocode 2 thiết lập quy trình thẩm định dựa trên tương tác đa vật lý giữa trường nhiệt độ phi tuyến và năng lực chịu tải dư. Quan hệ ứng suất-biến dạng (σ–ϵ) bộc lộ sự thoái hóa nghiêm trọng khi cường độ nén $f_{ck}$ và mô-đun đàn hồi sụt giảm, đi kèm sự biến đổi các ngưỡng biến dạng tới hạn do phá hủy cấu trúc vi mô của ma trận bê tông [1]. Theo Hình 4, sự suy giảm đặc tính vật liệu buộc tiết diện phải tái thiết lập trạng thái cân bằng nội lực. Gradient nhiệt độ gây phân vùng cường độ không đồng nhất, khiến trục trung hòa dịch chuyển lên phía trên để duy trì cân bằng giữa hợp lực nén hiệu chỉnh và hợp lực kéo của cốt thép đã bị chảy dẻo nhiệt. Hệ quả trực tiếp là sự thu hẹp cánh tay đòn nội lực, làm sụt giảm đột ngột khả năng kháng uốn $M_{Rd,fi}$ và triệt tiêu biên độ an toàn của cấu kiện [2]. Việc ứng dụng các mô hình toán học kết hợp mô phỏng phần tử hữu hạn là yếu tố then chốt để dự báo chính xác giới hạn chịu lửa (R) và ngăn ngừa sụp đổ dây chuyền theo triết lý thiết kế dựa trên hiệu năng [3].



Hình 3. Quan hệ ứng suất biến dạng - biến dạng theo 2 đường cong [4]



Hình 4. Quan hệ ứng suất biến dạng - biến dạng theo 2 đường cong [4]

### 2.2. Phương pháp mô phỏng số

Việc mô phỏng số ứng xử nhiệt-cơ của dầm BTCT dưới tác động hỏa hoạn đòi hỏi một quy trình phân tích đa vật lý nghiêm ngặt. Trong môi trường ANSYS APDL, nghiên cứu triển khai phân tích tương tác nhiệt-cơ phi tuyến tuần tự [3]. Giai đoạn đầu sử dụng phần tử nhiệt SOLID để giải quyết bài toán truyền nhiệt không ổn định, xác định trường nhiệt độ trên tiết diện. Tiếp theo, mô hình cấu trúc được thiết lập với phần tử SOLID cho bê tông (áp dụng tiêu chuẩn phá hủy Willam-Warnke) và phần tử thanh LINK cho cốt thép theo phương pháp rời rạc. Giả thiết bám dính lý tưởng được thực hiện thông qua việc chia sẻ nút chung giữa thép và bê tông, cho phép tái hiện chính xác sự suy giảm cường độ chảy dẻo của cốt thép ở nhiệt độ cao.

Để đảm bảo tính ổn định của thuật toán lặp Newton-Raphson trong giai đoạn phi tuyến cực hạn, kỹ thuật chia lưới phân vùng mật độ (graded meshing) được tối ưu hóa dựa trên phân tích hội tụ lưới theo khung lý thuyết Eurocode 2 [1]. Các thông số vật liệu đa vật lý, bao gồm đặc trưng cơ học (mô đun đàn hồi, cường độ) và nhiệt-lý (độ dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng), được chuẩn hóa theo nhiệt độ để phản ánh trung thực sự thoái hóa của cấu trúc dưới dòng nhiệt cực hạn [5].

Hệ thống điều kiện biên cơ học được định nghĩa tỉ mỉ nhằm tái hiện sơ đồ làm việc và cơ chế phân phối lại nội lực, đặc biệt là ảnh hưởng của sự giãn nở nhiệt bị kiềm chế trong các kết cấu siêu tĩnh. Tải trọng nhiệt được áp dụng dưới dạng điều kiện biên nhiệt động học theo đường cong hỏa hoạn tiêu chuẩn ISO 834, mô phỏng tiến trình gia nhiệt phi tuyến theo thời gian . Sự kết hợp chặt chẽ giữa hệ điều kiện biên chuẩn mực và trường nhiệt độ biến thiên là tiền đề để dự báo chính xác trạng thái giới hạn khả năng chịu tải và các hiện tượng mất ổn định hình học phi tuyến của cấu kiện trong điều kiện biên khắc nghiệt [3].

## 3. BÀI TOÁN KHẢO SÁT

### 3.1. Thông số đầu vào kết cấu

Cấu kiện dầm BTCT nghiên cứu có kích thước tiết diện 200×400 mm, nhịp tính toán 3000 mm, được cốt hóa bởi 4 thanh thép φ16 với lớp bảo vệ c=20 mm. Đặc tính vật liệu đầu vào cho mô hình ANSYS APDL được xác lập nghiêm ngặt: thép ($E_s=2\times10^5$ MPa, $\rho_s=7850$ kg/ $m^3$, n=0,3) và bê tông ($E_c=27,5\times10^3$ MPa, $\rho_c$ =2500 kg/$m^3$, v=0,2). Việc chuẩn hóa các thông số cơ lý này là tiền đề cốt lõi để phân tích chính xác sự suy giảm năng lực chịu tải và ứng xử phi tuyến của kết cấu dưới tác động của nhiệt độ cao [3], [5].

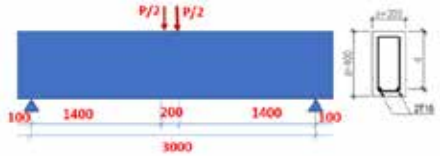
### 3.2. Mô phỏng các bài toán truyền nhiệt trên phần mềm ANSYS APDL

Tiến trình thực nghiệm số được triển khai trên cấu kiện dầm bê tông cốt thép điển hình với các đặc trưng hình học và hệ thống thông số vật liệu đầu vào được chuẩn hóa tại Hình 5 cùng các Bảng 1 và Bảng 2. Nhằm thiết lập lộ trình thẩm định khả năng chịu hỏa hoạn tương thích với QCVN 06:2022/BXD và Eurocode 2 [1]. Nghiên cứu thực hiện phân tích tham số đối với chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c) biến thiên từ 20 mm đến 70 mm dưới tác động của đường cong gia nhiệt tiêu chuẩn ISO 834. Việc khảo sát dải biến số này cho phép định lượng hóa hiệu ứng trễ nhiệt (thermal lag) và khả năng bảo toàn đặc tính cơ lý của cốt thép chịu lực [5]. Để làm sáng tỏ tương tác đa vật lý giữa điều kiện biên nhiệt và trạng thái giới hạn kết cấu, hai kịch bản phơi nhiễm được thiết lập:

- Kịch bản 1 (KB1 - Cháy đơn diện): Tiếp xúc nhiệt tại mặt đáy, mô phỏng ứng xử của dầm biên hoặc dầm có vách che chắn.

- Kịch bản 2 (KB2 - Cháy tam diện): Tiếp xúc nhiệt tại mặt đáy và hai mặt bên, đại diện cho cấu kiện lộ thiên hoàn toàn.

Việc đối chiếu các kịch bản phơi nhiễm hướng tới xác định cơ chế thoái hóa đặc tính vật liệu theo thời gian thực của đám cháy. Kết quả mô phỏng cung cấp luận cứ khoa học để hiệu chỉnh hệ số an toàn và tối ưu hóa chiều dày lớp bảo vệ nhằm duy trì độ cứng chống uốn EI. Đối với các công trình hạ tầng quy mô lớn, việc thấu hiểu sự khác biệt giữa các kịch bản phơi nhiễm là yếu tố then chốt để ngăn ngừa rủi ro sụp đổ dây chuyền (progressive collapse) và thỏa mãn triết lý thiết kế dựa trên hiệu năng [2].




Hình 5. Thông số kích thước dầm BTCT

Bảng 1. Đặc trưng vật liệu thép

| Thông số | Ký hiệu | Giá trị |
|---|---|---|
| Module đàn hồi Young (N/mm$^2$) | E | 2x10$^5$ |
| Tỷ trọng (kg/m$^3$) | ρ | 7850 |
| Tỷ số poisson | υ | 0.3 |

Bảng 2. Đặc trưng vật liệu bê tông

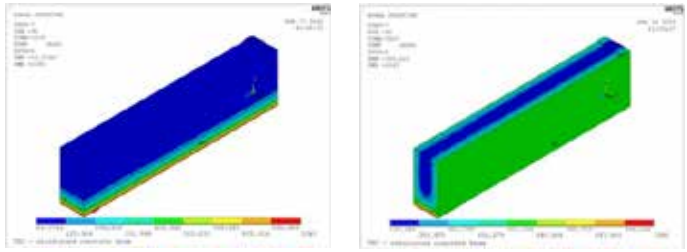
| Thông số | Ký hiệu | Giá trị |
|---|---|---|
| Module đàn hồi Young (N/mm$^2$) | E | 27.5x10$^3$ |
| Tỷ trọng (kg/m$^3$) | ρ | 2500 |
| Tỷ số poisson | υ | 0.2 |

## 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 4.1. Kết quả mô phỏng trên ANSYS

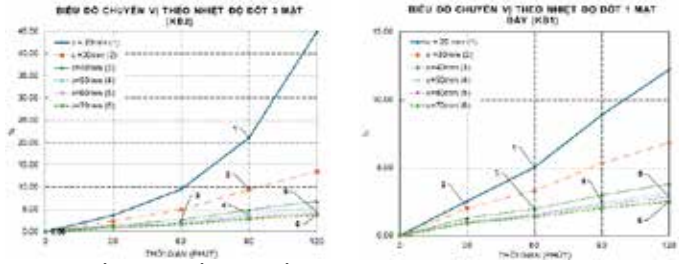
Mô hình hóa phần tử hữu hạn (FEM) trên nền tảng ANSYS APDL cho phép tái hiện chính xác sự biến thiên nhiệt độ, ứng suất và biến dạng của dầm BTCT dưới tác động nhiệt. Chi tiết mô hình 3D của dầm thử nghiệm được trình bày tại Hình 6 và Hình 7. Kết quả mô phỏng làm sáng tỏ gradient nhiệt độ không gian từ bề mặt đến lõi tiết diện, đóng vai trò điều kiện biên thiết yếu cho bài toán tương tác nhiệt - cơ tuần tự. Quy trình tích hợp này là cơ sở định lượng để xác định giới hạn chịu lửa (R) của cấu kiện với độ tin cậy cao, đáp ứng các yêu cầu khắt khe của thiết kế an toàn cháy theo hiệu năng [1].

Hình 6. Mô hình 3D trước khi giải



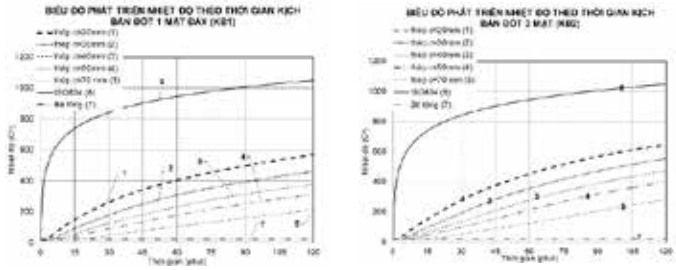
Hình 7. Mô hình 3D (KB1 và KB2) sau khi giải

Dựa trên dữ liệu tổng hợp tại Hình 8, nghiên cứu khẳng định chiều dày lớp bảo vệ (c) là yếu tố quyết định để bảo toàn độ cứng chống uốn EI (Nguyen, 2018). Trong kịch bản KB1, hiện tượng vênh nhiệt gây chuyển vị 13% tại mốc R120 khi c=20 mm, nhưng được kiểm soát dưới 3% với c=70 mm. Đối với KB2, sự giao thoa nhiệt đa hướng dẫn đến biến dạng nhanh, tại c=20 mm, chuyển vị đạt 45% gây sụp đổ do cốt thép chảy dẻo và bê tông vùng nén bị phá hủy. KB2 khuếch đại mức độ tổn thương gấp 3-4 lần KB1, đòi hỏi hiệu chỉnh hệ số an toàn trong thiết kế kháng cháy dựa trên hiệu năng.



Hình 8. Biểu đồ phát triển của chuyển vị của nhiệt độ theo thời gian phụ thuộc vào chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c) theo KB1 và KB2

Trường nhiệt độ không ổn định theo ISO 834 là cơ sở định lượng để thẩm định sự thoái hóa đặc tính cơ lý cấu kiện. Theo hình 9, do hệ số dẫn nhiệt (λ) cao, cốt thép gia nhiệt nhanh hơn ma trận bê tông. Lớp bảo vệ (c=20-70 mm) đóng vai trò lá chắn nhiệt, trì hoãn ngưỡng tới hạn 400°C của thép theo Eurocode 2 [2]. So với KB1, kịch bản KB2 gây giao thoa nhiệt đa hướng nhanh hơn, sự hội tụ các đường đẳng nhiệt (isotherms) tại lõi đẩy nhanh tiến trình thoái hóa gel C-S-H và triệt tiêu năng lực dự phòng nhiệt của tiết diện.



Hình 9. Biểu đồ phát triển của nhiệt độ theo thời gian phụ thuộc vào chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c) theo KB1 và KB2

Theo Bảng 3 và Bảng 4, dữ liệu thực nghiệm số xác lập quy luật tỷ lệ nghịch giữa chiều dày lớp bảo vệ (c) và tốc độ gia nhiệt cốt thép dưới tác động của ISO 834. Trong kịch bản đốt đơn diện, gia tăng c từ 20 đến 70 mm giúp kìm hãm nhiệt độ thép từ 568°Cxuống 211°C sau 120 phút. Ngược lại, kịch bản đốt tam diện gây giao thoa nhiệt đa hướng, đẩy nhiệt độ lên mức cực hạn 645°C (c=20 mm) và duy trì 280°C (c=70 mm). Sự hội tụ nhanh chóng của các đường đẳng nhiệt (isotherms) trong cấu kiện chịu lửa đa diện đòi hỏi hệ số dự phòng cao hơn nhằm ngăn ngừa rủi ro sụp đổ dây chuyền [3], [5].

Bảng 3. Các trường tính toán nhiệt độ cho cấu kiện dầm đơn giản (tăng cường lớp bê tông bảo vệ 20-70 mm) theo kịch bản đốt 1 mặt đáy

| Thời gian | ISO 834 | Bê tông | cốt thép c = 20mm | cốt thép c = 30mm | cốt thép c = 40mm | cốt thép c = 50mm | cốt thép c = 70mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **10 phút** | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C |
| **30 phút** | 842°C | 20°C | 262°C | 179°C | 125°C | 91°C | 47°C |
| **60 phút** | 945°C | 20°C | 405°C | 308°C | 234°C | 178°C | 106°C |
| **90 phút** | 1006°C | 20°C | 498°C | 395°C | 314°C | 253°C | 160°C |
| **120 phút** | 1045°C | 20°C | 568°C | 462°C | 378°C | 312°C | 211°C |

Bảng 4. Các trường tính toán nhiệt độ cho cấu kiện dầm đơn giản (tăng cường lớp bê tông bảo vệ 20 -70 mm) theo kịch bản đốt 3 mặt

| Thời gian | ISO 834 | Bê tông | cốt thép c = 20 mm | cốt thép c = 30 mm | cốt thép c = 40 mm | cốt thép c = 50 mm | cốt thép c = 70 mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **10 phút** | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C | 2°C0 |
| **30 phút** | 842°C | 20°C | 278°C | 192°C | 135°C | 99°C | 52°C |
| **60 phút** | 945°C | 20°C | 452°C | 356°C | 278°C | 214°C | 124°C |
| **90 phút** | 1006°C | 20°C | 568°C | 471°C | 389°C | 318°C | 205°C |
| **120 phút** | 1045°C | 20°C | 645°C | 553°C | 473°C | 400°C | 280°C |

Kết quả mô phỏng số xác lập quy luật tiến hóa trường nhiệt độ phi tuyến, nơi gradient nhiệt độ bị chi phối bởi chiều dày lớp bảo vệ và kịch bản gia nhiệt. Hiệu ứng trễ nhiệt giúp bảo vệ cốt thép nhưng suy giảm khi cháy đa diện do giao thoa nhiệt lượng. Sự phân bố nhiệt không đồng nhất này là cơ sở định lượng để thẩm định thoái hóa cơ lý và dự báo trạng thái giới hạn theo Eurocode 2.

**4.2. Kết quả tính toán theo Eurocode**

Dữ liệu nhiệt độ trích xuất từ mô phỏng được sử dụng để xác định cường độ dư của vật liệu, phục vụ tính toán năng lực chịu tải P của dầm BTCT theo Eurocode 2 theo bài toán Hình 5. Từ các Bảng 5, Bảng 6 và Bảng 7 kết quả thể hiện kịch bản 1, khi chưa gia tăng lớp bảo vệ (c=20 mm), cốt thép đạt 568°C sau 120 phút, khiến tải trọng P sụt giảm 66,28%. Ngược lại, với c=70 mm, nhiệt độ thép chỉ ở mức 211°C, bảo toàn 91,51% năng lực chịu tải ban đầu. Từ các Bảng 8, Bảng 9 và Bảng 10 kết quả thể hiện kịch bản 2 ứng xử nhiệt-cơ khắc nghiệt hơn do hiện tượng giao thoa nhiệt lượng đa hướng. Tại c=20 mm, nhiệt độ thép vọt lên 645°C, gây sụt giảm 80,85% tải trọng, đưa kết cấu tiệm cận trạng thái sụp đổ. Ngay cả khi c=50 mm, năng lực chịu tải vẫn giảm 34,98%. Chỉ khi c=70 mm ($T_s$ =280°C), độ suy giảm mới được khống chế ở mức 15,60%. Kết quả khẳng định giới hạn chịu lửa (R) của dầm phụ thuộc mật thiết vào chiều dày lớp bảo vệ và điều kiện phơi nhiễm nhiệt. Việc duy trì mô-men kháng uốn dư $M_{Rd,fi}$ lớn hơn mô men tác dụng là điều kiện tiên quyết để đảm bảo an toàn kết cấu theo triết lý thiết kế dựa trên hiệu năng [3].

Bảng 5. Kết quả tính toán cho từng nhiệt độ trường hợp dầm chưa tăng chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c=20 mm) KB1

| Thời gian (Phút) | Nhiệt độ đáy dầm theo Iso 834 | Nhiệt độ cốt thép (°C) | Tải trọng P tương ứng (T) | Độ giảm (%) |
|---|---|---|---|---|
| 0 phút | 20°C | 20°C | 8.72 | 0% |
| 30 phút | 842°C | 262°C | 7.53 | ↓ 13.65% |
| 60 phút | 945°C | 405°C | 5.59 | ↓ 35.89% |
| 90 phút | 1006°C | 498°C | 4.06 | ↓ 53.44% |
| 120 phút | 1045°C | 568°C | 2.94 | ↓ 66.28% |

Bảng 6. Kết quả tính toán cho từng nhiệt độ trường hợp dầm chưa tăng chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c=50 mm) KB1

| Thời gian (Phút) | Nhiệt độ cốt thép (°C) | Tải trọng P tương ứng (T) | Độ giảm (%) |
|---|---|---|---|
| 0 phút | 20°C | 8.72 | 0% |
| 30 phút | 91°C | 8.44 | ↓ 3.21% |
| 60 phút | 178°C | 8.15 | ↓ 6.54% |
| 90 phút | 253°C | 7.61 | ↓ 12.73% |
| 120 phút | 312°C | 7.00 | ↓ 19.72% |

Bảng 7. Kết quả tính toán cho từng nhiệt độ trường hợp dầm chưa tăng chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c=70 mm) KB1

| Thời gian (Phút) | Nhiệt độ cốt thép (°C) | Tải trọng P tương ứng (T) | Độ giảm (%) |
|---|---|---|---|
| 0 phút | 20°C | 8.72 | 0% |
| 30 phút | 47°C | 8.61 | ↓ 1.26% |
| 60 phút | 106°C | 8.38 | ↓ 3.9% |
| 90 phút | 160°C | 8.21 | ↓ 5.85% |
| 120 phút | 211°C | 7.98 | ↓ 8.49% |

Bảng 8. Kết quả tính toán cho từng nhiệt độ trường hợp dầm chưa tăng chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c=20 mm) KB2

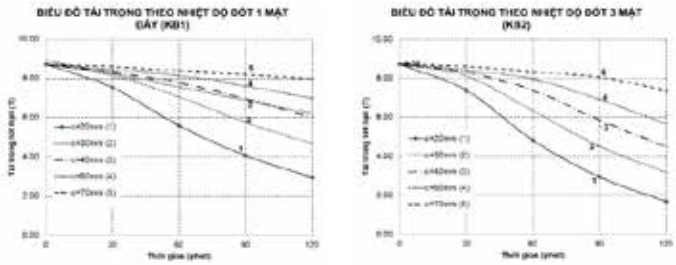
| Thời gian (Phút) | Nhiệt độ đáy dầm theo Iso 834 | Nhiệt độ cốt thép (°C) | Tải trọng P tương ứng (T) | Độ giảm (%) |
|---|---|---|---|---|
| 0 phút | 20°C | 20°C | 8.72 | 0% |
| 30 phút | 842°C | 278°C | 7.38 | ↓ 15.37% |
| 60 phút | 945°C | 452°C | 4.82 | ↓ 44.72% |
| 90 phút | 1006°C | 568°C | 2.94 | ↓ 66.28% |
| 120 phút | 1045°C | 645°C | 1.67 | ↓ 80.85% |

Bảng 9. Kết quả tính toán cho từng nhiệt độ trường hợp dầm chưa tăng chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c=50 mm) KB2

| Thời gian (Phút) | Nhiệt độ cốt thép (℃) | Tải trọng P tương ứng (T) | Độ giảm (%) |
|---|---|---|---|
| 0 phút | 20℃ | 8.72 | 0% |
| 30 phút | 99℃ | 8.41 | ↓ 3.56% |
| 60 phút | 214℃ | 7.96 | ↓ 8.72% |
| 90 phút | 318℃ | 6.91 | ↓ 20.76% |
| 120 phút | 400℃ | 5.67 | ↓ 34.98% |

Bảng 10. Kết quả tính toán cho từng nhiệt độ trường hợp dầm chưa tăng chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c=70 mm) KB2

| Thời gian (Phút) | Nhiệt độ cốt thép (℃) | Tải trọng P tương ứng (T) | Độ giảm (%) |
|---|---|---|---|
| 0 phút | 20℃ | 8.72 | 0% |
| 30 phút | 52℃ | 8.59 | ↓ 1.49% |
| 60 phút | 124℃ | 8.32 | ↓ 4.59% |
| 90 phút | 205℃ | 8.04 | ↓ 7.80% |
| 120 phút | 280℃ | 7.36 | ↓ 15.60% |



Hình 10. Khả năng chịu lực của cấu kiện theo thời gian theo kịch bản 1 (KB1) và kịch bản 2 (KB2)

Hình 10 xác lập quy luật suy giảm năng lực chịu tải của dầm BTCT theo thời gian phơi nhiễm nhiệt. Kết quả khẳng định khả năng chịu tải tỉ lệ nghịch với thời gian và diện tích tiếp xúc lửa, trong đó kịch bản KB2 gây tổn thất nghiêm trọng hơn KB1 do hiện tượng giao thoa nhiệt lượng đa hướng. Chiều dày lớp bảo vệ (c) là biến số quyết định: tại c=0mm, dầm mất 75% tải trọng sau 120 phút (KB2), trong khi c=70 mm bảo toàn 80-90% năng lực chịu tải nhờ hiệu ứng trễ nhiệt . Đây là cơ sở định lượng quan trọng để tối ưu hóa thiết kế kháng cháy theo QCVN 06:2022/BXD và Eurocode 2 [3].

**4.3. Thảo luận**

Phân tích tương quan giữa kịch bản hỏa hoạn và chiều dày lớp bê tông bảo vệ (c) làm sáng tỏ quy luật suy giảm phi tuyến năng lực chịu tải (P) cùng sự gia tăng biến dạng cấu kiện dưới tác động của đường cong ISO 834. Trong kịch bản gia nhiệt đơn diện (KB1), hiệu ứng trễ nhiệt (thermal lag) đóng vai trò rào cản nhiệt động học hữu hiệu. Khi c=20 mm, nhiệt độ cốt thép đạt 568℃ khiến tải trọng tới hạn sụt giảm 66,28%. Tuy nhiên, tại c=70 mm, nhiệt độ chỉ ở mức 211℃, bảo toàn 91,51% năng lực chịu tải ban đầu. Kết quả này phù hợp với khung lý thuyết Eurocode 2 về ngưỡng tới hạn 400℃ của thép carbon [2]. Ngược lại, kịch bản gia nhiệt tam diện (KB2) bộc lộ sự nghiêm trọng do hiện tượng giao thoa nhiệt lượng đa hướng tại vùng lõi, gây thoái hóa về hóa lý trầm trọng ma trận gel C-S-H. Tại mốc 120 phút với c=20 mm, nhiệt độ thép vọt lên 645℃, khiến tải trọng sụt giảm 80,85%, đưa cấu kiện vào trạng thái cận kề sụp đổ [5]. Sự hội tụ các đường đẳng nhiệt (isotherms) thúc đẩy trục trung hòa dịch chuyển lên phía trên, thu hẹp cánh tay đòn nội lực và triệt tiêu biên độ an toàn nhanh chóng hơn KB1.

Về động học biến dạng, nghiên cứu ghi nhận sự chuyển đổi từ vênh nhiệt (thermal bowing) sang biến dạng nhanh chóng (runaway deformation). Trong khi KB1 (c=70 mm) kiểm soát biến dạng dư dưới 3%, thì KB2 (c=20 mm) ghi nhận độ võng tới 45% do chảy dẻo nhiệt và nghiền nát bê tông vùng nén. Do đó, c là biến số chiến lược quyết định giới hạn chịu lửa (R). Việc nâng cấp cc từ 20 mm lên 70 mm trong điều kiện cháy đa diện giúp cải thiện khả năng kháng cháy từ 3 đến 4 lần, cung cấp dữ liệu định lượng thiết yếu cho thiết kế an toàn cháy theo hiệu năng [1].

**5. KẾT LUẬN**

Nghiên cứu đã xác lập hệ thống luận cứ khoa học vững chắc về hành vi nhiệt-cơ của dầm BTCT dưới tác động hỏa hoạn tiêu chuẩn. Kết quả khẳng định chiều dày lớp bảo vệ (c) là biến số chiến lược quyết định giới hạn chịu lửa (R). Ngưỡng c=70 mm được xác định là biên độ an toàn nhiệt học tối ưu, cho phép bảo toàn 85-90% năng lực chịu tải dư sau 120 phút phơi nhiễm nhiệt. Việc gia tăng (c) không chỉ là giải pháp thụ động mà còn là chiến lược chủ động ngăn ngừa sự sụp đổ đột ngột, đặc biệt trong kịch bản cháy tam diện nghiêm trọng [5].

Nghiên cứu chứng minh tính ưu việt của phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên nền tảng ANSYS APDL trong việc tái hiện tương tác nhiệt - cơ phi tuyến tuần tự. Quy trình này cho phép định lượng hóa các hiện tượng phức tạp như sự phân vùng cường độ không đồng nhất và ứng suất nhiệt cưỡng bức mà các phương pháp truyền thống chưa thể đáp ứng. Hệ thống biểu đồ thiết kế đa biến và ma trận tra cứu nhanh được thiết lập là công cụ hỗ trợ thiết thực cho công tác thẩm định an toàn cháy theo triết lý thiết kế dựa trên hiệu năng.

Nghiên cứu cảnh báo rủi ro sụp đổ (progressive collapse) đối với các cấu kiện mảnh chịu lửa đa diện do hiện tượng giao thoa nhiệt lượng nghiêm trọng [2]. Đây là cơ sở lý luận quan trọng để kiến nghị điều chỉnh các quy chuẩn kỹ thuật quốc gia tiệm cận với tiêu chuẩn Eurocode. Hướng phát triển tương lai cần tập trung vào cốt liệu đặc biệt và vật liệu chống cháy thông minh, kết hợp mô phỏng số tiên tiến và thực nghiệm quy mô lớn để tối ưu hóa tính bền vững cho hạ tầng trọng điểm quốc gia [1].

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1] Nguyen, P.L. Đánh giá khả năng chịu cháy của kết cấu bê tông cốt thép trong kết cấu nhà ga hàng không theo tiêu chuẩn Eurocode. Tạp chí Xây dựng - Bộ Xây dựng, số 6, tr. 295-299, 2020.

[2] Nguyen, P.L., Ferrier, E. High-temperature behavior of hand lay-up CFRP under simultaneous thermal and mechanical loading. Fire Safety Journal, vol. 97, pp. 10-20, 2018.

[3] Nguyen, P.L. Experimental and numerical study on thermo-mechanical behavior of carbon fiber reinforced polymer and structures reinforced with CFRP. Doctoral Dissertation, Université Claude Bernard Lyon 1, France, 2018.

[4] European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design (EN 1992-1-2). Brussels, Belgium: CEN, 2004.

[5] Nguyen, P.L., Vu, X.H. Thermo-mechanical performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and CFRP-reinforced concrete structures under fire conditions. Construction and Building Materials, vol. 215, pp. 120-135, 2019.