Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (4V): 138–151

ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CÒN LẠI VÀ GIA CƯỜNG BẢN SÀN BÊ TÔNG CỐT THÉP SAU CHÁY

Phạm Thanh Tùng[a], Nguyễn Tuấn Trung[a,*], Phan Quang Minh[b]

[a]*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

[b]*Công ty TNHH Tư vấn Đại học Xây dựng (CCU), 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 20/8/2026, Sửa xong 21/10/2026, Chấp nhận đăng 22/10/2026

Tóm tắt

Khi hỏa hoạn xảy ra, lửa có thể gây thiệt hại đáng kể đến các kết cấu chịu lực. Để đánh giá khả năng tái sử dụng kết cấu sau cháy, cần tiến hành khảo sát, phân tích và tính toán khả năng chịu lực còn lại của cấu kiện. Gần đây, Bộ Xây dựng Việt Nam mới ban hành tiêu chuẩn TCVN 14104:2025 về tính toán khả năng chịu lửa và khả năng bảo toàn sau cháy của kết cấu BTCT, được xây dựng trên cơ sở tham khảo tiêu chuẩn SP 468.1325800.2019 của Nga. Tuy nhiên, cũng cần thêm một thời gian nữa để có thể áp dụng trong thực tế. Bài báo trình bày các nguyên tắc thiết kế chung, phương pháp đánh giá khả năng chịu lực còn lại, và phương pháp gia cường của bản sàn bê tông cốt thép (BTCT) sau cháy (nếu cần thiết) theo tiêu chuẩn EN 1992-1-2. Một quy trình đánh giá khả năng chịu lực còn lại và giải pháp gia cường sàn BTCT sau cháy được đề xuất. Ví dụ minh họa dựa trên công trình thực tế được đề cập chi tiết. Kết quả cho thấy quy trình đề xuất là tin cậy và dễ áp dụng vào thực tiễn.

Từ khoá: sàn; bê tông cốt thép; sau cháy; khả năng chịu lực; gia cường.

EVALUATION OF THE RESIDUAL RESISTANCE AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE SLABS AFTER FIRE

Abstract

When a fire occurs, flames can cause significant damage to load-bearing structures. To assess the feasibility of reusing a structure after a fire, it is necessary to conduct surveys, analyses, and calculations of the residual load-bearing capacity of structural members. Recently, the Vietnamese Ministry of Construction issued TCVN 14104:2025, a standard for calculating the fire resistance and post-fire residual capacity of reinforced concrete structures, developed with reference to the Russian standard SP 468.1325800.2019. However, more time will still be needed before it can be applied in practice. This paper presents the general design principles, the methods to evaluate residual load-bearing capacity, and the strengthening methods (where required) for reinforced concrete (RC) slabs after fire exposure, in accordance with EN 1992-1-2. A procedure to assess the residual load-bearing capacity and strengthening of RC slabs after fire is proposed. An illustrative example based on a real building is discussed in detail. The results indicate that the proposed procedure is reliable and readily applicable in practice.

Keywords: slab; reinforced concrete structure; post-fire; load-bearing capacity; strengthening.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(4V)-11 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) được đánh giá là có khả năng chịu lửa tốt hơn so với các loại kết cấu sử dụng vật liệu khác, nhất là kết cấu thép. Đó là nhờ bê tông có hệ số dẫn nhiệt thấp, nhiệt dung riêng lớn và tốc độ suy giảm cường độ theo nhiệt độ chậm hơn so với thép kết cấu. Tuy vậy, khi xảy ra cháy, sự gia tăng nhiệt độ vẫn gây ra suy giảm không thể phục hồi về cường độ và độ cứng của cả bê tông lẫn cốt thép, dẫn đến sự sụt giảm đáng kể khả năng chịu lực của cấu kiện sau khi đám cháy được dập tắt và kết cấu nguội trở lại nhiệt độ môi trường. Trong số các cấu kiện chịu ảnh hưởng, sàn BTCT là bộ phận đặc biệt nhạy cảm với tác động nhiệt do tiếp xúc trực tiếp với khí nóng đối lưu và

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* trungnt2@huce.edu.vn (Trung, N. T.)

ngọn lửa tạt gần trần, chỉ có một mặt tiếp xúc với lửa nhưng diện tiếp xúc lớn; khác với các cấu kiện đứng như cột hay vách, có ba mặt tiếp xúc với lửa nhưng diện tiếp xúc khá nhỏ.

Sau mỗi sự cố cháy, một câu hỏi kỹ thuật – kinh tế then chốt luôn được đặt ra là kết cấu còn đủ khả năng chịu lực an toàn để tiếp tục sử dụng hay không, và nếu không, cần gia cường theo giải pháp nào để phục hồi khả năng làm việc mà không phải phá dỡ, xây mới. Việc đánh giá khả năng chịu lực còn lại vì vậy là bước bắt buộc để đưa ra quyết định sửa chữa, gia cường hay tháo dỡ, đồng thời là cơ sở để lựa chọn giải pháp gia cường phù hợp về mặt kỹ thuật và kinh tế. Ở Việt Nam, tốc độ đô thị hóa và mật độ xây dựng nhà cao tầng bằng kết cấu BTCT tăng nhanh trong khi hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn trong nước về đánh giá và gia cường kết cấu sau cháy còn chưa đồng bộ, khiến công tác thực tế phần lớn phải tham chiếu tiêu chuẩn nước ngoài (chủ yếu là tiêu chuẩn EN 1992-1-2 (EC2-1-2) [1]). Gần đây, Bộ Xây dựng Việt Nam cũng mới ban hành tiêu chuẩn TCVN 14104:2025 [2] về tính toán khả năng chịu lửa và khả năng bảo toàn sau cháy của kết cấu BTCT, được xây dựng trên cơ sở tham khảo tiêu chuẩn SP 468.1325800.2019 [3] của Nga. Tuy nhiên, tiêu chuẩn này cần thêm một thời gian nữa để có thể áp dụng trong thực tế.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về thiết kế kết cấu BTCT chịu lửa còn khá ít. Có một số nghiên cứu về cột BTCT chịu lửa, trong đó các phương pháp tính toán đơn giản theo tiêu chuẩn châu Âu EN 1992 phần 1-2 (EC2-1-2) cũng như phương pháp xây dựng biểu đồ tương tác được trình bày khá cụ thể, rõ ràng [4–6]. Từ năm 2018 đến 2022, khá nhiều nghiên cứu về thiết kế sàn và dầm BTCT chịu lửa theo các phương pháp tính toán của EC2-1-2 [7–11], và có một số nghiên cứu về khả năng chịu lực còn lại và gia cường cột bê tông cốt thép sau cháy [12, 13]. Một số tác giả cũng đã tiến hành nghiên cứu các biện pháp gia cường dầm và sàn bằng tấm composite CFRP [14–20], nhưng tác nhân suy giảm là do chịu tải trọng ở nhiệt độ thường hoặc do ăn mòn. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu nào đề cập đến việc tính toán khả năng chịu lực còn lại và gia cường kết cấu sàn BTCT sau cháy.

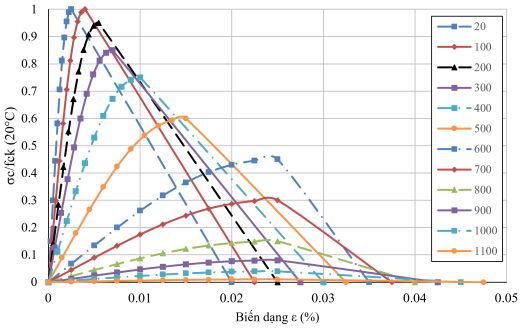
Tài liệu Chỉ dẫn đánh giá sự thiệt hại và sửa chữa kết cấu bê tông cốt thép ACI/KC 01-98 [21] cũng gợi mở một quy trình đánh giá mức độ thiệt hại và sửa chữa kết cấu bê tông cốt thép. Trong khi đó, để thiết kế kết cấu BTCT ở nhiệt độ cao, tiêu chuẩn EC2-1-2 [1] đưa ra các chỉ dẫn rõ ràng và cho phép thiết kế theo ba phương pháp: phương pháp tra bảng, phương pháp đơn giản và phương pháp thiết kế theo yêu cầu cụ thể về khả năng làm việc của kết cấu. Bài báo này trình bày các nguyên tắc kiểm tra khả năng chịu lực của sàn BTCT sau cháy dựa trên phương pháp đường đẳng nhiệt và phương pháp phân lớp của tiêu chuẩn EC2-1-2, đề xuất một phương án gia cường thường được sử dụng trong thực tế. Quy trình đề xuất và một ví dụ đã được áp dụng trong thực tế được trình bày rõ ràng và cụ thể.

2. Nguyên tắc kiểm tra khả năng chịu lực và gia cường sàn BTCT sau cháy theo EC2-1-2

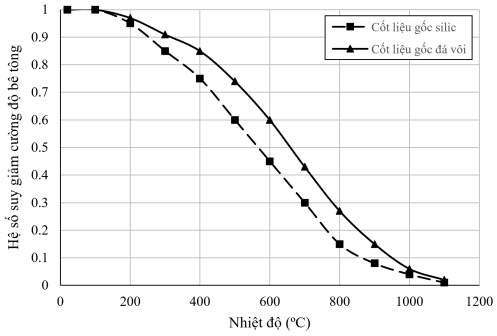
2.1. Đặc trưng cơ lý của bê tông và cốt thép khi chịu cháy và sau khi đã nguội

Dưới tác động của lửa, cả bê tông và cốt thép đều bị suy giảm cường độ và mô đun đàn hồi theo nhiệt độ. Cường độ chịu nén của bê tông và cường độ chảy dẻo của cốt thép ở trạng thái nóng (tức tại thời điểm đạt nhiệt độ cao nhất trong đám cháy) được xác định theo quan hệ ứng suất – biến dạng và các hệ số suy giảm quy định trong EC2-1-2 [1]. Tuy nhiên, sau khi kết cấu đã nguội trở lại nhiệt độ môi trường, cường độ chịu nén của bê tông không phục hồi mà tiếp tục suy giảm thêm so với giá trị ở trạng thái nóng ứng với cùng nhiệt độ cực đại đã đạt được. Mức suy giảm bổ sung này được xác định theo hệ số quy đổi cho trong Phụ lục C, EN 1994-1-2 [22]. Do đó, để đánh giá khả năng chịu lực còn lại của kết cấu BTCT sau cháy, các thông số quan trọng cần xác định gồm: (i) quan hệ ứng suất – biến dạng và cường độ suy giảm của bê tông, cốt thép ở trạng thái nóng theo EC2-1-2 (Hình 1, 2); và (ii) cường độ chịu nén còn lại của bê tông sau khi đã nguội theo EN 1994-1-2.

Khi nhiệt độ tăng cao, cả cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của bê tông và cốt thép đều suy giảm, nhưng biến dạng tương ứng với ứng suất lớn nhất, cũng như biến dạng cực hạn của bê tông lại tăng dần cùng với nhiệt độ, nghĩa là bê tông trở nên mềm hơn. Giá trị của các hệ số suy giảm cường độ chịu nén theo nhiệt độ cho bê tông cốt liệu gốc silic và cốt liệu đá vôi cũng như cho cốt thép cán nóng và kéo nguội được chỉ ra trên Hình 1(b) và Hình 2(b); trong đó $k_{c,\theta_{\max}} = \sigma_c/f_{ck}(20^\circ\text{C})$ là hệ số suy giảm (tỷ số giữa cường độ bê tông ở nhiệt độ θ và cường độ chịu nén đặc trưng f_{ck} ở nhiệt độ thường 20 °C), $\sigma(\theta)/f_{yk}$ là tỷ số giữa cường độ chịu kéo của cốt thép ở nhiệt độ θ và giới hạn chảy của cốt thép f_{yk} ở nhiệt độ thường.

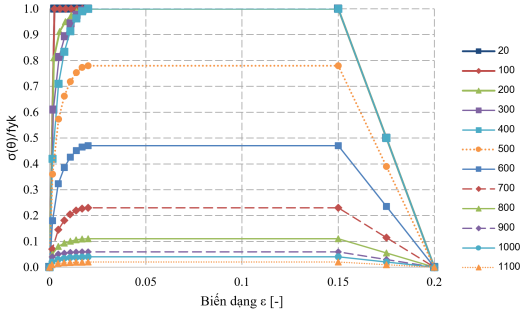


(a) Quan hệ ứng suất – biến dạng của bê tông

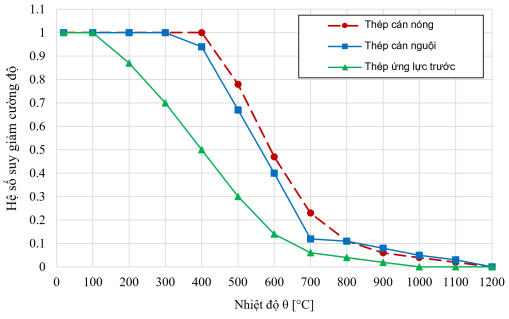


(b) Suy giảm cường độ của bê tông

Hình 1. Đặc trưng cơ lý của bê tông ở nhiệt độ cao



(a) Quan hệ ứng suất – biến dạng của cốt thép



(b) Suy giảm cường độ của cốt thép

Hình 2. Đặc trưng cơ lý của cốt thép ở nhiệt độ cao

Hệ số suy giảm cường độ của cốt thép thường và thép ứng lực trước được cho trong Bảng 3.2a và Bảng 3.3 của tiêu chuẩn EC2-1-2 [1] như được chỉ ra trong Hình 2(b). Có thể thấy rằng cốt thép cán nóng không bị suy giảm cường độ khi nhiệt độ chưa vượt quá 400 °C, trong khi cốt thép ứng lực trước bắt đầu bị suy giảm cường độ khi nhiệt độ vượt quá 100 °C. Lần lượt ở 200 °C và 300 °C, đối với thép ứng lực trước, hệ số suy giảm là 0,87 và 0,70. Ở giai đoạn nguội đi, cốt thép không phục hồi lại được cường độ như ban đầu và cũng không bị suy giảm thêm.

Phụ lục C, EN 1994-1-2 [22] cho phép xác định cường độ chịu nén suy giảm của bê tông khi bê tông bị nung nóng đến nhiệt độ $\theta_{\max}$ và sau đó bị nguội đi về nhiệt độ thường 20 °C bằng công thức (1), (2):

$$f_{c,\theta,20^\circ\text{C}} = \varphi f_{ck} \tag{1}$$

trong đó:

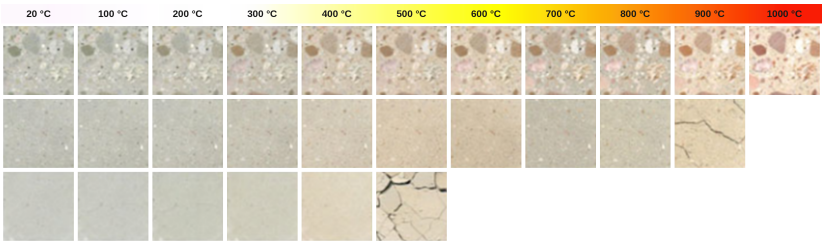
$$\begin{aligned} 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\max} < 100^{\circ}\text{C}: &\quad \varphi = k_{c,\theta_{\max}} \\ 100^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\max} < 300^{\circ}\text{C}: &\quad \varphi = 1{,}0 - [0{,}235(\theta_{\max} - 100)/200] \\ \theta_{\max} \geq 300^{\circ}\text{C}: &\quad \varphi = 0{,}9k_{c,\theta_{\max}} \end{aligned} \tag{2}$$

trong đó $k_{c,\theta_{\max}}$ là hệ số suy giảm, được xác định theo Hình 1.

2.2. *Phương pháp xác định nhiệt độ trên tiết diện bê tông*

Sau khi hỏa hoạn xảy ra, cần xác định các thông số đầu vào của đám cháy để có thể tiến hành kiểm tính lại kết cấu. Do vậy, cần phải tiến hành khảo sát hiện trường càng sớm càng tốt để xác định các thông số của đám cháy bao gồm: vị trí, đám cháy xảy ra trong bao lâu, đo vẽ và khảo sát hiện trạng các mức độ thiệt hại của kết cấu, tiến hành khoan rút lõi để xác định cường độ của bê tông sau cháy để kiểm chứng với tính toán.

Có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng đến việc giảm cường độ bê tông khi chịu lửa. Tuy nhiên, thông số quan trọng nhất là nhiệt độ lớn nhất đạt đến trong đám cháy và thời gian xảy ra cháy. Đây lại là một trong những vấn đề khó khăn vì không thể đo được nhiệt độ này lúc xảy ra sự cố. Một trong những phương pháp để xác định nhiệt độ lớn nhất đạt đến của bề mặt bê tông là dựa vào màu sắc của bê tông sau khi cháy (colour analysis). Hager [23] đã nghiên cứu sự thay đổi màu sắc của bê tông sử dụng xi măng Portland dưới ảnh hưởng của nhiệt độ, từ đó cho phép ước đoán được nhiệt độ lớn nhất của bề mặt bê tông lúc xảy ra đám cháy. Kết quả của nghiên cứu này được thể hiện trong Hình 3. Màu sắc bề mặt của bê tông sẽ đổi sang hồng / đỏ trong khoảng nhiệt độ từ 300 °C đến 600 °C, có màu xám hơi trắng trong khoảng nhiệt độ từ 600 °C đến 900 °C, có màu da bò (vàng nhạt, vàng sẫm) khi nhiệt độ từ 900 °C trở lên.



Hình 3. Sự thay đổi màu sắc của bê tông thường, vữa và chất kết dính xi măng khi nung nóng ở nhiệt độ từ 100 °C đến 1000 °C [23]

Trong đám cháy thực, nhiệt độ trên toàn bộ mặt cắt tiết diện của cấu kiện bê tông sẽ không bằng nhau. Do sự truyền nhiệt từ mặt ngoài vào trong mà nhiệt độ của các lớp bên ngoài sẽ khá cao, trong khi nhiệt độ của các lớp bê tông bên trong lại thấp. Vì vậy, sau khi xác định được nhiệt độ lớn nhất tại bề mặt của bê tông, cần tiến hành bài toán truyền nhiệt để xác định sự phân bố nhiệt độ trên toàn bộ mặt cắt tiết diện.

Lưu ý rằng, đối với bài toán kiểm tra khả năng chịu lực sau cháy và gia cường, đường gia nhiệt trong không gian cháy là đường gia nhiệt có tham số, kể đến ảnh hưởng của điều kiện thông gió, lỗ mở tại vị trí đám cháy. Theo Phụ lục A, EN 1991-1-2 [24], phương trình của đường gia nhiệt có tham số được xác định bằng công thức (3) và (4).

Đường cong gia nhiệt ở giai đoạn tăng nhiệt độ:

$$\Theta_g = 20 + 1325\left(1 - 0{,}324e^{-0{,}2t^*} - 0{,}204e^{-1{,}7t^*} - 0{,}472e^{-19t^*}\right)\ ^{\circ}\text{C} \tag{3}$$

Đường cong giảm nhiệt ở giai đoạn giảm nhiệt độ được tính bởi công thức:

$$\begin{aligned} \Theta_g &= \Theta_{max} - 625(t^* - t^*_{max}.x) && \text{cho } t^*_{max} \le 0{,}5 \\ \Theta_g &= \Theta_{max} - 250(3 - t^*_{max})(t^* - t^*_{max}.x) && \text{cho } 0{,}5 < t^*_{max} < 2 \\ \Theta_g &= \Theta_{max} - 250(t^* - t^*_{max}.x) && \text{cho } t^*_{max} \ge 2 \end{aligned} \quad (4)$$

trong đó t^* là thời gian quy đổi có kể đến ảnh hưởng của kích thước cửa sổ, lỗ mở trên tường; t^*_{max} là thời gian quy đổi khi đường cong gia nhiệt ở giai đoạn tăng nhiệt độ đạt giá trị lớn nhất.

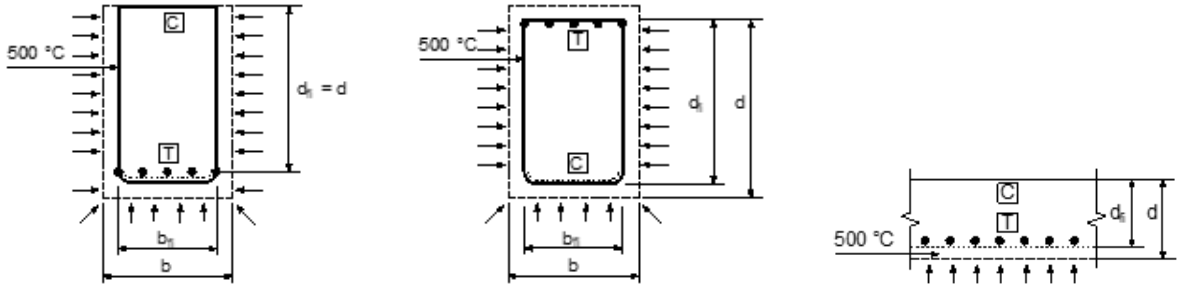
Dựa vào kết quả phân tích nhiệt độ, có thể xác định được hệ số suy giảm cường độ cho bê tông và cốt thép theo mục 2.1. Tiết diện suy giảm được lấy bằng tiết diện nguyên trừ đi phần bê tông bị hư hỏng. Chiều dày lớp bê tông bị hỏng lấy bằng con số lớn hơn của chiều dày bị bong (từ số liệu đo thực tế) và chiều dày của phần bê tông có nhiệt độ lớn hơn 500 °C (được xác định từ tính toán).

2.3. Phương pháp tính toán khả năng chịu lực còn lại của sàn

EC2-1-2 giới thiệu phương pháp tính toán kết cấu BTCT chịu lửa bao gồm phương pháp đơn giản và phương pháp nâng cao. Phương pháp đơn giản bao gồm ba phương pháp là tra bảng, đường đẳng nhiệt và phương pháp phân lớp. Tuy nhiên, phương pháp tra bảng không áp dụng được để tính toán khả năng chịu lực (KNCL) còn lại của sàn sau cháy. Trình tự tính toán cho phương pháp đường đẳng nhiệt và phương pháp phân lớp được trình bày dưới đây, chi tiết hơn và ví dụ tính toán minh họa có thể xem trong bài báo Trung và cs. [8]. Lưu ý rằng đối với bài toán đang nghiên cứu, cần tính toán KNCL của cấu kiện sàn sau khi cháy và đã nguội đi.

a. Phương pháp đường đẳng nhiệt

Phương pháp đường đẳng nhiệt có thể áp dụng được cho cấu kiện dầm, cột, sàn chịu tác động của đường gia nhiệt tiêu chuẩn với thời gian chịu lửa không giới hạn. Phương pháp này dựa trên nguyên tắc giảm đi kích thước tiết diện bị suy giảm do cháy. Kích thước tiết diện suy giảm bằng kích thước tiết diện nguyên trừ đi vùng bê tông có nhiệt độ lớn hơn 500 °C (Hình 4). Những vùng có nhiệt độ lớn hơn 500 °C thì coi như bị mất hết khả năng chịu lực, trong khi đó những vùng còn lại sẽ duy trì được cường độ và mô đun đàn hồi ban đầu. Phương pháp này nên được áp dụng cho sàn BTCT tại những vùng chịu mô men dương. Khi đó vùng kéo của bê tông nằm trong vùng có nhiệt độ lớn, và có thể bỏ đi hoàn toàn, không kể đến khả năng chịu lực.



(a) Bị gia nhiệt từ ba phía – Vùng kéo T nằm phía dưới

(b) Bị gia nhiệt từ ba phía – Vùng nén C nằm phía dưới

(c) Bị gia nhiệt từ một phía – Vùng kéo T nằm phía dưới

Hình 4. Tiết diện ngang suy giảm của cấu kiện BTCT (dầm, sàn)

Quy trình tính toán như sau:

- Xác định sự phân bố nhiệt độ trong sàn. Đối với bài toán kiểm tra KNCL của cấu kiện sau cháy, sự phân bố này cần phải dựa vào bài toán tính toán truyền nhiệt để xác định nhiệt độ mặt trên, nhiệt độ của cốt thép và nhiệt độ mặt dưới của sàn;

- Xác định hệ số suy giảm cường độ của bê tông k_c và của cốt thép k_s khi cháy và sau khi nguội đi (mục 2.1). Từ đó xác định được cường độ tính toán của vật liệu.

Cường độ tính toán của cốt thép:

$$f_{yd,fi} = \frac{k_s f_{yk}}{1{,}15} \tag{5}$$

Cường độ tính toán của bê tông:

$$f_{cd,fi} = \frac{k_c f_{ck}}{1{,}5} \tag{6}$$

trong đó f_{yk} là cường độ chảy đặc trưng của cốt thép ở nhiệt độ thường (MPa); f_{ck} là cường độ đặc trưng khi chịu nén của bê tông ở nhiệt độ thường (MPa).

- Xác định khả năng chịu mô men của sàn theo nguyên tắc của cấu kiện chịu uốn;

Chiều cao vùng nén (mm):

$$x = \frac{A_s f_{yd,fi}}{f_{cd,fi} \lambda b} \tag{7}$$

trong đó A_s là diện tích cốt thép chịu kéo; b là bề rộng tiết diện; $\lambda = 0{,}8$ khi $f_{ck} \leq 50$ MPa.

Cánh tay đòn (mm):

$$z = d - \frac{\lambda x}{2} \tag{8}$$

trong đó d là chiều cao làm việc của tiết diện.

Khả năng chịu mô-men sau khi cháy và nguội đi (kNm):

$$M_{Rd,fi} = A_s f_{yd,fi} z \tag{9}$$

- Kiểm tra khả năng chịu cắt của sàn và kết luận. Khả năng chịu cắt của sàn được kiểm tra với tiết diện đã bị giảm yếu và cường độ suy giảm của bê tông.

b. Phương pháp phân lớp

Phương pháp này có thể áp dụng cho mọi đám cháy chịu tác động của đường gia nhiệt tiêu chuẩn hoặc đường gia nhiệt có tham số. Phương pháp này nên dùng tại vùng có mô men âm, vì bê tông vùng nén nằm ở thớ bị suy giảm cường độ do cháy. Đối với vùng mô men dương, phần bê tông bị suy giảm nằm ở mặt dưới của sàn lại trùng với vùng bê tông chịu kéo, vùng được bỏ qua trong tính toán chịu lực. Do vậy, áp dụng phương pháp này với vùng mô men dương sẽ không hiệu quả, chỉ cần xác định nhiệt độ lớn nhất tại thớ bê tông trùng với vị trí cốt thép chịu lực chính là đủ. Quy trình tính toán như sau.

Chia tiết diện thành n lớp có chiều dày bằng nhau ($n \geq 3$). Xác định nhiệt độ tại tâm của mỗi lớp và hệ số suy giảm cường độ bê tông tương ứng $k_c(\theta_i)$.

Xác định hệ số suy giảm cường độ trung bình:

$$k_{c,m} = \frac{1 - 0{,}2/n}{n} \sum_{i=1}^{n} k_c(\theta_i) \tag{10}$$

Chiều dày của lớp bê tông bị hỏng do cháy được xác định bởi công thức (11):

$$a_z = h_s \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right] \quad \text{(mm)} \tag{11}$$

trong đó $k_c(\theta_M)$ là hệ số suy giảm cường độ bê tông tham khảo (Hình 5 và mục 2.1).

Xác định chiều dày sàn giảm yếu và chiều cao làm việc hiệu quả giảm yếu:

$$h'_s = h_s - a_z \quad \text{(mm)} \tag{12}$$

$$d' = h'_s - a \quad \text{(mm)} \tag{13}$$

Lực kéo cốt thép:

$$F_s = f_{yd,fi} A'_s \quad \text{(kN)} \tag{14}$$

Lực nén bê tông:

$$F_c = f_{cd,fi} \lambda x b \quad \text{(kN)} \tag{15}$$

Chiều cao vùng nén x sẽ được xác định bằng cách cân bằng tổng các lực nén trong từng phân lớp F_{ci} với lực kéo của cốt thép F_s.

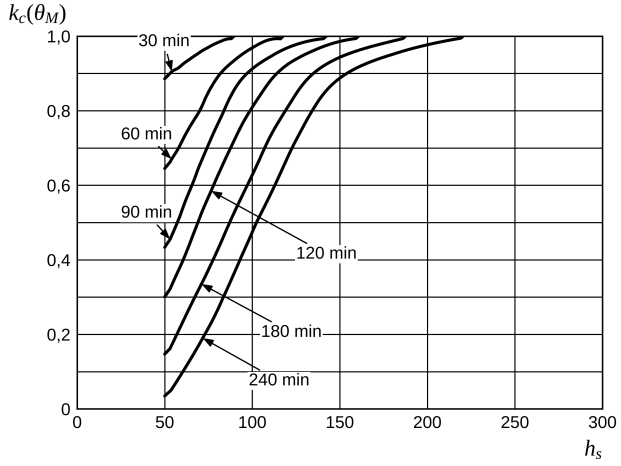
Cánh tay đòn (mm):

$$z = d' - 0{,}5\lambda x \tag{16}$$

Khả năng chịu mô-men sau khi cháy và nguội đi:

$$M_{Rd,fi} = A'_s f_{yd,fi} z \quad \text{(kNm)} \tag{17}$$

Kiểm tra khả năng chịu cắt của sàn và kết luận. Khả năng chịu cắt của sàn được kiểm tra với tiết diện đã bị giảm yếu và cường độ suy giảm của bê tông.



Hình 5. Hệ số giảm cường độ chịu nén của tiết diện giảm yếu

2.4. Các giải pháp gia cường sàn bê tông cốt thép

Về giải pháp gia cường, ba nhóm biện pháp gia cường sàn BTCT sau cháy thường được lựa chọn tùy theo mức độ hư hại và điều kiện thi công: (i) dán tấm sợi polyme (FRP – CFRP/GFRP) theo kỹ thuật dán ngoài (EBR) để bổ sung trực tiếp khả năng chịu kéo tại vùng bê tông đã suy giảm cường độ do nhiệt; (ii) tăng tiết diện bằng lớp bê tông cốt thép bổ sung (tăng chiều dày sàn, bổ sung cốt thép) nhằm phục hồi cả cường độ lẫn độ cứng; và (iii) gia cường bằng tấm/thanh thép dán ngoài trong trường hợp cần khả năng chịu lực lớn và điều kiện thi công cho phép.

Việc lựa chọn giải pháp cần dựa trên kết quả đánh giá khả năng chịu lực còn lại để xác định mức độ thiếu hụt mô men kháng uốn cần bù đắp. Về mặt tính toán, khả năng chịu uốn của sàn sau gia cường được xác định theo nguyên lý cân bằng nội lực trên tiết diện đã kể đến sự suy giảm cường độ

bê tông, cốt thép theo sự phân bố nhiệt độ lúc xảy ra cháy, cộng thêm đóng góp của lớp vật liệu gia cường (biến dạng giới hạn của FRP, ứng suất dính bám FRP – bê tông, hoặc diện tích cốt thép bổ sung), đồng thời kiểm tra các dạng phá hoại có thể chi phối như bong tách FRP, phá hoại dính bám hay trượt cắt tại mặt tiếp giáp lớp bê tông cũ – mới.

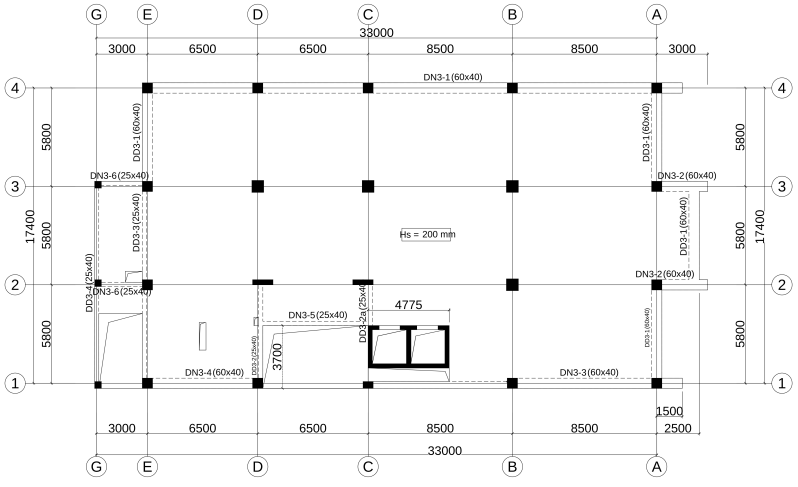
Kết luận rút ra từ nghiên cứu đã tổng hợp [25] là giải pháp dán CFRP có ưu điểm thi công nhanh, ít ảnh hưởng tải trọng bản thân, phù hợp mức hư hại nhẹ đến trung bình, trong khi tăng tiết diện phù hợp hơn với sàn hư hại nặng cần phục hồi đồng thời cường độ và độ cứng; việc lựa chọn cuối cùng cần cân đối giữa hiệu quả kỹ thuật, chi phí và thời gian gián đoạn sử dụng công trình.

3. Quy trình đánh giá khả năng chịu lực còn lại của cấu kiện sàn BTCT sau cháy

Quy trình đánh giá khả năng chịu lực còn lại của cấu kiện sàn BTCT hay sàn BTCT ứng lực trước sau cháy có thể được tiến hành theo trình tự sau:

- Tiến hành thu thập thông tin và khảo sát hiện trạng: các thông tin cần thu thập bao gồm thời gian, địa điểm xảy ra đám cháy; các điều kiện thông gió, lỗ mở cửa lúc xảy ra hỏa hoạn... Tiến hành khoan rút lõi bê tông để xác định cường độ bê tông còn lại.
- Thu thập các thông tin về mức độ thiệt hại: phân loại mức độ và khu vực thiệt hại;
- Đánh giá nhiệt độ lớn nhất tại bề mặt bê tông lúc xảy ra hỏa hoạn. Tính toán bài toán truyền nhiệt để xác định sự phân bố nhiệt độ trên toàn bộ mặt cắt tiết diện;
- Dựa vào kết quả phân tích nhiệt độ, xác định được hệ số suy giảm cường độ cho bê tông sau khi cháy và đã nguội đi, hệ số suy giảm cường độ cho cốt thép và thép ứng lực trước theo mục 2.1. Tiết diện suy giảm được lấy bằng tiết diện nguyên trừ đi phần bê tông bị hư hỏng. Chiều dày lớp bê tông bị hỏng lấy bằng con số lớn hơn của chiều dày bị bong (từ số liệu đo thực tế) và chiều dày của phần bê tông có nhiệt độ lớn hơn 500 °C (được xác định từ tính toán);
- Tính toán khả năng chịu lực còn lại của sàn theo phương pháp đường đẳng nhiệt hoặc phương pháp phân lớp;
- Tiến hành tính toán gia cường cấu kiện nếu cần thiết.

4. Ví dụ tính toán

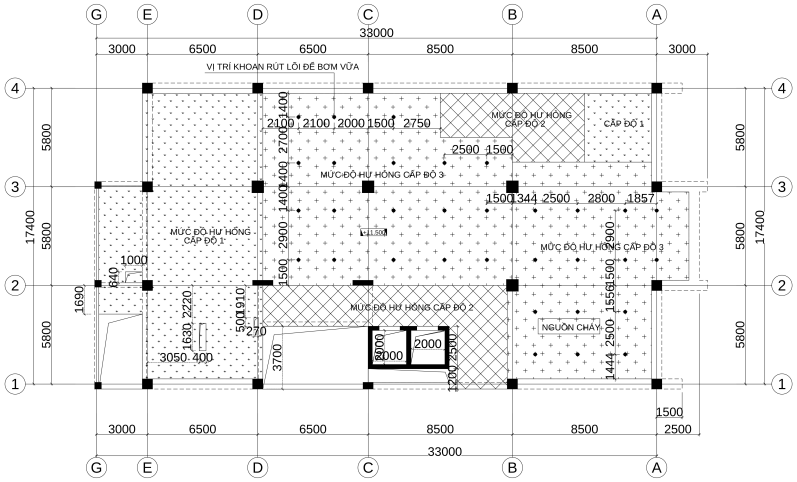


Hình 6. Mặt bằng kết cấu tầng điển hình

Thông tin công trình: Công trình có 11 tầng nổi, 1 tum và 1 tầng bán hầm. Căn cứ hồ sơ hoàn công được cung cấp, công trình có kích thước 33 m × 18 m, có mặt bằng kết cấu tầng điển hình như Hình 6. Bê tông sử dụng cho cột, vách có cường độ chịu nén B22,5 (M300), cho dầm, sàn ứng lực

trước dùng B25 (M350). Cốt thép sàn dùng loại CI (R_s = 225 MPa). Cốt thép ứng lực trước T13, các chỉ tiêu kỹ thuật theo ASTM A416/A416M [26], f_{py} = 1690 MPa, f_{pu} = 1860 MPa. Theo thiết kế ban đầu, sàn có chiều dày 200 mm. Cốt thép thường ϕ12a250 hai lớp; cốt thép ứng lực trước đặt 4 bó 4 sợi T13 cho dải trên cột, 1 bó 3 sợi với khoảng cách 1100 mm cho dải giữa nhịp theo cả hai phương. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ cho sàn là 20 mm. Công trình có bậc chịu lửa là bậc 2. Kết cấu mặt dựng bao bọc chu vi mặt bằng khối nhà là vách kính (sử dụng kính hộp), khung hợp kim nhôm kết hợp cột ốp đá.

Công trình xảy ra sự cố cháy ở tầng 3, đang được sử dụng làm văn phòng, bên trong có chia phòng bằng vách nhôm kính, trần thạch cao. Có vách kính ngăn với khu vực như sảnh tầng, buồng thang bộ, hộp kỹ thuật theo chiều đứng, phòng vệ sinh. Thang máy được bao bọc bằng tường bê tông cốt thép. Vị trí đám cháy trong mặt bằng tầng 3, sàn bị ảnh hưởng là tầng 4. Nhiên liệu cháy chủ yếu là đồ dùng văn phòng phẩm, tài liệu. Sau khi cháy khoảng 20 đến 25 phút thì bắt đầu dập lửa. Sau 3 giờ thì đám cháy bị dập tắt hoàn toàn.



Hình 7. Mặt bằng phân chia khu vực hư hỏng sau cháy

Sau khi tiến hành khảo sát và đo đạc, có thể phân chia sàn tầng 4 thành ba khu vực tương ứng với mức độ hư hỏng như được chỉ ra trong Hình 7. Trong đó, mức độ hư hỏng cấp độ 3 là lớn nhất, lớp bê tông bảo vệ sàn bị bong tróc nhiều, với bề dày bong tróc trung bình từ 20 đến 30 mm. Cốt thép sàn lớp dưới chưa bị lộ hết. Một số vị trí bị lộ cáp ứng lực trước (Hình 8). Các kết quả dưới đây được trình bày cho khu vực sàn có mức độ hư hỏng cấp độ 3.

Kết quả tiến hành khảo sát và kiểm định vật liệu cho thấy: Phần bê tông nằm sâu phía trong lớp bê tông bị bong hoặc nằm sâu hơn 10 đến 20 mm so với bề mặt bê tông ban đầu vẫn đảm bảo cường độ theo yêu cầu thiết kế. Bê tông sàn đạt cấp độ bền B25 như thiết kế ban đầu. Cột đạt cấp độ bền B22.5 (mác M300).

Cốt thép sàn $\phi \geq 10$, theo thiết kế là thép CI (R_s = 225 MPa). Sau khi cháy, tại các khu vực bị lộ cốt thép, cường độ thép thực tế theo thí nghiệm đạt R_s = 225 MPa. Giá trị này sẽ được dùng để tính toán.

Bề mặt lớp bê tông sau cháy có màu sắc ở khoảng giữa ánh hồng đến xám trắng. Một số nghiên cứu về bê tông khi bị cháy cho thấy, nhiệt độ lớn nhất khi cháy tại bề mặt bê tông sẽ khoảng 600 °C đến 685 °C. Thiên về an toàn, nhiệt độ lớn nhất tại bề mặt bê tông sẽ được lấy khoảng 685 °C cho bài toán phân tích truyền nhiệt.



(a) Khu vực hư hỏng cấp độ 3

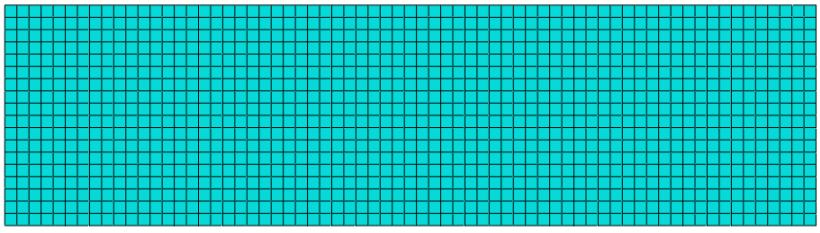


(b) Vị trí bị lộ cốt thép và cáp ứng lực trước

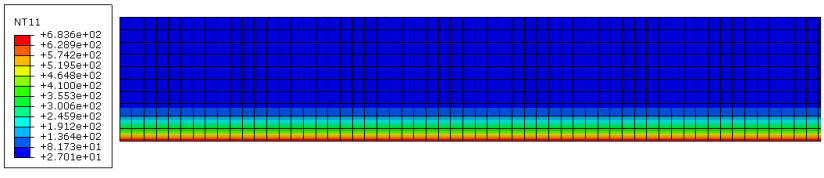
Hình 8. Một số hình ảnh sàn bị hư hỏng

Để xác định sự phân bố nhiệt độ trong cấu kiện sàn BTCT, mô hình truyền nhiệt trong Abaqus [27] được dùng để phân tích. Đây là phần mềm được sử dụng rộng rãi trên thế giới để phân tích kết cấu các bài toán phức tạp và phi tuyến. Mô hình phân tích nhiệt 2-D được sử dụng để khảo sát sự phân bố nhiệt độ sàn. Mặt bị cháy sẽ chịu đối lưu và bức xạ nhiệt. Mặt không bị cháy sẽ chịu đối lưu và bức xạ nhiệt với nhiệt độ môi trường (lấy bằng 27 °C). Các hệ số này được lấy theo tiêu chuẩn EN 1992-1-2. Đối với bài toán này, đường gia nhiệt có tham số theo phương trình (3), (4) được sử dụng dựa trên các kết quả khảo sát. Kích thước khoang cháy là 30,6 × 18 (m), chiều cao khoang cháy là 3,5 m. Ba mặt khoang cháy là kính và một mặt là tường xây, vật liệu gây cháy là giấy tờ, bàn ghế, máy tính, văn phòng phẩm...

Hình 9 chỉ ra mô hình 2D phân tích nhiệt cho sàn dày 200 mm. Sàn được chia nhỏ bằng các phần tử DC2D4, kích thước một phần tử là 25 mm. Kết quả phân tích sự phân bố nhiệt độ cho sàn được chỉ ra trong Hình 10.

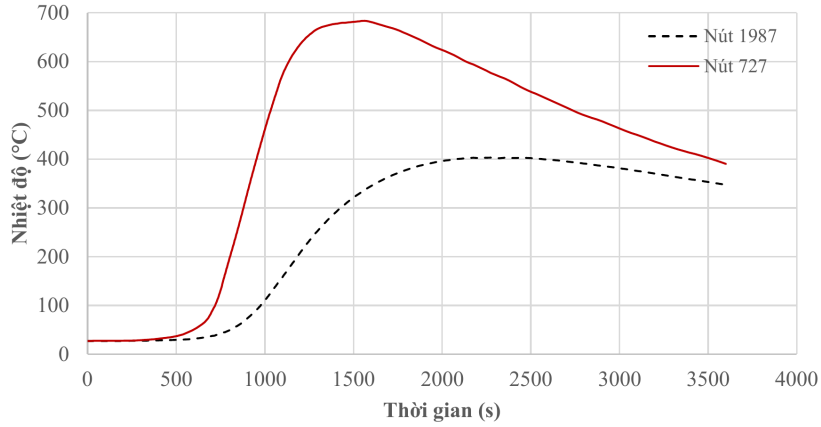


Hình 9. Mô hình chia nhỏ sàn



Hình 10. Phân bố nhiệt độ cho sàn

Hình 11 chỉ ra sự phát triển nhiệt độ tại mặt dưới của sàn (nút 727) và tại thớ bê tông trùng với vị trí cốt thép thường (nút 1987), cách bề mặt là 25 mm. Nhiệt độ tại mặt dưới của sàn đã đạt đến khoảng 684 °C. Tuy nhiên, nhiệt độ giảm khá nhanh khi truyền nhiệt vào trong. Tại vị trí cốt thép thường chỉ cách bề mặt là 25 mm, nhiệt độ lớn nhất chỉ đạt khoảng 400 °C.



Hình 11. Quan hệ nhiệt độ – thời gian tại vị trí cốt thép thường và tại mặt dưới của sàn

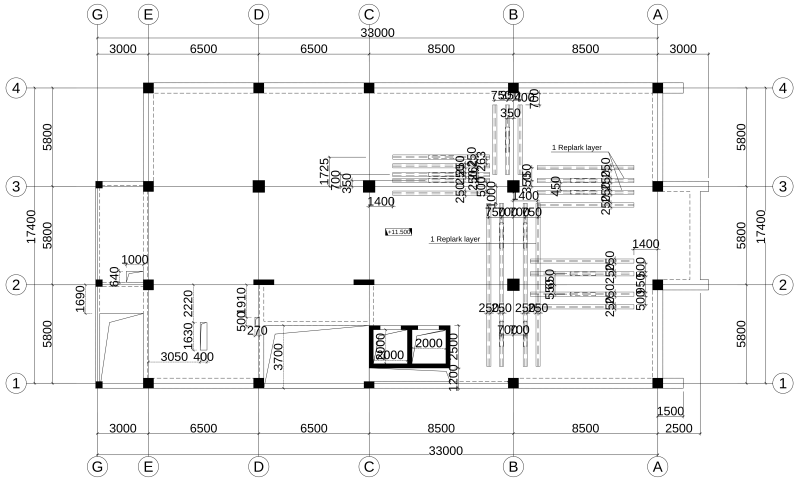
Dựa vào kết quả phân tích nhiệt độ, có thể xác định được hệ số suy giảm cường độ cho bê tông, cốt thép thường và thép ứng lực trước dựa theo mục 2.1. Tiết diện suy giảm được lấy bằng tiết diện nguyên trừ đi phần bê tông bị hư hỏng. Chiều dày lớp bê tông bị hỏng lấy bằng con số lớn hơn của chiều dày bị bong (từ số liệu đo thực tế) và chiều dày của phần bê tông có nhiệt độ lớn hơn 500 °C (được xác định từ tính toán). Kết quả chi tiết được cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Tiết diện suy giảm và hệ số suy giảm cường độ cho bê tông và cốt thép

STT	Vị trí	Chiều dày sàn ban đầu	Chiều dày sàn bị suy giảm	Nhiệt độ lớn nhất	Hệ số suy giảm cường độ	Cường độ còn lại $f_{y,\theta}$ (MPa)
1	Thép thường			400	1,0	225
2	Thép ứng lực trước			243	0,797	1346,9
3	Bê tông mặt ngoài			684		theo KQ khoan rút lõi
4	Vùng mô men dương	200	170			
5	Vùng mô men âm	200	170			

Đối với các cấu kiện bị hư hỏng mức độ III thì phương án xử lý đề xuất như sau. Tại các vị trí chịu mô men âm, biện pháp xử lý đóng lưới thép và đổ bù lớp vữa xi măng mác #400 (B30) dày tối thiểu 60 mm và bù hết phần bê tông bị bong là đảm bảo an toàn. Tại các vị trí chịu mô men dương, nếu bị suy giảm khả năng chịu lực so với trước khi cháy thì được gia cường bằng các lớp sợi các bon cường độ cao Replark, mỗi lớp dày 0,333 mm. Sợi này có bề rộng mỗi lớp bằng 250 mm, mô đun đàn hồi là 230000 MPa, giới hạn bền f_{fu} = 3400 MPa. Số lượng, chiều dày và bố trí của lớp sợi được tính toán thiết kế và kiểm tính theo tiêu chuẩn ACI PRC-440.2-17 [28]. Mặt bằng bố trí sợi gia cường được chỉ ra trong Hình 12.

Tại vị trí ô sàn này, khả năng chịu mô men dương trước khi cháy là 86 kNm. Sau khi cháy, khả năng chịu mô men dương là 58 kNm. Sau khi gia cường, khả năng chịu mô men tính toán được là 94 kNm, tăng 9,3% so với giá trị trước khi xảy ra cháy. Như vậy, phương pháp gia cường là đảm bảo an toàn. Lưu ý rằng khác với khả năng chịu lực khi cháy, khả năng chịu lực sau cháy của kết cấu BTCT sẽ được tính toán kiểm tra với hệ quả tác động theo trạng thái giới hạn cực hạn tại nhiệt độ thường.



Hình 12. Mặt bằng bố trí gia cường sợi Replark

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày các nguyên tắc và phương pháp đánh giá khả năng chịu lực còn lại của bản sàn bê tông cốt thép sau cháy theo bộ tiêu chuẩn Eurocode, bao gồm phương pháp đường đẳng nhiệt (áp dụng cho vùng chịu mô men dương) và phương pháp phân lớp (áp dụng cho vùng chịu mô men âm), cùng các giải pháp gia cường thường được sử dụng trong thực tế. Trên cơ sở đó, một quy trình đánh giá khả năng chịu lực còn lại và lựa chọn giải pháp gia cường sàn BTCT sau cháy đã được đề xuất, gồm các bước: khảo sát hiện trạng và thu thập thông tin đám cháy; đánh giá mức độ thiệt hại; xác định nhiệt độ lớn nhất bề mặt bê tông và phân bố nhiệt độ trên tiết diện; xác định hệ số suy giảm cường độ vật liệu; tính toán khả năng chịu lực còn lại; và thiết kế gia cường nếu cần thiết.

Quy trình đề xuất đã được áp dụng cho một công trình thực tế bị cháy tại tầng 3, ảnh hưởng đến sàn tầng 4. Kết quả phân tích truyền nhiệt (Abaqus) kết hợp khảo sát màu sắc bê tông và số liệu đo đạc hiện trường cho phép xác định được chiều dày vùng bê tông suy giảm và hệ số suy giảm cường độ của bê tông, cốt thép thường, thép ứng lực trước theo EN 1992-1-2 và EN 1994-1-2. Tại khu vực hư hỏng cấp độ 3, khả năng chịu mô men dương của sàn giảm từ 86 kNm (trước cháy) xuống còn 58 kNm (sau cháy); sau khi gia cường bằng tấm sợi các bon Replark được tính toán theo ACI PRC-440,2-17, khả năng chịu mô men đạt 94 kNm, tăng 9,3% so với trạng thái trước khi xảy ra cháy. Kết quả này cho thấy quy trình đề xuất là hợp lý, đáng tin cậy và có thể áp dụng vào thực tiễn đánh giá và gia cường công trình sau cháy tại Việt Nam.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Vụ Khoa học Công nghệ, Môi trường và Vật liệu xây dựng, Bộ Xây dựng, cùng sự hỗ trợ trong công tác triển khai của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài "Nghiên cứu xây dựng quy trình đánh giá khả năng chịu lực còn lại của cấu kiện dầm, sàn bê tông cốt thép sau cháy", mã số RD 53-26.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Các tác giả xác nhận không sử dụng bất kỳ công cụ trí tuệ nhân tạo tạo sinh hoặc công nghệ hỗ trợ bởi AI nào trong quá trình chuẩn bị và hoàn thiện bản thảo.

Tài liệu tham khảo

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

[2] TCVN 14104:2025. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – Nguyên tắc đảm bảo khả năng chịu lửa và khả năng bảo toàn sau cháy*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.

[3] SP 468.1325800.2019. *Concrete and reinforced concrete structures – Rules for ensuring fire resistance and fire safety*. Ministry of Construction of the Russian Federation, Moscow, Russia.

[4] Thắng, N. T., Ninh, N. T. (2016). Biểu đồ tương tác của cột bê tông cốt thép ở nhiệt độ cao theo tiêu chuẩn châu Âu EC2. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (STCE)*, 10(2):55–61.

[5] Thắng, N. T. (2017). Xác định khả năng chịu lửa của cột bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn EC2-1-2. *Tạp chí Xây dựng*, 590:71–75.

[6] Thang, N. T. (2016). Effect of concrete cover on axial load resistance of reinforced concrete columns in fire. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)*, 10(5):29–36.

[7] Đồng, P. T. (2018). *Thiết kế sàn bê tông cốt thép chịu lửa theo tiêu chuẩn EN 1992-1-2*. Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Xây dựng, Hà Nội.

[8] Trung, N. T., Hai, D. V., Phương, P. M. (2019). Đánh giá khả năng chịu lửa của sàn bê tông cốt thép bằng các phương pháp đơn giản theo tiêu chuẩn EN 1992-1-2. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 13(2V):41–52.

[9] Thang, N. T., Viet, N. H. (2021). Simplified calculation of flexural strength deterioration of reinforced concrete T-beams exposed to ISO 834 standard fire. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(4):123–135.

[10] Thang, N. T., Kien, N. T. (2021). Calculation of reinforced concrete beams' shear strengths at ambient and fire conditions according to Russian design standards. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(4):157–171.

[11] Hưng, Đ. V., Quân, B. L., Tùng, B. T., Thắng, N. T. (2022). Tính toán giới hạn chịu lửa của dầm bê tông cốt thép tiết diện chữ nhật theo tiêu chuẩn thiết kế SP 468.1325800.2019. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 16(5V):57–73.

[12] Nguyen, T.-T., Pham, T. T., Phan, Q. M., Vu, T. A. (2018). A case study on residual strength and strengthening of fire-damaged reinforced concrete columns. *Proceedings of the 7th International Conference on Protection of Structures against Hazards (PSH18)*, Hanoi, Vietnam, 437–448.

[13] Nguyen, T.-T., Pham, X.-D., Pham, A.-T., Nguyen, T.-N.-H., Tran, M.-H., Nguyen, V.-H., Nguyen, T.-N., Nguyen, T.-T. (2025). Case studies of post-fire resistance calculation and strengthening of reinforced concrete columns. *Safeguarding structural resilience under extreme events: Proceedings of PROTECT 2024*, Cham, Springer, 785–800.

[14] Hieu, N. T., Dat, P. X., Vinh, T. X., Hung, N. M. (2025). Experimental study on the effectiveness of strengthening openings in two-way reinforced concrete slabs with CFRP sheets. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 19(1):36–46.

[15] Quỳnh, D. Đ., Hiếu, N. T., Đạt, P. X., Hùng, N. M. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng tấm composite CFRP ở trạng thái đang chịu tải. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 15(2V):1–11.

[16] Hang, N. T. N., Hung, T. V., Fan, S. (2025). Shear performance of prestressed hollow-core slabs strengthened with CFRP: Finite element modeling and parametric insights. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 19(3):13–27.

[17] Dat, P. X., Hieu, N. T. (2023). Experimental study on the effectiveness of strengthening reinforced concrete slab-column connections using CFRP sheets. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 17(3):46–54.

[18] Hùng, H. M., Phương, P. N., Nam, P. H. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm gia cường sức kháng uốn cho dầm bê tông cốt thép bằng tấm CFRP ứng suất trước. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(7V):109–118.

[19] Anh, T. H., Giang, N. H., Tân, N. N. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường kháng uốn của

dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn bằng tấm sợi composite CFRP. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 15(1V):1–16.

[20] Nguyen, T. H., Pham, X. D., Tran, K. D. (2021). Experimental study on the behavior of eccentrically compressed reinforced concrete columns strengthened with CFRP composite sheets. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(4):172–181.

[21] ACI KC-01-98. *Guide to damage assessment and repair of concrete structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

[22] EN 1994-1-2:2005. *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*. European Committee for Standardization, CEN, Brussels, Belgium.

[23] Hager, I. (2014). Colour change in heated concrete. *Fire Technology*, 50(4):945–958.

[24] EN 1991-1-2:2002. *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization, CEN, Brussels, Belgium.

[25] Haris, M., Xiong, E., Gao, W., Samuel, M. A., Sahar, N. U., Saleem, A. (2025). Strengthening reinforced concrete members using FRP – evaluating fire performance, challenges, and future research directions: A state-of-the-art review. *Polymers*, 17(1):13.

[26] ASTM A416/A416M-94. *Standard specification for steel strand, uncoated seven-wire for prestressed concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[27] Dassault Systèmes (2010). *ABAQUS analysis user's manual (Version 6.10)*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

[28] ACI 440.2R-17. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.