

# Đánh giá kết cấu bê tông cốt thép sau hỏa hoạn: Tổng quan nghiên cứu

**Chu Việt Thức<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Chính<sup>2,\*</sup>**

<sup>1</sup> Phòng Quản lý khoa học và Hợp tác quốc tế, Trường Đại học Điện lực

<sup>2</sup> Khoa Cơ khí – Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện lực

## TỪ KHOÁ

Bê tông cốt thép  
Hư hỏng sau hỏa hoạn  
Đánh giá sau cháy  
Phục hồi kết cấu

## TÓM TẮT

Hỏa hoạn gây suy giảm đáng kể khả năng chịu lực, độ cứng và độ bền lâu của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặt ra yêu cầu cấp thiết về đánh giá và phục hồi kết cấu sau cháy. Bài báo này tổng quan các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến cơ chế hư hỏng, phương pháp đánh giá và giải pháp phục hồi kết cấu BTCT sau hỏa hoạn. Trọng tâm được đặt vào các biến đổi vật lý – hóa học của bê tông dưới tác động của nhiệt độ cao, sự suy giảm cường độ, mô đun đàn hồi, khả năng bám dính giữa bê tông và cốt thép, cũng như hiện tượng bong tróc bê tông. Bài báo nhấn mạnh rằng hư hỏng sau cháy thường không phân bố đồng đều theo chiều sâu tiết diện, làm cho việc đánh giá khả năng chịu lực còn lại trở nên phức tạp. Các phương pháp đánh giá phổ biến như khảo sát trực quan, thí nghiệm không phá hủy, khoan lõi, thí nghiệm trong phòng và mô hình hóa số được tổng hợp, phân tích và liên hệ với hệ thống tiêu chuẩn hiện hành tại Việt Nam. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất định hướng tiếp cận tích hợp trong đánh giá sau cháy, kết hợp giữa phương pháp truyền thống, công nghệ hiện đại và yêu cầu thực tiễn, nhằm hỗ trợ lựa chọn giải pháp sửa chữa, gia cường hoặc thay thế kết cấu một cách phù hợp.

## KEYWORDS

Reinforced concrete  
Fire damage  
Post-fire assessment  
Residual capacity  
Structural rehabilitation

## ABSTRACT

Fire can significantly reduce the load-bearing capacity, stiffness, and durability of reinforced concrete (RC) structures, creating an urgent need for post-fire assessment and rehabilitation. This paper provides a review of domestic and international studies on the damage mechanisms, assessment methods, and rehabilitation solutions for reinforced concrete structures after fire exposure. Particular emphasis is placed on the physical and chemical changes in concrete at elevated temperatures, including the degradation of compressive strength, elastic modulus, bond performance between concrete and reinforcing steel, as well as concrete spalling. The paper highlights that post-fire damage is often unevenly distributed through the cross-section depth, making the assessment of residual structural capacity more complex. Common assessment methods, such as visual inspection, non-destructive testing, core sampling, laboratory testing, and numerical modeling, are reviewed, analyzed, and discussed in relation to the current standards applied in Vietnam. On that basis, the paper proposes an integrated approach to post-fire assessment, combining conventional methods, modern technologies, and practical requirements to support the selection of appropriate solutions for repair, strengthening, or replacement of damaged structures.

## 1. Giới thiệu

Hỏa hoạn là một trong những tác nhân gây suy giảm nghiêm trọng khả năng chịu lực và độ bền lâu của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT). Mặc dù kết cấu BTCT thường không sụp đổ tức thời như nhiều dạng kết cấu khác, tác động của nhiệt độ cao vẫn làm biến đổi sâu sắc tính chất cơ học, vi cấu trúc vật liệu và trạng thái làm việc của cấu kiện. Các tổng quan quốc tế gần đây đều cho thấy sau hỏa hoạn, cường độ còn lại của bê tông không chỉ giảm theo mức nhiệt cực đại mà còn phụ thuộc mạnh vào thời gian chịu nhiệt, chế độ làm nguội và mức độ không đồng nhất theo chiều sâu của vùng chịu lửa. Trong đó, việc xác định chiều sâu lớp bê tông bị hư hỏng được xem là một trong những vấn đề trọng tâm của đánh giá sau cháy, bởi đây là cơ sở để phân biệt giữa hư

hỏng bề mặt có thể sửa chữa và hư hỏng sâu ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu lực còn lại của cấu kiện [1], [2].

Các nghiên cứu nền tảng về vật liệu chịu nhiệt cao đã sớm chỉ ra rằng bê tông chịu tác động nhiệt sẽ xuất hiện mất nước liên kết, phân hủy các pha ngậm nước, gia tăng hệ vi nứt và suy giảm đáng kể cường độ nén cũng như mô đun đàn hồi. Hướng nghiên cứu này được phát triển từ các công trình kinh điển về cường độ bê tông ở nhiệt độ cao, như Abrams, Khoury, Schneider và các báo cáo RILEM về ứng xử của bê tông khi chịu nhiệt. Các công trình đó đã đặt nền móng cho việc hiểu bản chất suy giảm vật liệu, đồng thời cho thấy ảnh hưởng của cốt liệu, tốc độ gia nhiệt và cơ chế bong tách nổ bề mặt đến mức độ hư hỏng còn lại của kết cấu [3].

\*Liên hệ tác giả: Chinhnv@epu.edu.vn

Nhận ngày 02/04/2026, sửa xong ngày 29/04/2026, chấp nhận đăng ngày 04/05/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2026.1340>

Hỏa hoạn là một trong những tác nhân nguy hiểm gây suy giảm nghiêm trọng khả năng chịu lực và độ bền lâu của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt trong bối cảnh gia tăng mật độ xây dựng và phát triển hạ tầng đô thị. Các nghiên cứu gần đây cho thấy rằng mặc dù kết cấu BTCT có khả năng chịu lửa tương đối tốt, tác động của nhiệt độ cao vẫn gây ra sự suy giảm đáng kể các đặc trưng cơ học của vật liệu, bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và khả năng bám dính giữa bê tông và cốt thép. Đồng thời, vật liệu sau cháy thường xuất hiện tính không đồng nhất theo chiều sâu, gây khó khăn đáng kể cho công tác đánh giá và phục hồi kết cấu [1], [2].

Các nghiên cứu về kết cấu BTCT sau hỏa hoạn có thể được phân thành ba hướng chính. Thứ nhất, nhóm nghiên cứu về cơ chế suy giảm vật liệu tập trung làm rõ ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến vi cấu trúc và tính chất cơ học của bê tông. Các công trình của Phan và Carino (2001) và Kodur và Raut (2012) đã chỉ ra rằng cường độ bê tông giảm mạnh theo nhiệt độ và thời gian chịu nhiệt, đồng thời phụ thuộc vào thành phần vật liệu và điều kiện gia nhiệt [3].

Thứ hai, nhóm nghiên cứu về phương pháp đánh giá kết cấu sau cháy tập trung vào việc phát triển các kỹ thuật thí nghiệm tại hiện trường và trong phòng. Các phương pháp không phá hoại (NDT) như siêu âm truyền xung, búa bật nảy và các phương pháp bán phá hoại như khoan lõi đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi. Tuy nhiên, Wróblewska và Kowalski (2020) [2] đã chỉ ra rằng độ tin cậy của các phương pháp này bị ảnh hưởng đáng kể bởi tính không đồng nhất của bê tông sau cháy, đặc biệt là sự phân bố hư hỏng theo chiều sâu cấu kiện. Ngoài ra, các nghiên cứu thực nghiệm gần đây của Momin cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kết hợp nhiều phương pháp để nâng cao độ chính xác trong đánh giá [4].

Thứ ba, các nghiên cứu gần đây có xu hướng tích hợp các công nghệ hiện đại nhằm nâng cao độ chính xác và tự động hóa quá trình đánh giá. Các nghiên cứu của Liu và cộng sự (2025) [5] và Wang và cộng sự (2025) [6] đã ứng dụng trí tuệ nhân tạo và học sâu để nhận diện và phân loại các dạng hư hỏng của kết cấu BTCT sau cháy với độ chính xác cao. Đồng thời, các mô hình số tiên tiến như nghiên cứu của Miao và cộng sự (2025) [7] cho phép mô phỏng chi tiết sự tương tác nhiệt – cơ học trong bê tông, góp phần làm rõ cơ chế suy giảm vật liệu. Bên cạnh đó, các kỹ thuật đo đạc hiện trường hiện đại như quét laser 3D cũng cho thấy tiềm năng lớn trong việc đánh giá toàn diện mức độ hư hỏng của kết cấu (Makupa và cộng sự, 2016 [8]).

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về kết cấu BTCT sau hỏa hoạn còn tương đối hạn chế và chủ yếu tập trung vào khảo sát thực tế công trình. Nguyễn Cao Dương và Hoàng Anh Giang đã chỉ ra rằng kết cấu sau cháy thường xuất hiện các dạng hư hỏng như bong tróc lớp bảo vệ, lộ cốt thép và suy giảm khả năng chịu lực, đồng thời nhấn mạnh yêu cầu đánh giá một cách khoa học và hệ thống. Bên cạnh đó, các báo cáo khảo sát của Hoàng Anh Giang (2009) [3] đã cung cấp dữ liệu thực nghiệm quan trọng về đặc điểm hư hỏng và phương pháp phân cấp mức độ ảnh hưởng của hỏa hoạn. Ngoài ra, nghiên cứu của Liang Chaoqun (2018) [9] cho thấy sự suy giảm đáng kể khả năng chịu lực của cấu kiện sau cháy và đề xuất các giải pháp gia cường phù hợp.

Mặc dù đã đạt được nhiều tiến bộ, các nghiên cứu hiện nay vẫn tồn tại một số hạn chế đáng kể. Thứ nhất, phần lớn các công trình tập trung vào từng phương pháp riêng lẻ mà thiếu một khung đánh giá tích hợp kết hợp giữa khảo sát hiện trường, thí nghiệm vật liệu và mô hình hóa số. Thứ hai, các phương pháp và mô hình hiện có chủ yếu được phát triển trong điều kiện phòng thí nghiệm hoặc tại các quốc gia phát triển, do đó chưa phản ánh đầy đủ điều kiện thực tế tại các nước đang phát triển, đặc biệt là các quốc gia nhiệt đới như Việt Nam. Thứ ba, việc xác định chiều sâu lớp bê tông bị hư hỏng – một thông số then chốt trong đánh giá sau cháy – vẫn chưa có phương pháp thống nhất và đáng tin cậy (Ibrahim và cộng sự, 2025 [10]).

Trong những năm gần đây, tại Việt Nam đã ghi nhận nhiều vụ hỏa hoạn xảy ra trong các công trình dân dụng và hạ tầng giao thông, gây ra những hư hỏng đáng kể đối với kết cấu bê tông cốt thép. Các sự cố cháy tại khu vực tầng hầm để xe, nhà ở cao tầng hoặc công trình công cộng cho thấy đặc điểm chung là nhiệt độ cao cục bộ trong thời gian ngắn nhưng đủ để gây bong tróc lớp bê tông bảo vệ, lộ cốt thép và suy giảm khả năng chịu lực của cấu kiện. Thực tế này đặt ra yêu cầu cấp thiết đối với việc đánh giá nhanh và chính xác mức độ hư hỏng của kết cấu sau cháy nhằm đưa ra quyết định sửa chữa, gia cường hoặc tháo dỡ.

Tuy nhiên, theo các nghiên cứu trong nước, công tác đánh giá hiện nay chủ yếu dựa vào quan sát hiện trường và kinh nghiệm chuyên gia, trong khi việc áp dụng các phương pháp tiên tiến như thí nghiệm không phá hoại kết hợp mô hình số hoặc trí tuệ nhân tạo còn rất hạn chế. Do đó, bài báo này nhằm tổng hợp và phân tích các nghiên cứu hiện có về cơ chế hư hỏng, phương pháp đánh giá và giải pháp phục hồi kết cấu BTCT sau hỏa hoạn. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất một hướng tiếp cận tích hợp, kết hợp giữa các phương pháp truyền thống và công nghệ hiện đại, hướng tới xây dựng quy trình đánh giá phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam.

## 2. Cơ chế hư hỏng của bê tông cốt thép dưới tác động của hỏa hoạn

### 2.1. Biến đổi vật lý và hóa học của bê tông

Trong điều kiện hỏa hoạn, nhiệt độ, độ ẩm, thành phần hóa học và cấu trúc vi mô của bê tông thay đổi đồng thời, dẫn đến sự suy giảm đáng kể các tính chất cơ học của nó. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng cơ chế phá hoại của bê tông ở nhiệt độ cao không phải do một yếu tố duy nhất gây ra, mà là do sự tương tác của nhiều yếu tố, bao gồm gradient nhiệt độ, sự di chuyển của hơi ẩm, áp suất hơi nước trong lỗ rỗng và sự phân hủy các hydrat trong hỗn hợp xi măng [11].

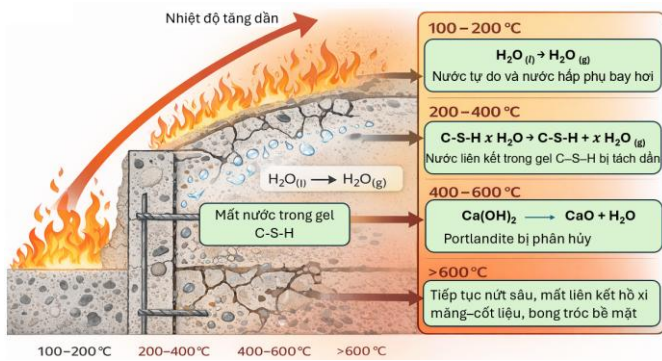
Ở nhiệt độ 100–200 °C, nước tự do và nước hấp phụ trong hệ thống mao dẫn bắt đầu bay hơi. Quá trình này làm tăng áp suất lỗ rỗng và tạo ra các vết nứt nhỏ ban đầu trong hỗn hợp xi măng. Khi khả năng thoát ẩm của bê tông bị hạn chế, áp suất hơi nước tích tụ gần bề mặt, càng thúc đẩy sự hình thành các vết nứt nhỏ. Ở nhiệt độ 200–400 °C, nước liên kết trong gel C-S-H dần dần tách ra, làm suy yếu cấu trúc liên kết chính của hỗn hợp xi măng. Đồng thời, sự khác biệt về hệ số giãn nở nhiệt giữa cốt liệu và hỗn hợp xi măng tạo ra ứng suất nhiệt không

tương thích trong vùng chuyển tiếp liên kết (ITZ), làm cho vùng này dễ bị hình thành các vết nứt nhỏ hơn.

Khi nhiệt độ tăng lên khoảng 400–600 °C, các biến đổi hóa học trở nên đáng kể hơn.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bắt đầu phân hủy, làm hư hại nghiêm trọng lớp gel C-S-H và làm giảm đáng kể mật độ, cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông. Ở nhiệt độ cao hơn, sự giãn nở không đồng đều giữa các thành phần vật liệu tiếp tục làm tăng ứng suất bên trong, cuối cùng dẫn đến các vết nứt sâu và bong tróc bề mặt. Nói chung, sự giảm cường độ bê tông theo nhiệt độ có thể được biểu thị như sau:

$$f_{c,T} = k_T \cdot f_{c,20}$$

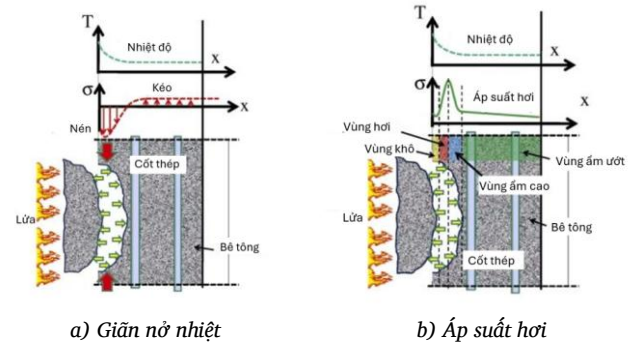
Trong đó  $f_{c,T}$  là cường độ bê tông ở nhiệt độ T,  $k_T$  là hệ số giảm cường độ theo nhiệt độ, và  $f_{c,20}$  là cường độ ban đầu trong điều kiện bình thường.



**Hình 1.** Sơ đồ biến đổi vật lý và hóa học của bê tông dưới tác động của nhiệt độ cao.

Hình 1 cho thấy bê tông dưới tác động của nhiệt độ cao bị suy thoái theo từng giai đoạn nhiệt độ. Ở 100–200 °C, nước tự do và nước hấp phụ bay hơi, làm tăng áp suất lỗ rỗng và khởi phát vi nứt. Trong khoảng 200–400 °C, gel C-S-H mất nước liên kết, làm suy yếu pha liên kết chính của hồ xi măng. Ở 400–600 °C,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  phân hủy, cấu trúc vi mô bị phá hủy mạnh hơn, kéo theo suy giảm cường độ và độ cứng. Trên 600 °C, nứt sâu và bong tróc bề mặt xuất hiện rõ, phản ánh sự mất ổn định vật liệu ở cấp tiết diện.

Theo nghiên cứu của Ozawa và cộng sự, sự hư hại của bê tông dưới tác động của lửa chủ yếu được chi phối bởi hai cơ chế. Cơ chế thứ nhất là cơ chế nhiệt–cơ học. Khi bề mặt bê tông chịu nhiệt độ cao, gradient nhiệt độ theo chiều sâu tiết diện tạo ra ứng suất nén song song với bề mặt và ứng suất kéo vuông góc với bề mặt; khi ứng suất kéo vượt quá cường độ kéo của bê tông, hiện tượng nứt và bong tróc sẽ xảy ra. Cơ chế thứ hai là cơ chế ẩm–nhiệt. Khi bê tông bị gia nhiệt, độ ẩm bên trong tái phân bố, hình thành các vùng khô, vùng hơi và vùng ẩm; sự gia tăng đột ngột của áp suất hơi nước, đặc biệt tại ranh giới giữa vùng hơi và vùng ẩm, tạo ra ứng suất kéo nội bộ lớn, từ đó thúc đẩy hiện tượng bong tróc nổ. Hai cơ chế này được minh họa rõ trong các sơ đồ cơ chế do Ozawa và cộng sự đề xuất [11].



**Hình 2.** Cơ chế gây hư hại do hỏa hoạn trong các cấu trúc bê tông cốt thép (M. Ozawa, 2012 [11]).

Hình 2 minh họa hai cơ chế chính gây hư hỏng bê tông khi cháy. Hình 3a thể hiện cơ chế nhiệt–cơ học, trong đó gradient nhiệt tạo ra chênh lệch giãn nở giữa bề mặt và lõi, sinh ứng suất kéo vuông góc bề mặt và dẫn đến nứt, bong tróc. Hình 3b mô tả cơ chế ẩm–nhiệt, khi hơi ẩm trong bê tông tái phân bố thành vùng khô, vùng hơi và vùng ẩm; áp suất hơi tăng mạnh tại ranh giới các vùng này, gây ứng suất kéo nội bộ và thúc đẩy bong tróc nổ. Hai cơ chế này thường tương tác đồng thời trong cấu kiện sau hỏa hoạn. Kết quả thí nghiệm của Ozawa và cộng sự cũng cho thấy rằng trong các mẫu bê tông cường độ cao, hiện tượng bong tróc xảy ra khi áp suất hơi nước bên trong các lỗ rỗng đạt khoảng 3,2 MPa (mẫu ướt) và khoảng 3,5 MPa (mẫu khô trong không khí). Độ sâu bong tróc tối đa quan sát được lần lượt là khoảng 15 mm (mẫu ướt) và 12 mm (mẫu khô trong không khí). Những kết quả này khẳng định rằng hàm lượng ẩm ban đầu của bê tông đóng vai trò quan trọng trong cơ chế hư hại do hỏa hoạn.

Cần nhấn mạnh rằng các biến đổi vật lý và hóa học nêu trên không chỉ phụ thuộc vào mức nhiệt độ tức thời, mà còn chịu chi phối bởi toàn bộ lịch sử nhiệt của cấu kiện, bao gồm nhiệt độ cực đại, thời gian chịu lửa, tốc độ gia nhiệt và điều kiện trao đổi ẩm trong quá trình cháy. Nói cách khác, cùng một dạng biến đổi vi cấu trúc nhưng các kịch bản cháy khác nhau có thể dẫn đến mức độ suy giảm cơ tính rất khác nhau. Vì vậy, việc xác định nhiệt độ cháy và phân bố nhiệt trong cấu kiện có ý nghĩa nền tảng trong diễn giải cơ chế hư hại của bê tông sau hỏa hoạn. Quan điểm này cũng được Wang Yuan nhấn mạnh, khi xem nghiên cứu quá trình phát triển nhiệt độ cháy, trường nhiệt bên trong cấu kiện và các tham số kỹ thuật sau cháy là cơ sở cho đánh giá tổn thương, khả năng chịu lực còn lại và lựa chọn giải pháp phục hồi kết cấu [12].

Như vậy, dưới tác động của hỏa hoạn, bê tông đồng thời chịu ảnh hưởng của các quá trình như bay hơi ẩm, dịch chuyển ẩm, phân hủy hydrat, giãn nở nhiệt không đồng đều, hình thành vi nứt trong vùng ITZ và bong tróc bề mặt. Hiểu rõ các cơ chế vật lý và hóa học này, đồng thời đặt chúng trong bối cảnh của lịch sử nhiệt thực tế của cấu kiện, là cơ sở khoa học quan trọng để lựa chọn các phương pháp đánh giá và giải pháp sửa chữa phù hợp đối với kết cấu bê tông cốt thép sau hỏa hoạn.

## 2.2. Suy giảm tính chất cơ học của bê tông

Những biến đổi vật lý và hóa học trình bày ở mục 2.1 tất yếu dẫn đến sự suy giảm đáng kể các tính chất cơ học của bê tông sau hỏa hoạn. Các tổng quan gần đây thống nhất rằng cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi và quan hệ ứng suất–biến dạng của bê tông đều thay đổi theo nhiệt độ; đồng thời mức độ suy giảm còn phụ thuộc vào loại cốt liệu, tỷ lệ nước/chất kết dính, độ ẩm ban đầu, phụ gia khoáng, sợi gia cường, chế độ gia nhiệt và phương pháp thí nghiệm [13].

Trong các chỉ tiêu cơ học, cường độ chịu nén là đại lượng được sử dụng phổ biến nhất để đánh giá mức độ suy giảm của bê tông sau cháy. Tuy nhiên, sự suy giảm này thường không diễn ra tuyến tính theo nhiệt độ. Chan, Peng và Anson cho thấy sau khi chịu nhiệt độ cao đến 1200 °C, cả bê tông thường và bê tông cường độ cao đều suy giảm cường độ đáng kể, trong đó khoảng 400–800 °C là vùng nhiệt độ tối hạn đối với mất cường độ; đồng thời cấu trúc lỗ rỗng của cả hai loại bê tông đều bị thô hóa [14]. Kết quả này phù hợp với nhận định tổng quan của Ma và cộng sự rằng tổn thương vi cấu trúc ở cấp vi mô và trung mô là nguyên nhân nền tảng dẫn đến suy giảm cơ tính tổng thể của bê tông ở nhiệt độ cao [15].

Đối với bê tông cường độ cao (HSC), mức độ suy giảm cơ tính sau cháy không nhất thiết nhỏ hơn bê tông thường. Chan và cộng sự cho thấy HSC mất cơ tính theo cách tương tự NSC, dù có xu hướng bị suy giảm mạnh hơn về khía cạnh liên quan đến độ thấm và độ bền lâu [14]. Li, Qian và Sun cũng chỉ ra rằng cơ tính còn lại của HSC sau cháy chịu ảnh hưởng mạnh bởi nhiệt độ, độ ẩm, kích thước mẫu, cấp độ bền và phân bố nhiệt độ, đồng thời nhấn mạnh rằng HSC dễ gặp bất lợi hơn do độ thấm thấp và tính giòn cao, nên dễ xảy ra bong tróc nổ hơn so với NSC [16].

So với cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi thường suy giảm sớm hơn và mạnh hơn, vì chỉ tiêu này nhạy cảm trực tiếp với sự phát triển

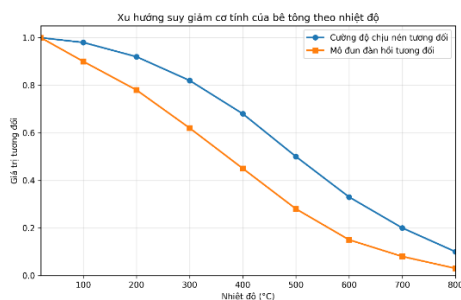
của vi nứt và mức độ mất liên tục trong cấu trúc vật liệu. Tổng quan của Babalola và cộng sự nhấn mạnh rằng mô đun đàn hồi là một trong những đại lượng bị ảnh hưởng nghiêm trọng nhất sau khi bê tông chịu nhiệt độ cao, đồng thời chỉ ra rằng các nghiên cứu hiện có đã xem xét rộng rãi cường độ nén dư, cường độ kéo dư, mô đun đàn hồi và ứng xử ứng suất–biến dạng sau cháy [13]. Điều này có ý nghĩa rất lớn đối với kết cấu, bởi trong nhiều trường hợp sau cháy, bê tông vẫn còn duy trì một phần cường độ nén, nhưng độ cứng của cấu kiện đã giảm mạnh, kéo theo gia tăng độ võng, chuyển vị và nguy cơ mất khả năng làm việc bình thường.

Bên cạnh đó, cường độ chịu kéo của bê tông sau cháy cũng suy giảm rõ rệt và thường nhạy với nhiệt độ hơn so với cường độ chịu nén. Li và cộng sự cho thấy đối với HSC, không chỉ cường độ chịu nén mà cả cường độ kéo chệch và cường độ uốn đều suy giảm sau gia nhiệt, phản ánh vai trò chi phối của hệ vi nứt và tổn thương tại vùng ITZ đối với khả năng kháng nứt của vật liệu [16]. Đây là điểm đặc biệt quan trọng đối với các cấu kiện chịu uốn như dầm và bản sàn, nơi sự suy giảm khả năng chịu kéo có thể làm nứt phát triển nhanh hơn và dẫn đến thay đổi cơ chế làm việc của tiết diện.

Một đặc điểm rất quan trọng là sự suy giảm tính chất cơ học của bê tông sau hỏa hoạn không đồng đều theo chiều sâu tiết diện. Tổng quan của Wróblewska và Kowalski nhấn mạnh rằng sau cháy, bê tông trở thành vật liệu không đồng nhất, do đó việc xem cường độ còn lại như một giá trị trung bình duy nhất cho toàn tiết diện là không đầy đủ [2]. Kết quả của Chan và cộng sự về sự thô hóa cấu trúc lỗ rỗng ở cả NSC và HSC sau nhiệt độ cao cũng củng cố nhận định rằng lớp bê tông gần bề mặt chịu lửa thường bị hư hại nghiêm trọng hơn nhiều so với phần lõi bên trong [14]. Vì vậy, trong đánh giá sau cháy, thông số cần được ưu tiên không chỉ là cường độ còn lại trung bình mà còn là chiều sâu lớp bê tông bị suy giảm cơ học.

**Bảng 1.** Xu hướng suy giảm các tính chất cơ học của bê tông sau hỏa hoạn.

| Chỉ tiêu cơ học        | Xu hướng suy giảm                        | Ý nghĩa đối với kết cấu             |
|------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Cường độ chịu nén      | Giảm theo nhiệt độ và thời gian chịu lửa | Giảm sức chịu tải còn lại           |
| Mô đun đàn hồi         | Giảm sớm và thường mạnh hơn cường độ nén | Giảm độ cứng, tăng chuyển vị        |
| Cường độ chịu kéo      | Rất nhạy với vi nứt và nhiệt độ cao      | Tăng nguy cơ nứt, bong tróc         |
| Cơ tính theo chiều sâu | Không đồng đều giữa lớp ngoài và lõi     | Làm phức tạp việc đánh giá sau cháy |



**Hình 3.** Xu hướng suy giảm cường độ nén tương đối và mô đun đàn hồi của bê tông theo nhiệt độ.

## 2.3. Ảnh hưởng đến cốt thép và liên kết bê tông – cốt thép

Bên cạnh sự suy giảm cơ tính của bê tông, hỏa hoạn còn gây ảnh hưởng đáng kể đến cốt thép và khả năng làm việc đồng thời giữa bê tông với cốt thép trong kết cấu BTCT. Trên thực tế, khả năng chịu lực của cấu kiện BTCT không chỉ phụ thuộc vào cường độ riêng lẻ của bê tông hoặc cốt thép, mà còn phụ thuộc rất lớn vào cơ chế bám dính và truyền lực tại vùng tiếp xúc giữa hai vật liệu. Vì vậy, đánh giá kết cấu sau cháy cần xem xét đồng thời cả sự suy giảm cơ tính của cốt thép lẫn sự suy yếu của liên kết bê tông–cốt thép. Wang Yuan cũng coi sự thay

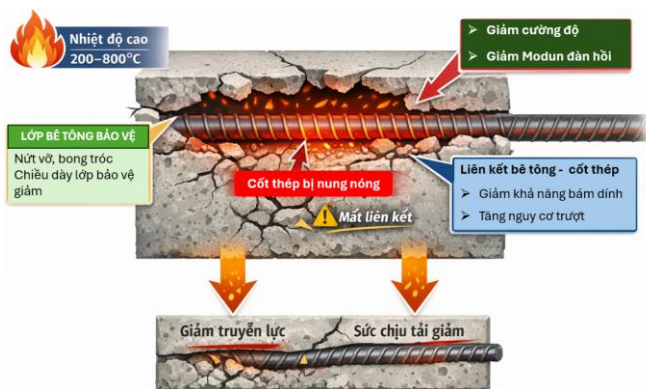


đổi cơ tính của cốt thép và tổn thất bám dính là những tham số quan trọng trong đánh giá khả năng chịu lực còn lại của cấu kiện sau hỏa hoạn [12].

Ở nhiệt độ cao, cường độ chảy và mô đun đàn hồi của cốt thép giảm dần theo nhiệt độ. Khi nhiệt độ tăng, thép trở nên mềm hơn, độ cứng giảm và khả năng chống biến dạng suy yếu rõ rệt. Điều này dẫn đến việc cấu kiện BTCT không chỉ bị giảm sức chịu tải mà còn tăng nguy cơ biến dạng lớn, mất ổn định cục bộ và thay đổi cơ chế làm việc của tiết diện. Trong nghiên cứu trong nước về sàn BTCT chịu lửa theo EN 1992-1-2, các tác giả cũng nhấn mạnh rằng khi nhiệt độ tăng cao, cả cường độ và mô đun đàn hồi của bê tông và cốt thép đều suy giảm; đồng thời các hệ số suy giảm cường độ của bê tông và cốt thép theo nhiệt độ đã được chỉ ra rõ thông qua các đồ thị ứng suất–biến dạng và hệ số suy giảm cường độ ở nhiệt độ cao [17].

Tuy nhiên, ảnh hưởng của hỏa hoạn lên cốt thép không chỉ dừng ở bản thân vật liệu thép, mà còn gắn chặt với lớp bê tông bảo vệ. Khi bê tông bị nứt sâu, bong tróc hoặc mất lớp bảo vệ, cốt thép sẽ bị đặt trong môi trường nhiệt độ cao hơn nhiều so với trường hợp lớp bảo vệ còn nguyên vẹn. Điều này làm gia tăng tốc độ suy giảm cơ tính của thép, đồng thời làm tăng nguy cơ mất neo, trượt cốt thép hoặc giảm khả năng làm việc tổng thể của cấu kiện. Kết quả thực nghiệm của Ozawa và cộng sự cho thấy chiều sâu bong tróc có thể đạt khoảng 12–15 mm, qua đó làm giảm đáng kể hiệu quả che chắn nhiệt của lớp bê tông bảo vệ [11].

Một nội dung đặc biệt quan trọng trong kết cấu BTCT sau cháy là sự suy giảm liên kết bê tông–cốt thép. Trong điều kiện làm việc bình thường, khả năng bám dính bảo đảm cho việc truyền lực hiệu quả giữa bê tông và cốt thép, giúp hai vật liệu cùng tham gia chịu lực. Tuy nhiên, dưới tác động của nhiệt độ cao, cơ chế bám dính bị suy yếu do nhiều nguyên nhân đồng thời: bê tông nứt và giãn nở không đồng đều, vùng tiếp xúc bị tổn thương, thép bị giãn nở nhiệt, và lớp bê tông bảo vệ bị bong tróc. Kết quả là lực dính bám giữa hai vật liệu giảm xuống, làm giảm khả năng truyền lực và tăng nguy cơ trượt cốt thép trong cấu kiện. Wang Yuan dành riêng nội dung để xem xét sự mất bám dính giữa bê tông và cốt thép sau hỏa hoạn, qua đó cho thấy đây là thành phần không thể bỏ qua khi đánh giá sức chịu tải còn lại của cấu kiện BTCT.



**Hình 4.** Ảnh hưởng của hỏa hoạn đến lớp bê tông bảo vệ, cốt thép và liên kết bê tông–cốt thép trong cấu kiện bê tông cốt thép.

Hình 4 cho thấy ảnh hưởng của hỏa hoạn lên cấu kiện bê tông cốt thép diễn ra theo một chuỗi cơ chế liên hoàn. Trước hết, lớp bê tông bảo vệ ở vùng tiếp xúc trực tiếp với lửa bị nứt, bong tróc và suy giảm chiều dày hữu hiệu. Khi lớp bảo vệ không còn đảm bảo chức năng cách nhiệt, nhiệt độ truyền vào cốt thép tăng lên, kéo theo sự suy giảm cường độ và mô đun đàn hồi của thép. Đồng thời, vùng tiếp xúc giữa bê tông và cốt thép bị tổn thương do nứt, giãn nở nhiệt không đồng đều và mất liên tục vật liệu, làm giảm khả năng bám dính và truyền lực giữa hai thành phần.

Ở cấp độ tiết diện và cấu kiện, ảnh hưởng tổng hợp của sự suy giảm cơ tính bê tông, cốt thép và phân bố nhiệt không đồng đều có thể được phản ánh rõ thông qua biểu đồ tương tác lực dọc – mô men của cột BTCT trong điều kiện cháy. Một nghiên cứu trong nước gần đây đã phát triển cách xác định trường nhiệt độ trên tiết diện cột BTCT chữ nhật và tiến hành phân tích tiết diện theo mô hình biến dạng phi tuyến của EN 1992-1-2. Kết quả cho thấy các biểu đồ tương tác tại các thời điểm 30, 60, 90, 120, 180 và 240 phút của đám cháy tiêu chuẩn đều thu hẹp dần theo thời gian, qua đó phản ánh rõ sự suy giảm khả năng chịu lực của tiết diện cột BTCT khi cháy. Điều này cho thấy ảnh hưởng của hỏa hoạn không chỉ dừng ở sự suy giảm riêng lẻ của bê tông hoặc cốt thép, mà còn làm giảm toàn bộ miền làm việc chịu lực của tiết diện cấu kiện [18].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu gần đây về cấu kiện bê tông cốt thép trong điều kiện cháy đã bước đầu làm rõ sự suy giảm sức kháng của sàn, dầm và cột BTCT thông qua phân tích trường nhiệt độ tiết diện, quan hệ ứng suất–biến dạng của bê tông và cốt thép ở nhiệt độ cao, cũng như các phương pháp tính khả năng chịu lửa theo tiêu chuẩn nước ngoài. Bài của Nguyễn Tuấn Trung và cộng sự cho thấy khả năng chịu lực khi cháy của sàn BTCT phụ thuộc rõ vào chiều dày lớp bê tông bảo vệ, hàm lượng cốt thép và thời gian cháy; đồng thời nhấn mạnh cường độ và mô đun đàn hồi của cả bê tông và cốt thép đều suy giảm khi nhiệt độ tăng [17]. Bài của Đặng Việt Hưng và cộng sự tiếp tục cho thấy trong dầm BTCT chịu cháy, sự suy giảm cơ tính của bê tông và cốt thép làm giảm dần khả năng chịu lực trên tiết diện thẳng góc và tiết diện nghiêng, trong đó nhiệt độ tại vị trí cốt thép và chiều dày lớp bê tông bị suy giảm là những tham số then chốt [19].

Từ góc độ nghiên cứu trong nước, có thể nhận thấy rằng các công bố hiện nay đã bước đầu làm rõ ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến cơ tính của bê tông và cốt thép, cũng như sự suy giảm khả năng chịu lực của tiết diện và cấu kiện BTCT trong điều kiện cháy. Tuy nhiên, các nghiên cứu đi sâu riêng về cơ chế suy giảm liên kết bê tông–cốt thép sau hỏa hoạn vẫn còn tương đối hạn chế. Phần lớn các công trình mới dừng ở việc suy luận gián tiếp vai trò của liên kết thông qua khả năng chịu lực tổng thể, thay vì tách liên kết thành một đối tượng nghiên cứu độc lập. Đây là khoảng trống quan trọng cần tiếp tục được làm rõ trong các nghiên cứu tiếp theo, đặc biệt trong bối cảnh đánh giá và phục hồi kết cấu BTCT sau hỏa hoạn tại Việt Nam.

Như vậy, hỏa hoạn ảnh hưởng đến kết cấu BTCT không chỉ thông qua sự suy giảm cơ tính của bê tông và cốt thép, mà còn thông qua sự suy yếu của cơ chế truyền lực giữa hai vật liệu. Vì vậy, đánh giá sau

cháy cần được thực hiện theo hướng tổng hợp, xem xét đồng thời cả vật liệu bê tông, cốt thép, lớp bê tông bảo vệ và liên kết giữa chúng, thay vì phân tích từng thành phần một cách tách rời.

Từ góc độ kết cấu, hệ quả quan trọng nhất không chỉ là bê tông và thép cùng suy yếu, mà còn là cơ chế làm việc đồng thời giữa chúng bị phá vỡ. Khi liên kết bê tông–cốt thép giảm, ứng suất trong cốt thép không còn được huy động đúng như giả thiết thiết kế, từ đó làm giảm sức chịu tải còn lại, tăng biến dạng và gia tăng nguy cơ trượt cốt thép hoặc mất neo. Sơ đồ này vì vậy nhấn mạnh rằng đánh giá kết cấu BTCT sau hỏa hoạn phải được thực hiện theo hướng tổng hợp, xem xét đồng thời lớp bê tông bảo vệ, trạng thái cốt thép và mức độ suy yếu liên kết giữa hai vật liệu. Điều này phù hợp với các phân tích về bong tróc do hỏa hoạn của Ozawa và cộng sự [11] và quan điểm đánh giá tổng hợp của Wang Yuan [12].

#### 2.4. Hiện tượng bong tróc (spalling)

Bong tróc bê tông khi cháy là một trong những dạng hư hỏng nguy hiểm nhất của kết cấu bê tông cốt thép, vì nó làm mất lớp bê tông bảo vệ, giảm tiết diện chịu lực và làm cốt thép tiếp xúc trực tiếp với nhiệt độ cao, từ đó đẩy nhanh sự suy giảm khả năng chịu lực của cấu kiện (Nguyễn Phi Long & Nguyễn Trúc Lin Na, 2025 [20]; Amran và cộng sự, 2022 [21]). Nghiên cứu tổng quan gần đây cho thấy hiện tượng này đặc biệt nghiêm trọng đối với bê tông cường độ cao do vật liệu có cấu trúc đặc chắc, độ thấm thấp và khả năng thoát hơi ẩm kém.

Về cơ chế, spalling chủ yếu xuất phát từ sự kết hợp giữa áp suất hơi nước trong lỗ rỗng và ứng suất nhiệt do chênh lệch nhiệt độ giữa lớp ngoài và phần lõi bê tông. Khi các ứng suất này vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông, bề mặt bê tông sẽ bị nứt, tách lớp hoặc bong bật cục bộ; trong trường hợp nghiêm trọng có thể xảy ra bong tróc nổ (explosive spalling) [21]. Theo Nguyễn Phi Long và Nguyễn Trúc Lin Na (2025) [20], nguy cơ bong tróc tăng lên khi bê tông có độ ẩm ban đầu cao, bị gia nhiệt nhanh và có tính thấm thấp.

Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng HSC và đặc biệt là UHPC có nguy cơ bong tróc cao hơn bê tông thường. Amran và cộng sự cho rằng UHPC tuy có cường độ rất cao nhưng lại nhạy cảm hơn với cháy do vì cấu trúc rất đặc sít, làm áp suất hơi tích tụ nhanh trong quá trình gia nhiệt. Vì vậy, vật liệu có cường độ càng cao chưa chắc càng an toàn hơn trong điều kiện hỏa hoạn nếu không kiểm soát tốt hiện tượng bong tróc [21].

Một hướng hạn chế bong tróc hiệu quả là bổ sung sợi polypropylene (PP) vào cấp phối bê tông. Chen và Liu (2004) [22] cho thấy bê tông cường độ cao có sử dụng sợi, đặc biệt là sợi PP hoặc sợi lai, có khả năng hạn chế bong tróc tốt hơn rõ rệt so với HSC thông thường sau khi chịu nhiệt cao. Điều này được giải thích do sợi PP nóng chảy ở nhiệt độ tương đối thấp, tạo ra các vi kênh giúp hơi nước thoát ra ngoài, từ đó làm giảm áp suất trong lỗ rỗng và giảm nguy cơ bong tróc.

Như vậy, spalling là hiện tượng cần được đặc biệt lưu ý trong đánh giá bê tông sau cháy, vì nó vừa phản ánh mức độ tổn thương nhiệt của vật liệu, vừa ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng bảo vệ cốt thép và

sức chịu lực còn lại của cấu kiện. Trong thực tế, việc đánh giá sau cháy cần quan tâm đến mức độ bong tróc bề mặt, chiều sâu lớp bê tông bị tách, tình trạng lộ cốt thép và loại bê tông sử dụng trong công trình, đặc biệt đối với HSC và UHPC.

#### 2.5. Tính không đồng nhất của vật liệu sau cháy

Dưới tác động của hỏa hoạn, bê tông cốt thép hư hỏng chủ yếu do tương tác nhiệt – ẩm – cơ học. Nhiệt độ cao làm nước trong bê tông bay hơi, tăng áp suất trong hệ lỗ rỗng, đồng thời tạo chênh lệch nhiệt độ giữa lớp ngoài và lõi cấu kiện, từ đó phát sinh ứng suất nhiệt và vết nứt trong bê tông. Mức độ hư hỏng phụ thuộc mạnh vào cường độ đám cháy, tốc độ gia nhiệt và tính chất bê tông, đặc biệt là khả năng thấm và thoát ẩm của vật liệu (Pulkit và cộng sự, 2025 [23]; Ibrahim và cộng sự, 2025 [10]).

Khi nhiệt độ tiếp tục tăng, bê tông bị suy giảm cường độ và độ cứng, còn lực bám dính giữa bê tông và cốt thép cũng giảm dần do vết nứt nhiệt, suy yếu bê tông bao quanh thanh thép và chênh lệch giãn nở nhiệt giữa hai vật liệu. Thí nghiệm gần đây cho thấy ở vùng nhiệt độ thấp ảnh hưởng đến bám dính có thể chưa lớn, nhưng khi nhiệt độ tăng cao hơn thì cường độ bám dính giảm rõ rệt và cơ chế phá hoại chuyển dần sang dạng giòn hơn. Đây là một mất xích quan trọng làm cấu kiện BTCT mất khả năng làm việc đồng thời giữa bê tông và cốt thép sau cháy (Andrade và cộng sự, 2024 [24]; Banoth và cộng sự, 2024 [25]).

Với các loại bê tông đặc chắc, nhiệt và áp suất hơi còn có thể gây bong tróc bề mặt hoặc bong tróc nổ, làm mất lớp bê tông bảo vệ và khiến cốt thép bị nung nóng trực tiếp. Vì vậy, hư hỏng của BTCT trong cháy không chỉ là suy giảm riêng rẽ của bê tông hay cốt thép, mà là sự suy giảm đồng thời của bê tông, cốt thép và vùng liên kết giữa chúng, dẫn đến giảm nhanh khả năng chịu lực của cấu kiện và kết cấu sau hỏa hoạn (Ibrahim và cộng sự, 2025 [10]; Alaskar và cộng sự, 2025 [26]).

### 3. Phương pháp đánh giá kết cấu sau hỏa hoạn (Assessment methods)

#### 3.1. Mục tiêu đánh giá sau cháy

Đánh giá kết cấu sau hỏa hoạn nhằm xác định mức độ hư hỏng thực tế của vật liệu và cấu kiện, bao gồm bê tông, cốt thép và vùng liên kết giữa chúng. Trên cơ sở đó, quá trình đánh giá cho phép xác định khả năng chịu lực còn lại của kết cấu sau khi chịu tác động của nhiệt độ cao, đồng thời nhận diện các nguy cơ mất an toàn có thể tiếp tục phát sinh trong giai đoạn khai thác sau cháy.

Ngoài ra, đánh giá sau cháy còn là cơ sở kỹ thuật quan trọng để lựa chọn phương án xử lý phù hợp, như tiếp tục sử dụng, sửa chữa, gia cường hoặc tháo dỡ thay thế công trình. Vì vậy, mục tiêu của công tác này không chỉ dừng ở việc nhận diện hư hỏng mà còn hướng tới hỗ trợ ra quyết định kỹ thuật và quản lý an toàn công trình một cách khoa học và hiệu quả.

### 3.2. Các phương pháp đánh giá kết cấu sau hỏa hoạn trên thế giới

Trên thế giới, đánh giá kết cấu sau hỏa hoạn thường được thực hiện theo hướng kết hợp nhiều phương pháp để nâng cao độ tin cậy của kết luận kỹ thuật. Các nghiên cứu cho thấy quá trình này thường bắt đầu bằng khảo sát trực quan hiện trường nhằm nhận diện nứt, bong tróc, đổi màu bê tông, lộ cốt thép và biến dạng dư; sau đó kết hợp các phương pháp không phá hủy như súng bật nảy, siêu âm xung, radar xuyên đất hoặc các kỹ thuật chẩn đoán hiện trường khác; cuối cùng sử dụng các phương pháp bán phá hủy hoặc phá hủy cục bộ như khoan lõi và thí nghiệm nén mẫu lõi để xác định đáng tin cậy hơn cường độ còn lại của bê tông sau cháy [27]–[30].

Bên cạnh đó, một số nghiên cứu còn phát triển phương pháp đánh giá nhanh cường độ dư dựa trên mối tương quan giữa kết quả thí nghiệm không phá hủy và mức suy giảm sức kháng của cấu kiện sau cháy. Hướng tiếp cận này đặc biệt hữu ích trong giai đoạn kiểm định ban đầu hoặc khi cần đánh giá nhanh trên diện rộng, nhưng vẫn cần được kiểm chứng bằng các phép thử trực tiếp tại những vị trí nghi ngờ hư hỏng nặng (Alcaíno và cộng sự, 2020 [31]).

Liên hệ với điều kiện Việt Nam, các nhóm phương pháp nêu trên có thể đối chiếu với hệ thống tiêu chuẩn hiện hành như TCVN 9343:2012 về Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén bằng súng bật nảy (năm 2012), TCVN 12252:2020 cho khoan lõi và xác định cường độ bê tông, cùng với TCVN 9356:2012, TCVN 13536:2022 và TCVN 13537:2024 cho các phương pháp điện từ và siêu âm. Vì vậy, bảng đối chiếu “phương pháp quốc tế – tiêu chuẩn Việt Nam tương ứng” là cơ sở phù hợp để chuyển hóa các phương pháp đánh giá trên thế giới thành cách tiếp cận có thể áp dụng trong thực tiễn Việt Nam. Trên cơ sở các nhóm phương pháp đánh giá nêu trên và hệ thống tiêu chuẩn hiện hành có thể áp dụng ở Việt Nam, quá trình đánh giá kết cấu sau cháy cần được tổ chức theo một trình tự hợp lý, từ khảo sát sơ bộ hiện trường, lựa chọn phương pháp kiểm tra phù hợp, đến phân tích khả năng chịu lực còn lại và đề xuất giải pháp xử lý. Quy trình này sẽ được trình bày trong mục tiếp theo.

### 3.3. Quy trình đánh giá sau cháy

Quy trình đánh giá kết cấu sau cháy thường được thực hiện theo trình tự từ khảo sát hiện trường, xác định mức độ hư hỏng, lựa chọn phương pháp kiểm tra phù hợp, đến phân tích khả năng chịu lực còn lại của cấu kiện và kết cấu. Ở bước đầu, cần kiểm tra sơ bộ mức độ an toàn của công trình, nhận diện các dấu hiệu hư hỏng như nứt, bong tróc, lộ cốt thép, đổi màu bê tông và biến dạng dư để phân vùng khu vực bị ảnh hưởng nhiệt.

Sau đó, tùy theo mức độ hư hỏng quan sát được, tiến hành kết hợp các phương pháp đánh giá thích hợp như thí nghiệm không phá hủy, khoan lõi, kiểm tra cốt thép hoặc các phân tích chuyên sâu khác nhằm xác định mức suy giảm tính chất vật liệu và khả năng làm việc còn lại của cấu kiện. Trên cơ sở kết quả kiểm tra, cần đánh giá lại khả năng chịu lực của kết cấu để đưa ra quyết định kỹ thuật phù hợp, bao

gồm tiếp tục sử dụng, sửa chữa cục bộ, gia cường hoặc tháo dỡ thay thế công trình. Quy trình này bảo đảm việc đánh giá sau cháy được thực hiện một cách hệ thống, khách quan và có cơ sở kỹ thuật.

### 3.4. Định hướng phục hồi kết cấu sau hỏa hoạn

Sau khi đánh giá mức độ hư hỏng và khả năng chịu lực còn lại, cần lựa chọn phương án xử lý phù hợp cho kết cấu bê tông cốt thép sau hỏa hoạn. Tùy theo mức độ ảnh hưởng của nhiệt đến bê tông, cốt thép và liên kết giữa chúng, công trình có thể được tiếp tục sử dụng, sửa chữa cục bộ, gia cường hoặc tháo dỡ thay thế.

Đối với các hư hỏng bề mặt như bong tróc lớp bê tông bảo vệ, nứt cục bộ hoặc suy giảm nhẹ lớp ngoài, giải pháp thường áp dụng là loại bỏ phần bê tông hư hỏng, làm sạch cốt thép, xử lý chống gỉ và sửa chữa bằng vữa hoặc bê tông chuyên dụng. Trong trường hợp cấu kiện bị suy giảm đáng kể khả năng chịu lực, có thể áp dụng các biện pháp gia cường như bọc bê tông cốt thép, bọc thép hoặc sử dụng vật liệu composite FRP nhằm phục hồi hoặc nâng cao khả năng làm việc của cấu kiện.

Việc lựa chọn giải pháp phục hồi cần dựa trên kết quả đánh giá sau cháy, bao gồm mức độ suy giảm cơ tính của vật liệu, chiều sâu vùng bê tông hư hỏng, tình trạng cốt thép và yêu cầu khai thác của công trình. Do đó, đánh giá và phục hồi là hai bước có quan hệ chặt chẽ, trong đó độ chính xác của công tác đánh giá quyết định hiệu quả và độ tin cậy của phương án xử lý kết cấu sau hỏa hoạn.

## 4. Kết luận

Bài báo đã tổng quan các cơ chế hư hỏng, phương pháp đánh giá và định hướng phục hồi kết cấu bê tông cốt thép sau hỏa hoạn. Kết quả tổng hợp cho thấy, dưới tác động của nhiệt độ cao, bê tông xảy ra đồng thời các biến đổi vật lý, hóa học và cơ học như bay hơi nước, phân hủy các sản phẩm thủy hóa, hình thành vi nứt, suy giảm cường độ, mô đun đàn hồi và khả năng bám dính với cốt thép. Đặc biệt, hiện tượng bong tróc bê tông và sự không đồng nhất của mức độ hư hỏng theo chiều sâu tiết diện là những yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu lực còn lại của cấu kiện.

Các phương pháp đánh giá sau cháy cần được thực hiện theo hướng kết hợp giữa khảo sát trực quan, thí nghiệm không phá hủy, khoan lõi, thí nghiệm trong phòng và phân tích kết cấu. Việc đối chiếu các phương pháp quốc tế với hệ thống tiêu chuẩn Việt Nam cho thấy có thể xây dựng một quy trình đánh giá phù hợp với điều kiện thực tiễn trong nước. Tuy nhiên, công tác đánh giá và phục hồi kết cấu sau hỏa hoạn tại Việt Nam vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu, đặc biệt về xác định chiều sâu vùng bê tông hư hỏng, đánh giá liên kết bê tông – cốt thép và ứng dụng công nghệ số, trí tuệ nhân tạo trong chẩn đoán hư hỏng. Đây là cơ sở quan trọng để nâng cao độ tin cậy trong quyết định sửa chữa, gia cường hoặc thay thế kết cấu sau cháy.

## Tài liệu tham khảo

- [1]. Z. Lu, J. Liao, and J. Yu, "Study and Discussion on Inspection of Fire-damaged Concrete Structures," *J. Disaster Prev. Mitig. Eng.*, vol. 32, no. 5, pp. 6–9, 2012.
- [2]. J. Wróblewska and R. Kowalski, "Assessing concrete strength in fire-damaged structures," vol. 254, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119122.
- [3]. H. A. G. Nguyễn Cao Dương, "Khảo sát đánh giá hư hỏng các bộ phận kết cấu nhà bê tông cốt thép chịu tác động của lửa."
- [4]. M. A. Momin, K. S. Ahmed, T. Mustafy, and M. J. Islam, "Damage assessment and test results of construction materials of a fire-damaged RC building," *Results Eng.*, vol. 24, p. 102986, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102986>.
- [5]. C. Liu, L. Tian, P. Wang, X. Wang, and J. Miao, "Automatic damage detection and evaluation of post-fire reinforced concrete structures using deep learning," *Autom. Constr.*, vol. 177, p. 106376, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106376>.
- [6]. P. Wang, C. Liu, X. Wang, L. Tian, J. Miao, and Y. Liu, "Multicategory fire damage detection of post-fire reinforced concrete structural components," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 40, no. 1, pp. 91–112, 2025, doi: <https://doi.org/10.1111/mice.13314>.
- [7]. K. Miao, Z. Pan, X. Fang, and A. Chen, "Fire-induced damage behaviour in corrosion-damaged concrete: Thermal-mechanical coupling phase field meso-scale modeling," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 196, p. 106041, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2025.106041>.
- [8]. W. Mukupa, G. W. Roberts, C. M. Hancock, and K. Al-manasir, "Change Detection and Assessment of Fire-Damaged Concrete Using Terrestrial Laser Scanning," 2016.
- [9]. Chaoqun Liang, "Phát hiện và đánh giá thiệt hại do hỏa hoạn đối với các kết cấu khung bê tông cốt thép và các nghiên cứu trường hợp kỹ thuật," *Sichuan Build. Mater.*, vol. 44, no. 6, pp. 3–4, 2018.
- [10]. E. A. Ibrahim, D. Goff, and A. Keyvanfar, "Assessing Post-Fire Damage in Concrete Structures: A Comprehensive Review," 2025.
- [11]. M. Ozawa, S. Uchida, T. Kamada, and H. Morimoto, "Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission," *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 621–628, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070>.
- [12]. W. Yuan, "Study on Evaluation and Repair of Fire-Damaged concrete structure quality," *China Northeastern Univeristy*, 2006.
- [13]. O. E. Babalola, P. O. Awoyera, D.-H. Le, and L. M. Bendezi Romero, "A review of residual strength properties of normal and high strength concrete exposed to elevated temperatures: Impact of materials modification on behaviour of concrete composite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 296, p. 123448, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123448>.
- [14]. Y. N. Chan, G. F. Peng, and M. Anson, "Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, no. 1, pp. 23–27, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00034-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00034-1).
- [15]. 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, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>.
- [16]. M. Li, C. Qian, and W. Sun, "Mechanical properties of high-strength concrete after fire," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 6, pp. 1001–1005, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.007>.
- [17]. P. M. P. Nguyễn Tuấn Trung, Dương Văn Hai, "BẢNG CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐƠN GIẢN THEO TIÊU CHUẨN EN 1992-1-2," *Tap chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, vol. 13, pp. 41–52, 2019.
- [18]. N. T. N. Nguyễn Trường Thắng, Trần Việt Tâm, "Biểu đồ tương tác khi cháy của cột bê tông cốt thép tiết diện chữ nhật theo EN 1992-1-2," *Tap chí Xây dựng*, 2025.
- [19]. Đặng Việt Hưng; Bùi Lê Quân; Bùi Thanh Tùng; Nguyễn Trường Thắng, "Tính toán giới hạn chịu lửa của dầm bê tông cốt thép tiết diện chữ nhật theo tiêu chuẩn thiết kế s.p 468.1325800.2019," *Tap chí Khoa học công nghệ xây dựng*, vol. 16, pp. 57–73, 2022.
- [20]. N. T. N. N. Nguyễn Phi Long, "Tiến bộ trong nghiên cứu an toàn cháy cho kết cấu bê tông và thép tại Việt Nam và quốc tế," *Tap chí Xây dựng*, 2025.
- [21]. M. Amran, S.-S. Huang, A. M. Onaizi, G. Murali, and H. S. Abdelgader, "Fire spalling behavior of high-strength concrete: A critical review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 341, p. 127902, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127902>.
- [22]. B. Chen and J. Liu, "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 6, pp. 1065–1069, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.010>.
- [23]. U. Pulkit, S. Das Adhikary, and V. Kodur, "Influence of fire severity and concrete properties on the thermo-hygral behavior of concrete during fire exposure," *Struct. Concr.*, vol. 26, no. 2, pp. 1560–1577, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/suco.202400067>.
- [24]. M. S. Andrade, J. C. L. Ribeiro, D. S. de Oliveira, L. G. Pedroti, and C. F. R. Santos, "Experimental evaluation of concrete-reinforcement bond: Bond failure mechanisms after exposure to elevated temperatures," *Eng. Struct.*, vol. 311, p. 118148, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118148>.
- [25]. I. Banath and A. Agarwal, "Bond between deformed steel rebars and concrete at elevated temperatures," *Fire Saf. J.*, vol. 145, p. 104133, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104133>.
- [26]. A. Alaskar, "A comprehensive review on the influence of elevated temperatures on the mechanical performance of high-performance concretes," pp. 879–890, 2025.
- [27]. Corporation-Coteccons, "Coteccons' Experience in Implementing BIM in High-Rise Projects," 2021.
- [28]. H. Cho, D. H. Lee, H. Ju, H. Park, H. Kim, and K. S. Kim, "Fire Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures Using Fuzzy Theory," *Appl. Sci.*, vol. 5, 2017, doi: 10.3390/app7050518.
- [29]. D. Qin, P. Gao, F. Aslam, M. Sufian, and H. Alabduljabbar, "A comprehensive review on fire damage assessment of reinforced concrete structures," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e00843, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00843>.
- [30]. M. Colombo and R. F. Á, "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures," vol. 42, pp. 461–472, 2007, doi: 10.1016/j.firesaf.2006.09.002.
- [31]. P. Alcaíno, H. Santa-María, C. Magna-Verdugo, and L. López, "Experimental fast-assessment of post-fire residual strength of reinforced concrete frame buildings based on non-destructive tests," *Constr. Build. Mater.*, vol. 234, p. 117371, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117371>.