

Tiến bộ trong nghiên cứu an toàn cháy cho kết cấu bê tông và thép tại Việt Nam và Quốc tế

Advances in fire safety research for concrete and steel structures in Vietnam and Globally

Nguyễn Phi Long^{1,*}

¹ Khoa Xây dựng, Học viện Hàng Không Việt Nam;

*Tác giả liên hệ: longnp@vaa.edu.vn

■ Nhận bài: 03/06/2025 ■ Sửa bài: 12/11/2025 ■ Duyệt đăng: 10/12/2025

DOI: <https://doi.org/10.66195/mtu.2026.16.118>

TÓM TẮT

Báo cáo tổng hợp các nghiên cứu từ năm 2000 đến nay về khả năng chịu cháy của kết cấu bê tông, thép và bê tông cốt thép, tập trung vào hành vi vật liệu và cấu kiện dưới tác động nhiệt độ cao. Các nghiên cứu chỉ ra rằng bê tông giảm đáng kể cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi ở nhiệt độ trên 600°C, đồng thời hiện tượng bong tróc (spalling) gây nguy hiểm do làm lộ cốt thép. Thép kết cấu mất khoảng 50% cường độ chảy ở 550-600°C và chỉ còn 10-20% ở 800°C. Sự suy giảm độ bám dính giữa bê tông và cốt thép ở nhiệt độ cao cũng ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu lực. Các phương pháp phòng ngừa bong tróc, như sử dụng phụ gia hoặc lớp bảo vệ, cùng với thiết kế chịu cháy theo hiệu suất, được nghiên cứu rộng rãi. So sánh cho thấy Việt Nam có tiến bộ nhưng còn hạn chế về thí nghiệm quy mô lớn và hợp tác quốc tế. Báo cáo nhấn mạnh tầm quan trọng của nghiên cứu này trong bối cảnh đô thị hóa, góp phần nâng cao an toàn và chất lượng công trình xây dựng.

Từ khóa: Khả năng chịu cháy, Kết cấu bê tông, Kết cấu thép, Bong tróc (spalling), Thiết kế chịu cháy

ABSTRACT

This report synthesizes research from 2000 to the present on the fire resistance of concrete, steel, and reinforced concrete structures, focusing on material and structural behavior under high temperatures. Studies reveal that concrete experiences significant reductions in tensile strength and elastic modulus above 600°C, with spalling posing a critical risk by exposing reinforcement. Steel structures lose approximately 50% of their yield strength at 550–600°C and retain only 10–20% at 800°C. The bond strength between concrete and reinforcement also diminishes significantly at elevated temperatures, impacting load-bearing capacity. Preventive measures for spalling, such as specialized additives and protective coatings, alongside performance-based fire engineering, have been extensively explored. Comparative analysis indicates that while Vietnam has made progress, its research is limited in scope and large-scale experimentation compared to global efforts. The report underscores the necessity of advancing fire resistance studies amid rapid urbanization in Vietnam, providing a robust scientific foundation for enhancing construction safety and quality. Continued investment and international collaboration are essential to bridge gaps and improve the resilience of structures against fire hazards.

Keywords: Fire resistance, Concrete structure, Steel structure, Spalling, Fire-resistant design

1. GIỚI THIỆU

Trong lĩnh vực xây dựng hiện đại, việc đảm bảo an toàn phòng cháy chữa cháy cho các công trình là một yêu cầu cấp thiết, nhằm bảo vệ tính mạng con người, tài sản và môi trường khỏi những hậu quả nghiêm trọng do

hỏa hoạn gây ra. Các vật liệu kết cấu phổ biến như bê tông, thép và bê tông cốt thép đóng vai trò trụ cột trong việc xây dựng nên cơ sở hạ tầng và các tòa nhà, tuy nhiên, chúng lại phải đối mặt với những thách thức đặc biệt khi nhiệt độ tăng cao trong các vụ cháy. Do

đó, việc nghiên cứu sâu rộng về khả năng chịu cháy của các vật liệu và kết cấu này ở các cấp độ khác nhau là vô cùng quan trọng, giúp các kỹ sư và nhà thiết kế đưa ra những giải pháp tối ưu, nâng cao độ an toàn và giảm thiểu rủi ro cháy nổ cho các công trình xây dựng.

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục đích tổng hợp một cách có hệ thống các nghiên cứu đã được công bố từ năm 2000 đến nay về khả năng chịu cháy của kết cấu bê tông, thép và bê tông cốt thép, bao gồm cả các nghiên cứu được thực hiện tại Việt Nam và trên thế giới, từ cấp độ vật liệu, cấu kiện trung gian (như dầm, cột, sàn) cho đến các hệ kết cấu lớn. Phạm vi của báo cáo tập trung vào việc đánh giá các thay đổi về tính chất cơ lý của vật liệu khi chịu nhiệt độ cao, hành vi của các cấu kiện chịu lực trong điều kiện cháy, và khả năng làm việc tổng thể của các hệ kết cấu khi xảy ra hỏa hoạn. Đối tượng chính mà báo cáo hướng đến là các chuyên gia trong ngành xây dựng tại Việt Nam, bao gồm các kỹ sư kết cấu, kiến trúc sư, nhà nghiên cứu và các nhà hoạch định chính sách, với hy vọng cung cấp một cái nhìn toàn diện về tình hình nghiên cứu hiện tại và những vấn đề còn tồn tại trong lĩnh vực này. Nghiên cứu được cấu trúc một cách logic, bắt đầu từ việc xem xét các nghiên cứu về khả năng chịu cháy của từng loại vật liệu riêng lẻ, sau đó đi sâu vào phân tích hành vi của các cấu kiện chịu lực, và cuối cùng là đánh giá hiệu suất của các hệ kết cấu lớn trong điều kiện hỏa hoạn, đồng thời so sánh và đánh giá các kết quả nghiên cứu giữa Việt Nam và các quốc gia khác trên thế giới.

Sự gia tăng nhanh chóng của quá trình đô thị hóa và phát triển xây dựng tại Việt Nam trong những thập kỷ gần đây đã đặt ra những yêu cầu ngày càng cao về an toàn phòng cháy chữa cháy cho các công trình. Với mật độ xây dựng ngày càng tăng và các tòa nhà cao tầng, phức tạp xuất hiện ngày càng nhiều, nguy cơ xảy ra các vụ cháy lớn với những thiệt hại nghiêm trọng về người và tài sản cũng gia tăng đáng kể. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc hiểu rõ và áp dụng các nguyên tắc thiết kế chịu lửa tiên tiến vào thực tiễn xây dựng ở Việt Nam. Một báo cáo tổng hợp các nghiên cứu mới nhất về khả năng chịu cháy của các vật liệu và kết cấu xây dựng chủ yếu sẽ cung cấp những thông tin khoa học cần thiết, giúp các nhà quản lý, kỹ sư và kiến trúc

sư đưa ra các quyết định thiết kế và xây dựng an toàn, hiệu quả hơn, phù hợp với điều kiện đặc thù của Việt Nam. Bên cạnh đó, khoảng thời gian từ năm 2000 đến nay chứng kiến những tiến bộ vượt bậc trong lĩnh vực khoa học vật liệu và kỹ thuật phòng cháy chữa cháy kết cấu. Các phương pháp mô hình hóa bằng máy tính ngày càng trở nên mạnh mẽ và chính xác hơn, các kỹ thuật thí nghiệm cũng được cải tiến đáng kể, và sự hiểu biết về hành vi của vật liệu ở nhiệt độ cao cũng sâu sắc hơn. Việc tổng hợp các nghiên cứu trong giai đoạn này sẽ mang lại một bức tranh toàn diện về những thành tựu đã đạt được, những vấn đề còn tồn tại và các xu hướng nghiên cứu mới trong lĩnh vực khả năng chịu cháy của kết cấu xây dựng.

2. NGHIÊN CỨU VỀ KHẢ NĂNG CHỊU CHÁY CỦA VẬT LIỆU

2.1. Bê tông

2.1.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ cao lên tính chất cơ học và vật lý của bê tông

Bê tông, một vật liệu xây dựng composite bao gồm xi măng, cốt liệu và nước, thể hiện một khả năng chịu lửa tương đối tốt so với nhiều vật liệu khác. Tuy nhiên, khi tiếp xúc với nhiệt độ cao trong đám cháy, các tính chất cơ học và vật lý của bê tông sẽ bị suy giảm đáng kể, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu lực và độ ổn định của kết cấu. Các nghiên cứu từ năm 2000 đến nay đã tập trung vào việc làm rõ những biến đổi này, đặc biệt là đối với cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi và hệ số dẫn nhiệt của bê tông ở các mức nhiệt độ khác nhau [1-7].

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng cường độ chịu nén của bê tông bắt đầu suy giảm đáng kể ở nhiệt độ khoảng 300°C và có thể mất tới 70-90% cường độ ban đầu khi nhiệt độ đạt đến 600-800°C [8,9]. Mức độ suy giảm này phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm thành phần hỗn hợp bê tông (tỷ lệ xi măng, loại cốt liệu, phụ gia), độ ẩm ban đầu, tốc độ gia nhiệt và thời gian chịu nhiệt. Ví dụ, các loại bê tông có hàm lượng thạch anh trong cốt liệu cao thường có xu hướng bị giảm cường độ nhiều hơn ở nhiệt độ khoảng 573°C do sự chuyển pha của thạch anh, gây ra sự giãn nở thể tích đột ngột và làm nứt bê tông. Ngược lại, các loại bê tông sử dụng cốt liệu đá vôi có khả năng chịu nhiệt tốt hơn do sự phân hủy canxi cacbonat diễn ra ở nhiệt độ cao hơn (khoảng 800°C) và quá

trình này hấp thụ nhiệt, làm chậm quá trình tăng nhiệt độ bên trong khối bê tông.

Tương tự như cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của bê tông cũng giảm đáng kể khi nhiệt độ tăng cao. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng cường độ chịu kéo có thể giảm tới 90% ở nhiệt độ 600°C, trong khi mô đun đàn hồi có thể giảm tới 80% ở cùng mức nhiệt độ. Sự suy giảm này ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chống lại sự hình thành và phát triển của các vết nứt trong bê tông khi chịu tải và nhiệt độ cao, đặc biệt là trong các cấu kiện chịu uốn như dầm và sàn [10-12].

Hệ số dẫn nhiệt của bê tông cũng là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng chịu lửa của kết cấu. Khi nhiệt độ tăng, hệ số dẫn nhiệt của bê tông thường giảm, đặc biệt là đối với bê tông có độ ẩm cao. Điều này có nghĩa là lớp bê tông bên ngoài sẽ trở thành một lớp cách nhiệt, làm chậm quá trình truyền nhiệt vào bên trong khối bê tông và bảo vệ các lớp bê tông bên trong cũng như cốt thép khỏi nhiệt độ quá cao trong một khoảng thời gian nhất định. Tuy nhiên, sự giảm hệ số dẫn nhiệt cũng có thể dẫn đến sự tích tụ nhiệt ở lớp bề mặt, gây ra ứng suất nhiệt lớn và làm tăng nguy cơ nứt vỡ [13].

Các nghiên cứu gần đây cũng tập trung vào ảnh hưởng của các loại phụ gia khác nhau đến khả năng chịu nhiệt của bê tông. Ví dụ, việc sử dụng tro bay, xỉ lò cao hoặc silica fume có thể cải thiện khả năng chịu nhiệt của bê tông bằng cách làm tăng độ đặc chắc của ma trận xi măng, giảm tính thấm và hạn chế sự hình thành các vết nứt do nhiệt. Ngoài ra, các nghiên cứu về bê tông cường độ cao và bê tông siêu cao hiệu năng (UHPC) cũng cho thấy những kết quả khác nhau về khả năng chịu lửa so với bê tông thông thường, do thành phần hỗn hợp và cấu trúc vi mô đặc biệt của chúng [14].

2.1.2. Hiện tượng bong tróc (Spalling) bê tông khi cháy

Một trong những hiện tượng nguy hiểm nhất xảy ra với bê tông khi chịu nhiệt độ cao là hiện tượng bong tróc (spalling), tức là sự tách lớp hoặc vỡ vụn của bề mặt bê tông dưới tác động của nhiệt. Hiện tượng này không chỉ làm giảm tiết diện chịu lực của cấu kiện mà còn có thể làm lộ cốt thép, khiến cốt thép bị mất

cường độ nhanh chóng do nhiệt độ cao.

Các nghiên cứu đã xác định được nhiều yếu tố có thể gây ra hoặc làm tăng nguy cơ bong tróc bê tông khi cháy, bao gồm:

Độ ẩm ban đầu: Bê tông có độ ẩm cao (đặc biệt là bê tông tươi hoặc bê tông mới đổ) có nguy cơ bong tróc cao hơn. Khi nhiệt độ tăng nhanh, nước bên trong bê tông sẽ chuyển thành hơi nước và tạo ra áp suất lớn bên trong các lỗ rỗng, vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông và gây ra hiện tượng nứt vỡ, bong tróc [15].

Tốc độ gia nhiệt: Tốc độ gia nhiệt càng nhanh, đặc biệt là trong giai đoạn đầu của đám cháy, thì nguy cơ bong tróc càng cao. Sự tăng nhiệt độ đột ngột tạo ra sự chênh lệch nhiệt độ lớn giữa bề mặt và bên trong khối bê tông, gây ra ứng suất nhiệt cao và dẫn đến bong tróc [16].

Tính thấm của bê tông: Bê tông có tính thấm thấp sẽ cản trở sự thoát hơi nước ra ngoài, làm tăng áp suất hơi nước bên trong và tăng nguy cơ bong tróc. Bê tông cường độ cao và UHPC thường có tính thấm rất thấp, do đó có thể dễ bị bong tróc hơn bê tông thông thường nếu không có các biện pháp phòng ngừa [15].

Cường độ bê tông: Một số nghiên cứu cho thấy bê tông cường độ cao có xu hướng bị bong tróc nhiều hơn bê tông cường độ thấp dưới tác động của nhiệt, có thể do cấu trúc vi mô đặc chắc và tính thấm thấp của nó [17].

Sự có mặt của sợi: Việc thêm các loại sợi (ví dụ như sợi polypropylene) vào bê tông đã được chứng minh là có thể giảm thiểu đáng kể nguy cơ bong tróc. Khi nhiệt độ đạt đến khoảng 170°C, sợi polypropylene sẽ nóng chảy và tạo ra các kênh nhỏ bên trong bê tông, giúp giải phóng áp suất hơi nước và ngăn chặn hiện tượng bong tróc [18].

Các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc phát triển các phương pháp dự đoán và ngăn chặn hiện tượng bong tróc bê tông khi cháy. Các mô hình số phức tạp đã được xây dựng để mô phỏng quá trình truyền nhiệt và sự phát triển áp suất hơi nước bên trong bê tông, từ đó dự đoán nguy cơ bong tróc. Về mặt thực nghiệm, nhiều nghiên cứu đã tiến hành các thí nghiệm đốt mẫu bê tông với các điều kiện khác nhau để đánh giá hiệu quả của các biện pháp phòng ngừa bong tróc, chẳng hạn như sử dụng các loại phụ gia đặc biệt, thiết kế hình dạng cấu kiện phù hợp hoặc áp dụng các lớp bảo vệ bề mặt.

2.2. Thép

2.2.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ cao lên tính chất cơ học của thép kết cấu

Thép kết cấu, với ưu điểm về cường độ cao, độ dẻo dai tốt và khả năng thi công nhanh chóng, là một trong những vật liệu chịu lực chủ yếu trong xây dựng. Tuy nhiên, khả năng chịu lực của thép lại bị suy giảm đáng kể khi nhiệt độ tăng cao. Các nghiên cứu từ năm 2000 đến nay đã tập trung vào việc xác định một cách chính xác sự suy giảm này, đặc biệt là đối với cường độ chảy, cường độ kéo và mô đun đàn hồi của các loại thép kết cấu thông dụng ở các mức nhiệt độ khác nhau.

Theo các tiêu chuẩn và kết quả nghiên cứu, cường độ chảy của thép kết cấu thông thường (ví dụ như thép CT3, SS400) bắt đầu giảm nhẹ ở nhiệt độ khoảng 300°C, nhưng sự suy giảm trở nên đáng kể hơn ở nhiệt độ trên 400°C. Khi nhiệt độ đạt đến 550-600°C, cường độ chảy của thép có thể giảm xuống còn khoảng 50% so với cường độ ở nhiệt độ thường. Sự suy giảm này tiếp tục diễn ra khi nhiệt độ tăng cao hơn, và ở nhiệt độ khoảng 800°C, cường độ chảy của thép có thể chỉ còn khoảng 10-20% so với ban đầu [19–21].

Tương tự, cường độ kéo và mô đun đàn hồi của thép cũng bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ cao. Cường độ kéo thường đạt giá trị cao nhất ở nhiệt độ khoảng 200-300°C, sau đó bắt đầu giảm dần. Mô đun đàn hồi của thép giảm tuyến tính với nhiệt độ, và ở nhiệt độ 600°C, nó có thể giảm xuống còn khoảng 30% so với giá trị ở nhiệt độ thường. Sự suy giảm mô đun đàn hồi có nghĩa là độ cứng của kết cấu thép giảm đi, dẫn đến độ võng lớn hơn và có thể gây ra mất ổn định [20,22].

Các nghiên cứu cũng đã xem xét ảnh hưởng của thành phần hóa học và quá trình sản xuất đến khả năng chịu nhiệt của các loại thép khác nhau. Ví dụ, các loại thép hợp kim thấp có thể duy trì cường độ tốt hơn ở nhiệt độ cao so với thép cacbon thông thường. Ngoài ra, các nghiên cứu về thép cường độ cao cũng cho thấy rằng chúng có thể có tốc độ suy giảm cường độ nhanh hơn ở nhiệt độ cao so với thép cường độ thấp [23].

2.2.2. Hiện tượng chảy dẻo cục bộ và mất ổn định của kết cấu thép khi cháy

Do sự suy giảm cường độ và độ cứng ở nhiệt độ cao, các cấu kiện thép có thể bị chảy

dẻo cục bộ tại các vị trí chịu ứng suất lớn hoặc bị mất ổn định do giảm khả năng chịu nén và uốn. Hiện tượng này đặc biệt quan trọng đối với các cấu kiện thanh mảnh như cột và dầm có nhịp lớn [23].

Trong điều kiện cháy, nhiệt độ không đồng đều có thể phát triển trong một cấu kiện thép, ví dụ như cột có thể nóng hơn ở các mặt tiếp xúc trực tiếp với lửa so với các mặt khác. Sự phân bố nhiệt độ không đều này dẫn đến sự phân bố cường độ và độ cứng không đều, gây ra các ứng suất nhiệt và làm tăng nguy cơ chảy dẻo cục bộ tại các vùng nóng hơn.

Đối với các cấu kiện chịu nén như cột, sự suy giảm mô đun đàn hồi ở nhiệt độ cao làm giảm đáng kể khả năng chống lại hiện tượng mất ổn định do uốn dọc (buckling) [22]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng chiều dài hiệu quả của cột có thể tăng lên khi nhiệt độ tăng, làm giảm tải trọng tới hạn gây ra mất ổn định. Tương tự, đối với các cấu kiện chịu uốn như dầm, sự suy giảm cường độ chảy và mô đun đàn hồi có thể dẫn đến độ võng lớn và mất ổn định cục bộ (ví dụ như lật ngang).

Các nghiên cứu về hành vi của kết cấu thép trong lửa thường bao gồm cả các thí nghiệm đốt mẫu cấu kiện thực tế và các phân tích số sử dụng các mô hình phần tử hữu hạn phức tạp [24,25]. Các thí nghiệm này giúp xác định thời gian chịu lửa của các cấu kiện thép khác nhau dưới các điều kiện tải trọng và nhiệt độ khác nhau, đồng thời cung cấp dữ liệu để hiệu chỉnh và kiểm chứng các mô hình số. Các phân tích số cho phép nghiên cứu hành vi của các kết cấu thép phức tạp hơn và khảo sát ảnh hưởng của nhiều yếu tố khác nhau, chẳng hạn như sơ đồ kết cấu, điều kiện biên và kịch bản cháy.

2.3. Bê tông cốt thép

2.3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ cao lên sự tương tác giữa bê tông và cốt thép

Bê tông cốt thép là sự kết hợp ưu việt giữa khả năng chịu nén tốt của bê tông và khả năng chịu kéo tốt của thép, tạo thành một vật liệu kết cấu có khả năng chịu lực toàn diện. Tuy nhiên, khi chịu nhiệt độ cao, sự tương tác giữa bê tông và cốt thép trở nên phức tạp hơn do sự khác biệt trong tính chất giãn nở nhiệt và sự suy giảm cường độ của cả hai vật liệu [26,27].

Hệ số giãn nở nhiệt của thép (khoảng $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) lớn hơn so với bê tông (khoảng

$10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). Khi nhiệt độ tăng, thép có xu hướng giãn nở nhiều hơn bê tông, tạo ra ứng suất tiếp xúc tại bề mặt giao diện giữa hai vật liệu. Nếu ứng suất này vượt quá cường độ bám dính, có thể xảy ra hiện tượng trượt giữa cốt thép và bê tông, làm giảm hiệu quả làm việc của cốt thép trong việc chịu kéo.

Ngoài ra, nhiệt độ cao cũng ảnh hưởng đến cường độ bám dính giữa bê tông và cốt thép. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng cường độ bám dính bắt đầu giảm ở nhiệt độ khoảng 200°C và có thể giảm tới 70-80% ở nhiệt độ 600°C . Sự suy giảm này phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm loại bê tông, loại cốt thép (gân hay trơn), đường kính cốt thép và chiều dày lớp bê tông bảo vệ. Lớp bê tông bảo vệ đóng vai trò quan trọng trong việc cách nhiệt cho cốt thép, giúp làm chậm quá trình tăng nhiệt độ của cốt thép và duy trì cường độ bám dính lâu hơn.

Hiện tượng bong tróc bê tông cũng có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến sự tương tác giữa bê tông và cốt thép. Khi lớp bê tông bảo vệ bị bong tróc, cốt thép sẽ tiếp xúc trực tiếp với lửa, dẫn đến nhiệt độ tăng nhanh và cường độ suy giảm nhanh chóng. Đồng thời, sự mất mát lớp bê tông bảo vệ cũng làm giảm diện tích bám dính giữa bê tông và cốt thép [15].

2.3.2. Nghiên cứu về khả năng chịu cháy của các cấu kiện bê tông cốt thép (dầm, cột, sàn)

Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để đánh giá khả năng chịu cháy của các cấu kiện bê tông cốt thép như dầm, cột và sàn, là những thành phần cơ bản của hầu hết các công trình xây dựng. Các nghiên cứu này thường tập trung vào việc xác định thời gian chịu lửa của các cấu kiện dưới tác động của tải trọng và nhiệt độ theo các tiêu chuẩn thử nghiệm cháy đã được quy định (ví dụ như tiêu chuẩn ISO 834, ASTM E119) [28].

Dầm bê tông cốt thép: Khả năng chịu cháy của dầm bê tông cốt thép phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm kích thước tiết diện, hàm lượng cốt thép, chiều dày lớp bê tông bảo vệ và sơ đồ chịu lực. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng dầm có tiết diện lớn hơn và lớp bê tông bảo vệ dày hơn thường có thời gian chịu lửa cao hơn. Hàm lượng cốt thép cũng ảnh hưởng đến khả năng chịu uốn của dầm khi cháy, tuy nhiên, việc tăng quá nhiều hàm lượng cốt thép có thể làm tăng nguy cơ bong tróc bê tông [1-3,12,29,30].

Cột bê tông cốt thép: Tương tự như dầm, khả năng chịu cháy của cột bê tông cốt thép cũng phụ thuộc vào kích thước tiết diện, hàm lượng cốt thép dọc và cốt thép đai, chiều dày lớp bê tông bảo vệ và chiều dài cột. Các cột có tiết diện tròn hoặc vuông thường có khả năng chịu lửa tốt hơn cột có tiết diện chữ nhật do sự phân bố nhiệt độ đồng đều hơn. Cốt thép đai đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì sự ổn định của cột và hạn chế hiện tượng bong tróc bê tông [4-7,17].

Sàn bê tông cốt thép: Sàn bê tông cốt thép thường có khả năng chịu lửa tốt hơn dầm và cột do có diện tích tiếp xúc với lửa lớn hơn và thường chịu tải phân bố. Khả năng chịu cháy của sàn phụ thuộc vào chiều dày bản sàn, hàm lượng cốt thép và chiều dày lớp bê tông bảo vệ. Các loại sàn rỗng hoặc sàn có sử dụng các vật liệu cách nhiệt có thể có khả năng chịu lửa cao hơn [10,11,26,31-33].

Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc phát triển các phương pháp tính toán và thiết kế cấu kiện bê tông cốt thép chịu lửa. Các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành thường cung cấp các bảng tra hoặc công thức kinh nghiệm để xác định kích thước tiết diện và chiều dày lớp bê tông bảo vệ cần thiết để đạt được một thời gian chịu lửa nhất định. Tuy nhiên, các nghiên cứu gần đây cũng đã phát triển các mô hình phân tích tiên tiến hơn, dựa trên phương pháp phân tử hữu hạn, để mô phỏng chính xác hơn hành vi của cấu kiện bê tông cốt thép trong điều kiện cháy, có xét đến sự thay đổi tính chất vật liệu theo nhiệt độ, sự tương tác giữa bê tông và cốt thép, và các hiệu ứng phi tuyến khác.

3. NGHIÊN CỨU VỀ KHẢ NĂNG CHỊU CHÁY CỦA HỆ KẾT CẤU LỚN

3.1. Hành vi của hệ kết cấu bê tông cốt thép chịu cháy

Nghiên cứu về khả năng chịu cháy không chỉ dừng lại ở cấp độ vật liệu và cấu kiện riêng lẻ mà còn mở rộng ra việc xem xét hành vi của toàn bộ hệ kết cấu trong điều kiện hỏa hoạn. Các hệ kết cấu bê tông cốt thép, bao gồm khung nhà, sàn liên tục và các hệ kết cấu đặc biệt khác, có những đặc điểm riêng biệt về khả năng chịu lửa do sự tương tác phức tạp giữa các cấu kiện thành phần [8,18,34].

Khi một đám cháy xảy ra trong một tòa nhà bê tông cốt thép, nhiệt độ sẽ tăng lên và lan truyền qua các cấu kiện, gây ra sự suy

giảm cường độ và độ cứng của vật liệu. Tuy nhiên, do tính liên tục của hệ kết cấu, các cấu kiện không bị cháy trực tiếp vẫn có thể hỗ trợ cho các cấu kiện bị ảnh hưởng bởi lửa, thông qua sự phân phối lại tải trọng. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng kết cấu thứ cấp và có thể góp phần làm tăng khả năng chịu lực tổng thể của hệ thống trong một khoảng thời gian nhất định [18,34].

Các nghiên cứu đã sử dụng các phương pháp phân tích số toàn hệ thống và các thí nghiệm đốt mô hình thu nhỏ hoặc mô hình thực tế để nghiên cứu hành vi này. Các thí nghiệm thường được thực hiện trong các lò đốt lớn, mô phỏng các kịch bản cháy khác nhau và theo dõi sự thay đổi về nhiệt độ, biến dạng và khả năng chịu lực của hệ kết cấu theo thời gian. Các phân tích số sử dụng các mô hình phần tử hữu hạn phức tạp, có khả năng mô phỏng sự truyền nhiệt, sự suy giảm vật liệu và sự tương tác giữa các cấu kiện, để dự đoán hành vi của hệ kết cấu trong lửa [34].

Một số nghiên cứu đã tập trung vào ảnh hưởng của sơ đồ kết cấu đến khả năng chịu cháy. Ví dụ, các hệ khung có độ siêu tĩnh cao hơn (nhiều liên kết dư) thường có khả năng phân phối lại tải trọng tốt hơn khi một số cấu kiện bị suy yếu do nhiệt, do đó có thể chịu lửa tốt hơn so với các hệ khung có độ siêu tĩnh thấp hơn. Tương tự, các hệ sàn liên tục có khả năng chịu lửa tốt hơn so với các hệ sàn đơn giản do hiệu ứng vòm và sự tham gia chịu lực của các vùng sàn lân cận [8,16].

3.2. Hành vi của hệ kết cấu thép chịu cháy

Hệ kết cấu thép, do tính dẫn nhiệt cao của thép, thường nhạy cảm hơn với tác động của nhiệt độ cao so với hệ kết cấu bê tông cốt thép. Tuy nhiên, các nghiên cứu từ năm 2000 đến nay đã cho thấy rằng với các biện pháp bảo vệ cháy phù hợp và thiết kế kết cấu thông minh, hệ kết cấu thép vẫn có thể đạt được yêu cầu về khả năng chịu lửa [24].

Khi một đám cháy xảy ra, nhiệt độ trong các cấu kiện thép có thể tăng lên rất nhanh, dẫn đến sự suy giảm cường độ và độ cứng, và có thể gây ra chảy dẻo cục bộ hoặc mất ổn định tổng thể của hệ thống. Tuy nhiên, tương tự như hệ bê tông cốt thép, hiệu ứng kết cấu thứ cấp cũng có thể phát huy vai trò trong hệ kết cấu thép. Ví dụ, trong một khung thép nhiều tầng, nếu một cột ở tầng dưới bị suy yếu

do cháy, tải trọng có thể được phân phối lại cho các cột lân cận hoặc các cấu kiện khác thông qua các dầm và giằng.

Các nghiên cứu về hành vi của hệ kết cấu thép chịu cháy thường tập trung vào việc đánh giá hiệu quả của các biện pháp bảo vệ cháy, chẳng hạn như sử dụng lớp phủ chịu lửa, tấm bảo vệ hoặc hệ thống phun nước chữa cháy. Các thí nghiệm đốt toàn bộ hoặc một phần mô hình kết cấu thép đã được thực hiện để kiểm tra hiệu quả của các biện pháp này và xác định thời gian chịu lửa của hệ thống. Các phân tích số cũng đóng vai trò quan trọng trong việc nghiên cứu hành vi của hệ kết cấu thép phức tạp trong lửa, cho phép các kỹ sư đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau và tối ưu hóa thiết kế [35,36].

Một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng khác là thiết kế kết cấu thép theo phương pháp “thiết kế chịu cháy theo hiệu suất” (performance-based fire engineering).

Phương pháp này dựa trên việc phân tích cụ thể các kịch bản cháy có thể xảy ra và đánh giá hiệu suất của kết cấu dựa trên các tiêu chí cụ thể, chẳng hạn như thời gian duy trì ổn định, mức độ biến dạng cho phép và khả năng thoát nạn của người trong tòa nhà. Phương pháp này cho phép các kỹ sư thiết kế các kết cấu thép an toàn và kinh tế hơn so với phương pháp thiết kế truyền thống dựa trên các quy định định sẵn [22,35].

3.3. So sánh và đánh giá nghiên cứu giữa Việt Nam và trên thế giới

Việc so sánh và đánh giá các nghiên cứu về khả năng chịu cháy của kết cấu bê tông, thép và bê tông cốt thép giữa Việt Nam và trên thế giới từ năm 2000 đến nay cho thấy một số điểm khác biệt và tương đồng đáng chú ý.

Nghiên cứu về vật liệu: Nhìn chung, các nghiên cứu trên thế giới về ảnh hưởng của nhiệt độ cao lên tính chất cơ lý của bê tông và thép rất phong phú và đa dạng, bao gồm nhiều loại vật liệu khác nhau (bê tông cường độ cao, UHPC, thép hợp kim, v.v.) và các điều kiện thí nghiệm khác nhau. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về lĩnh vực này có phần hạn chế hơn về số lượng và phạm vi, thường tập trung vào các loại vật liệu thông dụng trong nước. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, đã có sự gia tăng đáng kể về số lượng và chất lượng các nghiên cứu về khả năng chịu nhiệt của bê

tông sử dụng các loại phụ gia địa phương (ví dụ như tro trấu, xỉ than).

Nghiên cứu về cấu kiện: Các nghiên cứu quốc tế về khả năng chịu cháy của dầm, cột và sàn bê tông cốt thép và thép rất đa dạng về kích thước, hình dạng và điều kiện tải trọng. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng các tiêu chuẩn thử nghiệm cháy quốc tế và khu vực. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về cấu kiện chịu cháy cũng đã được thực hiện, tuy nhiên, số lượng các thí nghiệm đốt mẫu thực tế còn hạn chế do chi phí cao và yêu cầu về thiết bị phức tạp. Các nghiên cứu thường tập trung vào phân tích số và so sánh với các kết quả nghiên cứu trên thế giới.

Nghiên cứu về hệ kết cấu: Nghiên cứu về hành vi của hệ kết cấu lớn chịu cháy là một lĩnh vực phức tạp và đòi hỏi nguồn lực lớn, do đó, phần lớn các nghiên cứu tiên tiến trong lĩnh vực này được thực hiện ở các nước phát triển với các phòng thí nghiệm hiện đại và đội ngũ chuyên gia giàu kinh nghiệm. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về hành vi của toàn bộ hệ kết cấu trong điều kiện cháy còn rất ít. Tuy nhiên, với sự phát triển của công nghệ mô hình hóa và tính toán, các nhà nghiên cứu Việt Nam ngày càng có nhiều cơ hội để thực hiện các phân tích số phức tạp về lĩnh vực này.

Bảng 1 tóm tắt nghiên cứu về vật liệu và kết cấu xây dựng tại Việt Nam có những điểm tương đồng và khác biệt đáng chú ý so với bối cảnh quốc tế. Về vật liệu Bê tông, Việt Nam

tập trung vào bê tông thông dụng và mới bắt đầu nghiên cứu bê tông sử dụng phụ gia địa phương, trong khi quốc tế đã đa dạng hóa sang nhiều loại bê tông đặc biệt như cường độ cao (HPC), UHPC và bê tông sử dụng phụ gia tiên tiến. Đối với vật liệu Thép, nghiên cứu tại Việt Nam chủ yếu về thép kết cấu thông dụng, ít đi sâu vào các loại thép đặc biệt. Ngược lại, quốc tế có nghiên cứu sâu rộng về nhiều loại thép kết cấu và các loại thép hợp kim chịu nhiệt. Trong lĩnh vực Cấu kiện Bê tông cốt thép, Việt Nam tập trung vào dầm, cột, sàn với kích thước và điều kiện tải trọng thông thường, chủ yếu dựa trên phân tích số. Quốc tế đã thực hiện nhiều thí nghiệm đốt mẫu thực tế theo tiêu chuẩn quốc tế. Về Cấu kiện Thép, Việt Nam nghiên cứu các cấu kiện thép thông dụng và hiệu quả của các biện pháp bảo vệ cháy. Quốc tế có nghiên cứu sâu về hành vi của các loại cấu kiện thép khác nhau, bao gồm cả các cấu kiện phức tạp. Cuối cùng, đối với Hệ kết cấu, Việt Nam rất ít nghiên cứu thực nghiệm về hành vi của toàn bộ hệ kết cấu, chủ yếu dựa trên phân tích số. Trong khi đó, quốc tế có nhiều nghiên cứu thực nghiệm và phân tích số phức tạp về hành vi của các hệ kết cấu trong điều kiện cháy. Nhìn chung, nghiên cứu tại Việt Nam đang dần tiếp cận các xu hướng tiên tiến của thế giới, nhưng vẫn còn nhiều tiềm năng để phát triển sâu hơn về vật liệu đặc biệt, các loại cấu kiện phức tạp và nghiên cứu thực nghiệm hệ thống.

Bảng 1: Bảng so sánh tổng quan

Cấp độ nghiên cứu	Việt Nam	Quốc tế
Vật liệu (Bê tông)	Tập trung vào bê tông thông dụng, bắt đầu có nghiên cứu về bê tông sử dụng phụ gia địa phương.	Rất đa dạng, bao gồm nhiều loại bê tông đặc biệt (cường độ cao, UHPC, phụ gia tiên tiến).
Vật liệu (Thép)	Nghiên cứu về thép kết cấu thông dụng, ít nghiên cứu về các loại thép đặc biệt chịu nhiệt.	Nghiên cứu sâu rộng về nhiều loại thép kết cấu, bao gồm cả thép hợp kim chịu nhiệt tốt.
Cấu kiện (Bê tông cốt thép)	Nghiên cứu về dầm, cột, sàn với kích thước và điều kiện tải trọng thông thường, chủ yếu dựa trên phân tích số.	Nghiên cứu đa dạng với nhiều thí nghiệm đốt mẫu thực tế theo các tiêu chuẩn quốc tế.
Cấu kiện (Thép)	Nghiên cứu các cấu kiện thép thông dụng, tập trung vào hiệu quả của các biện pháp bảo vệ cháy.	Nghiên cứu sâu về hành vi của các loại cấu kiện thép khác nhau, kể cả các cấu kiện phức tạp.
Hệ kết cấu	Rất ít nghiên cứu thực nghiệm về hành vi của toàn bộ hệ kết cấu, chủ yếu dựa trên phân tích số.	Nhiều nghiên cứu thực nghiệm và phân tích số phức tạp về hành vi của các hệ kết cấu trong điều kiện cháy.
Vật liệu (Bê tông)	Tập trung vào bê tông thông dụng, bắt đầu có nghiên cứu về bê tông sử dụng phụ gia địa phương.	Rất đa dạng, bao gồm nhiều loại bê tông đặc biệt (cường độ cao, UHPC, phụ gia tiên tiến).

Nhìn chung, lĩnh vực nghiên cứu về khả năng chịu cháy của kết cấu xây dựng ở Việt Nam đang có những bước phát triển đáng khích lệ trong những năm gần đây, tuy nhiên, vẫn còn nhiều tiềm năng để phát triển hơn nữa, đặc biệt là trong việc thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm quy mô lớn và hợp tác quốc tế để tiếp cận các công nghệ và kiến thức tiên tiến trên thế giới. Việc tăng cường đầu tư vào nghiên cứu và phát triển trong lĩnh vực này sẽ góp phần nâng cao chất lượng và an toàn của các công trình xây dựng tại Việt Nam.

4. KẾT LUẬN

Báo cáo này đã tổng hợp một lượng lớn các nghiên cứu về khả năng chịu cháy của kết cấu bê tông, thép và bê tông cốt thép từ năm 2000 đến nay, bao gồm cả các nghiên cứu được thực hiện tại Việt Nam và trên thế giới. Qua quá trình tổng hợp và phân tích, có thể thấy rằng lĩnh vực này đã có những tiến bộ đáng kể trong việc hiểu rõ hơn về hành vi của vật liệu và kết cấu dưới tác động của nhiệt độ cao. Các nghiên cứu đã làm sáng tỏ những biến đổi về tính chất cơ lý của bê tông và thép ở các mức nhiệt độ khác nhau, đồng thời xác định các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu lửa của các cấu kiện và hệ kết cấu.

Đối với bê tông, các nghiên cứu đã tập trung vào ảnh hưởng của thành phần hỗn hợp, độ ẩm và tốc độ gia nhiệt đến sự suy giảm cường độ và hiện tượng bong tróc. Việc sử dụng các loại phụ gia đặc biệt và sợi đã được chứng minh là có thể cải thiện đáng kể khả năng chịu nhiệt của bê tông và giảm nguy cơ bong tróc. Đối với thép, sự suy giảm cường độ và độ cứng ở nhiệt độ cao là một vấn đề quan trọng, và các nghiên cứu đã cung cấp các đường cong suy giảm vật liệu chính xác, giúp các kỹ sư đánh giá khả năng chịu lực của kết cấu thép trong lửa. Đối với bê tông cốt thép, sự tương tác giữa bê tông và cốt thép, cũng như vai trò của lớp bê tông bảo vệ, đã được nghiên cứu kỹ lưỡng, giúp tối ưu hóa thiết kế các cấu kiện chịu lửa.

Nghiên cứu về hành vi của hệ kết cấu lớn trong điều kiện cháy đã cho thấy tầm quan trọng của hiệu ứng kết cấu thứ cấp và khả năng phân phối lại tải trọng. Các phương pháp phân tích số tiên tiến và các thí nghiệm đốt mô hình đã cung cấp những hiểu biết sâu sắc về cách các hệ kết cấu khác nhau phản ứng với lửa. So sánh giữa nghiên cứu ở Việt Nam

và trên thế giới cho thấy Việt Nam đang có những bước tiến đáng kể, nhưng vẫn cần tăng cường đầu tư và hợp tác quốc tế để nâng cao năng lực nghiên cứu trong lĩnh vực này.

Nhận thức được tầm quan trọng của an toàn phòng cháy chữa cháy trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng ở Việt Nam, việc tiếp tục đẩy mạnh các nghiên cứu về khả năng chịu cháy của kết cấu xây dựng là vô cùng cần thiết. Các kết quả nghiên cứu này sẽ cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho việc xây dựng và cập nhật các tiêu chuẩn thiết kế phòng cháy chữa cháy, đào tạo nguồn nhân lực chất lượng cao và nâng cao nhận thức về an toàn cháy nổ trong cộng đồng xây dựng. Việc áp dụng các kết quả nghiên cứu vào thực tiễn thiết kế và thi công sẽ góp phần xây dựng những công trình an toàn, bền vững và giảm thiểu tối đa những thiệt hại do hỏa hoạn gây ra.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Firmo JP, Correia JR, França P. (2012). Fire behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: Protection systems with insulation of the anchorage zones. *Compos Part B Eng.*, 43(3), 1545–1556.
- [2] Firmo JP, Arruda MRT, Correia JR. (2015). Numerical simulation of the fire behaviour of thermally insulated reinforced concrete beams strengthened with EBR-CFRP strips. *Compos Struct.*, 126, 360–370.
- [3] Ahmed A, Kodur VKR. (2011). Effect of bond degradation on fire resistance of FRP-strengthened reinforced concrete beams. *Compos Part B Eng.*, 42(2), 226–237.
- [4] Chowdhury EU, Bisby LA, Green MF, Kodur VKR. (2007). Investigation of insulated FRP-wrapped reinforced concrete columns in fire. *Fire Saf J.*, 42(6–7), 452–460.
- [5] Cree D, Chowdhury EU, Green MF, Bisby LA, Bénichou N. (2012). Performance in fire of FRP-strengthened and insulated reinforced concrete columns. *Fire Saf J.*, 54, 86–95.
- [6] Kodur VKR, Bisby LA, Green MF. (2006). Experimental evaluation of the fire behaviour of insulated fibre-reinforced-polymer-strengthened reinforced concrete columns. *Fire Saf J.*, 41(7), 547–557.
- [7] Bratina S, Čas B, Saje M, Planinc I. (2005). Numerical modelling of behaviour of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2. *Int J Solids Struct.*, 42(21–22), 5715–5733.
- [8] Bisby LA, Green MF, Kodur VKR. (2005). Response to fire of concrete structures that incorporate FRP. *Prog Struct Eng Mater.*, 7(3), 136–149.

- [9] Martin Z, Anna K, Pert S. Effect of Fire on FRP reinforced concrete structures. In: Low-tech and high-tech materials and technology for sustainable buildings.
- [10] Kodur VR, Baingo D. Fire Resistance of FRP Reinforced Concrete Slabs. https://www.researchgate.net/publication/44050669_Fire_Resistance_of_FRP_Reinforced_Concrete_Slabs
- [11] Nigro E, Cefarelli G, Bilotta A, Manfredi G, Cosenza E. (2014). Guidelines for flexural resistance of FRP reinforced concrete slabs and beams in fire. *Compos Part B Eng.*, 58, 103–112.
- [12] Carlos TB, Rodrigues JPC, de Lima RCA, Dhima D. (2018). Experimental analysis on flexural behaviour of RC beams strengthened with CFRP laminates and under fire conditions. *Compos Struct.*, 189, 516–528.
- [13] Ji G, Li G, Alaywan W. (2013). A new fire resistant FRP for externally bonded concrete repair. *Constr Build Mater.*, 42, 87–96.
- [14] Tran NT, Tran TK, Kim DJ. (2015). High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension. *Cem Concr Res.*, 69, 72–87.
- [15] Amran M, Huang SS, Onaizi AM, Murali G, Abdelgader HS. (2022). Fire spalling behavior of high-strength concrete: A critical review. *Constr Build Mater.*, 341, 127902.
- [16] Kang THK, Howell J, Kim S, Lee DJ. (2012). A State-of-the-Art Review on Debonding Failures of FRP Laminates Externally Adhered to Concrete. *Int J Concr Struct Mater.*, 6(2), 123–134.
- [17] Kodur VKR, Wang TC, Cheng FP. (2004). Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns. *Fire Resist.*, 26(2), 141–153.
- [18] Agelaridou-Twohig A, Tamanini F, Ali H, Adjari A, Vaziri A. (2014). Thermal analysis of reinforced concrete chimneys with fiberglass plastic liners in uncontrolled fires. *Eng Struct.*, 75, 87–98.
- [19] Eurocode 1. EN 1991-1-1 (2002): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings. CEN.
- [20] EN 1990:2002. EN 1990:2002: Eurocode - Basis of structural design. CEN.
- [21] EN 1992-1-2. EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. CEN.
- [22] EN 1993-1-2. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. CEN.
- [23] Heidarpour A, Tofts NS, Korayem AH, Zhao XL, Hutchinson CR. (2014). Mechanical properties of very high strength steel at elevated temperatures. *Fire Saf J.*, 64, 27–35.
- [24] Qiang X, Bijlaard FSK, Kolstein H. Elevated-temperature mechanical properties of high strength structural steel S460N: Experimental study and recommendations for fire-resistance design. *Fire Saf J.* 201, 55, 15–21.
- [25] ISO 834: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Annex A: Thermal data for carbon steel And stainless steel sections.
- [26] Ellobody E, Bailey CG. (2009). Modelling of unbonded post-tensioned concrete slabs under fire conditions. *Fire Saf J.*, 44(2), 159–167.
- [27] Foster SK, Bisby LA. (2008). Fire survivability of externally bonded FRP strengthening systems. *J Compos Constr.*, 12(5), 553–561.
- [28] ISO-834. ISO 834: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements. ISO/TC 92/SC 2; 1999.
- [29] Firmo JP, Correia JR. (2015). Fire behaviour of thermally insulated RC beams strengthened with EBR-CFRP strips: Experimental study. *Compos Struct.*, 122, 144–154.
- [30] Firmo JP, Arruda MRT, Correia JR. (2014). Contribution to the understanding of the mechanical behaviour of CFRP-strengthened RC beams subjected to fire: Experimental and numerical assessment. *Compos Part B Eng.*, 66, 15–24.
- [31] Kodur VKR, Bhatt PP. (2018). A numerical approach for modeling response of fiber reinforced polymer strengthened concrete slabs exposed to fire. *Compos Struct.*, 187, 226–240.
- [32] Nigro E, Cefarelli G, Bilotta A, Manfredi G, Cosenza E. (2011). Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part I: Experimental investigations on the mechanical behavior. *Compos Part B Eng.*, 42(6), 1739–1750.
- [33] Terrasi GP, Bisby L, Barbezat M, Affolter C, Hugli E. (2012). Fire Behavior of Thin CFRP Pretensioned High-Strength Concrete Slabs. *J Compos Constr.*, 16(4), 381–394.
- [34] Ahmed A, Kodur V. (2011). The experimental behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to design fire exposure. *Eng Struct.*, 33(7), 2201–2011.
- [35] Wei X, Liu J, Xu L (2025). The collapse mechanism and paths of steel frame structures under designed fire scenarios. *Structures.*, 76, 108942.
- [36] Fürst R, Häßler D, Stelzner L, Hothan S. (2025). Fire resistance of existing steel structures with aged intumescent coating based on an in situ test method. *Fire Saf J.*, 153, 104380