

# Cải tiến mô hình dự đoán khả năng chịu lửa của cột bê tông cốt thép

## A calibration model for predicting the fire resistance of reinforced concrete columns

> **TRẦN LÊ VĨNH NGUYỄN<sup>1</sup>, MAI XUÂN ĐẠT<sup>1</sup>, THS NGUYỄN THỊ HỒNG NỤ<sup>2</sup>, TS TRƯƠNG GIA TOẠI<sup>3\*</sup>**

<sup>1</sup>SV khoa Kỹ thuật xây dựng Trường Đại học Đông Á, Đà Nẵng;

Email: [nguyen54202@donga.edu.vn](mailto:nguyen54202@donga.edu.vn), [dat53716@donga.edu.vn](mailto:dat53716@donga.edu.vn)

<sup>2</sup>GV Khoa Kỹ thuật xây dựng Trường Đại học Đông Á, Đà Nẵng; Email: [nunth@donga.edu.vn](mailto:nunth@donga.edu.vn)

<sup>3</sup>GV Khoa Kỹ thuật xây dựng Trường Đại học Đông Á, Đà Nẵng; Email: [toaitg@donga.edu.vn](mailto:toaitg@donga.edu.vn)

\*Corresponding author

### TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, các tác giả tập trung đánh giá khả năng dự đoán chính xác của các tiêu chuẩn thiết kế cũng như một số công thức đề xuất hiện tại về khả năng chịu lửa của cột bê tông cốt thép (BTCT). Đồng thời, đề xuất công thức mới dựa trên kết quả thực nghiệm và bộ dữ liệu thực nghiệm đã thu thập được để đánh giá khả năng chịu lửa của cột BTCT. Mô hình đề xuất đơn giản hơn và có thể thực hành tính toán thuận tiện hơn so với các mô hình trước đó. Kết quả dự đoán sử dụng mô hình đề xuất cho thấy sự hiệu quả và độ chính xác cao hơn so với các mô hình hiện có. Tác động của các tham số thiết kế đến khả năng chịu lửa của cột BTCT cũng được nghiên cứu bằng cách sử dụng mô hình tham số.

**Từ khóa:** Cột bê tông cốt thép, mô hình dự đoán, khả năng chịu lửa, Eurocode 2, tham số thiết kế.

### ABSTRACT

In this study, the authors focus on evaluating the predictive accuracy of current design standards and several existing formulas for the fire resistance of reinforced concrete (RC) columns. Additionally, a new formula is proposed based on experimental results and the collected experimental dataset to assess the fire resistance of RC columns. The proposed model is simpler and offers more convenient practical calculations compared to previous models. The prediction results using the proposed model demonstrate greater efficiency and accuracy than the existing models. The effect of design parameters on the fire resistance of RC columns is also examined using a parametric study.

**Keywords:** Reinforced concrete columns, prediction models, fire resistance, Eurocode 2, design parameters.

### 1. GIỚI THIỆU

Hỏa hoạn là một thảm họa nguy hiểm, có sức tàn phá thường xuyên xảy ra và là mối đe dọa đối với sự an toàn của các công trình xây dựng (Hình 1). Nó có khả năng gây hư hỏng vật liệu, linh kiện, thậm chí dẫn đến hư hỏng hoặc sập kết cấu [1, 2]. Kết cấu BTCT thường được sử dụng trong xây dựng các tòa nhà cao tầng, trong đó cột BTCT đóng vai trò chịu trách nhiệm chịu tải trọng trong khung kết cấu. Do đó, ứng xử của các cột BTCT khi chịu lửa đặc biệt quan trọng. Vì vậy, việc nghiên cứu khả năng chịu lửa của cột BTCT có ý nghĩa hết sức quan trọng nhằm đảm bảo an toàn cho toàn bộ công trình [3]. Khả năng chịu lửa (hay chống cháy) là một trong những chỉ số quan trọng nhất để đo lường sự an toàn chống cháy của các cấu kiện, và được xác định là thời gian trong đó một cấu kiện thể hiện khả năng chống lại sự kiện liên quan đến tính toàn vẹn cấu trúc, ổn định và truyền nhiệt độ dưới điều kiện cháy.

Trong vài thập kỷ qua, nhiều nghiên cứu thử nghiệm đã kiểm tra khả năng chịu lực của cột BTCT khi chịu lửa [4–5]. Các nghiên cứu cho thấy các yếu tố như tỷ lệ tải, kích thước cột, cường độ bê tông, loại cốt liệu, hàm lượng cốt thép và kích bản cháy đều ảnh hưởng đến khả năng chịu lửa. Kodur và cộng sự [6] và Park và cộng sự [7] báo cáo rằng cột NSC chống cháy tốt hơn HSC do HSC dễ nứt nổ vì

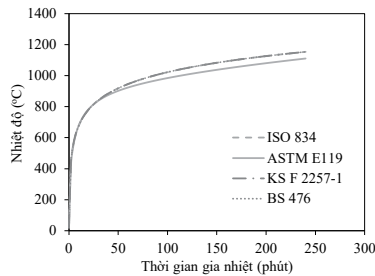
mật độ cao và khả năng thấm thấp. Ali và cộng sự [8] cũng cho rằng các yếu tố như tính chất vật liệu và điều kiện biên ảnh hưởng đến nứt vỡ do nổ. Thanh giảng bên có thể cải thiện khả năng chống cháy của cột HSC [4, 7]. Martins và cộng sự [9] và Dotreppe và cộng sự [10] phát hiện thanh có đường kính > 25 mm làm giảm khả năng chống cháy do truyền nhiệt nhanh hơn [9]. Phương pháp thí nghiệm là đáng tin cậy nhưng tốn kém và dữ liệu thực nghiệm vẫn còn hạn chế sau nhiều năm nghiên cứu.



Hình 1. Phá hoại của cột BTCT do hỏa hoạn gây ra [1]

Gần đây, nhiều phương pháp đã được đề xuất để dự đoán khả năng chống cháy của cột BTCT. Shah và Sharma [11] giới thiệu mô hình thực nghiệm đánh giá khả năng chịu lực của cột khi chịu lửa, xem xét ảnh hưởng của cốt thép ngang. Mahmoud và cộng sự [12] giới thiệu một phương pháp đơn giản hóa nhằm khắc phục những hạn chế của phương pháp EC2 [13], bằng cách phát triển một mô hình mới dựa trên đường cong khả năng chống cháy của cột BTCT, giúp xác định chính xác hơn khả năng chống cháy của cột. Một số quy chuẩn như AS3600 [14] và DBJ/T 15-18 [15] đã phát triển phương pháp thiết kế đơn giản sau thử nghiệm chịu lửa tiêu chuẩn. Tuy nhiên, các phương pháp này chưa xem xét đầy đủ các yếu tố quan trọng như tải trọng, thời gian cháy, vật liệu và chi tiết gia cố, dẫn đến ước tính thiếu chính xác. EC2 [13] cung cấp cách tiếp cận đơn giản hóa và nâng cao, xem xét các yếu tố như kích thước cột và số lượng cốt thép, nhưng phạm vi ứng dụng vẫn bị hạn chế do thiếu dữ liệu thử nghiệm đầy đủ, mặc dù đã được xác thực với 80 cột.

Nghiên cứu tại Việt Nam đã chỉ ra sự thiếu hụt các nghiên cứu thực nghiệm cũng như lý thuyết về đánh giá khả năng chịu lửa của các cột BTCT, và hiện chưa có các thí nghiệm trực tiếp hay lý thuyết nào được thực hiện và công bố. Thay vào đó, các nhà nghiên cứu Việt Nam, chẳng hạn như Khổng và Vũ [16] trình bày nguyên tắc thiết kế chung và phương pháp tính toán cho cấu kiện cột BTCT theo tiêu chuẩn EC2 về thiết kế kết cấu cột BTCT trong điều kiện cháy, hoặc xây dựng biểu đồ tương tác của cột BTCT tại các thời điểm 30, 60, 90 và 120 phút của vụ cháy theo tiêu chuẩn EC2 thông qua phần mềm sử dụng ngôn ngữ lập trình Embarcadero Delphi, và đồng thời đưa ra một số khuyến cáo về khả năng chịu lực của cột BTCT ở nhiệt độ cao [17].



Hình 1. Chế độ gia nhiệt theo các tiêu chuẩn khác nhau

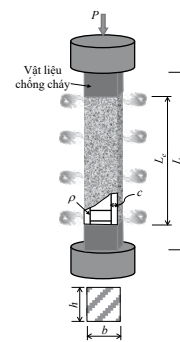
Tổng quan tài liệu cho thấy rằng mặc dù các mô hình đã được xây dựng để đánh giá khả năng chịu lửa của cột BTCT, hiệu quả của chúng chưa được đánh giá cao. Đặc biệt, trong bối cảnh nghiên cứu của Việt Nam, việc xây dựng các mô hình này chưa được quan tâm mà chỉ áp dụng các tiêu chuẩn hiện có, vốn thiếu sự chính xác khi so sánh với kết quả thực nghiệm. Do đó, trong nghiên cứu này, các tác giả sẽ tập trung đánh giá khả năng dự đoán chính xác của các tiêu chuẩn thiết kế cũng như một số công thức để xuất hiện tại về khả năng chịu lửa của cột BTCT. Đồng thời, đề xuất công thức mới dựa trên các công thức hiện và bộ

dữ liệu thực nghiệm đã thu thập được để đánh giá chính xác khả năng chịu lửa của cột BTCT.

## 2. THU THẬP SỐ LIỆU

### 2.1 Xây dựng cơ sở dữ liệu từ thực nghiệm

Nhiều thí nghiệm chịu lửa đã được thực hiện để nghiên cứu xem các thông số khác nhau ảnh hưởng như thế nào đến khả năng chống cháy của cột BTCT. Từ nguồn tài liệu hiện có, một cơ sở dữ liệu bao gồm 119 mẫu thí nghiệm đã được sưu tầm để dự báo khả năng chịu lửa của cột BTCT. Tuy nhiên, sau quá trình đánh giá và loại bỏ những dữ liệu thiếu tin cậy, 81 mẫu thí nghiệm đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Đáng chú ý là mặc dù các đường cong nhiệt-độ-thời gian khác nhau được sử dụng trong các thí nghiệm, bao gồm ISO 834 [18], ASTM E 119 [19], BS 476 [20] và KS F 2257-1 [21], chế độ gia nhiệt phản ánh nhiệt độ khí ga danh nghĩa không khác biệt đáng kể như mô tả trong Hình 2. Cũng cần lưu ý rằng trên thực tế, nhiệt trong lò có thể biểu hiện sự thay đổi do các yếu tố như thành phần nhiên liệu, tốc độ dòng khí, độ ẩm, thiết kế lò và cách nhiệt. Tuy nhiên, từ kết quả trình bày trong [1, 3, 6], sự khác biệt giữa nhiệt độ khí danh nghĩa và nhiệt lượng thực tế trong lò được nhận thấy là không đáng kể. Vì vậy, trong nghiên cứu này giả định rằng nhiệt lượng thực tế trong lò gần như lý tưởng và gắn chặt với nhiệt độ danh nghĩa của khí ga. Do đó, tất cả các mẫu thử trong cơ sở dữ liệu có thể được sử dụng để ước tính và so sánh trong cùng điều kiện. Hơn nữa, các cột được sử dụng trong thí nghiệm có tiết diện hình vuông và cả bốn mặt cột đều chịu lửa. Các mẫu thí nghiệm bao gồm nhiều tham số thiết kế với biên độ rộng, như thể hiện ở Bảng 1: chiều dài cột tiếp xúc với lửa ( $L_e$ ) dao động từ 2.1m đến 4.76m; chiều rộng ( $b$ ) mặt cắt cột từ 200 đến 406mm; tỷ lệ cốt thép dọc ( $\rho$ ) dao động từ 0.893 đến 6.981%; bề dày lớp bê tông bảo vệ ( $c$ ) dao động từ 25 đến 48 mm;  $n$  là số cây thép trong cột dao động từ 4 đến 20 cây; cường độ chịu nén của bê tông ( $f'_c$ ) dao động từ 24.4 đến 120.0 MPa; và tỷ số tải trọng ( $LR$ , được định nghĩa là tỷ số giữa tải trọng tác dụng và khả năng chịu tải của cột BTCT nằm trong khoảng từ 0.2 đến 0.9. Trong khi đó, khả năng chống cháy ( $FR_{exp}$ ) thu được từ kết quả thí nghiệm là rất khác nhau, dao động từ 34 đến 456 phút, do các thông số thí nghiệm có biên độ dao động lớn. Hình 3 thể hiện cấu tạo điển hình của các cột BTCT trong cơ sở dữ liệu.



Hình 3. Cấu tạo điển hình cột BTCT.

Bảng 1: Tóm tắt các thông số thí nghiệm trong cơ sở dữ liệu về cột BTCT chịu lửa

Chỉ số thống kê	$L_e$ (m)	$b$ (mm)	$n$	$\rho$ (%)	$c$ (mm)	$f'_c$ (MPa)	$LR$	$FR_{exp}$ (min)
Max	4.76	406	20	6.98	48	120	0.9	456
Min	1.7	200	4	0.89	25	24.4	0.21	34
Range	3.06	206	16	6.09	23	95.6	0.69	422
Mean	3.51	288.73	6.20	2.36	35.35	39.53	0.62	152.61
SD	0.91	52.02	3.54	1.34	8.91	19.42	0.19	91.85

Trong đó: Max = giá trị lớn nhất, min = giá trị nhỏ nhất, range = khoảng cách giữa max và min, Mean = giá trị trung bình; SD = độ lệch chuẩn

**2.2 Các tham số ảnh hưởng đến khả năng chịu lửa của cột BTCT**

Thông qua các nghiên cứu số và thực nghiệm, nhiều yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống cháy của cột BTCT đã được nhiều nhà nghiên cứu khám phá. Từ kết quả thử nghiệm thu được, có thể thấy rõ rằng khả năng chống cháy của cột BTCT bị ảnh hưởng rất lớn bởi độ lớn của tải trọng tác dụng, thường được định lượng bằng tỷ số tải trọng ( $LR$ ) [22]. Trên thực tế, độ lớn của tải trọng tác dụng có tác động gián tiếp đến khả năng chống cháy của cột BTCT, điều này có thể hiểu được vì cường độ của cột bị giảm đáng kể khi nhiệt độ tăng [23]. Trong khi đó, Silva [24] chỉ ra rằng khả năng chống cháy tăng theo kích thước của cột. Tuy nhiên, đối với trường hợp cột sử dụng bê tông cường độ cao (HSC) các đặc tính hình học của cột bao gồm kích thước mặt cắt ngang ( $b \times h$ , chiều rộng  $\times$  chiều cao), chiều dài và các điều kiện chống đỡ (gối tựa đơn-gối tựa đơn, gối tựa đơn-ngàm và ngàm-ngàm) cũng đóng một vai trò quan trọng trong việc xác định khả năng chống cháy của cột BTCT. Điều này chủ yếu liên quan đến khả năng mất ổn định của cột BTCT với độ cứng bị suy giảm sau thời gian dài tiếp xúc với lửa. Trên thực tế, ảnh hưởng của các đặc tính hình học trên có thể được kết hợp bằng cách sử dụng hệ số gọi là tỷ lệ độ mảnh ( $SR$ ): tỷ lệ độ mảnh càng lớn thì khả năng chống cháy càng thấp, do mất khả năng chống oằn [25], được cho là có khả năng nổ vỡ cao hơn, mặt cắt ngang lớn hơn có thể làm tăng nguy cơ nứt vỡ do nhiệt gây nổ, do đó làm giảm khả năng chống cháy của chúng. Điều này được cho là do mối tương quan trực tiếp giữa kích thước mẫu vật và sự vận chuyển nhiệt và độ ẩm bên trong cấu trúc, cùng với khả năng lưu trữ năng lượng tăng lên của các cấu trúc lớn hơn, như Kodur và Phan [26] đã giải thích. Cường độ chịu nén của bê tông ( $f'_c$ ) cũng ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lửa của cột BTCT: Cột sử dụng bê tông thường (NSC) có khả năng chống cháy lâu hơn cột bê tông cường độ cao (HSC) do ít bị nứt vỡ hơn [7, 8, 27]. Ngoài ra, việc sử dụng tỷ lệ cốt thép dọc ( $\rho$ ) cao hơn có thể nâng cao khả năng chống cháy của cột BTCT [11, 7]. Tuy nhiên, việc sử dụng các thanh cốt thép dọc có kích thước lớn hơn có thể làm giảm khả năng chống cháy [7, 8].

Về mặt lý thuyết, điều quan trọng cần lưu ý là việc sử dụng các tham số thiết kế với kích thước hoặc hàm lượng lớn hơn nhiều so với mức cho phép có thể làm giảm khả năng chống cháy trong một số trường hợp nhất định. Điều này bao gồm các trường hợp lớp bê tông bảo vệ bị giảm, nguy cơ nổ tung, biến dạng nhiệt và biến dạng trong đám cháy tăng lên [28]. Lớp bê tông bảo vệ ( $c$ ) cũng là thông số chi phối ảnh hưởng đến khả năng chống cháy của cột BTCT và nó liên quan đến nhiều quy chuẩn thiết kế hiện hành [29]. Việc sử dụng lớp phủ dày hơn có thể trì hoãn sự tăng nhiệt độ của thanh cốt thép và do đó kéo dài thời gian hư hỏng.

**3. ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG DỰ ĐOÁN CỦA CÁC MÔ HÌNH TÍNH TOÁN HIỆN TẠI**

**3.1 Các mô hình tính toán**

Trong nghiên cứu này, ba công thức khác nhau nêu trong Eurocode 2 [13], AS3600 [14] và Silva [24] đã được sử dụng để đánh giá khả năng chống cháy của cột BTCT. Eurocode 2 [13] giới thiệu bộ phương trình phân tích để tính toán khả năng chống cháy ( $FR$ ) của cột BTCT trong điều kiện tiếp xúc với lửa tiêu chuẩn. Các phương trình này tính đến nhiều thông số thiết kế như số lượng và vị trí cốt thép dọc, tỷ lệ tải trọng, kích thước cột, độ dày lớp bê tông bảo vệ và chiều dài hiệu dụng.

$$FR = 120 \times \left( \frac{R_\mu + R_a + R_l + R_b + R_n}{120} \right)^{1.8} \tag{1a}$$

$$R_\mu = 83 \left[ 1 - \mu_{fi} \left( \frac{1 + \omega}{\frac{0.85}{\alpha_{cc}} + \omega} \right) \right] \tag{1b}$$

$$R_a = 1.6(c_1 - 30) \tag{1c}$$

$$R_l = 9.6(5 - l_{0,fi}) \tag{1d}$$

$$R_b = 0.09b' \tag{1e}$$

$$R_n = \begin{cases} 0 & \text{for } n = 4 \text{ (corner bars only)} \\ 12 & \text{for } n > 4 \end{cases} \tag{1f}$$

trong đó,  $\mu_{fi}$  là hệ số suy giảm đối với mức tải trọng thiết kế trong trường hợp cháy;  $\omega = (A_s f_y / A_c f'_c)$  là tỷ số cốt thép cơ học ở điều kiện nhiệt độ thường;  $\alpha_{cc}$  là hệ số cường độ chịu nén;  $a$  (mm) là khoảng cách từ trục đến cốt thép dọc,  $25\text{mm} \leq a \leq 80\text{mm}$ ;  $l_{0,fi}$  là chiều dài hữu hiệu của cột trong điều kiện cháy,  $2\text{m} \leq l_{0,fi} \leq 6\text{m}$ ;  $n$  là số lượng cốt thép dọc; và  $b' = (2A_c / (b + h))$  tính cho cột hình chữ nhật hoặc đường kính cột tròn,  $200\text{mm} \leq b' \leq 450\text{mm}$ , và  $h \leq 1.5b$ .

AS3600 [14] cung cấp một công thức đơn giản để đánh giá khả năng chống cháy của cột BTCT, xem xét ảnh hưởng của lớp bê tông bảo vệ, cường độ chịu nén của bê tông, kích thước mặt cắt ngang của cột, tải trọng tác dụng và chiều dài hữu hiệu. Phương trình được thể hiện như sau:

$$FR = \frac{k \times f^{1.3} \times D_{min}^{3.3} \times D_{max}^{1.8}}{10^5 \times N^{1.5} \times L_e^{0.9}} \tag{2}$$

trong đó,  $k$  là hệ số xét đến ảnh hưởng của tỷ lệ cốt thép dọc ( $k = 1.5$  khi  $\rho < 0.025$  và  $k = 1.7$  đối với các trường hợp khác);  $D_{min}$  (tính bằng mm) là kích thước nhỏ hơn của cột hình chữ nhật;  $D_{max}$  (tính bằng mm) là kích thước lớn hơn của cột hình chữ nhật;  $N$  (tính bằng kN) là lực dọc trục được thiết kế cho trạng thái giới hạn cháy; và  $L_e$  (tính bằng mm) là chiều dài hiệu dụng của cột.

Silva [24] đã phát triển một công thức đơn giản hóa để ước tính khả năng chống cháy của cột BTCT bằng cách điều chỉnh các phương trình thiết kế được nêu trong Eurocode 2 [13]. Theo kết quả nghiên cứu của Silva [24], khả năng chống cháy của cột BTCT bị ảnh hưởng chủ yếu bởi bốn thông số là kích thước mặt cắt ngang của cột, khoảng cách từ tâm các thanh cốt thép đến bề mặt được gia nhiệt gần nhất ( $c_1$ ), chiều dài hiệu dụng của cột và tải trọng tác dụng. Do đó, công thức tính khả năng chịu lửa được xây dựng như sau:

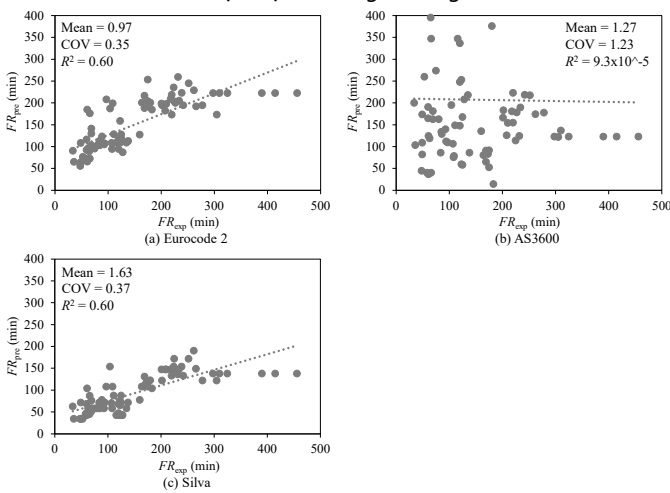
$$FR = \left( 3 + \frac{h}{50 + \left( \frac{h}{b} + 1 \right)} + \frac{c_1}{5} - 1.5l_{0,fi} + 10N \right)^{1.8} \tag{3}$$

**3.2 Đánh giá kết quả**

Hình 4 so sánh kết quả thu được từ thí nghiệm và từ các mô hình tính toán hiện có. Các kết quả chỉ ra rằng mô hình AS3600 [14] và Silva [24] đưa ra ước tính khá an toàn về khả năng chịu lửa của cột BTCT (với giá trị trung bình của tỉ lệ  $FR_{exp}/FR_{pre}$  lần lượt là 1.27 và 1.63), trong khi EC2 [13] thể hiện kết quả dự đoán không bảo toàn với giá trị trung bình giá trị 0.97. Cùng với đó là các giá trị hệ số biến thiên (COV) tương đối lớn: 1.23 đối với AS3600 [14], 0.37 đối với Silva [24] và 0.35 đối với EC2 [13], và các hệ số xác định ( $R^2$ ) lần lượt là  $9.3 \times 10^{-5}$ , 0.60, và 0.60 tương ứng với các mô hình AS3600 [14], Silva [24] và EC2 [13]. Điều đó cho thấy các phương trình thiết kế hiện tại thể hiện mức độ chính xác tương đối thấp và độ phân tán cao đối với cơ sở dữ liệu nhất định. Đáng chú ý, mặc dù AS3600 có khả năng cung

cấp các dự đoán thận trọng nhưng nó lại thể hiện sự phân tán đáng kể trong kết quả, với các giá trị  $FR_{exp}/FR_{pre}$  nằm trong khoảng từ 0.09 đến 12.86. Điều quan trọng cần nhấn mạnh là các mô hình dự đoán do AS3600 [14] và Silva [24] đề xuất về cơ bản là các mô hình đơn giản hóa dựa trên các công thức hồi quy, trái ngược với mô hình cơ học được mô tả trong EC2 [13]. Cụ thể, EC2 [13] và Silva [24] có thể chứng minh khả năng thích hợp để dự đoán khả năng chống cháy của cột BTCT trong phạm vi lên tới 4 giờ (240 phút). Tuy nhiên, sau 4 giờ chịu lửa thì kết quả dự đoán của EC2 và Silva có vẻ như đã không còn chính xác và đánh giá hơi thấp khả năng chịu lửa của cột BTCT. AS3600 [14] thể hiện xu hướng tương tự, nhưng có độ phân tán lớn hơn trong vòng 4 giờ đầu tiên so với EC2 [13].

Nhìn chung, những quan sát này cho thấy rằng cần phải cải tiến hơn nữa để nâng cao hiệu quả của các phương trình cho mục đích thiết kế. Tuy nhiên, điều quan trọng cần lưu ý là ba phương trình thiết kế chủ yếu tính đến thời gian tiêu chuẩn—đường cong nhiệt độ, có thể hơi khác so với nhiệt thực tế trong lòng.

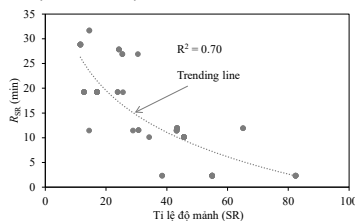


Hình 4. So sánh kết quả dự đoán của các mô hình hiện tại với kết quả từ thực nghiệm.

#### 4. ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN KHẢ NĂNG CHỊU LỬA CỦA CỘT BTCT

##### 4.1 Mô hình đề xuất

Trong nghiên cứu này, để cải thiện độ chính xác trong các kết quả dự đoán khả năng chịu lửa của cột BTCT, một công thức mới đã được đề xuất dựa vào các kết quả thu được từ thực nghiệm với các giá trị đầu vào là các tham số ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu lửa của cột BTCT, bao gồm: hàm lượng cốt thép dọc ( $\rho$ ), bề dày lớp bê tông bảo vệ ( $c$ ), cường độ chịu nén của bê tông ( $f'_c$ ), tỉ lệ độ mảnh ( $SR$ ), tỉ lệ tải trọng tác dụng ( $LR$ ). Đặc biệt chú ý rằng ảnh hưởng của tỉ lệ độ mảnh được đề xuất dựa vào kết quả thu được từ nghiên cứu của Kodur và cộng sự [25]. Đồng thời, trong công thức tính tỉ lệ độ mảnh cũng đã kể đến chiều dài hữu dụng của cột và kích thước mặt cắt ngang của cột, từ đó làm giảm bớt quá trình tính toán. Hình 5 thể hiện mối tương quan giữa  $R_{SR}$  và  $SR$ . Kết quả cho thấy  $R_{SR}$  và  $SR$  có mối liên quan cao với hệ số xác định  $R^2 = 0.70$ .



Hình 5. Mối tương quan giữa khả năng chịu lửa của cột do tỉ lệ độ mảnh ( $R_{SR}$ ) và tỉ lệ độ

mảnh ( $SR$ )

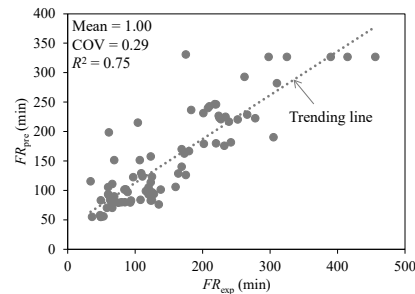
Mô hình đề xuất dự đoán khả năng chịu lửa của cột BTCT được thể hiện trong công thức (4) dưới đây:

$$FR = \alpha \times \rho^\beta \times c^\gamma \times f'_c{}^\delta \times SR^\theta \times LR^\epsilon \quad (4)$$

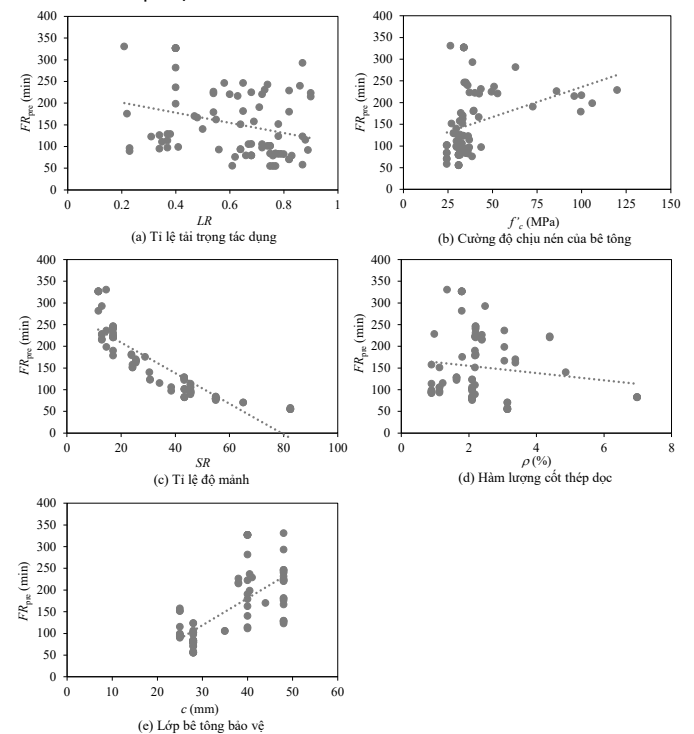
Để xác định các tham số này, phương pháp tối ưu hoá bằng cách giảm thiểu sai số bình phương trung bình (RMSE) giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm được sử dụng. Kết quả phân tích cho thấy, với  $\alpha = 1241$ ,  $\beta = -0.09$ ,  $\gamma = 0.4$ ,  $\delta = -0.24$ ,  $\theta = -0.8$ ,  $\epsilon = -0.05$ , RMSE đạt giá trị nhỏ nhất (= 45.98 min).

##### 4.2 Đánh giá khả năng chịu lửa của cột BTCT theo công thức đề xuất

Hình 6 thể hiện mối liên hệ giữa kết quả dự đoán từ công thức đề xuất (4) và kết quả thực nghiệm. Kết quả thu được cho thấy công thức đề xuất có thể cải thiện sâu độ chính xác dự đoán khả năng chịu lửa của cột BTCT với giá trị trung bình của tỉ lệ  $FR_{exp}/FR_{pre}$  là Mean = 1.00, COV = 0.29, và  $R^2 = 0.75$ . Kết quả này cải thiện 3.1% về giá trị trung bình của  $FR_{exp}/FR_{pre}$ , 20.7% về hệ số biến thiên (COV) và 25% về hệ số độ xác định ( $R^2$ ) so với kết quả dự đoán bằng mô hình EC2 [13].



Hình 6. Kết quả dự đoán của mô hình đề xuất



Hình 7. Ảnh hưởng của các tham số thiết kế đến khả năng chịu lửa của cột BTCT

Sử dụng mô hình đề xuất, một mô hình tham số đã được thực hiện để điều tra sự ảnh hưởng của các tham số thiết kế đến khả năng chịu lửa của các cột BTCT. Phân tích này nhằm mục đích hiểu rõ hơn về mối quan hệ giữa các tham số thiết kế và khả năng chịu lửa của cột BTCT, xác định các tham số có tác động đáng kể nhất đến kết quả



này, từ đó lựa chọn cấu tạo và phương án thiết kế cột BTCT một cách hợp lý nhất. Kết quả của mô hình tham số được thể hiện trong Hình 7.

Các thảo luận chi tiết cho từng tham số như sau. Khả năng chịu lửa của cột BTCT được phát hiện là tỉ lệ nghịch với tỉ lệ tải trọng tác dụng ( $LR$ , Hình 7(a)), tỉ lệ độ mảnh ( $SR$ , Hình 7(c)) và hàm lượng cốt thép dọc ( $\rho$ , Hình 7(d)). Điều này có nghĩa là nếu  $LR$ ,  $SR$  và  $\rho$  tăng lên thì khả năng chịu lửa của cột BTCT sẽ giảm đi. Ali và cộng sự [8] đã chứng minh rằng việc sử dụng tải trọng tác dụng cao hơn có thể gây ra thời gian bong tróc và mức độ bong tróc cao hơn. Tương tự như vậy, khả năng chống cháy giảm đáng kể khi tỉ lệ độ mảnh ( $SR$ ) của các cột tăng lên, Điều này là do tỷ lệ độ mảnh cao hơn có thể gây ra mất khả năng chống uốn cong đáng kể. Thêm nữa, ở nhiệt độ cao, thép cho thấy cường độ giảm nhanh hơn bê tông, dẫn đến giảm khả năng chống cháy của cột RC [6, 25]

Trong khi đó, khả năng chịu lửa của cột BTCT được phát hiện là tỉ lệ thuận với cường độ chịu nén của bê tông ( $f'_c$ , Hình 7(b)) và lớp bê tông bảo vệ ( $c$ , Hình 7(e)). Điều này là do khi cường độ bê tông tăng lên, cường độ chịu kéo của bê tông cũng tăng lên và do đó làm giảm tỉ lệ bị bong tróc của cột. Trong trường hợp của lớp bê tông bảo vệ, tăng  $c$  làm tăng khả năng chịu lửa của cột BTCT. Điều này là do lớp bê tông bảo vệ đóng vai trò quan trọng trong việc trì hoãn sự gia tăng nhiệt độ trong các thanh cốt thép và do đó kéo dài thời gian phá hủy.

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này giới thiệu một mô hình mới để đánh giá khả năng chịu lửa của cột BTCT, dựa trên 81 mẫu thí nghiệm. Các tham số ảnh hưởng như tỉ lệ độ mảnh, lớp bê tông bảo vệ, hàm lượng cốt thép dọc, và tỉ lệ tải trọng đã được đánh giá và tích hợp vào công thức mới, giúp đơn giản hóa tính toán nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác. Kết quả cho thấy mô hình mới dự đoán hiệu quả với Mean = 1.00, COV = 0.29 và  $R^2 = 0.75$ , vượt trội so với các mô hình hiện có (EC2, AS3600, Silva). So với EC2, mô hình cải thiện 3.1% về giá trị trung bình, 20.7% về hệ số biến thiên, và 25% về  $R^2$ . Nghiên cứu tham số chỉ ra rằng cường độ bê tông và lớp bảo vệ có tác động tích cực, trong khi tỉ lệ độ mảnh, tải trọng và hàm lượng cốt thép có tác động tiêu cực đến khả năng chịu lửa.

Nghiên cứu này đã góp phần quan trọng trong việc nâng cao hiểu biết về khả năng chịu lửa của cột bê tông cốt thép (BTCT) và ảnh hưởng của các tham số thiết kế đến ứng xử của cột dưới tác động của lửa. Tuy nhiên, vẫn còn những yếu tố cần được xem xét và đánh giá kỹ lưỡng hơn trong các nghiên cứu tiếp theo, chẳng hạn như ảnh hưởng của độ lệch tâm của tải trọng, hàm lượng cốt đai và kích thước của cốt thép dọc. Điều này chủ yếu do thiếu hụt dữ liệu thực nghiệm, vì vậy việc tăng cường số liệu thí nghiệm là một khía cạnh cực kỳ quan trọng trong hướng nghiên cứu này.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Truong, G.T., Baek, S.-W., Im, H., Kim, C.-S., *Fire resistance of semi-precast composite columns subjected to axial load*, Structures, 2024, **59**:105697.
2. Du, P., Yang, Y., Tan, K.T., *Fire characteristics and design of hybrid fiber-reinforced high-performance concrete columns subjected to uniaxial bending*, Structure Eng, 2022, **251**:113425.
3. Raut, N., Kodur, V., *Behavior of reinforced concrete columns when subjected to biaxial bending caused by fire*, ACI J Struct, 2011, **108**(5):610–619.
4. Chandra, S., Sharma, U.K., Green, M., Gales, J., Bhargava P., *Fire performance of corroded reinforcement concrete columns*, Fire Tech, 2024, **60**:2265-2295.
5. Abdurraheem, M.S., Kadhum, M.M., *Experimental and numerical study on post-fire behavior of reinforced reactive powder concrete columns subjected to concentric loading*, Constr Build Mater, 2018, **168**:877-892.

6. Kodur, V., McGrath, R., *Fire resistance of high strength concrete columns*, Fire Medicine, 2003, **39**(1):73-87.
7. Park, J.E., Shin, Y.S., Kim, H.S., *Factors affecting the thermal behavior of high-strength concrete (HSC) columns when subjected to fire*, Procd Eng, 2011, **14**:427-433.
8. Ali, F., Nadjai, A., Choi, S., *Numerical and experimental study on the behavior of high-strength concrete columns in fire*, Struct Eng, 2010, **32**(5):1236-1243.
9. Martins, A.M.B., Rodrigues, J.P.C., *Fire resistance of reinforced concrete columns with elastically restrained thermal elongation*, Eng Struct, 2010, **32**(10):3330-3337.
10. Dotreppa, J.C., Franssen, J.M., Bruls, A., Baus, R., Vandeveld, P., Minne, R., van Nieuwenburg, D., Lambotte, H., *Experimental research on the determination of the main parameters affecting the behavior of reinforced concrete columns under fire conditions*, Mag Concr Res, 1997, **49**(179):117-127.
11. Shah, A.H., Sharma, U.K., *Fire resistance and spalling resistance of confined concrete columns*, Constr Build Mater, 2017, **156**:161-174.
12. Mahmoud, K.A., *A simplified method for determining fire resistance of RC columns using fire-resistance-column-curves approach*, Fire Tech, 2024, **60**:3443-3474.
13. CEN (European Committee for Standardization), *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Parts 1–2: General Rules - Design of Fire-Resistant Structures*, EN 1992–1–2, Brussels (Belgium), 2004.
14. AS 3600, *Concrete Structures*, Australian Standards Association, 2009.
15. DBJ/T 15-81-2011, *Rules for Fire-Resistant Design of Indoor Concrete Structures*, China Architecture & Construction Publishing House, 2011.
16. Khổng, T.T., Vũ, C.T., *Tính toán khả năng chịu lửa của cột bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn EN 1992-1-2*, Tạp Chí Vật Liệu & Xây Dựng, 2021, p. 56–61.
17. Nguyễn, T.T., Nguyễn, T.N., *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, 2016, **28**:55–61.
18. ISO 834–1, *Fire Resistance Testing - Components of Building Structures - Part 1: General Requirements*, International Organization for Standardization, 1999.
19. ASTM, *Standard Test Method for Fire Testing of Materials and Construction*, E119-88, American Society for Testing and Materials, 1988.
20. BSI, *Fire Testing of Building Materials and Structures*, BS 476 (Parts 1-23), British Standards Institution, UK, 1987.
21. KS, *Test Method for Fire Resistance of Building Structural Components - General Requirements (KS F 2257-1)*, Korean Institute of Technology and Standards, Seoul, Korea, 2019.
22. Lie, T.T., *Fire resistance of reinforced concrete columns: parametric study*, J Fire Prot Eng, 1989, **1**(4):121-129.
23. Naser, M.Z., Kodur, V.K.R., *Explainable machine learning using real, synthetic and augmented fire tests to predict fire and spalling resistance of RC columns*, Struct Eng, 2022, **253**:113824.
24. Silva, V.P., *Fireproof design of reinforced concrete columns. An alternative to the tabular method is presented according to the Brazilian standard NBR 15200:2004*, Ibracon Struct Mater J, 2008, **1**(4):331-392.
25. Kodur, V.K.R., Raut, N.K., Mao, X.Y., Khaliq, W., *Simplified method for evaluating the residual strength of reinforced concrete columns exposed to fire*, Mater Struct, 2013, **46**:2059-2075.
26. Kodur, V.K.R., Phan, L., *Important factors governing the fire performance of high-strength concrete systems*, J Fire, 2007, **42**:482-488.
27. Lie, T.T., Lin, T.D., *Fire resistance of reinforced concrete columns*, Fire Safety: Science and Engineering, American Society for Testing and Materials (ASTM) STP 882, 1985, p. 176-205.
28. Rafik, S.A., Hashmi, A.K., *Evaluation of fire resistance of reinforced concrete columns*, Int Res J Eng Technol, 2021, **8**(4):1881-1887.
29. Buch, S.H., Sharma, U.K., *Fire resistance of reinforced concrete columns: A systematic review*, in: Gillie & Wang (Eds), Applications of Fire Engineering, University of Manchester, UK, Taylor & Francis Group, 2017, p. 141-150.