

# XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA KHUNG THÉP TIỀN CHẾ MỘT TẦNG TRONG ĐIỀU KIỆN CHỊU LỬA THEO PHƯƠNG PHÁP LÝ THUYẾT VÀ MÔ PHỎNG SỐ

## DETERMINATION OF FIRE RESISTANCE OF SINGLE-STORY PRE-ENGINEERED STEEL FRAMES ACCORDING TO SIMPLIFIED CALCULATION AND SIMULATION

PHẠM THỊ NGỌC THU<sup>a,\*</sup>, NGUYỄN TRẦN HIẾU<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

\*Tác giả đại diện: Email: thupnt@huce.edu.vn

Ngày nhận 17/01/2025, Ngày sửa 18/02/2025, Chấp nhận 25/02/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol1-4>

**Tóm tắt:** Khung nhà thép tiền chế là một giải pháp phổ biến, được ứng dụng nhiều trong các công trình công nghiệp bởi khả năng chịu lực tốt và tính linh hoạt trong quá trình thi công, lắp dựng. Với hệ khung một tầng, cấu kiện cơ bản sẽ là các dầm (kèo), cột thép tiết diện chữ I định hình hoặc tổ hợp. Trong điều kiện chịu nhiệt độ cao khi cháy (điều kiện chịu lửa), khả năng chịu lực của các cấu kiện tăng rõ rệt khi được bọc bảo vệ bằng các vật liệu chống cháy. Có nhiều phương pháp để phân tích ứng xử của các cấu kiện khung thép tiền chế chịu tải trọng trong điều kiện chịu lửa. Bài báo giới thiệu cách xác định khả năng chịu lực của cấu kiện dầm, cột thép trong khung bằng phương pháp tính đơn giản hóa theo EN 1993-1-2 và phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm mô phỏng IDEA StatiCa. Một ví dụ số được thực hiện áp dụng cho các trường hợp bọc bảo vệ khác nhau để so sánh thời gian và giá trị nhiệt độ thu được theo hai phương pháp trên.

**Từ khóa:** khung thép tiền chế, khả năng chịu lửa, phương pháp tính đơn giản, phương pháp mô phỏng số, EN 1993-1-2, IDEA StatiCa.

**Abstract:** Pre-engineered steel frames are used popularly in industrial buildings due to their good load-bearing capacity and flexibility in assembly. For single-storey steel frames, the basic components are I-section beams (raftes) and columns. At elevated temperature (in fire), the load-bearing capacity of these components increases markedly when they are protected by fireproof materials. There are many methods to analyze the behavior of them in fire. A simplified calculation in accordance with EN 1993-1-2 and simulation using IDEA StatiCa program to determine fire resistance of beams and columns in single-storey pre-engineered steel frames are presented in the paper. Examples are implemented for different protection solutions to compare obtained values of time and temperatures from two these methods.

**Keywords:** pre-engineered steel frame, fire resistance, simplified calculation, simulation, EN 1993-1-2, IDEA StatiCa.

### 1. Giới thiệu

Khung nhà thép tiền chế một tầng phổ biến hiện nay được cấu tạo bởi các cấu kiện kèo đỡ mái, cột thép tiết diện chữ I định hình hoặc tổ hợp. Với giải pháp mái lợp tôn có trọng lượng nhẹ, các cấu kiện được tính toán làm việc chính trong mặt phẳng khung, trạng thái làm việc ngoài mặt phẳng khung được đảm bảo bởi các cấu kiện theo phương dọc nhà như hệ xà gồ đỡ mái tôn và các hệ giằng kèo, giằng cột.

Trong trường hợp chịu lửa, kích bản cháy phổ biến trong không gian nhà là ngọn lửa phát triển từ dưới lên, tác động trực tiếp vào tiết diện dầm và cột thép. Khi các cấu kiện thép không được bọc bảo vệ,... nhiệt độ từ đám cháy trong cấu kiện phát triển rất nhanh và các cấu kiện thép giảm khả năng chịu lực với một tốc độ tương ứng. Để tăng khả năng chịu lực cho dầm, cột thép trong điều kiện chịu lửa, các giải pháp bọc dầm, cột thép bằng các vật liệu cách nhiệt như sơn chống cháy, vữa chống cháy, thạch cao chống cháy,... được sử dụng. Về hình thức bọc bảo vệ, có thể kể đến hai dạng bọc hiện đang được sử dụng nhiều cho các cấu kiện khung thép tiền chế là bọc bảo vệ dạng hộp và bọc bảo vệ theo chu vi.

Trong quy trình thiết kế chịu lửa, các cấu kiện dầm, cột được thiết kế phải thỏa mãn khả năng chịu lực (ký hiệu bằng chữ R), tính toàn vẹn (E) và khả năng cách nhiệt (I) [1,5]. Hiện nay, có nhiều phương pháp được nghiên cứu để xác định khả năng chịu lực của cấu kiện thép trong điều kiện chịu lửa, trong đó phương pháp tính toán đơn giản hóa được ứng dụng khá phổ biến cho các cấu kiện riêng lẻ hoặc kết cấu khung đơn giản [5]. Theo phương pháp này, các công thức đơn giản hóa được đưa ra để xác định

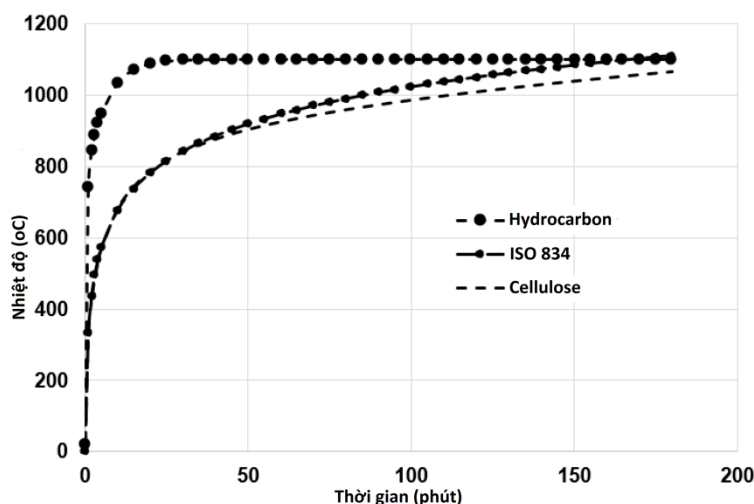
mức độ tăng nhiệt bên trong cấu kiện theo thời gian, xác định giá trị nhiệt độ giới hạn, thời gian chịu lửa giới hạn, nội lực tới hạn của từng cấu kiện.

Quá trình truyền nhiệt được mô tả từ môi trường bên ngoài qua lớp bảo vệ vào bên trong cấu kiện. Nhiệt độ môi trường được xác định dựa trên mô hình cháy danh nghĩa biểu diễn mối quan hệ nhiệt độ-thời gian trong quá trình cháy... Đường cong nhiệt độ-

thời gian dựa trên mô hình cháy danh nghĩa trong ISO được xây dựng dựa trên cơ sở các đám cháy của vật liệu hydrocarbon và cellulose (Hình 1) theo công thức [2,6]:

$$T = 345 \log_{10}(8t+1) + 20 \quad (1)$$

trong đó:  $T$  là nhiệt độ thu được ( $^{\circ}\text{C}$ ) tại thời điểm  $t$  (phút).



Hình 1. Mối quan hệ nhiệt độ môi trường - thời gian theo ISO 834

Bên cạnh đó, phương pháp tính nâng cao như phương pháp mô phỏng số dựa trên lý thuyết phân tử hữu hạn [5,7,8] cũng được áp dụng vì tính chính xác cao trong các kết quả thu được. Đây là phương pháp phức tạp hơn khi có thể phân tích các ứng xử cơ nhiệt của riêng từng cấu kiện, một phần hay toàn bộ hệ kết cấu chịu lực trong điều kiện chịu lửa. Trong phạm vi bài báo, quy trình tính toán các cấu kiện của khung thép tiền chế theo hai phương pháp này được trình bày một cách chi tiết, có kèm theo các ví dụ số để phân tích kết quả thu được và hiệu quả chống cháy khi thực hiện các giải pháp bọc bảo vệ khác nhau.

## 2. Quy trình tính toán các cấu kiện của khung thép tiền chế theo phương pháp đơn giản hóa

### 2.1 Xác định tải trọng

Tải trọng tác dụng lên kết cấu trong điều kiện chịu lửa được xác định theo công thức [3]:

$$q_{fi} = G_k + (\psi_{1,1} \text{ hoặc } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \psi_{2,i} Q_{k,i} + A_d \quad (2)$$

trong đó:  $G_k$  là giá trị đặc trưng của tải trọng thường xuyên;  $Q_{k,1}$  là giá trị hoạt tải chính;  $\psi_{1,1}$  (giá trị thường

xuyên) hoặc  $\psi_{2,1}$  (giá trị gần như thường xuyên) là hệ số tổ hợp khi xét đến xác suất tồn tại của hoạt tải chính cùng với tải trọng thường xuyên trong điều kiện chịu lửa;  $Q_{k,i}$  là giá trị hoạt tải phụ;  $\psi_{2,i}$  là hệ số tổ hợp khi xét đến xác suất tồn tại của hoạt tải phụ cùng với tải trọng thường xuyên trong điều kiện chịu lửa;  $A_d$  là các tác động gián tiếp do lửa gây ra, sự xuất hiện và giá trị của  $A_d$  phụ thuộc rất nhiều vào kịch bản cháy.

### 2.2 Xác định nhiệt độ trên tiết diện thép

Đối với tiết diện thép không được bọc bảo vệ, mức tăng nhiệt độ trên tiết diện theo từng khoảng thời gian  $\Delta t$  (không vượt quá 5 giây) được xác định theo công thức:

$$\Delta \theta_{a,t} = k_{shadow} \frac{A_i/V_i}{C_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t \quad (3)$$

trong đó:  $k_{shadow}$  là hệ số điều chỉnh do ảnh hưởng của sự che khuất [5];  $A_i/V_i$  (1/m) là hệ số tiết diện của phần thứ  $i$  trên tiết diện dầm thép;  $C_a$  (J/kgK) là nhiệt dung riêng của thép, phụ thuộc vào nhiệt độ  $\theta_a$ ;  $\rho_a$  (kg/m<sup>3</sup>) là tỷ trọng của thép;  $\dot{h}_{net}$  (W/m<sup>2</sup>) là giá trị thiết kế của thông lượng dòng nhiệt trên một đơn vị diện tích [5];  $\Delta t$  (giây) là khoảng thời gian.

Trong trường hợp tiết diện được bọc bảo vệ, mức tăng nhiệt độ trên tiết diện theo từng khoảng thời gian  $\Delta t$  (không vượt quá 30 giây) được xác định theo công thức:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_{p,i} \sqrt{V_i}}{d_p C_a \rho_a (1+w/3)} \theta_t - \theta_{a,t} \Delta t - (e^{\frac{w}{10}} - 1) \Delta\theta_t \geq 0 \quad (4)$$

$$w = \left( \frac{C_p \rho_p}{C_a \rho_a} \right) d_p \left( \frac{A_{p,i}}{V_i} \right) \quad (4a)$$

trong đó:  $C_p$  (J/kgK),  $\rho_p$  (kg/m<sup>3</sup>),  $\lambda_p$  (W/mK) lần lượt là nhiệt dung riêng, tỷ trọng, hệ số dẫn nhiệt của vật liệu bọc bảo vệ;  $d_p$  (m) là chiều dày của lớp bọc;  $\Delta t$  (giây) là độ tăng nhiệt độ môi trường trong khoảng thời gian  $\Delta t$ .

### 2.3 Xác định khả năng chịu lực của dầm, cột trong điều kiện chịu lửa

#### a. Phân loại tiết diện

Khi cường độ và modun đàn hồi của thép giảm theo những tốc độ khác nhau trong điều kiện chịu

lửa, sự phân loại tiết diện ở nhiệt độ cao có thể khác so với ở nhiệt độ thường. Tuy nhiên, vẫn có thể sử dụng một cách phân loại đơn giản được thực hiện dựa trên ứng xử ở nhiệt độ thường. Khi đó, việc phân loại tiết diện tương tự như ở điều kiện nhiệt độ thường [4] ngoại trừ giá trị  $\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{f_y}{f_{yk}}}$  trong điều kiện chịu lửa. Như ở nhiệt độ thường, tiết diện thép có 4 loại tiết diện, trong đó tiết diện loại 1 có khả năng chống mất ổn định tốt nhất [5].

#### b. Sự thay đổi đặc trưng cơ lý của vật liệu thép theo nhiệt độ

Vật liệu thép giảm cường độ và độ cứng một cách đáng kể khi chịu lửa. Cường độ bắt đầu giảm ở nhiệt độ trên 300°C và giảm theo một tốc độ ổn định đến khoảng 800°C. Ở một nhiệt độ cao  $\theta$  cho trước, giá trị các hệ số suy giảm mô đun đàn hồi  $k_{E,\theta}$ , giới hạn tỷ lệ  $k_{ap,\theta}$ , giới hạn chảy  $k_{ay,\theta}$  của vật liệu thép được thể hiện ở Bảng 1 [5,6].

**Bảng 1.** Giá trị các hệ số suy giảm mô đun đàn hồi, giới hạn chảy và giới hạn tỷ lệ của thép ở nhiệt độ  $\theta$

| Nhiệt độ $\theta$ (°C) | $k_{E,\theta} = E_a/E_a$ | $k_{ap,\theta} = f_{ap}/f_{ap}$ | $k_{ay,\theta} = f_{ay}/f_{ay}$ | $k_{au,\theta} = f_{au}/f_{ay}$ |
|------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 20                     | 1,00                     | 1,00                            | 1,00                            | 1,25                            |
| 100                    | 1,00                     | 1,00                            | 1,00                            | 1,25                            |
| 200                    | 0,90                     | 0,807                           | 1,00                            | 1,25                            |
| 300                    | 0,80                     | 0,613                           | 1,00                            | 1,25                            |
| 400                    | 0,70                     | 0,420                           |                                 | 1,00                            |
| 500                    | 0,60                     | 0,360                           |                                 | 0,78                            |
| 600                    | 0,31                     | 0,180                           |                                 | 0,47                            |
| 700                    | 0,13                     | 0,075                           |                                 | 0,23                            |
| 800                    | 0,09                     | 0,050                           |                                 | 0,11                            |
| 900                    | 0,0675                   | 0,0375                          |                                 | 0,06                            |
| 1000                   | 0,0450                   | 0,0250                          |                                 | 0,04                            |

#### c. Xác định khả năng chịu lực của dầm

Theo điều kiện bền, khả năng chịu momen thiết kế được xác định theo cách tương tự như thiết kế ở nhiệt độ thường nhưng có điều chỉnh về sự giảm các đặc tính ở nhiệt độ cao. Khả năng chịu lực thiết kế ở nhiệt độ  $\theta_a$  được xác định như sau:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \left( \frac{\gamma_{MO}}{\gamma_{M,fi}} \right) \quad (5)$$

trong đó:  $M_{Rd}$  là momen bền dẻo (với tiết diện loại 1 và 2) và momen bền đàn hồi (với tiết diện loại 3) ở nhiệt độ thường;  $\gamma_{MO}$  là hệ số riêng khi tính toán độ bền ở nhiệt độ thường [3];  $\gamma_{M,fi}$  là hệ số riêng của vật liệu trong điều kiện chịu lửa [3].

Theo điều kiện ổn định tổng thể, khả năng chịu momen oằn thiết kế được xác định theo cách tương

tự như thiết kế ở nhiệt độ thường nhưng có điều chỉnh về sự giảm các đặc tính ở nhiệt độ cao, như sau: Đối với tiết diện Loại 1 hoặc 2:

$$M_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{LT,fi} W_y k_{y,\theta,com} \left( \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \right) \quad (6)$$

trong đó:  $\chi_{LT,fi}$  là hệ số giảm khả năng oằn vặn bên trong điều kiện chịu lửa;  $W_y$  là momen kháng uốn dẻo (với tiết diện loại 1 và 2) hoặc momen kháng uốn đàn hồi (với tiết diện loại 3);  $k_{y,\theta,com}$  là hệ số giảm cường độ của thép ở nhiệt độ lớn nhất của bản cánh nén  $\theta_{a,com}$  tại thời điểm  $t$ .

Hệ số giảm khả năng oằn vặn bên trong điều kiện chịu lửa được tính như sau:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta,com}^2 - \lambda_{LT,\theta,com}^2}} \quad (7)$$

với  $\varphi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left( 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2 \right)$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}}$  và  $\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

trong đó:  $\bar{\lambda}_{LT}$  là độ mảnh ở nhiệt độ thường [4].

Khả năng chịu cắt cũng được xác định giống như trong thiết kế ở nhiệt độ thường, như sau:

$$V_{fi,\theta,Rd} = V_{Rd} k_{y,\theta,web} \left( \frac{V_{M0}}{V_{M,fi}} \right) \quad (8)$$

trong đó:  $k_{y,\theta,web}$  là hệ số giảm cường độ của thép ở nhiệt độ trung bình của bản bụng  $\theta_{web}$ ;  $V_{Rd}$  là khả năng chịu cắt của tiết diện nguyên ở nhiệt độ thường [4].

#### d. Xác định khả năng chịu lực của cột

Khả năng chịu lực trong điều kiện chịu lửa của cấu kiện cột được kiểm tra theo công thức, khi thừa nhận rằng hiện tượng oằn do uốn xảy ra theo phương oằn vận bên, vì vậy hệ số giảm do oằn theo trục z-z (là trục ngoài mặt phẳng khung),  $\chi_{z,fi}$  được sử dụng.

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \left( \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \right)} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT} W_y k_{y,\theta} \left( \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \right)} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_z k_{y,\theta} \left( \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \right)} \leq 1,0 \quad (9)$$

trong đó:  $\chi_{z,fi} = \frac{1}{\varphi_{z,\theta} + \sqrt{\varphi_{z,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{z,\theta}^2}}$  với  $\varphi_{z,\theta} = \frac{1}{2} (1 + \alpha \bar{\lambda}_{z,\theta} + \bar{\lambda}_{z,\theta}^2)$  và độ mảnh không thứ nguyên theo trục z-z ở nhiệt độ  $\theta_a$  là:  $\bar{\lambda}_{z,\theta} = \bar{\lambda}_z \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$ . Hệ số  $\chi_{LT}$  được xác định tương tự như đối với dầm.

Giá trị của các hệ số  $k_z$  và  $k_{LT}$  được xác định như sau:

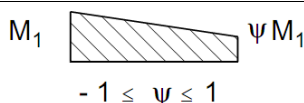
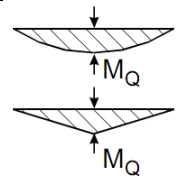
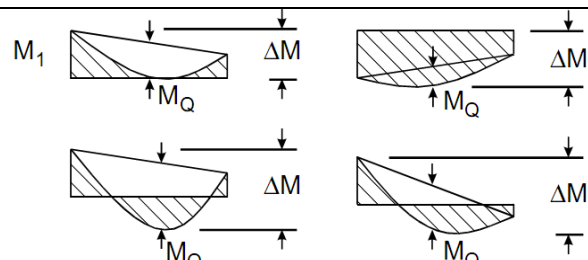
$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \left( \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \right)} \leq 1 \quad \text{với } \mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \left( \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \right)} \leq 3 \quad \text{với } \mu_z = (1,2 \beta_{M,z} - 3) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,71 \beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8$$

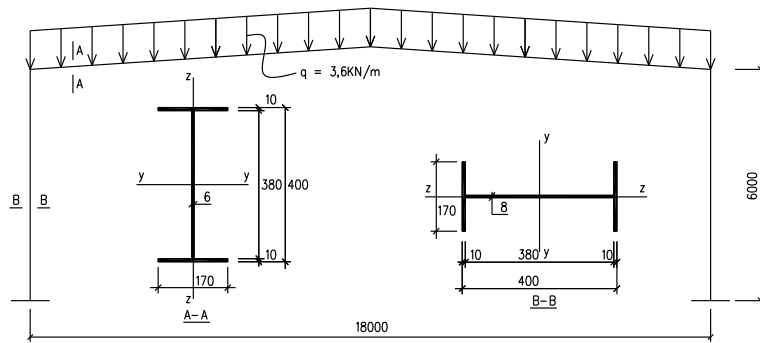
Các giá trị này phụ thuộc vào các hệ số momen phân bố đều tương đương  $\beta_{M,z}$ ,  $\beta_{M,LT}$  được xác định trong Bảng

2 [5]. Đối với cấu kiện tiết diện loại 4, khi oằn cục bộ xảy ra, giá trị nhiệt độ tối hạn trong cột được lấy  $\theta_{crit} = 350^\circ\text{C}$ .

**Bảng 2. Bảng tra hệ số  $\beta_M$  phụ thuộc vào biểu đồ momen**

| Biểu đồ momen                                                                                                                                                                                                                                                           |  | Hệ số $\beta_M$                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><math>M_1</math> <math>\psi M_1</math><br/><math>-1 \leq \psi \leq 1</math></p>                                                                                                  |  | $\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$                                                 |
|  <p><math>M_Q</math><br/><math>M_Q</math></p>                                                                                                                                        |  | $\beta_{M,Q} = 1,3$<br>$\beta_{M,Q} = 1,4$                                       |
|  <p><math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math></p> |  | $\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ |

### 3. Ví dụ số



Hình 2. Sơ đồ khung và tiết diện dầm, cột trong ví dụ

Xác định khả năng chịu lửa của khung thép tiền chế đơn giản có kích thước, tiết diện, tải trọng như Hình 2. Vật liệu thép S235. Nhiệt độ phát triển trong đám cháy tuân theo công thức (1). Tải trọng tác dụng lên dầm (xem là phân bố đều trên suốt chiều dài dầm) trong điều kiện nhiệt độ thường  $q = 3,6 \text{ kN/m}$ . Dựa vào sơ đồ bố trí hệ giằng và xà gồ mái, chiều dài tính toán ngoài mặt phẳng của dầm và cột lần lượt là 2400mm và 3000mm.

Các tiết diện thép được tính toán trong các trường hợp: không bọc bảo vệ; bọc bảo vệ theo chu

vi bằng vật liệu vữa chống cháy  $d_{p1} = 15 \text{ mm}$ ,  $\lambda_{p1} = 0,18 \text{ W/mK}$ ,  $C_a = 850 \text{ J/kgK}$ ,  $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ ; bọc bảo vệ dạng hình hộp bằng vật liệu thạch cao chống cháy  $d_{p2} = 16 \text{ mm}$ ,  $\lambda_{p2} = 0,25 \text{ W/mK}$ ,  $C_a = 1100 \text{ J/kgK}$ ,  $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ .

#### 3.1 Kết quả thu được theo phương pháp tính đơn giản hóa

Các kết quả thu được về khả năng chịu momen do uốn, do oằn, khả năng chịu lực cắt của dầm và khả năng chịu lực của cột lần lượt được thể hiện trong Bảng 3,4,5,6.

Bảng 3. Kết quả khả năng chịu momen uốn của dầm theo phương pháp đơn giản hóa

| Thời gian<br>$t$ (phút) | Kết quả khả năng chịu momen uốn |                             |       |                        |                             |       |                        |                             |       |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|-------|
|                         | Không bọc                       |                             |       | Bọc vữa                |                             |       | Bọc thạch cao          |                             |       |
|                         | $\theta_{max}$<br>(°C)          | $M_{fi,Ed}$<br>$/M_{fi,Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $M_{fi,Ed}$<br>$/M_{fi,Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $M_{fi,Ed}$<br>$/M_{fi,Rd}$ | KL    |
| 5                       | 568                             | 0,70                        | Đạt   | 95                     | 0,40                        | Đạt   | 78                     | 0,40                        | Đạt   |
| 15                      | 737                             | 2,14                        | Không | 276                    | 0,40                        | Đạt   | 259                    | 0,40                        | Đạt   |
| 30                      | 841                             | -                           | -     | 485                    | 0,49                        | Đạt   | 467                    | 0,46                        | Đạt   |
| 60                      | 945                             | -                           | -     | 768                    | 2,20                        | Không | 750                    | 1,99                        | Không |

Bảng 4. Kết quả khả năng chịu momen oằn của dầm theo phương pháp đơn giản hóa

| Thời gian<br>$t$ (phút) | Kết quả khả năng chịu momen do oằn |                               |       |                        |                               |       |                        |                               |       |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------|------------------------|-------------------------------|-------|------------------------|-------------------------------|-------|
|                         | Không bọc                          |                               |       | Bọc vữa                |                               |       | Bọc thạch cao          |                               |       |
|                         | $\theta_{max}$<br>(°C)             | $M_{fi,Ed}$<br>$/M_{b,fi,Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $M_{fi,Ed}$<br>$/M_{b,fi,Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $M_{fi,Ed}$<br>$/M_{b,fi,Rd}$ | KL    |
| 5                       | 568                                | 1,06                          | Không | 89                     | 0,56                          | Đạt   | 78                     | 0,56                          | Đạt   |
| 15                      | -                                  | -                             | -     | 276                    | 0,58                          | Đạt   | 259                    | 0,58                          | Đạt   |
| 30                      | -                                  | -                             | -     | 485                    | 0,73                          | Đạt   | 467                    | 0,70                          | Đạt   |
| 60                      | -                                  | -                             | -     | 768                    | 3,47                          | Không | 750                    | 3,18                          | Không |

Bảng 5. Kết quả khả năng chịu lực cắt của dầm theo phương pháp đơn giản hóa

| Thời gian<br>$t$ (phút) | Kết quả khả năng chịu lực cắt |                             |       |                        |                             |     |                        |                             |     |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|-----|------------------------|-----------------------------|-----|
|                         | Không bọc                     |                             |       | Bọc vữa                |                             |     | Bọc thạch cao          |                             |     |
|                         | $\theta_{max}$<br>(°C)        | $V_{fi,Ed}$<br>$/V_{fi,Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $V_{fi,Ed}$<br>$/V_{fi,Rd}$ | KL  | $\theta_{max}$<br>(°C) | $V_{fi,Ed}$<br>$/V_{fi,Rd}$ | KL  |
| 5                       | 568                           | 0,17                        | Đạt   | 89                     | 0,10                        | Đạt | 78                     | 0,10                        | Đạt |
| 15                      | 737                           | 0,53                        | Đạt   | 276                    | 0,10                        | Đạt | 259                    | 0,10                        | Đạt |
| 30                      | 841                           | 1,09                        | Không | 485                    | 0,12                        | Đạt | 467                    | 0,11                        | Đạt |
| 60                      | -                             | -                           | -     | 768                    | 0,54                        | Đạt | 750                    | 0,49                        | Đạt |

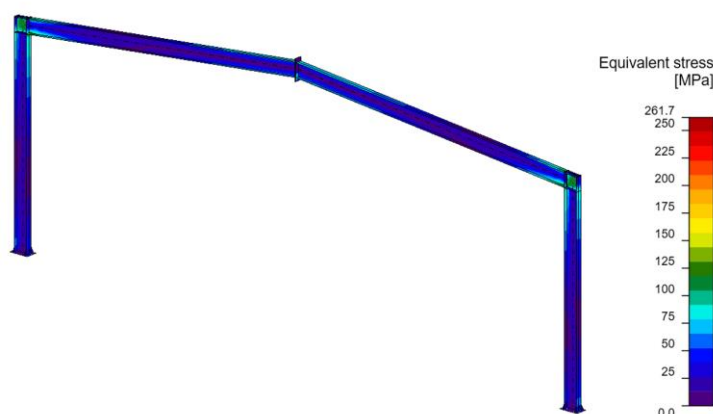
**Bảng 6. Kết quả khả năng chịu lực của cột theo phương pháp đơn giản hóa**

| Thời gian<br>$t$ (phút) | Kết quả khả năng chịu lực |                |       |                        |                |       |                        |                |       |
|-------------------------|---------------------------|----------------|-------|------------------------|----------------|-------|------------------------|----------------|-------|
|                         | Không bọc                 |                |       | Bọc vừa                |                |       | Bọc thạch cao          |                |       |
|                         | $\theta_{max}$<br>(°C)    | Công<br>thức 9 | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | Công<br>thức 9 | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | Công<br>thức 9 | KL    |
| 5                       | 565                       | 1,21           | Không | 77                     | 0,62           | Đạt   | 68                     | 0,62           | Đạt   |
| 15                      | -                         | -              | -     | 236                    | 0,65           | Đạt   | 220                    | 0,65           | Đạt   |
| 30                      | -                         | -              | -     | 428                    | 0,74           | Đạt   | 410                    | 0,72           | Đạt   |
| 60                      | -                         | -              | -     | 708                    | 2,99           | Không | 687                    | 2,21           | Không |

### 3.2 Kết quả thu được theo phương pháp mô phỏng số

IDEA Statica là phần mềm thương mại được thiết lập ban đầu từ phương pháp CBFEM (Component-based finite element method) là phương pháp phân tích chính xác ứng xử của các dạng liên kết cấu tạo phức tạp [8]. Sau đó, phần mềm được phát triển cho việc phân tích toàn bộ hệ kết cấu khung thép chịu lực trong cả điều kiện nhiệt độ thường và nhiệt độ cao. Trong trường hợp chịu nhiệt độ cao, quá trình mô phỏng được thực hiện gồm hai giai đoạn. Giai đoạn thứ nhất là mô phỏng sự truyền nhiệt từ bề mặt qua lớp vật liệu bảo vệ vào trong cấu kiện. Giai đoạn thứ hai là mô phỏng ứng xử của cấu kiện dầm, cột khung

thép vừa chịu tải trọng vừa chịu tác động của nhiệt độ. Giai đoạn này sử dụng phân tích GMNIA [7] là phân tích có xét đến phi tuyến hình học và phi tuyến vật liệu có kể đến sai số hình học ban đầu. Về mặt vật liệu, IDEA mô tả một số mô hình ứng xử phổ biến của vật liệu theo các tiêu chuẩn chảy dẻo, áp dụng cho vật liệu đẳng hướng, vật liệu không đẳng hướng, vật liệu rời rạc [7];... Trong trường hợp này, với thép là vật liệu đồng nhất và đẳng hướng, mô hình ứng xử MISO là phù hợp để mô tả ứng xử ngoài đàn hồi theo tiêu chuẩn dẻo Von-Mises. Về mặt hình học, mô hình sai số hình học ban đầu được xác định thông qua dạng mất ổn định thu được từ phân tích LBA [7] là phân tích ổn định tuyến tính.



**Hình 3. Kết quả phân bố ứng suất trong khung trường hợp cấu kiện được bọc vừa theo chu vi tại thời điểm 30 phút theo IDEA**

Các kết quả thu được dùng để đánh giá khả năng chịu lực của cấu kiện theo điều kiện khống chế ứng suất: ứng suất thu được nhỏ hơn giới hạn chảy của thép có xét đến hệ số suy giảm do ảnh hưởng nhiệt độ tại một thời điểm xác định được kết luận là

đảm bảo. Hình 3 trình bày kết quả phân bố ứng suất trên các cấu kiện khung được bọc vừa bảo vệ theo chu vi tại thời điểm  $t = 30$  phút. Kết quả về khả năng chịu lực của cấu kiện dầm, cột theo mô phỏng IDEA được trình bày trong Bảng 7,8.

**Bảng 7. Kết quả khả năng chịu lực của dầm theo phương pháp mô phỏng**

| Thời gian<br>$t$ (phút) | Kết quả khả năng chịu lực theo ứng suất tương đương |                             |       |                        |                             |       |                        |                             |       |
|-------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|-------|
|                         | Không bọc                                           |                             |       | Bọc vừa                |                             |       | Bọc thạch cao          |                             |       |
|                         | $\theta_{max}$<br>(°C)                              | $\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd}$ | KL    |
| 15                      | 712                                                 | 2,57                        | Không | 310                    | 0,68                        | Đạt   | 269                    | 0,68                        | Đạt   |
| 30                      | -                                                   | -                           | -     | 534                    | 0,84                        | Đạt   | 487                    | 0,68                        | Đạt   |
| 60                      | -                                                   | -                           | -     | 737                    | 3,22                        | Không | 721                    | 2,99                        | Không |

**Bảng 8. Kết quả khả năng chịu lực của cột theo phương pháp mô phỏng**

| Thời gian<br>$t$ (phút) | Kết quả khả năng chịu lực theo ứng suất tương đương |                             |       |                        |                             |       |                        |                             |       |
|-------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|-------|
|                         | Không bọc                                           |                             |       | Bọc vữa                |                             |       | Bọc thạch cao          |                             |       |
|                         | $\theta_{max}$<br>(°C)                              | $\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd}$ | KL    | $\theta_{max}$<br>(°C) | $\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd}$ | KL    |
| 15                      | 699                                                 | 1,97                        | Không | 265                    | 0,56                        | Đạt   | 236                    | 0,57                        | Đạt   |
| 30                      | -                                                   | -                           | -     | 475                    | 0,56                        | Đạt   | 438                    | 0,48                        | Đạt   |
| 60                      | -                                                   | -                           | -     | 708                    | 2,01                        | Không | 680                    | 1,73                        | Không |

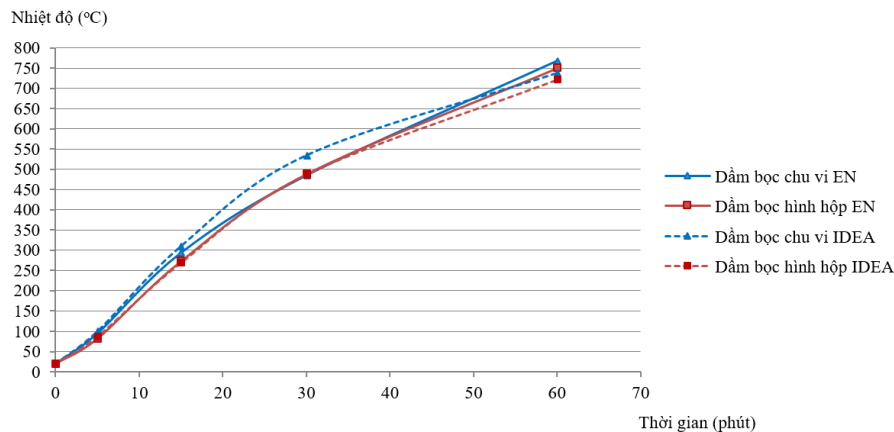
\* Nhận xét kết quả thu được từ ví dụ:

- Kết quả nhiệt độ thu được từ hai phương pháp tính là khá tương đồng, đặc biệt là trong trường hợp cấu kiện được bọc theo dạng hình hộp. Hình 4 và 5 cho thấy sự chênh lệch nhiệt độ lớn nhất xảy ra ở tiết diện dầm bọc vữa bảo vệ theo chu vi tại thời điểm 15 phút là 10,1%;

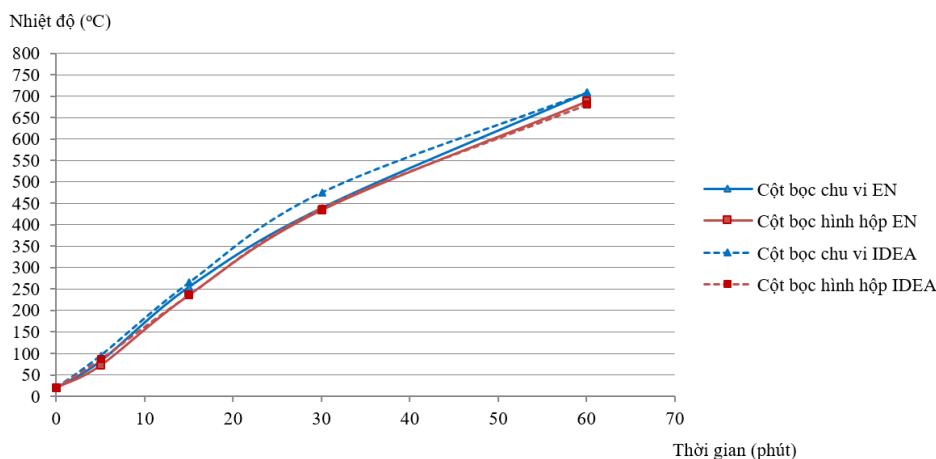
- Về kết quả đánh giá khả năng chịu lực của cấu kiện, đối với cấu kiện dầm theo phương pháp tính đơn giản hóa, khả năng chịu lực theo momen do oằn là nguy hiểm nhất nên được đưa vào so sánh với kết quả thu được theo mô phỏng. Kết quả ở các Bảng 4 và 7, 6 và 8 đều cho kết quả hội tụ về khả năng chịu lực R30 của các cấu kiện;

- Khi không sử dụng các biện pháp bọc bảo vệ cấu kiện bằng các vật liệu cách nhiệt, nhiệt độ trong kết cấu thép tăng rất nhanh. Kết quả thu được theo cả hai phương pháp đều cho thấy nếu áp theo đường cong nhiệt độ-thời gian ở công thức (1) thì cấu kiện không bọc không chịu được R5 so với R30 khi bọc vữa theo chu vi hoặc bọc thạch cao dạng hình hộp;

- Về hình thức bọc, nhiệt độ thu được trên tiết diện được bọc vữa bảo vệ theo chu vi lớn hơn so với tiết diện được bọc thạch cao bảo vệ dạng hình hộp. Kết quả này phụ thuộc vào nhiều thông số như đặc tính nhiệt của vữa và thạch cao, kích thước tiết diện thông qua giá trị hệ số tiết diện. Cụ thể trong ví dụ, tiết diện cột và dầm chỉ khác nhau về bề dày của các bản thép nhưng nhiệt độ thu được thay đổi khá nhiều.



**Hình 4. Kết quả nhiệt độ thu được trên tiết diện dầm theo EN và IDEA**



**Hình 5. Kết quả nhiệt độ thu được trên tiết diện cột theo EN và IDEA**

- Ở thời điểm  $t = 30$  phút (R30), tiết diện cầu kiện dầm trong ví dụ có thể đảm bảo khả năng chịu lực khi nhiệt độ trong tiết diện thép đạt tới trên  $485^{\circ}\text{C}$  theo phương pháp tính đơn giản hóa và  $534^{\circ}\text{C}$  theo phương pháp mô phỏng. Các giá trị nhiệt độ này đối với cầu kiện cột được xác định lần lượt là  $428^{\circ}\text{C}$  và  $475^{\circ}\text{C}$ . Đây là kết quả khá phù hợp khi so sánh với kết quả thu được từ các thí nghiệm [6], cho thấy độ tin cậy của các phương pháp tính này.

#### 4. Kết luận

Các bước trong quy trình tính toán khung thép tiền chế một tầng không bọc và được bọc bảo vệ trong điều kiện chịu lửa được trình bày theo hai phương pháp tính toán đơn giản hóa và phương pháp mô phỏng. Phương pháp tính toán đơn giản hóa theo các công thức của EN 1993-1-2:2005 cho thấy tính hiệu quả trong các thiết kế đơn giản, đặc biệt là với các cấu kiện điển hình. Phương pháp mô phỏng phức tạp hơn nhưng có xét đến ứng xử tổng thể của cả hệ khung nên kết quả thu được sẽ gần sát với sự làm việc thực tế của khung. Dựa vào độ tin cậy từ các kết quả thu được, kiến nghị trong quy trình thiết kế chịu lửa, phương pháp đơn giản hóa được dùng để lựa chọn sơ bộ vật liệu bọc, hình thức bọc, bề dày lớp bọc bảo vệ và phương pháp mô phỏng được dùng để kiểm tra tổng thể hệ kết cấu và thực hiện tối ưu thiết kế.

Các kết quả thu được cho thấy ngưỡng nhiệt độ  $450-550^{\circ}\text{C}$  là ngưỡng nhiệt độ tới hạn hợp lý cho các cấu kiện thép để duy trì độ bền, độ cứng, độ ổn định của hệ kết cấu khi xảy ra cháy. Ngoài các mức thời gian tương ứng với các bậc chịu lửa đang được chỉ định áp dụng trong thiết kế, các phương pháp tính toán này có thể sử dụng bậc chịu lửa R được chia theo bước thời gian nhỏ hơn để kết quả nhiệt độ thu được chính xác và gần sát với thực tế.

#### Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài NCKH “Tính toán khả năng chịu lực của cấu kiện thép dựa trên các tiêu chí đánh giá theo quy chuẩn QCVN 06:2022/BXD”, mã số 26-2024/KHXD của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Nhóm tác giả xin cảm ơn Công ty Cổ phần Công nghệ và Tư vấn CIC đã hỗ trợ bản quyền phần mềm IDEA Statica sử dụng trong nghiên cứu!

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] QCVN 06:2022/BXD, *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về an toàn cháy cho nhà và công trình*, Bộ Xây dựng, Việt Nam.
- [2] BS EN 1363-1:2012, *Fire resistance tests - Part 1: General requirements*, BSI Standards Publication, UK.
- [3] EN 1991-1-2:2002, *Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*, British Standards Institution, UK.
- [4] EN 1993-1-1:2005, *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, British Standards Institution, UK.
- [5] EN 1993-1-2:2005, *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, British Standards Institution, UK.
- [6] ASFD Yellow Book (2009), *Fire protection for structural steel in buildings*, 4<sup>th</sup> Edition revised 7 Oct 09.
- [7] IDEA Statica Tutorials 2024, available at <https://www.ideastatica.com/support-center/fire-design-analysis-of-a-steel-member-en>.
- [8] Wald, F., Sabatka, L., Kabelac, J., Kolaja, D., Pospisil, M. (2015). *Structural Analysis and Design of Steel Connections Using Component Based Finite Element Model (CBFEM)*, Journal of Civil Engineering and Architecture, 9, 895-901.