

XÁC ĐỊNH HỆ SỐ DẪN NHIỆT CỦA SƠN CHỐNG CHÁY BẰNG MÔ HÌNH HỒI QUY TUYẾN TÍNH ĐA BIẾN

Thiếu tá, ThS ĐẶNG VĂN TRỌNG

Khoa Khoa học cơ bản và Ngoại ngữ, Trường Đại học PCCC

Thiếu tá, ThS NGÔ XUÂN TÙNG

Khoa Cơ sở ngành Phòng cháy chữa cháy, Trường Đại học PCCC

*Tác giả liên hệ: Đặng Văn Trọng (E-mail: vantrong0712@gmail.com)

Tóm tắt: Sơn chống cháy là loại vật liệu dạng phản ứng được sử dụng để bảo vệ kết cấu thép, bê tông hoặc các bề mặt khác khỏi tác động của lửa trong một khoảng thời gian nhất định khi xảy ra cháy. Quá trình trương nở của vật liệu này dưới tác động của nhiệt độ cao trong điều kiện chịu lửa diễn ra rất phức tạp gây nhiều khó khăn cho việc đo đạc trực tiếp giá trị hệ số dẫn nhiệt của nó. Bài viết này trình bày kết quả nghiên cứu xác định hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy bằng mô hình hồi quy tuyến tính đa biến. Mô hình được xây dựng dựa trên số liệu từ kết quả thử nghiệm chịu lửa theo phương pháp thử nghiệm được quy định tại tiêu chuẩn Châu Âu EN 13381-8:2013 với các mẫu thử là thép được sơn chống cháy. Với sự hỗ trợ của phần mềm phân tích thống kê IBM SPSS Statistics, 16 mô hình hồi quy đã được xây dựng có ý nghĩa thống kê, phản ánh sự phụ thuộc của hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy (λ) vào hệ số tiết diện của mẫu thép có lớp sơn chống cháy (A_p/V) và độ dày màng khô của lớp sơn chống cháy (d_p).

Từ khóa: sơn chống cháy, kết cấu thép, độ dẫn nhiệt, độ dày màng khô, hệ số tiết diện, mô hình hồi quy tuyến tính.

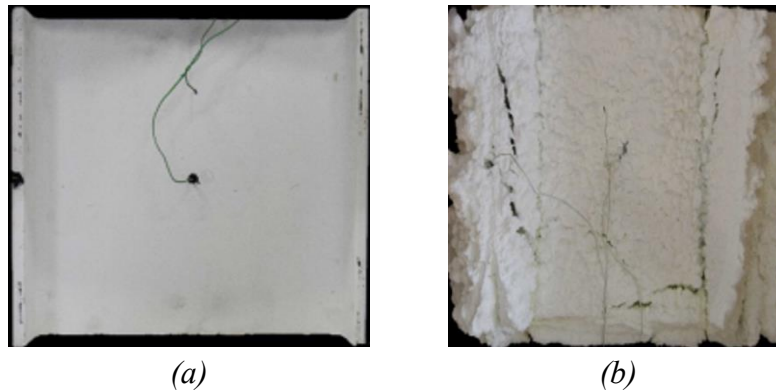
Abstract: Intumescent paint is a reactive material that is commonly utilized to protect steel structures, concrete, and other surfaces against fire for a specified period. Due to its complex expansion behavior at high temperatures, direct measurement of its thermal conductivity is challenging. In this study, the thermal conductivity of intumescent paint is estimated using a multivariate linear regression model. Data from fire resistance tests, which were carried out following the European standard EN 13381-8:2013 using steel samples coated with intumescent paint, were analyzed to develop the model. 16 regression models were developed using statistical analysis performed in IBM SPSS Statistics, demonstrating the relationship among thermal conductivity (λ), the section factor of the coated steel sample (A_p/V), and coating dry film thickness (d_p).

Keywords: Intumescent paint, steel structures, thermal conductivity coefficient, dry film thickness, section factor, linear regression model.

1. Giới thiệu

Sơn chống cháy là loại vật liệu dạng phản ứng có sự kết hợp của các thành phần hữu cơ và vô cơ liên kết với nhau trong một ma trận Polyme. Ở nhiệt độ thường, lớp sơn chống cháy có tính trơ. Dưới tác động của nhiệt

độ cao (khoảng 250°C) trong điều kiện chịu lửa, lớp sơn chống cháy xảy ra phản ứng nhiệt và trương nở lên tới 30 đến 50 lần so với độ dày ban đầu để tạo thành lớp than cac bon có độ dẫn nhiệt thấp hoạt động như lớp cách nhiệt cho kết cấu thép (Hình 1).



Hình 1: Mẫu thép có sơn chống cháy trước (a) và sau (b) khi thử nghiệm chịu lửa [1].

Tiêu chuẩn Châu Âu EN 1992-1-2:2005 [2] cho phép tính toán sự gia tăng nhiệt độ của kết cấu thép bọc sơn chống cháy khi chịu lửa bằng phương pháp tính toán đơn giản hoặc phương pháp tính toán nâng cao nếu như xác định được hệ số dẫn nhiệt của loại sơn được sử dụng. Tuy nhiên, giá trị này không thể đo trực tiếp do quá trình trương nở của sơn chống cháy dưới tác động của nhiệt độ cao trong điều kiện chịu lửa diễn ra rất phức tạp.

Bài viết này trình bày phương pháp xác định hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy dựa trên kết quả thử nghiệm chịu lửa với đường cong ngọn lửa/thời gian tiêu chuẩn theo tiêu chuẩn Châu Âu EN 13381-8:2013 [3] của các mẫu thử bằng thép có hệ số tiết diện và độ dày lớp sơn chống cháy thay đổi bằng cách sử dụng mô hình hồi quy tuyến tính. Với sự hỗ trợ của phần mềm phân tích thống kê IBM SPSS, nhóm nghiên cứu đã xây dựng được 16 mô hình có ý nghĩa thống kê giúp xác định hệ số dẫn nhiệt (λ) của sơn chống cháy tại bất kỳ cặp giá trị (A_p/V , d_p) nào.

Giá trị hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy đã xác định được có thể sử dụng để tính toán sự gia tăng nhiệt độ trong kết cấu thép trong điều kiện chịu lửa từ đó xác định giới hạn chịu lửa của kết cấu thép có sơn chống cháy bằng phương pháp tính toán đơn giản hoặc phương pháp tính toán nâng cao theo tiêu chuẩn Châu Âu EN 1992-1-2: 2005 [2].

2. Cơ sở lý thuyết tính toán hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy

Xuất phát từ công thức tính toán sự gia tăng nhiệt độ trong kết cấu thép có lớp bảo vệ chống cháy được quy định trong tiêu chuẩn EN 1993-1-2:2005 [1]:

$$\Delta \theta_{a,t} = \left[\frac{\lambda_{p,t} / d_p}{c_a \rho_a} \times \frac{A_p}{V} \times \left(\frac{1}{1 + \phi / 3} \right) \times (\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t \right] - [(e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_t] \quad (1)$$

Với:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \times d_p \times \frac{A_p}{V}$$

Trong đó:

- $\Delta \theta_{a,t}$ là nhiệt độ thép tăng theo bước thời gian Δt (K)
- $\Delta \theta_t$ là nhiệt độ lò tăng theo thời gian bước Δt (K)
- $\theta_{a,t}$ là nhiệt độ đo được trong mẫu thép ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_t là nhiệt độ đo được trong lò đốt tương ứng với các mẫu thử nghiệm ($^{\circ}\text{C}$)
- d_p là độ dày màng khô của sơn chống cháy (m)
- c_a là nhiệt dung riêng của thép tại nhiệt độ θ_a (J/kgK)
- ρ_a là khối lượng riêng của thép (kg/m^3)
- c_p là nhiệt dung riêng của vật liệu bảo vệ. Nếu giá trị này không có sẵn, sẽ sử dụng giá trị 1000 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$;
- ρ_p là khối lượng riêng của sơn chống cháy (kg/m^3)

- A_p/V là hệ số tiết diện của tiết diện thép (m^{-1})
- Δt là bước thời gian (s).
- $\lambda_{p,t}$ là hệ số dẫn nhiệt của lớp sơn chống cháy tại thời điểm t tương ứng với độ dày màng khô d_p ($W/m.K$).

Vì sơn chống cháy là dạng vật liệu có khối lượng nhẹ và rất nhỏ so với khối lượng thép nên để đơn giản hóa quá trình tính toán, số hạng thứ hai ở vế phải của công thức (1) có thể bỏ qua và hệ số dẫn nhiệt $\lambda_{p,t}$ của sơn chống cháy có thể được tính toán theo công thức (2). Đây cũng là công thức được đề xuất trong phụ lục E, tiêu chuẩn [3].

$$\lambda_{p,t} = d_p \times \frac{V}{A_p} \times c_a \times \rho_a \times \frac{1}{(\theta_t - \theta_{a,t}) \times \Delta t} \times \Delta \theta_{a,t} \quad (2)$$

Đối với mỗi mẫu thử nghiệm, lập bảng tính hệ số dẫn nhiệt tương đương của lớp sơn chống cháy theo công thức (2). Giá trị hệ số dẫn nhiệt này được gọi là hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng vì sử dụng độ dày màng sơn khô ban đầu và không kể đến sự trương nở của sơn chống cháy. Dựa trên các bảng tính hệ số dẫn nhiệt tương đương của lớp sơn chống cháy đối với từng mẫu thử nghiệm theo công thức (2), lập bộ dữ liệu là tập hợp các mẫu số liệu dạng (A_p/V , d_p , $\lambda_{p,t}$) tương ứng với các mẫu thử nghiệm theo các mốc nhiệt độ từ $300^\circ C$ đến $700^\circ C$.

Dựa trên bộ dữ liệu đã lập, mô hình hồi quy tuyến tính được xây dựng thể hiện sự phụ thuộc của hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy $\lambda_{p,t}$ theo hệ số tiết diện A_p/V và độ dày màng khô của lớp sơn chống cháy d_p . Mô hình hồi quy tuyến tính với hàm tổng quát như công thức (3):

$$\lambda = c_0 + c_1.A_p/V + c_2.d_p \quad (3)$$

Các hệ số c_0 , c_1 , c_2 của mô hình được ước lượng bằng phương pháp bình phương tối thiểu dựa trên tất cả các điểm dữ liệu của mẫu thử nghiệm theo từng mốc nhiệt độ khảo sát. Mô hình hồi quy được xây dựng với sự hỗ trợ của phần mềm phân tích thống kê IBM SPSS Statistics.

Kết quả thực hiện được trình bày trong phần tiếp theo.

3. Kết quả xác định hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy bằng mô hình hồi quy

Số liệu về thử nghiệm chịu lửa của 12 mẫu thử bằng vật liệu thép tiết diện I, chiều dài $L = 1000mm$ được bảo vệ bằng một loại sơn chống cháy có mặt trên thị trường với hệ số tiết diện (A_p/V) và độ dày màng khô lớp sơn chống cháy (d_p) thay đổi đã được thống kê, tập hợp theo tài liệu [4] như trong Bảng 1. Các thử nghiệm chịu lửa được thực hiện tại Phòng thí nghiệm vật liệu, cấu kiện xây dựng và trang thiết bị phòng cháy chữa cháy trực thuộc Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy.

Bảng 1: Đặc điểm của các mẫu thử nghiệm chịu lửa [4].

TT	Ký hiệu mẫu	A_p/V (m^{-1})	d_p (μm)	TT	Ký hiệu mẫu	A_p/V (m^{-1})	d_p (μm)
1	M1_1	70	282	7	M3_1	253	281
2	M1_2	70	1455	8	M3_2	253	1454
3	M1_3	70	2375	9	M3_3	253	2405
4	M2_1	181	278	10	M4_1	360	1490
5	M2_2	181	2484	11	M4_2	360	2430
6	M2_3	181	3642	12	M4_3	360	3621

Dựa trên các bảng tính hệ số dẫn nhiệt tương đương của lớp sơn chống cháy đối với từng mẫu thử nghiệm theo công thức (2), bộ dữ liệu tương ứng với 12 mẫu thử nghiệm đã được xây dựng. Bảng 2 dưới đây được trích từ bộ dữ liệu này.

Bảng 2: Minh họa bộ dữ liệu sử dụng để xây dựng mô hình hồi quy

TT	A_p/V (m^{-1})	d_p (μm)	$\lambda_{p,t}$ (W/m.K)			
			400°C	550°C	600°C	650°C
1	70	282	0,007	0,005	0,004	0,004
2	181	2484	0,027	0,007	0,006	0,008
3	253	3667	0,020	0,007	0,005	0,008
4	360	2430	0,018	0,004	0,003	0,004

Bằng việc sử dụng phần mềm IBM SPSS xử lý số liệu, nhóm nghiên cứu đã thu được 17 mô hình hồi quy tuyến tính tương ứng với các mốc nhiệt độ từ 300°C đến 700°C với bước nhiệt độ là 25°C. Các hệ số hồi quy (c_0 , c_1 , c_2) của mô hình được xác định tại các điểm nhiệt độ được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3: Kết quả phân tích bằng SPSS xác định các hệ số của mô hình và sai số tính toán bằng mô hình so với giá trị thực tế.

TT	Nhiệt độ (°C)	Hệ số c_0	Hệ số c_1	Hệ số c_2	R^2	Sig.F	Sai số trung bình	Độ lệch chuẩn sai số
1	300	0,009	$-3.151.10^{-5}$	$2.061.10^{-6}$	0,605	0,015	$6,45.10^{-16}$	0,905
2	325	0,008	$-2,584.10^{-5}$	$1,735.10^{-6}$	0,634	0,011	$3,96.10^{-16}$	0,905
3	350	0,008	$-2,837.10^{-5}$	$2,233.10^{-6}$	0,753	0,002	$-2,22.10^{-16}$	0,905
4	375	0,008	$-3,035.10^{-5}$	$2,574.10^{-6}$	0,782	0,001	$-2,08.10^{-16}$	0,905
5	400	0,009	$-3,520.10^{-5}$	$3,034.10^{-6}$	0,785	0,001	$1,94.10^{-16}$	0,905
6	425	0,010	$-3,791.10^{-5}$	$3,285.10^{-6}$	0,787	0,001	$-2,91.10^{-16}$	0,905
7	450	0,011	$-4,140.10^{-5}$	$3,629.10^{-6}$	0,785	0,001	$-5,55.10^{-16}$	0,905
8	475	0,012	$-4,473.10^{-5}$	$3,934.10^{-6}$	0,788	0,001	$1,39.10^{-17}$	0,905
9	500	0,012	$-4,740.10^{-5}$	$4,294.10^{-6}$	0,756	0,002	$3,19.10^{-16}$	0,905
10	525	0,012	$-4,934.10^{-5}$	$4,667.10^{-6}$	0,723	0,003	$1,94.10^{-16}$	0,905
11	550	0,013	$-5,125.10^{-5}$	$4,790.10^{-6}$	0,740	0,002	$5,55.10^{-17}$	0,905
12	575	0,013	$-5,395.10^{-5}$	$5,196.10^{-6}$	0,750	0,002	$4,44.10^{-16}$	0,905
13	600	0,014	$-6,093.10^{-5}$	$5,439.10^{-6}$	0,725	0,003	$2,50.10^{-16}$	0,905
14	625	0,015	$-6,706.10^{-5}$	$5,575.10^{-6}$	0,690	0,005	$-4,30.10^{-16}$	0,905
15	650	0,015	$-6,498.10^{-5}$	$5,347.10^{-6}$	0,752	0,002	$-9,71.10^{-17}$	0,905
16	675	0,016	$-6,200.10^{-5}$	$4,921.10^{-6}$	0,694	0,005	$-1,67.10^{-16}$	0,905
17	700	0,015	$-5,863.10^{-5}$	$5,795.10^{-6}$	0,761	0,002	$-2,64.10^{-16}$	0,905

Trong Bảng 3, cột R^2 thể hiện mức độ giải thích của mô hình cho sự biến động của $\lambda_{p,t}$. Ví dụ, tại mốc nhiệt 300°C mô hình có hệ số $R^2 = 0,605$ thể hiện có 60,5% độ biến động của $\lambda_{p,t}$ được giải thích bởi sự biến động của A_p/V và d_p kèm theo đó 39,5% sự biến động của $\lambda_{p,t}$ do các yếu tố khác gây ra chưa thể giải thích bằng mô hình đã thiết lập. Hệ số R^2 càng cao, mô hình càng có độ tin cậy cao. Cột Sig.F để đánh giá mức độ phù hợp của mô hình với tập số liệu thử nghiệm, giá trị của Sig.F nhỏ hơn 0,05 thì mô hình được cho là phù hợp. Cả 17 mô hình xây dựng trong Bảng 3 đều có Sig.F nhỏ hơn 0,001 cho thấy mức độ phù hợp rất cao của mô hình đã xây dựng với tập số liệu thử nghiệm đã xây dựng ở trên. Cột sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số dùng để đánh giá sai số và độ lệch chuẩn giữa các giá trị $\lambda_{p,t}$ được tính bằng mô hình hồi quy và các giá trị $\lambda_{p,t}$ thực tế đưa vào xây dựng mô hình. Trong lý thuyết mô hình hồi quy đòi hỏi điều kiện sai số trung bình xấp xỉ 0 và độ lệch chuẩn xấp xỉ 1, các kết quả chạy mô hình cho thấy điều kiện này được đáp ứng.

Mỗi hệ số hồi quy c_0, c_1, c_2 của mô hình đều có một mức ý nghĩa thống kê đi kèm để xác định ý nghĩa thống kê của hệ số đó. Các hệ số hồi quy có mức ý nghĩa thống kê nhỏ hơn 0,05 được coi là có ý nghĩa thống kê. Hệ số c_2 trong mô hình hồi quy của $\lambda_{p,t}$ tương ứng với nhiệt độ 300°C có mức ý nghĩa thống kê bằng 0,057 lớn hơn 0,05 nên hệ số đó không có ý nghĩa thống kê (xem Bảng 4), do vậy mô hình này không thể sử dụng trong tính toán mặc dù mô hình vẫn khớp với số liệu thực nghiệm, 16 mô hình còn lại các hệ số hồi quy đều có ý nghĩa thống kê.

Bảng 4: Bảng hệ số hồi quy của mô hình với nhiệt độ 300°C .

Hệ số hồi quy ^a						
Mô hình		Hệ số chưa chuẩn hoá		Hệ số chuẩn hóa	t	Mức ý nghĩa thống kê
		B	Sai số chuẩn	β		
1	Hệ số chặn (c_0)	0,009	0,002		3,909	0,005
	A_p/V (c_1)	$-3,151.10^{-5}$	0,000	-0,745	-3,403	0,008
	d_p (c_2)	$2,061.10^{-6}$	0,000	0,472	2,146	0,057
a. Biến phụ thuộc của mô hình: Lamda (300°C)						

Từ việc kiểm tra các điều kiện sử dụng của mô hình hồi quy tuyến tính cho thấy có 16 mô hình hồi quy thỏa mãn và có thể sử dụng trong phân tích, tính toán. Với mỗi hàng trong Bảng 3, có một mô hình hồi quy tuyến tính ở điểm nhiệt độ tương ứng, chẳng hạn với nhiệt độ $t = 600^\circ\text{C}$ mô hình tương ứng là:

$$\lambda\left(\frac{A_p}{V}; d_p; 600\right) = 0,014 - 6,093.10^{-5} \cdot \frac{A_p}{V} + 5,439.10^{-6} \cdot d_p \quad (3)$$

Các mô hình này rất có ý nghĩa trong thực tiễn, nó giúp tính toán được hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy $\lambda_{p,t}$ tại bất kỳ cặp giá trị ($A_p/V, d_p$) nào. Tức là khi thay đổi giá trị của hệ số tiết diện A_p/V và độ dày màng khô của lớp sơn chống cháy d_p ta luôn xác định được giá trị tương ứng của $\lambda_{p,t}$. Khi có được các giá trị $\lambda_{p,t}$ tại các điểm nhiệt được tính bằng mô hình, tiếp tục sử dụng các phương pháp nội suy tuyến tính ta có thể xác định được giá trị của $\lambda_{p,t}$ tại bất kỳ điểm nhiệt độ nào trong phạm vi nhiệt độ từ 300°C đến 700°C . Bảng 5 dưới đây thể hiện giá trị của $\lambda_{p,t}$ tại 600°C tính theo mô hình hồi quy tuyến tính (3) ứng với một số điều kiện cụ thể

của $A_p/V, d_p$. Mỗi ô trong bảng thể hiện giá trị của $\lambda\left(\frac{A_p}{V}; d_p; 600\right)$ tính tại cặp giá trị $\left(\frac{A_p}{V}; d_p\right)$ tương ứng.

Bảng 5: Hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy tại nhiệt độ 600°C tính tại một số cặp giá trị (A_p/V , d_p) bằng mô hình.

Mô hình hồi quy $\lambda\left(\frac{A_p}{V}; d_p; 600\right) = 0,014 - 6,093.10^{-5} \cdot \frac{A_p}{V} + 5,439.10^{-6} \cdot d_p$				
$d_p \backslash \frac{A_p}{V}$	100	150	200	250
1000	0,0133	0,0103	0,0073	0,0042
1500	0,0161	0,0130	0,0100	0,0069
2000	0,0215	0,0185	0,0154	0,0124
2500	0,0242	0,0212	0,0181	0,0151

4. Kết luận

Dựa trên bộ dữ liệu về kết quả thử nghiệm chịu lửa của 12 mẫu thử đã lập được, bằng phương pháp thống kê, nghiên cứu này đã xây dựng được 16 mô hình hồi quy tuyến tính đa biến (2 biến) có ý nghĩa thống kê, phản ánh sự phụ thuộc tuyến tính của hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy vào độ dày màng sơn khô ban đầu của lớp sơn chống cháy và hệ số tiết diện của thép có lớp sơn chống cháy. Các mô hình này rất có ý nghĩa trong thực tiễn, giúp tính toán được hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy $\lambda_{p,t}$ khi thay đổi giá trị của A_p/V và d_p . Các mô hình này khi được kết hợp với phương pháp nội suy tuyến tính sẽ giúp xác định được hệ số dẫn nhiệt của sơn chống cháy tại các điểm nhiệt độ của mẫu thép thử nghiệm trong phạm vi từ 300°C đến 700°C. Các giá trị này là một trong số các dữ liệu đầu vào được sử dụng trong tính toán kết cấu thép chịu lửa theo tiêu chuẩn Châu Âu EN 1992-1-2: 2005 [2].■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. A. Lucherini (2016), *Experimental study of the behaviour of steel structures protected by different intumescent coatings and exposed to various fire scenarios*. MSc thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark (DTU).
2. British Standards Institution (2005). *EN 1992-1-2:2005 - Eurocode 3. Design of Steel Structures. General Rules. Structural Fire Design*.
3. British Standards Institution (2013), *EN 13381-8:2013, Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 8: Applied reactive protection to steel members*.
4. Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy, Phòng thí nghiệm vật liệu, cấu kiện xây dựng và trang thiết bị phòng cháy chữa cháy (2023), *Báo cáo thử nghiệm xây dựng cơ sở dữ liệu phục vụ công tác thiết kế bảo vệ chịu lửa cho cấu kiện thép của vật liệu dạng phản ứng – Sơn chống cháy loại trương nở - Theo tiêu chuẩn BS EN 13381-8:2013 (No: 0825/2023-TNCL)*.