

ỨNG DỤNG DỮ LIỆU CONE CALORIMETER TRONG DỰ BÁO KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM ĐỐT TRÊN MẪU KÍCH THƯỚC LỚN ĐỐI VỚI VẬT LIỆU HOÀN THIỆN TƯỜNG, TRẦN TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM

APPLICATION OF CONE CALORIMETER DATA IN PREDICTING INTERMEDIATE-SCALE FIRE TEST RESULTS OF WALL AND CEILING FINISHING MATERIALS IN VIETNAM

PHẠM MINH ĐIỀN^{a,*},

^aViện Khoa học công nghệ xây dựng

*Tác giả đại diện: Email: midibst@gmail.com

Ngày nhận 04/8/2026, Ngày sửa 28/9/2026, Chấp nhận 30/9/2026

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2026.vi.vol3-3>

Tóm tắt: Các thử nghiệm thử nghiệm phản ứng với lửa của vật liệu xây dựng như ASTM E84, ISO 9705 và EN 13823 thường được thực hiện trên mẫu thử có kích thước tương đối lớn và đòi hỏi thiết bị thử nghiệm phức tạp. Để dự báo một số chỉ tiêu phản ứng với lửa của vật liệu được thử nghiệm trên mẫu kích thước lớn, có thể sử dụng mô hình được đề xuất bởi Janssens và phần mềm ConeTools kết hợp các kết quả thử nghiệm đốt thực hiện trên thiết bị đo nhiệt lượng hình nón cụt (Cone Calorimeter) với mẫu thử kích thước chỉ 100 mm. Để đánh giá khả năng ứng dụng của các phương pháp đã được đề xuất khi sử dụng các thiết bị hiện có tại Việt Nam, nghiên cứu này đã tiến hành thử nghiệm trên 3 loại vật liệu gồm plywood, ván dăm định hướng (OSB) và gỗ thông tại các mức bức xạ 25 kW/m² và 50 kW/m². Dữ liệu tốc độ giải phóng nhiệt (HRR) và tốc độ sinh khói (SPR) thu được qua thử nghiệm trên Cone Calorimeter được sử dụng làm đầu vào để dự báo các chỉ tiêu thử nghiệm theo ASTM E84 gồm chỉ số lan truyền lửa (FSI), chỉ số sinh khói (SDI), cũng như các chỉ tiêu thử nghiệm theo ISO 9705 và EN 13823 gồm tốc độ phát triển đám cháy (FIGRA) và thời gian xảy ra bắt cháy toàn diện (t_{IF}). Dự báo về phân loại chỉ tiêu phản ứng với lửa của các mẫu được thử căn cứ trên dữ liệu từ Cone Calorimeter đã được đối chiếu với kết quả tương ứng thu được từ thử nghiệm trên mẫu kích thước lớn. Kết quả đối chiếu cho thấy sự tương đồng khá tốt giữa 2 cách tiếp cận.

Từ khóa: thử nghiệm phản ứng với lửa, chỉ tiêu phản ứng với lửa, cone calorimeter (ISO 5660-1); tốc độ giải phóng nhiệt (HRR); tốc độ sinh khói (SPR); tốc độ phát triển đám cháy (FIGRA); mô hình Janssens; ConeTools; chỉ số lan truyền lửa (FSI); chỉ số sinh khói (SDI); bắt cháy toàn diện (flashover).

Abstract: Reaction to fire tests for construction materials, such as ASTM E84, ISO 9705, and EN

13823, are generally conducted using relatively large test specimens and require complex testing equipment. To predict the reaction to fire of materials in larger-scale tests, models developed by Janssens and the ConeTools software can be used, with input data obtained from Cone Calorimeter tests using specimens measuring only 100 mm × 100 mm. To evaluate the applicability of these approaches using testing facilities available in Vietnam, this study investigated three types of materials, namely plywood, oriented strand board (OSB), and pine wood, using a Cone Calorimeter at incident heat fluxes of 25 kW/m² and 50 kW/m². The heat release rate (HRR) and smoke production rate (SPR) obtained from the Cone Calorimeter tests were used as input data to predict the characteristic parameters of ASTM E84, including the Flame Spread Index (FSI) and Smoke Developed Index (SDI), as well as the characteristic parameters of the ISO 9705 and EN 13823 fire tests, including the Fire Growth Rate Index (FIGRA) and time to flashover (t_{IF}). The predicted fire reaction parameters were compared with the corresponding results obtained from larger-scale fire tests. The comparison showed relatively good agreement between the two sets of results.

Keywords: reaction to fire test, reaction to fire properties, cone calorimeter (ISO 5660-1); heat release rate (HRR); smoke production rate (SPR); fire growth rate (FIGRA); Janssens model; ConeTools; flame spread index (FSI); smoke developed index (SDI); flashover.

1. Giới thiệu

Một trong những nội dung cần xem xét khi thiết kế về an toàn cháy cho nhà và công trình là phải đánh giá được khả năng tham gia của vật liệu xây dựng vào sự hình thành và phát triển đám cháy cũng như các yếu tố nguy hiểm của đám cháy, đó chính là tính

nguy hiểm cháy của vật liệu xây dựng. Việc phân loại tính nguy hiểm cháy của vật liệu xây dựng cần căn cứ vào các thử nghiệm phản ứng với lửa để xác định các đặc tính kỹ thuật về cháy liên quan [1]. Các thử nghiệm đốt (thuộc nhóm phản ứng với lửa) quy mô trung bình và quy mô lớn [2] tương ứng thực hiện trên mẫu có kích thước lớn nhất đến 3 m và hơn 3 m (dưới đây gọi chung là mẫu kích thước lớn). Mỗi quốc gia hoặc khu vực có thể áp dụng phương pháp thử nghiệm phản ứng với lửa theo các tiêu chuẩn khác nhau. Liên quan đến các đặc tính như mức độ lan truyền lửa, mức độ sinh khói và khả năng dẫn đến giai đoạn bắt cháy toàn diện trong khoang cháy ở các điều kiện khác nhau, thường sử dụng các phương pháp thử nghiệm tiêu chuẩn theo ASTM E84 (Steiner Tunnel Test) [3], ISO 9705 (Room Corner Test) [4] và (Single Burning Item – SBI) [5]. Căn cứ vào yêu cầu đối với kích thước mẫu thử, có thể xếp ASTM E84 và ISO 9705 vào nhóm thử nghiệm đốt quy mô lớn, còn EN 13823 có thể xếp vào nhóm thử nghiệm đốt quy mô trung bình [2]. Kết quả của các phép thử này thường được sử dụng làm cơ sở cho phân loại vật liệu theo các hệ thống tiêu chuẩn của Mỹ bao gồm NFPA 101 [6], IBC [7] hoặc của châu Âu [8].

Các thử nghiệm đốt nêu trên được thực hiện trên các mẫu kích thước lớn thường đòi hỏi về thiết bị và điều kiện môi trường cho thử nghiệm phức tạp. Cụ thể mẫu thử, ASTM E84 yêu cầu kích thước dài 7,32 m và rộng 0,508 m, ISO 9705 yêu cầu mẫu vật liệu cần đánh giá phải phủ lên các bề mặt của phòng thử với tổng diện tích khoảng 20 m², còn EN 13823 yêu cầu mẫu vật liệu cần đánh giá khoảng hơn 3 m². Bên cạnh đó, để có thể thực hiện được các thử nghiệm này, hạ tầng phòng thử nghiệm còn cần hệ thống thông gió, thiết bị đo và phân tích các sản phẩm khí sinh ra sau cháy và không gian thử nghiệm chuyên dụng [9], [10]. Những yếu tố kể trên có ảnh hưởng nhiều đến chi phí tuân thủ của xã hội, đặc biệt trong trường hợp quy định về quản lý chất lượng công trình xây dựng đòi hỏi áp dụng riêng kết quả thử nghiệm đối với từng công trình, đồng thời cũng là những trở ngại cho công tác nghiên cứu khoa học hoặc nghiên cứu phát triển sản phẩm khi cần phải thực hiện thử nghiệm trên một số lượng lớn mẫu thử.

Để khắc phục những vấn đề trên, việc nghiên cứu, xây dựng mối quan hệ giữa kết quả từ các thử nghiệm phản ứng với lửa trên mẫu kích thước nhỏ, kết quả thử nghiệm phản ứng với lửa trên mẫu kích

thước lớn đã được quan tâm trong lĩnh vực kỹ thuật an toàn cháy [11]. Trong số các phương pháp thử trên mẫu kích thước nhỏ thì thử nghiệm sử dụng thiết bị đo nhiệt lượng hình nón cụt (Cone Calorimeter) theo tiêu chuẩn ISO 5660-1 [12] được áp dụng tương đối phổ biến nhờ khả năng xác định tốc độ giải phóng nhiệt (HRR) dựa trên nguyên lý xác định khối lượng ô xy được tiêu thụ bởi sự cháy [13]. Các dữ liệu thu được từ Cone Calorimeter gồm HRR (đây được xem là tham số đặc trưng cho mức độ nguy hiểm cháy của vật liệu [14]), SPR, thời gian bắt cháy (t_{ig}) và suy giảm khối lượng (ML) đã được sử dụng trong nhiều nghiên cứu nhằm xây dựng mối liên hệ với kết quả từ các thử nghiệm đốt mẫu kích thước lớn, điển hình như [15] và [16].

Một trong các hướng tiếp cận tiêu biểu là mô hình Janssens, được phát triển nhằm dự báo các kết quả thử nghiệm theo ASTM E84 gồm chỉ số lan truyền lửa (FSI) và chỉ số sinh khói (SDI) từ dữ liệu Cone Calorimeter [17]. Song song đó, phần mềm ConeTools do RISE (Thụy Điển) thiết kế và xây dựng cho phép sử dụng dữ liệu HRR và t_{ig} thu được từ thử nghiệm bằng Cone Calorimeter để dự báo các kết quả thử nghiệm theo ISO 9705 và EN 13823, bao gồm thời gian đến bắt cháy toàn diện (t_{IF}), tốc độ phát triển đám cháy (FIGRA) và diễn biến theo thời gian của tốc độ giải phóng nhiệt trong không gian cháy [18], [19].

Tại Việt Nam, thời gian gần đây nhu cầu thực hiện thử nghiệm phản ứng với lửa để đánh giá vật liệu theo các tiêu chuẩn quốc tế ngày càng gia tăng trong khi nguồn lực dành cho thử nghiệm cũng còn nhiều hạn chế. Vì vậy, việc nghiên cứu khả năng ứng dụng dữ liệu Cone Calorimeter trong dự báo các chỉ tiêu phản ứng với lửa từ các thử nghiệm trên mẫu kích thước lớn có ý nghĩa thực tiễn trong việc giảm chi phí thử nghiệm, tiết kiệm vật liệu và hỗ trợ sàng lọc vật liệu trước khi thực hiện các phép thử mẫu kích thước lớn. Tuy nhiên, để có cơ sở khẳng định về khả năng áp dụng cũng như thiết lập một quy trình triển khai phù hợp với những điều kiện hạ tầng phòng thí nghiệm, thiết bị thử nghiệm hiện có ở Việt Nam thì việc thực hiện các thử nghiệm mang tính đối chiếu với những kết quả đã có là rất cần thiết.

Nghiên cứu này tập trung đánh giá khả năng sử dụng dữ liệu Cone Calorimeter để dự báo các đặc

tính kỹ thuật về cháy của vật liệu khi thử nghiệm theo ASTM E84, ISO 9705 và EN 13823 thông qua mô hình Janssens và phần mềm ConeTools. Ba loại vật liệu gồm ván plywood, ván dăm định hướng (OSB) và gỗ thông được sử dụng làm đối tượng nghiên cứu nhằm bước đầu đánh giá khả năng áp dụng phương pháp dự báo đối với các nhóm vật liệu gỗ thường dùng làm vật liệu hoàn thiện tường, trần trong công trình xây dựng.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1 Thử nghiệm trên Cone Calorimeter

Cone Calorimeter theo ISO 5660-1 là thiết bị thử nghiệm đốt đối với mẫu thử có kích thước nhỏ được sử dụng rộng rãi để đánh giá tính năng cháy của vật liệu [13]. Việc xác định các chỉ tiêu phản ứng với lửa của vật liệu bằng thiết bị này dựa trên nguyên lý xác định khối lượng oxy được tiêu thụ bởi sự cháy, theo đó lượng nhiệt giải phóng trong quá trình cháy tỷ lệ với lượng oxy bị tiêu thụ [20].

Thử nghiệm trên Cone Calorimeter yêu cầu mẫu thử có kích thước dài 100 mm x rộng 100mm với chiều dày lớn nhất cho phép 50 mm. Mẫu được đặt dưới bộ gia nhiệt hình nón cụt và chịu tác động bởi bức xạ nhiệt có cường độ xác định. Các mức bức xạ

thường được sử dụng nằm trong khoảng từ 25 kW/m² đến 75 kW/m² tùy thuộc mục đích nghiên cứu và loại vật liệu [12]. Trong nghiên cứu này, số liệu thử nghiệm trên Cone Calorimeter ở mức bức xạ 50 kW/m² được sử dụng kết hợp phần mềm ConeTools để dự báo các chỉ tiêu thử nghiệm theo ISO 9705 và EN 13823 và mức bức xạ 25 kW/m² được sử dụng cùng với mô hình Janssens để dự báo các chỉ số thử nghiệm theo ASTM E84.

Các thông số cơ bản từ thử nghiệm trên Cone Calorimeter dùng trong nghiên cứu này được trình bày tổng hợp trong Bảng 1. Với lợi thế về mẫu thử có kích thước nhỏ và khả năng cung cấp nhiều chỉ tiêu phản ứng với lửa của vật liệu nên thử nghiệm trên thiết bị Cone Calorimeter được xem như một công cụ hiệu quả trong sàng lọc vật liệu và sử dụng cho nghiên cứu quan hệ giữa các kết quả thử nghiệm đốt trên mẫu kích thước nhỏ phản ứng với lửa của mẫu kích thước lớn [25]. Trên thực tế bên cạnh việc sử dụng các dữ liệu này để xây dựng phương pháp dự báo chỉ tiêu phản ứng với lửa của các mẫu kích thước lớn, chúng còn được sử dụng rộng rãi trong mô hình cháy để mô phỏng sự phát triển đám cháy [15], [16].

Bảng 1. Các thông số cơ bản khi thử nghiệm trên Cone Calorimeter sử dụng trong nghiên cứu

STT	Ký hiệu	Tên thông số	Đơn vị
1	HRR _{Cone}	Tốc độ giải phóng nhiệt của mẫu	kW/m ²
2	SPR _{Cone}	Tốc độ sinh khói	m ² /s
3	t _{ig,Cone}	Thời gian bắt cháy của mẫu	s
4	ML	Suy giảm khối lượng của mẫu	g
5	THR _{Cone}	Tổng nhiệt lượng giải phóng trên đơn vị diện tích	MJ/m ²

2.2 Phần mềm ConeTools và dự báo các kết quả thử nghiệm theo ISO 9705, EN 13823

Ký hiệu các thông số cơ bản từ các thử nghiệm theo tiêu chuẩn khác và từ viết tắt sử dụng trong nghiên cứu này được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Giải thích từ viết tắt và các thông số cơ bản khi thử nghiệm theo các tiêu chuẩn khác

STT	Ký hiệu	Tên thông số / từ viết tắt	Đơn vị
1	HRR _{RCT}	Tốc độ giải phóng nhiệt xác định qua thử nghiệm ISO 9705	kW
2	t _{IF}	Thời gian xảy ra bắt cháy toàn diện xác định qua thử nghiệm ISO 9705	s
3	FIGRA _{SBI}	Chỉ số tốc độ phát triển cháy xác định qua thử nghiệm SBI	W/s
4	RCT	Room Corner Test – cấu hình thử nghiệm góc phòng theo ISO 9705	–
5	SBI	Single Burning Item – cấu hình thử nghiệm với một nguồn cháy đơn theo EN 13823	–
6	FSI	Chỉ số lan truyền lửa bề mặt xác định qua thử nghiệm ASTM E84	–
7	SDI	Chỉ số sinh khói xác định qua thử nghiệm ASTM E84	–

ConeTools là công cụ dự báo được phát triển từ những năm 2000 trong khuôn khổ các nghiên cứu của SP Fire Research (nay là RISE – Thụy Điển), đến nay đã trở thành phần mềm thương mại có bản quyền với mục đích sử dụng dữ liệu Cone Calorimeter để đánh giá các chỉ tiêu phản ứng với lửa của vật liệu trên mẫu kích thước lớn [18], [19]. Công cụ này cho phép chuyển đổi dữ liệu HRR_{Cone} thành các chỉ tiêu phản ứng với lửa khi thử nghiệm theo ISO 9705 và EN 13823. Để xây dựng phần mềm dự báo ConeTools, nhóm nghiên cứu đã tiến hành thử nghiệm trên Cone Calorimeter khoảng 80 mẫu sản phẩm khác nhau, đa dạng từ gỗ thông, ván plywood, nhựa, thạch cao, ván dăm phủ lớp trơ nỡ, bông khoáng, foam PU... Và đối chiếu với các kết quả thử nghiệm theo ISO 9705 và EN 13823 [18], [21].

Đối với ISO 9705, ConeTools sử dụng HRR_{Cone} và $t_{ig,Cone}$ từ kết quả thử nghiệm trên Cone Calorimeter làm dữ liệu đầu vào để mô phỏng sự phát triển của vùng cháy trên bề mặt vật liệu và dự báo tốc độ giải phóng nhiệt của toàn bộ không gian thử nghiệm (HRR_{RCT}). Thời gian xảy ra bắt cháy toàn diện t_{IF} được xác định từ biểu đồ quan hệ HRR_{RCT} , theo thời gian ứng với thời điểm HRR_{RCT} đạt 1000 kW [18], [22].

Đối với EN 13823, ConeTools cho phép dự báo các tham số đặc trưng như FIGRA, THR_{600s} và diễn biến phát triển cháy ghi nhận được qua thử nghiệm SBI [19]. Chỉ số FIGRA và THR_{600s} được sử dụng rộng rãi trong hệ thống phân loại Euroclass nhằm đánh giá tốc độ phát triển cháy của vật liệu [8].

Các kết quả dự báo không thay thế hoàn toàn cho thử nghiệm ISO 9705 hoặc EN 13823 thực tế, nhưng cho phép đánh giá sơ bộ xu hướng phát triển cháy của vật liệu với chi phí và quy mô thử nghiệm nhỏ hơn đáng kể.

2.3 Mô hình Janssens dự báo kết quả thử nghiệm theo ASTM E84

ASTM E84 là phương pháp thử nghiệm đốt mẫu kích thước lớn được sử dụng để đánh giá đặc tính lan truyền lửa bề mặt và sinh khói của vật liệu xây dựng. Kết quả thử nghiệm được biểu thị thông qua hai chỉ số chính gồm FSI và SDI được dùng trong đánh giá và phân loại vật liệu theo NFPA 101 và International Building Code (IBC) [3], [6], [7].

Janssens và cộng sự đã xây dựng mô hình toán – lý nhằm dự báo kết quả thử nghiệm ASTM E84 từ dữ liệu thử nghiệm trên Cone Calorimeter và thử nghiệm đối chứng trên hệ thống thiết bị theo ASTM E84 trên cơ sở dữ liệu của 12 loại vật liệu như ván Plywood, thạch cao, giấy dán tường, ván dăm định hướng (OSB), gỗ thông, tấm nhựa cốt sợi thủy tinh... [16], [25].

Trong mô hình Janssens, dữ liệu HRR_{Cone} và $t_{ig,Cone}$ từ kết quả thử nghiệm trên Cone Calorimeter được sử dụng để mô phỏng sự phát triển của vùng cháy và sự lan truyền của ngọn lửa trên bề mặt mẫu trong điều kiện thử nghiệm theo ASTM E 84. Dựa trên quan hệ của chiều dài lan truyền của ngọn lửa theo thời gian, diện tích dưới đường cong lan truyền lửa được sử dụng để dự báo chỉ số FSI. Đồng thời, dữ liệu SPR được sử dụng để dự báo mức độ sinh khói và xác định chỉ số SDI [17].

Mô hình Janssens không nhằm thay thế hoàn toàn thử nghiệm ASTM E84 thực tế mà được sử dụng như một công cụ hỗ trợ dự báo và sàng lọc vật liệu trước khi thực hiện các thử nghiệm mẫu kích thước lớn [25]. Do đó, kết quả dự báo phụ thuộc vào loại vật liệu, điều kiện thử nghiệm và phạm vi áp dụng của mô hình.

3. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

3.1 Vật liệu thử nghiệm

Ba loại vật liệu gồm ván plywood dày 12mm, ván dăm định hướng (OSB) dày 20mm và gỗ thông dày 26mm được lựa chọn làm mẫu thử đại diện cho các nhóm vật liệu gỗ kỹ thuật và gỗ tự nhiên thường sử dụng trong công trình xây dựng. Các mẫu thử được sử dụng ở trạng thái hoàn thiện của sản phẩm thương mại, giữ nguyên chiều dày thực tế, không thực hiện thêm các công đoạn gia công hoặc hoàn thiện bề mặt trước khi thử nghiệm ngoài việc gia công thành các miếng mẫu có kích thước dài 100mm x rộng 100mm phù hợp với yêu cầu của thiết bị Cone Calorimeter theo ISO 5660-1 [12].

Ván plywood được chế tạo từ nhiều lớp gỗ mỏng liên kết bằng keo dưới tác dụng của nhiệt và áp suất. OSB là vật liệu gỗ kỹ thuật được tạo thành từ các dăm gỗ định hướng kết hợp với chất kết dính polymer nhiệt rắn. Trong khi đó, gỗ thông là vật liệu gỗ tự nhiên thường được sử dụng trong các ứng dụng nội thất và kết cấu nhẹ. Việc lựa chọn ba loại vật liệu này

nhằm đánh giá khả năng áp dụng các mô hình dự báo đối với các nhóm vật liệu đa dạng có cấu trúc và đặc tính cháy khác nhau, đồng thời là những mẫu có tính tương đồng ở mức độ nào đó với các nhóm mẫu mà các nhóm nghiên cứu đã sử dụng để thiết kế phần mềm ConeTools cũng như xây dựng công cụ dự báo của Janssens [26], [27].

Với dự báo các kết quả thử nghiệm theo ISO 9705 và EN 13823: sử dụng 01 mẫu đối với mỗi loại vật liệu thử nghiệm ở cấp bức xạ 50 kW/m². Với dự báo các chỉ số theo ASTM E84, sử dụng 06 mẫu/01 loại vật liệu thử nghiệm lần lượt, mỗi mẫu tại một cấp bức xạ từ 50 kW/m², 45 kW/m², 40 kW/m², 35 kW/m², 30 kW/m² và 25 kW/m². Trong một số trường hợp, khi độ tin cậy của phép hồi quy trong xác định thời gian bắt cháy dự báo của bề mặt vật liệu trong đường hầm Steiner chưa đảm bảo, một số mẫu được thử thêm tại các mức bức xạ như 55 kW/m², 20 kW/m²...

Mỗi loại vật liệu trước khi thử nghiệm đã được kiểm tra kích thước (chiều dài, chiều rộng, chiều dày) và để trong điều kiện ổn định đến khối lượng không đổi theo quy trình nêu trong ISO 5660-1. Độ ẩm của mẫu sau dưỡng hộ được xác định trước khi thử nghiệm và nằm trong khoảng 8 đến 10%.

3.2 Thử nghiệm Cone Calorimeter

Các thử nghiệm được thực hiện trên thiết bị Cone Calorimeter theo tiêu chuẩn ISO 5660-1 [12]. Mẫu thử có kích thước danh nghĩa 100 mm x 100 mm và được đặt nằm ngang dưới bộ gia nhiệt hình nón (cone heater). Trong quá trình thử nghiệm, bề mặt mẫu chịu tác động của dòng nhiệt bức xạ không đổi và được gây bắt cháy bằng bộ đánh lửa điện theo quy trình tiêu chuẩn.

Trong nghiên cứu này, hai mức bức xạ nhiệt được sử dụng gồm 50 kW/m² và 25 kW/m². Kết quả thử nghiệm ở mức bức xạ 50 kW/m² được sử dụng cho các dự báo ISO 9705 và EN 13823 thông qua phần mềm ConeTools trong khi kết quả thử nghiệm ở mức bức xạ 25 kW/m² được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho mô hình Janssens nhằm dự báo các chỉ số theo ASTM E84.

Các dữ liệu thu thập từ Cone Calorimeter bao gồm HRR_{Cone} , SPR_{Cone} , $t_{ig,Cone}$ và ML theo thời gian. Dữ liệu được ghi nhận liên tục trong suốt quá trình thử nghiệm phù hợp theo ISO 5660-1 [12], [23].

3.3 Quy trình dự báo theo ConeTools

Với mỗi loại vật liệu, 01 mẫu được thử nghiệm trên Cone Calorimeter ở cấp bức xạ 50 kW/m² theo quy trình ISO 5660-1 để ghi nhận HRR_{Cone} và $t_{ig,Cone}$ để sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho phần mềm ConeTools nhằm dự báo các đặc trưng cháy theo ISO 9705 và EN 13823 [18], [19].

Đối với kịch bản ISO 9705, ConeTools được sử dụng để dự báo diễn biến tốc độ tỏa nhiệt của toàn bộ không gian cháy theo thời gian ($HRR_{RCT}(t)$). Trong nghiên cứu này, ngưỡng $HRR_{RCT} = 1000$ kW được sử dụng để xác định t_F theo thông lệ áp dụng trong các nghiên cứu ISO 9705 [4], [22]. Đối với kịch bản EN 13823, phần mềm được sử dụng để dự báo các thông số đặc trưng của thử nghiệm SBI, bao gồm diễn biến HRR_{SBI} , chỉ số FIGRA và THR_{600s} [8], [19].

3.4 Quy trình dự báo theo mô hình Janssens

Đối với mỗi loại vật liệu, 06 mẫu được thử nghiệm trên Cone Calorimeter lần lượt tại các cấp bức xạ nhiệt (ký hiệu là q''_e) lần lượt là 50 kW/m², 45 kW/m², 40 kW/m², 35 kW/m², 30 kW/m² và 25 kW/m² nhằm xác định $t_{ig,Cone}$ tại từng cấp bức xạ nhiệt. Với cấp bức xạ 25 kW/m², mẫu thử sẽ được thử nghiệm theo quy trình đầy đủ theo ISO 5660-1 để ghi nhận HRR_{Cone} , SPR_{Cone} nhằm sử dụng làm đầu vào cho mô hình Janssens nhằm dự báo các chỉ số FSI và SDI theo ASTM E84 [17], [25]. Từ các giá trị $t_{ig,Cone}$ ghi nhận được tại từng cấp bức xạ nhiệt nêu trên, thông lượng nhiệt tới hạn gây bắt cháy bề mặt vật liệu q''_{cr} và hệ số b được xác định theo phương pháp hồi quy của Janssens với b là hệ số góc của đường hồi quy biểu diễn mối quan hệ giữa q''_{cr} / q''_e và $\sqrt{t_{ig}}$. Với thông lượng nhiệt từ ngọn lửa của đầu đốt trong mô hình Steiner Tunnel được lấy là $q''_b = 35$ kW/m², thời gian bắt cháy dự báo $t_{ig,Tunnel}$ của vật liệu trong điều kiện thử nghiệm Steiner Tunnel, ký hiệu là $t_{ig,Tunnel}$ được tính theo phương trình:

$$t_{ig,Tunnel} = \left(\frac{q''_{cr}}{b q''_b} \right)^2$$

trong đó:

$t_{ig,Tunnel}$ - thời điểm bắt cháy dự báo của bề mặt vật liệu theo ASTM E 84;

q''_{cr} - thông lượng nhiệt tới hạn gây bắt cháy bề mặt mẫu;

q''_b - thông lượng nhiệt của ngọn lửa đầu đốt theo ASTM E 84, lấy = 35 kW/m²;

b – hệ số góc của đường hồi quy mối quan hệ $\dot{q}''_{cr}/\dot{q}''_e$ và $\sqrt{t_{ig}}$.

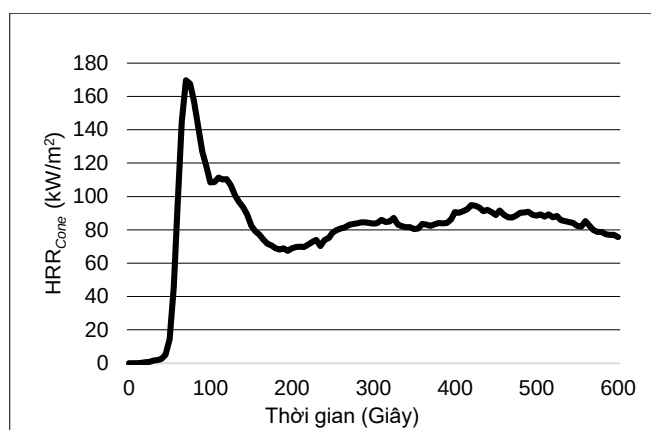
Các kết quả thu được trong nghiên cứu là kết quả dự báo từ mô hình lý thuyết dựa trên dữ liệu Cone Calorimeter và không thay thế trực tiếp cho kết quả thử nghiệm ASTM E84 thực tế.

4. Kết quả thử nghiệm và phân tích đối chiếu

Các dữ liệu thử nghiệm thu được từ Cone Calorimeter như HRR_{Cone} và SPR_{Cone} , các kết quả dự báo chỉ số cháy đặc trưng của ASTM E84, ISO 9705 và EN 13823 như FSI, SDI, t_{IF} , FIGRA được trình bày trong các biểu đồ dưới đây.

4.1 Mẫu ván plywood

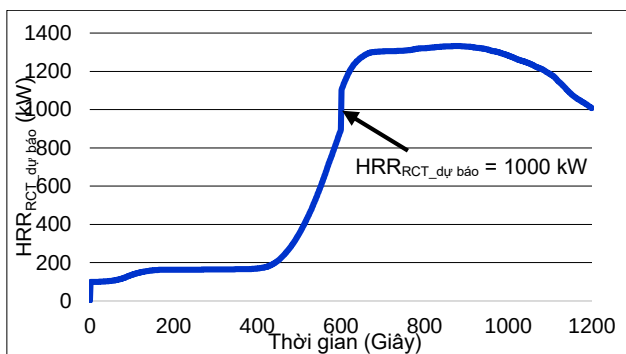
a) Thử nghiệm trên Cone Calorimeter ở cấp bức xạ 50 kW/m²



Hình 1. HRR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 50 kW/m²)

Kết quả thử nghiệm Cone Calorimeter của mẫu plywood tại mức bức xạ 50 kW/m² cho thấy đường cong HRR_{Cone} đạt giá trị cực đại khoảng 170

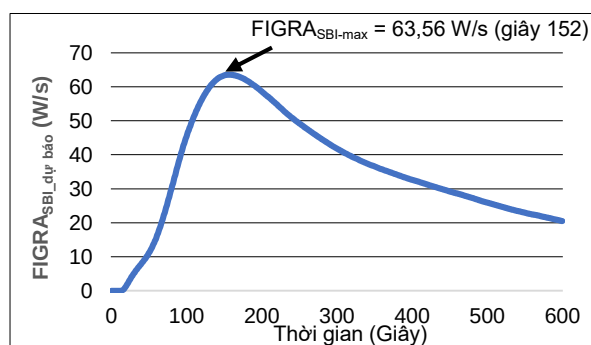
kW/m² khoảng giây thứ 100 (Hình 1). Sau khi đạt đỉnh, HRR_{Cone} giảm dần và duy trì ở mức khoảng từ 70 kW/m² đến 90 kW/m² trong giai đoạn cháy sau.



Hình 1a. HRR_{RCT} dự báo theo ISO 705

Từ dữ liệu HRR_{Cone} và $t_{ig,Cone}$, ConeTools dự báo các đặc trưng cháy mẫu kích thước lớn và trung gian theo ISO 9705 và EN 13823. Kết quả dự báo theo ISO 9705 cho thấy HRR_{RCT} đạt ngưỡng 1000 kW tại khoảng 600 giây, tương ứng t_{IF} (Hình 1a).

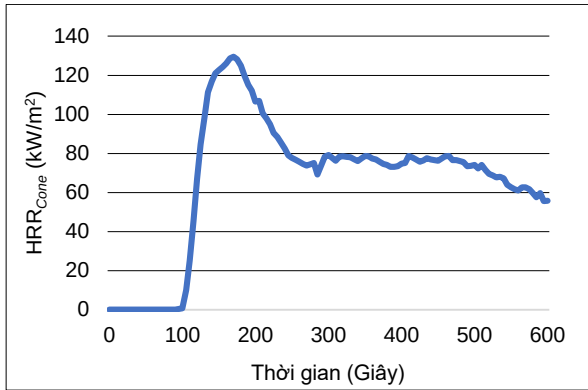
Đối với kích bản SBI theo EN 13823, ConeTools dự báo giá trị $FIGRA_{SBI}$ cực đại đạt



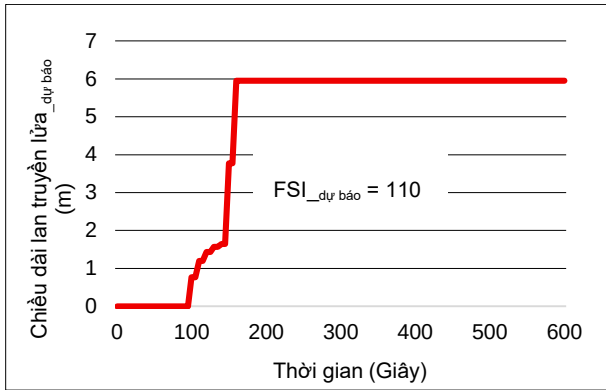
Hình 1b. $FIGRA_{SBI}$ dự báo theo EN 13823

63,56 W/s tại khoảng 150 giây (Hình 1b). Đường cong $FIGRA_{SBI}$ tăng nhanh trong giai đoạn đầu và giảm dần sau khi đạt đỉnh, phản ánh xu hướng phát triển cháy ở mức trung bình của vật liệu trong điều kiện thử nghiệm SBI.

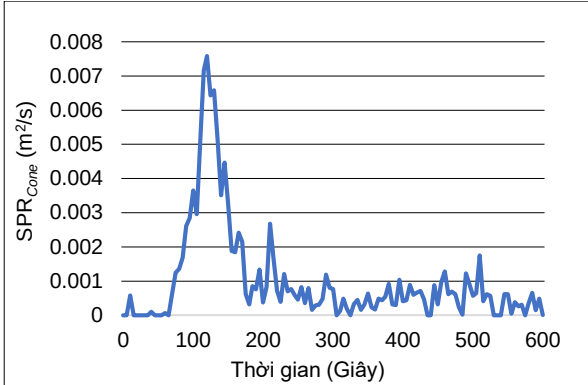
b) Thử nghiệm trên Cone Calorimeter ở cấp bức xạ 25 kW/m² và dự báo theo ASTM E84



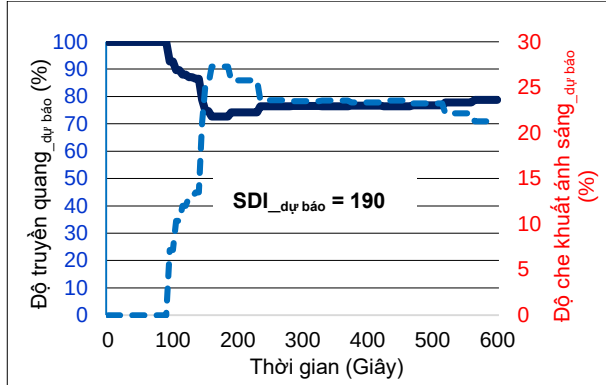
Hình 2. HRR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 25 kW/m^2)



Hình 2a. Chiều dài lan truyền lửa dự báo theo ASTM E84



Hình 3. SPR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 25 kW/m^2)



Hình 3a. Diễn biến sinh khói dự báo theo ASTM E84

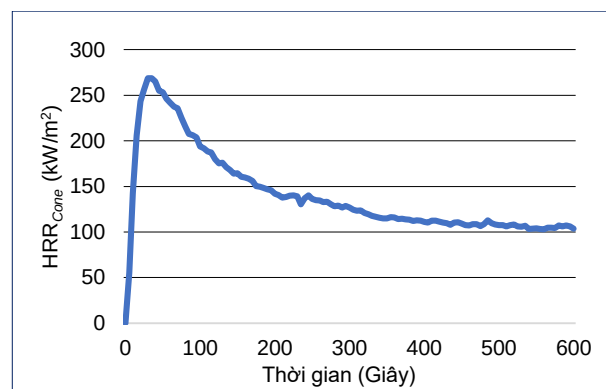
Ở mức bức xạ 25 kW/m^2 , đường cong HRR_{Cone} cho thấy tốc độ phát triển cháy thấp hơn đáng kể so với trường hợp thử nghiệm ở 50 kW/m^2 , với HRR_{Cone} cực đại đạt khoảng 130 kW/m^2 ở giai đoạn 150 đến 170 giây (Hình 2). Trong khi đó, đường cong SPR_{Cone} cho thấy giá trị lớn nhất khoảng $0,0075 \text{ m}^2/\text{s}$ trong thời gian từ 120 đến 150 giây và giảm dần theo thời gian.

Từ dữ liệu HRR_{Cone} và SPR_{Cone} tại mức bức xạ 25 kW/m^2 , mô hình Janssens được sử dụng để dự

báo các chỉ số FSI và SDI theo ASTM E84. Kết quả cho thấy giá trị $FSI_{\text{dự báo}} \approx 110$, trong khi $SDI_{\text{dự báo}} \approx 190$. Các giá trị này cho thấy mẫu ván plywood được xếp vào nhóm Class C (phân loại theo NFPA 101) [6] trong cấu hình thử nghiệm theo ASTM E84.

4.2 Mẫu ván dăm định hướng (OSB)

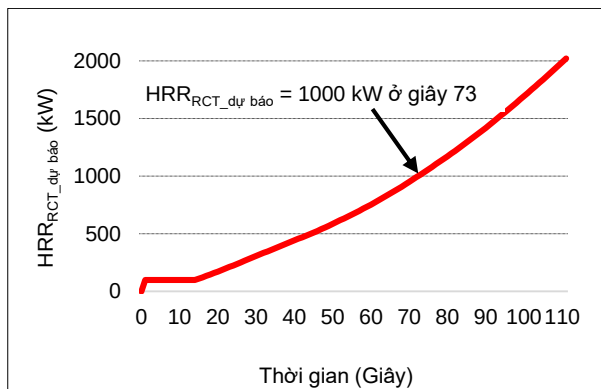
a) Thử nghiệm trên Cone Calorimeter ở cấp bức xạ 50 kW/m^2 và dự báo theo ISO 9705 và EN 13823



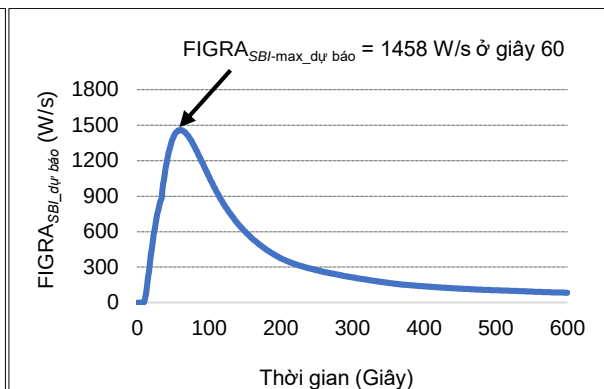
Hình 4. HRR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 50 kW/m^2)

Kết quả thử nghiệm Cone Calorimeter của mẫu ván dăm định hướng OSB tại mức bức xạ 50 kW/m^2 cho thấy HRR_{Cone} tăng nhanh ngay sau khi bắt cháy và đạt giá trị cực đại khoảng 270 kW/m^2 (Hình 4)

trong giai đoạn đầu của quá trình cháy. Sau khi đạt đỉnh, HRR_{Cone} giảm dần theo thời gian nhưng vẫn duy trì ở mức tương đối cao trong phần còn lại của quá trình thử nghiệm.



Hình 4a. $HRR_{RCT_dự\ báo}$ theo ISO 9705

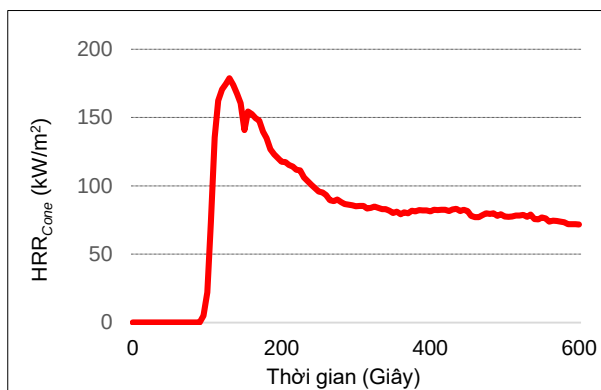


Hình 4b. $FIGRA_{SBI_dự\ báo}$ theo EN 13823

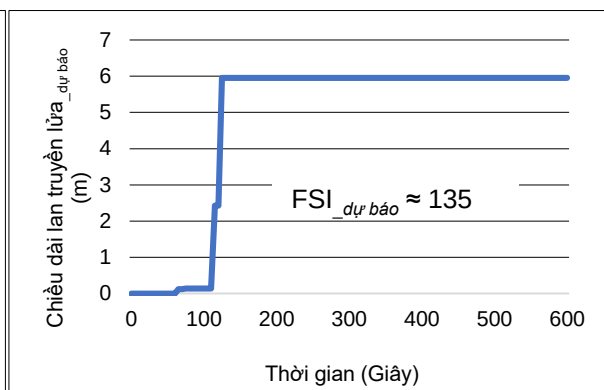
Từ dữ liệu HRR_{Cone} này, ConeTools dự báo HRR_{RCT} theo kích bản ISO 9705 đạt ngưỡng 1000 kW tại giây 73 (Hình 4a). Đối với kích bản SBI theo EN 13823, giá trị $FIGRA_{SBI-max_dự\ báo}$ đạt 1458 W/s (Hình 4b) trong giai đoạn đầu của quá trình cháy. Đường cong $FIGRA_{SBI_dự\ báo}$

đạt đỉnh sớm và giảm nhanh sau đó, phản ánh khả năng cháy mạnh của vật liệu trong cấu hình SBI.

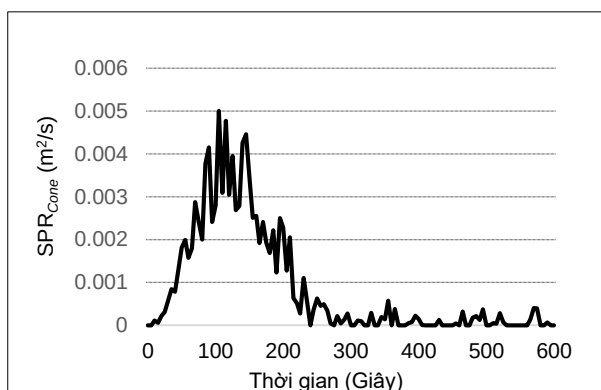
b) Thử nghiệm trên Cone Calorimeter ở cấp bức xạ 25 kW/m² và dự báo theo ASTM E84



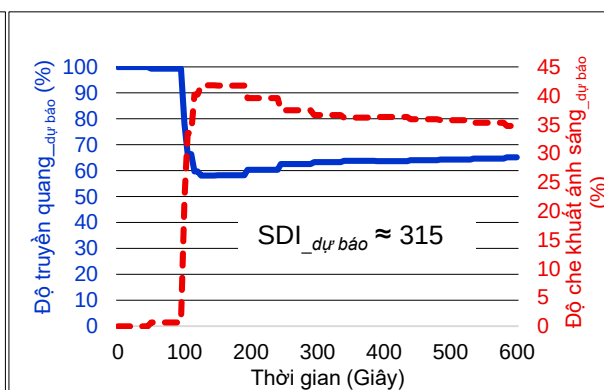
Hình 5. HRR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 25 kW/m²)



Hình 5a. Chiều dài lan truyền lửa dự báo theo ASTM E84



Hình 6. SPR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 25 kW/m²)



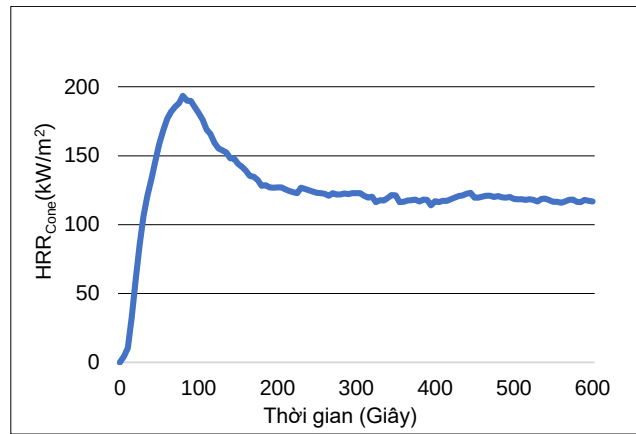
Hình 6a. Diễn biến sinh khói dự báo theo ASTM E84

Ở mức bức xạ 25 kW/m², đường cong HRR_{Cone} cho thấy giá trị lớn (khoảng 170 kW/m²) trong giai đoạn đầu (Hình 5) và SPR_{Cone} tăng mạnh trong khoảng từ 50 giây đến 150 giây đầu tiên (Hình 6). Kết quả dự báo theo ASTM E84 cho thấy mức độ lan truyền lửa phát triển mạnh theo thời gian, tương ứng với giá trị $FSI_{dự\ báo} \approx 135$ (Hình 5a), đồng bộ với giai đoạn lan truyền lửa mạnh mẽ, lượng khói sinh ra tăng đột biến trong cùng khoảng thời gian, tương ứng với

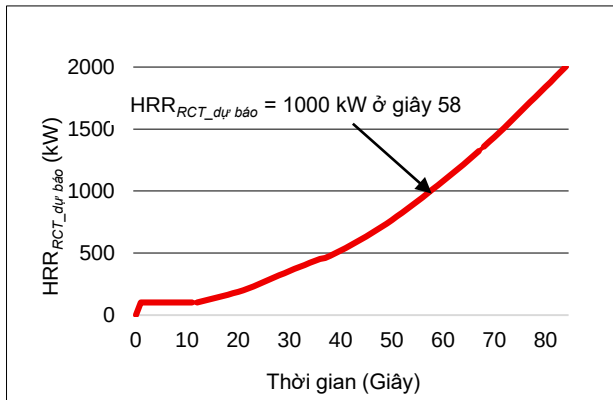
$SDI_{dự\ báo} \approx 315$ (Hình 6a). Các giá trị này cho thấy mẫu ván OSB được xếp vào vào nhóm Class C (phân loại theo NFPA 101) [6] trong thử nghiệm theo ASTM E84.

4.3 Mẫu gỗ thông

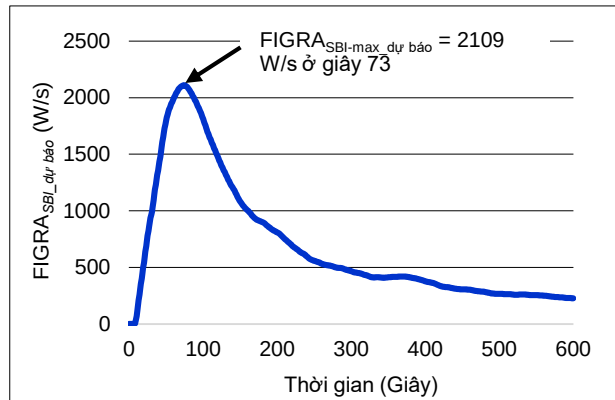
a) Thử nghiệm trên Cone Calorimeter ở cấp bức xạ 50 kW/m² và dự báo kết quả thử nghiệm theo ISO 9705 và EN 13823



Hình 7. HRR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 50 kW/m^2)



Hình 7a. $HRR_{RCT_dự\ báo}$ theo ISO 9705

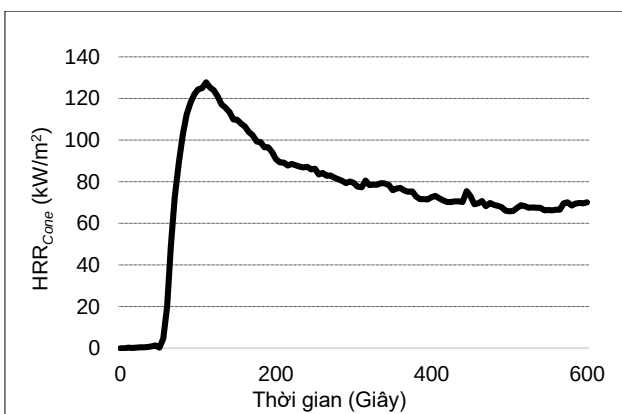


Hình 7b. $FIGRA_{SBI_dự\ báo}$ theo EN 13823

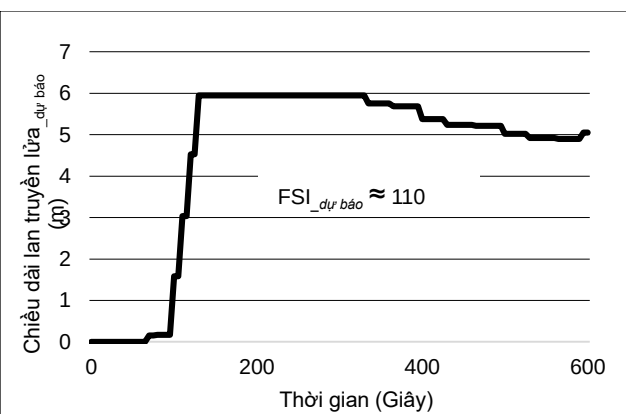
Kết quả thử nghiệm Cone Calorimeter của mẫu gỗ thông tại mức bức xạ 50 kW/m^2 cho thấy HRR_{Cone} tăng nhanh trong giai đoạn đầu và đạt giá trị cực đại khoảng từ 185 kW/m^2 đến 190 kW/m^2 (Hình 7). Sau khi đạt đỉnh, HRR_{Cone} giảm dần theo thời gian nhưng vẫn duy trì ở mức tương đối cao trong phần còn lại của quá trình thử nghiệm.

Kết quả dự báo theo ISO 9705 cho thấy $HRR_{RCT_dự\ báo}$ đạt ngưỡng 1000 kW tại giây 58. Đối với kịch bản SBI theo EN 13823, giá trị $FIGRA_{SBI_max_dự\ báo}$ đạt khoảng 2100 W/s trong giai đoạn đầu của quá trình cháy.

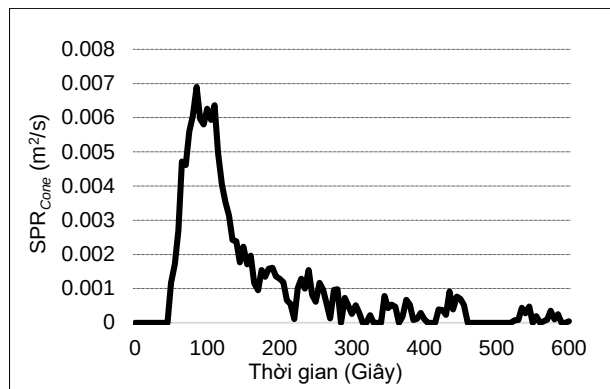
b) Thử nghiệm trên Cone Calorimeter ở cấp bức xạ 25 kW/m^2 và dự báo kết quả thử nghiệm theo ASTM E84



Hình 8. HRR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 25 kW/m^2)



Hình 8a. Chiều dài lan truyền lửa dự báo theo ASTM E84



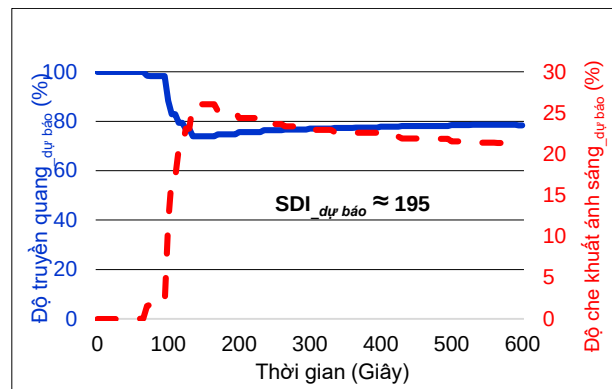
Hình 9. SPR_{Cone} (thử nghiệm ở cấp bức xạ 25 kW/m^2)

Ở mức bức xạ 25 kW/m^2 , mẫu gỗ thông vẫn duy trì HRR_{Cone} tương đối cao trong phần lớn thời gian thử nghiệm và xuất hiện đỉnh sinh khói rõ rệt trong khoảng 80–120 giây đầu tiên. Kết quả dự báo theo ASTM E84 cho thấy giá trị $FSI_{dự báo} \approx 110$ (Hình 8a), trong khi $SDI_{dự báo} \approx 195$ (Hình 9a). Các giá trị này cho thấy mẫu gỗ thông được xếp vào nhóm Class C (phân loại theo NFPA 101) [6] trong thử nghiệm theo ASTM E84.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã cho những cơ sở ban đầu giúp đánh giá khả năng sử dụng dữ liệu Cone Calorimeter để dự báo ứng xử cháy của vật liệu hoàn thiện tường, trần trong các phép thử mẫu kích thước lớn thông qua phần mềm ConeTools và mô hình Janssens. Ba loại vật liệu gồm ván plywood, ván dăm định hướng (OSB) và gỗ thông đã được thử nghiệm trên Cone Calorimeter tại các mức bức xạ nhiệt từ 25 đến 50 kW/m^2 , cung cấp dữ liệu đầu vào cho các mô hình dự báo. Kết quả cho thấy dữ liệu Cone Calorimeter có thể được khai thác để dự báo các đại lượng đặc trưng của các thử nghiệm đốt mẫu kích thước lớn, gồm FSI và SDI theo mô hình Janssens, t_{IF} trong thử nghiệm theo ISO 9705 và FIGRA cấu hình EN 13823.

Kết quả dự báo cho thấy sự khác biệt rõ rệt về xu hướng phát triển cháy giữa các loại vật liệu. Plywood có xu hướng phát triển cháy chậm hơn, thể hiện qua giá trị t_{IF} lớn hơn và các giá trị FSI , SDI tương đối thấp. Ngược lại, OSB và gỗ thông thể hiện khả năng phát triển cháy nhanh hơn, với giá trị FIGRA lớn và giá trị t_{IF} nhỏ hơn. Những kết quả này bước đầu cho thấy dữ liệu Cone Calorimeter có khả năng cung cấp thông tin hữu ích để dự báo xu hướng phản ứng với lửa của các vật liệu trước khi tiến hành các phép thử mẫu kích thước lớn.



Hình 9a. Diễn biến sinh khói dự báo theo ASTM E84

Việc sử dụng Cone Calorimeter kết hợp với ConeTools và mô hình Janssens có ý nghĩa thực tiễn đối với hoạt động nghiên cứu, phát triển và sàng lọc vật liệu tại Việt Nam. So với việc thực hiện trực tiếp các phép thử ISO 9705, EN 13823 hoặc ASTM E84, phương pháp này sử dụng mẫu thử nhỏ hơn và lượng vật liệu ít hơn, qua đó giảm chi phí chuẩn bị mẫu và thử nghiệm. Tuy vậy, cũng chỉ nên áp dụng phương pháp như một bước đánh giá sơ bộ nhằm lựa chọn và sàng lọc vật liệu trước khi thực hiện các phép thử mẫu kích thước lớn cần thiết để đánh giá hoặc phân loại chính thức.

Đối với điều kiện Việt Nam, nơi khả năng tiếp cận các hệ thống thử nghiệm đốt mẫu kích thước lớn còn gặp nhiều khó khăn, cách tiếp cận này mở ra khả năng khai thác hiệu quả hơn dữ liệu Cone Calorimeter trong nghiên cứu và đánh giá vật liệu. Bên cạnh lợi ích về chi phí và yêu cầu cơ sở vật chất, việc giảm kích thước mẫu và số lượng vật liệu sử dụng trong giai đoạn sàng lọc cũng góp phần giảm lượng vật liệu tiêu hao và giảm phát thải ra môi trường trong quá trình thử nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] QCVN 06:2022/BXD Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia Về an toàn cháy cho nhà và công trình và Sửa đổi 1:2023 QCVN 06:2022/BXD.
- [2] TCVN 13943:2020 An toàn cháy – Từ vựng.
- [3] ASTM International (2023). ASTM E84-23: Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials. West Conshohocken, PA, USA.
- [4] International Organization for Standardization (2019). ISO 9705-1:2019 Fire tests — Full-scale room test for surface products. Geneva, Switzerland.
- [5] European Committee for Standardization (2020). EN 13823:2020 Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings

- exposed to the thermal attack by a single burning item. Brussels, Belgium.
- [6] National Fire Protection Association (2021). NFPA 101: Life Safety Code. Quincy, MA, USA.
- [7] International Code Council (2021). International Building Code (IBC). Washington, DC, USA.
- [8] European Committee for Standardization. EN 13501-1:2018 Fire classification of construction products and building elements. Brussels, Belgium.
- [9] Quintiere, J. G. (1998). *Principles of Fire Behavior*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [10] Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd ed. Wiley, Chichester, UK.
- [11] Schartel, B., Hull, T. R. (2007). *Development of fire-retarded materials—Interpretation of cone calorimeter data*. Fire and Materials, 31(5):327-354.
- [12] International Organization for Standardization (2015). ISO 5660-1:2015 Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). Geneva, Switzerland.
- [13] Babrauskas, V. (1984). *Development of the cone calorimeter—A bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption*. Fire and Materials, 8(2):81-95.
- [14] Quintiere, J. G. (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena*. Wiley.
- [15] Östman, B., Tsantaridis, L. (1995). *Correlation between cone calorimeter and room/fire performance*. Fire and Materials, 19(5):205-211.
- [16] Wickström, U. (1996). *Correlation between small-scale and large-scale fire tests for combustible linings*. Lund Institute of Technology Report, Sweden.
- [17] Marc Janssens, Jason Huczek and Anthony Saucedo (2008). *Development of a Model of the ASTM E84 Steiner Tunnel Test*.
- [18] SP Technical Research Institute of Sweden. ConeTools User Guide and Theory Manual. Borås, Sweden (2002).
- [19] RISE Research Institutes of Sweden. Prediction of SBI and Room Corner Test performance from Cone Calorimeter data. Technical Report, Sweden (2002).
- [20] Thornton, W. M. (1917). *The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds*. Philosophical Magazine, 33:196-203.
- [21] Patrick Van Hees, Tommy Hertberg & Anne Steen-Hansen (2002). *Development of Screening Method for the SB and Room Corner using the Cone Calorimeter*.
- [22] Peacock, R. D., Reneke, P. A (1999). *Flashover of materials in ISO 9705 room tests*. NIST Report, USA.
- [23] ASTM International. ASTM E1354-23 Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter. West Conshohocken, PA, USA.
- [24] Karlsson, B., Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press.
- [25] Janssens, M. L. (1991). *Measuring rate of heat release by oxygen consumption*. Fire Technology, 27(3):234-249.
- [26] Forest Products Laboratory. Wood Handbook – Wood as an Engineering Material. USDA Forest Service (2021).
- [27] White, R. H., Dietenberger, M. A (2010). *Fire safety of wood construction*. Trong: Wood Handbook. USDA Forest Service.