

## Simulation of Dispersed Pollutant From Incense Burning Within an Enclosed Space

Giap Thach Nguyen<sup>1</sup>, Lu Phuong Nguyen<sup>\*1</sup>

Ho Chi Minh City University of Natural Resources and Environment (HCMUNRE), Vietnam

\*Corresponding author. Email: [nlphuong@hcmunre.edu.vn](mailto:nlphuong@hcmunre.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 13/11/2025  
Revised: 04/12/2025  
Accepted: 14/01/2026  
Published: 28/02/2026

### KEYWORDS

Mechanical ventilation;  
Indoor air pollution;  
Computational fluid dynamics (CFD);  
Formaldehyde;  
Incense burning.

### ABSTRACT

Indoor air pollution is a serious environmental and public health issue, as modern people spend approximately 80-90% of their time in enclosed spaces. In addition to common emission sources, incense burning – a traditional cultural practice, is a significant source of indoor air pollutants, particularly formaldehyde, but has not received adequate attention. This study focuses on evaluating formaldehyde emissions and dispersion from smoke generated by several commonly used incense types in Viet Nam under different mechanical ventilation conditions. Experiments were conducted in a closed chamber with a volume 1 m<sup>3</sup>, combined with numerical simulations using the finite volume method implemented in Ansys Fluent to validate and analyze pollutant dispersion. Experimental results showed that, under non-ventilated conditions, the average formaldehyde concentration reached 4.163 mg/m<sup>3</sup>, approximately four times higher than the short-term exposure limit specified in QCVN 03:2019/BYT. Simulation results obtained using the low-Reynolds-number k-ε turbulence model showed good agreement with experimental data, with a deviation of about 5%. The study demonstrates the effectiveness of mechanical ventilation and highlights the applicability of CFD modeling in assessing indoor air pollution.

## Mô phỏng sự lan truyền chất ô nhiễm từ việc đốt nhang trong không gian kín

Nguyễn Giáp Thạch<sup>1</sup>, Nguyễn Lữ Phương<sup>\*1</sup>

Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUNRE), Việt Nam

\*Tác giả liên hệ. Email: [nlphuong@hcmunre.edu.vn](mailto:nlphuong@hcmunre.edu.vn)

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 13/11/2025  
Ngày hoàn thiện: 04/12/2025  
Ngày chấp nhận đăng: 14/01/2026  
Ngày đăng: 28/02/2026

### TỪ KHÓA

Thông gió cơ học;  
Ô nhiễm không khí trong nhà;  
Mô phỏng CFD;  
Formaldehyde;  
Đốt nhang.

### TÓM TẮT

Ô nhiễm không khí trong nhà là một trong những vấn đề môi trường và sức khỏe cộng đồng nghiêm trọng, do con người hiện đại dành khoảng 80-90% thời gian sinh hoạt trong không gian kín. Bên cạnh các nguồn phát thải phổ biến, hành vi đốt nhang – một tập quán văn hóa quen thuộc là nguồn phát sinh chất ô nhiễm đáng kể, đặc biệt là formaldehyde nhưng vẫn chưa được quan tâm đúng mức. Nghiên cứu này tập trung đánh giá sự phát thải và lan truyền formaldehyde từ khói của một số loại nhang phổ biến trên thị trường Việt Nam trong các điều kiện thông gió cơ học khác nhau. Thí nghiệm được thực hiện trong mô hình kín có thể tích 1 m<sup>3</sup>, kết hợp mô phỏng số bằng phương pháp thể tích hữu hạn sử dụng phần mềm Ansys Fluent để kiểm chứng và phân tích sự phát tán chất ô nhiễm. Kết quả thực nghiệm cho thấy, trong điều kiện không thông gió, nồng độ formaldehyde trung bình đạt 4,163 mg.m<sup>-3</sup>, cao gấp 4 lần giới hạn tiếp xúc ngắn hạn cho phép theo QCVN 03:2019/BYT. Kết quả mô phỏng sử dụng mô hình rối k-ε Reynolds thấp phù hợp với số liệu thực nghiệm, sai lệch khoảng 5%. Nghiên cứu chứng minh hiệu quả của thông gió và tính ứng dụng của mô phỏng CFD trong đánh giá ô nhiễm không khí trong nhà.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2026.2039>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

## 1. Giới thiệu

Ô nhiễm không khí trong nhà là một trong những vấn đề môi trường và sức khỏe cộng đồng đáng quan tâm, do con người hiện đại dành khoảng 80-90% thời gian sinh hoạt trong các không gian kín [1]-[3]. Nhiều nghiên cứu cho thấy nồng độ các chất ô nhiễm trong nhà có thể cao hơn đáng kể so với môi trường ngoài trời, đặc biệt trong điều kiện thông gió hạn chế. Các nguồn phát thải trong nhà bao gồm vật liệu xây dựng, hoạt động sinh hoạt, thiết bị đốt cháy và các tập quán văn hóa truyền thống, trong đó hành vi đốt nhang là một nguồn phát sinh chất ô nhiễm đáng kể nhưng chưa được quan tâm đúng mức [4]-[7].

Quá trình đốt nhang phát sinh nhiều chất ô nhiễm như bụi mịn ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ), các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (VOCs) và đặc biệt là formaldehyde – một chất có khả năng gây kích ứng mạnh và đã được xếp vào nhóm chất gây ung thư cho người [8]-[10]. Các nghiên cứu thực nghiệm đã ghi nhận nồng độ formaldehyde phát sinh từ khói nhang có thể đạt hoặc vượt ngưỡng phơi nhiễm cho phép, đặc biệt trong các không gian kín như nhà ở, phòng thờ hoặc khu vực có mật độ đốt nhang cao [8], [9], [11], [12]. Ngoài ra, các hạt bụi mịn sinh ra từ nhang còn có khả năng mang theo các tác nhân gây hại, làm gia tăng nguy cơ ảnh hưởng đến hệ hô hấp trong môi trường trong nhà [13]-[15].

Trong những năm gần đây, mô phỏng số động lực học chất lưu tính toán (Computational fluid dynamics – CFD) đã được ứng dụng rộng rãi như một công cụ hiệu quả để nghiên cứu chất lượng không khí trong nhà. Phương pháp CFD cho phép mô tả chi tiết trường vận tốc và sự lan truyền của các chất ô nhiễm trong không gian kín với độ phân giải cao, đồng thời khắc phục được các hạn chế về chi phí và khả năng bố trí điểm đo của phương pháp thực nghiệm [16]. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng CFD để mô phỏng sự phân tán khí ô nhiễm và hạt bụi trong các không gian có thông gió khác nhau, qua đó đánh giá hiệu quả của các giải pháp thông gió và kiểm soát ô nhiễm [17], [18].

Độ chính xác của mô phỏng CFD trong không gian kín phụ thuộc đáng kể vào việc lựa chọn mô hình rối. Các mô hình thường được sử dụng bao gồm k- $\epsilon$  Reynolds thấp, k- $\epsilon$  RNG, Realizable k- $\epsilon$  và SST k- $\omega$  [19]-[22]. Trong đó, mô hình k- $\epsilon$  Reynolds thấp được đánh giá là phù hợp cho các bài toán thông gió trong phòng và không gian kín, nơi ảnh hưởng của lớp biên gần tường và dòng chảy có số Reynolds trung bình đóng vai trò quan trọng. Một số nghiên cứu trước đây cho thấy mô hình này cho kết quả phù hợp tốt với số liệu thực nghiệm khi mô phỏng phân bố vận tốc và sự lan truyền chất ô nhiễm trong các hệ thống thông gió [19], [23].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về phát thải từ đốt nhang cũng như ứng dụng CFD trong đánh giá chất lượng không khí trong nhà, các nghiên cứu kết hợp đồng thời giữa đo đạc thực nghiệm nồng độ formaldehyde và mô phỏng CFD nhằm phân tích sự lan truyền chất ô nhiễm từ khói nhang trong các điều kiện thông gió cơ học cụ thể vẫn còn hạn chế, đặc biệt trong bối cảnh điều kiện sinh hoạt và tập quán văn hóa tại Việt Nam [12], [24].

Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm: (i) đo đạc nồng độ formaldehyde phát sinh từ quá trình đốt nhang trong không gian kín dưới các điều kiện thông gió khác nhau, (ii) mô phỏng sự lan truyền formaldehyde bằng phương pháp CFD sử dụng mô hình rối k- $\epsilon$  Reynolds thấp, và (iii) đánh giá hiệu quả của thông gió cơ học trong việc giảm thiểu ô nhiễm không khí trong nhà. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng cung cấp cơ sở khoa học và kỹ thuật cho việc ứng dụng mô phỏng CFD trong đánh giá và kiểm soát chất lượng không khí trong các không gian sinh hoạt kín.

## 2. Mô tả mô hình và phương pháp nghiên cứu

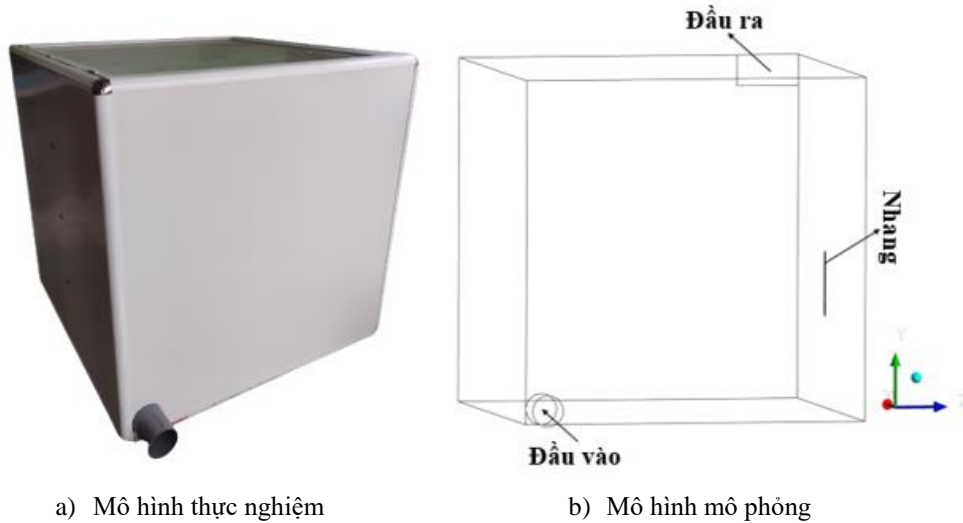
### 2.1. Mô tả mô hình

#### 2.1.1. Mô hình thí nghiệm

Mô hình thực nghiệm (Hình 1a) được thiết kế với thể tích 1 m<sup>3</sup> nhằm đại diện cho không gian kín quy mô nhỏ, cho phép kiểm soát điều kiện thông gió và đánh giá định lượng sự lan truyền chất ô nhiễm. Mặt trên của mô hình được thiết kế bằng kính trong suốt nhằm thuận tiện cho việc quan sát quá trình cháy của nhang và bố trí các vị trí lấy mẫu.

Mô hình được bố trí một lỗ cấp khí đường kính 90 mm tại góc thấp và một lỗ thoát khí có gắn quạt hút tại góc cao đối diện. Hai quạt thông gió tổng công suất 6 m<sup>3</sup>/h, mỗi quạt có kích thước 90 × 90 × 25 mm được lắp và có thể điều chỉnh tốc độ quay để tạo ra các chế độ thông gió khác nhau.

Mô hình số (Hình 1b) được xây dựng với kích thước hình học tương đồng với mô hình thực nghiệm bằng phần mềm Ansys SpaceClaim. Cấu hình mô hình thí nghiệm được minh họa trong Hình 1.



**Hình 1.** Mô hình thí nghiệm thể tích 1m<sup>3</sup>.

### 2.1.2. Thiết lập điều kiện biên mô phỏng

Các phương trình chi phối được giải bằng phương pháp thể tích hữu hạn, bảo đảm tính ổn định và độ chính xác của trường dòng chảy trong điều kiện thông gió cưỡng bức. Ba mô hình khuếch tán rối được áp dụng và so sánh, bao gồm: Mô hình k-ε Reynolds thấp [19], mô hình RNG k-ε [20] và mô hình SST k-ω [22]. Các điều kiện biên, thông số mô phỏng và các mô hình rối sử dụng trong nghiên cứu được tóm tắt trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Thiết lập điều kiện biên mô phỏng.

Thông số	Điều kiện biên
Mô hình tính toán rối	Mô hình Reynolds (Re) thấp kiểu k-ε Mô hình RNG k-ε Mô hình SST k-ω
Số lượng ô lưới tính toán	3,141,000
Điều kiện lớp biên sát tường	Không trượt
Điều kiện vận tốc khí đầu vào (velocity – inlet)	$U_{in1} = 0,59$ m/s $U_{in2} = 0,89$ m/s $U_{in3} = 1,18$ m/s
Điều kiện dòng khí đầu ra	Áp suất đầu ra

### 2.1.3. Phương trình chủ đạo

Dòng không khí trong mô hình được giả thiết là không nén được và được mô tả bằng hệ phương trình liên tục, phương trình động lượng và phương trình năng lượng [22].

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial(\rho_g u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Phương trình động lượng:

$$\frac{\partial(\rho_g u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p_g}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_g \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

Phương trình năng lượng:

$$\frac{\partial(\rho_g T_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g u_i T_g)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_g}{Pr} \frac{\partial T_g}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

Các thông số đặc trưng của dòng bao gồm vector vận tốc  $u$  (với các thành phần  $u$ ,  $v$  và  $w$  theo các hướng  $x$ ,  $y$  và  $z$ ), áp suất  $p_g$ , khối lượng riêng  $\rho_g$ , độ nhớt  $\mu_g$ , hệ số dẫn nhiệt  $k$ , số Prandtl  $Pr$  và nhiệt độ  $T_g$ , cho phép mô tả đầy đủ trạng thái động học và nhiệt động học của dòng không khí trong mô hình.

## 2.2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.2.1. Phương pháp thực nghiệm

#### a. Tính toán và bố trí thông gió

Dựa trên các tài liệu về thông gió nhà ở [25], bội số trao đổi không khí được lựa chọn là 6 lần/h. Từ đó xác định lưu lượng và vận tốc đầu vào tương ứng cho mô hình theo các công thức:

$$m = \frac{Q_{TG}}{V_{MH}} \quad (4)$$

Trong đó:  $m$  là bội số trao đổi không khí ( $m = 6$ ),  $Q_{TG}$  là lưu lượng thông gió cần thiết ( $m^3/s$ ),  $V_{MH}$  là thể tích mô hình thí nghiệm ( $m^3$ )

$$Q_{TG} = m \times V_{MH} = 6 \times 1(m^3/h) = 1,67 \times 10^{-3} (m^3/s) \quad (5)$$

$$Q_{TG} = U_{in} \times S (m^3/s) \quad (6)$$

Trong đó:  $S$  là tiết diện ống ( $m^2$ ),  $U_{in}$  là vận tốc gió qua ống ( $m/s$ )

Để đo vận tốc gió của quạt phải dựa vào Method-2-Velocity-S-Type pitot/US EPA, sử dụng một đoạn ống hình trụ có đường kính là 60 mm, có chiều dài gấp 8 lần đường kính ống để dòng khí đi qua được ổn định.

$$S = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,06^2}{4} = 2,83 \times 10^{-3} (m^2) \quad (7)$$

$$U_{in} = \frac{Q_{TG}}{S} = \frac{1,67 \times 10^{-3}}{2,83 \times 10^{-3}} = 0,59 (m/s) \quad (8)$$

Như vậy để mô hình có lưu lượng thông gió  $6 m^3/h$  thì vận tốc đầu vào phải đạt  $0,59 m/s$ .

Tiến hành đo vận tốc gió tại 11 vị trí từ P1 ( $x = 0 m$ ) đến P11 ( $x = 1 m$ ) theo phương  $x$ , sơ đồ bố trí các vị trí đo được trình bày trong Hình 2a, khoảng cách  $0,1m$  giữa các điểm, trong mô hình thí nghiệm ở ba giá trị thông gió  $0,59 m/s$ ;  $0,89 m/s$  và  $1,18 m/s$ . Vận tốc gió được đo bằng thiết bị HT-9829, vi khí hậu được đo bằng Kestrel 5000 nhằm đánh giá điều kiện môi trường bên ngoài.

#### b. Thực nghiệm đốt nhang và lấy mẫu formaldehyde

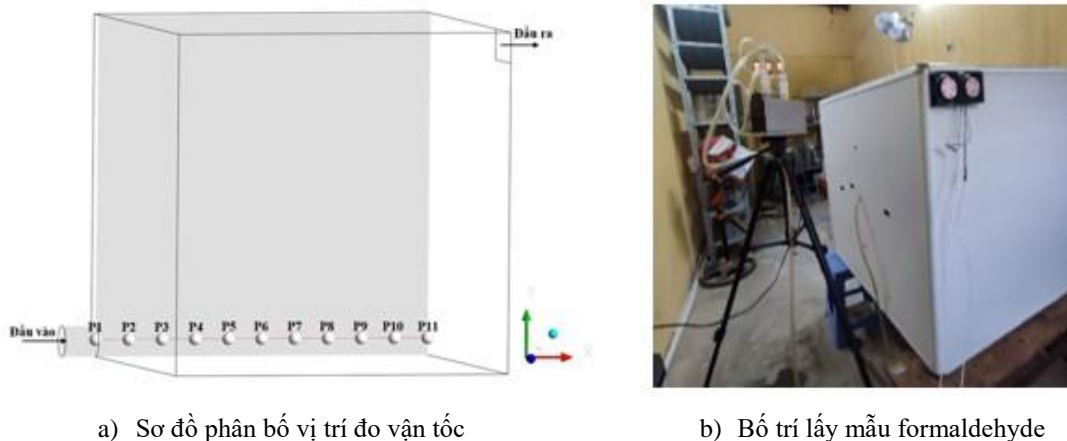
Ba loại nhang được lựa chọn làm vật liệu nghiên cứu, đại diện cho các nhóm sản phẩm có đặc tính phát thải khác nhau, bao gồm: nhang thơm (N1), nhang trầm (N2), và nhang thơm ít khói (N3).

Nhang N1 được sản xuất từ hỗn hợp các nguyên liệu có nguồn gốc thực vật như rễ cây bài, đường đen, mía tím, quế hồi, hoa ngọc lan, nụ đinh hương, nhựa cây trám, có đường kính 3 mm, dài 215 mm, ít khói, thời gian cháy 45-50 phút.

Nhang N2 gồm hỗn hợp đại hồi, quế chi, đinh hương, trầm hương, hương bài, đường kính 3mm, dài 210 mm, nhiều khói, thời gian cháy 40-45 phút.

Nhang N3 được làm bằng bột vụn gỗ đàn, có đường kính 3mm, dài 250 mm, ít khói, thời gian cháy 60 phút.

Trước mỗi thí nghiệm, mô hình được vận hành không tải trong 15 phút nhằm làm sạch và ổn định không khí. Nhiệt độ và độ ẩm tương đối được đo đồng thời bên trong và bên ngoài mô hình để kiểm soát điều kiện nền. Mỗi loại nhang được đốt riêng lẻ dưới các điều kiện thông gió khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của thông gió đến sự phát sinh và phân bố formaldehyde trong không khí. Vị trí đốt và cấu hình mô hình được giữ không đổi giữa các thí nghiệm. Formaldehyde được thu thập bằng phương pháp lấy mẫu chủ động theo NIOSH Method 3500. Không khí được hút qua bình hấp thụ chứa dung dịch natri bisulfite ( $\text{NaHSO}_3$ ) 1%. Thiết bị lấy mẫu được đặt bên ngoài và kết nối với bên trong vị trí lấy mẫu bằng ống silicon được mô tả trong Hình 2b. Tốc độ hút mẫu được kiểm soát bằng bơm hút đã hiệu chuẩn, đồng thời thể tích mẫu cũng được ghi nhận cho mỗi thí nghiệm. Mẫu trắng hiện trường được sử dụng để hiệu chỉnh nền và kiểm soát chất lượng. Kết thúc quá trình lấy mẫu, tắt bơm, chuyển dung dịch hấp thụ vào chai nhựa polyethylene. Mẫu sau đó được bảo quản lạnh và phân tích trong vòng 24 giờ.



**Hình 2.** Bố trí thực nghiệm.

### 2.2.2. Phương pháp mô phỏng

Kết quả phân tích nồng độ formaldehyde của các loại nhang dưới các điều kiện thông gió khác nhau được tổng hợp trong Bảng 2. Trong đó, loại nhang trầm (N2) cho nồng độ formaldehyde trung bình cao nhất  $4,163 \text{ mg.m}^{-3}$ , vượt gấp 4 lần ngưỡng cho phép ( $1,0 \text{ mg.m}^{-3}$  trong 15 phút, QCVN 03:2019/BYT [26]). Do đó, quá trình khuếch tán formaldehyde từ khói nhang trầm (N2) được lựa chọn để mô phỏng bằng Ansys Fluent.

**Bảng 2.** Kết quả phân tích nồng độ formaldehyde ở các loại nhang trong điều kiện thông gió khác nhau.

Mẫu	Điều kiện thông gió (m/s)	Lần 1 ( $\text{mg.m}^{-3}$ )	Lần 2 ( $\text{mg.m}^{-3}$ )	Lần 3 ( $\text{mg.m}^{-3}$ )	Trung bình ( $\text{mg.m}^{-3}$ )	Độ lệch chuẩn SD
N1	$U_{in} = 0$	2,085	2,118	2,131	2,111	0,024
	$U_{in} = 0,59$	0,162	0,164	0,164	0,163	0,001
N2	$U_{in} = 0$	4,051	4,289	4,148	4,163	0,120
	$U_{in} = 0,59$	0,218	0,221	0,225	0,221	0,004
N3	$U_{in} = 0$	1,615	1,632	1,658	1,635	0,022
	$U_{in} = 0,59$	0,130	0,135	0,135	0,133	0,003

Hệ số khuếch tán D ở nhiệt độ T và áp suất P của formaldehyde trong không khí được xác định theo công thức 9 [27].

$$D_{AB} = \frac{0,602 \times T^{1,78} \times (1 + \sqrt{M_A + M_B})}{P \left( v_A^{\frac{1}{3}} + v_B^{\frac{1}{3}} \right)^2 \times \sqrt{M_A M_B}} \quad (cm^2 / s) \quad (9)$$

Trong đó:  $D_{AB}$  là hệ số khuếch tán của formaldehyde trong không khí, ( $cm^2/s$ ),  $M_A$  là khối lượng phân tử của không khí (A), (28,8 kg/kg.mol),  $M_B$  là khối lượng phân tử của formaldehyde (B), (30 kg/kg.mol),  $P$  là áp suất (760 mmHg),  $T$  là nhiệt độ (298°K),  $v_A$  là thể tích phân tử của không khí (29,9  $cm^3/g.mol$ ),  $v_B$  là thể tích phân tử của formaldehyde (29,6  $cm^3/g.mol$ ).

$$D_{AB} = \frac{0,602 \times 298^{1,78} \times \sqrt{28,8 + 30}}{760 \times \left( 29,9^{\frac{1}{3}} + 29,6^{\frac{1}{3}} \right)^2 \times \sqrt{28,8 \times 30}} = 0,15 \quad (cm^2/s)$$

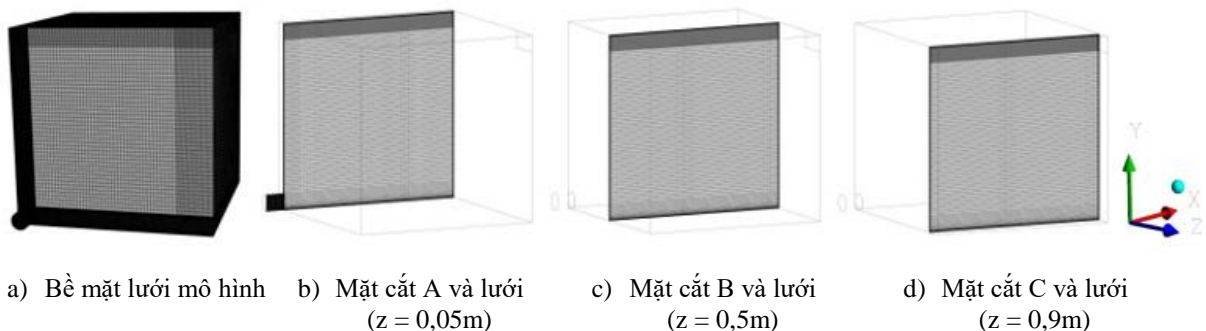
$$D_{AB} = 1,5 \times 10^{-5} \quad (m^2/s)$$

Để tính toán nồng độ formaldehyde trong Ansys Fluent, nghiên cứu sử dụng các hàm tự định nghĩa (User-Defined Functions – UDFs) được viết bằng ngôn ngữ C và biên dịch dưới dạng Compiled UDFs nhằm tích hợp phương trình vận chuyển chất ô nhiễm vào quá trình mô phỏng, từ đó tính toán sự khuếch tán và phân bố nồng độ formaldehyde trong không gian. Các giá trị hệ số khuếch tán ( $D_{AB}$ ) của formaldehyde trong không khí cũng được tham khảo từ các nghiên cứu khác để đảm bảo độ chính xác cho quá trình mô phỏng [17], [18].

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Lưới tính toán

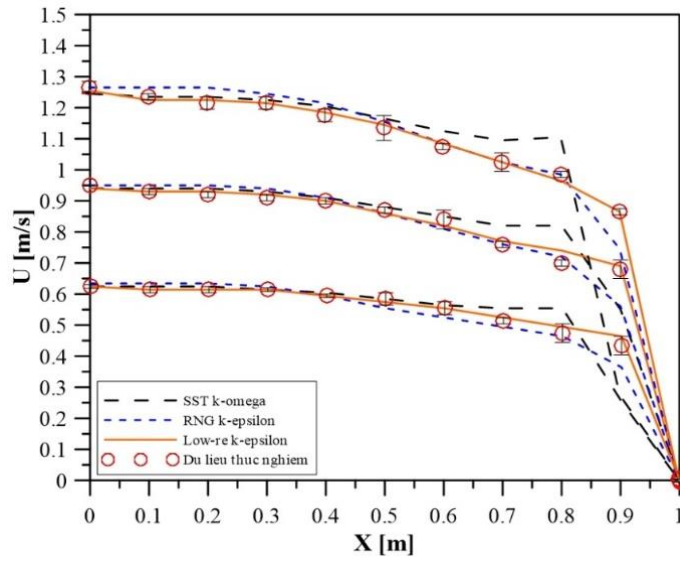
Mô hình sử dụng lưới tứ diện, xây dựng trên phần mềm Ansys ICEM với khoảng 3,14 triệu ô. Cấu trúc lưới tính toán của mô hình tại các mặt cắt đặc trưng được thể hiện trong Hình 3, cho thấy sự tinh chỉnh lưới tại các vùng gần đầu vào, đầu ra và khu vực nguồn phát thải nhằm đảm bảo độ chính xác và ổn định.



**Hình 3.** Mặt cắt và lưới tính toán của mô hình.

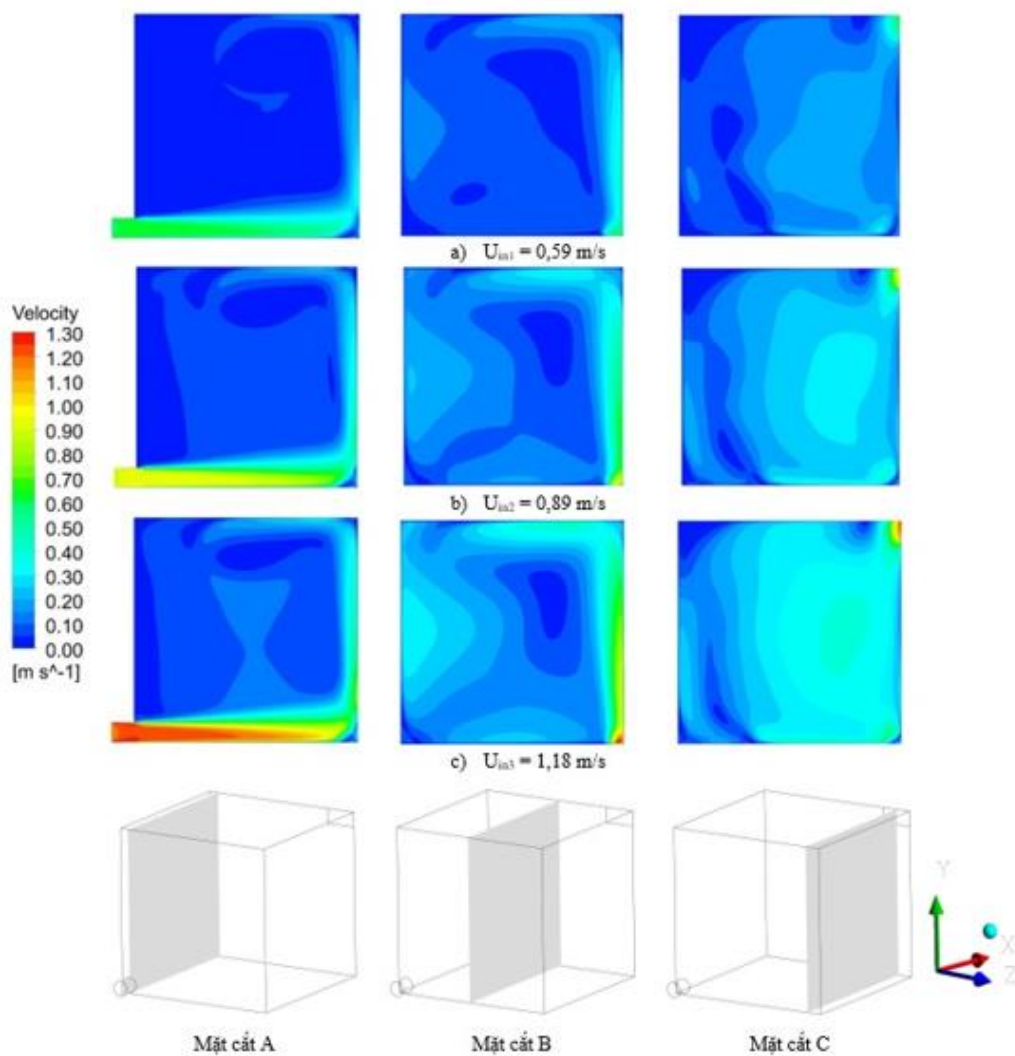
#### 3.2. So sánh kết quả thực nghiệm và mô phỏng

So sánh giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng các mô hình rối khác nhau dưới các điều kiện thông gió được trình bày trong Hình 4, cho thấy mô hình rối k-ε Reynolds thấp có độ phù hợp cao nhất với số liệu thực nghiệm ở cả ba chế độ thông gió. Các mô hình RNG k-ε và SST k-ω cho sai lệch lớn hơn, đặc biệt trong điều kiện vận tốc đầu vào thấp. Kết quả này phù hợp tương đối với nghiên cứu của Nguyễn Lữ Phương và cộng sự, các mô hình rối cũng được đánh giá và so sánh nhằm lựa chọn mô hình phù hợp nhất với thực nghiệm, các tác giả kết luận rằng mô hình k-ε Reynolds thấp phù hợp nhất với kết quả đo thực nghiệm [23], [28].



**Hình 4.** Biểu đồ so sánh dữ liệu thực nghiệm và mô phỏng.

### 3.3. Phân tích dòng không khí



**Hình 5.** Phân bố vận tốc tại các mặt cắt trong mô hình thí nghiệm.

Phân bố trường vận tốc dòng không khí tại các mặt cắt trong mô hình thí nghiệm được thể hiện trong Hình 5. Dòng không khí đi vào mô hình có xu hướng phân bố đồng đều trong ống cấp khí, sau đó giảm vận tốc khi vào không gian chính do thay đổi tiết diện. Khi va chạm với tường, dòng khí hình thành hiệu ứng Coandă và lan truyền lên phía trên, tạo nên sự tương đối đồng đều trong toàn bộ thể tích mô hình.

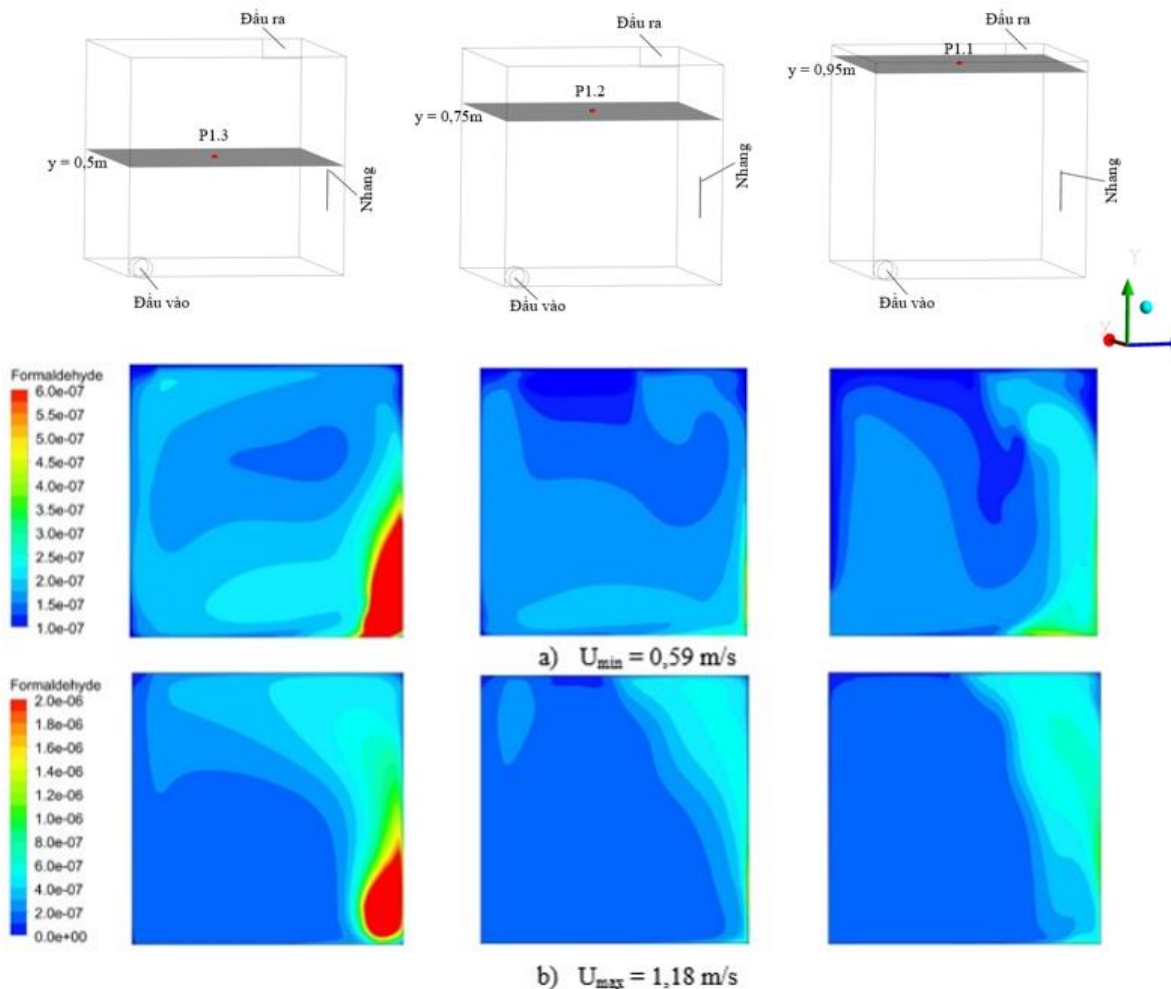
### 3.4. Phân bố nồng độ formaldehyde

Các thông số và điều kiện mô phỏng quá trình lan truyền formaldehyde được trình bày trong Bảng 3.

**Bảng 3.** Thiết lập điều kiện mô phỏng formaldehyde.

Thông số	Điều kiện
Mô hình rối	k-ε Reynolds thấp
Nồng độ trung bình ban đầu	$C_0 = 4,163 \text{ mg.m}^{-3}$
Điều kiện biên đầu vào	$U_{\min} = 0,59 \text{ m/s}$ $U_{\max} = 1,18 \text{ m/s}$
Hệ số khuếch tán formaldehyde	$D_{AB} = 0,000015 \text{ m}^2/\text{s}$ , [17], [18], [27]

Mô phỏng máy tính được thực hiện tại mặt cắt không gian  $y = 0,5\text{m}$ ,  $y = 0,75\text{m}$  và  $y = 0,95\text{m}$  với vận tốc gió cơ học  $U_{\min} = 0,59\text{m/s}$  và  $U_{\max} = 1,18\text{m/s}$ .



**Hình 6.** Kết quả phân bố nồng độ formaldehyde trên các mặt cắt.

**Bảng 4.** Kết quả mô phỏng nồng độ formaldehyde ở các chế độ thông gió.

Vị trí	Tọa độ (m)			C <sub>HCHO</sub> (mg.m <sup>-3</sup> )	
	X	Y	Z	U <sub>min</sub> (0,59 m/s)	U <sub>max</sub> (1,18 m/s)
P1.1	0,50	0,95	0,50	0,197	0,152
P1.2	0,50	0,75	0,50	0,204	0,158
P1.3	0,50	0,50	0,50	0,210	0,164

**Bảng 5.** So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm formaldehyde.

Vị trí	Tọa độ (m)			Kết quả mô phỏng (mg.m <sup>-3</sup> )	Kết quả thực nghiệm (mg.m <sup>-3</sup> )
	X	Y	Z		
P1.3	0,50	0,50	0,50	0,210	0,221

Phân bố nồng độ formaldehyde trên các mặt cắt khác nhau được thể hiện trong Hình 6. Giá trị nồng độ formaldehyde mô phỏng tại các vị trí đặc trưng trong không gian dưới các chế độ thông gió khác nhau được tổng hợp trong Bảng 4. Kết quả cho thấy, khi tăng vận tốc thông gió từ 0,59 m/s lên 1,18 m/s, nồng độ formaldehyde trung bình trong không gian giảm rõ rệt. Mức độ sai lệch giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm tại vị trí đo được so sánh thông qua số liệu trong Bảng 5, cho thấy độ tin cậy cao của mô phỏng CFD.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã kết hợp phương pháp thực nghiệm và mô phỏng số động lực học chất lưu tính toán (CFD) để đánh giá sự phát thải và lan truyền formaldehyde từ quá trình đốt nhang trong không gian kín. Kết quả thực nghiệm cho thấy, trong điều kiện không thông gió, nồng độ formaldehyde trung bình đạt 4,163 mg.m<sup>-3</sup>, vượt khoảng 4 lần ngưỡng tiếp xúc ngắn cho phép theo QCVN 03:2019/BYT, phản ánh nguy cơ tiềm ẩn đối với sức khỏe con người khi đốt nhang trong môi trường kín và thông gió hạn chế.

Kết quả mô phỏng CFD sử dụng mô hình rối k-ε Reynolds thấp cho thấy khả năng tái hiện tốt đặc điểm dòng không khí và sự phân bố formaldehyde trong mô hình thí nghiệm, với sai lệch giữa mô phỏng và thực nghiệm khoảng 5%. So với các mô hình RNG k-ε và SST k-ω, mô hình k-ε Reynolds thấp thể hiện độ phù hợp cao hơn, đặc biệt trong điều kiện vận tốc thông gió thấp, khi ảnh hưởng của lớp biên gần tường và dòng chảy có số Reynolds trung bình chi phối mạnh đến quá trình lan truyền chất ô nhiễm.

Phân tích kết quả cho thấy thông gió cơ học có vai trò quyết định trong việc làm giảm nồng độ formaldehyde trong không gian kín, trong đó việc tăng vận tốc cấp khí giúp tăng cường khả năng pha loãng và thải loại chất ô nhiễm. Điều này khẳng định tầm quan trọng của thiết kế và vận hành hệ thống thông gió phù hợp nhằm kiểm soát ô nhiễm không khí trong nhà phát sinh từ các hoạt động mang tính văn hóa như đốt nhang.

Nhìn chung, nghiên cứu đã cung cấp bằng chứng khoa học đáng tin cậy về khả năng ứng dụng mô phỏng CFD như một công cụ hiệu quả trong đánh giá chất lượng không khí trong nhà và lan truyền chất ô nhiễm. Kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng làm cơ sở kỹ thuật cho công tác đánh giá rủi ro, thiết kế thông gió và quản lý môi trường trong các không gian sinh hoạt kín. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần mở rộng phạm vi khảo sát sang các không gian có quy mô lớn hơn, xem xét điều kiện cháy không ổn định theo thời gian và đánh giá đồng thời tác động của nhiều chất ô nhiễm khác nhau nhằm phản ánh đầy đủ hơn điều kiện phơi nhiễm thực tế.

#### Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích liên quan đến nghiên cứu này.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Firdaus and A. Ahmad, "Indoor air pollution and self-reported diseases - a case study of NCT of Delhi," *Indoor Air*, vol. 21, no. 5, pp. 410–416, Oct. 2011, doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00715.x.

- [2] S. Brasche and W. Bischof, "Daily time spent indoors in German homes - Baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants," *Int. J. Hyg. Environ. Health*, vol. 208, no. 4, pp. 247–253, 2005, doi: 10.1016/j.ijheh.2005.03.003.
- [3] J. A. Leech, W. C. Nelson, R. T. Burnett, S. Aaron, and M. E. Raizenne, "It's about time: A comparison of Canadian and American time-activity patterns," *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.*, vol. 12, no. 6, pp. 427–432, 2002, doi: 10.1038/sj.jea.7500244.
- [4] K. C. Chiang and C. M. Liao, "Heavy incense burning in temples promotes exposure risk from airborne PMs and carcinogenic PAHs," *Sci. Total Environ.*, vol. 372, no. 1, pp. 64–75, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.08.012.
- [5] H. C. Chuang, T. P. Jones, S. C. C. Lung, and K. A. Bérubé, "Soot-driven reactive oxygen species formation from incense burning," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 22, pp. 4781–4787, 2011, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.07.041.
- [6] H. C. Chuang, K. Bérubé, S. C. C. Lung, K. J. Bai, and T. Jones, "Investigation into the oxidative potential generated by the formation of particulate matter from incense combustion," *J. Hazard. Mater.*, vol. 244–245, pp. 142–150, 2013, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.034.
- [7] R. Cohen, K. G. Sexton, and K. B. Yeatts, "Hazard assessment of United Arab Emirates (UAE) incense smoke," *Sci. Total Environ.*, vol. 458–460, pp. 176–186, 2013, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.101.
- [8] S. S. H. Ho and J. Z. Yu, "Concentrations of formaldehyde and other carbonyls in environments affected by incense burning," *J. Environ. Monit.*, vol. 4, no. 5, pp. 728–733, 2002, doi: 10.1039/b200998f.
- [9] S. C. Lee and B. Wang, "Characteristics of emissions of air pollutants from burning of incense in a large environmental chamber," *Atmos. Environ.*, vol. 38, no. 7, pp. 941–951, 2004, doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.11.002.
- [10] K. S. Liu, F. Y. Huang, S. B. Hayward, J. Wesolowski, and K. Sexton, "Irritant effects of formaldehyde exposure in mobile homes," *Environ. Health Perspect.*, vol. 94, no. 13, pp. 91–94, 1991, doi: 10.2307/3431298.
- [11] J. R. He *et al.*, "Associations between maternal exposure to incense burning and blood pressure during pregnancy," *Sci. Total Environ.*, vol. 610–611, pp. 1421–1427, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.134.
- [12] D. C. Thinh, N. Van Cu, and T. P. Vu, "Emission of Dust and VOCs as Burning Incense Under Ventilation Conditions," *Mod. Environ. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 5, pp. 292–300, 2022, doi: 10.15341/mese(2333-2581)/05.08.2022/006.
- [13] T. C. Lin, G. Krishnaswamy, and D. S. Chi, "Incense smoke: Clinical, structural and molecular effects on airway disease," *Clin. Mol. Allergy*, vol. 6, pp. 1–9, 2008, doi: 10.1186/1476-7961-6-3.
- [14] S. D. Sturton, H. L. Wen, and O. G. Sturton, "Etiology of cancer of the nasopharynx," *Cancer*, vol. 19, no. 11, pp. 1666–1669, 1966, doi: 10.1002/1097-0142(196611)19:11<1666::AID-CNCR2820191135>3.0.CO;2-H.
- [15] Y. Vallès *et al.*, "Incense Burning is Associated with Human Oral Microbiota Composition," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-46353-y.
- [16] A. Mleczkowska, M. Strojceki, Ł. Bratasz, and R. Kozłowski, "Particle penetration and deposition inside historical churches," *Build. Environ.*, vol. 95, pp. 291–298, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.09.017.
- [17] S. J. Yoo and K. Ito, "Numerical prediction of tissue dosimetry in respiratory tract using computer simulated person integrated with physiologically based pharmacokinetic-computational fluid dynamics hybrid analysis," *Indoor Built Environ.*, vol. 27, no. 7, pp. 877–889, 2018, doi: 10.1177/1420326X17694475.
- [18] S. J. Yoo and K. Ito, "Assessment of transient inhalation exposure using in silico human model integrated with PBPK-CFD hybrid analysis," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 40, pp. 317–325, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.023.
- [19] N. Abe, Kondoh, "A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching Flows-I. Flow Field Calculations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Japan, pp. 139–151, May 18, 1994.
- [20] V. Yakhot and S. A. Orszag, "Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory," *J. Sci. Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–51, 1986, doi: 10.1007/BF01061452.
- [21] D. C. Wilcox, "Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models," *AIAA J.*, vol. 26, no. 11, pp. 1299–1310, 1988, doi: 10.2514/3.10041.
- [22] S. B. Pope, *Turbulent Flows*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2000, doi: 10.1017/CBO9780511840531.
- [23] N. L. Phuong and K. Ito, "Experimental and numerical study of airflow pattern and particle dispersion in a vertical ventilation duct," *Build. Environ.*, vol. 59, pp. 466–481, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.09.014.
- [24] H. A. Le, D. M. Cuong, N. Thi, and K. Anh, "Particulate matter (PM10, PM2.5, PM1) indoor pollution by using different fuel materials," *VNU J. Sci. Earth Environ. Sci.*, vol. 4, pp. 28–34, 2018.
- [25] N. T. Hung and N. D. Tuan, *Kiểm soát ô nhiễm không khí*. Việt Nam: NXB ĐH QG TP HCM, 2007.
- [26] Bộ Y tế, QCVN 03:2019/BYT: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về giá trị giới hạn tiếp xúc cho phép của 50 yếu tố hóa học tại nơi làm việc. Hà Nội, Việt Nam, 2019.
- [27] T. Hobler, *Mass Transfer and Absorbers*, New York: Pergamon Press, 1966
- [28] N. L. Phuong and K. Ito, "Investigation of flow pattern in upper human airway including oral and nasal inhalation by PIV and CFD," *Build. Environ.*, vol. 94, pp. 504–515, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.10.002.

**Giap Thach Nguyen.** He obtained his B.E. in 2018 and M.E. in 2023 from Ho Chi Minh City University of Natural Resources and Environment.

Email: [nguyengiaphach1031995@gmail.com](mailto:nguyengiaphach1031995@gmail.com). ORCID:  <https://orcid.org/0000-0002-7014-0469>

**Lu Phuong Nguyen.** He is an Associate Professor at the Faculty of Environment, Hochiminh city University of Natural Resources and Environment (HCMUNRE), Vietnam. He received Ph.D. in Energy and Environmental Engineering from Kyushu University, Japan in 2012. He is specializes in energy and environmental research, focusing on computational fluid dynamics (CFD), environmental quality and sustainability. He has led and contributed to multiple research projects in Vietnam. His research is focusing on air pollution issues through development low-cost sensor devices for air monitoring, emission inventory and air quality simulation by CFD. Through interdisciplinary collaboration, he contributes to innovative solutions for better environments.

Email: [nlphuong@hcmunre.edu.vn](mailto:nlphuong@hcmunre.edu.vn). ORCID:  <https://orcid.org/0000-0003-0918-7505>