Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (3V): 107–120

ĐỀ XUẤT BỘ DỮ LIỆU ĐẦU VÀO THAM CHIẾU CHO MÔ PHỎNG NĂNG LƯỢNG TOÀ NHÀ VĂN PHÒNG TẠI VIỆT NAM TRÊN CƠ SỞ ĐỐI CHIẾU TIÊU CHUẨN TRONG NƯỚC VÀ QUỐC TẾ

Nguyễn Thành Trung[a,*], Đặng Hoàng Long[b], Phạm Trung Đức[c]

[a]*Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,*
55 đường Giải Phóng, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam
[b]*Khoa Kinh tế và Quản lý xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,*
55 đường Giải Phóng, Phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam
[c]*Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Kỹ thuật, Đại học Quốc Lập Đài Loan,*
Số 1, Đoạn 4, Đường Roosevelt, Quận Đại An, Thành phố Đài Bắc, Đài Loan

Nhận ngày 27/7/2026, Sửa xong 18/8/2026, Chấp nhận đăng 20/8/2026

Tóm tắt

Trong mô phỏng năng lượng công trình, độ tin cậy của kết quả phụ thuộc đáng kể vào chất lượng và tính nhất quán của dữ liệu đầu vào. Tuy nhiên, hệ thống tiêu chuẩn hiện hành tại Việt Nam chủ yếu quy định yêu cầu thiết kế hoặc các giới hạn tuân thủ, trong khi chưa hình thành bộ giá trị vận hành điển hình có thể sử dụng trực tiếp cho mô phỏng năng lượng công trình. Nghiên cứu này đề xuất 12 thông số dữ liệu đầu vào được lựa chọn phân cấp theo nguồn tham chiếu và điều chỉnh phù hợp với điều kiện sử dụng và vận hành công trình văn phòng tại Việt Nam. Các thông số trên được đối chiếu giữa tiêu chuẩn trong nước, tiêu chuẩn quốc tế và các bộ dữ liệu mô phỏng được sử dụng phổ biến. Khả năng áp dụng của bộ dữ liệu được minh họa thông qua mô phỏng bằng DesignBuilder cho một công trình văn phòng hành chính sáu tầng tại Hà Nội. Kết quả cho thấy EUI giảm từ 90,13 xuống 63,32 kWh/m^2/năm, khoảng 29,75% so với kịch bản cơ sở. Điều này cho thấy việc lựa chọn các giả định đầu vào có thể tạo ra khác biệt đáng kể về EUI, qua đó nhấn mạnh sự cần thiết của việc chuẩn hóa và kiểm chứng dữ liệu đầu vào, đồng thời cần khảo sát quá trình vận hành và đo lường thực tế tại các công trình văn phòng ở Việt Nam.

Từ khoá: mô phỏng năng lượng công trình; công trình văn phòng; dữ liệu đầu vào tham chiếu; thông số vận hành; tiêu chuẩn năng lượng công trình; cường độ sử dụng năng lượng (EUI); Việt Nam.

PROPOSAL OF A REFERENCE INPUT DATASET FOR OFFICE BUILDING ENERGY SIMULATION IN VIETNAM BASED ON A BENCHMARKING REVIEW OF NATIONAL AND INTERNATIONAL STANDARDS

Abstract

In building energy simulation, the reliability of results depends significantly on the quality and consistency of the input data. However, current standards in Vietnam mainly specify design requirements or compliance limits, while a set of typical operating values that can be directly used for building energy simulation has not yet been established. This study proposes a reference dataset comprising 12 input parameters selected through a hierarchical source-selection approach and adapted to the operating conditions of office buildings in Vietnam. These parameters are compared between domestic standards, international standards, and commonly used simulation datasets. The applicability of the dataset is illustrated through simulation using DesignBuilder for a six-story office building in Hanoi. The results show that the EUI decreased from 90.13 to 63.32 kWh/m^2/year, approximately 29.75% compared to the baseline scenario. The results indicate that the selection of input assumptions can lead to substantial differences in EUI, highlighting the need for standardized and validated input data and further verification through operational surveys and field measurements in Vietnamese office buildings.

Keywords: building energy simulation; office buildings; reference input dataset; operational parameters; building energy standards; Energy Use Intensity (EUI); Vietnam.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(3V)-10 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* trungnt1@huce.edu.vn (Trung, N. T.)

1. Đặt vấn đề

Mô phỏng năng lượng công trình (Building Energy Simulation – BES) đang trở thành công cụ không thể thiếu trong thiết kế công trình hiệu quả năng lượng, đánh giá, chứng nhận công trình xanh và kiểm chứng tuân thủ quy chuẩn công trình sử dụng năng lượng tiết kiệm và hiệu quả. Các phần mềm mô phỏng năng lượng phổ biến như EnergyPlus, DesignBuilder, eQUEST hay IESVE đều yêu cầu một bộ dữ liệu đầu vào chi tiết về điều kiện vận hành công trình để tính toán nhu cầu năng lượng theo giờ trong suốt một năm vận hành. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng thường có sự khác biệt đáng kể giữa các nghiên cứu, ngay cả khi cùng áp dụng cho một loại công trình trong cùng điều kiện khí hậu. Nguyên nhân chính là sự thiếu nhất quán trong các thông số giả định vận hành, một số nghiên cứu sử dụng dữ liệu từ tiêu chuẩn Việt Nam kết hợp kinh nghiệm phân tích chủ quan của người dùng, một số khác lấy trực tiếp từ ASHRAE 90.1 [1] hoặc ISO 17772-1 [2] mà không hiệu chỉnh cho bối cảnh Việt Nam. Điều này làm giảm độ tin cậy của các đánh giá hiệu quả năng lượng. Trong những năm gần đây, các nghiên cứu trong nước đã ứng dụng rộng rãi DesignBuilder/EnergyPlus để đánh giá tiêu thụ năng lượng, phân tích hiệu quả của lớp vỏ công trình, hệ thống HVAC và tích hợp năng lượng tái tạo cho công trình văn phòng. Tuy nhiên, các mô hình này chủ yếu được xây dựng từ hồ sơ thiết kế hoặc dữ liệu khảo sát riêng của từng công trình, dẫn đến các giả định về mật độ người sử dụng, tải nội bộ và lịch vận hành chưa thống nhất giữa các nghiên cứu, làm hạn chế khả năng tái lập và so sánh kết quả mô phỏng [3].

Trên thế giới, ngoài các tiêu chuẩn kỹ thuật, nhiều quốc gia đã phát triển hệ thống hướng dẫn mô hình hóa, bộ mô hình công trình tham chiếu và cơ sở dữ liệu khảo sát nhằm chuẩn hóa dữ liệu đầu vào cho mô phỏng năng lượng công trình. Tiêu biểu là bộ mô hình nguyên mẫu thương mại của Bộ Năng lượng Hoa Kỳ (DOE Commercial Prototype Building Models) [4], Phương pháp Tính toán Quốc gia của Vương quốc Anh (UK National Calculation Methodology – UKNCM) [5] và COMNET Modeling Guidelines đều cung cấp bộ đầu vào hoàn chỉnh, bao gồm lịch vận hành theo giờ, mật độ người, mật độ công suất chiếu sáng (Lighting Power Density-LPD) và mật độ công suất thiết bị (Equipment Power Density-EPD) theo từng loại không gian chức năng. Các bộ dữ liệu này cho thấy vai trò của việc chuẩn hóa các giả định đầu vào trong mô phỏng năng lượng và cung cấp cơ sở tham khảo cho việc xây dựng bộ dữ liệu phù hợp với Việt Nam. Ngoài ra, các nghiên cứu thực nghiệm về hành vi người sử dụng đã chứng minh việc lập lịch vận hành và mô hình hóa hiện diện có ảnh hưởng đáng kể đến cường độ sử dụng năng lượng (Energy Use Intensity-EUI), đặc biệt tại các khu vực có văn hóa làm việc khác biệt so với phương Tây [6–9], qua đó cho thấy sự cần thiết của các nghiên cứu khảo sát quy mô đủ lớn để xây dựng lịch vận hành phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam.

Hệ thống tiêu chuẩn Việt Nam hiện nay liên quan đến việc xây dựng thông số và lập kế hoạch vận hành công trình bao gồm TCVN 5687:2024 [10] về thiết kế thông gió và điều hòa không khí, TCVN 13521:2022 [11] về chất lượng không khí trong nhà và QCVN 04-3:2026/BXD [12] về hiệu quả năng lượng đối với công trình từ 2500 m^2 sàn trở lên. Tuy nhiên, các tài liệu này chủ yếu quy định các yêu cầu tối thiểu hoặc giới hạn tối đa mang tính thiết kế kỹ thuật, chứ chưa cung cấp đầy đủ các giá trị điển hình (typical values) cần thiết cho mô phỏng như mật độ người sử dụng, lịch vận hành theo giờ, tải thiết bị trung bình hay nhiệt thải. Do đó, việc đối chiếu dựa trên cơ sở các thông số tiêu chuẩn quốc tế và tiêu chuẩn Việt Nam, đồng thời đề xuất một bộ dữ liệu đầu vào tham chiếu thống nhất sử dụng cho mô phỏng năng lượng trong công trình là cần thiết và có giá trị thực tiễn cao. Nghiên cứu này tập trung vào đối tượng công trình văn phòng tại Việt Nam, đây là nhóm công trình khá phổ biến, có mức tiêu thụ năng lượng lớn và là đối tượng của nhiều nghiên cứu mô phỏng trong nước.

Khác với DOE Prototype và UK NCM, vốn được xây dựng trên cơ sở dữ liệu khảo sát và thống kê đặc thù của Bắc Mỹ và Vương quốc Anh, nghiên cứu này ưu tiên sử dụng các quy chuẩn, tiêu chuẩn

và điều kiện vận hành thực tế của Việt Nam làm cơ sở, đồng thời tham chiếu các nguồn quốc tế như EN, ASHRAE, DOE và COMNET để bổ sung cho những nội dung còn thiếu. Từ khoảng trống trên, nghiên cứu thực hiện đối chiếu có hệ thống các nhóm thông số đầu vào giữa tiêu chuẩn trong nước, quốc tế và các bộ dữ liệu tham chiếu, từ đó đề xuất bộ dữ liệu đầu vào tham chiếu cho mô phỏng năng lượng công trình văn phòng hành chính tại Việt Nam theo hướng tăng tính nhất quán, khả năng tái lập và phù hợp với bối cảnh địa phương. Khả năng áp dụng của bộ dữ liệu được minh họa bằng mô phỏng DesignBuilder/EnergyPlus cho một công trình văn phòng tại Hà Nội.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nguồn tài liệu được lựa chọn theo bốn tiêu chí: (i) liên quan trực tiếp đến yêu cầu đầu vào mô phỏng tòa nhà; (ii) có giá trị định lượng có thể truy xuất; (iii) đại diện cho hệ thống quy chuẩn, tiêu chuẩn của Việt Nam và quốc tế như Hoa Kỳ và châu Âu; và (iv) có khả năng áp dụng cho văn phòng làm việc hành chính. Nhóm tài liệu cốt lõi trong nghiên cứu này bao gồm TCVN 5687:2024, TCVN 13521:2022, QCVN 04-3:2026/BXD, EN 16798-1:2019, ASHRAE 55-2023, ASHRAE 62.1-2022 và ASHRAE 90.1-2022 [1, 10–15]. Nhóm dữ liệu tham chiếu gồm COMNET Modeling Guidelines cung cấp các hướng dẫn thống nhất về xây dựng mô hình và lựa chọn các giả định đầu vào như lịch vận hành, mật độ người sử dụng, mật độ công suất chiếu sáng (LPD), mật độ công suất thiết bị (EPD) và các điều kiện vận hành của hệ thống điều hòa không khí và thông gió (HVAC). DOE Commercial Prototype Building Models cung cấp các mô hình công trình tham chiếu cho nhiều loại hình công trình, tích hợp các thông số đầu vào và lịch vận hành điển hình phù hợp với ASHRAE 90.1, được sử dụng rộng rãi trong EnergyPlus và nhiều nghiên cứu mô phỏng năng lượng. Các mô hình này được phát triển và kiểm chứng dựa trên các cơ sở dữ liệu khảo sát quy mô lớn, tiêu biểu là Khảo sát tiêu thụ năng lượng công trình thương mại của Hoa Kỳ (CBECS) do Cơ quan Thông tin Năng lượng Hoa Kỳ (EIA) thực hiện, cung cấp dữ liệu thực tế về đặc điểm công trình, chế độ vận hành và mức tiêu thụ năng lượng của các công trình thương mại [4, 5, 16]. Các nghiên cứu về hành vi người sử dụng, bất định đầu vào và hiệu chỉnh mô hình được dùng để đánh giá giới hạn của lịch trình cố định và sự cần thiết của dữ liệu đo [6–9, 16].

Các thông số đầu vào được phân thành bốn nhóm chính, nhóm 1 là nhiệt ẩm trong nhà (nhiệt độ điểm đặt, độ ẩm tương đối và vận tốc không khí); nhóm 2 là thông gió và chất lượng không khí trong nhà (lưu lượng gió tươi, nồng độ CO_2, giới hạn bụi $PM_{2.5}$); nhóm 3 là dữ liệu sử dụng công trình (mật độ người, LPD, EPD) và nhóm 4 là lịch vận hành. Phương pháp đối chiếu dựa trên việc so sánh song song từng nhóm thông số, xác định mức độ tương đồng, khác biệt và khoảng trống. Kết quả được trình bày dưới dạng bảng đối chiếu và phân tích định tính. Các thông số được đưa vào bộ dữ liệu phải đồng thời thỏa mãn ba điều kiện: (i) có giá trị định lượng cụ thể trong ít nhất một tiêu chuẩn/hướng dẫn được xét; (ii) là đầu vào trực tiếp cho phần mềm BES dưới dạng giá trị vô hướng hoặc lịch vận hành theo giờ; (iii) độc lập với thiết kế hệ thống và đặc điểm thi công của từng công trình. Dựa trên ba tiêu chí này, tốc độ thâm nhập không khí (infiltration rate) phụ thuộc vào chất lượng thi công và trình tự điều khiển HVAC không được đưa vào bộ dữ liệu tham chiếu chung do phụ thuộc vào thiết kế hệ thống.

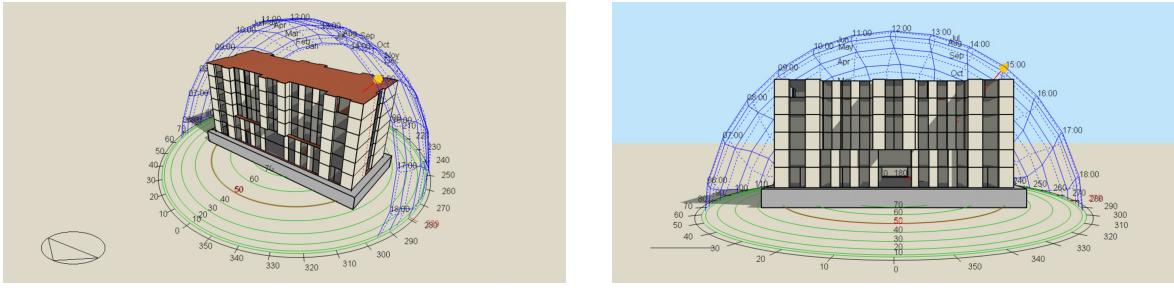
Bộ dữ liệu đầu vào được xây dựng theo nguyên tắc phân cấp ưu tiên: (i) Ưu tiên quy định trực tiếp trong tiêu chuẩn Việt Nam khi có giá trị định lượng cụ thể; (ii) Tham khảo tiêu chuẩn quốc tế có phạm vi điều kiện phù hợp với Việt Nam đối với các nội dung chưa được quy định; (iii) Điều chỉnh giá trị tiêu chuẩn hoặc tham chiếu quốc tế theo bối cảnh sử dụng công trình tại Việt Nam. Các giá trị đề xuất được định dạng phù hợp để sử dụng trực tiếp làm đầu vào cho các phần mềm mô phỏng phổ biến như EnergyPlus và DesignBuilder.

Bảng 1. Nguyên tắc phân cấp nguồn và lựa chọn dữ liệu đầu vào tham chiếu

Nguồn lựa chọn	Nguyên tắc lựa chọn	Thông số liên quan
(1) Quy chuẩn/Tiêu chuẩn Việt Nam có giá trị cụ thể	Ưu tiên giá trị quy định trong QCVN/TCVN hiện hành; tiêu chuẩn quốc tế được sử dụng để đối chiếu	Điều kiện nhiệt và tiện nghi
(2) Quy chuẩn/Tiêu chuẩn Việt Nam chỉ quy định giới hạn tối đa/tối thiểu	Lựa chọn giá trị vận hành điển hình trong phạm vi cho phép, đồng thời đối chiếu với tiêu chuẩn và dữ liệu tham chiếu quốc tế	Dữ liệu sử dụng và tải nội bộ
(3) Quy chuẩn/Tiêu chuẩn Việt Nam chưa quy định giá trị điển hình	Tham chiếu các tiêu chuẩn, hướng dẫn và bộ dữ liệu quốc tế; ưu tiên nguồn phù hợp với mục đích mô phỏng và loại hình công trình	Dữ liệu sử dụng và tải nội bộ
(4) Chưa có giá trị quy định trực tiếp trong tiêu chuẩn trong nước và quốc tế	Kết hợp quy định pháp luật Việt Nam về thời gian làm việc với dữ liệu khảo sát/nghiên cứu thực nghiệm về hành vi người sử dụng	Lịch vận hành

Theo nguyên tắc trong Bảng 1, các giá trị đầu vào không được xác định bằng cách lấy trung bình cơ học giữa các nguồn mà được lựa chọn theo thứ tự ưu tiên về tính pháp lý, mức độ phù hợp với mục đích mô phỏng và khả năng đại diện cho điều kiện vận hành công trình văn phòng hành chính tại Việt Nam. Việc đối chiếu và lựa chọn giá trị cụ thể cho từng nhóm thông số được trình bày tại Mục 3. Nghiên cứu tiến hành mô phỏng một công trình văn phòng điển hình, có diện tích sàn 6.976 m^2, sử dụng phần mềm DesignBuilder với lõi tính toán EnergyPlus [17] và file khí hậu VNM_Hanoi.488200 (Hà Nội – IWEC). Hai kịch bản được thiết lập, kịch bản 1 (KB1) phản ánh trường hợp cơ sở theo kết quả khảo sát của Đề tài RD 08-24 [18], và KB2 là kịch bản tổng hợp, trong đó một số thông số thuộc bộ dữ liệu đề xuất được áp dụng đồng thời với một số giải pháp kỹ thuật khác ngoài bộ dữ liệu. Sự khác biệt giữa hai kịch bản tập trung vào các nhóm thông số: Hệ số hiệu quả năng lượng (COP); Mật độ người sử dụng; Mật độ công suất chiếu sáng (LPD); Thông số kính; hệ số SHGC; Mức đặt (setback) điều hòa trong giờ nghỉ trưa; Bổ sung chế độ thông gió tự nhiên. Các thông số giữ nguyên ở cả hai kịch bản (KB1 và KB2): nhiệt độ điểm đặt 26 °C, lưu lượng gió tươi 25 m^3/h/người và mật độ công suất thiết bị điện (EPD).

Hình 1 minh họa mô hình hình học và hướng công trình được sử dụng trong DesignBuilder. Mô hình này đóng vai trò là trường hợp minh họa nhằm kiểm tra khả năng áp dụng của bộ dữ liệu đầu vào đề xuất, qua đó đánh giá sự khác biệt về EUI giữa kịch bản cơ sở và kịch bản tổng hợp KB2.



(a) Phối cảnh mô hình (b) Mặt đứng mô hình

Hình 1. Mô hình công trình văn phòng trong DesignBuilder

Để đánh giá ảnh hưởng riêng của một số thông số đầu vào đến kết quả mô phỏng, nghiên cứu áp dụng phân tích độ nhạy cục bộ theo phương pháp thay đổi từng yếu tố OAT (One-at-a-Time). Kịch bản KB1 được sử dụng làm trường hợp cơ sở; tại mỗi lần mô phỏng chỉ một thông số hoặc một nhóm thông số thuộc cùng giải pháp được thay đổi theo giá trị khảo sát, trong khi các điều kiện còn lại được giữ nguyên. Các trường hợp phân tích gồm mật độ công suất chiếu sáng (LPD), hệ số hiệu quả năng lượng (COP), đặc tính nhiệt của kính và phương thức thông gió. Mức ảnh hưởng được đánh giá thông qua mức thay đổi EUI tuyệt đối và tương đối so với KB1. Đối với các biến định lượng đơn như LPD và COP, nghiên cứu sử dụng thêm hệ số nhạy chuẩn hóa Si (Normalized Sensitivity Coefficient) được tính bằng tỷ lệ giữa sự thay đổi tương đối của đầu ra mô hình và sự thay đổi tương đối của yếu tố đầu vào theo phương trình [19, 20]:

$$S_i = \frac{\Delta EUI_i / EUI_0}{\Delta X_i / X_{i,0}} \tag{1}$$

trong đó EUI_i là đầu ra của mô hình, X_i đại diện cho mỗi yếu tố đầu vào của mô hình, EUI_0 và $X_{i,0}$ là giá trị mô hình cơ sở (KB1) của đầu ra và đầu vào mô hình. Giá trị càng lớn biểu thị EUI càng nhạy với thông số đang xét, trong khi dấu (+) hoặc (−) thể hiện chiều tác động.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Điều kiện nhiệt ẩm

Bảng 2. Đối chiếu điều kiện nhiệt và tiện nghi

Thông số	TCVN 5687:2024	EN 16798-1:2019	ASHRAE 55-2023	Nhận xét
Nhiệt độ làm mát (mùa hè)	25–27 °C	24–26 °C	Vùng tiện nghi linh hoạt; phụ thuộc vận tốc gió và độ ẩm	Khá tương đồng
Nhiệt độ sưởi (mùa đông)	20–24 °C	20–22 °C	Không áp dụng tại các vùng khí hậu nhiệt đới	Khá tương đồng
Độ ẩm tương đối	50–70%	30–70%	Kết hợp với nhiệt độ theo đường giới hạn humidity ratio	Việt Nam dải hẹp hơn, ở ngưỡng cao
Vận tốc không khí trong phòng	≤ 0,3 m/s	≤ 0,25 m/s	Phụ thuộc nhiệt độ không khí và mức hoạt động	Khá tương đồng

Kết quả đối chiếu trong Bảng 2 cho thấy các quy định về nhiệt độ vận hành trong TCVN 5687:2024 có mức tương đồng cao với các tiêu chuẩn quốc tế. Cụ thể, khoảng nhiệt độ làm mát mùa hè từ 25 °C đến 27 °C và nhiệt độ sưởi mùa đông từ 20 °C đến 24 °C khá tương đồng với hạng mục II (điều kiện thông thường) của ISO 17772-1 [2]. Đây là hạng mục được khuyến nghị áp dụng cho các công trình văn phòng mới xây dựng hoặc cải tạo trong điều kiện vận hành thông thường. Đối với độ ẩm tương đối, TCVN 5687:2024 quy định dải 50–70%, hẹp hơn so với khuyến nghị của EN 16798-1:2019 [15] (30–70%), điều này phản ánh yêu cầu đặc thù trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm của Việt Nam, nơi độ ẩm ngoài trời thường xuyên vượt ngưỡng 80%. Về vận tốc không khí, TCVN 5687:2024 giới hạn ≤ 0,3 m/s, khá gần với mức 0,25 m/s của EN 16798-1:2019 và phù hợp với dải cho phép của ASHRAE 55 đối với hoạt động văn phòng. Điểm khác biệt đáng chú ý là ASHRAE 55 không đưa ra

nhiệt độ điểm đặt cố định mà sử dụng mô hình tiện nghi nhiệt thích nghi (Adaptive Comfort Model - ACM) cho không gian thông gió tự nhiên và mô hình PMV/PPD [2] cho không gian điều hòa không khí.

Trên cơ sở đối chiếu TCVN 5687:2024 với EN 16798-1:2019 và ASHRAE 55-2023, các thông số về nhiệt độ, độ ẩm và vận tốc không khí được tổng hợp trong Bảng 2. Bảng này cho thấy nhóm điều kiện nhiệt ẩm có mức tương đồng tương đối cao giữa tiêu chuẩn Việt Nam và quốc tế, qua đó có thể sử dụng làm cơ sở ban đầu cho bộ dữ liệu tham chiếu

Như vậy, đối với nhóm điều kiện nhiệt ẩm, tiêu chuẩn Việt Nam đã cung cấp cơ sở định lượng khá rõ cho mô phỏng năng lượng. Tuy nhiên, sự khác biệt về dải độ ẩm và cách tiếp cận tiện nghi nhiệt cho thấy cần lựa chọn giá trị vận hành đại diện phù hợp với điều kiện khí hậu nóng ẩm của Việt Nam, thay vì sao chép trực tiếp từ tiêu chuẩn quốc tế.

3.2. Thông gió và chất lượng không khí trong nhà

Về lưu lượng gió tươi tối thiểu, cũng có sự tương đồng các tiêu chuẩn Việt Nam và quốc tế. TCVN 5687:2024 quy định từ 25 đến 30 m^3/h/người trên mỗi người sử dụng cho không gian văn phòng, tương tự Bảng A.1 của TCVN 13521:2022 và EN 16798-1:2019 (7–10 L/s/người). Tuy nhiên, ASHRAE 62.1-2022 áp dụng công thức tích hợp (2,5 L/s/người + 0,3 L/s/m^2), cho kết quả khoảng 5,5 L/s/người với mật độ 10 m^2/người, thấp hơn đáng kể. Điều này cần lưu ý khi so sánh kết quả mô phỏng giữa các nghiên cứu dùng nhiều nguồn tiêu chuẩn khác nhau. Về nồng độ CO_2, Bảng 3 trong TCVN 13521:2022 quy định giới hạn ≤ 1000 ppm cho nhà công cộng (trị số trung bình 8 giờ làm việc), phù hợp với khuyến nghị của EN 16798-1 (800-1000 ppm) và ngưỡng tham chiếu phổ biến của ASHRAE 62.1. Quy định này giúp bổ sung thêm thông tin trong TCVN 5687, đồng thời cung cấp căn cứ rõ ràng cho việc nhập thông số CO_2 trong các phần mềm mô phỏng kiểm soát thông gió theo nhu cầu (Demand Controlled Ventilation – DCV).

Bên cạnh các quy định trong tiêu chuẩn, các kết quả khảo sát thực tế tại Việt Nam cũng cho thấy vai trò quan trọng của thông gió trong việc bảo đảm chất lượng không khí trong nhà. Nghiên cứu trên các văn phòng mới đưa vào sử dụng ghi nhận nồng độ formaldehyde và TVOC cao trong giai đoạn đầu vận hành do phát thải từ vật liệu hoàn thiện và nội thất, đồng thời chỉ ra rằng việc tăng cường thông gió, kết hợp kiểm soát nhiệt độ và độ ẩm, là giải pháp hiệu quả để giảm nồng độ các chất ô nhiễm và cải thiện IAQ. Điều này cho thấy khi xây dựng bộ dữ liệu đầu vào cho mô phỏng năng lượng, các thông số về lưu lượng gió ngoài, điều kiện nhiệt–ẩm và lịch vận hành hệ thống HVAC cần được lựa chọn đồng thời trên cơ sở yêu cầu tiết kiệm năng lượng và đảm bảo chất lượng không khí trong nhà, thay vì chỉ tối ưu theo tiêu chí tiêu thụ năng lượng [21].

Ngoài nồng độ CO_2, TCVN 13521:2022 còn quy định giới hạn nồng độ đối với một số chất ô nhiễm không khí trong nhà như $PM_{2.5}$, HCHO, TVOC, CO và NO_2. Trong đó, giới hạn $PM_{2.5}$ ≤ 50 μg/m^3 cung cấp cơ sở tham chiếu cho đánh giá chất lượng không khí trong nhà. Tuy nhiên, $PM_{2.5}$ không phải là thông số đầu vào trực tiếp của mô hình năng lượng EnergyPlus, giá trị này chủ yếu được sử dụng để xác định yêu cầu kiểm soát chất lượng không khí và lựa chọn giải pháp lọc phù hợp cho hệ thống thông gió. Khác với nhóm thông số nhiệt ẩm, nhóm thông gió và chất lượng không khí trong nhà có sự khác biệt rõ hơn giữa các tiêu chuẩn. Bảng 3 tổng hợp các yêu cầu về lưu lượng gió tươi, CO_2, $PM_{2.5}$, formaldehyde và phân cấp IAQ để làm rõ mức độ đầy đủ cũng như khoảng trống của từng tiêu chuẩn.

Từ Bảng 3 có thể thấy, TCVN 13521:2022 đã bổ sung các giới hạn quan trọng về CO_2, $PM_{2.5}$, HCHO và các chất ô nhiễm trong nhà, tạo cơ sở cho đánh giá IAQ trong mô phỏng.

Bảng 3. Đối chiếu thông số thông gió và chất lượng không khí trong nhà

Thông số	TCVN 5687:2024	TCVN 13521:2022	EN 16798-1:2019	ASHRAE 62.1-2022
Lưu lượng gió tươi văn phòng	25–30 m^3/h/người	25–30 m^3/h/người	7–10 L/s/người	2,5 L/s/người + 0,3 $L/s/m^2$
Nồng độ CO_2 tối đa	Chưa quy định	≤ 1000 ppm	800–1000 ppm	Không quy định giới hạn CO_2 tuyệt đối chung
Giới hạn $PM_{2.5}$ trong nhà	Không quy định	≤ 50 $\mu g/m^3$	Theo WHO 2021	Không quy định trực tiếp
Formaldehyde (HCHO)	Không quy định	≤ 100 $\mu g/m^3$ (0,08 ppm)	Không quy định trực tiếp	Không quy định trực tiếp

3.3. Dữ liệu vận hành và sử dụng công trình

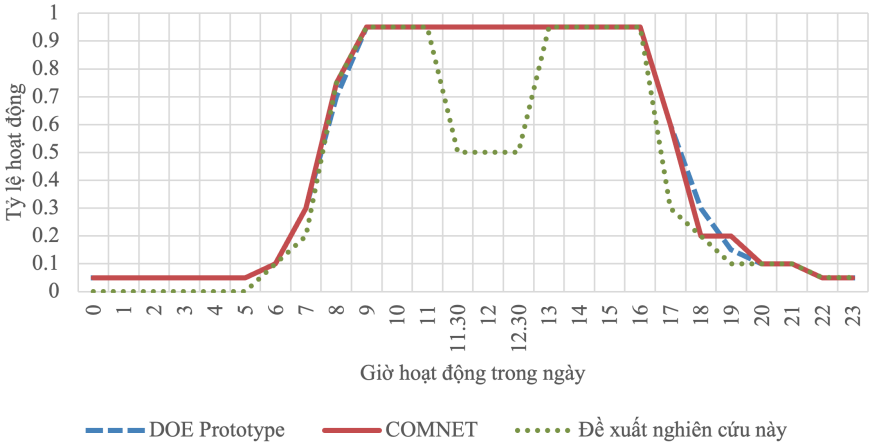
Đây là nhóm thông số có sự chênh lệch lớn nhất giữa hệ thống tiêu chuẩn Việt Nam và quốc tế. Trong khi các tiêu chuẩn như ASHRAE 90.1 [1], DOE Prototype [4] và UK NCM [5] cung cấp đầy đủ các bảng giá trị mật độ sử dụng, lịch vận hành theo giờ, LPD và EPD cho từng loại không gian chức năng, các tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành không có dữ liệu tương đương ở dạng giá trị điển hình dùng cho mô phỏng.

Theo Bộ luật Lao động 2019, thời giờ làm việc bình thường không quá 08 giờ trong 01 ngày và không quá 48 giờ trong 01 tuần [22]. Đối với văn phòng hành chính, nghiên cứu lựa chọn lịch làm việc 5 ngày/tuần để xây dựng lịch vận hành tham chiếu. Thời gian làm việc hành chính có thể khác nhau giữa các cơ quan và địa phương, trong nghiên cứu này khung giờ 7h30–17h00 với thời gian nghỉ trưa 11h30–13h00, được lựa chọn làm lịch vận hành tham chiếu. Trong khung giờ nghỉ trưa, lượng người ở lại trong văn phòng thường chỉ khoảng 20–30% và hệ thống HVAC thường được điều chỉnh giảm tải (setback). Cơ sở khoa học cho việc điều chỉnh lịch vận hành phù hợp với điều kiện Việt Nam được củng cố bởi các nghiên cứu thực nghiệm về hành vi người sử dụng trong công trình. Trong nghiên cứu của D'Oca và cs. đã tổng hợp từ 103 nghiên cứu cho thấy sai lệch giữa lịch vận hành thiết kế và thực tế đo có thể gây chênh lệch EUI lên đến 20–30% [6]. Hong và cs. phát triển mô hình hành vi người dùng tích hợp trong EnergyPlus, chỉ ra tầm quan trọng của việc đồng bộ mô hình hiện diện với văn hóa và thói quen làm việc địa phương [7]. Yan và cs. đã chứng minh rằng hành vi điều chỉnh thiết bị và chiếu sáng của người dùng tại châu Á khác biệt đáng kể so với mô hình chuẩn phương Tây [8]. Trong một nghiên cứu của Page và cs. đề xuất mô hình thống kê về xác suất hiện diện theo giờ, khá phù hợp để mô hình hóa khoảng nghỉ trưa đặc trưng của văn phòng tại Việt Nam [9]. Những nghiên cứu này cho thấy khoảng bất định điển hình, mật độ người dao động ±20–30% so với giá trị thiết kế; lịch vận hành thực tế có thể sai lệch ±1–2 giờ so với lịch danh nghĩa. Người dùng bộ dữ liệu cần cân nhắc các khoảng bất định này khi đánh giá kết quả mô phỏng. Những nghiên cứu trên phù hợp với lịch vận hành đề xuất theo hai giai đoạn trong ngày (7h30–11h30 và 13h00–17h00) với mức đặt trong khoảng 50% trong giờ nghỉ trưa như đề xuất trong Bảng 4 và Hình 2 cho nghiên cứu này. Hình 2 trực quan hóa sự khác biệt về hệ số hoạt động theo giờ trong ngày.

Trong khi các thông số nhiệt ẩm và thông gió đã có cơ sở định lượng tương đối rõ từ tiêu chuẩn, lịch vận hành lại phụ thuộc mạnh vào đặc điểm sử dụng thực tế của từng quốc gia. Vì vậy, Bảng 4 được sử dụng để đối chiếu lịch vận hành giữa DOE Prototype, COMNET và đề xuất cho Việt Nam.

Bảng 4. Đối chiếu dữ liệu sử dụng công trình

Nội dung	DOE Prototype	COMNET	Đề xuất Việt Nam
Giờ bắt đầu làm việc	07:00–08:00	07:00–08:00	7:30–8:00
Giờ kết thúc	18:00–19:00	18:00	17:00
Nghỉ trưa	Không rõ	Không có mô hình hóa riêng	11:30–13:00
Hệ số sử dụng lớn nhất (Occupancy max)	0,95	0,95	0,95
Hệ số sử dụng buổi tối	0,10–0,30	0,05–0,20	0,1
Thứ Bảy	Có hoạt động	Có hoạt động	Giảm còn khoảng 30%
Chủ nhật	Tải nền 5%	Tải nền 5%	Tải nền khoảng 5%



Hình 2. Biểu đồ đề xuất lịch vận hành tòa nhà văn phòng tại Việt Nam

So với nghiên cứu DOE Prototype và COMNET, lịch vận hành đề xuất cho Việt Nam có ba điểm khác biệt chính: (i) thời gian làm việc tập trung từ 07:30 đến 17:00 theo Bộ luật Lao động Việt Nam; (ii) khoảng nghỉ trưa 11:30–13:00 được mô hình hóa riêng nhằm phản ánh sự giảm mật độ người và tải thiết bị; và (iii) mức sử dụng vào buổi tối và cuối tuần thấp hơn do phần lớn văn phòng hành chính không tổ chức làm việc ngoài giờ. Những điều chỉnh này giúp lịch vận hành phản ánh sát hơn đặc điểm sử dụng thực tế của công trình văn phòng tại Việt Nam và làm giảm sai lệch khi áp dụng trực tiếp các lịch tham chiếu của Bắc Mỹ.

Về mật độ công suất chiếu sáng (LPD), QCVN 04-3:2026/BXD quy định giới hạn tối đa 11 W/m^2, trong khi ASHRAE 90.1 đưa ra mức khoảng 6 W/m^2 cho văn phòng sử dụng chiếu sáng hiệu suất cao. Bên cạnh đó, theo JRC (2023), LED đã trở thành công nghệ chiếu sáng phổ biến, chiếm trên 50% doanh thu thị trường toàn cầu và dự báo vượt 85% vào năm 2035, khu vực châu Á Thái Bình Dương có tốc độ tăng trưởng cao [23]. Do đó, trong bối cảnh LED ngày càng phổ biến tại Việt Nam, lựa chọn LPD = 8 W/m^2, nằm giữa hai mức tham chiếu trên, được xem là hợp lý và phù hợp cho điều kiện thiết kế hiện nay.

Đối với mật độ công suất thiết bị (EPD), các tài liệu cho thấy giá trị này có mức biến thiên tương đối lớn, tùy thuộc vào mật độ người, loại và số lượng thiết bị, mức độ trang bị và hệ số sử dụng. Giá trị phụ tải thiết bị văn phòng trong eQUEST khoảng 16,1 W/m^2, trong khi CIBSE đưa ra các mức tham chiếu thiết kế khoảng 15–25 W/m^2 tùy theo hệ số đồng thời và mức độ trang bị [24]. Bên cạnh đó, dữ liệu tham khảo của ASHRAE cho thấy phụ tải thiết bị văn phòng có thể dao động trong

khoảng 5,4–21,5 W/m^2 theo mật độ và loại thiết bị [25]. Đáng chú ý, qua khảo sát 92 mô hình năng lượng công trình, Fuertes và Schiavon ghi nhận phụ tải thiết bị cắm điện được giả định trong khoảng 10,8–32,2 W/m^2 và khoảng 80% người lập mô hình lựa chọn EPD chủ yếu dựa trên kinh nghiệm [26]. Trên cơ sở đối chiếu các nguồn trên, nghiên cứu lựa chọn EPD = 18 W/m^2, nằm trong phạm vi các giá trị tham chiếu quốc tế và đại diện cho văn phòng có mức trang bị thiết bị trung bình-cao. Do Việt Nam hiện chưa có cơ sở dữ liệu khảo sát quy mô lớn về phụ tải thiết bị văn phòng, giá trị này được xem là giá trị tham chiếu ban đầu và cần tiếp tục được kiểm chứng bằng dữ liệu đo lường thực tế.

Đối với mật độ người sử dụng, TCVN 5687:2024 và TCVN 13521:2022 quy định phòng làm việc văn phòng với diện tích 8-10 m^2/người. Đây là căn cứ trực tiếp từ tiêu chuẩn Việt Nam, giá trị 10 m^2/người được chọn làm đề xuất vì vừa có căn cứ trong tiêu chuẩn Việt Nam vừa đảm bảo tính tương thích với thực hành quốc tế. Các giá trị trên được so sánh trong Bảng 5.

Bảng 5. Đối chiếu dữ liệu sử dụng công trình văn phòng

Thông số	Việt Nam	Quốc tế	Ghi chú
Mật độ người sử dụng	8–10 m^2/người (TCVN 5687:2024; TCVN 13521:2022)	20 m^2/người (ASHRAE 62.1)	Ảnh hưởng trực tiếp đến nhiệt thải trong phòng và tải lạnh
Lịch vận hành	Chưa quy định	5 ngày/tuần, 9–10 h/ngày (ASHRAE 90.1)	Tác động đến tổng giờ vận hành HVAC và EUI hàng năm
Mật độ công suất chiếu sáng (LPD)	≤ 11 W/m^2 (QCVN 04-3:2026/BXD)	6 W/m^2 (ASHRAE 90.1)	Thiếu giá trị điển hình làm cơ sở cho mô phỏng; không phân biệt không gian chức năng
Mật độ công suất thiết bị (EPD)	Chưa quy định	10,8–32,2 W/m^2 (Fuertes và Schiavon); 5,4–21,5 W/m^2 (ASHRAE); 15–25 W/m^2 (CIBSE)	Chênh lệch lớn giữa các nghiên cứu do chọn EPD khác nhau

3.4. Bộ dữ liệu đầu vào tham chiếu đề xuất cho công trình văn phòng

Kết quả đối chiếu ba nhóm nội dung trên cho thấy không một nguồn tài liệu đơn lẻ nào cung cấp đầy đủ toàn bộ dữ liệu cần thiết cho mô phỏng năng lượng văn phòng trong điều kiện Việt Nam. Các tiêu chuẩn trong nước và quốc tế chủ yếu quy định các yêu cầu về điều kiện nhiệt ẩm, thông gió và chất lượng môi trường trong nhà, trong khi các bộ mô hình và hướng dẫn tham chiếu (DOE Commercial Prototype, COMNET Modeling Guidelines và UK National Calculation Methodology) cung cấp các giá trị điển hình về tải nội bộ và lịch vận hành phục vụ mô phỏng. Trên cơ sở tổng hợp, đối chiếu và phân cấp các nguồn tài liệu trên, kết hợp lựa chọn và điều chỉnh các giá trị phù hợp với điều kiện sử dụng tại Việt Nam, nghiên cứu đề xuất bộ dữ liệu đầu vào tham chiếu trong Bảng 6. Bộ dữ liệu này nhằm thống nhất các giả định đầu vào, nâng cao tính nhất quán và khả năng so sánh giữa các nghiên cứu, đồng thời tạo cơ sở ban đầu cho việc xây dựng cơ sở dữ liệu vận hành công trình tại Việt Nam trong tương lai.

Bảng 6. Bộ dữ liệu đầu vào đề xuất cho mô phỏng năng lượng công trình văn phòng

Thông số	Giá trị đề xuất	Cơ sở / Nguồn tham chiếu
A. Điều kiện nhiệt ẩm		
Nhiệt độ điểm đặt làm mát	26 °C	TCVN 5687:2024; EN 16798-1:2019; phù hợp thực tế vận hành Việt Nam
Nhiệt độ điểm đặt sưởi (miền Bắc)	20 °C	TCVN 5687:2024; áp dụng các tỉnh miền Bắc mùa đông
Độ ẩm tương đối vận hành	60% (Dải kiểm soát: 55–65%)	TCVN 5687:2024 (50–70%); Đặt 60% phù hợp điều kiện nhiệt đới ẩm VN; dải kiểm soát ±5% cho vận hành thực tế
Vận tốc không khí trong phòng	≤ 0,3 m/s	TCVN 5687:2024
B. Thông gió và chất lượng không khí trong nhà		
Lưu lượng gió tươi	25 m^3/h/người	TCVN 5687:2024; TCVN 13521:2022; EN 16798-1:2019
Nồng độ CO_2 thiết kế tối đa	1000 ppm	TCVN 13521:2022; EN 16798-1:2019; ASHRAE 62.1
$PM_{2.5}$	45 μg/m^3	TCVN 13521:2022; thông số IAQ tham chiếu, không phải đầu vào trực tiếp của mô hình năng lượng
C. Dữ liệu sử dụng công trình		
Mật độ người sử dụng	10 m^2/người	TCVN 5687:2024 (8–10 m^2/người); ASHRAE 62.1 (20 m^2/người)
Mật độ công suất chiếu sáng (LPD)	8 W/m^2	Lựa chọn nằm giữa hai mức tham chiếu ASHRAE 90.1-2022 (6 W/m^2) và QCVN 04-3:2026/BXD (11 W/m^2); LED đã chiếm trên 50% thị trường chiếu sáng toàn cầu [23]
Mật độ công suất thiết bị (EPD)	18 W/m^2	Đối chiếu eQUEST (16,1 W/m^2), CIBSE (15–25 W/m^2) và ASHRAE (5,4–21,5 W/m^2); lựa chọn 18 W/m^2 trong phạm vi tham chiếu quốc tế, đại diện văn phòng có mức trang bị thiết bị trung bình–cao
D. Lịch vận hành		
Thời gian vận hành hàng ngày	7h30–11h30 và 13h00–17h00	Bộ luật lao động 2019; giờ nghỉ trưa 11h30–13h00 giả định giảm tải xuống 50%, HVAC cài đặt tiết kiệm năng lượng; tổng 8 giờ/ngày vận hành
Số ngày làm việc mỗi năm	260 ngày/năm	Bộ luật lao động 2019

Ghi chú: Nồng độ CO_2 được sử dụng làm ngưỡng điều khiển thông gió theo nhu cầu (DCV); độ ẩm tương đối thay đổi theo quá trình xử lý không khí của HVAC; $PM_{2.5}$ không nhập trực tiếp vào mô hình năng lượng EnergyPlus mà được sử dụng làm cơ sở xác định yêu cầu lọc không khí cấp gió tươi (có thể tham chiếu cấp lọc MERV 13). Bộ dữ liệu áp dụng cho văn phòng hành chính thông thường và cần được hiệu chỉnh theo điều kiện khí hậu, loại không gian và đặc điểm vận hành của từng công trình.

Cần lưu ý rằng bộ dữ liệu trong Bảng 6 áp dụng cho không gian làm việc văn phòng hành chính thông thường, có thể tham chiếu và điều chỉnh theo đặc thù từng công trình khi áp dụng. Đặc biệt, đối với các không gian có yêu cầu khác nhau (phòng họp, trung tâm dữ liệu, không gian lễ tân) hoặc công trình có hệ thống quản lý năng lượng tiên tiến (BEMS), cần khảo sát và thu thập dữ liệu vận hành thực tế để có đầu vào chính xác hơn.

3.5. Minh hoạ ứng dụng bộ dữ liệu đề xuất trong mô phỏng kịch bản

Để minh họa khả năng ứng dụng của bộ dữ liệu trong mô phỏng năng lượng công trình, nghiên cứu xây dựng hai kịch bản trên mô hình văn phòng nhằm đánh giá xu hướng thay đổi tiêu thụ năng lượng khi điều chỉnh các thông số đầu vào và giải pháp kỹ thuật (Bảng 7).

Bảng 7. Thiết lập các thông số cho kịch bản mô phỏng minh họa KB1 và KB2

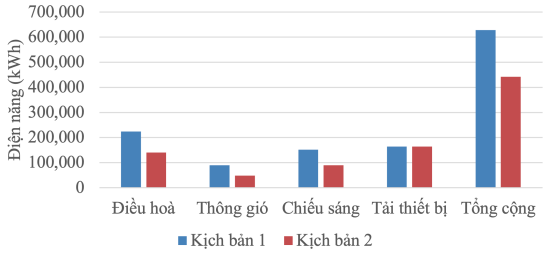
Nhóm thông số	Kịch bản cơ sở (KB1)	Kịch bản đề xuất (KB2)
Cài đặt nhiệt độ làm mát/sưởi ấm	26 °C / 20 °C	26 °C / 20 °C
Cài đặt độ ẩm	60%	60%
Lưu lượng gió tươi	25 m^3/h/người	25 m^3/h/người
Hệ thống thông gió	Thông gió cơ khí	Thông gió cơ khí, kết hợp thông gió tự nhiên
Mật độ người văn phòng	8 m^2/người	10 m^2/người
LPD – chiếu sáng	11 W/m^2	8 W/m^2
EPD – thiết bị	18 W/m^2	18 W/m^2
COP hệ thống lạnh	3,22 (VRF)	3,5 (VRF)
Giờ vận hành HVAC / Lighting	7h30–11h30 13h00–17h00	7h30–11h30 13h00–17h00
Giờ nghỉ trưa	11h30–13h00 (giảm tải HVAC, chiếu sáng: 50%)	11h30–13h00 (giảm tải HVAC, chiếu sáng: 25%)
Số ngày làm việc/năm	260 ngày	260 ngày
Tường ngoài (không xuyên sáng)	U = 1,799 W/m^2/K	U = 1,799 W/m^2/K
Mái	U = 0,947 W/m^2/K	U = 0,947 W/m^2/K
Tỷ lệ cửa sổ/tường (WWR)	35%	35%
Kính (cửa sổ)	U = 5,5 W/m^2/K SHGC = 0,65	U = 2,5 W/m^2/K SHGC = 0,25

Kết quả mô phỏng năng lượng bằng DesignBuilder giữa KB1 và KB2 được tổng hợp trong Hình 3 và phân tích như sau:

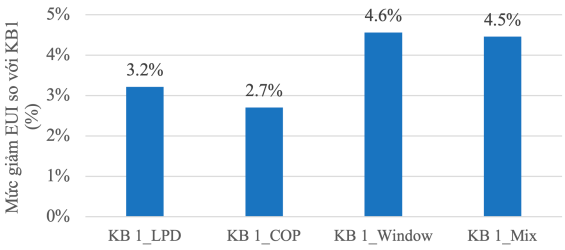
- Đối với KB1, kết quả mô phỏng trong cho thấy EUI có giá trị 90,13 kWh/m^2/năm, trong đó điều hòa-thông gió chiếm tỷ trọng lớn nhất (44,90 kWh/m^2/năm, chiếm khoảng 49,8%), gồm tiêu thụ làm lạnh (31,24 kWh/m^2) và quạt-thông gió (12,82 kWh/m^2). Chiếu sáng chiếm 21,71 kWh/m^2/năm (24,1%) và tải thiết bị điện chiếm 23,53 kWh/m^2/năm (26,1%).

- Đối với KB2 giá trị EUI là 63,32 kWh/m^2/năm, tiết kiệm 26,81 kWh/m^2/năm so với KB1 (tương đương 29,75%). Tiêu thụ điện của hệ thống điều hòa thông gió là 26,99 kWh/m^2/năm, khi so sánh với KB1 cho thấy giảm 17,91 kWh/m^2/năm (khoảng 39,89%), trong đó thành phần làm lạnh giảm 11,17 kWh/m^2/năm (khoảng 37,20%), quạt thông gió giảm 5,98 kWh/m^2/năm (khoảng 46,61%). Hạng mục chiếu sáng giảm 8,90 kWh/m^2/năm (khoảng 41,0%) chủ yếu từ việc giảm LPD từ 11 xuống 8 W/m^2. Tải thiết bị không thay đổi do EPD giữ nguyên ở cả hai kịch bản.

Tổng lượng điện tiết kiệm hàng năm cho tòa nhà 6.976 m^2 khi áp dụng KB2 tương đương khoảng 187.000 kWh/năm. Kết quả này cho thấy kịch bản tổng hợp KB2, kết hợp một số thông số của bộ dữ liệu đề xuất với các thay đổi về hiệu suất hệ thống, đặc tính kính và phương thức thông gió, có EUI thấp hơn khoảng 30% so với KB1. Kết quả được sử dụng để minh họa khả năng ứng dụng của bộ dữ liệu trong xây dựng và phân tích kịch bản, không được xem là kiểm chứng độc lập hiệu quả của bộ dữ liệu đề xuất.



Hình 3. Biểu đồ tiêu thụ năng lượng tòa nhà văn phòng tại Hà Nội



Hình 4. Mức giảm EUI của các trường hợp thay đổi so với KB1

Ghi chú: EUI được tính trên tổng diện tích sàn (GFA) là 6.976 m^2 (bao gồm cả diện tích không điều hòa như hành lang, thang, vệ sinh).

Kết quả cho thấy hệ thống điều hòa–thông gió và chiếu sáng chiếm tỷ trọng đáng kể trong EUI của KB1, lần lượt là 49,8% và 24,1%. Để làm rõ mức độ ảnh hưởng riêng của một số thay đổi trước khi tích hợp trong kịch bản tổng hợp, nghiên cứu tiếp tục phân tích cục bộ đối với LPD, COP, đặc tính kính và phương thức thông gió tại Mục 3.6.

3.6. Phân tích độ nhạy và ảnh hưởng của một số thông số đầu vào đến EUI

Trên cơ sở phương pháp phân tích độ nhạy cục bộ OAT và hệ số nhạy chuẩn hóa đã trình bày tại Mục 2, bốn trường hợp thay đổi riêng lẻ được mô phỏng nhằm định lượng mức độ ảnh hưởng đến EUI so với KB1. Các trường hợp khảo sát gồm: KB1_LPD, giảm mật độ công suất chiếu sáng từ 11 xuống 8 W/m^2; KB1_COP, tăng COP của hệ thống lạnh từ 3,22 lên 3,50; KB1_Window, cải thiện đặc tính nhiệt của kính từ U = 5,5 xuống 2,5 $W/m^2/K$ và SHGC từ 0,65 xuống 0,25; và KB1_Mix, chuyển từ thông gió cơ khí sang kết hợp thông gió cơ khí và thông gió tự nhiên. Kết quả trong Hình 4 cho thấy các thay đổi riêng lẻ đều làm giảm EUI so với KB1, nhưng mức độ ảnh hưởng khác nhau.

Xét theo hệ số nhạy chuẩn hóa, kết quả cho thấy trong hai thông số định lượng được khảo sát, EUI nhạy hơn với sự thay đổi tương đối của COP (S_{COP} = −0,31) so với LPD (S_{LPD} = 0,12). Nói cách khác, mức tăng khoảng 1% COP tạo ra mức thay đổi tương đối của EUI lớn hơn so với mức thay đổi 1% LPD trong phạm vi khảo sát. Tuy nhiên, xét về mức tiết kiệm tuyệt đối của các phương án kỹ thuật được lựa chọn, giảm LPD từ 11 xuống 8 W/m^2 mang lại mức giảm EUI lớn hơn việc tăng COP từ 3,22 lên 3,50 do biên độ thay đổi của LPD lớn hơn. Không tính hệ số nhạy chuẩn hóa cho KB1_Window và KB1_Mix do KB1_Window đồng thời thay đổi hai thuộc tính của kính (U và SHGC), còn KB1_Mix là thay đổi dạng giải pháp vận hành chứ không phải một biến định lượng liên tục. Kết quả của hai trường hợp này vì vậy được sử dụng để đánh giá mức ảnh hưởng riêng của giải pháp, thay vì so sánh hệ số nhạy với COP và LPD.

Khi các giải pháp đơn lẻ được tích hợp trong KB2, EUI giảm từ 90,13 xuống 63,32 kWh/m^2/năm, tương ứng 29,75%. Mức giảm này lớn hơn đáng kể so với từng trường hợp thay đổi riêng lẻ, cho thấy kết quả của kịch bản tổng hợp hình thành từ tác động đồng thời và tương tác giữa nhiều thông số, bao gồm tải nội bộ, hiệu suất hệ thống, đặc tính vỏ bao che, thông gió và lịch vận hành.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đối chiếu phân cấp các tiêu chuẩn và nguồn dữ liệu trong nước, quốc tế để xây dựng bộ dữ liệu đầu vào phục vụ mô phỏng năng lượng công trình văn phòng hành chính tại Việt Nam. Trên cơ sở đó, bộ dữ liệu đề xuất được áp dụng cho mô hình văn phòng 6 tầng tại Hà Nội bằng mô phỏng nhằm minh họa khả năng ứng dụng trong thực tế. Kết quả cho thấy kịch bản tổng hợp có áp dụng một số thông số của bộ dữ liệu đề xuất kết hợp các giải pháp cải thiện hệ thống và vỏ bao che (KB2) giúp giảm gần 30% cường độ sử dụng năng lượng so với kịch bản cơ sở (KB1).

Kết quả đối chiếu cho thấy các quy định về điều kiện nhiệt và môi trường trong nhà (nhiệt độ, độ ẩm và vận tốc không khí) trong TCVN 5687:2024 có mức độ khá tương đồng với EN 16798-1:2019 và các tiêu chuẩn ASHRAE liên quan. Đặc biệt, TCVN 13521:2022 quy định giới hạn nồng độ CO_2 trong nhà công cộng ($\leq$ 1.000 ppm), góp phần hoàn thiện cơ sở kỹ thuật cho việc thiết kế, đánh giá chất lượng không khí trong nhà và phát triển các giải pháp thông gió điều khiển theo nhu cầu (DCV). Tuy nhiên, khoảng trống lớn nhất của hệ thống tiêu chuẩn Việt Nam hiện nay vẫn nằm ở nhóm dữ liệu đầu vào, bao gồm mật độ người sử dụng điển hình, lịch vận hành theo giờ, mật độ công suất chiếu sáng (LPD) và mật độ công suất thiết bị (EPD) theo từng loại không gian chức năng. Việc thiếu các dữ liệu này khiến phần lớn các nghiên cứu trong nước phải tham khảo các bộ dữ liệu quốc tế, trong khi chưa được hiệu chỉnh đầy đủ theo điều kiện vận hành thực tế tại Việt Nam. Nghiên cứu đã đề xuất bộ dữ liệu đầu vào tham chiếu gồm 12 thông số thuộc bốn nhóm: điều kiện nhiệt ẩm, thông gió và chất lượng không khí trong nhà, dữ liệu sử dụng công trình và lịch vận hành. Bộ dữ liệu này có thể được sử dụng như một tập giá trị tham chiếu ban đầu cho các mô hình mô phỏng năng lượng công trình văn phòng hành chính thông thường tại Việt Nam, góp phần nâng cao tính nhất quán của các giả định đầu vào, tăng khả năng so sánh giữa các nghiên cứu và tạo cơ sở cho việc xây dựng cơ sở dữ liệu quốc gia phục vụ mô phỏng năng lượng trong tương lai.

Từ những kết quả đạt được, hướng nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào kiểm chứng, lượng hóa bất định và từng bước xây dựng cơ sở dữ liệu quốc gia về đặc điểm vận hành và tiêu thụ năng lượng công trình tại Việt Nam. Trước hết, phân tích Monte Carlo đối với các thông số trong bộ dữ liệu đề xuất tại Bảng 6, kết hợp phân tích bất định (Uncertainty Analysis), có thể được sử dụng để xác định mức độ đóng góp của từng thông số vào biến thiên kết quả mô phỏng, khoảng tin cậy của EUI dự báo và thứ tự ưu tiên các thông số cần thu thập dữ liệu thực tế. Trên cơ sở đó, cần triển khai các chương trình khảo sát và đo lường định kỳ tại các công trình văn phòng và từng bước mở rộng sang các loại hình công trình khác nhằm thu thập dữ liệu về đặc điểm sử dụng, tải nội bộ, lịch vận hành và mức tiêu thụ năng lượng thực tế. Dữ liệu thực đo sẽ là cơ sở để kiểm chứng, hiệu chỉnh và cập nhật các giá trị tham chiếu, tiến tới xây dựng cơ sở dữ liệu quốc gia và phát triển hướng dẫn kỹ thuật thống nhất về dữ liệu đầu vào cho mô phỏng năng lượng công trình. Đây là nền tảng để nâng cao tính nhất quán và khả năng so sánh giữa các nghiên cứu, đồng thời hỗ trợ xây dựng tiêu chuẩn, quy chuẩn và ứng dụng mô phỏng năng lượng trong thiết kế, vận hành và quản lý công trình tại Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

[1] ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2022. *Energy standard for sites and buildings except low-rise residential buildings*. ASHRAE, Atlanta.

[2] ISO 17772-1:2017. *Energy performance of buildings – indoor environmental quality – part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings*. International Organization for Standardization, Geneva.

[3] Dũng, T. Q., Trung, L. N., Nam, P. H., Trang, P. T. C., (2026). Tính toán tiêu thụ năng lượng và đánh giá tiềm năng sử dụng điện mặt trời trong tòa nhà văn phòng tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 20(2V):163–177.

[4] U. S. Department of Energy, (2022). *DOE commercial prototype building models*.

[5] BRE, MHCLG, (2021). *National calculation methodology (NCM) for assessing the energy performance of non-domestic buildings in England*. UK.
[6] D'Oca, S., Hong, T., Langevin, J., (2018). The human dimensions of energy use in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:731–742.
[7] Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D'Oca, S., Yan, D., Corgnati, S. P., (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings*, 116:694–702.
[8] Yan, D., O'Brien, W., Hong, T., Feng, X., Burak Gunay, H., Tahmasebi, F., Mahdavi, A., (2015). Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. *Energy and Buildings*, 107:264–278.
[9] Page, J., Robinson, D., Morel, N., Scartezzini, J.-L., (2008). A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings*, 40(2):83–98.
[10] TCVN 5687:2024. *Thông gió và điều hòa không khí – tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
[11] TCVN 13521:2022. *Nhà ở và nhà công cộng – các thông số chất lượng không khí trong nhà*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
[12] QCVN 04-3:2026/BXD. *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về công trình dân dụng – phần 3: Công trình xây dựng sử dụng năng lượng hiệu quả*. Bộ Xây dựng, Hà Nội.
[13] ANSI/ASHRAE Standard 55-2023. *Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE, Atlanta.
[14] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022. *Ventilation and acceptable indoor air quality*. ASHRAE, Atlanta.
[15] EN 16798-1:2019, (2019). *Energy performance of buildings – ventilation for buildings – part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings*. European Committee for Standardization, CEN, Brussels.
[16] ASHRAE, (2021). *ASHRAE handbook – fundamentals*. Atlanta.
[17] U. S. Department of Energy, NREL, (2023). *EnergyPlus engineering reference: The reference to EnergyPlus calculations*. National Renewable Energy Laboratory.
[18] Trung, N. T., (2025). *Nghiên cứu đề xuất mô hình công trình xây dựng không phát thải các-bon cho một số loại công trình*. Báo cáo đề tài mã số RD08-24, Bộ Xây dựng, Hà Nội.
[19] Yuan, Y., Bingner, R. L., Locke, M. A., Theagarten, P. A., Chen, J., (2015). Hydrologic and water quality models: Sensitivity. *Transactions of the ASABE*, 58(6):1721–1744.
[20] Van Hove, M., Delghust, M., Laverge, J., (2024). Quality assurance for building-stock energy models: A performance comparison of eleven uncertainty and sensitivity analysis methods. *Journal of Building Performance Simulation*, 17(2):149–175.
[21] Trung, N. T., (2026). Kiểm soát chất lượng không khí trong nhà giai đoạn đầu vận hành: Kinh nghiệm quốc tế và khuyến nghị cho Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 20(1V):69–81.
[22] Quốc hội, (2019). *Bộ luật Lao động số 45/2019/QH14*. Nhà xuất bản Chính trị quốc gia Sự thật, Hà Nội.
[23] Zissis, G., Bertoldi, P., (2023). *Update on status of solid-state lighting & smart lighting systems*. Luxembourg.
[24] Cheshire, D., (2012). *CIBSE Guide F: Energy efficiency in buildings*. 3rd edition, Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), London.
[25] ASHRAE, (2013). *ASHRAE handbook – fundamentals (SI edition)*. Atlanta.
[26] Fuertes, G., Schiavon, S., (2014). Plug load energy analysis: The role of plug loads in LEED certification and energy modeling. *Energy and Buildings*, 76:328–335.