

# Nghiên cứu các mô hình mô phỏng năng lượng: phân loại, ứng dụng kỹ thuật, xu hướng nghiên cứu và phát triển

Bùi Thị Hiếu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Kỹ thuật môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

## TỪ KHOÁ

Mô phỏng năng lượng công trình  
Tiêu thụ năng lượng  
Tối ưu thiết kế  
Tối ưu vận hành

## TÓM TẮT

Hiện nay tốc độ đô thị hóa ở Việt Nam ngày càng tăng đã kéo theo những áp lực liên quan đến nhu cầu sử dụng năng lượng trong lĩnh vực xây dựng. Tiêu thụ năng lượng trong các công trình dân dụng và công nghiệp chiếm tỉ trọng lớn trong tổng tiêu thụ năng lượng quốc gia. Tuy nhiên, cho đến nay nhiều công trình xây dựng tại Việt Nam vẫn chưa chú trọng đúng mức việc tích hợp tính hiệu quả sử dụng năng lượng vào các khâu thiết kế, xây dựng và vận hành công trình. Việc áp dụng các mô hình mô phỏng năng lượng trong các quy trình thiết kế, xây dựng và vận hành công trình có thể góp phần làm giảm đáng kể tổng mức tiêu thụ năng lượng và giảm thiểu phát thải khí nhà kính trong lĩnh vực xây dựng. Tuy nhiên, các nghiên cứu và áp dụng thực tế các mô hình mô phỏng năng lượng công trình trong các giai đoạn thiết kế và vận hành chưa được áp dụng phổ biến ở Việt Nam. Vì vậy, bài báo này đã tổng quan các nghiên cứu trên thế giới để cung cấp thông tin đầy đủ, chi tiết về các khái niệm, phân loại, ứng dụng kỹ thuật, xu hướng phát triển của mô hình, phần mềm mô phỏng năng lượng công trình trong lĩnh vực xây dựng. Nghiên cứu này là tài liệu tham khảo cho những nghiên cứu trong tương lai ở Việt Nam về ứng dụng mô phỏng năng lượng công trình ở các giai đoạn thiết kế và vận hành công trình nhằm đảm bảo tiết kiệm năng lượng, giảm thiểu phát thải cacbon mà vẫn duy trì tiện nghi môi trường.

## KEYWORDS

Building energy simulation  
Energy consumption  
Design optimization  
Operation optimization

## ABSTRACT

The rapid urbanization rate in Vietnam has increased the pressures related to energy demand used in the construction sector. Energy consumption in buildings and industries accounts for a significant portion of the total national energy consumption. However, many construction projects in Vietnam have not yet paid attention to the integration of effective energy utilization for the design, construction, and operation processes of buildings. Applying energy simulation models in the design, construction, and operation processes of buildings can contribute to reducing total energy consumption and minimizing greenhouse gas emissions in the construction sector. Research and practical application of building energy simulations in the design and operation stages in Vietnam have not been widely applied. Therefore, this article has reviewed research around the world to provide complete and detailed information about concepts, classification, technical applications, development trends of models, and building energy simulation software in the construction sector. This study is a reference for future research in Vietnam on the application of building energy simulation in the design and operation stages of buildings to ensure energy savings and carbon emission reduction while still maintaining environmental comfort.

## 1. Mở đầu

Mô hình năng lượng mô tả toàn bộ hoạt động vận hành thực tế của công trình bằng công cụ toán học và xác suất thống kê để dự báo các vấn đề liên quan tới chất lượng môi trường không khí, tiện nghi nhiệt, chiếu sáng tự nhiên, các hệ thống sử dụng điện năng như đèn chiếu sáng, thiết bị điện, hệ thống làm mát, sưởi ấm, chi phí vận hành công trình. Các công cụ mô phỏng năng lượng công trình được Cơ quan năng lượng Hoa Kỳ phát triển từ những năm 1960 [1]. Chính phủ Hoa Kỳ đã phát triển chương trình máy tính DOE-2 và BLAST để mô

phỏng năng lượng cho các công trình thương mại vào năm 1977. Bộ năng lượng Hoa Kỳ đã tài trợ cho phòng thí nghiệm Lawrence Berkeley, đơn vị dẫn đầu trong nỗ lực phát triển chương trình máy tính DOE-2 dựa trên thuật toán của ASHREA. Chương trình máy tính phân tích năng lượng công trình BLAST được phát triển bởi phòng thí nghiệm Nghiên cứu kỹ thuật Xây dựng Quân đội Hoa Kỳ. Energy Plus là chương trình mô phỏng hiệu suất tòa nhà kết hợp các tính năng từ BLAST và DOE-2, nhưng không có giao diện cho người sử dụng. Các công cụ mô phỏng năng lượng xây dựng sử dụng các mô hình toán học khác nhau để mô phỏng sự truyền nhiệt giữa lớp vỏ công trình và môi trường bên

\*Liên hệ tác giả: Hieubt@huce.edu.vn

Nhận ngày 05/02/2024, sửa xong ngày 20/03/2024, chấp nhận đăng ngày 22/03/2024

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2024.661>

ngoài và trong nhà. Người dùng lựa chọn công cụ mô phỏng năng lượng công trình để sử dụng và khả năng tiếp cận của mã nguồn. TRNSYS [2] được phát triển tại phòng thí nghiệm Năng lượng mặt trời của trường đại học Winconsin-Madison, là chương trình mô phỏng theo phương pháp động cho hệ thống phức tạp. IDA ICE [3] là một công cụ mô phỏng năng lượng toàn bộ công trình được phát triển bởi phòng kỹ sư dịch vụ xây dựng, Viện công nghệ hoàng gia ở Stockholm và Viện Toán ứng dụng của Thụy Điển. IDA ICE sử dụng ngôn ngữ lập trình độc lập để mô phỏng hệ thống động bằng các phương trình vi phân. Chương trình mô phỏng năng lượng công trình EnergyPlus là một công cụ đặc biệt được phát triển bởi Bộ Năng lượng Hoa kỳ dựa trên cấu trúc mô-đun với khả năng thêm các mô-đun mới vào chương trình. Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu ứng dụng mô hình mô phỏng năng lượng công trình trong các giai đoạn thiết kế, vận hành các hệ thống kỹ thuật trong công trình [4]–[8].

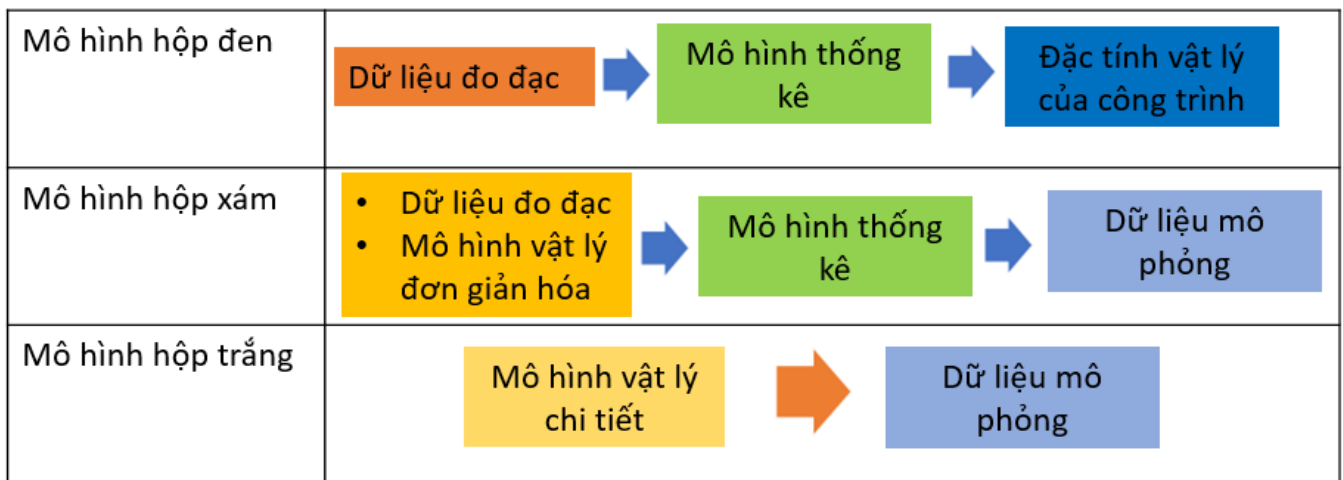
Ở Việt Nam, ngành xây dựng giữ một vai trò quan trọng trong cơ cấu nền kinh tế và có sự liên quan đến nhiều ngành, lĩnh vực khác. Tốc độ tăng trưởng ngành xây dựng nhanh chóng với tỷ lệ đô thị hóa cao (tính đến thời điểm cuối năm 2021 đạt khoảng 40,5%) đã kéo theo những áp lực liên quan đến sự gia tăng nhu cầu năng lượng sử dụng trong lĩnh vực xây dựng. Tiêu thụ năng lượng trong các công trình dân dụng và công nghiệp chiếm từ 37-40% tổng tiêu thụ năng lượng quốc gia [2, 3]. Tuy nhiên, cho đến nay nhiều công trình xây dựng tại Việt Nam vẫn chưa chú trọng đúng mức việc tích hợp tính hiệu quả sử dụng năng lượng vào các khâu thiết kế, xây dựng và vận hành công trình. Việc áp dụng các mô hình mô phỏng năng lượng trong các quy trình thiết kế, xây dựng và vận hành công trình có thể góp phần làm giảm tổng mức tiêu thụ năng lượng và giảm thiểu phát thải khí nhà kính trong lĩnh vực xây dựng. Tuy nhiên, ở Việt Nam hiện nay, khái niệm và ứng dụng về mô hình mô phỏng năng lượng chưa phổ biến trong lĩnh vực xây dựng. Vì vậy, bài báo này đã tổng quan các nghiên cứu trên thế giới để cung cấp thông tin đầy đủ, chi tiết về các khái niệm, phân

loại, ứng dụng kỹ thuật, xu hướng phát triển của mô hình, phần mềm mô phỏng năng lượng công trình trong lĩnh vực xây dựng. Bài báo này là tài liệu tham khảo cho những nghiên cứu về ứng dụng mô phỏng năng lượng công trình để vừa đảm bảo đảm bảo tiết kiệm năng lượng, giảm thiểu phát thải cacbon mà vẫn duy trì tiện nghi môi trường ở các giai đoạn khác nhau.

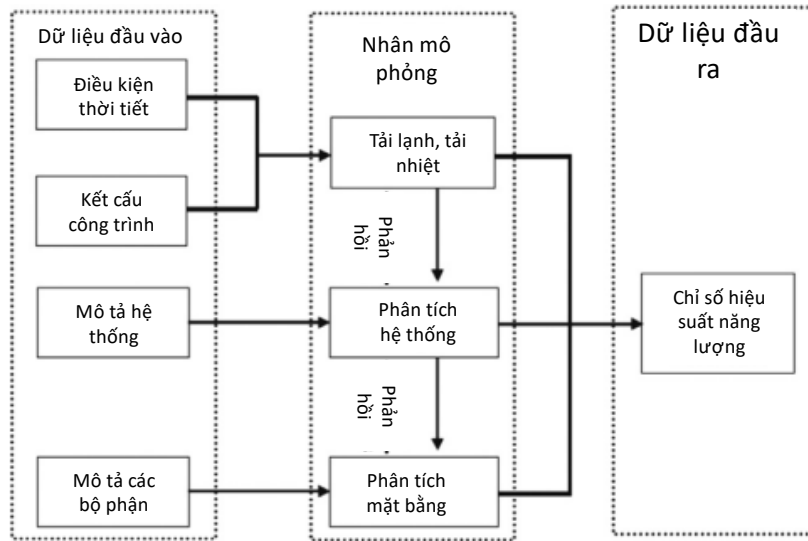
## 2. Phân loại các mô hình và phần mềm mô phỏng năng lượng công trình

### 2.1. Phân loại các mô hình mô phỏng năng lượng công trình

Mô hình mô phỏng năng lượng công trình được phân thành ba loại chính: mô hình hộp trắng, mô hình hộp xám và mô hình hộp đen [9]. Đặc điểm của các loại mô hình này được tóm tắt trong hình 1. Mô hình hộp trắng được thiết lập dựa trên tính chất vật lý của các bộ phận, các hệ thống phụ và toàn bộ hệ thống để mô phỏng toàn bộ công trình và các hệ thống phụ bao gồm thông tin về tiêu thụ năng lượng và tiện nghi bên trong công trình. Những phương trình toán học dựa trên các định luật về cân bằng năng lượng, cân bằng khối lượng và các thông số vật lý của công trình có khả năng phản ánh sự vận hành của các hệ thống trong công trình theo thời gian. Các dữ liệu và những thành phần chính để phát triển mô hình hộp trắng được tóm tắt trong hình 2. Những thông tin về điều kiện thời tiết, cấu trúc công trình, hệ thống của công trình và thiết bị được thu thập từ bản vẽ thiết kế, catalog của các hãng sản xuất và từ khảo sát hiện trường công trình. Nhân tính toán của các mô hình mô phỏng được nhóm thành các phương trình toán học mô phỏng hoạt động của tòa nhà và tính toán mức tiêu thụ năng lượng của tòa nhà. Có rất nhiều các phần mềm dựa trên mô hình hộp trắng đã được sử dụng rộng rãi để mô phỏng năng lượng và xác định phương án vận hành các hệ thống trong công trình như EnergyPlus [10], ESP-r [11], and TRNSYS [2].



Hình 1. Đặc tính của các mô hình hộp đen, hộp xám và hộp trắng.



Hình 2. Các thành phần chính của mô hình hộp trắng.

Mô hình hộp đen sử dụng phương trình toán học đơn giản hoặc các mô hình xác suất thống kê để thiết lập mối quan hệ giữa các tham số đầu vào về dữ liệu thời tiết và người sử dụng với số liệu đo đạc được. Các hệ số của mô hình được xác định sao cho chúng có thể xây dựng thuật toán để dự đoán đặc tính của hệ thống. Những hệ số này không thể hiện đặc tính vật lý của công trình. Mô hình hộp đen được sử dụng phổ biến để xác định chiến lược vận hành công trình nhằm giảm thiểu năng lượng sử dụng. Ma và cộng sự [12] đã áp dụng phương trình hồi quy tuyến tính để dự đoán năng lượng tiêu thụ hàng tháng của công trình. Sau đó, mô hình hồi quy tuyến tính này được sử dụng để xác định nhiệt độ tối ưu bên trong công trình và đảm bảo tiết kiệm năng lượng. Moon và Kim [13] đã ứng dụng phương pháp mạng lưới thần kinh nhân tạo để kiểm soát tiện nghi nhiệt bên trong công trình. Yokoyama và cộng sự [14] đề xuất phương pháp mạng lưới thần kinh lan truyền ngược để xác định tải lạnh yêu cầu của công trình. Năng lượng tiêu thụ, nhiệt độ và độ ẩm không khí được xác định dựa trên số liệu đo đạc hoặc ước tính từ kết quả mô phỏng của mô hình. Phương pháp này được sử dụng để đánh giá hiệu quả các chiến lược vận hành các hệ thống trong công trình. Mô hình hộp đen dễ xây dựng và tính toán. Tuy nhiên, cần có bộ dữ liệu đo đạc trong thời gian dài để đảm bảo độ chính xác của mô hình. Ngoài ra, độ chính xác của mô hình phụ thuộc nhiều vào các điều kiện vận hành thực tế của các hệ thống. Kết quả của mô hình có thể gặp vấn đề sai số lớn do dữ liệu đầu vào không bao phủ được phạm vi dự báo.

Khác với mô hình hộp đen, mô hình hộp xám có sử dụng mô tả vật lý đơn giản để mô phỏng đặc điểm tiêu thụ năng lượng của các hệ thống trong công trình. Sử dụng những mô hình vật lý đơn giản này sẽ giảm thiểu yêu cầu về độ dài dữ liệu đầu vào và thời gian hiệu chỉnh mô hình. Các hệ số của mô hình được xác định dựa trên dữ liệu hoạt động của công trình sử dụng các phương pháp xác suất thống kê. Mô hình có sự liên kết chặt chẽ với tính chất vật lý của công trình, hoạt động của các hệ thống và các thông số môi trường. Do đó, mô hình

cung cấp một nền tảng để đánh giá tác động của sự thay đổi các thông số vận hành của hệ thống, cung cấp thông tin hữu ích trong quá trình cải tạo, sửa chữa công trình.

## 2.2. Phân loại các phần mềm mô phỏng năng lượng

Có nhiều công cụ khác nhau để mô phỏng năng lượng công trình. Các công cụ này khác nhau về mức độ chi tiết của thông tin đầu vào, mức độ dễ sử dụng và thời gian cần thiết để hoàn thành mô phỏng. Các công cụ phần mềm có tính ứng dụng cao nhưng ít tính năng được xem là các công cụ cơ bản. Những công cụ này không yêu cầu cao về cấu hình máy tính hoặc các thông tin cụ thể liên quan đến công trình. Các công cụ phần mềm cơ bản trên nền tảng website như Design Advisor [15] và Green Building [16] là các phần mềm miễn phí và có tốc độ mô phỏng nhanh. Tuy nhiên, những phần mềm này chỉ mô phỏng một số khía cạnh thông tin. Mặt khác, những công cụ phức tạp hơn bao gồm TRNSYS [2], IDA ICE [3], Design builder được đặc trưng bởi yêu cầu thông tin chi tiết liên quan đến mô tả thiết bị, lịch trình vận hành, các dữ liệu khí hậu, tính đa dạng của kết quả đầu ra, khả năng xuất kết quả sử dụng ở các phần mềm khác. Kết quả của các mô hình này có độ chính xác cao hơn nhưng yêu cầu máy tính có cấu hình cao và người sử dụng cần phải có kiến thức nâng cao, và thời gian để chạy mô phỏng cũng kéo dài hơn. Các công cụ Mô hình thông tin tòa nhà, ví dụ Revit, gần đây đã kết hợp nhiều đặc tính với giao diện thân thiện, cho phép thực hiện những nghiên cứu mô phỏng năng lượng trong thời gian ngắn.

Các công cụ mô phỏng cơ bản cho phép người sử dụng xác định trước thể tích của từng không gian, lựa chọn những đặc tính chung. EQUEST [17] có khả năng hỗ trợ để đưa ra quyết định về tổng năng lượng sử dụng, dự báo nhiệt độ cao nhất, tính toán tải lạnh và tải nhiệt trong thời gian thiết kế. Phần mềm này được các chuyên gia trên thế giới sử dụng rộng rãi vì thời gian mô phỏng ngắn và miễn phí. Design advisor là phần mềm online được phát triển bởi Đại học MIT có khả

năng tính toán nhu cầu năng lượng của công trình. Ngoài ra, nó cho phép đánh giá nhanh chóng và trực quan thông tin về ánh sáng, thông gió, vòng đời của công trình mà không yêu cầu thông tin vật lý chi tiết của công trình. Quy trình mô hình hóa của mô hình này đơn giản. Ví dụ, người dùng có thể mô tả không gian trong công trình có dạng hình hộp chữ nhật và nhập các kích thước của công trình. Đối với cửa sổ, người dùng chỉ cần nhập phần trăm diện tích cửa sổ. Công cụ mô phỏng sẽ đưa ra những khoảng giá trị mặc định để người sử dụng lựa chọn. Do đó, thời gian phân tích mô phỏng nhanh chóng và trực quan. Tuy nhiên, người dùng chỉ có thể lựa chọn dữ liệu thời tiết ở một số các thành phố trên thế giới. Khác với các công cụ mô phỏng cơ bản khác, Design advisor cho phép người dùng nhập giá trị hệ số truyền nhiệt của các kết cấu bao che thay vì sử dụng cơ sở dữ liệu làm các công cụ phần mềm thường có. Các phần mềm này có giao diện thân thiện cho phép người dùng ước tính sự phân bố của ánh sáng tự nhiên, mức độ thông gió tự nhiên. Ưu điểm của phần mềm này là giao diện thân thiện và khả năng mô phỏng dựa vào các kịch bản khác nhau của mô hình bằng cách nhập các giá trị của vật liệu. Các kết quả này được trình bày rõ ràng dưới dạng đồ họa hoặc văn bản. Ngoài ra, người dùng có thể chạy tối đa bốn mô phỏng và xem xét tất cả các chi tiết về hiệu suất của các kịch bản. Vì vậy, Design Advisor trở thành phần mềm hữu ích cho các giai đoạn thiết kế cơ sở.

Các công cụ mô phỏng nâng cao có thể nhập mặt bằng, hoặc sơ đồ hình học từ các chương trình thiết kế khác hoặc sử dụng phần mềm thiết lập mô hình miễn phí. Tuy nhiên, thông tin nhập vào cần được sửa đổi hoặc bổ sung bằng cách phân chia các khu vực, xây dựng các vách ngăn che bên trong công trình. Các công cụ mô phỏng năng lượng khác nhau yêu cầu mức độ chi tiết khác nhau về công trình. TRNSYS có khả năng triển khai mô hình toán học mới sử dụng ngôn ngữ lập trình như FORTRAN, C++ . Tính năng này cho phép TRNSYS tích hợp và cập nhật những công nghệ đột phá trong mô hình. Tuy nhiên, do sự phức tạp của mô hình, TRNSYS không được khuyến cáo sử dụng trong giai đoạn đầu để mô phỏng bước đầu năng lượng của toàn công trình. IDA ICE được lựa chọn cho những mục đích mô phỏng chung do khả năng nhập các file thông tin từ BIM. Một số phần mềm phát triển giao diện cho người dùng sử dụng nhân tính toán Energy plus bao gồm Design builder [18], BuildSimHub [19]. Các phần mềm như Open studio [20] cũng được phát triển dựa trên nhân tính toán EnergyPlus.

Design builder và IDA ICE được khuyến cáo sử dụng để mô phỏng năng lượng công trình cho mục đích đặc biệt. Design builder có khả năng tính toán năng lượng tiêu thụ của một công trình, đánh giá các phương án thiết kế bề mặt ngoài của công trình dựa vào các thông tin về tính chất vật liệu và phương án thông gió tự nhiên. Ngoài ra, phần mềm này có thể ước tính ảnh hưởng của sự phân bố không khí trong phòng tới sự phân bố nhiệt độ và vận tốc chuyển động không khí nhờ sử dụng phương pháp tính toán động lực học chất lỏng (CFD). Phần mềm này cung cấp giao diện trực quan, tuy nhiên, quá trình nhập dữ liệu khá phức tạp. Phần mềm đưa ra kết quả với nhiều số liệu có thể được lựa chọn theo mong muốn của người dùng dưới dạng biểu đồ trực quan nên người dùng có thể phân tích kết quả dễ dàng. Ngoài ra,

phần mềm còn cung cấp thông tin không chỉ liên quan đến thông gió mà còn cung cấp tất cả các kết quả tính toán của mô hình, từ đó cung cấp cho người dùng thông tin cụ thể về đặc tính công trình. Design builder có hạn chế liên quan đến nhập thông tin hình học phức tạp của công trình. Nó sử dụng nhân tính toán Energy Plus để cung cấp phân tích chi tiết về các hệ thống sưởi ấm và làm mát của công trình. Thông gió tự nhiên được xem xét với chế độ hoạt động ban đêm trong chiến lược tiết kiệm năng lượng. Tương tự như vậy, phương án chiếu sáng tự nhiên và các mô hình điều khiển chiếu sáng sẽ tính toán mức độ tiết kiệm năng lượng. Phần mềm còn xem xét ảnh hưởng của bóng râm, các kết cấu che nắng và rèm cửa đến chiếu sáng tự nhiên bên trong công trình. Kết quả được chia thành năng lượng tiêu thụ sử dụng các nhiên liệu khác nhau, mục đích sử dụng cuối cùng và hiển thị dữ liệu thời tiết và nhiệt độ bên trong nhà. Người dùng có thể phân tích tải nhiệt, tải lạnh, rò gió, thông gió, sự tích tụ nồng độ CO<sub>2</sub>. Giao diện trực quan giúp người dùng phân tích ảnh hưởng của việc thay đổi các tham số thiết kế đến chỉ số tiêu thụ năng lượng. IDA ICE là phần mềm để mô phỏng năng lượng tiêu thụ của tòa nhà, mô phỏng chất lượng không khí, và tiện nghi công trình. Nó bao gồm mô hình tính toán truyền nhiệt, CO<sub>2</sub> và ẩm thừa, biến thiên nhiệt độ trong phòng. Mô hình có khả năng cung cấp thông tin ở tất cả các giai đoạn thiết kế của công trình. Mô hình này mô phỏng nhiệt động, đánh giá ánh sáng tự nhiên và nhân tạo, tính toán tải nhiệt, tải lạnh và mô phỏng hệ thống dựa trên các thành phần. IDA ICE cũng cung cấp dữ liệu để nghiên cứu điều kiện vi khí hậu bên trong công trình và năng lượng tiêu thụ của toàn bộ công trình. Giao diện phần mềm được thiết kế phù hợp với mục đích mô phỏng đơn giản và nâng cao. Hơn nữa, phần mềm cho phép nhập các dữ liệu bản vẽ từ mô hình thông tin công trình (BIM). IDA ICE có thể được sử dụng cho những nghiên cứu mô phỏng năng lượng hoàn chỉnh bao gồm kết cấu bao che của công trình, hệ thống, mặt bằng và phương án điều khiển hệ thống. BIM cho phép mô phỏng công trình 3D để người dùng có thể sử dụng thông tin cho những mục đích khác bao gồm dự báo năng lượng tiêu thụ. BIM biểu thị công trình dưới dạng dữ liệu bao gồm các thông tin về giải pháp kiến trúc mang lại hiệu quả thẩm mỹ và tính chất cách nhiệt của công trình. BIM đơn giản hóa việc phân tích nhiệt động để giảm năng lượng tiêu thụ và phân tích các lựa chọn năng lượng tái tạo. Công cụ BIM còn có thể phân tích hình thức công trình, tối ưu hóa lớp vỏ, phân tích chiếu sáng tự nhiên và tích hợp sử dụng năng lượng tái tạo.

Kết quả đầu ra của mô hình mô phỏng năng lượng công trình bao gồm nhu cầu năng lượng trong các khoảng thời gian khác nhau (hàng năm, theo mùa hoặc theo ngày) phụ thuộc vào điều kiện tiện nghi. Lượng khí thải CO<sub>2</sub>, năng lượng dòng, bức xạ mặt trời, ánh sáng tự nhiên, lượng nước tiêu thụ, lượng nhiệt thu do bức xạ mặt trời qua cửa sổ vào các thời điểm khác nhau trong ngày hoặc trong năm cũng là những kết quả có giá trị. Tính năng dễ sử dụng của công cụ ảnh hưởng tới sự lựa chọn công cụ nhiều hơn là độ chính xác của kết quả. Bốn khía cạnh đã được xem xét để đánh giá các công cụ mô phỏng năng lượng trong công trình đã được nêu trong các công trình nghiên cứu khoa học bao gồm: giao diện đồ họa và khả năng chương trình có thể

kê khai chi tiết vật liệu sử dụng; khả năng tạo các thư viện dữ liệu tùy chỉnh và khả năng xuất ra file dữ liệu để sử dụng trong các phần mềm khác; khả năng kết hợp dữ liệu khí hậu, sự hỗ trợ của phần mềm trong quá trình lập mô hình và nhập dữ liệu, xuất chi tiết kết quả đầu ra, chi tiết về định dạng và đồ họa. Các công cụ mô phỏng hoặc phân tích năng lượng bao gồm một giao diện với nhiều tính năng khác nhau để tính toán hiệu suất nhiệt của các tòa nhà và biểu thị kết quả trực quan. Dữ liệu đầu vào là điều kiện khí hậu của địa phương, hình dáng kết cấu bao che và vật liệu lớp vỏ công trình, các khoảng trống và không gian xung quanh, thiết bị và thông tin người sử dụng công trình. Dựa trên các thông tin này, các mô hình toán học được thiết lập để xác định các điều kiện bên trong công trình bao gồm nhiệt độ, độ ẩm, chất lượng không khí và nhu cầu năng lượng theo thời gian. Ngoài ra, đặc điểm của bức xạ mặt trời, chiếu sáng tự nhiên, dẫn nhiệt, lưu thông không khí, vòng đời sử dụng của vật liệu, chứng nhận môi trường cũng được biểu thị trực quan bằng phương pháp đồ họa hoặc số hóa, có thể xuất sang các công cụ phần mềm khác. Những nghiên cứu này cho thấy sự tương đồng giữa hệ thống và nêu bật sự khác biệt cơ bản trong giao diện người dùng và mối quan hệ với công cụ phần mềm khác. Các công cụ có sự tương đồng về hệ thống và nêu bật những khác biệt cơ bản trong giao diện người dùng, sự kết nối với những công cụ phần mềm khác. Cùng mô phỏng năng lượng cho một công trình cụ thể, nhưng kết quả của các mô hình khác nhau có thể khác nhau đến 30% [21]. Đánh giá độ chính xác của kết quả mô phỏng từ các phần mềm thường tập trung vào các yếu tố nội tại của công trình mà chưa kể đến các yếu tố triển khai, bao gồm chi phí lắp đặt, đầu tư, tập huấn người vận hành. Độ chính xác của phần mềm sẽ được xác định sử dụng các thông số liên quan đến tính toán dẫn nhiệt, sự khác biệt về truyền nhiệt đối lưu và các vấn đề sai số do dữ liệu đầu vào.

### 3. Tầm quan trọng và ứng dụng của các mô hình mô phỏng năng lượng công trình

#### 3.1. Ứng dụng mô hình mô phỏng năng lượng công trình để tối ưu hóa thiết kế

Quy trình thiết kế phổ thông được sử dụng phổ biến hiện nay tại Việt Nam dẫn đến nhiều vấn đề liên quan tới tiêu thụ năng lượng và tính bền vững của công trình. Kiến trúc sư đưa ra những phương án thiết kế độc lập khi phác thảo mặt bằng, phối cảnh và phát triển thiết kế cơ sở để xin giấy phép xây dựng. Sau đó, dựa trên nền tảng thiết kế cơ sở, kỹ sư sẽ thực hiện thiết kế hệ các hệ thống kỹ thuật ở giai đoạn sau của dự án. Điều này dẫn tới những xung đột hoặc những lỗi khó khắc phục kéo theo vấn đề tăng chi phí và thời gian thiết kế. Kỹ sư chỉ tham gia thiết kế ở giai đoạn sau của dự án, trên nền tảng thiết kế đã được quyết định một cách cảm tính của kiến trúc sư, điều này dễ gây ra những xung đột hay lỗi khó khắc phục, thường xảy ra nhất đối với năng lượng và tính bền vững môi trường. Việc xử lý lỗi thường mang tính khắc phục và dễ gây tăng chi phí, kéo dài thời gian thiết kế. Do đó, quy trình thiết kế tích hợp được sử dụng để khắc phục những nhược điểm của quy trình thiết kế phổ thông. Mặc dù quy trình áp dụng thiết kế tích hợp và mô phỏng năng

lượng tại Việt Nam chưa được áp dụng phổ biến, nhưng nó mang lại hiệu quả ở các giai đoạn thiết kế khác nhau và phù hợp với nhiều mô hình công ty kiến trúc khác nhau. Mô hình mô phỏng năng lượng công trình đã được áp dụng để đề xuất các giải pháp kiến trúc để tối ưu hóa nhu cầu sử dụng năng lượng của một số công trình như công trình Ủy ban chứng khoán quốc gia, dự án The Villa Hội An, công trình Capital Palace tại Hồ Chí Minh, tòa nhà Handico Hà Nội. Khác biệt với quy trình thiết kế phổ thông, mô phỏng năng lượng công trình được tích hợp trong các giai đoạn thiết kế với sự hợp tác chặt chẽ giữa kiến trúc sư và kỹ sư. Các mô hình mô phỏng năng lượng công trình đóng vai trò công cụ then chốt nhằm cung cấp, dự báo trước các số liệu vận hành, chi phí công trình cho đội thiết kế. Trong quy trình thiết kế tích hợp, các giải pháp thiết kế được đề xuất để tối ưu hiệu quả của công trình [22]. Các giải pháp thiết kế hướng tới hiệu quả công trình này dung hòa các phương pháp tiếp cận định tính và định lượng để đáp ứng yêu cầu liên quan đến hoạt động của công trình. Các giải pháp thiết kế hướng tới tối ưu hiệu quả công trình bao gồm 3 giai đoạn: giai đoạn thiết kế cơ sở bao gồm lựa chọn thông số công trình và lựa chọn hệ thống; giai đoạn xây dựng mô phỏng mô hình và mô phỏng hiệu quả công trình ở các khía cạnh khác nhau (phân tích năng lượng, phân tích môi trường sống); giai đoạn tối ưu hóa sử dụng các hàm đa mục tiêu để nâng cao hiệu quả hoạt động của công trình.

Trong giai đoạn thiết kế cơ sở, việc thiết lập tham số và phát triển mô hình thường dựa trên nguyên mẫu hoặc mẫu điển hình hoặc dựa trên số liệu đo đạc. Loche và cộng sự [23] đã phát triển nghiên cứu tham số cho mô hình văn phòng điển hình ở chế độ hỗn hợp đại diện cho kịch bản cơ sở. Các kết quả thu được cho thấy sử dụng ban công với kích thước hợp lý có thể mang lại hiệu quả bóng râm và khuếch tán ánh sáng. Các công cụ mô phỏng năng lượng còn hỗ trợ quá trình đưa ra quyết định thiết kế ở giai đoạn thiết kế cơ sở. Gercek và Durmus [24] đánh giá tác động của biến đổi khí hậu tới năng lượng tiêu thụ của công trình và những đặc tính môi trường, tổng hợp mối liên hệ giữa năng lượng công trình và tiêu chí hoạt động môi trường với các thông số thiết kế cho công trình nhà ở tại Thổ Nhĩ Kỳ. Dựa trên số liệu thu thập từ dự án bệnh viện đa khoa, Yao và cộng sự [25] đã thực hiện nghiên cứu đánh giá hiện trường về chất lượng môi trường không khí bên trong các bệnh viện, thiết lập mô hình hình học dựa vào số liệu đánh giá. Họ áp dụng mô hình CFD để thực hiện mô phỏng và đánh giá hiệu quả của các phương án thông gió.

Các mô hình mô phỏng năng lượng công trình được áp dụng để đánh giá hiệu suất năng lượng và chất lượng môi trường. Áp dụng các mô hình để mô phỏng năng lượng của hệ thống làm mát và sưởi ấm công trình ước tính tải lạnh, tải nhiệt và dự báo năng lượng tiêu thụ góp phần sử dụng tiết kiệm năng lượng và giảm thiểu phát thải trong lĩnh vực xây dựng. Ngoài hiệu quả sử dụng năng lượng của công trình, cần đảm bảo chất lượng môi trường sống để không gây ảnh hưởng tới sức khỏe và tiện nghi sống của con người. Bảng 1 thống kê các nghiên cứu đã sử dụng những công cụ khác nhau để mô phỏng hiệu quả về năng lượng và tiện nghi môi trường. Đối với hệ thống thông gió và tiện nghi nhiệt môi trường bên trong công trình, phương pháp mô hình hóa dựa trên cơ sở lý thuyết vật lý được phân thành 3 loại: Phương pháp



động lực học chất lỏng (CFD), Phương pháp vùng và phương pháp đa vùng. Phương pháp tính toán động lực học chất lỏng CFD có thể giải quyết các vấn đề phân bố không khí phức tạp và hình dung các kết quả định lượng bằng cách tích hợp cơ học chất lỏng, nhiệt động lực học, phân tích số và khoa học máy tính. Để đơn giản hóa trong tính toán, phương pháp đa vùng được lựa chọn để mô phỏng chiều hướng chuyển động của luồng không khí và phân phối chất ô nhiễm trong không gian.

Nó giả định sự phân phối không khí không đồng đều trong mỗi vùng được biểu thị đơn giản bằng một nút và tạo thành một trường không khí bao gồm cửa ra vào, cửa sổ và các lỗ mở thông gió khác. Tương tự như phương pháp đa vùng, phương pháp vùng chia không gian thành nhiều vùng nhỏ và thiết lập phương trình bảo toàn khối lượng và năng lượng để ước tính sự phân bố không khí.

**Bảng 1.** Các nghiên cứu đã sử dụng những công cụ khác nhau để mô phỏng hiệu quả về năng lượng và tiện nghi môi trường.

Loại công trình	Công cụ mô phỏng	Ứng dụng			Nguồn
		Năng lượng	Tiện nghi môi trường		
			Nhiệt	Ánh sáng	
Nhà ở	DesignBuilder; Energy Plus	x		x	[24]
Bệnh viện	CFD			x	[25]
Văn phòng	TRNSYS, IBE-e	x			[4]
Cơ sở giáo dục	DesignBuilder; eQUEST; EnergyPlus				[5]
Văn phòng và cơ sở giáo dục	Energyplus	x	x		[6]
Văn phòng	Grasshopper; Honeybee			x	

Trong giai đoạn thiết kế, nhiều yếu tố về hoạt động của công trình được xem xét và có thể chia thành hai nhóm: 1) Nhóm về hiệu quả năng lượng bao gồm cường độ sử dụng năng lượng, sưởi ấm, làm mát; 2) Nhóm 2 về hiệu quả môi trường bao gồm chiếu sáng, cách âm, thông gió, tiện nghi nhiệt. Hiện tại, các mô hình tập trung mô phỏng năng lượng và phân tích môi trường, tiện nghi sống. Nocera và cộng sự [4] tập trung đánh giá điều kiện chiếu sáng hiện tại của công trình di tích lịch sử để xác định phương án cải tạo phù hợp cho giải pháp chiếu sáng ban ngày. Cách tiếp cận được sử dụng để đánh giá các giải pháp chiếu sáng sẵn có trong một phòng học đại diện trong công trình di tích lịch sử tại Syracuse (Italy). Tam và cộng sự [5] tiến hành đo đặc nhiệt độ không khí, nồng độ CO<sub>2</sub> trong các giảng đường tại Toronto. Nghiên cứu này đã sử dụng mô phỏng hoạt động công trình để đánh giá nguyên nhân gây mất tiện nghi nhiệt của phòng học và xác định phương pháp phù hợp để điều tiết nhiệt độ và nồng độ khí CO<sub>2</sub> trong phòng.

Thiết lập các mục tiêu để đạt được giải pháp thiết kế công trình tối ưu là một quá trình thiết kế quan trọng hướng tới xây dựng các công trình sử dụng năng lượng hiệu quả. Futrell và cộng sự [7] đã nghiên cứu tối ưu hóa thiết kế lớp vỏ công trình để đề xuất một giải pháp hiệu quả sử dụng phương pháp đường cong Pareto để tối ưu hóa hiệu suất chiếu sáng và hiệu suất sưởi ấm của công trình. Garcia Kerdan [6] nghiên cứu công cụ tối ưu hóa đa mục tiêu để đánh giá ảnh hưởng của các giải pháp cải tạo công trình khác nhau nhằm mục đích giảm thiểu năng lượng tiêu thụ mà vẫn duy trì cảm giác tiện nghi nhiệt. Lu và cộng sự [26] đã nghiên cứu phương pháp cải thiện hiệu quả chiếu sáng ban ngày của các công trình văn phòng sử dụng các kết cấu có bề mặt cong đặt bên ngoài công trình. Kết quả thu được từ các công trình văn phòng điển hình cho thấy sử dụng các kết cấu có bề mặt cong ở bên ngoài công trình có khả năng cải thiện rõ rệt hiệu quả chiếu sáng

ban ngày. Thông qua công cụ mô hình, mô phỏng, tối ưu hóa, thiết kế công trình sử dụng năng lượng hiệu quả hỗ trợ, tạo điều kiện phát triển các giải pháp thiết kế công trình thỏa mãn yêu cầu về tiết kiệm năng lượng. Hiện tại, hiệu quả công trình tập trung vào cải thiện chất lượng không khí, tiện nghi nhiệt và hiệu quả năng lượng. Các nghiên cứu đã chứng minh thiết kế hướng tới hiệu quả công trình cải thiện chất lượng môi trường trong nhà, nhấn mạnh tầm quan trọng của quy trình thiết kế này đến việc hoàn thành mục tiêu liên quan đến hiệu quả công trình. Do đó, người thiết kế có thể tối ưu hóa hiệu quả xây dựng trong các giai đoạn thiết kế. Thiết kế dựa trên hiệu quả công trình dựa trên một số các tham số thiết kế bao gồm tỉ số tường và cửa sổ, hệ số truyền nhiệt của kết cấu... có ảnh hưởng trực tiếp tới ánh sáng, thông gió, tiện nghi nhiệt, và tích hợp các biến số hoạt động có thể đưa ra những phương án thiết kế khác nhau. Ngoài ra, do quá trình thiết kế công trình rất phức tạp do cần xem xét nhiều yếu tố, thiết kế dựa trên hiệu quả công trình sẽ hỗ trợ kết hợp đặc tính của hệ thống trong quá trình thiết kế và tăng cường hiệu quả, kéo theo sự phát triển bền vững của công trình. Quy trình thiết kế này sử dụng công cụ máy tính tự động cho phép đánh giá nhiều giải pháp thiết kế khác nhau.

**3.2. Ứng dụng mô hình mô phỏng năng lượng công trình để tối ưu hóa vận hành các hệ thống trong công trình**

Quy trình áp dụng mô phỏng năng lượng công trình để tối ưu hóa hoạt động vận hành bao gồm các bước: 1) Thu thập dữ liệu; 2) Tiền xử lý dữ liệu đầu vào và phân tích; 3) Thực hiện mô phỏng và tối ưu hóa sử dụng các hàm mục tiêu. Đầu tiên, dữ liệu vận hành và dữ liệu hình học của công trình được thu thập từ hệ thống quản lý năng lượng tòa nhà, mô hình thông tin tòa nhà (BIM). Tiếp theo là quá trình tiền

xử lý và phân tích dữ liệu được tiến hành để xác định chế độ vận hành các hệ thống của tòa nhà. Sau đó, tòa nhà và các hệ thống điều hòa thông gió được mô phỏng để xác nhận hiệu quả của các chiến lược sử dụng tối ưu năng lượng. Các hàm mục tiêu nhằm giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng của hệ thống và tối ưu hóa điều kiện tiện nghi trong công trình. Lịch trình vận hành các thiết bị làm mát, máy bơm, tháp giải nhiệt sẽ được xác định.

### 3.2.1. Thu thập và phân tích dữ liệu

Độ chính xác của kết quả mô phỏng phụ thuộc vào độ tin cậy và chất lượng của dữ liệu đầu vào. Dữ liệu thu thập bao gồm nhiệt độ, độ ẩm, lưu lượng, cột áp, công suất thiết bị, trạng thái hoạt động hoặc không hoạt động. Ngoài ra, dữ liệu về nhiệt độ không khí ngoài trời, độ ẩm cũng được thu thập để xác định ảnh hưởng của điều kiện thời tiết. Dữ liệu này được sử dụng để xác định đặc điểm vận hành của các hệ thống trong công trình. Trong những năm gần đây, việc thu thập dữ liệu về người sử dụng công trình trở thành vấn đề cấp thiết vì thói quen sử dụng của con người sẽ ảnh hưởng trực tiếp hoặc gián tiếp tới sự vận hành của công trình. Các cảm biến dùng để thu thập dữ liệu người dùng có thể thu thập từ điện thoại thông minh của người sử dụng hoặc hệ thống nhận diện người dùng dựa trên hệ thống camera. Ngoài các dữ liệu vận hành các hệ thống kỹ thuật trong công trình, các dữ liệu khác bao gồm dữ liệu cần thiết để mô phỏng hoặc kiểm định mô hình bao gồm tham số về lớp vỏ công trình (hệ số truyền nhiệt của tường, cửa sổ, ...). Những dữ liệu này để mô tả đặc điểm công trình và là cơ sở để lựa chọn các giải pháp thiết kế chủ động bao gồm bơm nhiệt, công nghệ thu hồi nhiệt. Để tìm hiểu đặc điểm hoạt động của hệ thống HVAC và tác động của chúng đến hiệu quả sử dụng năng lượng công trình, các kỹ thuật khai thác dữ liệu được nên được sử dụng để phát triển các mô hình dựa trên dữ liệu phản ánh sự tương tác giữa hiệu quả hoạt động của công trình và sự thay đổi của các tham số hoạt động của các hệ thống trong công trình.

### 3.2.2. Phương pháp mô hình hóa

Một mô hình năng lượng công trình chi tiết để mô phỏng toàn bộ hoạt động của công trình cần phải xem xét các đặc điểm xây dựng và các đặc tính khác nhau của công trình bao gồm các nguồn tỏa nhiệt bên trong và các thông số kỹ thuật của công trình. Các mô hình EnergyPlus [10], TRNSYS [2], DEST [27] và Modelica [28] được sử dụng rộng rãi do được thiết lập bởi các modul linh hoạt, tính toán từng bước nên người dùng dễ sử dụng. Độ chính xác của các mô hình phụ thuộc vào trình độ người sử dụng khi nhập các thông số đầu vào. Để kết quả hiệu chỉnh mô hình đạt kết quả tốt, các tham số của mô hình cần mô tả được đặc tính vật lý của hệ thống. Nói chung, số liệu đo đạc và dữ liệu thời tiết được sử dụng để kiểm định và hiệu chỉnh mô hình. Huang và cộng sự [29] đã thay đổi các hệ số của đường cong đặc tính chiller, nhiệt độ nước của chiller để giảm thiểu sự chênh lệch giữa công suất đo đạc và

công suất mô phỏng sử dụng nhiệt độ thực tế của nước ở bình ngưng tụ và nhiệt độ nước lạnh đi vào chiller.

Liên quan đến các công nghệ sử dụng trong thuật toán tối ưu, thuật toán di truyền (GA) được sử dụng phổ biến. Sau đó, phương pháp mạng lưới thần kinh nhân tạo được sử dụng để thay thế cho thuật toán di truyền trong phần mềm Energy plus để quá trình tính toán tối ưu hóa nhanh hơn. Gomez-Romero và cộng sự [30] đã phát triển mô hình hộp xám để tối ưu hóa vận hành của hệ thống HVAC đối với các công trình phi nhà ở. Souayfane và cộng sự [31] đã sử dụng công nghệ phân cụm thời tiết kết hợp với mô hình TRNSYS để xác định hoạt động làm mát tối ưu cho tòa nhà văn phòng trong một khu vực được điều hòa bằng công nghệ bơm nhiệt.

### 3.2.3. Phương pháp tối ưu hóa vận hành

Điều khiển hệ thống HVAC liên quan tới trạng thái tắt, bật và thông số nhiệt độ duy trì trong phòng (liên quan tới lưu lượng cấp vào phòng của hệ thống Điều hòa thông gió để duy trì nhiệt độ trong phòng) nhằm mục đích tối ưu hóa năng lượng sử dụng và chi phí vận hành của toàn bộ hệ thống khi duy trì điều kiện tiện nghi nhiệt. Garnier và cộng sự [8] nghiên cứu 5 phương án để tối ưu hóa vận hành của hệ thống Điều hòa không khí trong công trình phi nhà ở tại Perpignan (pháp) bao gồm 4 thông số cơ bản sử dụng phần mềm EnergyPlus và phương án tiền sưởi ấm, tiền làm mát trước giờ cao điểm. Papadopoulos và cộng sự [32] thay đổi giá trị nhiệt độ phòng sử dụng các hàm đa mục tiêu đối với tòa nhà văn phòng quy mô lớn điển hình ở 7 vùng khí hậu của Mỹ. Về mặt sử dụng thiết bị, Fan và cộng sự [33] nghiên cứu các giải pháp cục bộ bao gồm điều khiển tốc độ, sử dụng các van tiết lưu và van bypass. Chiến lược điều khiển tối ưu được nghiên cứu, bao gồm các giải pháp điều chỉnh công suất lạnh, đặt nhiệt độ nước lạnh cấp từ thiết bị sản xuất nước lạnh chiller. Chiến lược điều chỉnh có giám sát bao gồm trình tự điều chỉnh chế độ làm mát, thiết lập nhiệt độ nước làm lạnh từ chiller, điều chỉnh áp suất trong vòng tuần hoàn nước lạnh của chiller cũng được nghiên cứu.

## 4. Triền vọng, thách thức và xu hướng nghiên cứu, phát triển các mô hình mô phỏng năng lượng công trình trong tương lai

Mô phỏng để tối ưu hóa hiệu suất hoạt động các hệ thống điều hòa, thông gió là một bước quan trọng để đảm bảo tiết kiệm năng lượng, giảm thiểu phát thải cacbon mà vẫn đảm bảo tiện nghi nhiệt trong quá trình vận hành. Nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng hiệu quả của mô hình mô phỏng cần được cải thiện hơn nữa để tối ưu hóa mô phỏng tòa nhà từ hai khía cạnh: tốc độ tính toán mô phỏng và độ chính xác của kết quả mô phỏng. Tốc độ mô phỏng cần phải đáp ứng yêu cầu trong ứng dụng kỹ thuật. Thời gian cần thiết để mô phỏng cần phải ít hơn thời gian thực để điều khiển hệ thống. Trong nhiều kịch bản ứng dụng, yêu cầu thời gian tối đa thực hiện mô phỏng là 10 phút. Thời gian cho phép để thực hiện mô phỏng thậm chí còn ít hơn vì còn phải kể đến thời gian tính toán, phân tích phương án tối ưu. Tuy nhiên, mô

hình không nên đơn giản quá để giảm thiểu thời gian mô phỏng mà vẫn cần đảm bảo độ chính xác của kết quả mô phỏng. Độ chính xác của mô hình so với số liệu đo đạc thực tế sẽ ảnh hưởng lớn tới mô hình điều khiển dự đoán. Vì vậy, chủ đề cân bằng giữa thời gian mô phỏng và mức độ chi tiết của mô hình để đảm bảo độ chính xác của kết quả mô phỏng là vấn đề được quan tâm hiện nay.

Số liệu đo đạc kỹ thuật số là kết quả tất yếu của sự phát triển mô hình thông tin công trình để tích hợp tính chất vật lý của công trình và dữ liệu kỹ thuật số. Chi phí của giải pháp số liệu đo đạc kỹ thuật số là vấn đề trở ngại khiến cho phương pháp này chưa được sử dụng phổ biến. Ngoài ra, cần phải đảm bảo tính toàn vẹn và chính xác của dữ liệu để tích hợp các dữ liệu này trong mô phỏng năng lượng công trình. Để có bộ dữ liệu kỹ thuật số đầy đủ và chính xác, cần phải lắp đặt một lượng lớn các cảm biến chất lượng cao trong suốt vòng đời của công trình kéo theo một gánh nặng lớn về mặt kinh phí. Chi phí vận hành, bảo dưỡng các cảm biến này cũng rất tốn kém. Vì vậy, hướng phát triển trong tương lai là giảm thiểu chi phí của các cảm biến này và cải tiến độ chính xác của các cảm biến này. Độ chính xác của kết quả mô phỏng và thời gian mô phỏng để đưa ra quyết định vận hành cũng là một khía cạnh được quan tâm của phương pháp mô phỏng tích hợp với dữ liệu kỹ thuật số. Các phương pháp mô phỏng hiện tại tập trung vào dữ liệu vận hành trong quá khứ mà chưa sử dụng dữ liệu vận hành ở thời gian thực đã sử dụng nhiều thời gian để đưa ra kết quả mô phỏng. Độ trễ thời gian do dữ liệu, do quá trình tính toán kéo theo sự khác biệt giữa kết quả mô phỏng và điều kiện của công trình ở thời gian thực. Vì vậy cần phát triển các mô hình dự đoán nhanh và trực tuyến để đảm bảo kết quả chính xác và khả năng mô tả sự thay đổi các tham số vật lý theo thời gian thực.

## 5. Kết luận

Từ kết quả tổng quan các nghiên cứu trên thế giới, bài báo này đã cung cấp thông tin đầy đủ, chi tiết về các khái niệm, phân loại, ứng dụng kỹ thuật, xu hướng phát triển của mô hình, phần mềm mô phỏng năng lượng công trình trong lĩnh vực xây dựng. Các nghiên cứu và áp dụng thực tế các mô phỏng năng lượng công trình trong các giai đoạn thiết kế và vận hành tại Việt Nam chưa được áp dụng phổ biến. Do đó, nghiên cứu này là tài liệu tham khảo cho những nghiên cứu trong tương lai ở Việt Nam về ứng dụng mô phỏng năng lượng công trình ở các giai đoạn thiết kế và vận hành công trình. Mô hình mô phỏng năng lượng cung cấp thông tin về mức tiêu thụ năng lượng của công trình đối với những giải pháp kiến trúc và kỹ thuật khác nhau để đề xuất phương án tối ưu năng lượng sử dụng trong giai đoạn vận hành. Mô phỏng năng lượng công trình hỗ trợ kiến trúc sư và kỹ sư đề xuất nhóm giải pháp về vật liệu và thiết bị kỹ thuật cho công trình, cân đối về yếu tố tài chính, kỹ thuật và thẩm mỹ, thậm chí giảm chi phí đầu tư ban đầu, chi phí vận hành công trình do tìm được giải pháp phù hợp với các yêu cầu của dự án. Kết quả mô phỏng năng lượng có thể giúp tăng hiệu quả sử dụng năng lượng của công trình, giảm chi phí vật liệu và thiết bị, nhưng vẫn đảm bảo được yếu tố độ bền vững, thẩm mỹ và công năng sử dụng. Việc áp dụng mô phỏng

năng lượng công trình có thể ứng dụng vào các loại hình dự án khác nhau cũng như tất cả các giai đoạn trong quá trình thiết kế và vận hành công trình. Các mô hình mô phỏng năng lượng hỗ trợ kỹ sư vận hành tối ưu hóa hiệu suất hoạt động các hệ thống điều hòa, thông gió đáp ứng được chiến lược tiết kiệm năng lượng, giảm thiểu phát thải cacbon mà vẫn đảm bảo tiện nghi nhiệt trong quá trình vận hành. Các mô hình mô phỏng cần được cải thiện hơn về tốc độ tính toán mô phỏng để thực hiện điều khiển hệ thống kỹ thuật ở thời gian thực mà vẫn đảm bảo độ chính xác của kết quả thu được.

## Tài liệu tham khảo

- [1]. J. Sousa, "Energy Simulation Software for Buildings: Review and Comparison."
- [2]. S. A. Klein, W. A. Beckman, and J. A. Duffie, "Trnsys - a Transient Simulation Program.," *ASHRAE Trans.*, vol. 82, no. pt 1, pp. 623-633, 1976.
- [3]. T. Kalamees, "IDA ICE: the simulation tool for making the whole building energy- and HAM analysis," *IEA Annex 41 MOIST-ENG, Work. Meet. May 12-14*, no. 1999, p. 6, 2004.
- [4]. F. Nocera, A. Lo Faro, V. Costanzo, and C. Raciti, "Daylight Performance of Classrooms in a Mediterranean School Heritage Building," *Sustainability*, vol. 10, no. 10, p. 3705, Oct. 2018.
- [5]. C. Tam, Y. Zhao, Z. Liao, and L. Zhao, "Mitigation Strategies for Overheating and High Carbon Dioxide Concentration within Institutional Buildings: A Case Study in Toronto, Canada," *Buildings*, vol. 10, no. 7, p. 124, Jul. 2020.
- [6]. I. García Kerdan, R. Raslan, and P. Ruyssevelt, "An exergy-based multi-objective optimisation model for energy retrofit strategies in non-domestic buildings," *Energy*, vol. 117, pp. 506-522, Dec. 2016.
- [7]. B. J. Futrell, E. C. Ozelkan, and D. Brentrup, "Bi-objective optimization of building enclosure design for thermal and lighting performance," *Build. Environ.*, vol. 92, pp. 591-602, Oct. 2015.
- [8]. A. Garnier, J. Eynard, M. Caussanel, and S. Grieu, "Predictive control of multizone heating, ventilation and air-conditioning systems in non-residential buildings," *Appl. Soft Comput.*, vol. 37, pp. 847-862, Dec. 2015.
- [9]. X. Li and J. Wen, "Review of building energy modeling for control and operation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 517-537, 2014.
- [10]. R. K. Strand *et al.*, "EnergyPlus: A New-Generation Energy Analysis and Load Calculation Engine for Building Design Introduction: What is EnergyPlus?," *ACSA Technol. Conf.*, vol. 2, no. April 2014, 2000.
- [11]. University of Strathclyde, "The ESP-r System for Building Energy Simulation," 2002.
- [12]. J. Ma, J. Qin, T. Salsbury, and P. Xu, "Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 67, no. 1, pp. 92-100, Jan. 2012.
- [13]. J. W. Moon and J.-J. Kim, "ANN-based thermal control models for residential buildings," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 7, pp. 1612-1625, Jul. 2010.
- [14]. R. Yokoyama, T. Wakui, and R. Satake, "Prediction of energy demands using neural network with model identification by global optimization," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 2, pp. 319-327, Feb. 2009.
- [15]. B. J. Urban, "The MIT Design Advisor: simple and rapid energy simulation of early-stage building designs," *Massachusetts Inst. Technol.*, no. September 2008, 2007.
- [16]. S. Luziani and B. Paramita, "Autodesk Green Building Studio an Energy Simulation Analysis in the Design Process," *KnE Soc. Sci.*, vol. 2019, pp. 735-749, 2019.
- [17]. S. Lamichhane, "Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports An



- eQUEST Based Building Energy Modeling Analysis for Energy An eQUEST Based Building Energy Modeling Analysis for Energy Efficiency of Buildings Efficiency of Buildings,” 2021.
- [18]. H. A. Wasilowski and C. F. Reinhart, “Energy Simulation of an Existing Building Using Customized Internal Load Schedules and Weather Data as Opposed to Default Assumptions,” no. July, pp. 1252–1259, 2009.
- [19]. A. Zachariah, P. Rao, B. Corn, and D. Davison, “Design,” 2022.
- [20]. O. Ahmed and T. Al-Zubaydi, “Building Models Design And Energy Simulation With Google Sketchup And,” *J. Adv. Sci. Eng. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 318–333, 2013.
- [21]. F. Del and A. Gonzalo, “Assessment of Building Energy Simulation Tools to Predict Heating and Cooling Energy Consumption at Early Design Stages,” 2023.
- [22]. Y. Pan *et al.*, “Advances in Applied Energy Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case studies,” *Adv. Appl. Energy*, vol. 10, no. March, p. 100135, 2023.
- [23]. I. Loche, C. Bleil de Souza, A. B. Spaeth, and L. O. Neves, “Decision-making pathways to daylight efficiency for office buildings with balconies in the tropics,” *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 102596, Nov. 2021.
- [24]. M. Gercek and Z. Durmuş Arsan, “Energy and environmental performance based decision support process for early design stages of residential buildings under climate change,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 48, p. 101580, Jul. 2019.
- [25]. J. Yao, J. Zhong, and N. Yang, “Indoor air quality test and air distribution CFD simulation in hospital consulting room,” *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 17, pp. 33–37, Feb. 2022.
- [26]. S. Lu, B. Lin, and C. Wang, “Investigation on the potential of improving daylight efficiency of office buildings by curved facade optimization,” *Build. Simul.*, vol. 13, no. 2, pp. 287–303, Apr. 2020.
- [27]. D. Yan, J. Xia, W. Tang, F. Song, X. Zhang, and Y. Jiang, “DeST — An integrated building simulation toolkit Part I: Fundamentals,” *Build. Simul.*, vol. 1, no. 2, pp. 95–110, 2008.
- [28]. M. Wetter, “A modelica-based model library for building energy and control systems,” *IBPSA 2009 - Int. Build. Perform. Simul. Assoc. 2009*, no. June, pp. 652–659, 2009.
- [29]. S. Huang, W. Zuo, and M. D. Sohn, “Improved cooling tower control of legacy chiller plants by optimizing the condenser water set point,” *Build. Environ.*, vol. 111, pp. 33–46, Jan. 2017.
- [30]. J. Gomez-Romero *et al.*, “A Probabilistic Algorithm for Predictive Control With Full-Complexity Models in Non-Residential Buildings,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38748–38765, 2019.
- [31]. F. Souayfane, R. M. Lima, H. Dahrouj, and O. Knio, “A weather-clustering and energy-thermal comfort optimization methodology for indoor cooling in subtropical desert climates,” *J. Build. Eng.*, vol. 51, p. 104327, Jul. 2022.
- [32]. S. Papadopoulos, C. E. Kontokosta, A. Vlachokostas, and E. Azar, “Rethinking HVAC temperature setpoints in commercial buildings: The potential for zero-cost energy savings and comfort improvement in different climates,” *Build. Environ.*, vol. 155, pp. 350–359, May 2019.
- [33]. C. Fan *et al.*, “Open-source Modelica models for the control performance simulation of chiller plants with water-side economizer,” *Appl. Energy*, vol. 299, p. 117337, Oct. 2021.