

## Research on Application of Digital Twin for Collecting Data to Manage Building's Energy

Quoc Anh Le<sup>✉</sup>, The Bao Nguyen<sup>\*✉</sup>

University of Technology, Vietnam National University Ho Chi Minh City, Vietnam

\*Corresponding author. Email: [thebao@hcmut.edu.vn](mailto:thebao@hcmut.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 23/05/2025  
Revised: 03/06/2025  
Accepted: 04/06/2025  
Published: 28/08/2025

### KEYWORDS

Digital Twin;  
IoT;  
Energy simulation;  
Energy Plus;  
Real-time data acquisition.

### ABSTRACT

This study presents a possible affordable digital twin for real-time energy monitoring and model calibration in buildings. Sensors measuring temperature, humidity, voltage, current, and power factor were installed in a small office. Data was transmitted every 20 seconds through the Internet of Things (IoT) using Microsoft Azure platform, then stored in a cloud database. This dataset was used to calibrate an EnergyPlus simulation model of a fixed-capacity air-conditioning system. Calibration followed the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Guideline 14 for hourly data, using root mean square error, its coefficient of variation, and normalized mean bias error. After four iterations, the model achieved 10,65% and -2,05% for the two key metrics, within the recommended thresholds. The results confirm the value of high-frequency real-time data in improving simulation accuracy and supporting advanced functions such as anomaly detection and predictive control in smart building energy management.

## Ứng dụng mô hình song sinh số trong việc quản lý năng lượng tòa nhà

Lê Quốc Anh<sup>✉</sup>, Nguyễn Thế Bảo<sup>\*✉</sup>

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

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

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 23/05/2025  
Ngày hoàn thiện: 03/06/2025  
Ngày chấp nhận đăng: 04/06/2025  
Ngày đăng: 28/08/2025

### TỪ KHÓA

Digital Twin;  
IoT;  
Mô phỏng năng lượng;  
Energy Plus;  
Thu thập dữ liệu thời gian thực.

### TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một mô hình song sinh số khả thi với chi phí hợp lý nhằm giám sát năng lượng và hiệu chuẩn mô phỏng theo thời gian thực trong công trình xây dựng. Các cảm biến đo nhiệt độ, độ ẩm, điện áp, dòng điện và hệ số công suất được lắp đặt tại một văn phòng nhỏ, truyền dữ liệu 20 giây một lần qua Internet of Things (IoT) dùng nền tảng Microsoft Azure và lưu trữ trên đám mây. Dữ liệu này được dùng để hiệu chuẩn mô hình EnergyPlus mô phỏng hệ thống điều hòa công suất cố định. Quá trình hiệu chuẩn tuân theo Hướng dẫn số 14 của Hiệp hội Kỹ sư Sưởi ấm, Làm mát và Điều hòa Không khí Hoa Kỳ (ASHRAE) cho dữ liệu theo giờ, sử dụng các chỉ số sai số căn bậc hai, hệ số biến thiên và sai số thiên lệch chuẩn hóa. Sau bốn lần hiệu chuẩn, mô hình đạt mức sai số 10,65% và -2,05%, nằm trong ngưỡng khuyến nghị. Kết quả khẳng định vai trò của dữ liệu thời gian thực trong nâng cao độ chính xác mô phỏng và hỗ trợ phát hiện bất thường, điều khiển dự đoán trong quản lý năng lượng tòa nhà thông minh.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2025.1910>

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

### 1. Giới thiệu

Theo báo cáo mới nhất của Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA), lĩnh vực xây dựng chiếm khoảng 30% tổng mức tiêu thụ năng lượng cuối cùng và gần 26% lượng phát thải khí nhà kính liên quan đến năng lượng toàn cầu [1]. Trong bối cảnh nhu cầu điện năng ngày càng tăng tại các khu đô thị, việc nâng

cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong công trình đã trở thành một mục tiêu ưu tiên trong chiến lược phát triển bền vững.

Một trong những giải pháp công nghệ đang được quan tâm hiện nay là mô hình song sinh số (Digital Twin), cho phép kết nối dữ liệu đo lường thực tế với mô hình mô phỏng để giám sát, tối ưu và điều khiển hệ thống kỹ thuật trong công trình theo thời gian thực [2]. Khác với các mô hình mô phỏng tĩnh truyền thống, Digital Twin có khả năng cập nhật trạng thái liên tục thông qua mạng lưới cảm biến kết nối Internet, từ đó hỗ trợ vận hành chủ động các hệ thống điều hòa không khí (HVAC), chiếu sáng và thiết bị tiêu thụ điện [3].

Nghiên cứu của Vering và cộng sự đã chỉ ra rằng việc hiệu chuẩn mô hình song sinh số bằng dữ liệu thực có thể cải thiện đáng kể khả năng dự báo tải nhiệt và nâng cao hiệu suất vận hành của hệ HVAC [4]. Tuy nhiên, hiệu chuẩn mô hình là một thách thức kỹ thuật lớn, đòi hỏi dữ liệu đầu vào có độ chính xác và độ phân giải cao. Trước đây, nhiều nghiên cứu chỉ sử dụng dữ liệu tiêu thụ năng lượng theo tháng hoặc theo hóa đơn, dẫn đến sai số lớn và khó phát hiện các biến động ngắn hạn [5]. Gần đây, các hướng tiếp cận mới đã chứng minh rằng dữ liệu thời gian thực từ cảm biến có thể tăng độ chính xác của mô hình và hỗ trợ các chức năng như phát hiện bất thường và điều khiển dự đoán [6].

Để hiện thực hóa các chức năng này, các mô hình song sinh số hiện đại có xu hướng tích hợp các thành phần như mô phỏng năng lượng bằng EnergyPlus, lưu trữ dữ liệu thời gian thực trong cơ sở dữ liệu NoSQL, và vận hành trên nền tảng điện toán đám mây [7]. Trong ứng dụng thực tế, một số công trình đã kết hợp mô hình HVAC, cảm biến và phân tích dữ liệu để tối ưu hóa vận hành khách sạn và tòa nhà thông minh. Tuy nhiên, tại Việt Nam, các nghiên cứu theo hướng này còn tương đối hạn chế, đặc biệt là việc tích hợp dữ liệu cảm biến thời gian thực từ nền tảng Microsoft Azure vào quy trình hiệu chuẩn mô phỏng năng lượng theo chuẩn ASHRAE Guideline 14.

Do đó, bài báo này trình bày quá trình xây dựng một hệ thống Digital Twin chi phí thấp, thu thập dữ liệu đo từ cảm biến nhiệt độ, độ ẩm và công suất theo thời gian thực thông qua nền tảng Azure IoT, lưu trữ vào cơ sở dữ liệu đám mây, và sử dụng để hiệu chuẩn mô hình HVAC trong phần mềm EnergyPlus. Quá trình hiệu chuẩn được thực hiện theo hướng dẫn của ASHRAE Guideline 14 và đánh giá bằng các chỉ số sai số căn bậc hai, hệ số biến thiên và sai số thiên lệch chuẩn hóa. Kết quả hiệu chuẩn được phân tích để xác định khả năng ứng dụng của hệ thống trong giám sát năng lượng và các mục tiêu điều khiển dự đoán trong tương lai.

## 2. Phương pháp nghiên cứu và mô hình

### 2.1. Cơ sở lý thuyết về mô hình song sinh số

Khái niệm mô hình song sinh số được Michael Grieves đề xuất lần đầu vào năm 2003 trong lĩnh vực quản lý vòng đời sản phẩm. Đến năm 2017, Grieves & Vickers hệ thống hóa DT thành mô hình gồm ba thành phần: thực thể vật lý, bản sao số, và luồng dữ liệu thời gian thực [8]. DT cho phép phản ánh trạng thái vận hành liên tục để phục vụ giám sát, chuẩn đoán và tối ưu hệ thống. Theo Boschert & Rosen (2016), kiến trúc DT được tổ chức thành ba lớp: lớp vật lý (thiết bị đo), lớp dữ liệu (truyền tải – lưu trữ), và lớp mô hình số [9]. Trong lĩnh vực công trình, DT hỗ trợ hiệu chuẩn mô phỏng năng lượng, nâng cao tiện nghi và bảo trì dự báo.

### 2.2. Mô hình mô phỏng và hiệu chuẩn

Mô hình năng lượng của không gian nghiên cứu được xây dựng và mô phỏng bằng phần mềm EnergyPlus 24.2.0. Các thông số đầu vào được thiết lập như Bảng 1.

**Bảng 1.** Thông số đầu vào của không gian mô phỏng

Nhóm thông số	Mục	Giá trị / Mô tả	Nguồn tham chiếu & Ghi chú
Hình học	Kích thước phòng	6,4 m × 3,9 m × 3,0 m	Theo bản vẽ hoàn công

	Cửa kính	Kính một lớp, giáp phía Bắc ngoài trời và Đông trong nhà Hệ số dẫn nhiệt 0,78 W/(m.K)	QCVN 09:2017
	Orientation	Hướng chính Bắc	Theo google maps
<b>Cấu trúc vật lý</b>	Tường ngoài	Tường gạch bê tông dày 220mm có nhiệt trở $R_o=0,66 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$	QCVN 09:2017
	Trần	Bên trên là sàn tầng 1	
	Sàn	Sàn tiếp xúc hầm	
<b>HVAC</b>	Hệ thống	Điều hòa 2 cục công suất danh định 1,8kW	
	Thermostat	Setpoint 26 °C	Điều khiển On/Off theo giờ hành chính
<b>Tải bên trong</b>	Con người	3 người × 120 W/người	Theo ASHRAE 90,1 & Handbook 2017 – Office (sedentary)
	Thiết bị	~150–200 W cho máy in, máy tính	Theo Handbook 2019 – Office equipment load (medium use)
	Chiếu sáng	~200 W toàn phòng	Lighting Power Density ~5,6 W/m <sup>2</sup> theo QCVN09
<b>Weather Data</b>	File thời tiết	Ho_Chi_Minh_Vietnam.epw	Lấy từ trang EnergyPlus.net/weather; nguồn IWEC2 do ASHRAE cung cấp
<b>Output</b>	Biến theo dõi	Nhiệt độ trong phòng, công suất tiêu thụ.	Tần suất theo giờ
	Output format	CSV	Dùng cho so sánh, hiệu chuẩn với dữ liệu thực



**Hình 1.** Không gian phòng dùng để thí nghiệm

Dữ liệu đầu ra mô phỏng bao gồm nhiệt độ và công suất lạnh, được so sánh với dữ liệu thực tế để hiệu chuẩn mô hình HVAC. Theo ASHRAE Guideline 14, quá trình hiệu chuẩn mô hình cần so sánh các đầu ra chính của mô phỏng với dữ liệu thực đo. Trong đó, nhiệt độ phòng và công suất (hoặc năng lượng tiêu thụ) là hai đại lượng chính được khuyến nghị sử dụng để hiệu chuẩn mô hình. Việc hiệu chuẩn được thực hiện theo chuẩn ASHRAE Guideline 14 cho dữ liệu theo giờ, sử dụng ba chỉ số sai số với công thức tính toán:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad (1)$$

$$CVRMSE = \frac{RMSE}{\bar{M}} \times 100\% \quad (2)$$

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{n \cdot \bar{M}} \times 100\% \quad (3)$$

- RMSE: Sai số bình phương trung bình (*Root Mean Square Error*)
- CVRMSE: Hệ số biến thiên của sai số bình phương trung bình (*Coefficient of Variation of RMSE*)
- NMBE: Sai số trung bình lệch chuẩn hóa (*Normalized Mean Bias Error*)

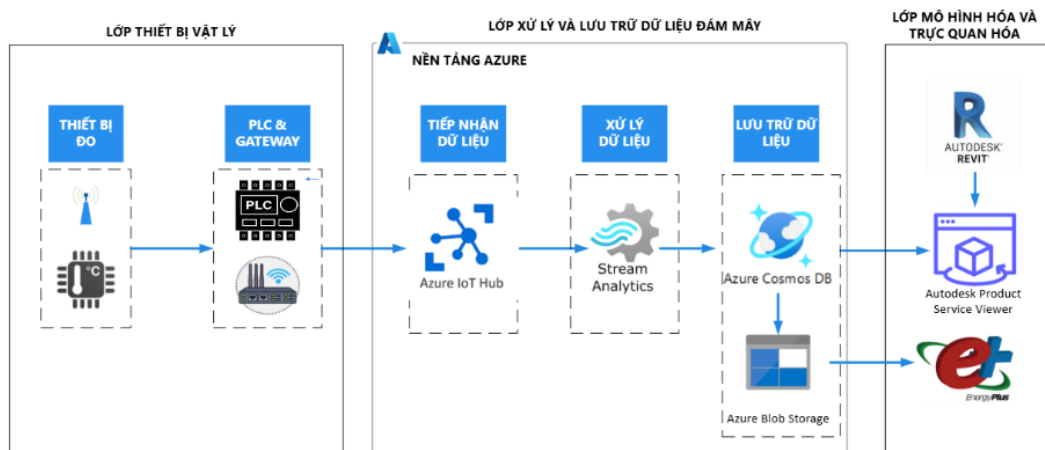
Trong đó:

- $S_i$  và  $M_i$ : giá trị mô phỏng và thực tế tại thời điểm  $i$
- $\bar{M}$ : giá trị trung bình của chuỗi  $M_i$
- $n$ : số lượng quan sát (số điểm dữ liệu theo thời gian)

Giá trị hiệu chuẩn được chấp nhận khi đạt  $CVRMSE \leq 30\%$  và  $|NMBE| \leq 10\%$ . Đây là ngưỡng sai số mục tiêu mà mô hình phải thỏa để đảm bảo độ chính xác cần thiết trong các ứng dụng mô phỏng và phân tích năng lượng. Việc hiệu chuẩn trong luận văn dừng lại khi mô hình thỏa hai điều kiện này.

### 2.3. Mô hình thông tin

Hệ thống mô hình số song sinh được triển khai theo kiến trúc ba lớp, thể hiện rõ dòng dữ liệu từ thiết bị thực tế đến mô hình số. Lớp thứ nhất là lớp thiết bị vật lý, bao gồm các cảm biến để đo nhiệt độ, độ ẩm và thông số điện, PLC có vai trò thu thập và xử lý sơ bộ tín hiệu, và Gateway thực hiện truyền dữ liệu lên nền tảng đám mây. Lớp thứ hai là lớp xử lý và lưu trữ dữ liệu trên nền tảng Microsoft Azure, nơi dữ liệu được tiếp nhận qua IoT Hub, xử lý bằng Stream Analytics để làm sạch và định tuyến, sau đó lưu vào Cosmos DB (dữ liệu có cấu trúc NoSQL) hoặc Blob Storage (dữ liệu dạng file). Lớp thứ ba là lớp mô hình hóa và trực quan hóa, sử dụng dữ liệu đo được để mô phỏng hệ thống HVAC trong EnergyPlus và kết nối mô hình Revit với Autodesk Viewer, cho phép người dùng cuối theo dõi tình trạng vận hành theo thời gian thực trên nền tảng web.



Hình 2. Sơ đồ mô hình kiến trúc hệ thống thông tin

### 2.4. Thiết bị và triển khai thực tế

Để đảm bảo quá trình đo lường và truyền dữ liệu diễn ra ổn định, hệ thống được cấu hình gồm chuỗi các thiết bị có chức năng cụ thể như sau:

**Cảm biến đo nhiệt độ, độ ẩm, điện áp và dòng điện:** Được bố trí tại ba vị trí (trong phòng, hành lang, ngoài trời) để ghi nhận các điều kiện môi trường và điện năng tiêu thụ. Cảm biến nhiệt độ – độ ẩm sử dụng là **ES35-SW** (giao tiếp RS485 Modbus RTU, chip SHT35, độ chính xác  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  và  $\pm 1,5\% \text{RH}$ , dải đo  $-20$  đến  $80^\circ\text{C}$  và  $0-100\% \text{RH}$ ). Cảm biến dòng điện là loại **EM2M-1P-C-10A** (dải đo tới 10 A),

và cảm biến điện áp được tích hợp sẵn trong cùng thiết bị đo năng lượng. Toàn bộ cảm biến đã được hiệu chuẩn tại Trung tâm Kỹ thuật Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng 3 (Quatest 3) trước khi lắp đặt, với chứng chỉ hiệu chuẩn được cấp theo tiêu chuẩn đo lường Việt Nam. Điều này nhằm đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy cao cho toàn bộ chuỗi dữ liệu. Các tín hiệu sau đó được đưa vào mini PLC hiệu Samkoon qua giao tiếp analog và Modbus RTU.

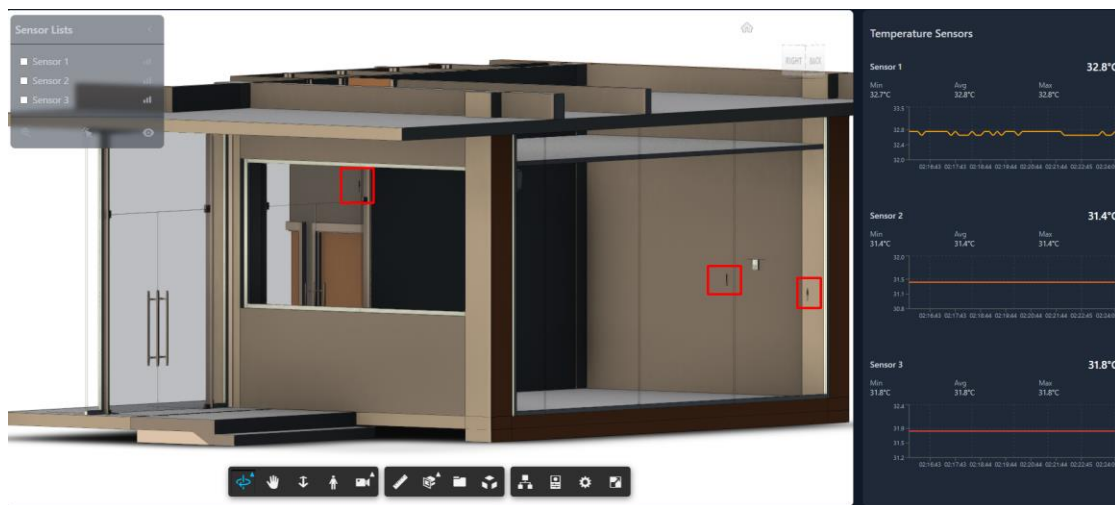
**Bộ điều khiển lập trình (PLC):** Đóng vai trò là thiết bị trung tâm trong tủ điện điều khiển. PLC có nhiệm vụ đọc tín hiệu từ các cảm biến, xử lý sơ bộ và lưu trữ dữ liệu trong bộ nhớ đệm ngắn hạn. Tủ điện cũng tích hợp bộ nguồn, thiết bị đấu nối, chống sét và cầu chì bảo vệ.

**Kết nối PLC – Gateway:** PLC truyền dữ liệu sang Gateway qua giao thức Modbus RTU (Remote Terminal Unit), hoạt động trên đường truyền vật lý RS-485. Đây là giao thức truyền thông nối tiếp phổ biến, cho phép truyền dữ liệu tin cậy trong môi trường công nghiệp với khả năng chống nhiễu cao.

**Gateway IoT công nghiệp:** Thiết bị này chuyển đổi dữ liệu từ định dạng Modbus sang JSON (JavaScript Object Notation) – định dạng văn bản nhẹ, có cấu trúc khóa-giá trị (key-value), phù hợp cho truyền thông IoT. Sau khi xử lý, Gateway gửi bản tin JSON lên nền tảng đám mây thông qua giao thức MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – một giao thức nhẹ và tối ưu cho thiết bị có băng thông hạn chế.

**Lưu trữ và hiển thị dữ liệu:** Các bản tin JSON được tiếp nhận bởi Azure IoT Hub, xử lý bởi Stream Analytics để lọc và định tuyến đến Cosmos DB. Tại đây, dữ liệu được lưu trữ theo thời gian thực, sẵn sàng phục vụ mô phỏng hiệu chuẩn với EnergyPlus hoặc trực quan hóa qua Web App.

Dữ liệu từ cảm biến được thu thập định kỳ 20 giây/lần và truyền theo thời gian thực lên nền tảng đám mây. Các cảm biến được bố trí tại ba khu vực đại diện cho các vùng nhiệt điển hình: trong phòng làm việc (T1, H1), hành lang (T2, H2), và ngoài trời (T3, H3). Đồng thời, các thông số điện bao gồm điện áp (V), dòng điện (A) và hệ số công suất (PF) cũng được ghi nhận để tính công suất tiêu thụ.



**Hình 3.** Giao diện mô hình 3D theo thời gian thực và vị trí các cảm biến

Dữ liệu thu được từ PLC được Gateway chuyển thành định dạng JSON, ví dụ:

```
{
  "miniPLC": {
    "V": 221,3,
    "A": 3,2,
    "PF": 0,98,
  }
}
```

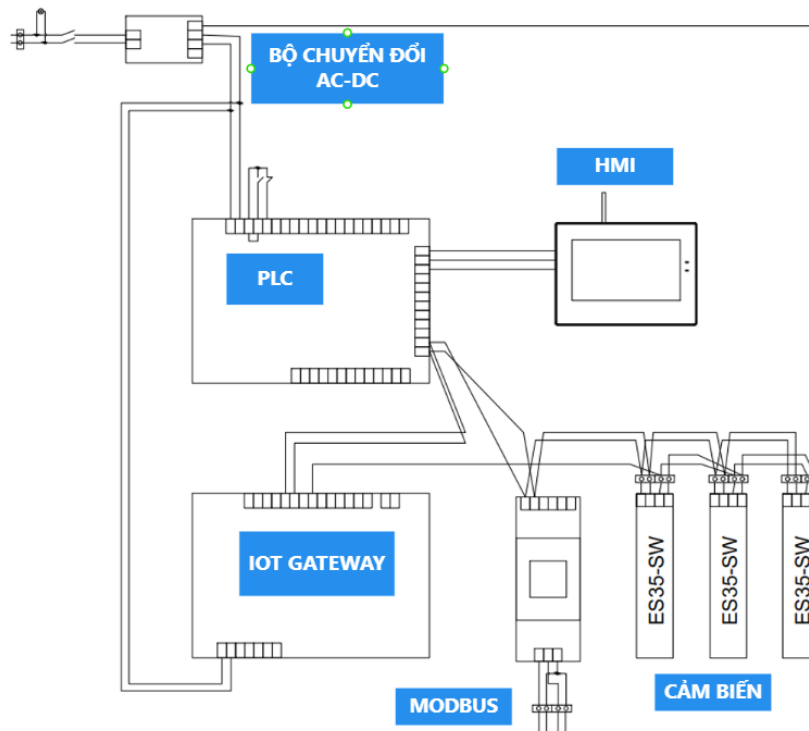
Mỗi bản tin này được truyền lên Azure IoT Hub thông qua giao thức MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – một giao thức nhẹ, tối ưu cho truyền dữ liệu từ thiết bị IoT có kết nối mạng yếu hoặc không ổn định. IoT Hub tiếp nhận và chuyển tiếp đến dịch vụ xử lý luồng dữ liệu Stream Analytics (SA), ứng dụng này xử lý dữ liệu và định dạng lại theo quy tắc hay chuẩn dữ liệu. Sau đó, dữ liệu sẽ được đưa qua và lưu trữ vào Cosmos DB – một hệ quản trị cơ sở dữ liệu, hỗ trợ truy vấn nhanh theo thời gian thực và khả năng mở rộng linh hoạt. Cấu trúc dữ liệu lưu

```
"T1": 25, 4,
"H1": 58, 7,
"T2": 27, 1,
"H2": 63, 3,
"T3": 34, 2,
"H3": 53, 2
}
```

trữ giữ nguyên định dạng JSON để dữ liệu có thể mapping (ánh xạ) qua Autodesk Viewer. Một luồng dữ liệu từ SA sẽ đưa qua Blob Storage – một ứng dụng chuyên lưu trữ dữ liệu lâu dài.



**Hình 4** Hiện trường lắp đặt tủ điện và cảm biến nhiệt độ - độ ẩm



**Hình 5.** Sơ đồ nguyên lý tủ điện điều khiển

### 3. Kết quả và phân tích

**Bảng 2.** Kết quả hiệu chuẩn theo nhiệt độ trong phòng và công suất

Calibration	RMSE T1 (°C)	CVRMSE T1 (%)	NMBE T1 (%)	RMSE Power (W)	CVRMSE Power (%)	NMBE Power (%)
Lần 1	5,72	17,98	+17,09	12,655	859,88	-676,8
Lần 2	5,52	17,35	+15,77	4,847	329,34	-235,25
Lần 3	5,52	17,35	+15,77	3,08	209,28	-134,2
Lần 4	4,66	14,78	-9,14	180	10,65	-2,05

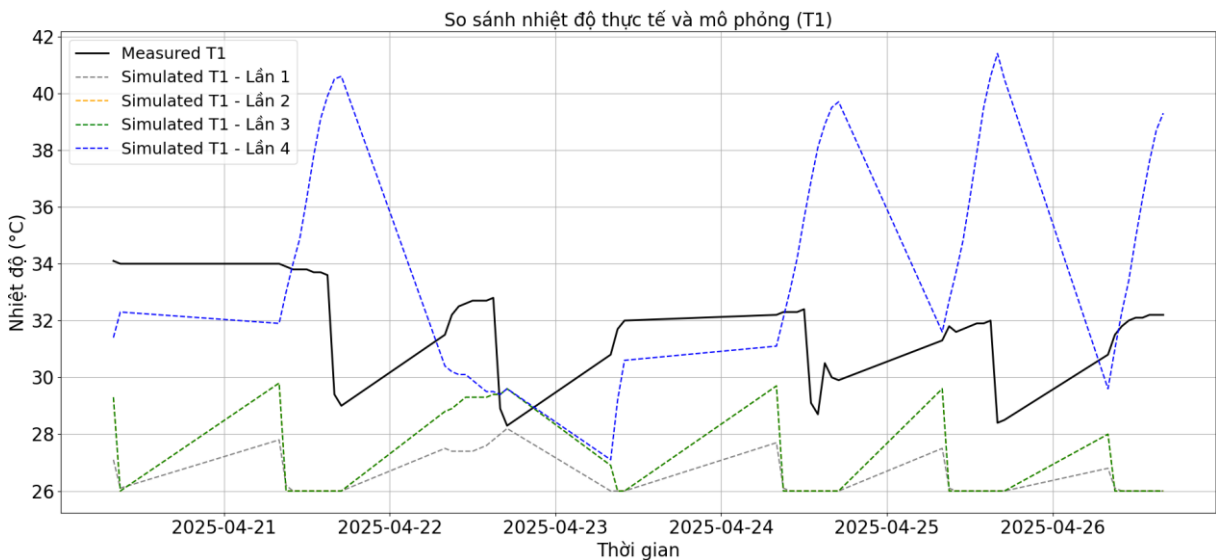
Dữ liệu trong bảng kết quả cho thấy một quá trình hiệu chuẩn mô hình có tiến trình rõ rệt. Mỗi lần lặp cải thiện đáng kể độ khớp giữa mô phỏng và thực tế, thể hiện qua việc giảm mạnh cả CVRMSE và NMBE:

CVRMSE công suất giảm từ 859,88% (Lần 1) xuống còn 10,65% (Lần 4), tức giảm gần 98,8% sai số.

NMBE công suất từ -676,8% còn -2,05% → chỉ còn lệch trung bình dưới 3% công suất thực.

Những con số này không chỉ minh chứng cho tính đúng hướng của quá trình hiệu chuẩn, mà còn phản ánh mô hình ban đầu thiếu ràng buộc kỹ thuật. Trong mô hình chưa hiệu chuẩn (L1-L3), hệ HVAC vượt công suất danh định tới hơn 10 lần, biểu hiện rõ tình trạng mô phỏng lý tưởng hóa, máy lạnh sẽ luôn chạy tới khi nhiệt độ đạt setpoint. Điều này khiến máy lạnh công suất luôn quá lớn dù đã điều chỉnh về tải và các thiết lập cho mô hình.

Tới lần hiệu chuẩn thứ 4, sau khi thiết lập ràng buộc công suất lạnh = 1,8 kW theo công suất và hiệu chuẩn đặc tính kính (SHGC, truyền nhiệt), mô hình bắt đầu tái hiện đúng giới hạn thiết bị sát với vận hành thực tế hơn, hiện tượng trễ và mất ổn định khi tải tăng đột ngột – đây là tín hiệu cho thấy mô hình bắt đầu tiệm cận các đặc điểm vận hành thực tế của hệ thống trong điều kiện khai thác



**Hình 6.** So sánh nhiệt độ thực tế và mô phỏng tại vị trí cảm biến T1 trong 4 lần hiệu chuẩn mô hình  
Kết quả mô phỏng cho thấy:

Ba lần mô phỏng đầu tiên (L1, L2, L3) đều có xu hướng theo sát nhiệt độ setpoint mà không phản ánh đúng các dao động nhiệt độ thực trong phòng. Hiện tượng này nhiều khả năng xuất phát từ việc mô hình HVAC chưa được áp đặt giới hạn công suất thực bởi giới hạn công suất máy lạnh hiện có – hệ thống có thể làm lạnh bất cứ lúc nào để duy trì nhiệt độ mục tiêu.

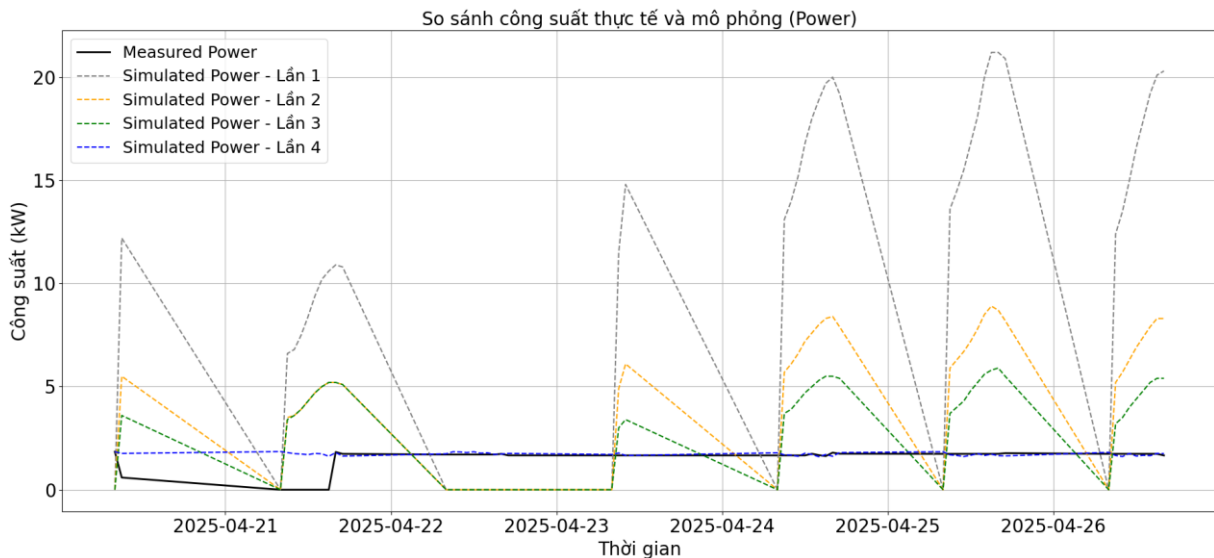
Tới lần thứ 4 (L4), sau khi giới hạn công suất đầu ra phù hợp với công suất danh định của máy lạnh (1,8kW), đường mô phỏng (màu xanh dương) bắt đầu lệch ra khỏi setpoint và tiệm cận với đường đo thực tế. Mô hình lúc này phản ánh đúng hơn hiện tượng trễ vận hành, quá tải cục bộ trong những khung giờ cao điểm.

Bên cạnh đó, kết quả cũng phản ánh một số đặc trưng vận hành của không gian nghiên cứu. Độ chênh lệch nhiệt độ lên tới 4,66°C vào giữa trưa có thể phản ánh ảnh hưởng của yếu tố vận hành và hành vi sử dụng không gian. Trái ngược với xu hướng tăng nhiệt độ phòng vào buổi trưa do điều kiện môi trường, dữ liệu thực tế trong trường hợp này lại ghi nhận xu hướng giảm nhẹ. Một số giả thiết được đặt ra nhằm giải thích hiện tượng này gồm:

Một giả thiết được đặt ra là người sử dụng có thể rời khỏi không gian trong giờ trưa, để máy lạnh nguyên trong giờ trưa và tắt hết các thiết bị điện. Điều này dẫn đến tải giảm vào buổi trưa dù nhiệt độ ngoài trời sẽ nóng hơn.

Người trong phòng nghỉ ngơi và tắt các thiết bị điện khiến nhiệt độ giảm xuống. Ngoài ra do đây là phòng tuyển sinh nên trong khung giờ sinh hoạt 8-12h sẽ tiếp nhiều khách, khiến cửa luôn mở ra làm nhiệt độ phòng không ổn định và giảm xuống nhiệt độ yêu cầu. Điều này có thể cho thấy tỷ trọng tải nhiệt của con người và thiết bị chiếm phần lớn so với tải từ cửa kính đi qua, do ở đây khuất nắng và trước cửa kính có bóng cây che.

Mô hình hiệu chỉnh lần thứ tư phản ánh sát nhất trạng thái vận hành thực tế trong phạm vi sai số cho phép, theo tiêu chí của ASHRAE Guideline 14.



**Hình 7.** So sánh công suất thực tế và tải mô phỏng của phòng trong 4 lần hiệu chuẩn mô hình

Kết quả mô phỏng cho thấy sự chênh lệch đáng kể giữa công suất lạnh mô phỏng và công suất điện đo thực trong các lần hiệu chuẩn:

Lần 1 đến lần 3:

Mô hình vẫn cho phép hệ thống HVAC hoạt động với tải cao, đặc biệt lên tới trên 20kW trong các giờ nắng nóng (ví dụ 13h–15h). Điều này vượt xa công suất thực tế của máy lạnh (~1,8kW), cho thấy mô hình vẫn đang chạy tự do không bị giới hạn bởi đặc tính kỹ thuật thiết bị.

Ba lần đầu tiên chủ yếu vẫn mô phỏng theo hướng hệ thống lý tưởng hóa hoặc chưa tinh chỉnh kỹ các yếu tố vật lý liên quan.

Lần 4 – hiệu chuẩn có kiểm soát:

Sau khi thiết lập giới hạn công suất theo thiết bị (1,8kW) và nhận ra ban đầu các thông số về kinh theo QCVN 09 vẫn còn lớn. Thực tế, kính được dán thêm lớp chống trầy xước, đồng thời nằm trong khu vực có nhiều cây xanh che nắng nên tải nhiệt từ bên ngoài qua kính giảm. Lúc này, mô hình phản ánh đúng hiện tượng thiết bị không thể đáp ứng toàn bộ tải nhiệt ở thời điểm cao điểm nhằm phản ánh rõ hơn sự quá tải, thiếu làm lạnh nếu không có giải pháp bổ sung như cách nhiệt tốt hơn hoặc điều chỉnh điều hòa.

Dữ liệu thực tế cho thấy máy lạnh thường vận hành ở mức tải cao. Một số trường hợp ngoại lệ (mất điện, không sử dụng) có thể khiến công suất về 0. Nhiệt độ trong phòng lại ở mức khá cao trong khoảng 30°C chứng tỏ mô hình cho thấy khả năng thiếu tải có xu hướng xuất hiện thường xuyên trong không gian này.

Như vậy, việc hiệu chuẩn mô hình không chỉ nhằm mục tiêu đạt sai số nhỏ, mà còn để xác định các nguy cơ vận hành như thiếu tải, quá tải thiết bị và gợi mở các hướng cải tiến như tăng cường cách nhiệt, nâng cấp thiết bị hoặc điều chỉnh hành vi sử dụng.

Việc hiệu chuẩn mô hình đạt độ chính xác cao không chỉ là mục tiêu nội tại của mô phỏng năng lượng, mà còn là nền tảng để mở rộng sang các ứng dụng phân tích và tối ưu hóa nâng cao. Một khi mô hình đã tái hiện sát thực trạng vận hành của thiết bị và tải, nó có thể được sử dụng làm:

Công cụ benchmark cho các kịch bản cải tiến (ví dụ: thay kính, tăng insulation, nâng cấp công suất lạnh);

Cơ sở để phát hiện bất thường vận hành (ví dụ: nhiệt độ tăng dù công suất không đổi → thiếu lạnh hoặc sensor lỗi);

Đầu vào cho mô hình học máy (Machine Learning): từ chuỗi dữ liệu đã hiệu chuẩn, có thể huấn luyện mô hình ML để:

Dự đoán tải nhiệt trong các khung giờ tiếp theo dựa trên thời tiết, hành vi sử dụng;

Đề xuất kịch bản điều khiển HVAC thông minh nhằm tối ưu năng lượng;

Phân loại tình huống bất thường (nhiều điện, mất tải, cài đặt sai, lỗi cảm biến...).

Dữ liệu độ ẩm tại ba vị trí được ghi nhận song song với dữ liệu nhiệt độ và điện. Trong suốt giai đoạn đo, độ ẩm trung bình trong phòng dao động quanh 65–75%RH, cao hơn mức khuyến nghị tiêu chuẩn (ASHRAE Standard 55: 40–60%). Điều này có thể ảnh hưởng đến cảm nhận nhiệt và hiệu suất làm lạnh, đặc biệt vào đầu giờ chiều khi nhiệt độ ngoài trời tăng. Tuy nhiên, do hệ thống chỉ sử dụng mô phỏng nhiệt khô, ảnh hưởng của độ ẩm chưa được tích hợp vào mô hình mô phỏng. Đây là một hạn chế cần được mở rộng trong các nghiên cứu tiếp theo.

Chi phí triển khai hệ thống thử nghiệm, bao gồm các cảm biến đo môi trường – điện năng, bộ điều khiển lập trình (PLC), gateway IoT, tủ điện và chi phí lập trình phần mềm, vào khoảng 30 triệu đồng. Cấu hình phần cứng và phần mềm được lựa chọn nhằm tối giản chi phí trong điều kiện nghiên cứu, đồng thời vẫn đảm bảo khả năng thu thập – xử lý – truyền dữ liệu theo thời gian thực.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã phát triển và triển khai một nền tảng Digital Twin hợp lý về chi phí, tích hợp mô hình mô phỏng EnergyPlus với dữ liệu thời gian thực từ hệ thống cảm biến công nghiệp, vận hành trên hạ tầng Microsoft Azure. Sau bốn lần hiệu chuẩn, mô hình đạt mức sai số CVRMSE = 10,65% và NMBE = -2,05%, nằm trong giới hạn khuyến nghị theo chuẩn ASHRAE Guideline 14 cho dữ liệu theo giờ.

Trong nghiên cứu này, thực thể vật lý là không gian văn phòng thực tế với các yếu tố môi trường như nhiệt độ và độ ẩm. Mô hình song sinh số gồm ba lớp: Revit-BIM (mô tả hình học), EnergyPlus (mô phỏng năng lượng), và nền tảng hiển thị dữ liệu qua trình duyệt (giao diện tương tác).

Mối liên kết giữa hai hệ có tính phản hồi: dữ liệu đo thực được tích hợp vào mô hình số để hiệu chuẩn, phân tích hành vi và chuẩn đoán bất thường. Khi sai số giữa mô phỏng và thực tế vượt ngưỡng, hệ thống có thể phát hiện các sai lệch như vận hành ngoài giờ, biến động nội tải hoặc giả định mô hình chưa phù hợp.

Kết quả mô phỏng sát với thực tế không chỉ phản ánh chính xác đặc điểm vận hành của hệ HVAC mà còn giúp phát hiện các hiện tượng quá tải, thiếu tải và ảnh hưởng của thói quen sử dụng phòng tới hiệu suất năng lượng. Một năng lực nâng cao khác của Digital Twin là khả năng phản hồi ngược từ mô hình số sang hệ vật lý như:

Đánh giá các kịch bản cải tiến năng lượng: thay đổi vật liệu, kính, cách nhiệt, hoặc lịch điều hòa.

Phát hiện bất thường: như sai lệch nhiệt độ không tương ứng với công suất tiêu thụ.

Dự báo và điều khiển thông minh: huấn luyện mô hình học máy từ dữ liệu hiệu chuẩn để dự đoán tải và đưa ra điều khiển HVAC tối ưu.

Tuy nhiên, cơ chế phản hồi khép kín này chưa được triển khai trong nghiên cứu, và sẽ là hướng phát triển quan trọng nhằm nâng cao mức độ tự động hóa và kiểm soát thông minh trong tương lai.

Hệ thống được cấu hình để tận dụng mức sử dụng miễn phí của nền tảng Azure, do đó không phát sinh chi phí lưu trữ dữ liệu vượt mức. Trong bối cảnh Việt Nam vẫn còn thiếu các giải pháp Digital Twin tích hợp toàn diện, kết quả nghiên cứu này đóng vai trò làm nền móng kỹ thuật và thực nghiệm cho việc cả nghiên cứu lẫn ứng dụng giám sát và quản lý năng lượng tòa nhà trong tương lai.

### Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IEA, *Global Status Report for Buildings and Construction*. International Energy Agency, 2023.
- [2] M. Bortolini *et al.*, "A review of Digital Twin applications in the building sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, p. 111948, 2022.
- [3] A. Agostinelli *et al.*, "Cyber-physical digital twins for smart city building energy systems," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1689–1699, 2021.
- [4] J. Vering *et al.*, "Monitoring HVAC system performance using a digital twin," *Energy and Buildings*, vol. 195, pp. 69–82, 2019.
- [5] K. Sun and T. A. Reddy, "A review of methods to match building energy simulation models to measured data," *Energy and Buildings*, vol. 210, p. 109736, 2020.
- [6] A. Hosamo *et al.*, "Digital twin-based AHU fault detection using real-time data," *Applied Energy*, vol. 307, p. 118110, 2022.
- [7] R. A. M. Torres *et al.*, "Application of digital twins and AI in hotel HVAC control," *Journal of Building Engineering*, vol. 45, p. 103578, 2022.
- [8] M. Grieves and J. Vickers, "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems," in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, pp. 85–113, 2017.
- [9] S. Boschert and R. Rosen, "Digital Twin—The Simulation Aspect," in *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, P. Hehenberger and D. Bradley, Eds. Cham: Springer, 2016.

**Quoc Anh Le** is an MEP engineer with experience in building services and Building Information Management (BIM). He received his B.Eng. from the University of Technology – VNU-HCM and is completing his M.S. thesis on digital twin applications for building energy management. He has worked at Aurecon, Taikisha Vietnam, and currently at Construction Corporation No.1 (CC1), while also lecturing Revit at BIMLab – UT. His research interests include smart buildings, HVAC systems, and energy optimization.

Email: [lequocanh3495@gmail.com](mailto:lequocanh3495@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4608-0729>

**The Bao Nguyen** is currently an Associate Professor at the Department of Heat and Refrigeration Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Technology - Vietnam National University Ho Chi Minh City. With 35 years of teaching, he has trained many generations of undergraduate and post-graduate students. Currently, his main research directions are solar energy, wind energy, energy conservation and energy efficient in air conditioning, refrigeration and heating systems, energy savings in buildings, heat pump drying and sublimation drying combined with waves. Email: [thebao@hcmute.edu.vn](mailto:thebao@hcmute.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7971-1459>