

## Economic and Technical Analysis of a Hybrid Photovoltaic and Fuel Cell System: Optimizing Configuration and Prospects for Green Hydrogen Development in Vietnam

Phuong Truong Le<sup>1\*</sup>, Phuong Long Le<sup>1</sup>, Van Tri Bui<sup>2</sup>, Huu Quang Nguyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lac Hong University, Vietnam

<sup>2</sup>Posts and Telecommunications Institute of Technology, Vietnam

\*Corresponding author. Email: [lephuongtruong@lhu.edu.vn](mailto:lephuongtruong@lhu.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 15/01/2025  
Revised: 10/02/2025  
Accepted: 24/04/2025  
Published: 28/05/2025

### KEYWORDS

Photovoltaic system;  
Hybrid system;  
Economic;  
Fuel Cell;  
Hydrogen.

### ABSTRACT

This paper presents the results of an economic and technical analysis of a hybrid system photovoltaic and fuel cells, in which the installed capacity of the photovoltaic system is fixed at 1 MW. The study utilizes weather data from NASA to determine the output capacity of the photovoltaic system, thereby evaluating the efficiency of varying the fuel cell capacity, hydrogen storage tank capacity, and load consumption levels (ranging from 600 kW/day to 1000 kW/day). HOMER Pro software was selected as the primary simulation tool, enabling a comprehensive assessment of both economic and technical aspects. The results indicate that the economically optimal configuration is achieved using a PEM fuel cell with a capacity of 120 kW, a hydrogen storage tank with a capacity of 120 kg, combined with a 1 MW photovoltaic system to meet a load demand of 1000 kW/day. The initial investment cost for this optimal configuration is estimated at USD 779,507. The findings not only clarify the economic efficiency of the hybrid solar-fuel cell system but also demonstrate its potential for extensive energy utilization by leveraging excess capacity, promoting the production and use of green hydrogen, and contributing to Vietnam's sustainable development strategy.

## Phân Tích Kinh Tế – Kỹ Thuật Hệ Thống Lai Điện Mặt Trời và Pin Nhiên Liệu: Tối Ưu Cấu Hình và Triển Vọng Phát Triển Hydro Xanh tại Việt Nam

Lê Phương Trường<sup>1\*</sup>, Lê Phương Long<sup>1</sup>, Bùi Văn Trí<sup>2</sup>, Nguyễn Hữu Quang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Lạc Hồng, Việt Nam

<sup>2</sup>Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Việt Nam

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

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 15/01/2025  
Ngày hoàn thiện: 10/02/2025  
Ngày chấp nhận đăng: 24/04/2025  
Ngày đăng: 28/05/2025

### TỪ KHÓA

Hệ thống pin quang điện;  
Hệ thống lai;  
Kinh tế;  
Pin nhiên liệu;  
Hy đrô.

### TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả phân tích kinh tế – kỹ thuật đối với hệ thống lai giữa năng lượng mặt trời và pin nhiên liệu, trong đó công suất lắp đặt của hệ thống quang điện được cố định ở mức 1 MWp. Nghiên cứu sử dụng dữ liệu thời tiết từ NASA để xác định công suất đầu ra của hệ thống quang điện, qua đó xem xét hiệu quả của việc thay đổi công suất pin nhiên liệu, dung tích bình lưu trữ hydro và mức tải tiêu thụ (từ 600 kW/ngày đến 1000 kW/ngày). Phần mềm HOMER Pro được lựa chọn làm công cụ mô phỏng chính, cho phép đánh giá toàn diện cả khía cạnh kinh tế lẫn kỹ thuật. Kết quả cho thấy cấu hình tối ưu về kinh tế xuất hiện khi sử dụng pin nhiên liệu PEM công suất 120 kW, bình lưu trữ hydro dung tích 120 kg, kết hợp với hệ thống quang điện 1 MWp để đáp ứng tải 1000 kW/ngày. Chi phí đầu tư ban đầu ước tính cho cấu hình tối ưu này là 779.507 USD. Những phát hiện từ nghiên cứu không chỉ làm rõ tính hiệu quả của hệ thống lai mặt trời – pin nhiên liệu về mặt kinh tế, mà còn nhằm tận dụng năng lượng rộng rãi trong việc tận dụng công suất dư thừa, thúc đẩy sản xuất và sử dụng hydro xanh, đóng góp vào chiến lược phát triển bền vững cho Việt Nam.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2025.1769>

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

Sự kết hợp giữa năng lượng mặt trời và pin nhiên liệu đang ngày càng thu hút sự quan tâm trong lĩnh vực năng lượng sạch, nhờ khả năng cải thiện hiệu suất và giảm đáng kể lượng phát thải khí nhà kính [1]. Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc khai thác năng lượng mặt trời kết hợp với công nghệ pin nhiên liệu không chỉ mang lại lợi ích năng lượng, mà còn đạt hiệu quả kinh tế đáng kể. Trong một ứng dụng cụ thể về thiết bị không người lái, hệ thống lai giữa năng lượng mặt trời và pin nhiên liệu cho thấy hiệu suất vượt trội và mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi [1].

Tại Việt Nam, nhờ có tiềm năng bức xạ mặt trời dồi dào và đường bờ biển dài, việc phát triển hệ thống điện mặt trời đã có những bước nhảy vọt trong vòng 5 năm trở lại đây [11]. Tuy nhiên, sự “tăng trưởng nóng” cũng dẫn đến tình trạng dư thừa công suất ở nhiều thời điểm, gây áp lực lên lưới điện và làm giảm hiệu quả khai thác. Các chuyên gia nhận định rằng nguồn công suất dư thừa này có thể được sử dụng để sản xuất hydro xanh, qua đó đáp ứng nhu cầu nội địa cũng như mở ra khả năng xuất khẩu sang các quốc gia khác trong khu vực. Một nghiên cứu năm 2024 đã phân tích tính khả thi của việc xuất khẩu hydro từ Việt Nam sang các nước châu Á thông qua hệ thống năng lượng tái tạo lai, đánh dấu bước tiến quan trọng trong chiến lược năng lượng xanh khu vực [2].

Song song với đó, nhiều nghiên cứu trong nước tập trung khai thác tiềm năng sản xuất hydro từ hệ thống điện mặt trời mái nhà tại các khu công nghiệp [3], phù hợp với điều kiện hạ tầng và quy mô hiện có, qua đó giảm phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch [4]. Các chính sách và chiến lược phát triển liên quan đến kinh tế hydro cũng đang được khuyến khích, nhằm tạo nền tảng pháp lý và hỗ trợ tài chính cho các dự án thí điểm [5]. Về khía cạnh công nghệ, việc tích hợp pin nhiên liệu trong các hệ thống năng lượng mặt trời lai không chỉ dừng lại ở cấp độ hộ gia đình hay khu công nghiệp, mà còn được nghiên cứu áp dụng ở nhiều lĩnh vực khác như giao thông và công nghiệp nặng [6]. Thậm chí, một số phân tích đã gợi ý rằng, với các chính sách hỗ trợ mạnh mẽ, Việt Nam hoàn toàn có thể trở thành một trung tâm sản xuất và xuất khẩu hydro xanh trong khu vực châu Á – Thái Bình Dương [7].

Trên bình diện quốc tế, nhiều hướng tiếp cận mới cũng được đề cập, chẳng hạn như tích hợp công nghệ tế bào năng lượng mặt trời nhạy quantum-dot với pin nhiên liệu, hứa hẹn nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng [8]. Đồng thời, các báo cáo toàn diện về triển khai năng lượng tái tạo trong giai đoạn gần đây nhấn mạnh vai trò của công nghệ và đổi mới sáng tạo trong việc giải quyết các vấn đề môi trường và nâng cao hiệu quả vận hành hệ thống [9]. Quan điểm này nhất quán với xu hướng chung trên thế giới, khi ngày càng nhiều quốc gia coi việc phát triển hệ thống lai năng lượng mặt trời – pin nhiên liệu là giải pháp cốt lõi cho an ninh năng lượng và giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu [10], [12], [13].

Trong bối cảnh ấy, nghiên cứu này hướng tới phân tích kinh tế – kỹ thuật hệ thống lai giữa năng lượng mặt trời và pin nhiên liệu, với công suất cố định của hệ thống quang điện (PV) là 1 MW. Dữ liệu thời tiết từ NASA được sử dụng để mô phỏng công suất ngõ ra của hệ thống PV, phục vụ cho việc mô phỏng trên phần mềm HOMER Pro. Thông qua việc thay đổi công suất pin nhiên liệu, dung tích bình lưu trữ hydro cũng như các mức tải tiêu thụ (600 kW/ngày đến 1000 kW/ngày), kết quả cho thấy cấu hình tối ưu về mặt kinh tế đạt được khi sử dụng pin nhiên liệu PEM công suất 120 kW và bình lưu trữ hydro 120 kg, đáp ứng tải 1000 kW/ngày với chi phí đầu tư ban đầu ước tính 779.507 USD. Việc xác định cấu hình này không chỉ chứng minh tính khả thi về mặt kỹ thuật, mà còn mở ra triển vọng cho việc tận dụng công suất mặt trời dư thừa, sản xuất hydro xanh và hướng tới xuất khẩu, phù hợp với chiến lược phát triển bền vững của Việt Nam trong tương lai.

## 2. Mô hình hệ thống lai điện mặt trời và pin nhiên liệu

### 2.1. Mô hình mô phỏng

HOMER (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) [14] là một công cụ mô phỏng và tối ưu hóa hệ thống năng lượng lai, được phát triển bởi Phòng thí nghiệm Năng lượng tái tạo Quốc gia Hoa Kỳ (NREL). Phần mềm này được thiết kế chuyên biệt để đánh giá hiệu suất và tối ưu hóa hệ

thống năng lượng tái tạo, đặc biệt là các hệ thống kết hợp nhiều nguồn năng lượng. Với khả năng mô phỏng toàn diện, HOMER cho phép phân tích hoạt động của các thành phần như hệ thống quang điện (PV), pin nhiên liệu PEM, và bình lưu trữ hydro dựa trên dữ liệu thời tiết thực tế, đảm bảo độ chính xác cao trong quá trình mô hình hóa.

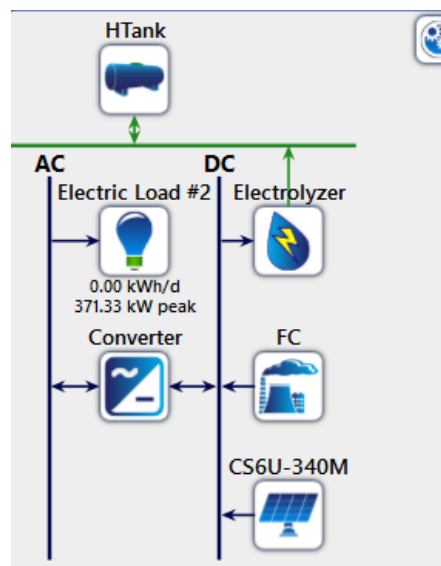
Bên cạnh đó, HOMER hỗ trợ tối ưu hóa các thông số kỹ thuật quan trọng như dung lượng lưu trữ, công suất thiết bị, và quy mô hệ thống nhằm xác định cấu hình có hiệu quả kinh tế - kỹ thuật tối ưu. Phần mềm cung cấp phân tích chi phí chi tiết, bao gồm chi phí đầu tư ban đầu, chi phí vận hành, và chi phí vòng đời (LCOE), giúp so sánh và lựa chọn phương án phù hợp nhất. Ngoài ra, tính năng phân tích độ nhạy của HOMER cho phép đánh giá tác động của các yếu tố biến động như giá năng lượng và tải tiêu thụ lên hiệu suất vận hành của hệ thống.

Trong nghiên cứu này, HOMER được sử dụng để mô phỏng và tối ưu hóa hệ thống lai giữa năng lượng mặt trời và pin nhiên liệu, với công suất quang điện cố định 1 MWp. Mức công suất này được lựa chọn dựa trên quy mô thương mại điển hình của hệ thống PV, tiềm năng phát điện trong điều kiện bức xạ mặt trời của Việt Nam, đồng thời tạo cơ sở tham khảo cho các dự án tương tự.

Hệ thống được đánh giá với ba mức tải tiêu thụ giả lập: 600 kW, 800 kW và 1000 kW, nhằm xác định cấu hình tối ưu, đảm bảo khả năng đáp ứng tải tiêu thụ một cách hiệu quả. Quá trình mô phỏng giúp phân tích khả năng vận hành của hệ thống trong các điều kiện tải khác nhau, từ đó đề xuất phương án tối ưu về cả mặt kinh tế và kỹ thuật.

Để tinh chỉnh phân tích, nghiên cứu đã đánh giá nhiều tổ hợp biến đầu vào, bao gồm công suất pin nhiên liệu PEM, công suất máy điện phân, dung tích lưu trữ hydro và tải tiêu thụ, nhằm xác định các cấu hình có chi phí đầu tư ban đầu thấp nhất và chi phí năng lượng trên mỗi kWh tối thiểu. Do số lượng tổ hợp khả dĩ quá lớn, việc tìm kiếm toàn diện là không khả thi. Thay vào đó, phương pháp tối ưu hóa bằng phần mềm HOMER Pro được áp dụng, ưu tiên các cấu hình có hiệu quả kinh tế cao nhất, đồng thời đảm bảo vận hành ổn định của hệ thống.

Hình 1 minh họa mô hình hệ thống lai giữa pin quang điện và pin nhiên liệu được thiết lập trong phần mềm HOMER.



Hình 1. Mô hình hệ thống lai pin quang điện và pin nhiên liệu.

## 2.2. Thiết đặt thông số mô phỏng

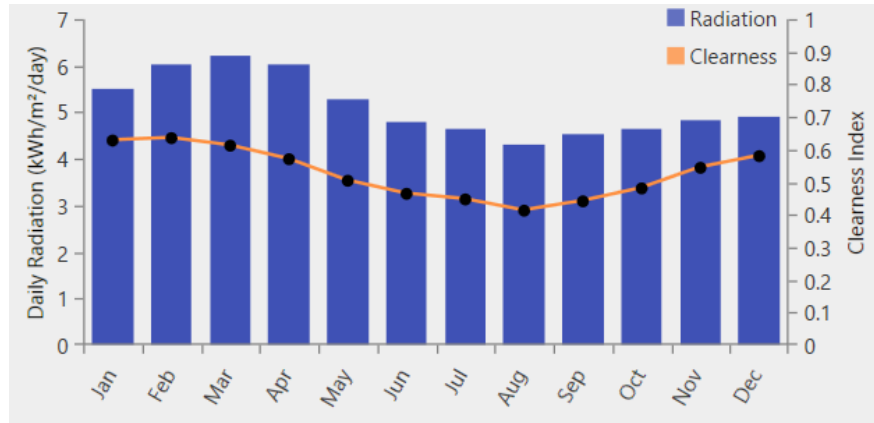
### 2.2.1. Thông số kỹ thuật

Mô phỏng được dựa trên các thông số kỹ thuật chi tiết bao gồm các thành phần chính của hệ thống năng lượng lai. Máy điện phân, chịu trách nhiệm sản xuất hydro, được cấu hình với hiệu suất 85%, công suất định mức dao động từ 10- 400 kW. Hệ thống pin nhiên liệu được xác định với công suất định mức

dao động từ 20-300 kW, vòng đời 40000 giờ. Hệ thống pin quang điện có tổng công suất lắp đặt là 1 MWp, hiệu suất tấm pin là 17.49%, và hoạt động dưới điều kiện bức xạ theo tháng tại tỉnh Ninh Thuận.

Hệ thống lưu trữ hydro được thiết kế với tổng dung lượng dao động từ 20 - 200kg. Cuối cùng, bộ chuyển đổi năng lượng, dùng để tích hợp các thành phần hệ thống khác nhau, được lựa chọn tối ưu hoá từ phần mềm HOMER.

Bên cạnh đó, phần mềm HOMER sử dụng dữ liệu thời tiết của NASA làm dữ liệu đầu vào để mô phỏng. Trong nghiên cứu này lựa chọn dữ liệu thời tiết bao gồm bức xạ mặt trời và nhiệt độ trung bình tại Bình Thuận để mô phỏng. Dữ liệu bức xạ mặt trời được trình bày ở hình 2.



Hình 2. Dữ liệu bức xạ mặt trời tại Bình Thuận

### 2.2.2. Thông số kinh tế

Để tính toán các chỉ tiêu kinh tế HOMER cần các dữ liệu đầu vào cơ bản như giá đầu tư, giá thay thế. Trong nghiên cứu này các thông số giá thành của các thiết bị được trình bày bảng 1.

Bảng 1. Thông số giá thành của thiết bị

STT	Tên thiết bị	Giá đầu tư
1	Pin quang điện CS6U-340M	150 USD/kW
2	PEM	650 USD/kW
3	Máy điện phân	1000 USD/kW
4	Bình đựng nhiên liệu Hydro	1400 USD/kg
5	Bộ biến đổi điện	300 USD/kg

### 2.2.3. Mô hình toán

HOMER tính toán các thông số ngõ ra của hệ thống lai Pin quang điện - pin nhiên liệu theo các công thức sau đây:

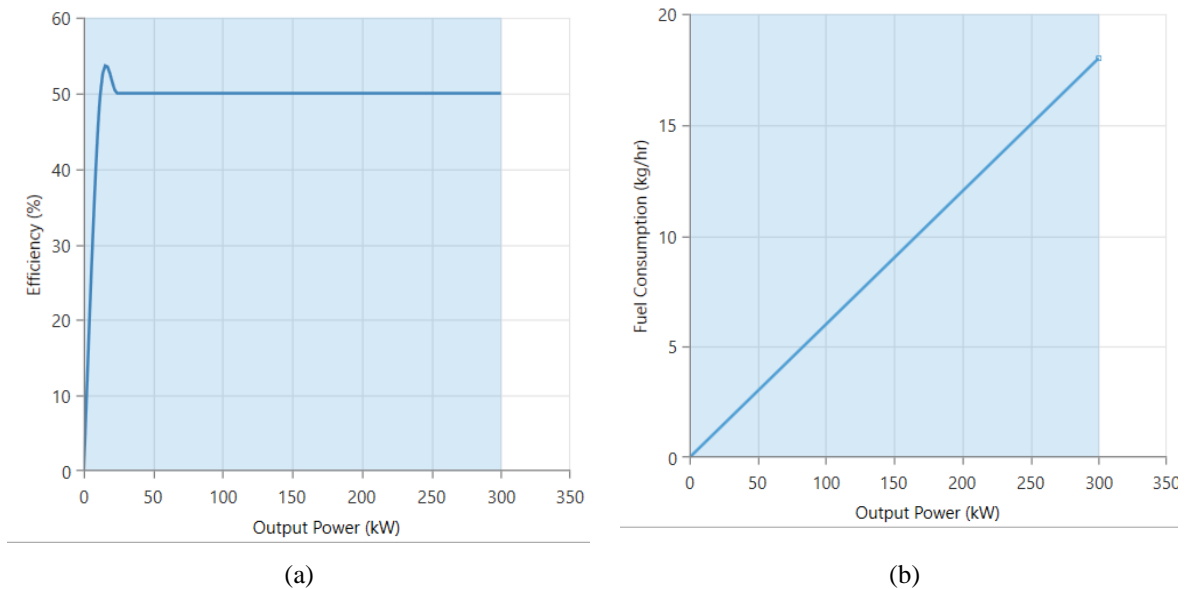
$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left( \frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (1)$$

Trong đó  $Y_{PV}$  là công suất định mức của dàn pin quang điện tại điều kiện chuẩn [kW],  $f_{PV}$  là hệ số suy giảm của pin quang điện [%],  $\bar{G}_T$  là bức xạ mặt trời tại thời gian hiện tại [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ],  $\bar{G}_{T,STC}$  là bức xạ chiếu tới trong điều kiện tiêu chuẩn (STC) [ $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ ],  $\alpha_p$  là hệ số nhiệt độ của công suất [%/°C],  $T_c$  là nhiệt độ của tế bào quang điện tại thời điểm hiện tại [°C],  $T_{c,STC}$  là nhiệt độ của tế bào quang điện tại điều kiện tiêu chuẩn (STC) [25°C].

Bên cạnh đó HOMER tính toán điện năng được tạo ra từ pin nhiên liệu thông qua hai phương pháp chính, tùy thuộc vào độ chi tiết của dữ liệu đầu vào và yêu cầu mô hình. Phương pháp tuyến tính đơn giản sử dụng một phương trình tuyến tính để mô phỏng mối quan hệ giữa công suất đầu ra và mức tiêu thụ nhiên liệu. Trong phương pháp này, công suất định mức của pin nhiên liệu được sử dụng làm giới hạn tối đa, trong khi tiêu thụ nhiên liệu được tính toán dựa trên công thức:

$$\text{Mức tiêu thụ nhiên liệu (kg/giờ)} = \text{Hệ số chặn} + (\text{Độ dốc} \times \text{Công suất đầu ra (kW)}) \quad (2)$$

với hệ số chặn (Intercept Coefficient) và độ dốc tiêu thụ nhiên liệu (Slope) được xác định trước. Ngược lại, phương pháp sử dụng bảng dữ liệu hiệu suất (Fuel Curve Table) dựa trên các thông số thực nghiệm chi tiết. HOMER sử dụng một bảng tra cứu mô tả mối quan hệ phi tuyến giữa công suất đầu ra và tiêu thụ nhiên liệu tại từng mức tải cụ thể. Điều này cho phép mô phỏng chính xác hơn các đặc tính vận hành thực tế của pin nhiên liệu, đặc biệt khi hiệu suất thay đổi theo mức tải. Trong nghiên cứu này sử dụng dữ liệu tham chiếu 0.06kg/kWh xem hình 3 đối với máy phát pin nhiên liệu có công suất là 300kW.



**Hình 3.** Mối quan hệ phi tuyến giữa công suất đầu ra và tiêu thụ nhiên liệu và hiệu suất. (a) Hiệu suất và công suất ngõ ra; (b) Mức tiêu thụ hydro và công suất ngõ ra

Ngoài ra, thời gian tự chủ của bình chứa hydro  $A_{\text{htank}}$  được tính toán để xác định khoảng thời gian mà bình chứa hydro có thể đáp ứng nhu cầu năng lượng trung bình của hệ thống. Công thức tính toán như công thức số (3).

$$A_{\text{htank}} = \frac{Y_{\text{htank}} LHV_{H_2} (24h / d)}{L_{\text{prim,ave}} (3.6MJ / kWh)} \quad (3)$$

Trong đó  $A_{\text{htank}}$  là thời gian tự chủ của bình chứa hydro (giờ),  $Y_{\text{htank}}$  là dung tích của bình chứa hydro (kg),  $LHV_{H_2}$  là Giá trị nhiệt thấp của hydro (120 MJ/kg), đại diện cho năng lượng hóa học có trong mỗi kg hydro,  $L_{\text{prim,ave}}$  là tải tiêu thụ trung bình của hệ thống (kWh/ngày), 3.6 là hệ số chuyển đổi từ megajoule (MJ) sang kilowatt-giờ (kWh) và 24 là số giờ trong một ngày, để quy đổi mức tải từ kWh/ngày sang kWh/giờ.

### 3. Kết quả và thảo luận

HOMER được sử dụng để tối ưu hóa cấu hình của hệ thống năng lượng lai nhằm đảm bảo cung cấp điện ổn định với chi phí đầu tư tối thiểu. Phần mềm này dựa trên việc phân tích các tổ hợp nguồn năng

lượng khác nhau và so sánh chi phí vòng đời để lựa chọn phương án tối ưu. Kết quả mô phỏng hệ thống lai giữa pin quang điện và pin nhiên liệu PEM được trình bày tại Bảng 2 cho thấy khả năng cao trong việc đảm bảo cung cấp điện liên tục, nhờ vào sự kết hợp hiệu quả giữa các khâu sản xuất, lưu trữ và tiêu thụ năng lượng.

Cụ thể, công suất hệ thống PV được giữ cố định ở mức 1000 kWp trong cả ba kịch bản. Điều này cho phép hệ thống tạo ra hơn 1,58 triệu kWh điện mỗi năm, đồng thời có khả năng dư thừa năng lượng để vận hành máy điện phân nhằm sản xuất và lưu trữ hydro. Ở mức tải tiêu thụ cao (1000 kWh/ngày), hiệu suất hệ thống đạt được mức tối ưu nhờ lựa chọn kích thước máy điện phân là 350 kW và bình chứa hydro 120 kg. Nhờ vậy, chi phí năng lượng giảm xuống chỉ còn 0,353 USD/kWh – thấp hơn so với các kịch bản tải tiêu thụ thấp hơn.

**Bảng 2.** Kết quả mô phỏng kinh tế kỹ thuật hệ thống lai pin quang điện và pin nhiên liệu

Tải tiêu thụ (kW)	Công suất pin quang điện (kWp)	Công suất pin nhiên liệu (kW)	Công suất máy điện phân (kW)	Bình chứa Hydro (kg)	Chi phí đầu tư ban đầu (USD)	Chi phí năng lượng (USD/kWh)	Tổng sản lượng điện kWh/năm	Tổng sản lượng Hydro tạo ra (kg/yr)	Tổng điện tạo ra từ pin nhiên liệu (kWh/yr)
1000	1000	120	350	120	779,507	0.353	1,661,584	11,395	189,888
800	1000	100	250	40	548,850	0.339	1,622,011	9,025	150,316
600	1000	100	150	40	441,017	0.4	1,583,206	6,705	111,511

Dựa trên các thông số vận hành của ba phương án cố định công suất lắp đặt pin quang điện là 1000kW như bảng 3, có thể nhận định rằng, nhu cầu tải khác nhau (lần lượt 1.000, 800 và 600 kW) đã ảnh hưởng trực tiếp đến lượng nhiên liệu tiêu thụ, thời gian hoạt động của pin nhiên liệu và sản lượng điện do pin nhiên liệu tạo ra. Cụ thể, khi tải là 1.000 kW, hệ thống cần 11.393,3 kg nhiên liệu mỗi năm và pin nhiên liệu vận hành 5.103 giờ, tạo ra 189.888,3 kWh điện, trong khi sản lượng từ pin quang điện vẫn duy trì khoảng 1.471.695 kWh. Ở mức tải 800 kW, tổng nhiên liệu tiêu thụ giảm xuống còn 9.018,944 kg/năm, số giờ hoạt động của pin nhiên liệu cũng giảm (4.997 giờ), dẫn đến sản lượng điện từ pin nhiên liệu thấp hơn (150.315,7 kWh), nhưng sản lượng từ pin quang điện không đổi. Tương tự, trong kịch bản tải 600 kW, nhu cầu về nhiên liệu và thời gian chạy pin nhiên liệu tiếp tục giảm (6.690,64 kg/năm; 4.879 giờ), khiến sản lượng điện từ pin nhiên liệu đạt mức 111.510,7 kWh.

Như vậy, việc giảm quy mô tải tiêu thụ làm giảm đáng kể vai trò hỗ trợ của pin nhiên liệu, đồng nghĩa với việc giảm lượng hydro cần thiết và chi phí vận hành liên quan. Tuy nhiên, sản lượng điện từ pin quang điện vẫn được duy trì ổn định, phản ánh rõ tính linh hoạt của mô hình lai khi phối hợp giữa nguồn năng lượng mặt trời và pin nhiên liệu. Trong các kịch bản tải khác nhau, hệ thống vẫn đảm bảo cung cấp điện liên tục nhờ khả năng tích trữ năng lượng dưới dạng hydro và phát điện bù đắp từ pin nhiên liệu, qua đó nâng cao độ tin cậy cấp điện cho các mức tải đa dạng.

**Bảng 3.** Kết quả mô phỏng thông số vận hành hệ thống lai pin quang điện và pin nhiên liệu theo tải

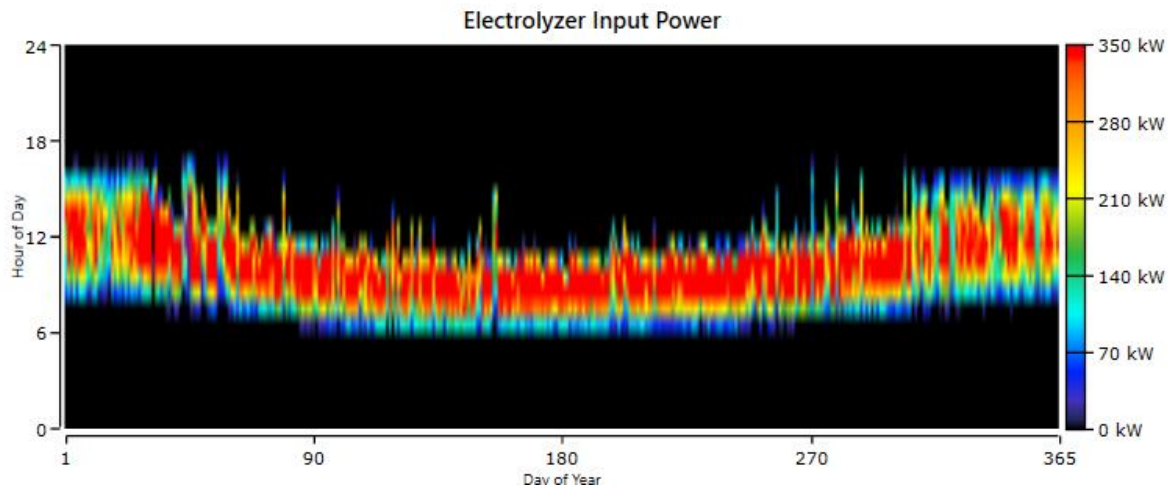
Tải	Tổng nhiên liệu (kg/yr)	Thời gian hoạt động Pin nhiên liệu (Giờ)	Sản lượng điện do pin nhiên liệu tạo ra (kWh)	Sản lượng do pin quang điện tạo ra (kWh)
1000kW	11393.3	5103	189888.3	1471695
800kW	9018.944	4997	150315.7	1471695
600kW	6690.64	4879	111510.7	1471695

Bên cạnh đó, kết quả mô phỏng công suất đầu vào máy điện phân, công suất đầu ra của máy phát, và mức tồn trữ hydro trong suốt một năm vận hành, phản ánh sự phối hợp giữa hệ thống quang điện và pin

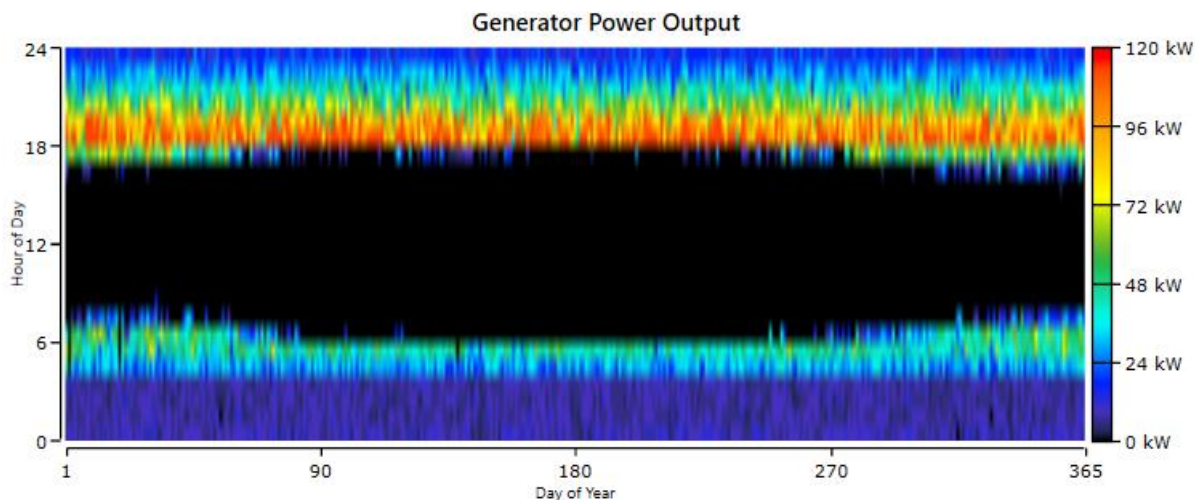
nhiên liệu được trình bày lần lượt như hình 4, hình 5 và hình 6. Các biểu đồ cho thấy khả năng phối hợp nhịp nhàng giữa thành phần quang điện và pin nhiên liệu trong hệ thống lai, thông qua ba khía cạnh chính. Thứ nhất, phân bố năng lượng đầu vào của máy điện phân theo thời gian phản ánh rõ việc khai thác nguồn năng lượng dư từ quang điện vào ban ngày để chuyển hóa thành hydro. Phân bố màu sắc chủ đạo ở mức công suất cao (vùng đỏ, vàng) xuất hiện trong khung giờ 6–18 giờ, cho thấy lượng điện dư đủ lớn để vận hành máy điện phân gần mức danh định (lên đến 350 kW).

Thứ hai, biểu đồ phân bố sản lượng của pin nhiên liệu theo thời gian minh họa sự bù đắp công suất từ pin nhiên liệu hoặc máy phát chạy bằng hydro trong các khoảng thời gian nguồn quang điện không đủ, thường về đêm hoặc khi bức xạ mặt trời xuống thấp. Dải màu đen ở vùng giữa biểu đồ (khoảng 10–18 giờ) chứng tỏ máy phát gần như không cần hoạt động trong thời điểm ban ngày, do đã được thay thế hoàn toàn bởi công suất từ hệ thống pin quang điện.

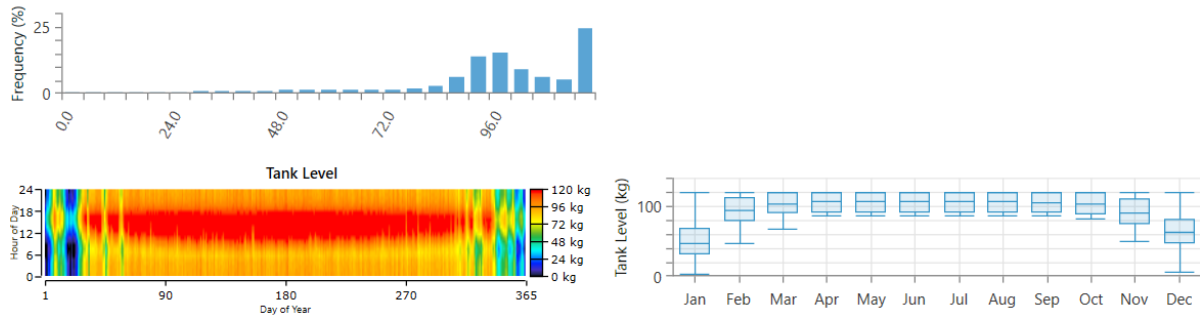
Cuối cùng, biểu đồ mức lưu trữ hydro và phân bố tần suất cho thấy bình chứa duy trì ở ngưỡng cao (thường trên 72 kg, nhiều lúc đạt đến 120 kg), đặc biệt vào các tháng bức xạ tốt; đồng thời, mức lưu trữ có xu hướng giảm nhẹ vào giai đoạn bức xạ thấp, nhưng vẫn đủ cung cấp nhiên liệu cho máy phát. Tổng hợp các kết quả này cho thấy hệ thống lai đã tận dụng tối đa công suất pin quang điện để sản xuất và dự trữ hydro, bảo đảm cung cấp điện liên tục và ổn định, qua đó khẳng định tiềm năng của chiến lược lưu trữ năng lượng dưới dạng hydro trong mô hình năng lượng tái tạo.



**Hình 4.** Thời gian hoạt động và phân bố năng lượng đầu vào của máy điện phân @ tải 1000kW



**Hình 5.** Thời gian hoạt động và phân bố sản lượng của pin nhiên liệu @ tải 1000kW



Hình 6. Phân bố thời gian và dung lượng của bình chứa hydro@ tải 1000kW

#### 4. Triển vọng phát triển hydro xanh tại Việt Nam

Hiện nay, hydro xanh đang được đánh giá là một giải pháp triển vọng trong quá trình chuyển đổi năng lượng bền vững của Việt Nam, dựa trên tiềm năng năng lượng tái tạo dồi dào và xu thế phát triển kinh tế xanh. Nghiên cứu về hệ thống lai giữa pin quang điện và pin nhiên liệu cho thấy việc tận dụng nguồn năng lượng mặt trời dư thừa để sản xuất hydro thông qua quá trình điện phân có thể đạt hiệu quả cao. Cụ thể, tổng lượng nhiên liệu tiêu thụ lên tới 11.393,3 kg/năm và sản lượng điện từ pin nhiên liệu đạt 189.888,3 kWh tại mức tải 1000 kW. Kết quả này chứng tỏ hydro xanh không chỉ đóng vai trò như một giải pháp lưu trữ năng lượng hiệu quả mà còn có thể tái sử dụng để phát điện, hỗ trợ cân bằng tải, đặc biệt hữu ích trong giai đoạn bức xạ mặt trời thấp hoặc khi nhu cầu tăng cao.

Bên cạnh đó, việc duy trì sản lượng điện từ pin quang điện ở mức ổn định (1.471.695 kWh/năm) qua các kịch bản tải khác nhau cho thấy tính bền vững và tiềm năng mở rộng mô hình này tại những khu vực vùng sâu, vùng xa và hải đảo, nơi lưới điện chưa thực sự ổn định. Tuy nhiên, quá trình phát triển hydro xanh tại Việt Nam vẫn đối mặt với nhiều thách thức, trong đó có chi phí sản xuất cao, hạ tầng lưu trữ và vận chuyển chưa đồng bộ, cũng như hạn chế về chính sách và khung pháp lý.

Để thúc đẩy hydro xanh, Việt Nam cần đầu tư mạnh mẽ vào nghiên cứu, phát triển công nghệ, xây dựng hạ tầng phù hợp, đồng thời ban hành các chính sách hỗ trợ ưu đãi. Mặt khác, việc tham gia sâu rộng vào các chương trình hợp tác quốc tế không chỉ giúp tiếp cận công nghệ tiên tiến mà còn góp phần quan trọng trong việc tìm kiếm nguồn tài trợ cho các dự án thí điểm. Nếu được hoạch định và triển khai hiệu quả, hydro xanh có thể trở thành một nhân tố then chốt, đảm bảo an ninh năng lượng, giảm phát thải nhà kính và thúc đẩy tăng trưởng kinh tế bền vững cho Việt Nam.

#### 5. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày phân tích kinh tế – kỹ thuật hệ thống lai giữa pin quang điện và pin nhiên liệu với công suất PV lắp đặt cố định 1000 kW, và xét các kịch bản tải 1000 kW, 800 kW, cũng như 600 kW. Kết quả cho thấy sản lượng điện từ hệ thống pin quang điện duy trì ổn định ở mức 1.471.695 kWh, trong khi sản lượng điện từ hệ thống pin nhiên liệu biến động từ 111.510 đến 1.661.584 kWh tùy theo kịch bản tải. Chi phí sản xuất năng lượng dao động trong khoảng 0,33–0,44 USD/kWh; đáng chú ý là khi tải giảm, vai trò bổ trợ của pin nhiên liệu cũng giảm, dẫn đến chi phí năng lượng tăng do hiệu ứng kinh tế quy mô bị hạn chế, với mức cao nhất (0,4 USD/kWh) tại kịch bản tải 600 kW.

Đồng thời, nghiên cứu làm rõ tính hiệu quả về mặt cung cấp điện khi kết hợp PV và pin nhiên liệu, nhất là trong việc tận dụng nguồn năng lượng mặt trời dư thừa để sản xuất hydro thông qua quá trình điện phân. Cụ thể, tổng lượng hydro tiêu thụ đạt 11.393,3 kg/năm và sản lượng điện từ pin nhiên liệu lên tới 189.888,3 kWh tại kịch bản tải 1000 kW, chứng minh hydro xanh là giải pháp lưu trữ năng lượng hiệu quả và hỗ trợ cân bằng tải, đặc biệt trong các giai đoạn bức xạ mặt trời thấp hoặc nhu cầu tăng cao.

#### Xung đột lợi ích

Chúng tôi tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

#### Tuyên bố dữ liệu sẵn có

Dữ liệu nghiên cứu của bài báo là sẵn có.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. A. Nguyen and S. B. Park, "Hybrid solar and fuel cell systems for unmanned aerial vehicles: A performance evaluation," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1234–1242, Oct. 2020.
- [2] K. T. Tran, "Feasibility study on hydrogen export from Vietnam to Asia using hybrid renewable energy systems," *Appl. Energy*, vol. 350, p. 123456, 2024.
- [3] J. S. Park, "Production of hydrogen from rooftop solar in industrial zones: A case study," in *Proc. 2022 Int. Conf. Renew. Energy Eng.*, 2022, pp. 96–104.
- [4] E. Brown, "Evaluation of fuel cell integration with renewable energy systems for reduced fossil fuel dependence," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 45–53, 2021.
- [5] Ministry of Industry and Trade of Vietnam, "Policy framework and strategy for hydrogen energy development in Vietnam," 2021.
- [6] S. Roberts, "Optimal design of hybrid fuel cell systems for industrial and transportation applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 210, p. 112345, 2022.
- [7] L. T. Nguyen and T. D. Do, "Vietnam as a green hydrogen hub: Potential and policy implications," *Renew. Energy*, vol. 190, pp. 150–159, 2023.
- [8] A. B. Smith, "Quantum-dot sensitized solar cells for fuel cell integration," *J. Power Sources*, vol. 478, p. 228904, 2023.
- [9] Ministry of Science and Technology of Vietnam, "Challenges and opportunities for renewable energy deployment in Vietnam," 2022.
- [10] J. M. Hodgson, "Hybrid solar-fuel cell systems for sustainable development: A global overview," *Sustain. Dev. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 12–21, 2023.
- [11] Ministry of Industry and Trade (Bộ Công Thương), "Báo cáo về tình hình phát triển điện mặt trời tại Việt Nam," Hanoi, Vietnam, 2022.
- [12] BloombergNEF, "Asia's Emerging Hydrogen Economies Report," 2023.
- [13] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2021*. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>. [Accessed: 01-Jan-2025].
- [14] HOMER software. Available: <https://www.homerenergy.com/>



**Trung Le Phuong** is a lecturer in the Faculty of Mechatronics and electronics at Lac Hong University (LHU) in Bien Hoa, Vietnam. He earned his B.Eng., M.Eng., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Lac Hong University (Vietnam), Southern Taiwan University of Science and Technology, and Da Yeh University (Taiwan) in 2005, 2010, and 2016, respectively. Currently, he serves as the Head of the Renewable Energy Research Group at Lac Hong University. His research interests encompass the fields of solar energy, the Internet of Things, and renewable energy. For inquiries, he can be reached via email [lephuongtruong@lhu.edu.vn](mailto:lephuongtruong@lhu.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6691-9755>



**Lê Phương Long** is a lecturer and researcher at Lac Hong University (LHU). He earned a Bachelor degree at Lac Hong University, a Master's degree at National Kaohsiung University of Applied Science, and a PhD degree at National Chung Cheng University. He works in the field of energy efficiency. His study focuses on ICE energy efficiency, battery electric energy efficiency, fuel cell energy efficiency. He can be contacted via email at [phuonglong@lhu.edu.vn](mailto:phuonglong@lhu.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0228-2377>



**Bùi Văn Trí** is a lecturer Faculty of Electricals and Electronics at Posts and Telecommunications Institute of Technology. He graduated with a major in electrical and electronics in 2000, and a master's degree in Electrical Engineering in 2005 from Ho Chi Minh City University of Technical and Education. In 2020, he graduated with a doctorate in electrical engineering at Ho Chi Minh City University of Technology. His research direction Applying Neural network - fuzzy SVC control to improve dynamic voltage stability of power grids connecting wind power plants, solar energy, the Internet of Things, and renewable energy. For inquiries, he can be reached via email at [tribuvan@ptithcm.edu.vn](mailto:tribuvan@ptithcm.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0000-2813>



**Nguyễn Hữu Quang** is a researcher in the field of electrical engineering at Lac Hong University. He graduated with a degree in Electrical Engineering from Thu Dau Mot University (Binh Duong Province) in 2019. Currently, he works at Sunlight Electrical Vietnam, a company specializing in the production of low-voltage switchboards. He has six years of experience in the field of switchgear and electrical panels. Email: [nguuquang86@gmail.com](mailto:nguuquang86@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9490-6791>