

# TỐI ƯU HIỆU QUẢ CHI PHÍ LẮP ĐẶT HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI TẠI TÒA NHÀ E, TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC

PHAN THỊ LAN HƯƠNG<sup>1\*</sup> - VŨ TUYẾT CHI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Khoa Quản lý Công nghiệp và Năng lượng, Trường Đại học Điện lực  
Faculty of Energy and Industry Management, Electric Power University

\* Tác giả liên hệ - Email: huongptl@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 18/6/2026

Ngày sửa chữa bài: 30/6/2026

Ngày duyệt đăng: 15/7/2026

## Tóm tắt:

Nghiên cứu đánh giá hiệu quả vận hành hệ thống điện mặt trời mái nhà công suất 6,16 kWp tại tòa nhà E, Trường Đại học Điện lực, dựa trên dữ liệu phụ tải, sản lượng phát điện thực tế và các thông số kỹ thuật của hệ thống. Kết quả cho thấy, hệ thống tạo ra khoảng 6.128,12 kWh/năm, đáp ứng khoảng 0,46% nhu cầu điện của tòa nhà, tiết kiệm khoảng 13,10 triệu đồng và giảm 4,04 tấn CO<sub>2</sub> mỗi năm. Nghiên cứu đồng thời xây dựng mô hình quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp nhằm tối ưu cơ cấu công nghệ điện mặt trời, pin lưu trữ và điện lưới. Kết quả tối ưu cho thấy, tỷ lệ điện mặt trời phù hợp về chi phí đạt khoảng 15,3%, góp phần giảm chi phí năng lượng và phát thải.

**Từ khóa:** điện mặt trời mái nhà, hiệu quả vận hành, quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp, giảm phát thải CO<sub>2</sub>, tối ưu hóa năng lượng

## Cost-effective optimization of a rooftop solar photovoltaic system at Building E, Electric Power University

### Abstract:

This study evaluates the operational performance of a 6.16 kWp rooftop photovoltaic system at Building E, Electric Power University, using actual load data, electricity generation records, and system specifications. The system generates approximately 6,128.12 kWh annually, meeting about 0.46% of the building's electricity demand, saving around VND 13.10 million, and reducing CO<sub>2</sub> emissions by 4.04 tons per year. A mixed-integer linear programming model is also developed to optimize the combination of solar photovoltaic generation, battery storage, and grid electricity. The optimal solution indicates that a solar electricity share of approximately 15.3% provides a suitable cost-effective configuration while reducing energy costs and emissions. The findings provide a basis for expanding rooftop solar deployment and improving energy management at the university.

**Keywords:** rooftop photovoltaic system, operational performance, mixed-integer linear programming, CO<sub>2</sub> emission reduction, energy optimization.

## 1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng ngày càng tăng, việc sản xuất điện từ nhiên liệu hóa thạch đang làm gia tăng phát thải khí nhà kính, ô nhiễm môi trường và áp lực lên hệ thống điện quốc gia. Vì vậy, phát triển năng lượng tái tạo, đặc biệt là điện mặt trời, là giải pháp cần thiết nhằm giảm phát thải, tiết kiệm chi phí và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng.

Tại Trường Đại học Điện lực, hệ thống điện mặt trời tại tòa nhà E vừa có ý nghĩa cung cấp điện, vừa phục vụ đào tạo và nghiên cứu. Hệ thống giúp sinh viên tiếp cận công nghệ điện mặt trời, nguyên lý vận hành và phương pháp đánh giá hiệu quả kinh tế - môi trường. Tuy nhiên, quy mô hiện tại còn nhỏ và chưa đáp ứng đáng kể nhu cầu phụ tải. Do đó, nghiên cứu tập trung đánh giá hiện trạng và xây dựng mô hình tối ưu nhằm xác định quy mô lắp đặt phù hợp, giảm lượng điện năng mua từ lưới, giúp tiết kiệm chi phí và hạn chế phát thải carbon.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

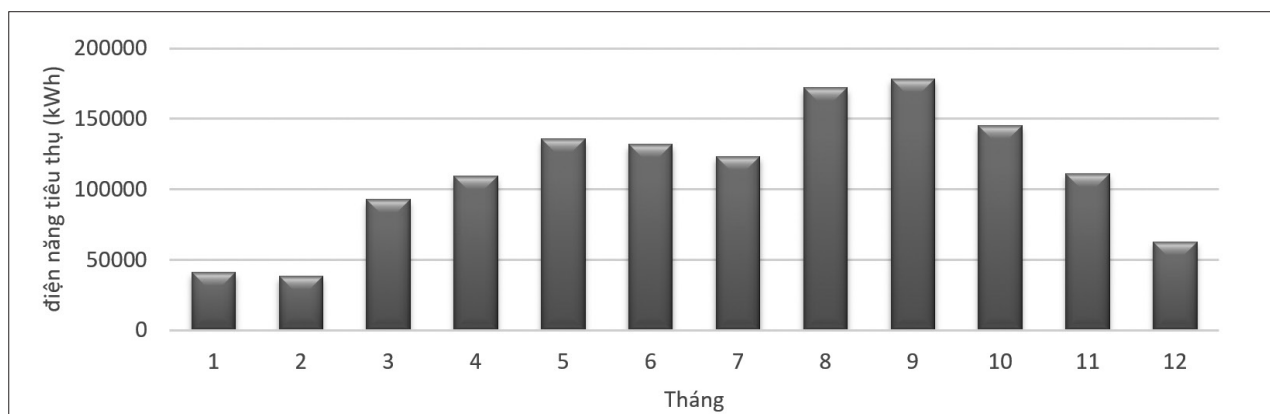
Nghiên cứu được thực hiện tại tòa nhà E, Trường Đại học Điện lực trong giai đoạn 2023-2025. Đối tượng nghiên cứu là hệ thống điện mặt trời mái nhà công suất 6,16 kWp, gồm 14 tấm pin Risen 440 Wp và bộ nghịch lưu Huawei SUN2000-5KTL-L1 công suất 5 kW, cùng phụ tải điện của tòa nhà. Nghiên cứu sử dụng phương pháp định lượng kết hợp tổng quan tài liệu, khảo sát hiện trạng và phân tích dữ liệu vận hành. Số liệu được thu thập toàn bộ từ công tơ điện, hệ thống giám sát FusionSolar, thông số bức xạ và hồ sơ kỹ thuật; không thực hiện điều tra chọn mẫu. Dữ liệu được xử lý theo thời gian để xác định sản lượng, suất phát điện, tỷ lệ đáp ứng phụ tải, chi phí tiết kiệm và lượng CO<sub>2</sub> giảm phát thải. Mô hình quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp được xây dựng để tối ưu cơ cấu công nghệ, dung lượng lưu trữ và điện mua từ lưới dưới các ràng buộc kỹ thuật, diện tích và chi phí.

## 3. Hiện trạng nhu cầu tiêu thụ điện và hệ thống pin mặt trời tòa nhà E, Trường Đại học Điện lực

### 3.1. Nhu cầu tiêu thụ điện tại tòa nhà E

Công trình nhà E phục vụ nhiều chức năng như đào tạo, nghiên cứu, hành chính và tổ chức sự kiện. Tầng 1 bố trí các phòng chức năng; tầng 2 đến tầng 6 là khu vực phòng học; tầng 7 và tầng 8 chủ yếu là phòng thí nghiệm; tầng 9 là hội trường; tầng hầm được sử dụng làm nơi để xe. Do có nhiều chức năng, tòa nhà hoạt động trong phần lớn thời gian trong ngày. Khu vực hành chính hoạt động theo giờ hành chính, các phòng học được sử dụng vào cả sáng, chiều và tối, trong khi phòng thí nghiệm chủ yếu hoạt động ban ngày và hội trường được sử dụng theo lịch sự kiện. Vì vậy, nhu cầu tiêu thụ điện của tòa nhà tương đối lớn và ổn định. Các phụ tải chính gồm hệ thống chiếu sáng, điều hòa không khí, quạt trần, thang máy, máy tính, máy chiếu, tivi, loa, camera, hệ thống thông gió và các thiết bị phụ trợ. Trong đó, điều hòa không khí và chiếu sáng chiếm tỷ trọng đáng kể do số lượng thiết bị lớn và thời gian vận hành kéo dài. Hình dưới đây thể hiện điện năng tiêu thụ của tòa E trong một năm điển hình.

**Hình 1. Tiêu thụ điện tại tòa nhà E trong năm điển hình**



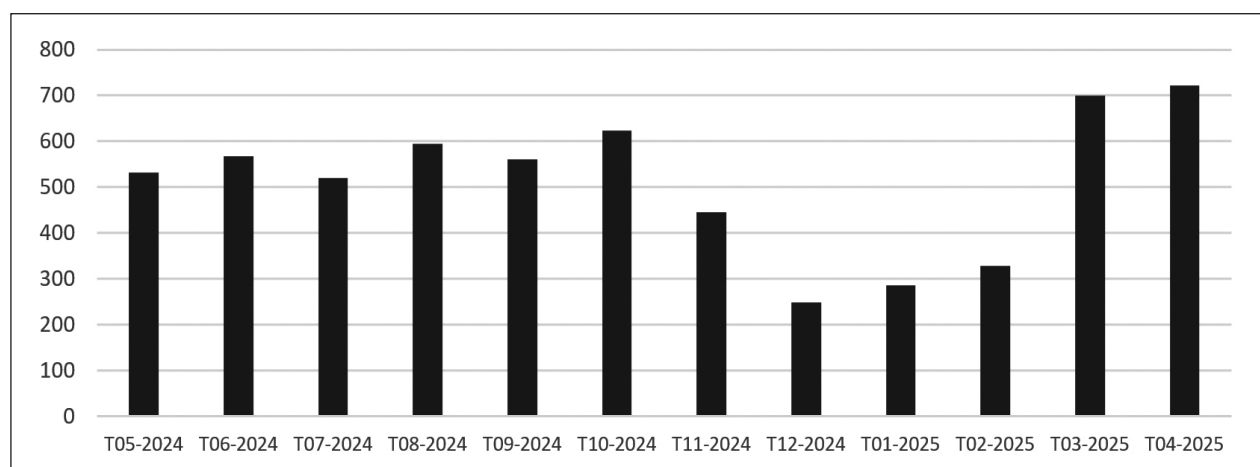
Nhu cầu tiêu thụ điện của tòa nhà E có sự biến động rõ rệt theo thời gian trong năm, chủ yếu chịu ảnh hưởng của điều kiện thời tiết và lịch học của Nhà trường. Trong các tháng 1, 2 và 12, nhu cầu điện ở mức thấp do đây là thời kỳ mùa đông, nhiệt độ thấp nên nhu cầu sử dụng điều hòa không khí giảm, điện năng chủ yếu được sử dụng cho chiếu sáng và các thiết bị phục vụ hoạt động cơ bản. Bên cạnh đó, trong khoảng tháng 1 và tháng 12 thường diễn ra kỳ nghỉ Tết và thời gian nghỉ sau thi học kỳ, làm cho tỷ lệ sử dụng và vận hành các phòng học thấp hơn so với các tháng thông thường.

### 3.2. Hệ thống pin mặt trời tại tòa nhà E, Trường Đại học Điện lực

Hệ thống điện mặt trời có công suất thiết kế là 6.16 kWp, sử dụng 14 tấm pin Risen 440 Wp/tấm, 1 bộ nghịch lưu Huawei SUN2000-5KTL-L1 có công suất là 5 kW. Các tấm pin được chia ra thành 2 chuỗi, mỗi chuỗi gồm 7 tấm. Hệ thống này thiết lập tỷ lệ vượt tải DC/AC khoảng 1,23 (6.16/5).

Về kết cấu, các tấm pin được lắp cố định trên mái tôn bằng giá đỡ nhôm chuyên dụng. Với điều kiện khí hậu ở Hà Nội, suất phát điện điển hình dự kiến đạt được khoản từ 3,5 đến 4,5 kWh/kWp/ngày, tương ứng với suất phát điện riêng của hệ thống được xác định ở mức xấp xỉ 930 đến 970 kWh/kWp/năm.

Hình 2. Sản lượng điện mặt trời tòa nhà E (05/2024 - 04/2025)



Nguồn: FusionSolar

Tổng sản lượng điện năng sinh ra hàng ngày của toàn hệ thống được ước tính đạt từ 21 đến 28 kWh/ngày và tổng sản lượng điện năng cung cấp trong một năm dự kiến đạt khoảng 5.700 đến 6.000 kWh/năm. Hệ thống đạt đỉnh công suất trong khung giờ từ 11h-13h. Sản lượng điện mặt trời từ hệ thống pin mặt trời trong giai đoạn 5/2024- 4/2025 đạt khoảng 6.182,12 kWh (Hình 2).

## 4. Mô hình tối ưu hóa chi phí hằng năm cho hệ thống điện tòa nhà E

### 4.1. Mô hình tối ưu hóa

Mô hình quy hoạch tuyến tính hỗn hợp nguyên (MILP) dưới đây xác định cấu hình lắp đặt tối ưu (công suất điện mặt trời và dung lượng pin lưu trữ) cùng chiến lược vận hành nhằm tối thiểu hóa tổng chi phí năng lượng quy đổi hằng năm, có xét đến chi phí phát thải carbon.

Hàm mục tiêu:

Tối thiểu hóa:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} c_i^R g_{it}^R + \sum_{t \in T} c^{SF} g_t^{SF} + c^{Bat} (B^R + B^{SF}) + \sum_{t \in T} c^{Grid} G_t + c^{Emiss} \sum_{t \in T} f_t G_t$$

Các ràng buộc của mô hình:

$$g_{it}^R = e_{it}^R N_i^R \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (1)$$

$$g_t^{SF} = e_t^{SF} N^{SF} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$N_i^R \leq MX_i^R \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$N^{SF} \leq MX^{SF} \quad (4)$$

$$B^R \leq M \sum_{i=1}^I X_i^R \quad (5)$$

$$B^{SF} \leq MX^{SF} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} a_i^R N_i^R \leq a_R^{Max} \quad (7)$$

$$a^{SF} N^{SF} \leq a_F^{Max} \quad (8)$$

$$S_t^{Sola} = S_t^R + S_t^{SF} \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$b_t^R = b_{t-1}^R + \sum_{i \in I} g_{it}^R - S_t^R - S_t^{Rwaste} \quad \forall t \in T, t \geq 2 \quad (10)$$

$$b_t^R = \sum_{i \in I} g_{it}^R - S_t^R - S_t^{Rwaste} \quad t=1 \quad (11)$$

$$b_t^R \leq B^R \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$b_t^{SF} = b_{t-1}^{SF} + g_t^{SF} - S_t^{SF} - S_t^{SFwaste} \quad \forall t \in T, t \geq 2 \quad (13)$$

$$b_t^{SF} = g_t^{SF} - S_t^{SF} - S_t^{SFwaste} \quad t=1 \quad (14)$$

$$b_t^{SF} \leq B^{SF} \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$S_t^{Sola} + G_t = D_t \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} S_t^{Sola} \geq r^{Quo} \sum_{i \in I} D_t \quad (17)$$

$$g_{it}^R, e_{it}^R \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$B^R, B^{SF} \geq 0 \quad (19)$$

$$N_i^R \in Z^+ \quad \forall i \in I \quad (20)$$

$$N^{SF} \in Z^+ \quad (21)$$

$$e_t^{SF}, g_t^{SF}, b_t^{SF}, b_t^R, S_t^R, S_t^{SF}, S_t^{Sola}, G_t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$S_t^{Rwaste}, S_t^{SFwaste} \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (23)$$

$$X_i^R, X^{SF} = \{0;1\} \quad \forall i \in I \quad (24)$$

Hàm mục tiêu (0) nhằm tối thiểu hóa tổng chi phí quy đổi hằng năm của hệ thống cung cấp điện cho tòa nhà E, gồm chi phí điện mặt trời, pin lưu trữ, điện lưới và phát thải carbon. Trong đó,  $c_i^R$  là chi phí điện quy dẫn (LCOE) của công nghệ điện mặt trời áp mái loại  $i$  (VND/kWh);  $i$  thuộc  $I$  là tập các loại công nghệ pin mặt trời áp mái.  $g_{it}^R$  là sản lượng điện của công nghệ điện áp mái loại  $i$  tại thời điểm  $t$  (kWh);  $t$  thuộc  $T$  là tập các chỉ số thời gian xét trong kỳ. Tổng chi phí điện mặt trời áp mái được tính bằng cách cộng chi phí của tất cả công nghệ và các khoảng thời gian. Chi phí Smartflower được xác định tương tự theo sản lượng điện tạo ra  $g_t^{SF}$  và LCOE tương ứng  $c^{SF}$ . Chi phí pin lưu trữ được xác định theo biểu thức  $c^{Bat}$  ( $B^R + B^{SF}$ ). Trong đó,  $B^R$  và  $B^{SF}$  lần lượt là dung lượng pin của hệ thống áp mái và Smartflower (kWh), còn  $c^{Bat}$  là chi phí quy dẫn trên một đơn vị dung lượng pin lắp đặt (VND/kWh-năm). Pin lưu trữ giúp tận dụng điện mặt trời dư thừa, tăng tỷ lệ tự tiêu thụ và giảm điện mua từ lưới, nhưng đồng thời làm tăng chi phí hệ thống. Mô hình chỉ lựa chọn dung lượng pin khi lợi ích kinh tế thu được đủ bù đắp chi phí bổ sung. Chi phí mua điện từ lưới được xác định bằng chi phí đơn vị  $c^{Grid}$  (VND/kWh) cho một kWh sử dụng điện lưới nhân với  $G_t$  (kWh) là lượng điện mua từ lưới tại khoảng thời gian  $t$ .

Tại mỗi khoảng thời gian, điện lưới được sử dụng để đáp ứng phần nhu cầu phụ tải chưa được điện mặt trời và pin lưu trữ cung cấp. Chi phí phát thải  $CO_2$  được đưa vào hệ thống nhằm chuyển tác động môi trường của việc sử dụng điện lưới thành một giá trị tiền tệ và đưa trực tiếp vào quá trình tối ưu hóa.

Khi lượng điện mua từ lưới tăng, cả chi phí mua điện và chi phí phát thải đều tăng. Khi điện mặt trời thay thế một phần điện lưới, hệ thống đồng thời giảm được chi phí điện và chi phí carbon. Chi phí phát thải CO<sub>2</sub> do sử dụng điện lưới được xác định bằng giá carbon hoặc chi phí phát thải, đơn vị VND/tấn CO<sub>2</sub> ( $c^{Emiss}$ ) nhân với tổng phát thải từ điện lưới. Trong đó, tổng phát thải được tính từ lượng tiêu thụ điện lưới nhân với hệ số phát thải của điện lưới tại thời điểm  $t$  là  $f_t$ .

Ràng buộc (3) và (4) liên kết số thiết bị với các biến nhị phân  $X_i^R$  và  $X^{SF}$ . Khi biến lựa chọn bằng 0, số thiết bị tương ứng bắt buộc bằng 0; khi bằng 1, mô hình được phép xác định số lượng lắp đặt trong giới hạn  $M$  là một số cực kỳ lớn bất kỳ. Tương tự, ràng buộc (5) và (6) chỉ cho phép lắp dung lượng pin  $B^R$  hoặc  $B^{SF}$  khi hệ thống điện mặt trời tương ứng được lựa chọn.

Ràng buộc (7) bảo đảm tổng diện tích của các tấm pin áp mái không vượt quá diện tích mái cho phép  $a_R^{Max}$  (m<sup>2</sup>), trong đó  $a_i^R$  (m<sup>2</sup>) là diện tích một tấm pin loại  $i$ . Ràng buộc (8) giới hạn diện tích lắp Smartflower theo diện tích mặt bằng tối đa  $a_F^{Max}$  (m<sup>2</sup>), với  $a^{SF}$  (m<sup>2</sup>) là diện tích cần thiết cho một thiết bị.

Ràng buộc (9) là ràng buộc xác định tổng điện mặt trời sử dụng tại thời điểm  $t$ , ký hiệu  $S_t^{Sola}$  (kWh), bằng tổng điện từ hệ thống áp mái  $S_t^R$  (kWh) và Smartflower  $S_t^{SF}$  (kWh) cấp cho phụ tải.

Các ràng buộc (10), (11), (12) là các ràng buộc về pin lưu trữ áp mái. Ràng buộc (10) mô tả cân bằng năng lượng của pin áp mái: lượng điện lưu trữ  $b_t^R$  (kWh) bằng lượng còn lại từ thời điểm trước cộng sản lượng mới, trừ điện cấp cho phụ tải  $S_t^R$  (kWh) và điện lãng phí không sử dụng của hệ thống  $S_t^{Rwaste}$  (kWh). Ràng buộc (11) áp dụng cho thời điểm đầu và hàm ý pin ban đầu không có điện. Ràng buộc (12) bảo đảm lượng điện lưu trữ không vượt quá dung lượng lắp đặt  $B^R$  (kWh). Tương tự, ràng buộc (13), (14), (15) có là các ràng buộc về pin lưu trữ đối với Smartflower. Trong đó,  $b_t^{SF}$  (kWh) là lượng điện lưu trữ,  $g_t^{SF}$  (kWh) là sản lượng phát,  $S_t^{SF}$  (kWh) là điện cấp cho phụ tải,  $S_t^{SFwaste}$  (kWh) là điện không sử dụng và  $B^{SF}$  (kWh) là dung lượng pin lắp đặt. Các ràng buộc duy trì cân bằng năng lượng và giới hạn lượng điện lưu trữ trong phạm vi dung lượng pin.

Ràng buộc (16) bảo đảm nhu cầu điện  $D_t$  (kWh) tại mỗi thời điểm được đáp ứng đầy đủ bằng tổng điện mặt trời sử dụng  $S_t^{Sola}$  (kWh) và điện mua từ lưới  $G_t$  (kWh).

Ràng buộc (17) yêu cầu tổng điện mặt trời sử dụng trong kỳ đạt ít nhất tỷ lệ  $r^{Quo}$  so với tổng nhu cầu điện. Ràng buộc này giúp mô hình đáp ứng mục tiêu sử dụng năng lượng tái tạo hoặc giảm phát thải.

Các ràng buộc còn lại thể hiện miền giá trị của biến. Ràng buộc (18), (19), (22) và (23) quy định các đại lượng sản lượng, dung lượng pin, điện lưu trữ, điện sử dụng, điện lưới và điện không sử dụng phải không âm. Ràng buộc (20) và (21) yêu cầu số tấm pin áp mái và số Smartflower là số nguyên không âm. Ràng buộc (24) quy định  $X_i^R$  và  $X^{SF}$  là biến nhị phân, trong đó giá trị 1 biểu thị lựa chọn lắp đặt và giá trị 0 biểu thị không lựa chọn.

#### 4.2. Các giả thiết mô hình

Để đánh giá hiệu quả hoạt động trạm điện mặt trời tòa nhà E, nghiên cứu đưa vào mô hình xem xét lựa chọn kết hợp các công nghệ để đáp ứng nhu cầu tiêu thụ điện tại tòa nhà tới mức chi phí tối ưu thỏa mãn nhu cầu phụ tải của tòa nhà (Bảng 1), bổ sung thêm cơ sở so sánh với hệ thống hiện tại. Chi phí sản xuất điện mặt trời được xác định thông qua chỉ tiêu chi phí điện năng quy dẫn - LCOE.

Ngoài các công nghệ pin mặt trời, hệ thống xem xét pin lưu trữ (BESS) lithium iron phosphate - LFP, là loại pin có hiệu suất cao, phù hợp với các hệ thống mặt trời tại Việt Nam. Dựa trên các kịch bản chi phí pin, nghiên cứu ngoại suy chi phí quy dẫn pin khoảng 1.266.596,10 VND/kWh/năm [1]. Về các chỉ số liên quan tới phát thải. Nghiên cứu sử dụng hệ số chi phí phát thải carbon được xác định ở mức 136.000 VND/tấn CO<sub>2</sub> tương đương, theo giao dịch carbon đầu tiên tại Việt Nam, hệ số quy đổi là 0,0006592 tấn CO<sub>2</sub>/kWh điện lưới tiêu thụ [2].

**Bảng 1. Các công nghệ pin mặt trời xem xét trong mô hình**

| Công nghệ                 | Lý do lựa chọn                                                                               | Chi phí quy dẫn LCOE | Hiệu suất | Diện tích lắp đặt đơn vị (m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------|--------------------------------------------|
| Ntype-TopCon              | Công nghệ hiện hữu                                                                           | 2114.39 VND/kWh [3]  | 22,5%     | 2,76                                       |
| Pervoskite/silicon tandem | Công nghệ có tốc độ tăng trưởng hiệu suất cao                                                | 1436.05 VND/kWh      | 26,34%    | 2,47                                       |
| SmartFlower               | Công nghệ có hiệu suất cao, có tính nghệ thuật và ứng dụng trong giáo dục năng lượng tái tạo | 8457,55 VND/kWh      | 32%       | 27,4                                       |

## 5. Kết quả

### 5.1. Về hiệu quả điện mặt trời tòa nhà E

Hiệu quả hệ thống điện mặt trời tòa nhà E được đánh giá dựa trên nhiều tiêu chí khác nhau:

Về kỹ thuật, tỷ số DC/AC của hệ thống là  $6,16/5 = 1,23$  là cấu hình hợp lý, giúp inverter hoạt động ở vùng công suất hiệu quả trong nhiều thời điểm.

Về sản lượng điện mặt trời, hệ thống thu được sản lượng theo thực tế là 6128,12 kWh/năm. Tham chiếu với tọa độ nhà E (21°02'50", 105°47'05") qua Global Solar Alas có sản lượng điện AC mỗi 1 kWp hệ thống PV có thể tạo ra trong 1 năm là 1088,2 kWh/kWp/năm. Sản lượng kỳ vọng với hệ thống điện mặt trời tòa nhà E:  $E_{kv} = 6,16 \times 1088,2 = 6703,31$  (kWh/năm). Tỷ lệ sản lượng tòa nhà E đạt được so với kỳ vọng là 6128,12 kWh/năm tương đương khoảng 91%. Điều này cho thấy, hệ thống điện mặt trời tòa nhà E đang vận hành khá tốt. Chênh lệch 7% so với kỳ vọng có thể đến từ suy hao hoặc do góc nghiêng không phải góc nghiêng tối ưu.

Về đáp ứng nhu cầu tiêu thụ điện tòa nhà E, với sản lượng khoảng 6128,12 kWh/năm, hệ thống điện mặt trời tòa nhà E cung cấp được 0,46% điện năng lượng tái tạo cho nhu cầu.

Về hiệu quả môi trường, với hệ số phát thải lưới điện Việt Nam 0,6592 tCO<sub>2</sub>/MWh [4]. Hệ thống hiện tại giúp giảm 4,04 tấn CO<sub>2</sub>/năm.

Về hiệu quả kinh tế, hệ thống giúp tiết kiệm 13.101.920,56 VND chi phí mua điện lưới/năm với đơn giá 2.138 VND/kWh cho đơn vị hành chính sự nghiệp.

Về hiệu quả giáo dục, hệ thống là công cụ thực hành hiệu quả cho sinh viên ngành Quản lý năng lượng, Trường Đại học Điện lực.

### 5.2. Về kết quả tối ưu

Kết quả cho thấy, nếu không đề xuất phí phát thải CO<sub>2</sub>, hệ thống đề xuất sử dụng 15,3% điện mặt trời và 84,7% điện lưới. 100% sử dụng công nghệ áp mái perovskite. Chi phí cho tiêu dùng điện là 2.759.135.321 VND/ năm. Tiết kiệm khoảng 3,9% chi phí điện năng. Góp phần giảm 150,42 tấn CO<sub>2</sub> tiêu thụ. Khi đề xuất chi phí phát thải CO<sub>2</sub>, và không giới hạn lượng điện mặt trời lắp đặt cho kết quả tương tự. Nguyên nhân do diện tích lắp đặt giới hạn của pin mặt trời. Trong trường hợp này, hệ thống phải chấp nhận chi phí phát thải 101.956.192 VND/năm, tăng tổng phí lên 2.861.091.513 VND/năm. Với mức đề xuất tối thiểu

19% năng lượng điện tái tạo phục vụ cho nhu cầu, hệ thống đề xuất lắp đặt 4 pin mặt trời Perovskite, 302 pin mặt trời Ntype-topcon và 1 Smartflower. Hệ thống giảm được 169,56 tấn CO<sub>2</sub>, tuy nhiên chi phí hằng năm lên đến 4.351.495.454 VND do ảnh hưởng của chi phí pin lưu trữ. Đề xuất tỷ lệ điện mặt trời tối thiểu 25% để đạt chứng chỉ hệ thống xanh LEED hoặc LOTUS, hệ thống không khả thi vì ràng buộc diện tích.

## 6. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu, có thể kết luận hệ thống điện mặt trời hiện tại tại tòa nhà E đang vận hành tương đối ổn định nhưng có quy mô nhỏ so với nhu cầu phụ tải. Để nâng cao tỷ lệ sử dụng điện mặt trời, cần xem xét mở rộng diện tích lắp đặt, tận dụng mái các công trình lân cận, phát triển mái che bãi xe tích hợp điện mặt trời hoặc sử dụng các mô-đun có hiệu suất cao hơn. Đồng thời, cần kết hợp phát triển nguồn điện mặt trời với các giải pháp quản lý phụ tải, nâng cao hiệu suất thiết bị, tăng tỷ lệ tự tiêu thụ điện vào ban ngày.

Đối với pin lưu trữ, do chi phí quy dẫn còn cao, việc lắp đặt chỉ phù hợp khi có nhu cầu dịch chuyển điện năng, hạn chế công suất cực đại, dự phòng điện hoặc nâng cao tỷ lệ tự tiêu thụ. Các nghiên cứu tiếp theo cần bổ sung dữ liệu phụ tải theo bước thời gian ngắn hơn, giá điện theo khung giờ, hiệu suất sạc - xả, suy giảm dung lượng, tuổi thọ thiết bị và phân tích độ nhạy đối với LCOE, giá điện lưới, giá carbon, chi phí pin và diện tích khả dụng ■

*(\*) Nghiên cứu này là sản phẩm của đề tài nghiên cứu và được tài trợ bởi Trường Đại học Điện lực, mã số ĐTKHCN.21/2024.*

## TÀI LIỆU TRÍCH DẪN VÀ THAM KHẢO:

- [1]. Institute of Energy. (2025). Study on pricing mechanism for grid-connected independent BESS in Vietnam. Interim report, . <[https://vepg.vn/wp-content/uploads/2025/12/3-EN\\_VNL\\_Slide-bao-cao-co-che-gia-BESS-2.12.2025-ENG.pdf](https://vepg.vn/wp-content/uploads/2025/12/3-EN_VNL_Slide-bao-cao-co-che-gia-BESS-2.12.2025-ENG.pdf)>.
- [2]. Tam An. (2024). US\$5 per carbon credit is acceptable price: Ministry. VietNamNet Global. <<https://vietnamnet.vn/en/5-per-carbon-credit-is-acceptable-price-ministry-2261115.html>>.
- [3]. Cristea M., Cristea C., Tîrnovan R.-A., et al. (2025). Levelized Cost of Energy (LCOE) of Different Photovoltaic Technologies. Applied Sciences, 15(12), 6710. <https://doi.org/10.3390/app15126710>.
- [4]. Cục Biến đổi khí hậu. (2024). Công văn số 1726/BĐKH-PTCBT về việc công bố kết quả tính toán hệ số phát thải của lưới điện Việt Nam năm 2023. <<https://thuvienphapluat.vn/cong-van/Tai-nguyen-Moi-truong/Cong-van-1726-BDKH-PTCBT-2024-cong-bo-ket-qua-tinh-toan-he-so-phat-thai-luoi-dien-2023-697510.aspx>>.