

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ SẢN XUẤT ĐIỆN CỦA HỆ THỐNG QUANG ĐIỆN TÍCH HỢP CÔNG TRÌNH (BIPV) SỬ DỤNG TẮM PIN MÀNG MỎNG CdTe BÁN TRONG SUỐT TẠI HÀ NỘI

PERFORMANCE EVALUATION OF A BUILDING-INTEGRATED PHOTOVOLTAIC (BIPV) SYSTEM USING SEMI-TRANSPARENT CDTE THIN-FILM MODULES IN HANOI

Bùi Mạnh Tú^{1,*}, Tiêu Xuân Hoàng²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.145>

TÓM TẮT

Quang điện tích hợp công trình (Building Integrated Photovoltaics - BIPV) là giải pháp trong đó tấm pin mặt trời đồng thời đóng vai trò vật liệu bao che của công trình, được xem là một hướng đi quan trọng nhằm phát triển công trình xanh và giảm phát thải khí nhà kính trong lĩnh vực xây dựng. Bài báo trình bày quá trình lựa chọn công nghệ, thiết kế, lắp đặt và đánh giá hiệu quả sản xuất điện của một hệ thống BIPV sử dụng 58 tấm pin màng mỏng CdTe bán trong suốt (độ truyền sáng 30%, công suất 60Wp/tấm, tổng công suất 3,48kWp) tích hợp vào mặt đứng tầng 4 và tầng 5 của một hội trường tại Hà Nội. Kết quả quan trắc liên tục 27 ngày trong tháng 9/2025 cho thấy hệ thống đạt tổng sản lượng 139,5kWh, trung bình 5,17kWh/ngày, tương ứng suất sinh điện khoảng 1,48kWh/kWp/ngày. Sản lượng ngày mưa chỉ giảm khoảng 40% so với ngày nắng, thể hiện khả năng làm việc ổn định của công nghệ CdTe trong điều kiện bức xạ khuếch tán. Kết quả nghiên cứu là cơ sở thực nghiệm cho việc ứng dụng BIPV trên mặt đứng công trình trong điều kiện khí hậu miền Bắc Việt Nam.

Từ khóa: BIPV; quang điện tích hợp công trình; pin mặt trời màng mỏng CdTe; tấm pin bán trong suốt.

ABSTRACT

Building Integrated Photovoltaics (BIPV), in which photovoltaic modules simultaneously serve as building envelope materials, is considered an important pathway toward green buildings and emission reduction in the construction sector. This paper presents the technology selection, design, installation and performance evaluation of a BIPV system comprising 58 semi-transparent CdTe thin-film modules (30% light transmittance, 60Wp per module, 3.48kWp in total) integrated into the 4th- and 5th-floor facade of an auditorium building in Hanoi, Vietnam. Monitoring data recorded over 27 consecutive days in September 2025 show a total energy yield of 139.5kWh, averaging 5.17kWh/day, equivalent to a specific yield of about 1.48kWh/kWp/day. The daily output on rainy days decreased by only about 40% compared with sunny days, demonstrating the stable operation of CdTe technology under diffuse irradiance conditions. The results provide an experimental basis for the application of facade-integrated BIPV under the climatic conditions of Northern Vietnam.

Keywords: BIPV; Building Integrated Photovoltaics; CdTe thin-film solar cell; semi-transparent module.

¹Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

²Trường Đại học Điện lực

*Email: bmtu@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/3/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 03/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng toàn cầu, điện mặt trời đã trở thành nguồn điện có tốc độ tăng trưởng

nh nhanh nhất, với tổng công suất lắp đặt lũy kế trên thế giới vượt 1,6 TW vào cuối năm 2023 [1]. Phần lớn công suất này đến từ các trang trại điện mặt trời quy mô lớn và hệ

thống lắp áp mái (Building Attached Photovoltaics - BAPV), trong đó tấm pin được gắn thêm lên kết cấu sẵn có của công trình. Khác với BAPV, quang điện tích hợp công trình (Building Integrated Photovoltaics - BIPV) là giải pháp trong đó tấm pin mặt trời thay thế trực tiếp một bộ phận của lớp vỏ công trình như mái, kính mặt đứng, lam che nắng hay lan can, nghĩa là vừa thực hiện chức năng bao che, chịu tác động khí hậu, vừa sản xuất điện năng [2], [3]. Theo tiêu chuẩn EN 50583-1, một mô-đun quang điện chỉ được coi là BIPV khi việc tháo bỏ nó làm mất đi chức năng xây dựng của bộ phận công trình tương ứng [11].

Nhiều nghiên cứu tổng quan đã chỉ ra tiềm năng to lớn của BIPV. Jelle và cộng sự đã hệ thống hóa các sản phẩm BIPV thương mại gồm ngói quang điện, tấm lợp, kính quang điện và phân tích các yêu cầu đồng thời về điện và xây dựng mà sản phẩm phải thỏa mãn [2]. Biyik và cộng sự tổng hợp hơn một trăm công trình nghiên cứu về BIPV, cho thấy dải hiệu suất, công nghệ tế bào và hình thức tích hợp rất đa dạng, từ silicon tinh thể đến các công nghệ màng mỏng [4]. Norton và cộng sự phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng của BIPV, trong đó nhấn mạnh vai trò của hướng lắp đặt, độ nghiêng, bóng che và nhiệt độ làm việc của tấm pin [5]. Ở khía cạnh kinh tế, báo cáo của Phòng thí nghiệm Năng lượng tái tạo quốc gia Hoa Kỳ (NREL) về giá hệ thống BIPV dân dụng cho thấy mặc dù chi phí riêng của phần quang điện cao hơn hệ lắp áp mái thông thường, BIPV có thể bù lại nhờ khoản chi phí vật liệu bao che và nhân công xây dựng được thay thế [6]. Heinsteins và cộng sự chỉ ra rằng rào cản chính của BIPV không hẳn nằm ở công nghệ mà ở nhận thức của kiến trúc sư, chủ đầu tư và sự phối hợp giữa ngành xây dựng với ngành quang điện [3]. Để hỗ trợ quá trình thiết kế, Bikos và Laochoojaroenkit đã xây dựng bộ công cụ tích hợp BIPV cho kiến trúc sư, bao quát từ phân tích vị trí, khả năng tiếp cận bức xạ mặt trời, đến các phương án tích hợp trên mái, mặt đứng và kết cấu che nắng [7]. Các nghiên cứu về sản phẩm BIPV thế hệ mới [8, 9] và thực tiễn ứng dụng tại Trung Quốc [10] cũng khẳng định xu hướng chuyển dịch từ mái sang mặt đứng, nơi diện tích tiếp nhận bức xạ của các tòa nhà cao tầng là rất lớn.

Tại Việt Nam, Quy hoạch điện VIII đặt mục tiêu phấn đấu đến năm 2030 có 50% các tòa nhà công sở và 50% nhà dân sử dụng điện mặt trời mái nhà tự sản, tự tiêu [15]; Nghị định số 135/2024/NĐ-CP tiếp tục cụ thể hóa cơ chế khuyến khích phát triển điện mặt trời tự sản xuất, tự tiêu thụ [16]. Tuy vậy, các hệ thống hiện hữu gần như hoàn

toàn là BAPV lắp trên mái; ứng dụng BIPV trên mặt đứng công trình còn rất hạn chế và thiếu số liệu vận hành thực tế trong điều kiện khí hậu Việt Nam, đặc biệt là khu vực miền Bắc với tổng xạ ngang trung bình chỉ khoảng 3,5 - 4,0 kWh/m²/ngày và nhiều ngày âm u, mưa phùn [17]. Câu hỏi đặt ra là: một hệ thống BIPV mặt đứng sử dụng kính quang điện bán trong suốt sẽ đạt sản lượng bao nhiêu, biến động thế nào theo điều kiện thời tiết, và có đáng để triển khai rộng rãi hay không.

Xuất phát từ thực tiễn đó, nghiên cứu này thực hiện lựa chọn công nghệ, thiết kế, lắp đặt một hệ thống BIPV sử dụng tấm pin màng mỏng CdTe bán trong suốt trên mặt đứng hội trường của một cơ sở đào tạo tại Hà Nội, sau đó quan trắc và đánh giá hiệu quả sản xuất điện của hệ thống trong điều kiện vận hành thực tế. Bài báo được cấu trúc theo trình tự: phần 2 trình bày đối tượng và phương pháp nghiên cứu; phần 3 trình bày kết quả lắp đặt và số liệu sản lượng đo được; phần 4 bàn luận về hiệu quả của hệ thống; phần 5 là kết luận và kiến nghị.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

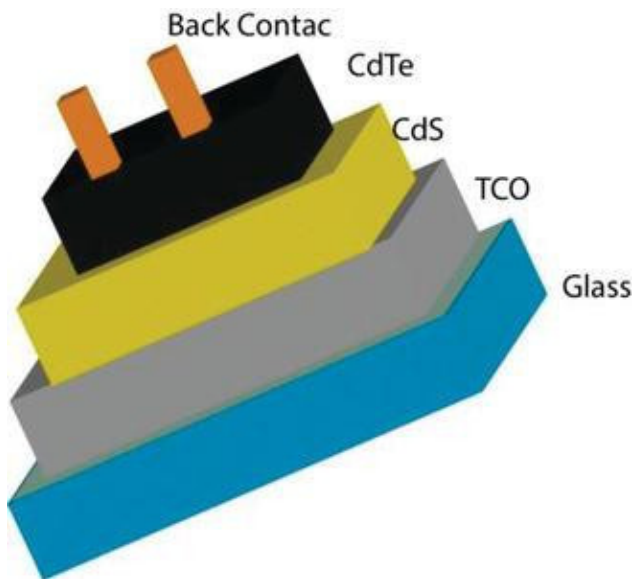
Đối tượng nghiên cứu là hệ thống BIPV tích hợp vào mặt đứng (hướng ra đường Hoàng Quốc Việt) tầng 4 và tầng 5 của tòa nhà B1 235 đường Hoàng Quốc Việt, thành phố Hà Nội. Vị trí lắp đặt là kính mặt tiền có yêu cầu đồng thời về lấy sáng tự nhiên, tầm nhìn ra sân trung tâm và mỹ quan kiến trúc, do đó giải pháp được lựa chọn phải là kính quang điện bán trong suốt thay thế cho kính mặt dựng thông thường. Phạm vi đánh giá hiệu quả trong bài báo này giới hạn ở hiệu quả sản xuất điện của hệ thống, dựa trên chuỗi số liệu sản lượng ngày thu thập trong tháng 9/2025.

2.2. Lựa chọn công nghệ tế bào quang điện

Trong các công nghệ quang điện thương mại hiện nay, nghiên cứu lựa chọn công nghệ màng mỏng Cadmium Telluride (CdTe) cho tấm pin BIPV vì các lý do chính sau: (i) chi phí sản xuất thấp hơn đáng kể so với silicon tinh thể và là công nghệ màng mỏng duy nhất có giá thành cạnh tranh trực tiếp với pin silicon thông thường [12]; (ii) hệ số hấp thụ quang học cao, lớp hấp thụ CdTe có thể hấp thụ trên 95% năng lượng bức xạ mặt trời trong vùng phổ làm việc với độ dày chỉ vài micromet; (iii) khả năng chế tạo dạng tấm kính bán trong suốt với độ truyền sáng tùy chỉnh, phù hợp yêu cầu lấy sáng của mặt dựng; (iv) việc thu hồi, xử lý tấm pin sau vòng đời thuận lợi hơn so với mô-đun silicon tinh thể; và (v) công nghệ đã được khẳng định ở quy mô công nghiệp bởi các nhà sản

xuất hàng đầu như First Solar, với hiệu suất tế bào kỷ lục trong phòng thí nghiệm trên 22% [13, 14].

Cấu trúc điển hình của tế bào quang điện CdTe dạng kính - kính được thể hiện trên hình 1, gồm các lớp: kính nền vôi natri cacbonat dày khoảng 3mm chịu nhiệt và ổn định hóa học; lớp ôxit dẫn điện trong suốt (TCO) chế tạo từ $\text{SnO}_2:\text{F}$, ITO, Cd_2SnO_4 hoặc $\text{ZnO}:\text{Al}$; lớp đệm Cadmium sulfide (CdS) có độ rộng vùng cấm 2,45eV, độ truyền qua tối thiểu 70%, độ dày tối ưu khoảng 100 - 120nm; lớp hấp thụ CdTe với độ rộng vùng cấm 1,45eV gần như tối ưu đối với phổ bức xạ mặt trời; và lớp tiếp xúc sau (back contact) có độ dẫn loại p bảo đảm tiếp xúc ôm tốt với CdTe.



Hình 1. Cấu trúc điển hình của tế bào quang điện màng mỏng CdTe

Bảng 1 trình bày thông số kỹ thuật của một số dòng tấm pin CdTe thương mại được khảo sát khi lựa chọn thiết bị. Tấm pin có kích thước điển hình $1.200 \times 600 \times 6,8\text{mm}$, khối lượng 11,8kg, hệ số nhiệt độ công suất $-0,214\%/^{\circ}\text{C}$, được bảo hành 10 năm và cam kết công suất đầu ra còn 90% sau 10 năm, 80% sau 25 năm (điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn STC: $1.000\text{W}/\text{m}^2$, AM1.5, 25°C).

Bảng 1. Thông số kỹ thuật một số tấm pin mặt trời công nghệ CdTe khảo sát

Thông số	OT-100-180S	OT-100-185S	OT-100-477S
Công suất cực đại	80W	85W	77W
Điện áp hở mạch V_{oc}	118,9V	120,5V	28V
Dòng ngắn mạch I_{sc}	0,95A	0,98A	3,91A
Điện áp làm việc V_m	94,1V	96,6V	21V
Dòng điện làm việc I_m	0,85A	0,88A	3,66A

Do vị trí lắp đặt là mặt tiền cần lấy sáng và bảo đảm tầm nhìn, loại tấm pin được lựa chọn cuối cùng là kính quang điện CdTe bán trong suốt Energy Glass, kích thước $0,6 \times 1,2\text{m}$, công suất 60Wp, độ truyền sáng 30% (hình 2). Với độ truyền sáng này, tấm pin cho phép ánh sáng tự nhiên đi vào không gian bên trong ở mức dịu, đồng thời quan sát được cảnh quan bên ngoài, đáp ứng yêu cầu thẩm mỹ của công trình.

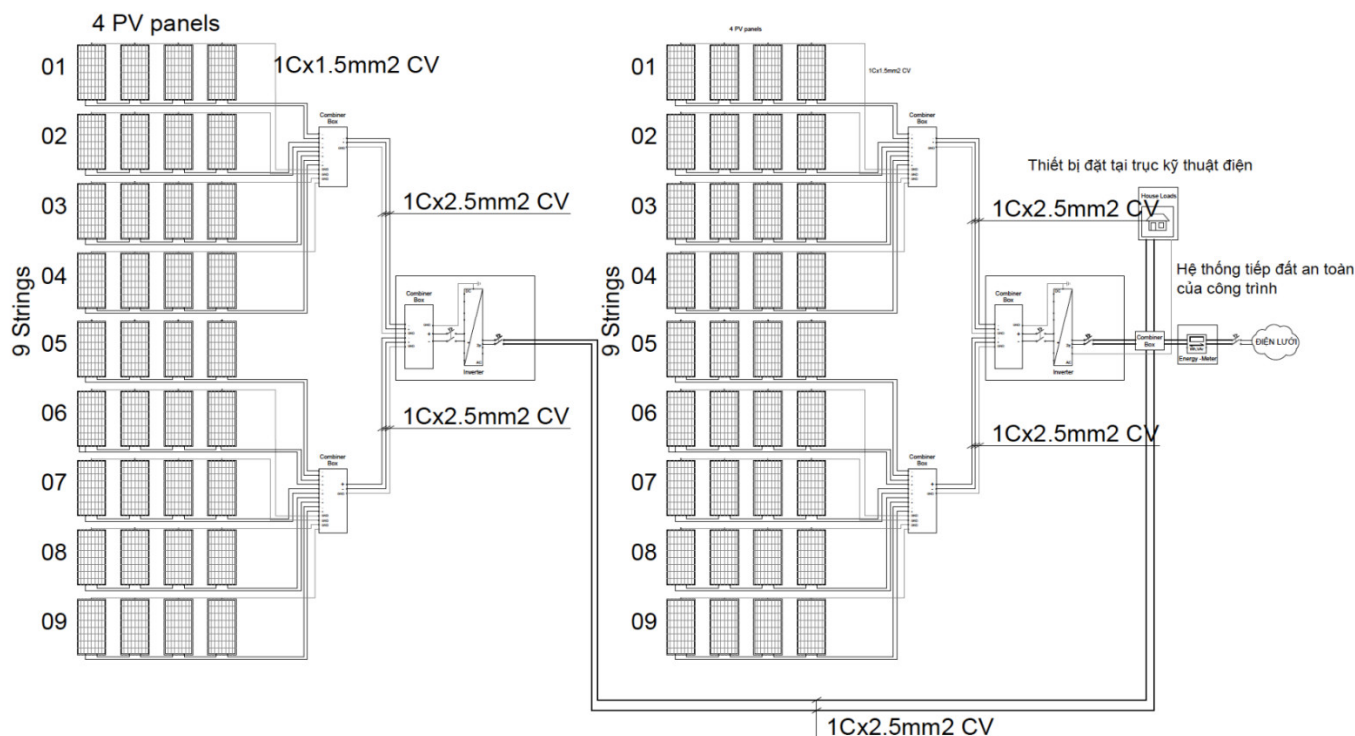


Hình 2. Tấm kính quang điện CdTe bán trong suốt sử dụng trong nghiên cứu

2.3. Thiết kế và lắp đặt hệ thống

Hệ thống sử dụng 58 tấm kính quang điện Energy Glass nói trên, tổng công suất lắp đặt 3,48kWp, tích hợp vào hệ nhôm kính mặt dựng (khoảng 60m^2 mặt tiền được bổ sung, gia cố) tại tầng 4 và tầng 5 của hội trường. Về phần điện, các tấm pin được đấu thành các chuỗi (string) và gom về hộp hợp lưu dòng kiểu 10 đầu vào, qua điốt chống dòng ngược, thiết bị chống sét lan truyền phía một chiều và xoay chiều, sau đó đưa về một biến tần hòa lưới GCI-4K (công suất danh định 4kW). Điện năng phát ra được hòa trực tiếp vào lưới điện hạ áp nội bộ của tòa nhà (cơ chế tự sản xuất, tự tiêu thụ). Sơ đồ nguyên lý đấu dây của hệ thống thể hiện trên hình 3; bố trí các tấm pin trên mặt đứng tầng 4, tầng 5 thể hiện trên hình 4. Danh mục thiết bị chính của hệ thống được tổng hợp trong bảng 2.

SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ ĐẦU DÂY



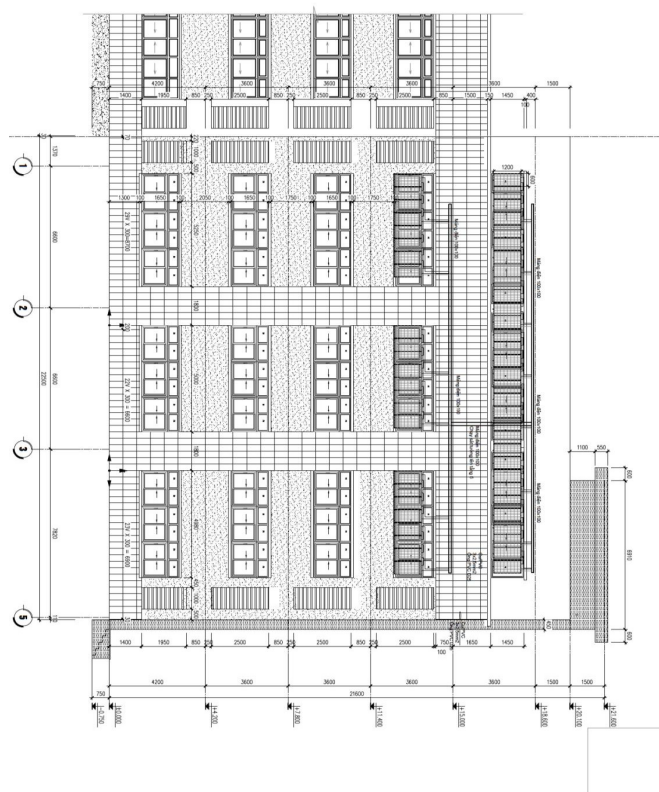
Hình 3. Sơ đồ nguyên lý đầu dây hệ thống BIPV

Bảng 2. Danh mục thiết bị chính của hệ thống BIPV

TT	Tên thiết bị	Đơn vị	Số lượng
1	Kính quang điện Energy Glass 0,6 × 1,2m; 60Wp; độ truyền sáng 30%	tấm	58
2	Hệ nhôm kính mặt tiền bổ sung	m ²	60
3	Biến tần hòa lưới Inverter GCI-4K	cái	1
4	Hộp hợp lưu dòng 10 lines in 1	cái	1
5	Điốt chống dòng ngược (anti-counter diode)	cái	2
6	Đầu nối T và đầu nối MC4	cái	4 + 120
7	Chống sét lan truyền AC (Schneider/Socomec hoặc tương đương)	bộ	1
8	Dây điện Cu/PVC 1×2,5mm ² và 1×6mm ²	m	1.000 + 100
9	Tủ điện 800×800×250, máng cáp thép 100×100, ống luồn dây, tiếp địa	hệ	1

2.4. Phương pháp thu thập và xử lý số liệu

Hiệu quả sản xuất điện của hệ thống được đánh giá bằng phương pháp quan trắc vận hành thực tế. Sản lượng điện hòa lưới hàng ngày được ghi tự động và lưu trong bộ nhớ của biến tần GCI-4K; số liệu được trích xuất theo từng



Hình 4. Sơ đồ bố trí các tấm pin BIPV trên mặt đứng tầng 4 và tầng 5

ngày trong tháng 9/2025 (từ 01/9 đến 27/9/2025, gồm 27 ngày liên tục). Điều kiện thời tiết của từng ngày được ghi nhận song song bằng quan sát tại chỗ và phân thành sáu nhóm: nhiều nắng, nắng, ít mây, không nắng, âm u và mưa. Trên cơ sở chuỗi số liệu, các đại lượng đặc trưng được tính toán gồm: tổng sản lượng tháng, sản lượng trung bình ngày, sản lượng trung bình theo từng nhóm thời tiết, và suất sinh điện riêng bằng tỷ số giữa sản lượng trung bình ngày và công suất lắp đặt của hệ thống [5]. Tháng 9 được lựa chọn làm giai đoạn đánh giá vì bao gồm cả những ngày nắng điển hình lẫn những ngày thời tiết bất lợi (âm u, mưa), phản ánh tương đối đầy đủ dải điều kiện làm việc của hệ thống.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Kết quả lắp đặt hệ thống

Hệ thống BIPV 3,48kWp đã được lắp đặt hoàn chỉnh và đưa vào vận hành hòa lưới tại mặt đứng tầng 4, tầng 5 của hội trường. Về chức năng xây dựng, 58 tấm kính quang điện bán trong suốt thay thế vai trò của kính mặt dựng thông thường: bảo đảm bao che, lấy sáng tự nhiên ở mức độ truyền sáng 30% và duy trì tầm nhìn ra đường Hoàng Quốc Việt cùng sân trung tâm của Học viện Kỹ thuật Quân sự. Về chức năng điện, hệ thống vận hành ổn định, toàn bộ điện năng phát ra được tiêu thụ ngay trong tòa nhà.

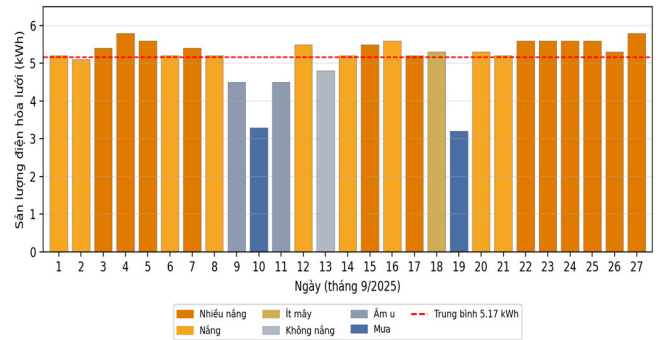
3.2. Sản lượng điện đo được

Bảng 3 trình bày sản lượng điện hòa lưới hàng ngày của hệ thống trong 27 ngày quan trắc của tháng 9/2025 cùng điều kiện thời tiết tương ứng; số liệu được trực quan hóa trên hình 5.

Bảng 3. Sản lượng điện hòa lưới hàng ngày của hệ thống BIPV, tháng 9/2025

Ngày	Sản lượng điện hòa lưới (kWh)	Điều kiện thời tiết
1/9/2025	5,2	Nắng
2/9/2025	5,1	Nắng
3/9/2025	5,4	Nhiều nắng
4/9/2025	5,8	Nhiều nắng
5/9/2025	5,6	Nhiều nắng
6/9/2025	5,2	Nắng
7/9/2025	5,4	Nhiều nắng
8/9/2025	5,2	Nắng
9/9/2025	4,5	Âm u
10/9/2025	3,3	Mưa
11/9/2025	4,5	Âm u

12/9/2025	5,5	Nắng
13/9/2025	4,8	Không nắng
14/9/2025	5,2	Nắng
15/9/2025	5,5	Nhiều nắng
16/9/2025	5,6	Nắng
17/9/2025	5,2	Nhiều nắng
18/9/2025	5,3	Ít mây
19/9/2025	3,2	Mưa
20/9/2025	5,3	Nắng
21/9/2025	5,2	Nắng
22/9/2025	5,6	Nhiều nắng
23/9/2025	5,6	Nhiều nắng
24/9/2025	5,6	Nhiều nắng
25/9/2025	5,6	Nhiều nắng
26/9/2025	5,3	Nhiều nắng
27/9/2025	5,8	Nhiều nắng



Hình 5. Diễn biến sản lượng điện ngày của hệ thống BIPV theo điều kiện thời tiết, tháng 9/2025

Bảng 4. Sản lượng trung bình ngày theo nhóm điều kiện thời tiết (tháng 9/2025)

Nhóm điều kiện thời tiết	Số ngày	Trung bình (kWh/ngày)	So với nhóm có nắng (%)
Có nắng (nhiều nắng, nắng, ít mây)	22	5,42	100
Âm u, không nắng	3	4,60	84,9
Mưa	2	3,25	60,0
Toàn bộ 27 ngày	27	5,17	95,4

Tổng sản lượng điện trong 27 ngày quan trắc đạt 139,5kWh, trung bình 5,17kWh/ngày, tương ứng suất sinh điện riêng khoảng 1,48kWh/kWp/ngày. Sản lượng

ngày lớn nhất đạt 5,8kWh (các ngày 4/9 và 27/9, trời nhiều nắng), nhỏ nhất 3,2kWh (ngày 19/9, trời mưa). Kết quả thống kê theo nhóm điều kiện thời tiết được tổng hợp trong bảng 4.

Số liệu cho thấy ba đặc điểm nổi bật. Thứ nhất, trong những ngày có nắng, sản lượng dao động hẹp trong khoảng 5,1 - 5,8kWh/ngày, độ lệch giữa các ngày nhỏ, chứng tỏ hệ thống làm việc ổn định. Thứ hai, trong những ngày âm u, không nắng - vốn rất phổ biến ở miền Bắc - hệ thống vẫn duy trì 4,5 - 4,8kWh/ngày, tức xấp xỉ 85% mức ngày nắng. Thứ ba, ngay cả hai ngày mưa, sản lượng vẫn đạt 3,2 - 3,3kWh/ngày, bằng 60% mức ngày nắng. Như vậy, biên độ suy giảm sản lượng theo thời tiết của hệ thống là tương đối hẹp; ngày bất lợi nhất vẫn đạt 55% so với ngày tốt nhất (3,2 so với 5,8kWh).

4. THẢO LUẬN

4.1. Về mức sản lượng và suất sinh điện của hệ thống

Suất sinh điện đo được của hệ thống (khoảng 1,48kWh/kWp/ngày, tương đương 45kWh/kWp/tháng) thấp hơn rõ rệt so với mức 3,5 - 4,5kWh/kWp/ngày thường đạt được ở các hệ thống điện mặt trời mái nhà lắp nghiêng tối ưu tại Việt Nam. Theo nhận định của nhóm tác giả, sự chênh lệch này không phản ánh nhược điểm của công nghệ mà chủ yếu do ba nguyên nhân mang tính cấu hình. Một là, tấm pin lắp thẳng đứng (90°) trên mặt tiền nên lượng bức xạ chiếu tới mặt phẳng tấm pin thấp hơn nhiều so với mặt phẳng nghiêng tối ưu, đặc biệt vào các tháng mặt trời lên cao. Hai là, để bảo đảm chức năng lấy sáng và tầm nhìn, tấm pin được chọn có độ truyền sáng 30%, nghĩa là chủ động cho khoảng một phần ba quang thông xuyên qua thay vì hấp thụ để phát điện - đây là sự đánh đổi có chủ đích giữa công năng kiến trúc và công năng phát điện. Ba là, mặt tiền chịu ảnh hưởng bóng che của các kết cấu lân cận trong một số thời điểm trong ngày. Nếu quy chiếu về cùng điều kiện, mức sản lượng đo được là phù hợp với đặc thù của BIPV mặt đứng và nằm trong dải có thể chấp nhận đối với loại hình tích hợp này.

4.2. Về tính ổn định theo điều kiện thời tiết

Điểm đáng chú ý nhất trong chuỗi số liệu, theo đánh giá của nhóm tác giả, là tính ổn định của sản lượng. Tỷ lệ suy giảm chỉ khoảng 15% trong ngày âm u và 40% trong ngày mưa là mức thấp so với cảm nhận thông thường rằng điện mặt trời gần như không phát trong thời tiết xấu. Điều này có thể giải thích từ hai phía. Về công nghệ, tế bào CdTe có hệ số hấp thụ cao và đáp ứng phổ rộng, làm việc tương đối tốt với thành phần bức xạ khuếch tán - thành phần chiếm ưu thế trong những ngày nhiều mây; hệ số nhiệt độ công suất thấp của CdTe

cũng hạn chế tổn thất khi nhiệt độ tấm pin tăng cao trong ngày nắng. Về cấu hình, chính việc lắp thẳng đứng làm cho hệ thống vốn đã không khai thác tối đa bức xạ trực tiếp giữa trưa, nên khi bức xạ trực tiếp mất đi trong ngày âm u, mức suy giảm tương đối trở nên nhỏ hơn so với hệ lắp nghiêng. Đặc tính đầu ra ổn định, ít biến động này là một lợi thế vận hành của BIPV mặt đứng trong điều kiện khí hậu nhiều mây của miền Bắc Việt Nam, giúp phụ tải nội bộ của tòa nhà được bù đắp đều đặn hơn giữa các ngày.

4.3. Về hiệu quả tổng hợp của giải pháp BIPV

Đánh giá hiệu quả của BIPV không thể chỉ dựa trên sản lượng điện. Với khoảng 155kWh/tháng (ước tính từ mức trung bình 5,17kWh/ngày), giá trị điện năng tiết kiệm được hằng tháng là khiêm tốn nếu so với tổng mức đầu tư của hệ thống. Tuy nhiên, nhóm tác giả cho rằng cần nhìn nhận hiệu quả của hệ thống theo ba lớp giá trị cộng gộp.

Thứ nhất là giá trị vật liệu: 58 tấm kính quang điện đồng thời là 41,8m² kính mặt dựng, tức là một phần chi phí đã thay thế cho kính kiến trúc và chi phí thi công tương ứng mà công trình dù sao cũng phải bỏ ra.

Thứ hai là giá trị vi khí hậu: lớp kính truyền sáng 30% làm giảm đáng kể bức xạ nhiệt xâm nhập qua mặt tiền hướng nắng, từ đó giảm tải cho hệ thống điều hòa không khí của hội trường - lợi ích này chưa được đo đếm trong nghiên cứu hiện tại nhưng theo nhận định của nhóm tác giả là không nhỏ đối với mặt tiền kính có diện tích lớn.

Thứ ba là giá trị phát điện trực tiếp như đã trình bày ở phần kết quả.

Ngoài ra, hệ thống còn có giá trị trình diễn công nghệ giới thiệu một phương án kết hợp hài hòa giữa hai yếu tố: đảm bảo thẩm mỹ trong kiến trúc, xây dựng đồng thời nâng cao hiệu quả năng lượng cho công trình. Khi cộng gộp các lớp giá trị này, giải pháp BIPV mặt đứng là có cơ sở để cân nhắc nhân rộng, đặc biệt cho các công trình dân dụng, toà nhà thương mại, dịch vụ, công sở, trường học, bệnh viện xây mới có diện tích mặt bao quanh lớn, có tiếp xúc với ánh sáng.

4.4. Hạn chế của nghiên cứu và hướng phát triển

Nghiên cứu hiện tại còn một số hạn chế mà nhóm tác giả chủ động nhìn nhận. Chuỗi số liệu mới bao phủ 27 ngày của một tháng, chưa phản ánh biến động mùa trong năm, đặc biệt là các tháng mùa đông ít nắng và các tháng hè bức xạ cao; do đó chưa thể ngoại suy chắc chắn sản lượng năm cũng như thời gian hoàn vốn. Việc phân loại thời tiết bằng quan sát định tính, chưa kèm số liệu đo bức

xạ và nhiệt độ tấm pin đồng thời, nên chưa tách bạch được định lượng ảnh hưởng của từng yếu tố và chưa tính được hệ số hiệu năng (performance ratio) chuẩn. Hiệu quả giảm tải làm mát và độ tiện nghi ánh sáng trong nhà cũng chưa được đo kiểm. Hướng nghiên cứu tiếp theo được đề xuất gồm: quan trắc liên tục tối thiểu 12 tháng kết hợp cảm biến bức xạ trên mặt phẳng tấm pin; so sánh các hướng mặt đứng và các mức độ truyền sáng khác nhau để tìm điểm cân bằng tối ưu giữa phát điện, lấy sáng và cách nhiệt; đồng thời phân tích kinh tế đầy đủ theo vòng đời có kể đến phần chi phí vật liệu bao che được thay thế.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày quá trình lựa chọn công nghệ, thiết kế, lắp đặt và đánh giá hiệu quả sản xuất điện của một hệ thống BIPV sử dụng 58 tấm kính quang điện màng mỏng CdTe bán trong suốt (độ truyền sáng 30%), tổng công suất 3,48kWp, tích hợp vào mặt đứng tầng 4 và tầng 5 của một hội trường tại Hà Nội. Kết quả quan trắc 27 ngày trong tháng 9/2025 cho thấy hệ thống đạt tổng sản lượng 139,5Wh, trung bình 5,17kWh/ngày (suất sinh điện khoảng 1,48 kWh/kWp/ngày); sản lượng ngày âm u đạt xấp xỉ 85% và ngày mưa đạt 60% so với ngày nắng, thể hiện đầu ra ổn định của công nghệ CdTe trong điều kiện bức xạ khuếch tán đặc trưng của miền Bắc Việt Nam. Mặc dù suất sinh điện thấp hơn hệ thống mái nghiêng tối ưu do đặc thù lắp đặt thẳng đứng và yêu cầu truyền sáng, hiệu quả tổng hợp của giải pháp - bao gồm thay thế vật liệu bao che, giảm bức xạ nhiệt vào công trình, phát điện tự tiêu thụ và giá trị thẩm mỹ, trình diễn công nghệ - cho thấy BIPV mặt đứng là hướng ứng dụng có triển vọng cho các công trình công cộng tại Việt Nam. Các kết quả thực nghiệm của nghiên cứu là tài liệu tham khảo hữu ích cho việc thiết kế, dự báo sản lượng và xây dựng chính sách khuyến khích BIPV trong thời gian tới.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xác nhận đã sử dụng Công cụ Gemini 3.1 Pro, ChatGPT 5.5 trong quá trình viết bài báo này, cụ thể cho việc tóm tắt nội dung, rà soát nguồn tài liệu tham khảo, hiệu đính ngôn ngữ, các lỗi chính tả. Toàn bộ nội dung có sự hỗ trợ của AI đã được tác giả rà soát và biên tập lại và chịu trách nhiệm đối với nội dung cuối cùng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. IEA PVPS, *Snapshot of Global PV Markets 2024*. International Energy Agency, Rep. IEA-PVPS T1-T5:2024, 2024.

- [2]. B. P. Jelle, C. Breivik, H. D. Røkenes, "Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 100, 69 - 96, 2012.
- [3]. P. Heinsteins, C. Ballif, L. E. Perret-Aebi, "Building integrated photovoltaics (BIPV): Review, potentials, barriers and myths," *Green*, 3, 2, 125 - 156, 2013.
- [4]. E. Biyik, et al., "A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, 3, 833 - 858, 2017.
- [5]. B. Norton, et al., "Enhancing the performance of building integrated photovoltaics," *Solar Energy*, 85, 8, 1629 - 1664, 2011.
- [6]. T. James, A. Goodrich, M. Woodhouse, R. Margolis, S. Ong, *Building-integrated photovoltaics (BIPV) in the residential sector: An analysis of installed rooftop system prices*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-53103, 2011.
- [7]. N. Bikos, K. Laochoojaroenkit, *Building integrated photovoltaics (BIPV): Tools for implementation and design approaches*. M.S. thesis, Dept. of Architecture, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, Rep. no. 465, 2012.
- [8]. A. K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, "Recent advancement in BIPV product technologies: A review," *Energy and Buildings*, 140, 188 - 195, 2017.
- [9]. M. Tripathy, P. K. Sadhu, S. K. Panda, "A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 451 - 465, 2016.
- [10]. C. Peng, Y. Huang, Z. Wu, "Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China," *Energy and Buildings*, 43, 12, 3592 - 3598, 2011.
- [11]. EN 50583-1:2016, *Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules*. CENELEC, Brussels, Belgium, 2016.
- [12]. T. D. Lee, A. U. Ebong, "A review of thin film solar cell technologies and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1286 - 1297, 2017.
- [13]. M. A. Green, et al., "Solar cell efficiency tables (Version 63)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 32, 1, 3 - 13, 2024.
- [14]. First Solar Inc., *First Solar Series 6 module datasheet*. Tempe, AZ, USA, 2021.
- [15]. Quyết định số 500/QĐ-TTg ngày 15/5/2023 phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. Hà Nội, Việt Nam, 2023.
- [16]. Nghị định số 135/2024/NĐ-CP ngày 22/10/2024 quy định cơ chế, chính sách khuyến khích phát triển điện mặt trời mái nhà tự sản xuất, tự tiêu thụ. Hà Nội, Việt Nam, 2024.
- [17]. World Bank Group, ESMAP, and Solargis, *Global Solar Atlas 2.0*. Washington, DC, USA, 2020. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info>

AUTHORS INFORMATION

Bui Manh Tu¹, Tieu Xuan Hoang²

¹University of Economics - Technology for Industries, Vietnam

²Electric Power University, Vietnam