

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC



ĐẶNG VĂN BÌNH

NGHIÊN CỨU LÀM MÁT BỊ ĐỘNG NHẪM NÂNG CAO
HIỆU SUẤT CHUYỂN ĐỔI CỦA TẮM QUANG ĐIỆN
BẰNG BỘ TẢN NHIỆT

Ngành: Kỹ thuật năng lượng

Mã số: Thí điểm

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KỸ THUẬT NĂNG LƯỢNG

Hà Nội - 2026

**Công trình được hoàn thành tại:
Trường Đại học Điện lực**

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. TS. Phạm Quang Vũ**
- 2. TS. Phạm Mạnh Hải**



Phản biện 1: PGS. TS. Nguyễn Tùng Linh

Phản biện 2: TS. Vũ Minh Pháp

Phản biện 3: PGS. TS. Lê Xuân Thành

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá Luận án Tiến sĩ cấp Trường, họp tại Trường Đại học Điện lực vào hồi 13 giờ 30 phút ngày 15 tháng 5 năm 2026.

Có thể tìm hiệu luận án tại:

1. Thư viện Trường Đại học Điện lực.
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam.

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	3
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	6
1.1. Khái quát chung về tấm quang điện	6
1.1.1. Khái niệm	6
1.1.2. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động	6
1.1.3. Một số thông số đặc trưng của tấm quang điện	6
1.1.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện	7
1.2. Nhiệt độ hoạt động và các giải pháp làm mát tấm quang điện	7
1.2.1. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện	7
1.2.2. Các giải pháp làm mát tấm quang điện	8
1.3. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước về làm mát tấm quang điện bằng bộ tản nhiệt	9
1.4. Khoảng trống nghiên cứu	9
Kết luận chương 1	9
CHƯƠNG 2: XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN XÁC ĐỊNH NHIỆT ĐỘ HOẠT ĐỘNG CỦA TẤM QUANG ĐIỆN	10
2.1. Cơ sở tính toán trao đổi nhiệt của tấm quang điện	10
2.2. Xây dựng mô hình toán xác định nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện	10
2.3. Xây dựng mô hình toán xác định nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện kết hợp bộ tản nhiệt	11
2.4. Kiểm chứng mô hình toán	13
2.5. Tính toán lý thuyết nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện	13
2.5.1. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện khi cường độ bức xạ thay đổi	14
2.5.2. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện khi nhiệt độ môi trường thay đổi	15
2.5.3. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện khi vận tốc gió thay đổi	15

2.5.4. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện khi góc nghiêng thay đổi	16
Kết luận chương 2	16
CHƯƠNG 3: ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ TRUYỀN NHIỆT CỦA CÁC BỘ TẢN NHIỆT VÀ ĐÁNH GIÁ SƠ BỘ KHẢ NĂNG LÀM MÁT TẤM QUANG ĐIỆN	17
3.1. Thông số của bộ tản nhiệt	17
3.2. Đánh giá hiệu quả truyền nhiệt của các bộ tản nhiệt	17
3.3. Đánh giá sơ bộ khả năng làm mát tấm quang điện	19
Kết luận chương 3	20
CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ LÀM MÁT TẤM QUANG ĐIỆN CỦA BỘ TẢN NHIỆT	21
4.1. Mô hình thực nghiệm	21
4.1.1. Nguyên lý tiến hành thực nghiệm	21
4.1.2. Dụng cụ, thiết bị thực nghiệm	21
4.1.3. Tiến hành thực nghiệm	23
4.2. Kết quả thực nghiệm ảnh hưởng của các yếu tố đến hiệu quả làm mát tấm quang điện của các bộ tản nhiệt	23
4.2.1. Ảnh hưởng của cường độ bức xạ đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện	23
4.2.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện	24
4.2.3. Ảnh hưởng của vận tốc gió đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện	26
4.2.4. Ảnh hưởng của góc nghiêng đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện	27
4.3. Thực nghiệm ngoài môi trường thực tế	28
Kết luận chương 4	30
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	31

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Hiện nay, nguồn năng lượng hóa thạch ngày càng cạn kiệt, ô nhiễm môi trường, hiệu ứng nhà kính, nhiệt độ trái đất tăng gây ra những thảm họa thiên nhiên, môi trường. Tại COP26, lãnh đạo các nước trên thế giới đã cam kết thực hiện giảm phát thải ròng bằng không vào năm 2050. Nhằm thực hiện mục tiêu này, Tổ chức Năng lượng thế giới (IEA) đã đưa ra lộ trình phát triển cho ngành năng lượng, trong đó nhấn mạnh việc giảm phát thải từ các ngành vận tải, sản xuất công nghiệp, xây dựng, điện, ... và phát triển các nguồn năng lượng tái tạo, xanh, sạch. Điện mặt trời và điện gió sẽ đóng vai trò quan trọng trong nguồn điện, chiếm 68% tổng nguồn điện.

Việt Nam cũng thể hiện cam kết của mình trong quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 (ban hành năm 2023 và điều chỉnh năm 2025). Điện mặt trời và điện gió chiếm 60,9 - 65,3% tổng cơ cấu nguồn điện, trong đó điện mặt trời chiếm 35,5 - 37,8%.

Đối với điện mặt trời, hiệu suất chuyển đổi (HSCĐ) của tấm quang điện (PV) là một thông số quan trọng. HSCĐ của tấm PV phụ thuộc vào các yếu tố môi trường và vị trí lắp đặt như cường độ bức xạ (CĐBX), nhiệt độ môi trường, gió, bụi, độ ẩm, góc nghiêng, ... Khi hoạt động trong môi trường, một phần bức xạ mặt trời không được chuyển hóa thành điện năng sẽ làm tăng nhiệt độ hoạt động (NĐHĐ) của tấm PV, đây là yếu tố ảnh hưởng đến HSCĐ. Ở điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn (STC), khi NĐHĐ của tấm PV tăng 1°C thì HSCĐ giảm 0,4 - 0,5%.

Vấn đề làm mát tấm PV được rất nhiều nhà khoa học quan tâm, giúp giảm NĐHĐ và quản lý nhiệt qua đó duy trì HSCĐ của tấm PV. Có hai kỹ thuật làm mát tấm PV là làm mát chủ động và làm mát bị động, mỗi kỹ thuật có ưu, nhược điểm và phạm vi ứng dụng khác nhau. Tuy nhiên, kỹ thuật làm mát bị động được quan tâm hơn làm mát chủ động vì chi phí thấp hơn, không mất thêm chi phí năng lượng, không cần chi phí bảo trì vận hành hoặc ít hơn, tuổi thọ, độ tin cậy cao mặc dù khả năng tản nhiệt chậm và khó kiểm soát. Bộ tản nhiệt (BTN) là thiết bị được sử dụng nhiều và mang lại hiệu quả làm mát đáng kể.

Ở Việt Nam hiện nay, điện mặt trời được phát triển mạnh tuy nhiên việc nghiên cứu làm mát tấm PV đặc biệt là kỹ thuật làm mát bị động sử dụng BTN có rất ít nghiên cứu được công bố. Chính vì vậy, luận án lựa chọn “**Nghiên cứu làm mát bị động nhằm nâng cao hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện bằng bộ tản nhiệt**” là cần thiết và phù hợp. BTN hướng tới trong nghiên cứu này là BTN bổ sung thêm lớp đồng ở đế của BTN nhôm nhằm nâng cao hiệu quả truyền nhiệt từ tấm PV đến BTN và ra môi trường xung quanh.

2. Mục tiêu của luận án

Mục tiêu chung của luận án: Sử dụng BTN nhôm - đồng để làm mát bị động tấm PV nhằm giảm NĐHĐ qua đó giảm ảnh hưởng của NĐHĐ đến HSCĐ của tấm PV.

Mục tiêu cụ thể của luận án:

- Nghiên cứu đánh giá các kỹ thuật làm mát tấm PV, lựa chọn kỹ thuật làm mát phù hợp.
- Xây dựng mô hình toán đơn giản hơn để xác định NĐHĐ của tấm PV từ các phương trình truyền nhiệt, phương pháp cân bằng năng lượng và đảm bảo độ chính xác.
- Lựa chọn, chế tạo, đánh giá hiệu quả truyền nhiệt của BTN nhôm - đồng.
- Thực nghiệm, đánh giá hiệu quả làm mát tấm PV của BTN nhôm - đồng trong điều kiện phòng thí nghiệm và môi trường thực tế tại Hà Nội để chứng minh tính toán dựa trên mô hình toán xây dựng được phản ánh đúng xu hướng của thực nghiệm.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu của luận án: BTN nhôm - đồng và tấm PV gắn thêm BTN vào mặt sau thực hiện quá trình trao đổi nhiệt đối lưu tự nhiên.

- Phạm vi nghiên cứu của luận án: Nghiên cứu này tập trung đánh giá, so sánh hiệu quả làm mát tấm PV của BTN cánh nhôm có đế nhôm và đế nhôm bổ sung thêm lớp đồng 1mm, 2mm với tấm PV không được làm mát. Nghiên cứu được tiến hành trong điều kiện phòng thí nghiệm và môi trường thực tế tại Hà Nội. Các nội dung nghiên cứu về hiệu quả kinh tế, ảnh hưởng tương tác giữa các tấm PV với nhau, giữa tấm PV và

các đối tượng xung quanh, tuổi thọ thiết bị chưa được xem xét trong luận án này.

4. Phương pháp nghiên cứu

- + Nghiên cứu lý thuyết.
- + Nghiên cứu thực nghiệm.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

- Ý nghĩa khoa học: Bổ sung thêm cơ sở khoa học về tính toán NĐHĐ của tấm PV không và được làm mát bằng BTN dựa trên truyền nhiệt.

- Ý nghĩa thực tiễn: Giải pháp làm mát bị động sử dụng BTN giúp giảm NĐHĐ của tấm PV, qua đó giảm ảnh hưởng của NĐHĐ đến HSCĐ góp phần nâng cao công suất điện đầu ra của tấm PV. Gián tiếp góp phần nâng cao ứng dụng điện mặt trời, giảm ô nhiễm môi trường.

6. Bố cục của luận án

Để giải quyết và làm rõ các vấn đề đã nêu trên, nội dung luận án được bố cục thành 4 chương:

Chương 1. Tổng quan vấn đề nghiên cứu.

Chương 2. Xây dựng mô hình toán xác định nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện.

Chương 3. Đánh giá hiệu quả truyền nhiệt của bộ tản nhiệt nhôm - đồng và đánh giá sơ bộ khả năng làm mát tấm quang điện.

Chương 4. Thực nghiệm đánh giá hiệu quả làm mát tấm quang điện của bộ tản nhiệt.

7. Những đóng góp mới của luận án

- Xây dựng được mô hình toán xác định NĐHĐ dựa trên các phương trình truyền nhiệt và cân bằng năng lượng đối với tấm PV không và được làm mát bằng BTN có xét đến bổ sung thêm lớp đồng vào đế.

- Đánh giá hiệu quả truyền nhiệt đối lưu tự nhiên của BTN cánh nhôm có bổ sung thêm lớp đồng vào đế.

- Đánh giá ảnh hưởng của các thông số như CĐBX, nhiệt độ môi trường, vận tốc gió và góc nghiêng đến hiệu quả làm mát bị động tấm PV của các BTN trong điều kiện phòng thí nghiệm tại Việt Nam.

- Đánh giá khả năng làm mát bị động, nâng cao HSCĐ của tấm PV trong điều kiện môi trường thực tế tại Hà Nội khi sử dụng BTN nhôm - đồng.

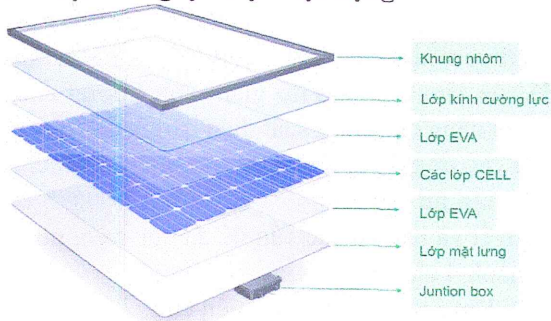
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. KHÁI QUÁT CHUNG VỀ TẮM QUANG ĐIỆN

1.1.1. Khái niệm

Tấm PV là thiết bị chuyển đổi ánh sáng mặt trời thành điện năng thông qua hiệu ứng quang điện.

1.1.2. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

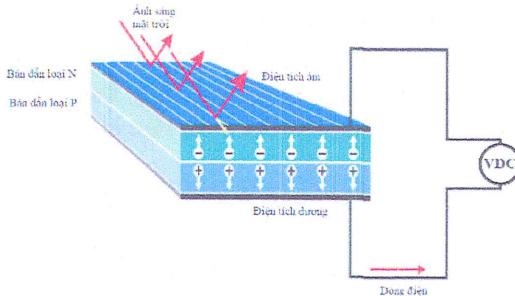


Hình 1.1. Cấu tạo của tấm PV

Cấu tạo tấm PV như thể hiện trong hình 1.1.

Nguyên lý hoạt động:

Tấm PV hoạt động nhờ hiệu ứng quang điện. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của tấm PV như thể hiện trên hình 1.2.



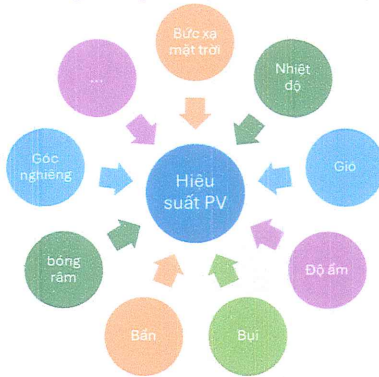
Hình 1.2. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của tấm PV

1.1.3. Một số thông số đặc trưng của tấm quang điện

- Dòng ngắn mạch I_{sc} .
- Điện áp hở mạch V_{oc} .
- Điểm công suất cực đại P_M .
- Hiệu suất chuyển đổi.

1.1.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện

Trong quá trình hoạt động, HSCĐ của tấm PV phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố môi trường và vị trí lắp đặt như CĐBX, nhiệt độ môi trường, gió, bụi, độ ẩm, góc nghiêng,... (hình 1.9).



Hình 1.9. Các yếu tố ảnh hưởng đến HSCĐ của tấm PV

1.2. NHIỆT ĐỘ HOẠT ĐỘNG VÀ CÁC GIẢI PHÁP LÀM MÁT TẤM QUANG ĐIỆN

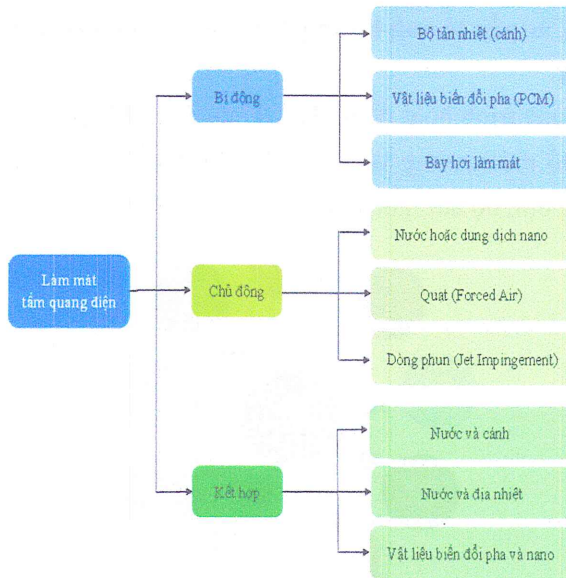
1.2.1. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện

Vấn đề tính toán, xác định NĐHĐ của tấm PV cần được quan tâm để có giải pháp quản lý nhiệt của tấm PV tốt qua đó giúp tấm PV hoạt động an toàn, hiệu suất ổn định. Hiện nay, có nhiều công thức tính toán, xác định NĐHĐ của tấm PV. NĐHĐ của tấm PV phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như CĐBX, nhiệt độ môi trường, vận tốc gió.

Hệ số nhiệt độ của mỗi công nghệ tế bào quang điện khác nhau là khác nhau, cụ thể công nghệ m-Si, p-Si, CIGS, CIS, CdTe lần lượt là -0,44; -0,45; -0,38; -0,39; -0,25 (%/K). Do đó nhằm duy trì HSCĐ của tấm PV khi làm việc, thì làm mát tấm PV là một giải pháp được quan tâm nghiên cứu.

1.2.2. Các giải pháp làm mát tấm quang điện

Các giải pháp làm mát tấm PV có thể phân loại như trong hình 1.11.



Hình 1.11. Phân loại kỹ thuật làm mát tấm PV

Trong làm mát và quản lý nhiệt tấm PV, làm mát bị động được quan tâm hơn làm mát chủ động vì chi phí thấp hơn, không mất thêm chi phí năng lượng, không cần chi phí bảo trì vận hành hoặc ít hơn.

Giải pháp làm mát bị động trong đó có sử dụng BTN có hiệu quả làm mát chưa cao như các giải pháp làm mát chủ động nhưng mang lại phương pháp bền vững và tiết kiệm năng lượng hơn nên sẽ được đặc biệt quan tâm.

1.3. TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU TRONG VÀ NGOÀI NƯỚC VỀ LÀM MÁT TẤM QUANG ĐIỆN BẰNG BỘ TẢN NHIỆT

BTN là một thiết bị được sử dụng trong làm mát các linh kiện điện, điện tử và mang lại hiệu quả tốt.

Trong làm mát bị động tấm PV, BTN được sử dụng, nghiên cứu nhiều và mang lại hiệu quả làm mát đáng kể.

Hiệu quả làm mát tấm PV của BTN có kết quả khác nhau khá nhiều giữa nghiên cứu mô phỏng và thực nghiệm, giữa các nghiên cứu với nhau.

BTN giúp giảm NĐHĐ qua đó giúp nâng cao HSCĐ của tấm PV.

Nhôm và đồng là hai vật liệu chính để chế tạo BTN. BTN nhôm có hiệu quả làm mát kém hơn BTN đồng nhưng được nghiên cứu và ứng dụng nhiều hơn do giá thành rẻ và dễ gia công.

Đối với thực nghiệm, khi lắp thêm BTN nhôm vào mặt sau có thể giúp giảm NĐHĐ của tấm PV khoảng $7 \div 8^{\circ}\text{C}$; với BTN đồng có thể giảm khoảng 15°C . BTN đồng có hiệu quả làm mát cao hơn BTN nhôm do hệ số dẫn nhiệt của đồng cao hơn.

Các vật liệu khác như sắt, hợp kim cũng được sử dụng để chế tạo các BTN nhưng hiệu quả thấp hơn BTN nhôm.

Cấu trúc cánh của BTN ảnh hưởng đến hiệu quả làm mát; cánh phẳng, không liên tục có cấu trúc đơn giản và hiệu quả cao; cánh phẳng tốt hơn cánh trụ; cánh phẳng có đục lỗ, tạo sóng tốt hơn cánh phẳng.

1.3. KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU

Từ các nghiên cứu đã công bố có thể thấy, các BTN sử dụng để làm mát tấm PV đa phần được chế tạo từ một loại vật liệu đơn lẻ, có rất ít nghiên cứu trình bày về BTN sử dụng hai loại vật liệu.

Nâng cao hiệu quả truyền nhiệt của đế BTN là một giải pháp để tăng cường hiệu quả làm mát của BTN. BTN cánh nhôm bổ sung thêm đồng ở lớp đế đã được ứng dụng trong làm một số thiết bị điện, điện tử. Tuy nhiên, có rất ít nghiên cứu về sử dụng BTN có đế được bổ sung thêm lớp đồng để tăng cường hiệu quả làm mát cho tấm PV.

Đặc biệt, trong thực tế, nhiệt độ của tấm PV không hoàn toàn đồng đều ở mọi vị trí nên khi BTN nhôm bổ sung thêm lớp đồng ở đế sẽ giúp nhiệt từ các điểm nóng cục bộ có thể phân tán ra đế và cánh BTN nhanh và đồng đều hơn.

Ở Việt Nam, nghiên cứu làm mát bị động tấm PV sử dụng BTN, đặc biệt là BTN từ hai loại vật liệu nhôm và đồng chưa được công bố trong bất kỳ nghiên cứu, ấn phẩm nào. Chính vì vậy, luận án lựa chọn nghiên cứu làm mát bị động nhằm nâng cao HSCĐ của tấm PV sử dụng BTN và BTN hướng đến là BTN cánh nhôm bổ sung thêm lớp đồng ở đế để tăng cường khả năng truyền nhiệt trong điều kiện, phạm vi ở Việt Nam là có tính mới

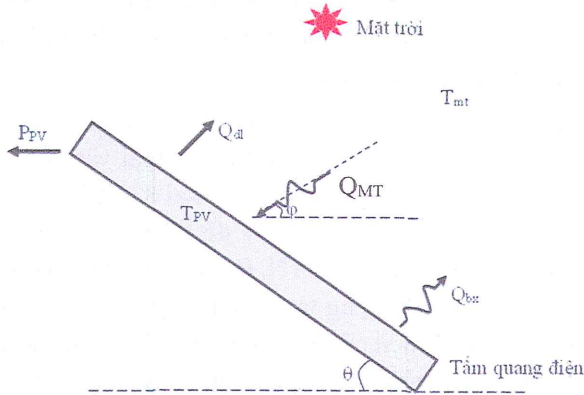
KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

CHƯƠNG 2: XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN XÁC ĐỊNH NHIỆT ĐỘ HOẠT ĐỘNG CỦA TẮM QUANG ĐIỆN

2.1. CƠ SỞ TÍNH TOÁN TRAO ĐỔI NHIỆT CỦA TẮM QUANG ĐIỆN

Khi tấm PV làm việc trong môi trường thực tế, tấm PV sẽ trao đổi nhiệt với môi trường xung quanh bằng các phương thức: dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ.

2.2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN XÁC ĐỊNH NHIỆT ĐỘ HOẠT ĐỘNG CỦA TẮM QUANG ĐIỆN



Hình 2.3. Sơ đồ trao đổi nhiệt giữa tấm PV và môi trường

Sơ đồ trao đổi nhiệt giữa tấm PV và môi trường như thể hiện trong hình 2.3. Khi tấm PV làm việc, phương trình cân bằng năng lượng của tấm PV được xác định như sau:

- Tại trạng thái ổn định: $Q_{MT} - Q_{bx} - Q_{dl} - P_{PV} = 0$

- Tại trạng thái động (không ổn định):

$$Q_{MT} - Q_{bx} - Q_{dl} - P_{PV} = C_{PV} \frac{dT_{PV}}{dt}$$

Với:

$$Q_{MT} = \alpha_{PV} A E_{MT} \sin(\varphi + \theta) \quad Q_{bx} = 2A\sigma(\varepsilon_{PV} T_{PV}^4 - \varepsilon_{bt} T_{bt}^4) = 2A\sigma\varepsilon(T_{PV}^4 - T_{mt}^4)$$

$$Q_{dl} = h_{PV,t} A (T_{PV} - T_{mt}) + h_{PV,s} A (T_{PV} - T_{mt})$$

h_{PV} có thể xác định bằng các công thức thực nghiệm sau:

$$+ h_{PV} = 5,7 + 3,8v \text{ với } 1 < v < 5 \text{ m/s}$$

$$+ h_{PV} = 2,8 + 3,0v \text{ với } 1 < v < 7 \text{ m/s}$$

$$+ h_{PV} = 3,8v \text{ với } v \leq 5 \text{ m/s}; h_{PV} = 7,17v^{0,78} \text{ với } v > 5 \text{ m/s}$$

$$P_{PV} = \alpha_{PV} A E_{MT} \sin(\varphi + \theta) \eta_{PV} = \alpha_{PV} A E_{MT} \sin(\varphi + \theta) \eta_{STC} (1 - \beta(T_{PV} - T_{STC}))$$

Như vậy:

- Tại trạng thái ổn định:

$$-2\sigma\varepsilon T_{PV}^4 - [h_{PV,i} + h_{PV,s} - \alpha_{PV} E_{MT} \sin(\varphi + \theta) \eta_{STC} \beta] T_{PV} + \left[\alpha_{PV} E_{MT} \sin(\varphi + \theta) + 2\sigma\varepsilon T_{m}^4 + h_{PV,i} T_{m} + h_{PV,s} T_{m} - \alpha_{PV} E_{MT} \sin(\varphi + \theta) \eta_{STC} (1 + \beta T_{STC}) \right] = 0$$

- Tại trạng thái động (không ổn định):

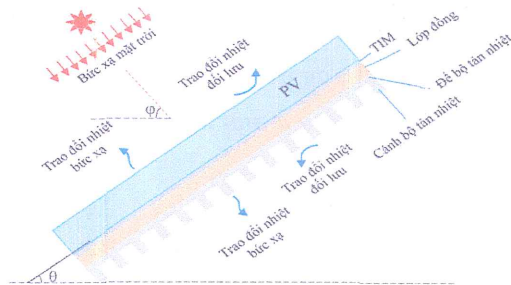
$$-2\sigma\varepsilon T_{PV}^4 - [h_{PV,i} + h_{PV,s} - \alpha_{PV} E_{MT} \sin(\varphi + \theta) \eta_{STC} \beta] T_{PV} + \left[\alpha_{PV} E_{MT} \sin(\varphi + \theta) + 2\sigma\varepsilon T_{m}^4 + h_{PV,i} T_{m} + h_{PV,s} T_{m} - \alpha_{PV} E_{MT} \sin(\varphi + \theta) \eta_{STC} (1 + \beta T_{STC}) \right] = C_{PV} \frac{dT_{PV}}{dt}$$

HSCĐ được xác định theo công thức:

$$\eta_{PV} = \eta_{STC} \cdot (1 - \beta(T_{PV} - T_{STC}))$$

2.3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN XÁC ĐỊNH NHIỆT ĐỘ HOẠT ĐỘNG CỦA TẮM QUANG ĐIỆN KẾT HỢP BỘ TẢN NHIỆT

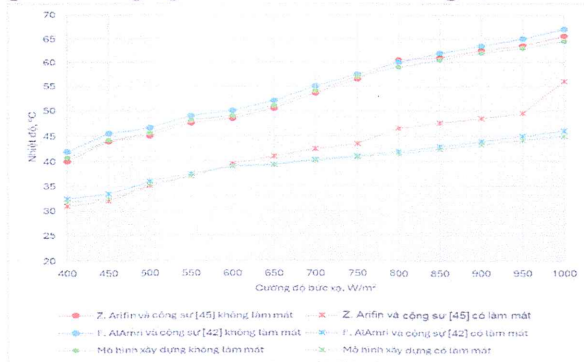
Tấm PV được gắn thêm BTN nhôm - đồng để làm mát thể hiện như trên hình 2.4.



Hình 2.4. Mô hình tấm PV gắn thêm BTN nhôm - đồng

2.4. KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH TOÁN

Để đánh giá độ chính xác của mô hình toán, tiến hành so sánh kết quả của tính toán NĐHĐ của tấm PV với kết quả tính toán bằng mô hình của Faha AlAmri và cộng sự và kết quả thực nghiệm của Arifin và cộng sự. Tính toán sử dụng các thông số của tấm PV, BTN, điều kiện môi trường như trong nghiên cứu Arifin và cộng sự.



Hình 2.6. So sánh NĐHĐ của tấm PV tính theo mô hình xây dựng được, Z. Arifin và cộng sự và F. AlAmri và cộng sự

Từ kết quả so sánh trong hình 2.6 cho thấy, mô hình tính toán xây dựng được có độ chính xác và có thể dùng để tính toán so sánh với kết quả thực nghiệm ở các nội dung sau.

2.5. TÍNH TOÁN LÝ THUYẾT NHIỆT ĐỘ HOẠT ĐỘNG CỦA TẤM QUANG ĐIỆN

Thông số cơ bản của tấm PV và BTN sử dụng trong tính toán như thể hiện trong bảng 2.2.

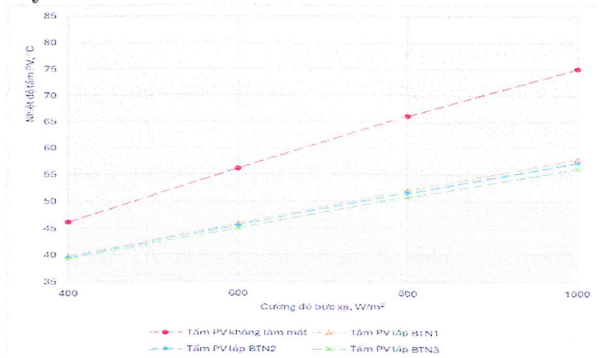
Bảng 2.2. Một số thông số của tấm PV và BTN

STT	Thông số	Giá trị
I	Tấm PV	
I.1	Công suất lớn nhất, P_{max}	50Wp
I.2	Loại cell	Monocrystalline
I.3	Kích thước (L×W×H)	670×540×30mm

I.4	Hiệu suất chuyển đổi, η	18,9%
I.5	Hệ số nhiệt độ tại P_{\max} , β	-0,38%/K
I.6	Hệ số phát xạ, ϵ_{PV}	0,96
I.7	Hệ số hấp phụ, α_{PV}	0,96
II	BTN	
II.1	Vật liệu (cánh và đế)	Nhôm, Đồng
II.2	Kích thước (L×W)	670×540mm
II.3	Chiều cao cánh (H_{fin})	15mm
II.4	Độ dày cánh, δ_{fin}	1,5mm
II.5	Bước cánh, a_{fin}	4,5mm
II.6	Chiều dày đế (lớp đồng và nhôm)	3mm
II.7	Số cánh	90
II.8	Hệ số dẫn nhiệt của nhôm	205W/m.K
II.9	Hệ số dẫn nhiệt của đồng	380W/m.K
II.10	Hệ số phát xạ của nhôm	0,05

Vật liệu dẫn nhiệt (TIM) được sử dụng để kết nối BTN với tấm PV là tấm tản nhiệt Snowman có chiều dày 0,5mm và hệ số dẫn nhiệt là 16,8W/m.K.

2.5.1. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện khi cường độ bức xạ thay đổi



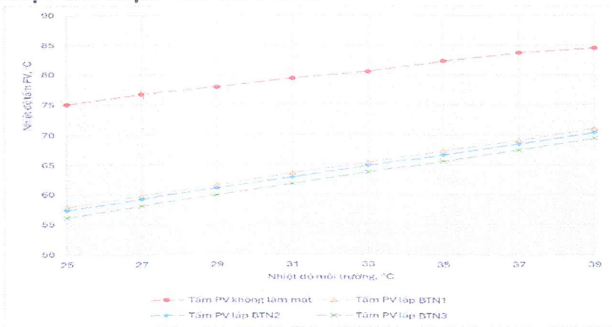
Hình 2.7. NĐHD tính toán của tấm PV ở các mức CĐBX khác nhau

NĐHD của tấm PV được tính toán với điều kiện $t_{mt} = 25^{\circ}C$, $\theta = 0^{\circ}$ (tấm PV đặt nằm ngang), $v = 0m/s$ (không có gió) và

$E = 400\text{W/m}^2, 600\text{W/m}^2, 800\text{W/m}^2$ và 1000W/m^2 . Kết quả tính toán NĐHĐ của tấm PV như được thể hiện trên hình 2.7.

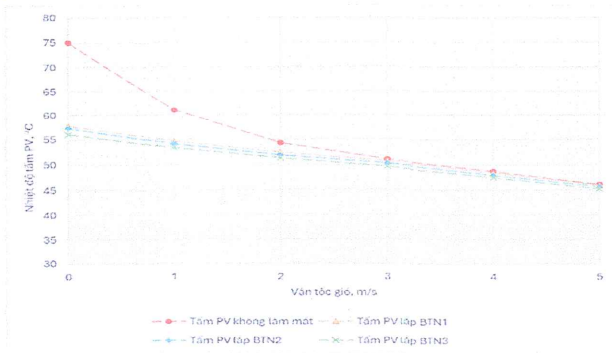
2.5.2. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện khi nhiệt độ môi trường thay đổi

NĐHĐ của tấm PV tính toán với điều kiện $\theta = 0^\circ$ (tấm PV đặt nằm ngang), $v = 0\text{m/s}$ (không có gió), $E = 1000\text{W/m}^2$ và $t_{\text{mt}} = 25^\circ\text{C}, 27^\circ\text{C}, 29^\circ\text{C}, 31^\circ\text{C}, 33^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}, 37^\circ\text{C}$ và 39°C . Kết quả tính toán NĐHĐ của tấm PV được thể hiện trên hình 2.8.



Hình 2.8. NĐHĐ tính toán của tấm PV khi nhiệt độ môi trường thay đổi

2.5.3. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện khi vận tốc gió thay đổi

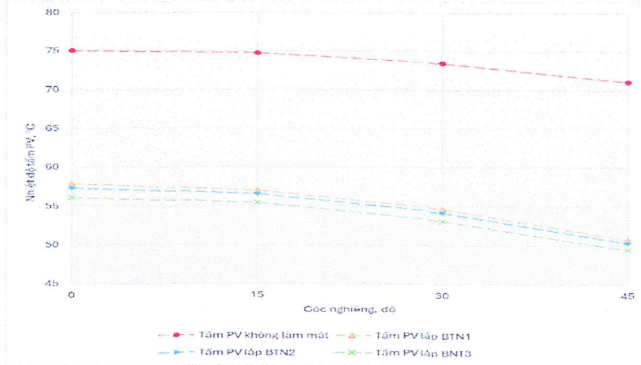


Hình 2.9. NĐHĐ tính toán của tấm PV khi vận tốc gió thay đổi

NĐHĐ của tấm PV tính toán với điều kiện $\theta = 0^\circ$ (tấm PV đặt nằm ngang), $t_{\text{mt}} = 25^\circ\text{C}$, $E = 1000\text{W/m}^2$ và $v = 0, 1, 2, 3, 4, 5\text{m/s}$. Kết quả tính toán của tấm PV được thể hiện trên hình 2.9.

2.5.4. Nhiệt độ hoạt động của tấm quang điện khi góc nghiêng thay đổi

Tính toán NĐHD của tấm PV với điều kiện $t_{mt} = 25^{\circ}\text{C}$, $E = 1000\text{W/m}^2$, $v = 0\text{m/s}$ (không có gió) với $\theta = 0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}$ và 45° . Kết quả NĐHD tính toán của tấm PV như thể hiện trên hình 2.10.



Hình 2.10. NĐHD tính toán của tấm PV khi góc nghiêng thay đổi

Từ các kết quả tính toán trên cho thấy, BTN giúp làm giảm NĐHD của tấm PV. Với BTN bổ sung thêm lớp đồng vào để nhôm giúp nâng cao hiệu quả làm mát tấm PV khi coi liên kết đồng và nhôm là lý tưởng (không có điện trở tiếp xúc).

Trong thực tế khi liên kết tấm đồng với đế nhôm của BTN luôn tồn tại một nhiệt trở tiếp xúc. Nhiệt trở đế của các BTN gần như không có sự chênh lệch nhiều khi sử dụng liên kết khuếch tán (diffusion bonding - DB), hàn khuấy ma sát (friction stir welding - FSW) và hàn nổ (explosion welding - EW). Nếu sử dụng vật liệu tản nhiệt (TIM) để liên kết tấm đồng và đế nhôm sẽ có ảnh hưởng nhất định đến khả năng truyền nhiệt của đế do vật liệu tản nhiệt thường có hệ số dẫn nhiệt thấp hơn so với nhôm và đồng. Như vậy, để BTN đế nhôm bổ sung thêm lớp đồng hoạt động hiệu quả thì cần phải lựa chọn phương pháp kết nối phù hợp, có nhiệt trở tiếp xúc thấp để không ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

CHƯƠNG 3: ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ TRUYỀN NHIỆT CỦA CÁC BỘ TẢN NHIỆT VÀ ĐÁNH GIÁ SƠ BỘ KHẢ NĂNG LÀM MÁT TẮM QUANG ĐIỆN

3.1. THÔNG SỐ CỦA BỘ TẢN NHIỆT

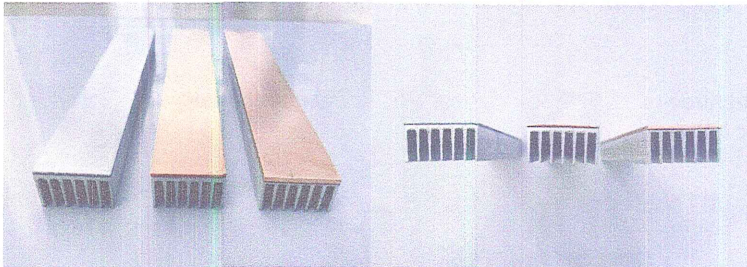
Thông số cơ bản của 03 BTN được thể hiện trong bảng 3.1.

Bảng 3.1. Thông số của BTN

STT	Thông số	BTN1	BTN2	BTN3
1	Vật liệu cánh	Nhôm nguyên chất		
2	Chiều cao cánh	15mm	15mm	15mm
3	Chiều dài cánh	210mm	210mm	210mm
4	Chiều dày cánh	1,5mm	1,5mm	1,5mm
5	Số lượng cánh	7	7	7
6	Vật liệu đế	Nhôm	Nhôm và đồng	Nhôm và đồng
7	Diện tích bề mặt đế	210 x 35mm	210 x 35mm	210 x 35mm
8	Chiều dày đế	3mm nhôm	1mm đồng + 2mm nhôm	2mm đồng + 1mm nhôm

Tấm đồng được gắn thêm vào đế nhôm của BTN bằng tấm dán dẫn nhiệt Snowman dày 0,5mm và có hệ số dẫn nhiệt là 16,8W/m.K.

Hình ảnh ba BTN chế tạo được như thể hiện trên hình 3.2.

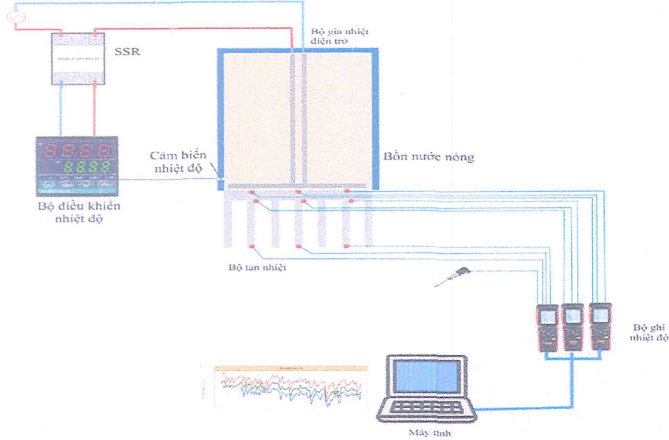


Hình 3.2. Các BTN chế tạo được

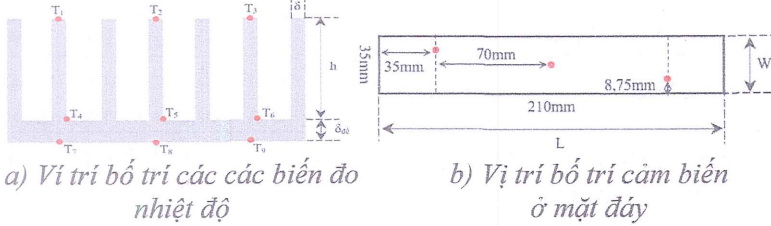
3.2. ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ TRUYỀN NHIỆT CỦA CÁC BỘ TẢN NHIỆT

Các BTN sau khi được chế tạo cần được đánh giá hiệu quả truyền nhiệt bằng thực nghiệm để so sánh.

Sơ đồ thực nghiệm như được thể hiện trên hình 3.3.



Hình 3.3. Sơ đồ thực nghiệm đánh giá hiệu quả truyền nhiệt của BTN



a) Vị trí bố trí các cảm biến đo nhiệt độ

b) Vị trí bố trí cảm biến ở mặt đáy

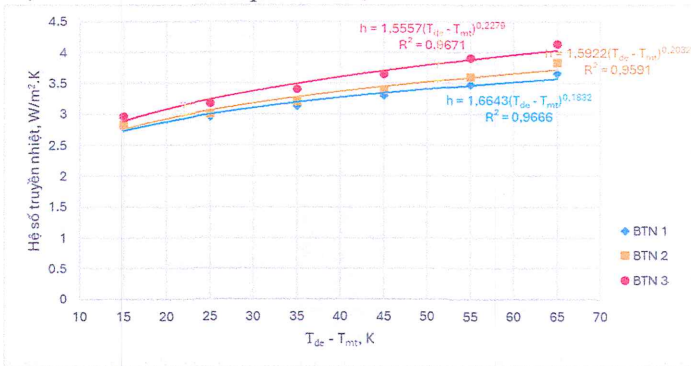
Hình 3.4. Sơ đồ bố trí cảm biến đo nhiệt độ BTN



Hình 3.5. Mô hình thực nghiệm đánh giá hiệu quả truyền nhiệt của BTN

Hình 3.5 là mô hình thực nghiệm thực tế.

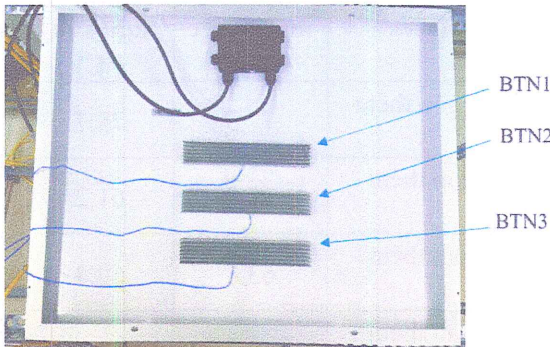
Phương trình tổng quát hệ số trao đổi nhiệt đối lưu tự nhiên theo nhiệt độ là $h = a\Delta T^n$. Kết quả thể hiện trên hình 3.6.



Hình 3.6. Phương trình hồi quy hệ số trao đổi nhiệt đối lưu tự nhiên của các BTN

BTN bổ sung thêm đồng vào để có tốc độ truyền nhiệt đến lớp đế nhôm, chân cánh nhanh hơn so với BTN đế nhôm. Qua đó, giúp quá trình làm mát nhanh và hiệu quả hơn.

3.3. ĐÁNH GIÁ SƠ BỘ KHẢ NĂNG LÀM MÁT TẮM QUANG ĐIỆN



Hình 3.9. Hình ảnh các BTN được gắn lên mặt sau các cell của tấm PV

Ba BTN được gắn vào vào mặt sau 3 cell của tấm PV để đánh giá sơ bộ khả năng làm mát. Hình ảnh các BTN được gắn lên mặt sau tấm PV như được thể hiện trên hình 3.9. Tấm PV được đặt ở vị trí $\theta = 0^\circ$, $t_{mt} = 25^\circ C$, $E = 1000 W/m^2$.



Hình 3.10. Hình ảnh đánh giá sơ bộ khả năng làm mát tấm PV của các BTN

Hình ảnh thử nghiệm đánh giá sơ bộ như được thể hiện trong hình 3.10. Nhiệt độ bề mặt trước và mặt sau các cell của tấm PV như được thể hiện trong bảng 3.7.

Bảng 3.7. Nhiệt độ các cell của tấm PV

STT	Cell	Nhiệt độ mặt trước (°C)	Nhiệt độ mặt sau (°C)	Nhiệt độ trung bình (°C)
1	Cell không gắn thêm BTN	77,5	75,7	76,6
2	Cell được gắn thêm BTN 1	63,8	61,2	62,5
3	Cell được gắn thêm BTN 2	63,4	60,8	62,1
4	Cell được gắn thêm BTN 3	62,4	59,6	61,0

Qua kết quả trên bảng 3.7 cho thấy, các cell được gắn thêm BTN phía mặt sau sẽ giúp giảm nhiệt độ trung bình là 14,1°C (BTN 1), 14,5°C (BTN 2) và 15,6°C (BTN 3) so với cell không gắn thêm BTN.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

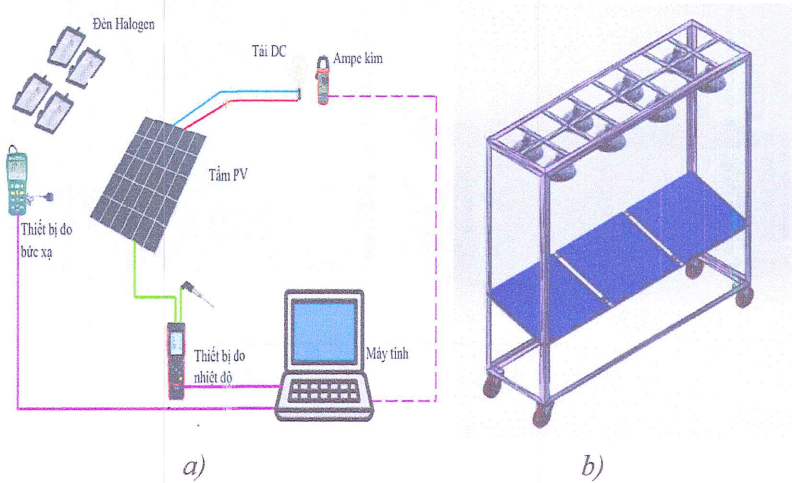
CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ LÀM MÁT TẮM QUANG ĐIỆN CỦA BỘ TẢN NHIỆT

4.1. MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM

4.1.1. Nguyên lý tiến hành thực nghiệm

Sơ đồ nguyên lý và mô hình thực nghiệm như thể hiện trên hình

4.1.



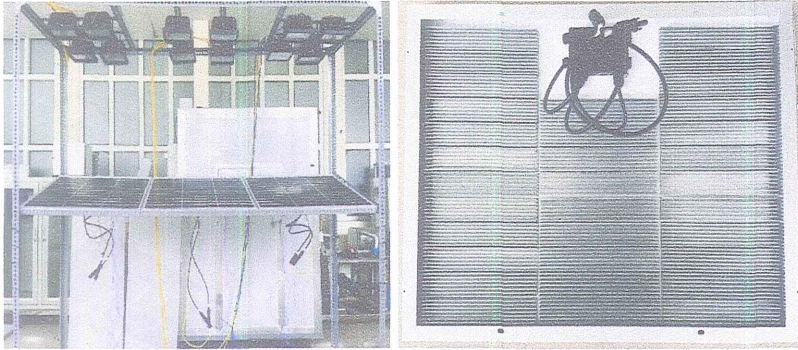
Hình 4.1. Sơ đồ nguyên lý (a) và mô hình 3D thực nghiệm

4.1.2. Dụng cụ, thiết bị thực nghiệm

Bảng 4.1. Một số thông số của tấm PV

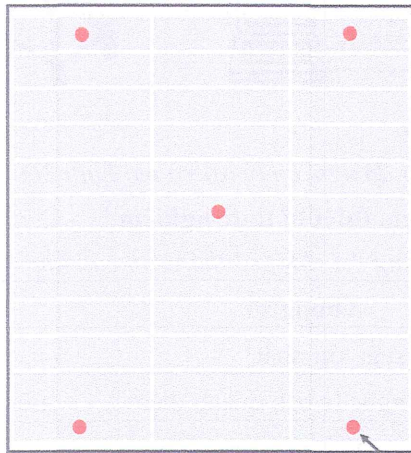
STT	Thông số	Giá trị
1	Công suất lớn nhất	50Wp
2	Công nghệ tế bào quang điện	monocrystalline
3	Số lượng tế bào quang điện	36
4	Kích thước	670x540x30mm
5	HSCĐ	18,9%
6	Hệ số nhiệt độ	-0,38%/K
7	Nhiệt độ hoạt động	-40 ÷ 85°C

Thực nghiệm sử dụng 04 tấm PV monocrystalline, trong đó 03 tấm được gắn các BTN (tấm PV gắn thêm BTN 1 ký hiệu là PV1; gắn thêm BTN 2 ký hiệu là PV2; gắn thêm BTN 3 ký hiệu là PV3) và 01 tấm nguyên bản (ký hiệu là PV0) để so sánh. Một số thông số cơ bản của tấm PV như được thể hiện trên bảng 4.1.



a)

b)



Vị trí cảm biến

c)

Hình 4.2. Mô hình thực nghiệm (a); mặt sau tấm PV gắn thêm BTN (b); và bố trí đầu đo cảm biến nhiệt độ (c)

Các BTN với các thông số như trong bảng 3.1 được chế tạo và gắn vào mặt sau của tấm PV theo từng cell riêng biệt bằng tấm dán dẫn nhiệt Snowman dày 0,5mm và có hệ số dẫn nhiệt là 16,8W/m.K. Mỗi tấm PV được gắn thêm 33 BTN mỗi loại.

Mô hình thực nghiệm thực tế và cách bố trí đầu đo cảm biến nhiệt độ như thể hiện trên hình 4.2.

4.1.3. Tiến hành thực nghiệm

Các tấm PV được thực nghiệm với các kịch bản như sau:

Kịch bản 1: $t_{mt} = 25^{\circ}\text{C}$, $\theta = 0^{\circ}$ (tấm PV đặt nằm ngang), $v = 0\text{m/s}$ (không có gió) và $E = 400\text{W/m}^2$, 600W/m^2 , 800W/m^2 , 1000W/m^2 .

Kịch bản 2: $E = 1000\text{W/m}^2$, $\theta = 0^{\circ}$ (tấm PV đặt nằm ngang), $v = 0\text{m/s}$ (không có gió) và $t_{mt} = 25^{\circ}\text{C}$, 27°C , 29°C , 31°C , 33°C , 35°C , 37°C , 39°C .

Kịch bản 3: $E = 1000\text{W/m}^2$, $t_{mt} = 25^{\circ}\text{C}$, $\theta = 0^{\circ}$ (tấm PV đặt nằm ngang) và $v = 0, 1, 2, 3\text{m/s}$ (gió thổi song song với bề mặt tấm PV và tốc độ gió được điều chỉnh nhờ thay đổi tốc độ của quạt và khoảng cách giữa quạt và tấm PV).

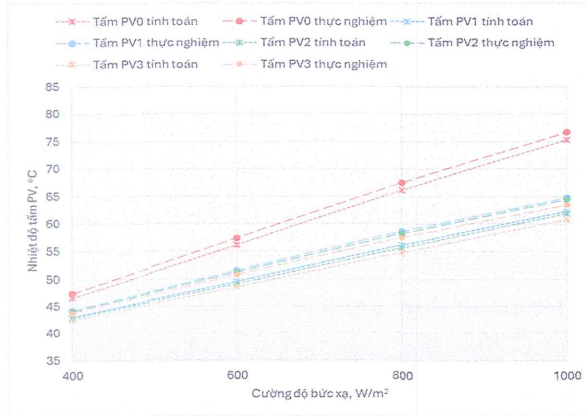
Kịch bản 4: $E = 1000\text{W/m}^2$, $t_{mt} = 25^{\circ}\text{C}$, $v = 0\text{m/s}$ (không có gió) và $\theta = 0^{\circ}$, 15° , 30° , 45° .

4.2. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC YẾU TỐ ĐẾN HIỆU QUẢ LÀM MÁT TẤM QUANG ĐIỆN CỦA CÁC BỘ TẢN NHIỆT

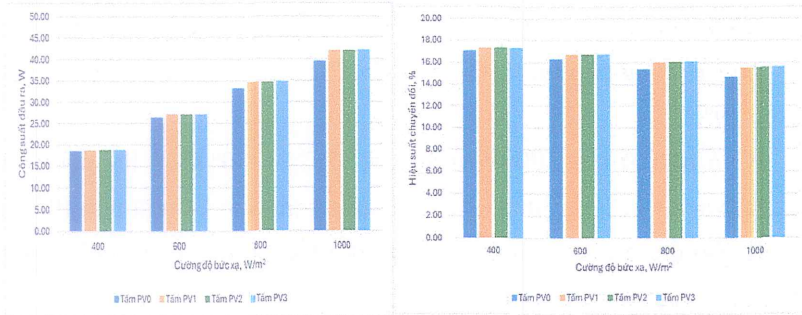
4.2.1. Ảnh hưởng của cường độ bức xạ đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện

Kết quả NĐHD của các tấm PV như được thể hiện trong hình 4.3.

Khi lắp thêm BTN, NĐHD của tấm PV giảm qua đó giúp nâng cao HSCĐ so với tấm PV nguyên bản như được thể hiện trong hình 4.4.



Hình 4.3. So sánh NDHD của các tấm PV ở các CĐBX khác nhau



a)

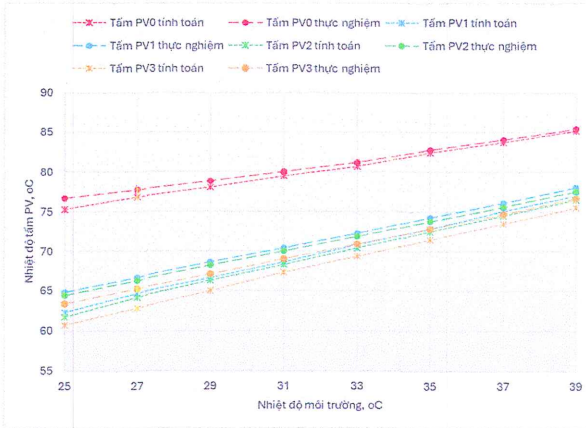
b)

Hình 4.4. So sánh công suất đầu ra (a) và HSCĐ (b) của các tấm PV ở các CĐBX khác nhau

Từ bảng 4.4 và hình 4.4 cho thấy, ở $E = 1000 \text{ W/m}^2$, so với tấm PV0 (nguyên bản), tấm PV được làm mát bị động bằng cách gắn BTN 1, 2, 3 giúp tăng HSCĐ thêm 0,85%; 0,88% và 0,95%, tương ứng công suất đầu ra tăng 5,8%; 6,0% và 6,48%.

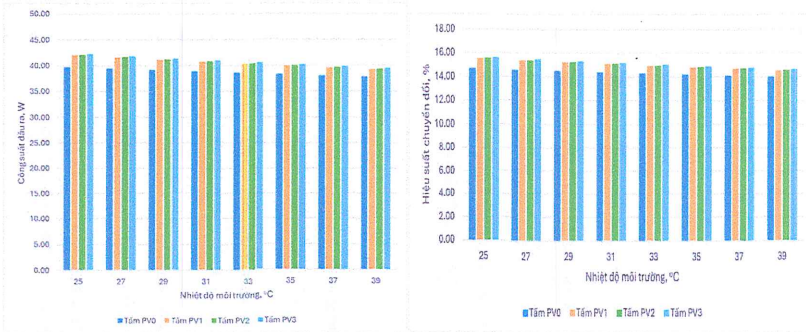
4.2.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện

Kết quả NDHD của các tấm PV như được thể hiện trong hình 4.5.



Hình 4.5. So sánh NĐHĐ tính toán và thực nghiệm của các tấm PV khi nhiệt độ môi trường thay đổi

Công suất đầu ra và HSCĐ của các tấm PV được thể hiện trên hình 4.6.



a)

b)

Hình 4.6. So sánh công suất đầu ra (a) và HSCĐ (b) của các tấm PV ở nhiệt độ môi trường khác nhau

Ở $t_{mt} = 39^{\circ}\text{C}$, NĐHĐ của tấm PV0 là lớn nhất nên HSCĐ của tấm PV0 thấp nhất (14,00%). Khi gắn thêm các BTN, HSCĐ của các tấm PV1, PV2, PV3 tăng thêm 0,53%; 0,57% và 0,63%, tương ứng công suất đầu ra tăng 3,78%; 4,07% và 4,5% so với tấm PV0.

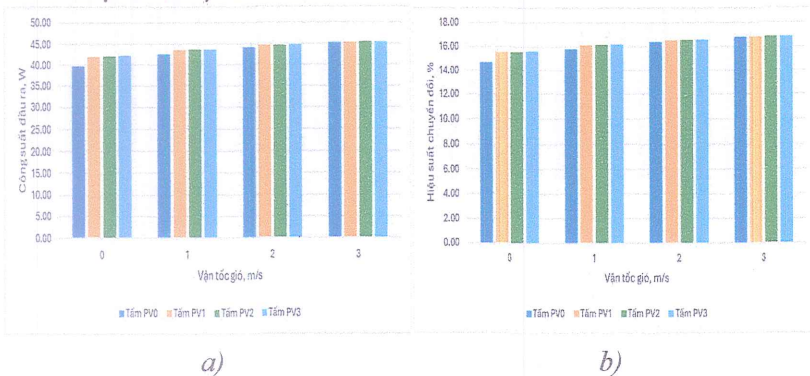
4.2.3. Ảnh hưởng của vận tốc gió đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện

Kết quả NĐHĐ của các tấm PV như được thể hiện trong hình 4.7.



Hình 4.7. So sánh NĐHĐ tính toán và thực nghiệm của các tấm PV khi vận tốc gió thay đổi

Công suất đầu ra và HSCĐ của các tấm PV ở các vận tốc gió khác nhau được thể hiện trên hình 4.8.



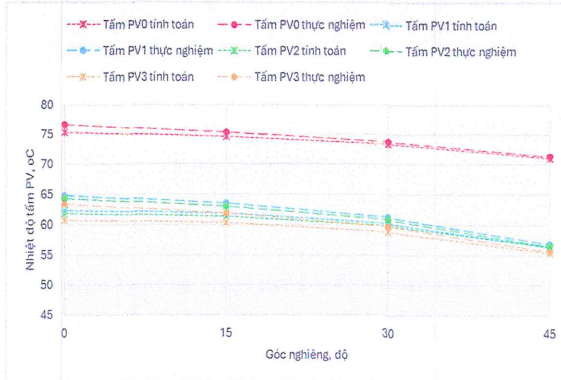
Hình 4.8. So sánh công suất đầu ra (a) và HSCĐ (b) của các tấm PV ở các vận tốc gió khác nhau

Khi vận tốc gió tăng, NĐHĐ của các tấm PV giảm và nhiệt độ chênh lệch giữa các tấm PV được làm mát và không được làm mát giảm.

Do đó, HSCĐ của các tấm PV ở $v = 3\text{m/s}$ là không có nhiều sự khác biệt. Sự khác biệt về HSCĐ thể hiện rõ ở điều kiện không có gió hoặc tốc độ gió thấp.

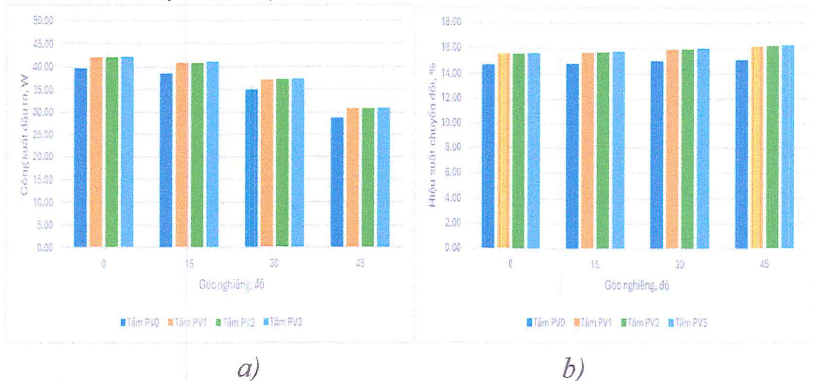
4.2.4. Ảnh hưởng của góc nghiêng đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện

Kết quả NDHĐ của các tấm PV như được thể hiện trong hình 4.9.



Hình 4.9. So sánh NDHĐ tính toán và thực nghiệm của các tấm PV khi góc nghiêng thay đổi

Công suất đầu ra và HSCĐ của các tấm PV ở các góc nghiêng khác nhau được thể hiện trên hình 4.11.



a)

b)

Hình 4.11. So sánh công suất đầu ra (a) và HSCĐ (b) của các tấm PV ở góc nghiêng khác nhau

Từ kết quả hình 4.11 cho thấy, khi góc nghiêng tấm PV tăng thì HSCĐ của tấm PV tăng do NĐHD của tấm PV giảm.

4.3. THỰC NGHIỆM NGOÀI MÔI TRƯỜNG THỰC TẾ

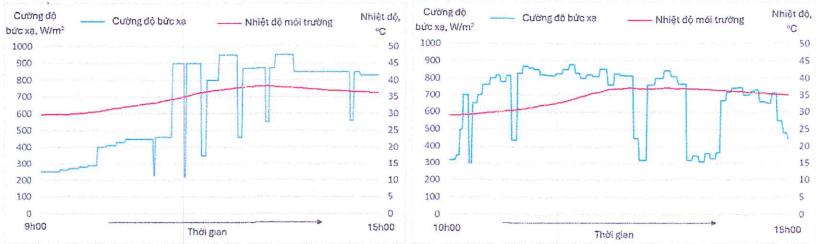


Hình 4.12. Mô hình triển khai thực tế ngoài môi trường

03 tấm PV bao gồm tấm PV0, tấm PV1 và tấm PV3 được tiến hành thực tế trong 02 ngày 27/7/2025 và 13/9/2025 tại Trường Đại học Điện lực (235 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội). Góc nghiêng tối ưu lắp đặt của tấm PV so với phương ngang là 9° (ngày 27/7/2025) và 15° (ngày 13/9/2025). Mô hình thực nghiệm thực tế ngoài môi trường như thể hiện trong hình 4.12.

Nhiệt độ môi trường và CĐBX mặt trời tại bề mặt tấm PV được thể hiện trên hình 4.13a (ngày 27/7/2025) và hình 4.13b (ngày 13/9/2025). Vận tốc gió trung bình trong khoảng thời gian thực nghiệm là 0,8m/s (ngày 27/7/2025) và 1,1m/s (ngày 13/9/2025).

Kết quả đo thực tế cho thấy, CĐBX mặt trời cũng luôn luôn thay đổi, thấp nhất là $250\text{W}/\text{m}^2$ vào lúc 9h00 ngày 27/7/2025 và cao nhất là $950\text{W}/\text{m}^2$ vào lúc 12h10 ngày 27/7/2025. Và trong thời gian thực nghiệm có một số thời điểm trời nhiều mây, CĐBX mặt trời giảm đột ngột.

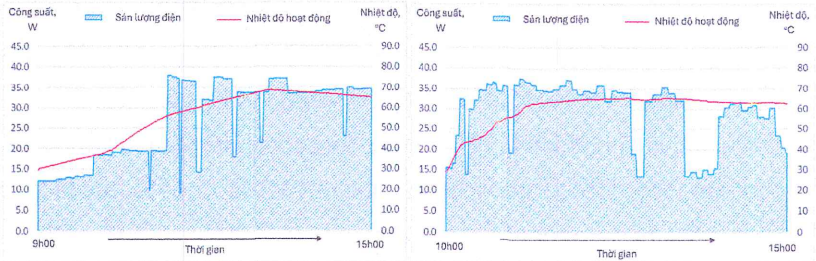


a)

b)

Hình 4.13. Nhiệt độ môi trường và CĐBX mặt trời tại bề mặt tấm PV ngày 27/7/2025 (a) và ngày 13/9/2025 (b)

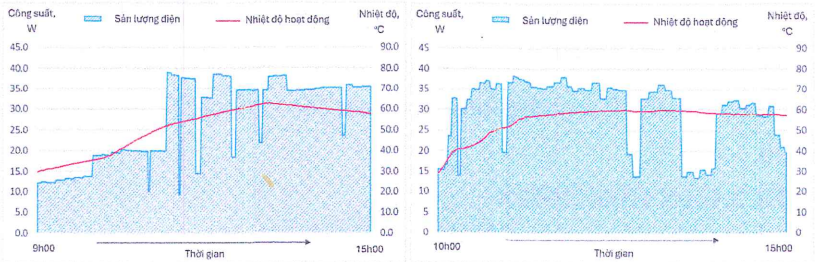
NĐHĐ và công suất của các tấm PV như thể hiện trên các hình 4.14 ÷ 4.16.



a)

b)

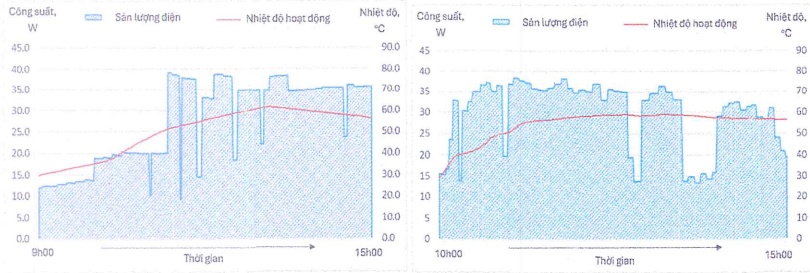
Hình 4.14. NĐHĐ và công suất của tấm PV0 ngày 27/7/2025 (a) và ngày 13/9/2025 (b)



a)

b)

Hình 4.15. NĐHĐ và công suất của tấm PV1 ngày 27/7/2025 (a) và ngày 13/9/2025 (b)



a)

b)

Hình 4.16. NĐHĐ và công suất của tấm PV3 ngày 27/7/2025 (a) và ngày 13/9/2025 (b)

Kết quả cho thấy, trong thời gian thực nghiệm:

Ngày 27/7/2025: khi sử dụng BTN nhôm thì NĐHĐ cao nhất của tấm PV giảm $6,0^{\circ}\text{C}$ (tấm PV1) và giảm $7,1^{\circ}\text{C}$ (tấm PV3). HSCĐ trung bình của tấm PV0 là 15,20%. HSCĐ trung bình của tấm PV1 là 15,58%, tức là tăng thêm 0,38%, tương ứng công suất đầu ra tăng 2,5% so với tấm PV0. HSCĐ trung bình của tấm PV3 là 15,65%, tức là tăng thêm 0,45%, tương ứng công suất đầu ra tăng 3,0% so với tấm PV0.

Ngày 13/9/2025: khi sử dụng BTN nhôm thì NĐHĐ cao nhất của tấm PV giảm $5,4^{\circ}\text{C}$ (tấm PV1) và giảm $6,3^{\circ}\text{C}$ (tấm PV3). HSCĐ trung bình của tấm PV0 là 15,83%. HSCĐ trung bình của tấm PV1 là 16,20%, tức là tăng thêm 0,37%, tương ứng công suất đầu ra tăng 2,34% so với tấm PV0. HSCĐ trung bình của tấm PV3 là 16,26%, tức là tăng thêm 0,43%, tương ứng công suất đầu ra tăng 2,72% so với tấm PV0.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Kết luận

Luận án đã đạt được một số kết quả như sau:

Xây dựng được mô hình toán xác định NĐHĐ của tấm PV được và không được làm mát bằng BTN dựa trên phương trình truyền nhiệt và phương pháp cân bằng năng lượng ở trạng thái ổn định và không ổn định. Khi biết được các thông số cần thiết về điều kiện môi trường, thông số tấm PV, BTN ta có thể tính toán được NĐHĐ của tấm PV. Các mô hình toán xây dựng đã được đánh giá độ chính xác, mô hình toán xây dựng được đảm bảo độ chính xác so với các nghiên cứu đã được công bố trước đây.

Chế tạo được 03 BTN cánh nhôm, đế nhôm và đế được bổ sung lớp đồng dày 1mm và 2mm với các thông số như: bước cánh, chiều dài cánh, chiều cao cánh được tham khảo từ BTN có trên thị trường. Các BTN này được đánh giá hiệu quả truyền nhiệt bằng thực nghiệm, với điều kiện thực nghiệm trong luận án này đã xác định được hệ số trao đổi nhiệt như sau:

+ BTN nhôm:

$$h = 1,6643(T_{de} - T_{mt})^{0,1832} \text{ với } R^2 = 0,9666$$

+ BTN nhôm có đế bổ sung thêm lớp đồng 1mm:

$$h = 1,5922(T_{de} - T_{mt})^{0,2032} \text{ với } R^2 = 0,9591$$

+ BTN nhôm có đế bổ sung thêm lớp đồng 2mm:

$$h = 1,5557(T_{de} - T_{mt})^{0,2279} \text{ với } R^2 = 0,9671$$

03 BTN được gắn lên mặt sau tấm PV Monocrystalline 50W để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố như CĐBX, nhiệt độ môi trường, vận tốc gió và góc nghiêng tấm PV đến hiệu quả làm mát và HSCĐ trong phòng thí nghiệm. Trong điều kiện thực nghiệm của luận án, BTN nhôm, BTN nhôm bổ sung thêm lớp đồng 1mm vào đế, BTN nhôm bổ sung thêm lớp đồng 2mm vào giúp giảm NĐHĐ của tấm PV lớn nhất lần lượt là 14,3°C; 14,7°C và 15,6°C so với tấm PV nguyên bản (với điều kiện $E = 1000\text{W/m}^2$, $t_{mt} = 25^\circ\text{C}$, $v = 0\text{m/s}$ và $\theta = 45^\circ$).

Giúp tăng HSCĐ thêm 1,03%; 1,06% và 1,12%, tương ứng công suất đầu ra tăng 6,84%; 7,04% và 7,43% so với tấm PV nguyên bản.

03 tấm PV (không được làm mát, gắn thêm BTN, gắn thêm BTN nhôm bổ sung thêm 2mm đồng vào đế) được tiến hành thực nghiệm ngoài trời tại Trường Đại học Điện lực (Hà Nội) để bước đầu xem xét, đánh giá khả năng, hiệu quả làm mát. Kết quả cho thấy, BTN có hiệu quả làm mát tấm PV khác nhau tùy thuộc vào điều kiện môi trường. Cụ thể, ngày 27/7/2025, BTN nhôm và BTN nhôm với đế bổ sung lớp đồng 2mm giúp giảm NĐHĐ của tấm PV lớn nhất lần lượt là 6,0°C và 7,1°C, qua đó HSCĐ trung bình của tấm PV tăng thêm tương ứng lần lượt là 0,38%, 0,45% so với tấm PV không được làm mát; ngày 13/9/2025, BTN nhôm và BTN nhôm với đế bổ sung lớp đồng 2mm giúp giảm NĐHĐ của tấm PV lớn nhất lần lượt là 5,4°C và 6,3°C, qua đó HSCĐ trung bình của tấm PV tăng thêm tương ứng lần lượt là 0,38%, 0,43% so với tấm PV không được làm mát.

Hướng nghiên cứu tiếp theo

- Nghiên cứu tối ưu chiều dày lớp đồng bổ sung vào đế BTN cũng như tối ưu cấu trúc cánh để nâng cao hiệu quả truyền nhiệt của BTN.

- Nghiên cứu các phương pháp liên kết giữa tấm đồng và đế BTN để nâng cao hiệu quả truyền nhiệt từ lớp đồng đến đế và cánh của BTN.

- Nghiên cứu kết hợp thêm các giải pháp kỹ thuật khác vào BTN để nâng cao HSCĐ như sử dụng kết hợp với quạt, vật liệu biến đổi pha,...

- Nghiên cứu độ bền, tuổi thọ của tấm PV làm mát bằng BTN; ảnh hưởng của các yếu tố như độ ẩm, bụi, bản đến hiệu quả làm mát của BTN.

- Nghiên cứu, đánh giá bài toán tổng thể về kỹ thuật, môi trường và kinh tế, tuổi thọ, sự tương tác lẫn nhau trong hệ thống khi sử dụng BTN để làm mát cho tấm PV.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Dang Van Binh**, Pham Quang Vu, Manh-Hai Pham, Dang Toan Nguyen, Ngoc Trung Nguyen, Quang-Hiep Do, Anh Tuan Do, "Passive Cooling for Photovoltaic Using Heat Sinks: A Recent Research Review," *2023 Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM)*, Hanoi, Vietnam, 2023, pp. 01-06, doi: 10.1109/EEE-AM58328.2023.10395427.
2. **V. B. Dang**, Q. V. Pham, and M.-H. Pham, "Calculating the Operating Temperature and Efficiency of Photovoltaic Panels in Vietnamese Conditions", *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sc.*, vol. 125, no. 2, pp. 42–53, Dec. 2024. DOI: <https://doi.org/10.37934/arfmts.125.2.4253>.
3. **Đặng V. Bình**, P. Q. Vũ, và P. M. Hải, "Ảnh hưởng của vận tốc gió đến nhiệt độ hoạt động và hiệu suất chuyển đổi của tấm quang điện", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol 23, số p.h 2, tr 49–53, tháng 2 2025. DOI: <https://doi.org/10.31130/ud-jst.2025.371>
4. **Dang Van Binh**, Pham Quang Vu, Pham Manh-Hai, "A computational study of passive cooling of photovoltaic panels using hybrid material heat sink," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 15, No. 5, October 2025, pp. 4487–4499. DOI: 10.11591/ijece.v15i5.pp4487-4499.
5. Pham Quang Vu, Phan Van Tho, Manh-Hai Pham, **Dang Van Binh**, "Influence of Various Factors on Efficiency of Photovoltaic Panel: An Experimental Study in Hanoi, Vietnam," *2025 Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM)*, Hanoi, Vietnam, 2025, pp. 01-04. DOI: 10.1109/EEE-AM66675.2025.11473409