

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO BỘ THU THẬP DỮ LIỆU CHO HỆ THỐNG ĐIỆN NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI ÁP MÁI

Nguyễn Nam Quyền, Nguyễn Văn Lành*, Lê Võ Minh Khang, Phạm Nguyên Hào¹

TÓM TẮT

Hệ thống điện mặt trời áp mái quy mô nhỏ đang phát triển mạnh tại Việt Nam nhằm góp phần thực hiện mục tiêu Net-Zero vào năm 2050. Tuy nhiên, việc thiếu hệ thống giám sát tự động dẫn đến khó khăn trong phát hiện sớm sự suy giảm hiệu suất. Nghiên cứu này đã thiết kế và chế tạo bộ thu thập dữ liệu dựa trên nền tảng Arduino Mega 2560 kết hợp ESP32. Bộ thu tích hợp các cảm biến đo bức xạ mặt trời (INA219), điện áp DC (ES-K12 cách ly), dòng điện (WCS1500), nhiệt độ tấm pin (DS18B20), nhiệt độ và độ ẩm không khí (SHT30), tốc độ gió và bụi mịn (PMS5003). Kết quả khảo nghiệm thực tế trên hệ thống 3 kWp trong 3 tháng cho thấy sai số đo bức xạ $\pm 4,5\%$, sai số điện áp và dòng điện $\pm 2,8\%$, nhiệt độ $\pm 0,6^\circ\text{C}$. Hiệu suất hệ thống dao động từ 11,3% đến 12,6% khi bức xạ thay đổi từ 560 đến 985 W/m². Dữ liệu được hiển thị thời gian thực trên màn hình HMI, lưu trữ trên thẻ SD và truyền qua MQTT. Bộ thu cung cấp giải pháp chi phí thấp, ổn định và có giá trị ứng dụng thực tiễn cao cho giám sát hệ thống điện mặt trời áp mái quy mô nhỏ.

Từ khóa: Arduino Mega 2560, bộ thu thập dữ liệu, giám sát hiệu suất, IoT, năng lượng mặt trời áp mái

RESEARCH, DESIGN AND DEVELOPMENT OF A DATA ACQUISITION UNIT FOR A ROOFTOP SOLAR ENERGY SYSTEM

ABSTRACT

Rooftop solar power systems play a vital role in Vietnam's Net-Zero target by 2050. However, the lack of automatic monitoring systems remains a significant challenge for early detection of performance degradation. This study designed and fabricated a data acquisition unit based on Arduino Mega 2560 and ESP32. The device integrates multiple sensors to measure solar irradiance (INA219), DC voltage (isolated ES-K12), current (WCS1500), panel temperature (DS18B20), air temperature and humidity (SHT30), wind speed, and particulate matter (PMS5003). Field testing on a 3 kWp system over 3 months showed measurement errors of $\pm 4.5\%$ for irradiance, $\pm 2.8\%$ for voltage and current, and $\pm 0.6^\circ\text{C}$ for temperature. System efficiency ranged from 11.3% to 12.6% under irradiance of 560–985 W/m². The unit displayed data in real-time on HMI, stored on SD card, and transmitted via MQTT. The developed system provides a low-cost, stable, and practical solution for monitoring small-scale rooftop solar systems.

Keywords: Arduino Mega 2560, data acquisition unit, IoT, rooftop solar power, performance monitoring.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Năng lượng mặt trời là một trong những nguồn năng lượng tái tạo quan trọng và bền vững, ngày càng được ứng dụng rộng rãi trên toàn cầu, đặc biệt trong bối cảnh nhu cầu về năng lượng sạch và bảo vệ môi trường ngày càng gia tăng [1]. Năng lượng mặt trời không chỉ giúp giảm thiểu sự phụ thuộc vào các nguồn năng lượng hóa thạch mà còn đóng góp vào việc giảm lượng khí thải CO₂, bảo vệ tài nguyên thiên nhiên và thúc đẩy sự phát triển bền vững. Trong các ứng dụng năng lượng mặt trời, hệ thống điện mặt trời mái nhà đang trở thành giải pháp phổ biến cho hộ gia đình, doanh nghiệp nhỏ, và đặc biệt là

trong các khu vực nông thôn, nơi việc sử dụng năng lượng sạch và tự cung tự cấp là rất cần thiết [2], [3].

Tuy nhiên, một hạn chế lớn đối với việc triển khai và vận hành các hệ thống điện mặt trời là sự giảm sút hiệu suất hoạt động của các tấm pin theo thời gian do ảnh hưởng của các yếu tố môi trường như nhiệt độ cao, độ ẩm, bụi bẩn và bụi mịn [4], [5]. Việc thiếu hệ thống giám sát tự động và liên tục khiến người sử dụng khó phát hiện sớm các bất thường, dẫn đến giảm hiệu quả vận hành, tăng chi phí bảo trì và rút ngắn tuổi thọ hệ thống [6], [7].

¹ Khoa Cơ khí – Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm TP.HCM

*Email: nvlanh@hcmuaf.edu.vn

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về hệ thống giám sát IoT cho pin mặt trời trong và ngoài nước, hầu hết các công trình tập trung vào hệ thống quy mô lớn (utility-scale) hoặc sử dụng các nền tảng thương mại đắt tiền, khó tiếp cận với hộ gia đình và doanh nghiệp nhỏ [8]. Tại Việt Nam, các giải pháp hiện có cho hệ thống áp mái quy mô nhỏ còn khá hạn chế, chủ yếu dựa vào phương pháp đo thủ công hoặc các hệ thống đơn giản thiếu tích hợp đa thông số [3], [9].

Khoảng trống nghiên cứu nằm ở việc thiếu một bộ thu thập dữ liệu chi phí thấp, mã nguồn mở, dễ triển khai, có khả năng tích hợp

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, bộ thu thập dữ liệu giám sát các thông số hoạt động hệ thống điện mặt trời được thiết kế và chế tạo dựa trên nền tảng phần cứng mở, sử dụng các linh kiện điện tử thông dụng nhưng có độ chính xác cao và chi phí hợp lý. Các vật liệu chính được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm:

Vi điều khiển Arduino Mega 2560 được sử dụng làm bộ điều khiển trung tâm của hệ thống, với nhiều chân I/O (I2C, UART, SPI, Analog), giúp kết nối các cảm biến và module khác nhau. ESP32 được sử dụng để xử lý kết nối mạng (Wi-Fi, MQTT), hỗ trợ truyền tải dữ liệu từ bộ thu thập dữ liệu tới các thiết bị khác hoặc nền tảng trực tuyến.

Cảm biến INA219 được sử dụng để đo dòng điện ngắn mạch (I_{sc}), một yếu tố quan trọng trong việc tính toán hiệu suất tấm pin và bức xạ mặt trời. Cảm biến WCS1500 đo dòng điện của tấm pin và sử dụng tải để đo dòng điện thực tế trong hệ thống điện mặt trời.

Cảm biến ES-K12 được sử dụng để đo điện áp DC đầu ra của hệ thống pin mặt trời, kết hợp với dòng điện để tính toán công suất thực tế của hệ thống. ES-K12 có khả năng đo trong dải từ (0-1500V), độ chính xác cao và thiết kế cách ly an toàn, phù hợp cho việc

đồng thời nhiều thông số quan trọng (bức xạ mặt trời, điện áp, dòng điện, nhiệt độ tấm pin, thông số môi trường và bụi mịn), đồng thời được kiểm chứng thực tế dài hạn trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa đặc trưng của Việt Nam.

Công trình này nhằm lấp khoảng trống nghiên cứu trên thông qua việc nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và khảo nghiệm một bộ thu thập dữ liệu hoàn chỉnh dựa trên nền tảng phần cứng mở (Arduino Mega 2560 kết hợp ESP32), với chi phí hợp lý, độ tin cậy cao và khả năng ứng dụng rộng rãi cho các hộ gia đình nông thôn cũng như xưởng sản xuất nhỏ.

giám sát các hệ thống điện mặt trời công suất lớn.

Cảm biến SHT30 được sử dụng để đo nhiệt độ và độ ẩm môi trường, giúp đánh giá các yếu tố môi trường có ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống điện mặt trời. SHT30 có độ chính xác cao, kháng nước, kháng bụi và khả năng hoạt động ổn định trong dải nhiệt độ và độ ẩm rộng.

Cảm biến DS18B20 được sử dụng để đo nhiệt độ bề mặt của tấm pin năng lượng mặt trời, giúp xác định mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ tế bào quang điện đến sự sụt giảm hiệu suất. Cảm biến có độ bền cao, chống thấm nước và hỗ trợ giao tiếp.

Cảm biến Anemometer được sử dụng để đo tốc độ gió tại khu vực lắp đặt, giúp đánh giá khả năng làm mát tự nhiên đối với hệ thống pin mặt trời. Tốc độ gió là dữ liệu quan trọng để phân tích sự cân bằng nhiệt và dự đoán hiệu suất vận hành của hệ thống trong các điều kiện khí hậu khác nhau.

Cảm biến PMS5003, đây là cảm biến đo bụi mịn, bao gồm các kích cỡ PM1.0, PM2.5 và PM10, giúp xác định nồng độ bụi trong không khí, một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ ánh sáng của tấm pin mặt trời.

Module RTC (Real Time Clock) DS3231 được sử dụng để ghi lại thời gian thực, giúp lưu trữ dữ liệu chính xác và đồng bộ hóa thời gian của các thông số đo lường.

Màn hình cảm ứng HMI được sử dụng để hiển thị dữ liệu theo thời gian thực, tạo giao diện người dùng dễ dàng thao tác và theo dõi hiệu suất hệ thống. Màn hình này giúp người dùng dễ dàng nhận diện các thông số như điện áp, dòng điện, công suất, và các thông số môi trường.

Thẻ SD được sử dụng để lưu trữ dữ liệu đo lường theo thời gian thực. Dữ liệu này sẽ được lưu trữ dưới dạng các tệp CSV để người dùng có thể dễ dàng truy xuất và phân tích sau này.

Các linh kiện khác: Ngoài các linh kiện chính trên, hệ thống còn sử dụng các điện trở, tụ điện, diodes, và các linh kiện điện tử cơ bản khác để đảm bảo mạch điện hoạt động ổn định và chính xác.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này áp dụng phương pháp thiết kế và chế tạo hệ thống giám sát điện mặt trời, bao gồm các bước như thiết kế sơ đồ khối, lắp ráp phần cứng, lập trình phần mềm và thử nghiệm thực tế. Phương pháp nghiên cứu được chia thành các phần sau:

2.2.1. Phương pháp thiết kế và chế tạo hệ thống

Phương pháp thiết kế hệ thống tập trung vào việc lựa chọn các cảm biến và vi điều khiển phù hợp với yêu cầu của nghiên cứu. Các cảm biến được lựa chọn dựa trên độ chính xác, khả năng tương thích với các linh kiện khác, và chi phí hợp lý. Hệ thống được thiết kế với sơ đồ khối bao gồm các khối cảm biến, khối xử lý (vi điều khiển), khối lưu trữ, và khối truyền dữ liệu.

Các linh kiện được kết nối đảm bảo các tín hiệu đo lường từ các cảm biến có thể được thu thập, xử lý và lưu trữ một cách chính xác. Đặc biệt, việc sử dụng phần cứng mở (Arduino và ESP32) giúp giảm chi phí và tạo điều kiện thuận lợi cho việc phát triển hệ thống trong tương lai.

2.2.2. Phương pháp lắp ráp và kiểm tra phần cứng

Sau khi thiết kế hệ thống, bước tiếp theo là lắp ráp các linh kiện và kết nối chúng thành

một hệ thống hoàn chỉnh. Việc lắp ráp bao gồm kết nối các cảm biến với vi điều khiển qua các giao thức như I2C, UART, SPI, và Analog. Cảm biến INA219, WCS 1500, ES-K12, SHT30, DS18B20, Anemometer, PMS5003, module RTC DS3231, và màn hình HMI được lắp đặt vào mạch và kết nối với vi điều khiển.

Kiểm tra phần cứng được thực hiện theo từng bước để đảm bảo tính ổn định và hoạt động chính xác của hệ thống. Quá trình này bao gồm việc kiểm tra các tín hiệu đầu vào và đầu ra từ các cảm biến, đảm bảo rằng hệ thống có thể thu thập và xử lý dữ liệu chính xác.

2.2.3. Phương pháp lập trình phần mềm

Phần mềm được lập trình sử dụng ngôn ngữ C/C++ trên nền tảng Arduino IDE. Phần mềm chịu trách nhiệm điều khiển toàn bộ hoạt động của hệ thống, bao gồm việc thu thập dữ liệu từ các cảm biến, xử lý và tính toán các thông số kỹ thuật, và hiển thị dữ liệu trên màn hình HMI. Dữ liệu thu thập được cũng được lưu trữ trên thẻ SD dưới dạng tệp CSV để phục vụ cho việc phân tích và đánh giá sau này.

Phần mềm cũng thực hiện kết nối với mạng Wi-Fi qua ESP32 để truyền tải dữ liệu từ hệ thống lên các nền tảng trực tuyến, cho phép người dùng giám sát hệ thống từ xa thông qua các ứng dụng di động hoặc máy tính.

2.2.4. Phương pháp hiệu chỉnh cảm biến và tính toán

Để đảm bảo độ chính xác của dữ liệu đo, các cảm biến chính được hiệu chỉnh thực nghiệm trước khi đưa vào khảo nghiệm. Các thuật toán lọc nhiễu số cũng được áp dụng để giảm tác động của nhiễu môi trường và nhiễu analog. Bức xạ mặt trời:

- **Bức xạ mặt trời:** được xác định gián tiếp thông qua việc đo dòng ngắn mạch (I_{sc}) của tấm pin bằng cảm biến INA219. Hệ số chuyển đổi được xác định thực nghiệm bằng cách so sánh với thiết bị đo bức xạ chuẩn (Solar Power Meter).

- **Điện áp DC:** Điện áp được đo thông qua cảm biến cách ly ES-K12 (output 0–5 V) nối vào chân A0. Giá trị được lọc bằng cách lấy trung bình 2000 mẫu

- **Dòng điện:** Cảm biến WCS1500 được hiệu chỉnh theo công thức tuyến tính sau:

$$I(A) = \frac{V_{\text{sensor}} - V_{\text{zero}}}{0.011}$$

Trong đó 0,011 là hệ số góc theo thông số nhà sản xuất. Để tăng độ ổn định, hệ thống áp dụng lọc min-max (1001 mẫu).

- **Nhiệt độ và độ ẩm không khí:** Cảm biến SHT30 được hiệu chỉnh theo hệ số góc và offset thực nghiệm: Nhiệt độ: hệ số góc = 1,0, offset = +0,3°C; Độ ẩm: hệ số góc = 1,0, offset = -2,6% RH.

- **Công suất và hiệu suất:** Công suất và hiệu suất của hệ thống được tính theo các

công thức sau: $P(W) = U \times I$; $\eta(\%) = \frac{P}{\text{Radiation} \times A} \times 100$

Trong đó A = 15,5 m² là diện tích dàn pin khảo nghiệm.

- **Nhiệt độ tấm pin:** Cảm biến DS18B20 được sử dụng để đo nhiệt độ mặt trên và mặt dưới của tấm pin. Cảm biến được dán bằng băng keo bạc tại vị trí đại diện.

- **Tốc độ gió:** Cảm biến anemometer 3 cánh được kết nối với ngắt ngoại vi trên chân số 3.

- **Bụi mịn (PM1,0; PM2,5; PM10):** Cảm biến PMS5003 giao tiếp qua UART. Dữ liệu được đọc theo khung 32 byte, hệ thống áp dụng đếm ngược 12 giây và lưu lại giá trị cuối cùng khi không nhận được dữ liệu mới.

Bảng 1. Các thiết bị chuẩn để hiệu chỉnh

STT	Thiết bị chuẩn hiệu chỉnh	Thông số chính của thiết bị
1	Solar Power Meter TM-208	Dải đo: 0 – 2000 W/m ² , Độ chính xác ±5%
2	Digital Multimeter UNI-T UT89C	Độ chính xác DC Voltage: ±0.05% + 2 digits
3	Clamp Meter AC/DC Fluke 376	Độ chính xác dòng DC: ±2% + 5 digits
4	Infrared Thermometer GM320 + HT-3006A	Độ chính xác: ±1.5°C ±0.5°C
5	Humidity/Temp Meter HT-3006A	Nhiệt độ ±0.5°C, Độ ẩm ±3% RH
6	Thiết bị đo bụi chuẩn (Dust Meter chuyên dụng)	Độ chính xác ±5-8%
7	Thiết bị đo gió chuẩn (Anemometer Calibration Tool)	Độ chính xác ±2-3%

2.2.5. Phương pháp khảo nghiệm

Bộ thu thập dữ liệu được lắp đặt và khảo nghiệm tại các hệ thống điện mặt trời áp mái quy mô nông hộ. Quá trình khảo nghiệm kéo dài 3 tháng để ghi nhận các thông số về bức xạ mặt trời, nhiệt độ, độ ẩm, nồng độ bụi, điện áp, dòng điện và công suất.

Dữ liệu thu thập trong quá trình khảo nghiệm được so sánh với dữ liệu của thiết bị đo chuẩn (Bảng 1). Điều này giúp đánh giá độ chính xác của bộ thu thập dữ liệu và kiểm tra khả năng hoạt động của hệ thống trong các điều kiện môi trường khác nhau.

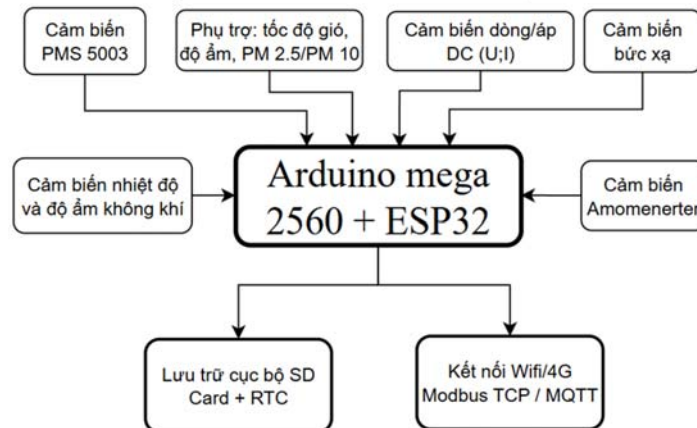
2.2.6. Phương pháp phân tích dữ liệu

Sau khi thu thập dữ liệu, các thông số sẽ được phân tích để đánh giá hiệu quả hoạt động của hệ thống điện mặt trời. Các phương pháp phân tích dữ liệu bao gồm tính toán hiệu suất chuyển đổi năng lượng, đánh giá tác động của các yếu tố môi trường đến hiệu suất hệ thống, và so sánh giữa kết quả đo của bộ thu thập dữ liệu và các thiết bị đo chuẩn.

Ngoài ra, dữ liệu còn được phân tích để đưa ra các khuyến nghị về bảo trì và sửa chữa, giúp tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống và giảm thiểu chi phí vận hành.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

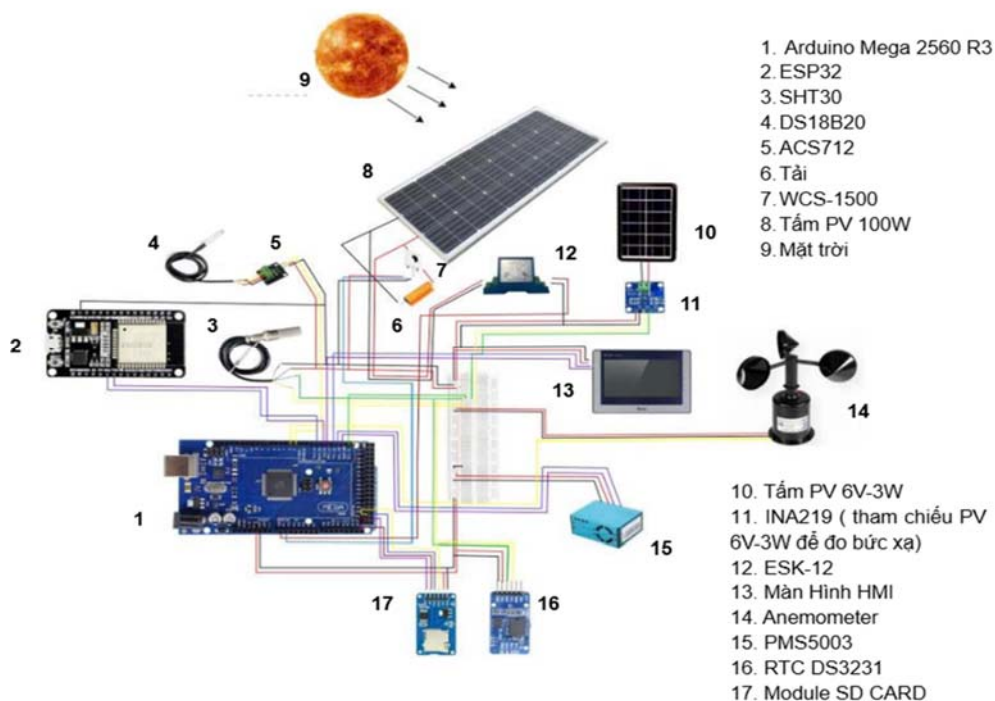
3.1. Kết quả thiết kế sơ đồ khối



Hình 1. Sơ đồ khối bộ thu dữ liệu hoạt động của hệ thống điện mặt trời

Arduino Mega 2560: Làm trung tâm thu thập dữ liệu, với nhiều chân I/O (I2C, UART, SPI, Analog) để kết nối cảm biến. Dễ lập trình, hỗ trợ thư viện phong phú, phù hợp giai đoạn thử nghiệm ban đầu.

ESP32: Xử lý kết nối mạng (WiFi, MQTT, ThingSpeak). Tích hợp WiFi/Bluetooth, hỗ trợ OTA, tiết kiệm năng lượng, và khả năng xử lý dữ liệu thời gian thực.



Hình 2. Sơ đồ kết nối hệ thống

- Sơ đồ minh họa kiến trúc hoàn chỉnh của bộ thu thập dữ liệu cho hệ thống điện mặt trời áp mái. Trung tâm là Arduino Mega 2560 R3 (1), kết nối với ESP32 (2) để truyền dữ liệu qua MQTT. Hệ thống tích hợp đầy đủ các cảm biến:

+ INA219 (11) đo bức xạ (qua tấm pin mặt trời PV 6V/3W tham chiếu hệ bức xạ dựa trên dòng điện Isc và hệ số góc).
+ ESK-12 (12) đo điện áp DC cách ly.
+ WCS-1500 (7) đo dòng điện.
+ DS18B20 (4) đo nhiệt độ tấm pin.

+ SHT30 (3) đo nhiệt độ & độ ẩm không khí.
 + PMS5003 (15) đo bụi mịn.
 + Anemometer (14) đo tốc độ gió.
 + Ngoài ra còn có RTC DS3231 (16), SD Card (17) lưu dữ liệu và màn hình HMI (13) hiển thị thời gian thực. Đánh giá: Sơ đồ thiết kế logic, sử dụng đa dạng giao tiếp (I2C, UART, Analog, Interrupt), đảm bảo tích hợp tốt các thông số quan trọng và dễ mở rộng.

3.2. Kết quả chế tạo bộ thu dữ liệu

Cảm biến INA219 được sử dụng để đo đồng thời dòng điện và điện áp của tấm pin quang điện 6V/3W, từ đó gián tiếp xác định

dòng ngắn mạch (I_{sc}) phục vụ tính toán bức xạ mặt trời. Thiết bị được tích hợp trong hệ thống thông qua giao tiếp I2C, với chân SDA và SCL kết nối tương ứng đến chân 20 và 21 của Arduino Mega 2560. Nguồn cấp VCC (5V) và GND được lấy từ vi điều khiển, đảm bảo chung mass với toàn bộ hệ thống nhằm hạn chế sai số do chênh lệch điện thế. Dữ liệu đo được từ INA219 sau đó được xử lý và quy đổi thông qua hệ số hiệu chuẩn đã xác định thực nghiệm để đảm bảo độ chính xác của giá trị bức xạ.



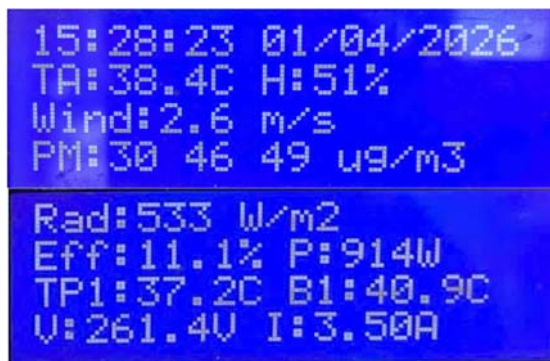
Hình 3. Hiệu chỉnh thông số bức xạ mặt trời

ES-K12 đo điện áp DC và chuyển đổi sang tín hiệu 0–5V. Chân PWR– nối GND chung với Arduino Mega 2560, PWR+ cấp nguồn ngoài 12–24VDC và cũng phải chung mass

với hệ thống. Tín hiệu VO (0–5V) đưa vào chân analog để xử lý, còn V+ và V– nối trực tiếp vào hai cực điện áp cần đo.



Hình 4. Hiệu chỉnh điện áp và dòng điện của bộ thu



Hình 5. Bộ thu dữ liệu và các thông số hiển thị trên bộ thu

Bộ thu dữ liệu sau khi được chế tạo hoàn chỉnh và kết quả hiệu chỉnh được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả hiệu chỉnh sai số các cảm biến

SST	Cảm biến	Model	Thông số đo lường chính	Độ chính xác theo hãng	Hệ số góc/Offset	Sai số sau hiệu chỉnh
1	Bức xạ mặt trời (gián tiếp)	PV + INA219	Dòng ngắn mạch $I_{sc} \rightarrow$ Bức xạ	$\pm 0.8\%$	Hệ số góc = 1.81	$\pm 4,5\%$
2	Điện áp DC cách ly	ES-K12	Điện áp DC 0 – 1500 V	$\pm 0.5\%$ FS	Hệ số góc = 300 $\times 1.05$	$\pm 2,8\%$
3	Dòng điện DC	WCS1500	Dòng DC 0 – 200 A	$\pm 1\%$ FS	Hệ số góc = 0.011 V/A Deadband = 0.18 A	$\pm 3,1\%$
4	Nhiệt độ tấm pin	DS18B20	Nhiệt độ - 55 ~ +125°C	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	Hệ số góc = 1.0	$\pm 0,6^{\circ}\text{C}$
5	Nhiệt độ & Độ ẩm không khí	SHT30	Nhiệt độ - 40 ~ +125°C Độ ẩm 0-100% RH	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ / $\pm 2\%$ RH	Nhiệt độ: +0.3°C Độ ẩm: -2.6%	$\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ / $\pm 3\%$
6	Bụi mịn	PMS5003	PM1.0, PM2.5, PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\pm 10\%$	Hệ số góc = 1.0	$\pm 8\%$
7	Tốc độ gió	Anemometer	Tốc độ gió 0 – 30 m/s	$\pm 5\%$	Hệ số góc = 8.75	$\pm 5\%$

3.3. Kết quả khảo nghiệm

Sau khi bộ thu được thiết kế và chế tạo hoàn thiện sẽ được kiểm tra hoạt động tại phòng thí nghiệm. Các số liệu đo đạc sẽ được đối chiếu và hiệu chỉnh phù hợp với thiết bị đo chuẩn (Bảng 1) trước khi tiến hành lắp đặt

bộ thu dữ liệu vào hệ thống điện NLMT để khảo nghiệm thực tế. Quá trình lắp đặt bộ thu phải đảm bảo: cảm biến bức xạ ngang tấm PV, gắn cảm biến nhiệt độ mặt sau mô-đun bằng keo dẫn nhiệt, đặt cảm biến đo tốc độ gió ở vị trí thoáng gió.



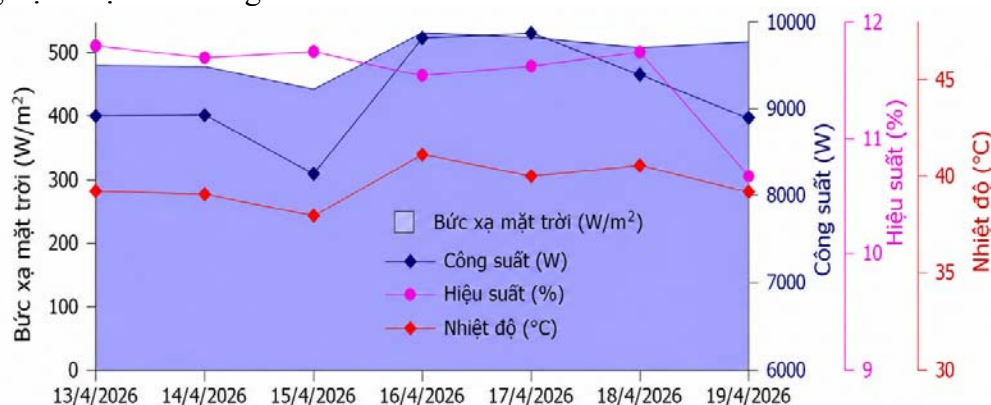
Hình 6. Khảo nghiệm bộ thu với hệ thống 3 kWp

Kết quả khảo nghiệm như sau:

+ Bức xạ: Sai số trung bình $\pm 4,5\%$ tương đương với mức sai số cho phép của lớp chuẩn B theo tiêu chuẩn ISO 9060:2018). Sai số này được xác định trong phạm vi thử nghiệm và khảo nghiệm thực tế của nghiên cứu.

+ Nhiệt độ môi trường: Sai số $\pm 0,6^\circ\text{C}$ $\rightarrow$ đáp ứng yêu cầu giám sát.

+ Điện áp – dòng điện: Sai số $\pm 2,8\%$ so với thiết bị đo chuẩn, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu.



Hình 7. Biểu đồ sự biến thiên trung bình trong 7 ngày của bức xạ mặt trời, công suất phát điện, nhiệt độ môi trường và hiệu suất hệ thống điện mặt trời 3 kWp

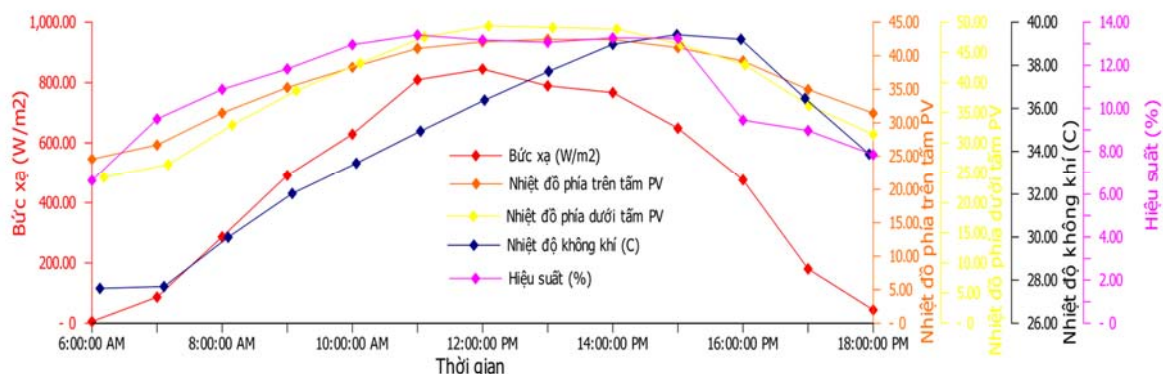
Nhận xét: Bức xạ là biến đầu vào chính và có xu hướng dao động trong khoảng ~ 450 – 520 W/m^2 . Đây là yếu tố chi phối trực tiếp đến công suất phát của hệ PV. Ta thấy khi bức xạ tăng (đặc biệt ngày 16–17/4), công suất tăng tương ứng và đạt đỉnh quanh (~ 9.8 – 10 kW). Điều này phản ánh mối quan hệ tuyến tính giữa bức xạ và công suất trong điều kiện vận hành thực tế.

Tuy nhiên, hệ không hoàn toàn tuyến tính tuyệt đối vì có sự tham gia của yếu tố nhiệt độ. Nhiệt độ dao động khoảng 38 – 42°C và có xu hướng tăng vào các ngày có bức xạ cao. Điều quan trọng là khi nhiệt độ tăng, công suất không tăng tương ứng mà có dấu hiệu chững hoặc giảm nhẹ. Đây là biểu hiện điển hình của pin quang điện silicon: nhiệt độ tăng

làm giảm điện áp hở mạch (Voc), kéo theo giảm hiệu suất chuyển đổi.

Về hiệu suất, dao động trong khoảng ~ 10 – 12% và không hoàn toàn đồng pha với bức xạ. Có thể thấy hiệu suất giảm nhẹ ở những ngày nhiệt độ cao, mặc dù bức xạ vẫn ở mức tốt. Điều này chứng minh rằng hiệu suất hệ không chỉ phụ thuộc vào năng lượng đầu vào mà còn bị chi phối mạnh bởi điều kiện nhiệt môi trường và nhiệt độ tấm pin.

Tóm lại, dữ liệu có tính nhất quán cao, không xuất hiện nhiều bất thường lớn, chứng tỏ hệ đo ổn định. Đồng thời biểu đồ cũng xác nhận rõ vai trò của nhiệt độ như một yếu tố giới hạn hiệu suất, không thể bỏ qua khi đánh giá vận hành hệ thống điện mặt trời thực tế.



Hình 8. Biểu đồ biến thiên bức xạ, nhiệt độ và hiệu suất (trung bình tháng 3/2026)

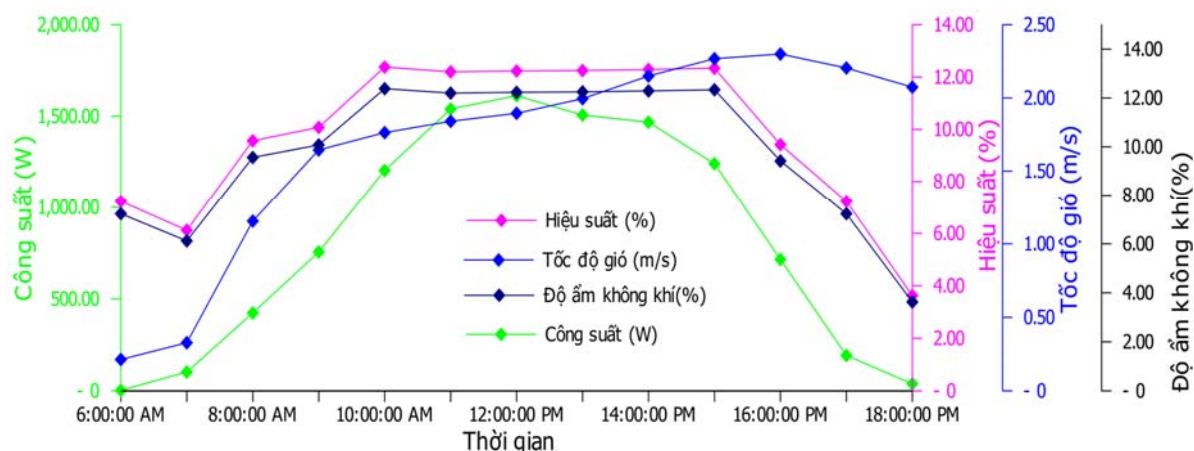
Dữ liệu thực nghiệm cho thấy các đại lượng bức xạ mặt trời, công suất phát và hiệu suất hệ thống tuân theo quy luật biến thiên phi tuyến theo chu kỳ bức xạ ngày. Bức xạ tăng từ mức thấp buổi sáng ($<100 \text{ W/m}^2$ lúc 6h00) lên giá trị cực đại trong khoảng $700\text{--}800 \text{ W/m}^2$ tại 11h00–13h00, sau đó giảm dần về chiều (Hình 8).

Nhiệt độ tấm pin (mặt trên và mặt dưới) tăng theo bức xạ, nhưng khi nhiệt độ mặt trên tấm pin vượt ngưỡng $\sim 40^\circ\text{C}$, hiệu suất hệ thống không còn tăng theo bức xạ mà có xu hướng giảm nhẹ từ $\sim 12\%$ xuống khoảng $\sim 11,5\%$. Hiện tượng này phù hợp với đặc tính vật lý của tế bào quang điện silicon, trong đó điện áp hở mạch (Voc) giảm theo nhiệt độ, dẫn đến suy giảm hiệu suất chuyển đổi năng lượng.

Tương ứng, công suất hệ thống tăng từ 0 W lên cực đại $1450\text{--}1500 \text{ W}$, trong khi hiệu suất đạt giá trị lớn nhất khoảng 12% trong cùng khung thời gian (Hình 9). Điều này khẳng định mối quan hệ phụ thuộc trực tiếp giữa bức xạ và công suất phát của hệ PV.

Độ ẩm không khí dao động trong khoảng 45–77%, có xu hướng giảm dần từ sáng đến trưa. Khi độ ẩm cao (giai đoạn 6h–8h), công suất tăng chậm do suy giảm bức xạ hữu hiệu thông qua tán xạ khí quyển. Khi độ ẩm giảm về mức $\sim 45\text{--}55\%$ (11h00–14h00), điều kiện quang học cải thiện, tương ứng với giai đoạn công suất đạt cực đại.

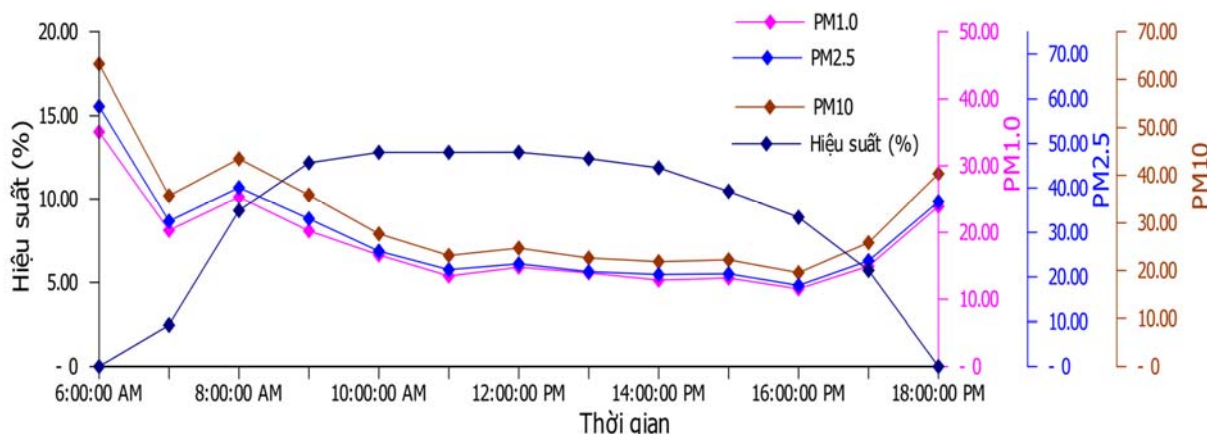
Tốc độ gió dao động từ 1,2–2,25 m/s, có vai trò điều hòa nhiệt độ tấm pin. Sự gia tăng tốc độ gió vào giai đoạn chiều giúp giảm tích nhiệt, từ đó hạn chế suy giảm hiệu suất do quá nhiệt (Hình 9).



Hình 9. Biểu đồ mối quan hệ giữa công suất phát, hiệu suất, tốc độ gió và độ ẩm (trung bình tháng 3/2026)

Các thông số PM1.0; PM2.5 và PM10 biến thiên theo hoạt động giao thông và điều kiện khí tượng (Hình 10): PM1.0: $\sim 20 \rightarrow 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$; PM2.5: $\sim 23 \rightarrow 44 \mu\text{g}/\text{m}^3$; PM10: $\sim 33 \rightarrow 49 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nồng độ bụi đạt cực đại vào 7h–8h, sau đó giảm và ổn định hơn trong khoảng trưa. Mặc dù bụi mịn có khả năng gây suy

giảm bức xạ thông qua tán xạ và hấp thụ quang học, tuy nhiên trong dữ liệu thực nghiệm, ảnh hưởng này thể hiện ở mức gián tiếp và không phải là yếu tố chi phối chính đến hiệu suất hệ PV.



Hình 10. Biểu đồ mối quan hệ giữa hiệu suất hệ thống và nồng độ bụi PM1.0, PM2.5, PM10 (trung bình tháng 3/2026)

Tóm lại, dữ liệu cho thấy hệ thống PV chịu tác động đồng thời của nhiều yếu tố môi trường: Bức xạ tăng thì công suất tăng (quan hệ tuyến tính); nhiệt độ tăng thì hiệu suất giảm (giới hạn vật lý của tế bào quang điện);

gió tăng thì nhiệt độ giảm thì hiệu suất tăng (tác động gián tiếp tích cực); độ ẩm tăng thì bức xạ hữu hiệu giảm thì công suất giảm; bụi mịn tăng thì tán xạ tăng thì suy giảm bức xạ hữu hiệu.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu và chế tạo bộ thu thập dữ liệu đã chứng minh hiệu quả trong việc giám sát hiệu suất của hệ thống điện mặt trời, đặc biệt ở quy mô hộ gia đình và doanh nghiệp nhỏ. Hệ thống cho phép theo dõi liên tục các thông số môi trường như bức xạ mặt trời, nhiệt độ, độ ẩm và nồng độ bụi, từ đó hỗ trợ đánh giá và tối ưu hóa hiệu suất vận hành của tấm pin cũng như nâng cao khả năng quản lý và bảo trì hệ thống.

Hướng nghiên cứu tiếp theo tập trung vào việc mở rộng khả năng của bộ thu thập dữ liệu để ứng dụng cho các hệ thống điện mặt trời quy mô lớn, đồng thời tích hợp với lưới điện thông minh nhằm nâng cao hiệu quả vận hành. Bên cạnh đó, việc triển khai lưu trữ dữ liệu trên nền tảng đám mây và ứng dụng giao tiếp không dây được xem là các hướng phát triển tiềm năng giúp tăng tính linh hoạt, khả năng mở rộng và hiệu quả khai thác dữ liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. International Energy Agency, *Renewables 2024 – Executive Summary*. Paris, France: IEA, 2024.

2. R. Chidembo, J. Francis, and S. Kativhu, “Rural Households’ Perceptions of the Adoption of Rooftop Solar Photovoltaics in Vhembe District,

South Africa,” *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 6157, 2022.

3. T. N. Do, P. J. Burke, K. G. H. Baldwin, and C. T. Nguyen, “*Underlying drivers and barriers for solar photovoltaics diffusion: The case of Vietnam*,” *Energy Policy*, vol. 144, p. 111561, 2020.

4. D. C. Jordan and S. R. Kurtz, “*Photovoltaic Degradation Rates—An Analytical Review*,” 2012.

5. R. J. Mustafa, M. R. Gomaa, M. Al-Dhaifallah, and H. Rezk, “*Environmental Impacts on the Performance of Solar Photovoltaic Systems*,” *Sustainability*, vol. 12, no. 2, p. 608, 2020.

6. V. Gupta, M. Sharma, R. K. Pachauri, and K. N. Dinesh Babu, “*Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques*,” *Solar Energy*, vol. 191, pp. 596–622, 2019.

7. National Renewable Energy Laboratory, Sandia National Laboratory, SunSpec Alliance, and the SunShot National Laboratory Multiyear Partnership (SuNLaMP) PV O&M Best Practices Working Group, *Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems; 3rd Edition*. Golden, CO, USA: NREL, 2018.

8. A. Hamied, A. Mellit, M. Benghaneim, and S. Boubaker, “*IoT-Based Low-Cost Photovoltaic Monitoring for a Greenhouse Farm in an Arid Region*,” *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3860, 2023.

9. N. Rouibah, A. El Hammoumi, A. Bouttout, S. Haddad, S. Oukaci, A. Limam, and M. Benghaneim, “*Smart monitoring of photovoltaic energy systems: An IoT-based prototype approach*,” *Scientific African*, vol. 30, p. e02973, 2025.

- Ngày gửi bài: 16/05/2026
- Ngày phản biện: 03/06/2026
- Ngày duyệt đăng: 08/06/2026