RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik
2026, Vol. 4, No. 3, pp. 791-810
E-ISSN: 3025-9444

Studi Eksperimental Pengaruh Ketinggian dan Sudut Kemiringan Modul Fotovoltaik Terapung terhadap Perilaku dan Potensi Degradasi Termal pada Panel Surya

Muhammad Reza Fathoni [1]✉, Bambang Arip Dwiyantoro [2]
(1,2) Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Abstrak: Sistem Fotovoltaik Terapung (FPV) menawarkan peningkatan kinerja melalui efek pendinginan alami badan air, namun temperatur operasi modul tetap menjadi faktor kritis yang memengaruhi performa listrik dan keandalan jangka panjang, serta sangat dipengaruhi oleh konfigurasi fisik sistem. Penelitian ini menganalisis pengaruh ketinggian modul di atas permukaan air (250, 500, dan 750 mm) dan sudut kemiringan (5°, 15°, dan 25°) terhadap temperatur mod fotovoltaik (Tmod) dan Faktor Percepatan Arrhenius (AF) sebagai indikator potensi degradasi termal. Data diambil pada sistem FPV di Kolam Graha ITS, Surabaya, pukul 09.00–15.00 WIB dengan interval 30 menit, dan dianalisis menggunakan metode Susunan Ortogonal Taguchi L9(3^2), Ratio Sinyal terhadap Gangguan (S/N), Analisis Pengaruh Utama (MEA), dan Analisis Variasi (ANOVA). Hasil menunjukkan Tmod berada pada rentang 32,91°C–54,96°C, menghasilkan AF antara 3,9488 dan 5,9110. Konfigurasi optimal (A_3B_3: ketinggian 750 mm, tilt 25°) menghasilkan Tmod = 48,10°C dan AF = 4,0524. ANOVA menunjukkan ketinggian modul sebagai faktor paling dominan, berkontribusi 72,92% terhadap variasi Tmod dan 68,93% terhadap AF, signifikan secara statistik (α = 0,05). Sudut tilt berkontribusi 13,82% (Tmod) dan 16,25% (AF), namun tidak signifikan. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan konfigurasi fisik FPV yang tepat untuk menekan temperatur operasi, meningkatkan efisiensi energi, dan memperpanjang umur layanan sistem di iklim tropis.

Article history:
Received: 10 July 2026
Revised: 26 July 2026
Accepted: 28 July 2026
Published: 29 July 2026

Kata kunci:
fotovoltaik terapung, degradasi termal, ketinggian, sudut kemiringan, analisis statistik

Abstract: *Floating Photovoltaic (FPV) systems enhance performance through the natural cooling effect of water bodies, yet module operating temperature remains a critical factor affecting electrical performance and long-term reliability and is strongly influenced by physical configuration. This study analyzes the effects of module height above the water surface (250, 500, and 750 mm) and tilt angle (5°, 15°, and 25°) on photovoltaic cell temperature (Tmod) and the Arrhenius Acceleration Factor (AF) as an indicator of thermal degradation potential. Measurements were conducted on an FPV system at ITS Graha Pond, Surabaya, Indonesia, from 09:00 to 15:00 local time at 30-minute intervals, analyzed using the Taguchi L9(3^2) Orthogonal Array, Signal-to-Noise (S/N) ratio, Main Effect Analysis (MEA), and Analysis of Variance (ANOVA). Results show Tmod ranged from 32.91°C to 54.96°C, yielding AF values between 3.9488 and 5.9110. The optimal configuration (A_3B_3: 750 mm height, 25° tilt) produced Tmod = 48.10°C and AF = 4.0524. ANOVA identified module height as the most dominant factor, contributing 72.92% to Tmod variation and 68.93% to AF variation, statistically significant at α = 0.05. Tilt angle contributed 13.82% (Tmod) and 16.25% (AF) but was not significant. These findings underscore the importance of selecting appropriate FPV physical configurations to reduce operating temperature, enhance energy efficiency, and extend system service life in tropical climates.*

Keyword:
floating photovoltaic, thermal degradation, height, tilt angle, statistical analysis

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

How to cite: Fathoni, M. R., & Dwiyantoro, B. A. (2026). Studi Eksperimental Pengaruh Ketinggian dan Sudut Kemiringan Modul Fotovoltaik Terapung terhadap Perilaku dan Potensi Degradasi Termal pada Panel Surya. *RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, *4*(3), 791–810. https://doi.org/10.70716/reswara.v4i3.733

✉ *Corresponding author:* ***rezafathoni03@gmail.com***
Copyright © 2026, the author(s)

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global menjadi tantangan serius yang menuntut perhatian dunia. Emisi gas rumah kaca dari aktivitas antropogenik, terutama sektor energi, memicu kenaikan temperatur permukaan bumi, perubahan pola cuaca, cuaca ekstrem, serta dampak lingkungan dan sosial-ekonomi yang signifikan, sementara dominasi bahan bakar fosil dalam bauran energi dunia terus menyumbang emisi CO_2 (Attanayake et al., 2024; Nugroho, 2025). Oleh karena itu, transformasi menuju energi bersih dan terbarukan menjadi prioritas berbagai negara untuk mendukung mitigasi iklim dan ketahanan energi jangka panjang (Li et al., 2026). Energi surya merupakan salah satu teknologi energi terbarukan yang berkembang paling pesat, didorong oleh penurunan biaya produksi modul fotovoltaik (PV), kemajuan manufaktur, dan peningkatan efisiensi konversi (Kobayashi et al., 2024). Ketersediaan sumber daya surya yang melimpah, khususnya di wilayah tropis, menjadikan PV pilihan strategis untuk ketahanan energi dan pembangunan berkelanjutan (Rahma et al., 2025).

Meski demikian, sistem PV konvensional di daratan menghadapi keterbatasan lahan, persaingan lahan dengan sektor pertanian dan permukiman, serta kenaikan temperatur modul akibat paparan radiasi matahari yang berkepanjangan, yang menurunkan efisiensi dan mempercepat degradasi material (Khoja et al., 2025; Lazo et al., 2026; Sepúlveda-Oviedo, 2025). Teknologi floating photovoltaic (FPV), yang memanfaatkan permukaan badan air seperti waduk, danau, atau kolam, muncul sebagai solusi karena efek pendinginan alami dari air menjaga temperatur modul tetap lebih rendah dibanding sistem di daratan, sehingga meningkatkan efisiensi konversi sekaligus menawarkan manfaat tambahan seperti pengurangan kebutuhan lahan dan laju evaporasi air (Faruqui et al., 2023; Eglin et al., 2025; Sutanto et al., 2025).

Namun demikian, karakteristik termal modul FPV tetap dipengaruhi oleh faktor lingkungan (irradiansi, temperatur ambien, kelembapan) maupun konfigurasi fisik seperti ketinggian modul di atas air dan sudut kemiringan panel, yang berperan penting dalam disipasi panas melalui konveksi alami (Bugeja et al., 2025; Octario & Dwiyantoro, 2025; Oeishee & Rahman, 2026). Ramanan et al. (2025) menunjukkan bahwa ketinggian modul secara signifikan memengaruhi profil termal FPV, karena jarak yang lebih besar dari permukaan air memungkinkan aliran udara konvektif yang lebih bebas. Variasi konfigurasi ini pada akhirnya berdampak pada efisiensi, stabilitas, dan keandalan modul jangka panjang (Nedelcu et al., 2026; Qamar et al., 2026; Wu et al., 2025). Berbagai studi telah mengkaji efisiensi energi, perilaku termal, serta perbandingan performa PV daratan dan FPV, dengan temuan bahwa penurunan temperatur modul beberapa derajat saja dapat meningkatkan efisiensi sekaligus memperlambat penuaan material (Nedelcu et al., 2026; Qamar et al., 2026; Wu et al., 2025). Selain performa energi, keandalan dan umur layanan modul juga menjadi perhatian, salah satunya melalui model Arrhenius yang menghubungkan temperatur operasi dengan laju degradasi lewat Arrhenius Acceleration Factor (AF)—semakin tinggi AF, semakin besar potensi percepatan degradasi akibat kenaikan temperatur (Fennessy et al., 2025; Park et al., 2013). Dalam optimasi sistem fotovoltaik, metode Taguchi banyak digunakan karena mampu menentukan kombinasi parameter optimal dengan jumlah percobaan lebih efisien dibanding desain faktorial penuh, memanfaatkan orthogonal array dan signal-to-noise ratio (S/N) (Satpute et al., 2024), serta diintegrasikan dengan ANOVA untuk mengukur kontribusi tiap faktor secara kuantitatif (Karadede et al., 2026). Pendekatan Taguchi–ANOVA telah diterapkan pada optimasi pendinginan modul, konfigurasi PV/T, dan evaluasi performa energi (Asefa et al., 2025; Ben Seddik et al., 2022; Gelis et al., 2023; Yan et al., 2022), namun penerapannya untuk

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

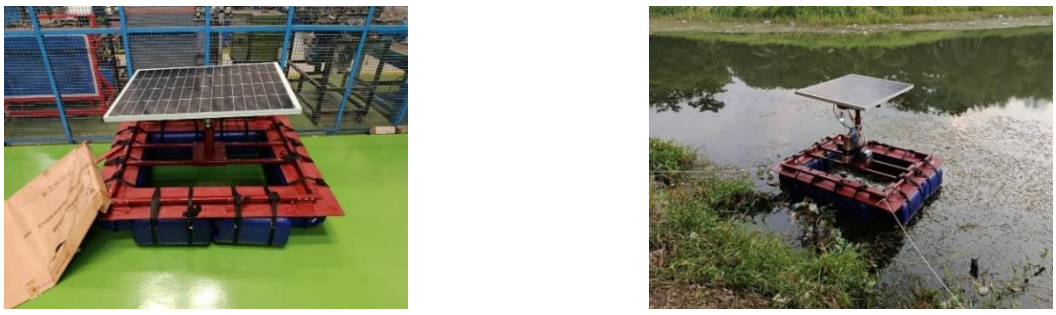
menganalisis pengaruh konfigurasi fisik terhadap temperatur mod dan indikator degradasi pada FPV masih terbatas—penelitian terdahulu umumnya berfokus pada faktor lingkungan, sementara kajian simultan terhadap parameter desain fisik dan potensi degradasi masih jarang. Penelitian ini karenanya mengintegrasikan temperatur mod (Tmod) dan AF sebagai indikator performa termal sekaligus reliabilitas modul (Damo et al., 2023; Hammami et al., 2017), guna memberikan pemahaman lebih komprehensif tentang pengaruh konfigurasi fisik terhadap kinerja FPV, baik dari sisi efisiensi maupun potensi degradasi termal jangka panjang (Altınkök & Altınkök, 2026).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh ketinggian modul di atas permukaan air dan sudut kemiringan panel terhadap Tmod dan AF pada sistem FPV, menggunakan pendekatan Taguchi–ANOVA dengan rancangan orthogonal array L9(3^2) untuk dua faktor kontrol pada tiga level. Tmod dan AF dipilih karena merepresentasikan performa termal dan reliabilitas modul secara simultan. Melalui rasio S/N, MEA, dan ANOVA, penelitian ini mengidentifikasi faktor paling berpengaruh terhadap variasi Tmod dan AF serta menentukan konfigurasi optimal yang meminimalkan temperatur mod dan potensi degradasi termal, guna memberikan panduan ilmiah bagi pemilihan konfigurasi fisik FPV yang optimal di wilayah beriklim tropis.

METODE PENELITIAN

Sistem Floating Photovoltaic dan Akuisisi Data

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan sistem floating photovoltaic (FPV) yang berlokasi di Kolam Graha Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Keputih, Surabaya, Indonesia. Sistem FPV dipasang di atas permukaan badan air dengan memanfaatkan efek pendinginan alami yang dihasilkan oleh lingkungan perairan, sehingga membantu menurunkan temperatur operasi modul dibandingkan sistem PV berbasis daratan. Sistem yang digunakan terdiri atas modul surya polikristalin 50 Wp yang dipasang pada platform terapung berbahan HDPE (High-Density Polyethylene) dan dilengkapi dengan rangka baja dengan mekanisme penyesuaian ketinggian menggunakan sistem tiang pivot yang dapat diatur secara manual. Sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) dirancang untuk mengukur dan merekam berbagai parameter lingkungan maupun parameter kelistrikan modul secara kontinu. Seluruh data hasil pengukuran ditransmisikan ke server penyimpanan cloud melalui koneksi Wi-Fi untuk keperluan pengolahan dan analisis lebih lanjut. Konfigurasi sistem FPV yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



(a) (b)

Gambar 1. (a) Rangka jadi FPV, dan (b) Rangka FPV dalam tahap uji coba

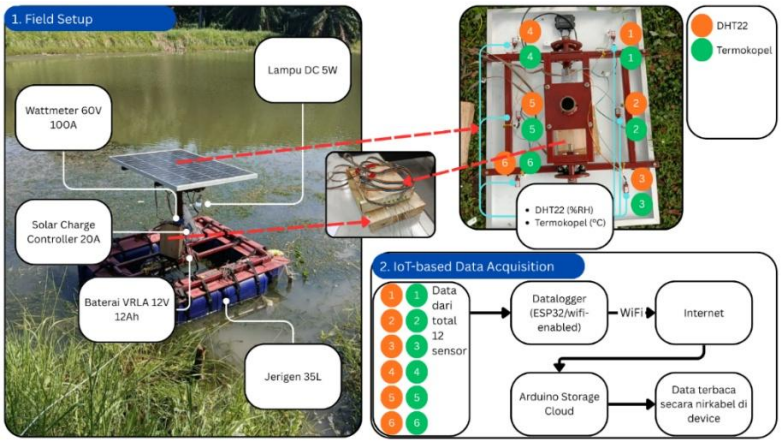
Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Modul fotovoltaik yang digunakan dalam penelitian ini adalah modul surya polikristalin dengan kapasitas daya puncak (peak power) sebesar 160 Wp. Faktor yang divariasikan dalam penelitian ini adalah ketinggian modul di atas permukaan air (Faktor A) dan sudut kemiringan panel (Faktor B). Ketinggian modul divariasikan pada tiga level, yaitu 250 mm, 500 mm, dan 750 mm, sedangkan sudut tilt divariasikan pada 5°, 15°, dan 25°. Kombinasi kedua faktor ini menghasilkan sembilan konfigurasi yang disusun dalam matriks ortogonal Taguchi L9(3^2). Karakteristik teknis modul fotovoltaik yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Modul Fotovoltaik ST Solar ST160W-32-M dalam kondisi STC (T = 25 0C, 1000 W/m2 dan AM1.5)

Parameter	Nilai	Satuan
Open circuit voltage, V_{OC}	21,80	*V*
Short circuit current, I_{SC}	9,30	*A*
Maximum voltage, V_m	18,24	*V*
Maximum current, I_m	8,77	*A*
Maximum power, P_m	160	*Watt*
Temperature range	-40 - +85	^0C
Size	1040 x 760 x 30	mm^3

Parameter yang diukur dalam penelitian ini meliputi irradiansi matahari (G) menggunakan pyranometer, temperatur permukaan modul (Tmod) menggunakan enam sensor thermocouple type-K yang dilengkapi modul pengondisi sinyal MAX6675 dan dipasang pada enam titik backsheet modul, temperatur lingkungan (Tamb) dan kelembapan relatif (RH%) menggunakan enam sensor DHT22/AM2302 yang ditempatkan berdekatan dengan masing-masing sensor thermocouple, serta karakteristik kelistrikan modul yang mencakup tegangan (V), arus (I), daya keluaran (Pout), daya masuk (Pin), dan efisiensi konversi (η) menggunakan wattmeter DC inline (0–60 V, 0–100 A). Seluruh data diakuisisi menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke cloud server melalui koneksi Wi-Fi.



Gambar 2. Skema sistem Floating Photovoltaic (FPV)

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Proses pengambilan data dilakukan dari pukul 09.00 hingga 15.00 WIB dengan interval 30 menit untuk setiap konfigurasi, menghasilkan 13 titik data per sesi pengukuran. Setiap konfigurasi diukur pada hari yang berbeda dalam kondisi cuaca cerah yang serupa untuk meminimalkan pengaruh variasi kondisi meteorologi terhadap perbandingan antar konfigurasi. Data yang digunakan dalam analisis Taguchi adalah nilai temperatur representatif (Topt) yang diperoleh dari titik-titik pengukuran pada periode puncak irradiansi.

Model Matematis Sistem Fotovoltaik

Sistem fotovoltaik beroperasi dengan cara mengonversikan energi surya menjadi energi listrik, dimana kinerja sebuah modul PV diamati dari seberapa besar daya yang dihasilkan dan dipengaruhi baik oleh faktor internal maupun faktor eksternal. Faktor internal tersebut berupa desain pabrikan modul PV tersebut dibuat dan temperatur operasi pada saat pengujian. Faktor eksternal, seperti temperatur lingkungan, kelembapan relatif, dan irradiansi matahari. Perhitungan daya output dan efisiensi konversi dijabarkan ke dalam Persamaan (1) dan Persamaan (2). Sistem fotovoltaik, baik ground-based maupun floating-based, melibatkan faktor-faktor tersebut dalam mempengaruhi performa modul yang mana dalam hal ini berupa tegangan dan arus output, yang terbilang ke dalam daya output (P), dengan efisiensi elektrik yang dianalisis.

$$P = V \times I \tag{1}$$

$$\eta_{el} = \frac{P}{G \times A_m} \tag{2}$$

V dan I adalah tegangan dan arus output pada saat pengoperasian, dengan P adalah daya output hasil perkalian tegangan (V) dan arus (I). G dan A_m adalah irradiansi matahari dan luas permukaan mod PV dalam m^2 atau mm^2. Oleh karena itu, temperatur mod digunakan sebagai parameter utama dalam penelitian ini untuk mengevaluasi kinerja termal modul sebelum dilakukan analisis potensi degradasi menggunakan model Arrhenius.

Model Arrhenius

Dalam penelitian ini, potensi degradasi termal modul dievaluasi menggunakan model Arrhenius, yang banyak diterapkan dalam studi keandalan perangkat elektronik dan sistem fotovoltaik untuk menggambarkan hubungan antara temperatur operasi dan laju degradasi material (Sinha et al., 2020). Peningkatan temperatur operasi akan mempercepat proses degradasi sehingga dapat memperpendek umur layanan komponen. Pada sistem floating photovoltaic (FPV), keberadaan badan air memberikan efek pendinginan alami yang membantu menurunkan temperatur modul. Kondisi ini tidak hanya meningkatkan kinerja energi, tetapi juga berpotensi menekan faktor Arrhenius dan mengurangi laju degradasi termal dibandingkan sistem PV berbasis daratan (Khoja et al., 2025).

Persamaan faktor percepatan Arrhenius (Arrhenius Acceleration Factor, AF) dinyatakan (Lyu et al., 2025):

$$AF = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right] \tag{3}$$

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

dengan E_a, k, menyatakan energi aktivasi (eV) dan konstanta Boltzmann ($8.617 \times 10^{-5}\ eV/K$). Dalam penelitian ini, nilai $\frac{E_a}{k} = 5802K$ ($E_a = 0{,}5\ eV$) digunakan sebagaimana yang direkomendasikan untuk modul silikon polikristalin pada lingkungan dengan kelembapan tinggi, dan dianggap representatif untuk menggambarkan mekanisme degradasi termal pada sistem FPV yang beroperasi di lingkungan tropis yang lembap (Hallberg & Peck, 1991; Liu et al., 2025). Nilai AF menggambarkan tingkat percepatan degradasi pada temperatur operasi tertentu dibandingkan dengan temperatur referensi standar ($T_{ref} = 298{,}15K$ atau 25°C). Nilai AF > 1 menunjukkan percepatan degradasi termal relatif terhadap kondisi referensi.

Nilai AF yang diperoleh dari temperatur representatif puncak (Topt) masing-masing konfigurasi digunakan sebagai indikator percepatan degradasi termal dan diperlakukan sebagai salah satu respon optimasi bersama Tmod dalam analisis Taguchi–ANOVA.

Desain Eksperimen Taguchi dan Analisis *Signal-to-Noise Ratio*

Metode Taguchi digunakan untuk menganalisis pengaruh parameter konfigurasi fisik terhadap temperatur mod (Tmod) dan *Arrhenius Acceleration Factor* (AF) pada sistem FPV. Metode ini dipilih karena mampu mengevaluasi beberapa faktor secara simultan dengan jumlah percobaan yang lebih efisien dibandingkan desain faktorial penuh (Liu et al., 2019). Ketinggian modul di atas permukaan air (A) dan sudut kemiringan panel (B) ditetapkan sebagai faktor kontrol karena keduanya merupakan parameter desain fisik yang secara langsung dapat ditentukan dan dikendalikan oleh perancang sistem. Berbeda dengan faktor lingkungan seperti irradiansi, temperatur ambien, atau kelembapan relatif yang bersifat tidak dapat dikendalikan (noise factor), ketinggian dan sudut tilt merupakan faktor desain yang memengaruhi kemampuan disipasi panas dan kondisi aliran udara konvektif di bawah panel. Berdasarkan rentang operasional yang umum diterapkan pada instalasi FPV, masing-masing faktor dibagi ke dalam tiga level. Faktor dan level yang digunakan dalam desain eksperimen disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan dua faktor dan tiga level yang digunakan, rancangan eksperimen disusun menggunakan *Orthogonal Array* (OA) L9(3^2). Rancangan ini memungkinkan evaluasi seluruh faktor hanya melalui sembilan kombinasi percobaan secara seimbang dan efisien (Nayyar et al., 2023). Respon yang dianalisis meliputi temperatur mod (Tmod) dan *Arrhenius Acceleration Factor* (AF). Karena tujuan penelitian adalah meminimalkan temperatur mod dan faktor Arrhenius, karakteristik kualitas yang digunakan adalah *Smaller-The-Better*. Kinerja setiap kombinasi faktor dievaluasi menggunakan *S/N Ratio* untuk mengidentifikasi konfigurasi yang menghasilkan respon minimum dengan tingkat kestabilan yang baik terhadap variasi kondisi operasi. Nilai *S/N Ratio* untuk karakteristik *Smaller-The-Better* dihitung menggunakan persamaan berikut (Satpute et al., 2024; Absike et al., 2021; Hosseinzadeh et al., 2018):

$$S/N = -10\ \log_{10}\left(\frac{1}{n}\right)\sum_{i=1}^{n} y_i^2 \qquad (dB) \tag{7}$$

dengan y_i menyatakan nilai respon pada pengamatan ke-i dan n adalah jumlah pengamatan. Dalam penelitian ini, n = 1 karena setiap konfigurasi diwakili oleh satu nilai Topt representatif, sehingga persamaan (7) menyederhanakan menjadi S/N = $-10\ \log_{10}(y^2)$. Nilai S/N Ratio yang lebih tinggi menunjukkan performa yang lebih baik karena berkaitan dengan nilai respon yang lebih rendah dan lebih stabil terhadap variasi kondisi operasi. Nilai *S/N Ratio* yang diperoleh untuk setiap kombinasi

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

faktor kemudian digunakan untuk mengidentifikasi kondisi operasi optimum dan mengevaluasi pengaruh masing-masing parameter fisik terhadap Tmod dan AF melalui Main Effect Analysis dan ANOVA.

Main Effect Analysis (MEA) dan *Analysis of Variance* (ANOVA)

Setelah nilai respon dan S/N Ratio diperoleh untuk setiap kombinasi percobaan, dilakukan MEA untuk mengevaluasi kecenderungan pengaruh masing-masing faktor lingkungan terhadap Tmod dan AF. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata respon dan rata-rata *S/N Ratio* pada setiap level faktor. Perubahan nilai respon antar level digunakan untuk menunjukkan sensitivitas Tmod dan AF terhadap variasi irradiansi, temperatur ambien, dan kelembapan relatif.

Dalam metode Taguchi, faktor dengan nilai delta terbesar, yaitu selisih antara nilai maksimum dan minimum pada setiap level, dianggap memiliki pengaruh paling signifikan terhadap respon. Untuk karakteristik *Smaller-The-Better*, kondisi operasi optimum ditentukan berdasarkan level faktor yang menghasilkan nilai *S/N Ratio* tertinggi (Asefa et al., 2025; Liu et al., 2023).

Tabel 2. Faktor dan Level pada Desain Taguchi

Faktor	Keterangan	Level		
		1	2	3
A	Ketinggian modul (mm)	250	500	750
B	Sudut *tilt* (°)	5	15	25

Hasil MEA selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik efek utama (main effect plot) guna mempermudah interpretasi pengaruh masing-masing faktor terhadap Tmod dan AF. Untuk memvalidasi hasil MEA, dilakukan Analysis of Variance (ANOVA) guna menguantifikasi kontribusi masing-masing faktor lingkungan terhadap variasi respon. Melalui analisis ini, pengaruh irradiansi matahari, temperatur ambien, dan kelembapan relatif dapat dibandingkan secara statistik sehingga faktor yang paling dominan dapat diidentifikasi. Perhitungan ANOVA melibatkan beberapa parameter, yaitu Sum of Squares (SS), Degree of Freedom (DOF), Mean Square (MS), F-ratio, dan persentase kontribusi. Ringkasan parameter dan persamaan yang digunakan disajikan pada Tabel 3. Faktor dengan persentase kontribusi terbesar dianggap memiliki pengaruh paling signifikan terhadap TMod dan AF pada sistem FPV.

Tabel 3. Parameter dan persamaan yang digunakan dalam analisis ANOVA [43]

Parameter	Persamaan	Keterangan	Keterangan Simbol
Sum of Squares **(SS)**	$SS_i = \sum n_i(\overline{Y}_i - \overline{Y})^2$	Variasi respon yang disebabkan oleh faktor ke-i	$\overline{Y}_i$: rata-rata respon pada level faktor ke-i $\overline{Y}$: rata-rata keseluruhan respon Y_j : nilai respon pengamatan ke-j n_i : jumlah data pada level ke-i L : jumlah level faktor
Total Sum of Squares **(SST)**	$SST = \sum \left(Y_j - \overline{Y}\right)^2$	Total variasi seluruh data	
Degree of Freedom **(DOF)**	$DOF = L - 1$	Derajat kebebasan faktor	
Mean Square **(MS)**	$MS = \frac{SS}{DOF}$	Variasi rata-rata faktor	

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

F-ratio	$F = \frac{MS_{factor}}{MS_{error}}$	Indikator signifikansi faktor
Persentase Kontribusi	$P_i = \frac{SS_i}{SST} \times 100\%$	Kontribusi faktor terhadap respon

Dalam metode Taguchi, faktor dengan nilai delta terbesar, yaitu selisih antara nilai maksimum dan minimum pada setiap level, dianggap memiliki pengaruh paling signifikan terhadap respon. Untuk karakteristik Smaller-The-Better, kondisi operasi optimum ditentukan berdasarkan level faktor yang menghasilkan nilai S/N Ratio tertinggi tertinggi (Asefa et al., 2025; Liu et al., 2023). Hasil MEA selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik efek utama (main effect plot) guna mempermudah interpretasi pengaruh masing-masing faktor terhadap Tmod dan AF. Untuk memvalidasi hasil MEA, dilakukan Analysis of Variance (ANOVA) guna menguantifikasi kontribusi masing-masing faktor lingkungan terhadap variasi respon. Melalui analisis ini, pengaruh irradiansi matahari, temperatur ambien, dan kelembapan relatif dapat dibandingkan secara statistik sehingga faktor yang paling dominan dapat diidentifikasi. Perhitungan ANOVA melibatkan beberapa parameter, yaitu Sum of Squares (SS), Degree of Freedom (DOF), Mean Square (MS), F-ratio, dan persentase kontribusi. Ringkasan parameter dan persamaan yang digunakan disajikan pada Tabel 3. Faktor dengan persentase kontribusi terbesar dianggap memiliki pengaruh paling signifikan terhadap Tmod dan AF pada sistem FPV.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi Parameter Lingkungan Selama Pengamatan Sistem FPV

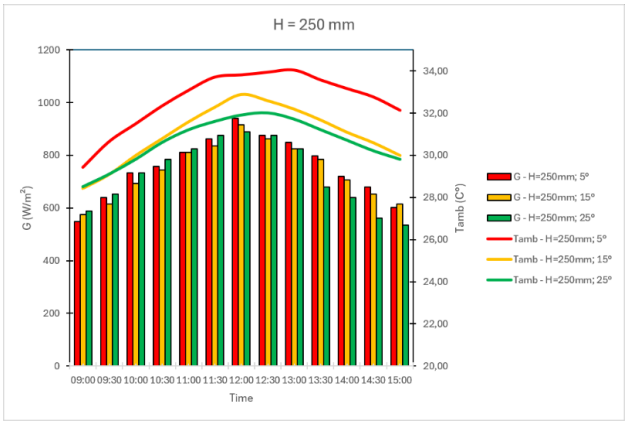
Proses pengambilan data dilakukan di Kolam Graha ITS Keputih, Surabaya, dari pukul 09.00–15.00 WIB dengan interval pengukuran 30 menit, menghasilkan 13 titik data per sesi pengukuran per konfigurasi. Parameter lingkungan yang diamati meliputi irradiansi matahari (G), temperatur ambien (Tamb), dan kelembapan relatif (RH%). Variasi ketiga parameter tersebut selama periode pengamatan ditunjukkan pada Gambar 3 dan selanjutnya memberikan konteks terhadap kondisi termal yang dialami modul FPV.

Parameter irradiansi matahari meningkat secara bertahap dari sekitar 535,9 W/m² pada pukul 09.00 WIB hingga mencapai nilai puncak sebesar 967,3 W/m² pada periode sekitar pukul 11.30–12.00 WIB, setelah itu menurun kembali menjelang sore hari. Pola yang serupa juga terlihat pada temperatur ambien yang meningkat dari sekitar 28,4°C pada pagi hari hingga mencapai nilai maksimum sekitar 34,1°C pada siang hari, sebelum kembali menurun menjelang pukul 15.00 WIB. Kecenderungan ini menunjukkan adanya peningkatan akumulasi panas di lingkungan akibat tingginya intensitas radiasi matahari selama periode pengamatan.

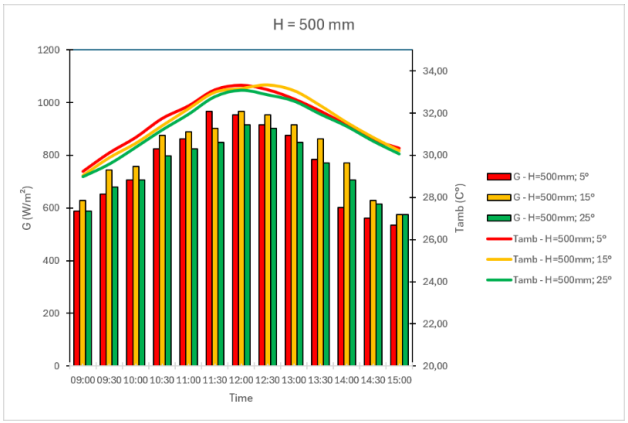
Sementara itu, parameter kelembapan relatif menunjukkan tren yang berlawanan. Nilai RH% menurun dari sekitar 80,1% pada pagi hari hingga mencapai nilai minimum sekitar 43,6% ketika irradiansi dan temperatur ambien berada pada kondisi puncak. Setelah itu, RH% kembali meningkat seiring dengan menurunnya temperatur lingkungan dan intensitas radiasi matahari. Pola ini mencerminkan karakteristik atmosfer yang umum terjadi pada kondisi cuaca cerah di wilayah tropis, di mana peningkatan temperatur udara menyebabkan kapasitas udara untuk menampung uap air meningkat sehingga nilai kelembapan relatif menurun (Nooni et al., 2025).

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

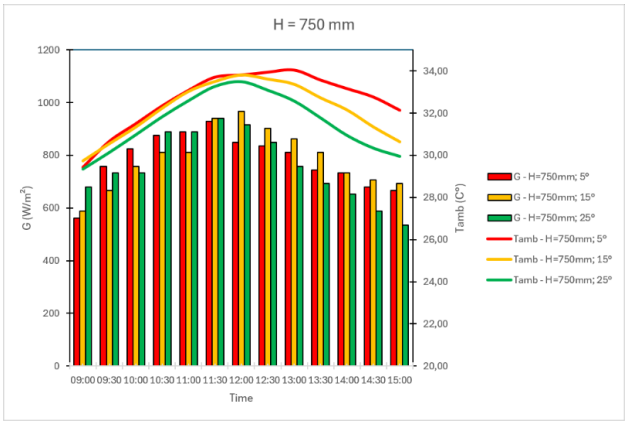
Kombinasi irradiansi tinggi, temperatur ambien yang meningkat, dan kelembapan relatif yang rendah diperkirakan memberikan pengaruh langsung terhadap temperatur operasi modul FPV (Sepúlveda-Oviedo, 2025). Kondisi paling kritis terjadi pada periode sekitar pukul 11.00–12.30 WIB, ketika irradiansi dan temperatur ambien mencapai nilai tertinggi, sedangkan kelembapan relatif berada pada nilai terendah. Kondisi ini berpotensi meningkatkan temperatur operasi modul, yang selanjutnya dapat memengaruhi daya keluaran, efisiensi, dan Arrhenius Acceleration Factor sebagai indikator percepatan degradasi termal. Oleh karena itu, analisis pada subbab berikutnya difokuskan pada respons termal dan elektrikal sistem FPV terhadap variasi konfigurasi fisik yang diuji.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. Profil G, Tamb, dan RH% harian: (a) 250mm, (b) 500mm, (c) 750mm

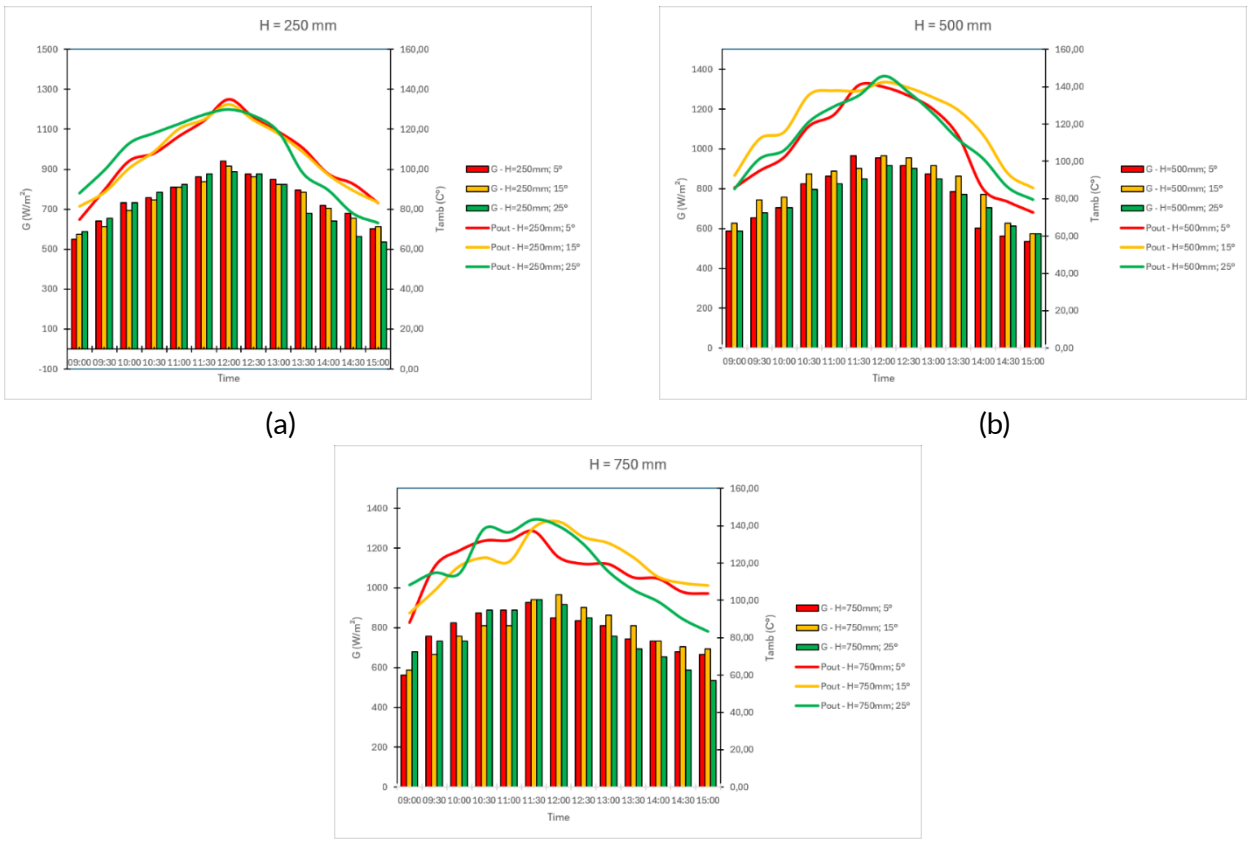
Pengaruh Konfigurasi Fisik terhadap Karakteristik Elektrik Sistem FPV

Setelah membahas variasi kondisi lingkungan selama periode pengamatan, analisis selanjutnya difokuskan pada respons termal dan elektrik sistem FPV terhadap variasi ketinggian modul dan sudut *tilt*. Temperatur operasi modul merupakan parameter penting karena dipengaruhi secara langsung oleh konfigurasi fisik sistem melalui mekanisme konveksi alami di bawah panel (Bamisile et al., 2025). Perubahan temperatur operasi tidak hanya mencerminkan kondisi termal modul, tetapi juga berpengaruh terhadap kinerja listrik sistem fotovoltaik. Oleh karena itu, pemahaman hubungan antara konfigurasi fisik, temperatur modul, dan karakteristik elektrik menjadi langkah penting sebelum mengevaluasi potensi degradasi termal menggunakan faktor Arrhenius.

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Variasi temperatur permukaan modul (Tmod) dan daya keluaran (Pout) untuk seluruh sembilan konfigurasi sepanjang periode pengamatan ditunjukkan pada Gambar 4. Temperatur modul meningkat secara bertahap dari pagi hari dan mencapai puncaknya pada kisaran 11.00–12.00 WIB, kemudian menurun menjelang sore. Terlihat dengan jelas bahwa konfigurasi dengan ketinggian 250 mm secara konsisten menunjukkan Tmod tertinggi sepanjang hari pada setiap level tilt, sedangkan ketinggian 750 mm menghasilkan Tmod terendah. Selisih Tmod pada jam puncak antara H=250 mm dan H=750 mm bervariasi cukup besar antar level tilt, berkisar antara 2,8°C (tilt 25°) hingga 7,3°C (tilt 5°), yang menunjukkan efektivitas mekanisme konveksi alami pada ketinggian lebih tinggi dalam membuang panas dari backsheet modul, dengan efek yang paling menonjol pada sudut kemiringan landai. Fenomena ini sesuai dengan temuan Ramanan et al. (2025) yang menyatakan bahwa peningkatan jarak antara panel dan permukaan air menciptakan kanal udara yang lebih terbuka sehingga aliran udara konvektif dapat berlangsung lebih efektif, menurunkan temperatur operasi modul secara signifikan.

β_{Voc} selama periode pengamatan, Tmod berada pada rentang 32,91°C hingga 54,96°C untuk seluruh konfigurasi. Tegangan keluaran menunjukkan kecenderungan yang berlawanan dengan Tmod, sesuai dengan koefisien temperatur negatif tegangan modul surya (≈−0,30 hingga −0,45 %/°C) (Skoplaki & Palyvos, 2009). Nilai tegangan keluaran berada pada rentang 20,21 V hingga 20,78 V, di mana konfigurasi dengan Tmod lebih rendah (H=750 mm) menunjukkan tegangan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan H=250 mm. Pola ini mengonfirmasi bahwa manajemen termal yang efektif melalui pemilihan ketinggian yang tepat secara langsung berdampak positif pada karakteristik kelistrikan sistem FPV.



(a) (b)

(c)

Gambar 4. Profil Tmod harian semua 9 konfigurasi Pout harian per konfigurasi variasi

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

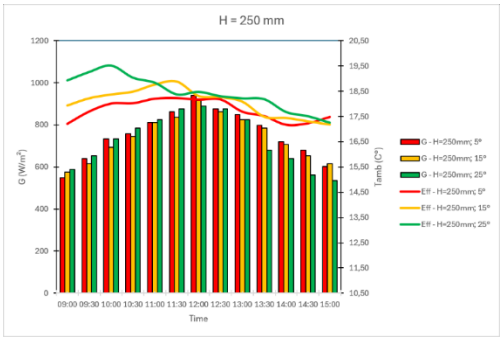
Karakteristik Efisiensi Sistem FPV

Gambar 5 menunjukkan variasi daya keluaran (Pout) dan efisiensi konversi (η) sistem FPV untuk seluruh sembilan konfigurasi selama periode pengamatan.

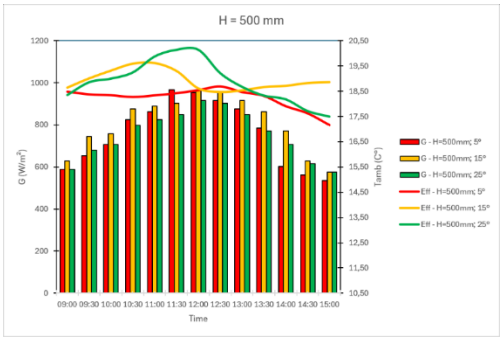
Daya keluaran meningkat secara bertahap mengikuti pola irradiansi dari pagi hingga siang hari dan menurun menjelang sore. Bertambahnya energi radiasi yang diterima permukaan modul meningkatkan arus foton yang dihasilkan sehingga daya keluaran sistem meningkat, sesuai dengan model satu dioda (Persamaan 1 dan 2). Rata-rata Pout pada waktu puncak 11.00–12.30 WIB berada pada rentang 116,60 W hingga 145,70 W untuk seluruh konfigurasi. Konfigurasi H=750 mm; T=25° secara konsisten menunjukkan Pout lebih tinggi dibandingkan H=250 mm, mencerminkan keunggulan termal yang berdampak positif pada karakteristik kelistrikan.

Berbeda dengan daya keluaran, efisiensi sistem menunjukkan perilaku yang lebih kompleks. Meskipun irradiansi meningkat selama periode siang hari, kenaikan temperatur operasi modul yang terjadi secara bersamaan menyebabkan penurunan tegangan keluaran. Akibatnya, peningkatan daya yang dihasilkan tidak sepenuhnya diikuti oleh peningkatan efisiensi sistem. Nilai efisiensi berada pada rentang 18,06% hingga 20,15% pada waktu puncak, dengan konfigurasi ketinggian 750 mm secara konsisten berada pada kurva efisiensi lebih tinggi dibandingkan 250 mm.

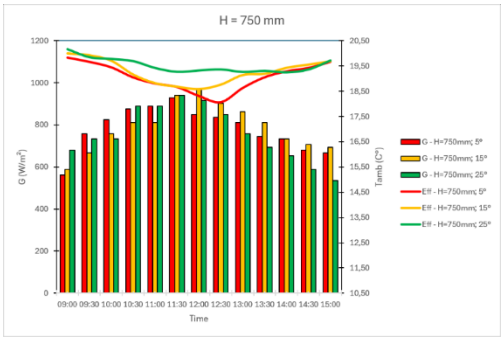
Fenomena ini sejalan dengan Persamaan (8) dan (9), yang menunjukkan bahwa daya maksimum dan efisiensi modul dipengaruhi secara langsung oleh temperatur operasi sel. Koefisien temperatur daya (γ_P) yang bernilai negatif mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur mod di atas kondisi standar 25°C akan menyebabkan penurunan daya maksimum dan efisiensi konversi energi. Oleh karena itu, meskipun daya keluaran meningkat seiring bertambahnya irradiansi, efisiensi sistem tidak menunjukkan peningkatan yang proporsional karena adanya rugi-rugi termal yang semakin besar pada temperatur operasi yang tinggi (Skoplaki & Palyvos, 2009).



(a)



(b)



(c)

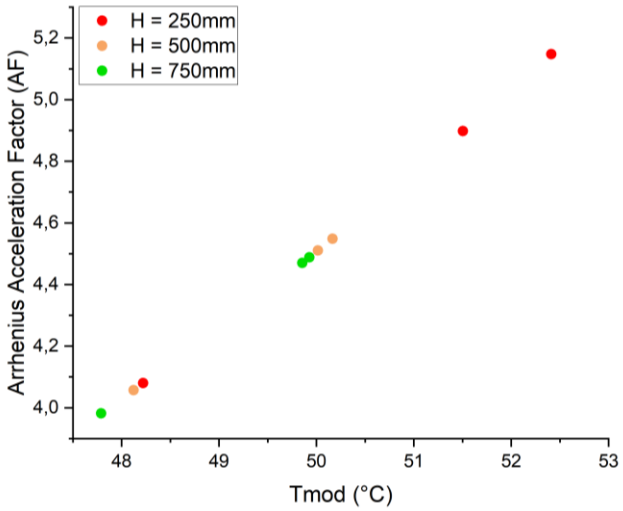
Gambar 5. Profil Pout harian dan efisiensi harian semua 9 konfigurasi

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Analisis Faktor Percepatan Arrhenius dan Potensi Degradasi Termal Modul FPV

Selain memengaruhi kinerja listrik, temperatur operasi juga berperan penting dalam menentukan laju degradasi material pada modul fotovoltaik. Untuk mengevaluasi potensi degradasi termal tersebut, penelitian ini menggunakan AF yang dihitung berdasarkan temperatur representatif puncak (Topt) masing-masing konfigurasi menggunakan model Arrhenius pada Persamaan (10). Hubungan antara Tmod dan AF untuk seluruh sembilan konfigurasi ditunjukkan pada Gambar 6.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa AF meningkat secara nonlinier seiring dengan kenaikan Tmod, sesuai dengan fungsi eksponensial model Arrhenius. Nilai Tmod pada window puncak berada pada rentang 47,64°C hingga 54,96°C dan menghasilkan nilai AF antara 3,949 hingga 5,911. Hubungan nonlinier ini mengindikasikan bahwa pengaruh temperatur terhadap potensi degradasi tidak bersifat proporsional — pada temperatur operasi yang lebih tinggi, laju peningkatan AF menjadi jauh lebih tajam, sehingga modul fotovoltaik menjadi semakin sensitif terhadap degradasi termal ketika temperatur mod mendekati 55°C ke atas.



Gambar 6. *Scatter plot* Tmod vs AF untuk semua 9 konfigurasi dan semua titik waktu

Dari Gambar 6 juga terlihat dengan jelas pengelompokan titik berdasarkan ketinggian modul. Titik-titik merah (H=250 mm) secara konsisten berada di sisi kanan atas grafik dengan nilai Tmod dan AF tertinggi, sedangkan titik-titik hijau (H=750 mm) berada di sisi kiri bawah dengan nilai Tmod dan AF terendah. Titik-titik oranye (H=500 mm) berada di posisi menengah, namun cenderung lebih dekat ke kelompok H=250 mm dibandingkan H=750 mm, mengindikasikan bahwa pengaruh peningkatan ketinggian dari 500 mm ke 750 mm lebih signifikan dibandingkan dari 250 mm ke 500 mm. Pola pengelompokan ini secara visual mengkonfirmasi bahwa ketinggian modul merupakan faktor dominan yang menentukan posisi operasi sistem FPV pada kurva Arrhenius, dimana semakin tinggi modul di atas permukaan air, semakin rendah Tmod dan semakin lambat potensi laju degradasi termalnya.

Karakteristik tersebut sejalan dengan teori Arrhenius yang menyatakan bahwa laju degradasi material meningkat secara eksponensial terhadap temperatur (Marques Araújo et al., 2025). Dari perspektif keandalan sistem, paparan temperatur tinggi yang terjadi secara berulang dalam jangka panjang berpotensi mempercepat degradasi berbagai komponen modul, seperti *encapsulant*, *backsheet*, sambungan solder, dan lapisan semikonduktor, yang pada akhirnya dapat mempercepat penurunan

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

performa sistem (Fennessy et al., 2025; Park et al., 2013). Kondisi lingkungan dan respon sistem pada nilai AF minimum dan maksimum dari seluruh data pengamatan disajikan pada Tabel 4.

Keterkaitan antara kondisi pengukuran dan nilai AF juga terlihat pada Tabel 4, di mana konfigurasi H=750 mm; T=5° yang menghasilkan AF minimum (3,949) beroperasi pada Tmod = 47,640°C, sedangkan konfigurasi H=250 mm; T=5° yang menghasilkan AF maksimum (5,911) beroperasi pada Tmod = 54,96°C. Selisih Tmod di antara keduanya mencapai sekitar 7,3°C, dengan perbedaan AF yang dihasilkan mencapai 1,962 atau sekitar 49,7%. Hal ini menegaskan sensitivitas tinggi model Arrhenius terhadap perubahan temperatur operasi, perubahan kecil pada Tmod memberikan dampak yang signifikan terhadap potensi percepatan degradasi termal modul. Oleh karena itu, pengendalian temperatur operasi melalui pemilihan konfigurasi fisik yang tepat menjadi penting tidak hanya untuk meningkatkan efisiensi energi sesaat, tetapi juga untuk memperpanjang umur layanan modul fotovoltaik dalam jangka panjang. Temuan ini memperkuat perlunya analisis lebih lanjut menggunakan metode Taguchi–ANOVA untuk mengidentifikasi faktor konfigurasi yang paling dominan memengaruhi Tmod dan AF pada sistem FPV [47].

Tabel 4. Kondisi Pengukuran dan Respon Sistem pada AF Minimum dan Maksimum

Kondisi	Irradiansi	Tamb	RH	Tmod	AF
	(W/m2)	(^{0}C)	(%)	(^{0}C)	(-)
Minimum AF	535,9	29,9	60,9	32,91	1,653
Maksimum AF	941,2	33,8	57,1	54,96	5,911

Keterkaitan antara kondisi lingkungan dan nilai AF juga terlihat pada Tabel 4, di mana kondisi dengan irradiansi tinggi dan temperatur ambien tinggi menghasilkan potensi degradasi termal yang paling besar. Menariknya, kondisi minimum AF diperoleh pada konfigurasi H=750 mm;T=25°, konfigurasi dengan ketinggian dan *tilt* terbesar, yang membuktikan bahwa pemilihan konfigurasi fisik yang tepat dapat secara efektif menekan nilai AF meskipun kondisi lingkungan tidak jauh berbeda. Temuan ini memperkuat perlunya analisis lebih lanjut menggunakan metode Taguchi–ANOVA untuk mengidentifikasi faktor konfigurasi yang paling dominan memengaruhi Tmod dan AF pada sistem FPV.

Analisis Optimasi Menggunakan Metode Taguchi

Metode Taguchi digunakan untuk menganalisis pengaruh ketinggian modul (Faktor A) dan sudut *tilt* (Faktor B) terhadap temperatur mod (Tmod) dan *Arrhenius Acceleration Factor* (AF) pada sistem FPV. Nilai Topt (temperatur representatif kondisi puncak irradiansi) per konfigurasi digunakan untuk menghitung nilai AF berdasarkan model Arrhenius (Persamaan 10). Hasil klasifikasi data berdasarkan kombinasi faktor, nilai respon, dan S/N Ratio disajikan pada Tabel 5.

Perbedaan nilai S/N Ratio yang nyata antar kombinasi faktor menunjukkan bahwa perubahan ketinggian modul dan sudut tilt memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik termal serta potensi degradasi modul FPV. Meskipun run ke-7 (H=750 mm; T=5°) mencatatkan nilai individual terbaik, hasil Main Effect Analysis pada Tabel 6 tetap mengidentifikasi kombinasi A_3B_3 (750 mm; 25°) sebagai konfigurasi optimum secara prediktif, karena sudut tilt 25° secara rata-rata memberikan performa lebih baik pada seluruh level ketinggian, meskipun pada level ketinggian 750 mm secara spesifik sudut tilt 5° kebetulan sedikit lebih unggul.

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

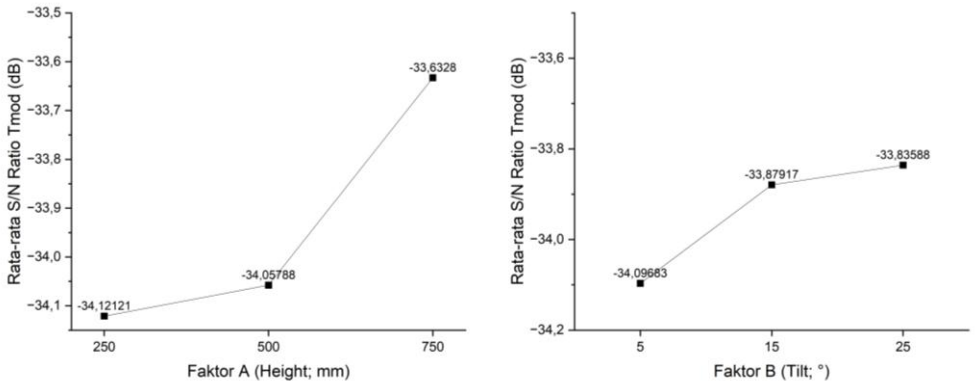
Tabel 5. Hasil Respon Eksperimen Berdasarkan *Orthogonal Array* L9(3^2) dan S/N Ratio

Test	Faktor kontrol		Hasil		Rasio S/N (dB)	
	A	B	Tmod (^{0}C)	AF (-)	Tmod	AF
1	250	5	54,96	5,9110	−34,8007	−15,4332
2	250	15	52,08	5,0556	−34,3340	−14,0755
3	250	25	50,87	4,7281	−34,1287	−13,4937
4	500	5	52,61	5,2031	−34,4211	−14,3252
5	500	15	50,88	4,7302	−34,1301	−13,4977
6	500	25	50,18	4,5525	−34,0112	−13,1650
7	750	5	47,64	3,9488	−33,5594	−11,9292
8	750	15	48,43	4,1270	−33,7014	−12,3127
9	750	25	48,10	4,0524	−33,6429	−12,1542

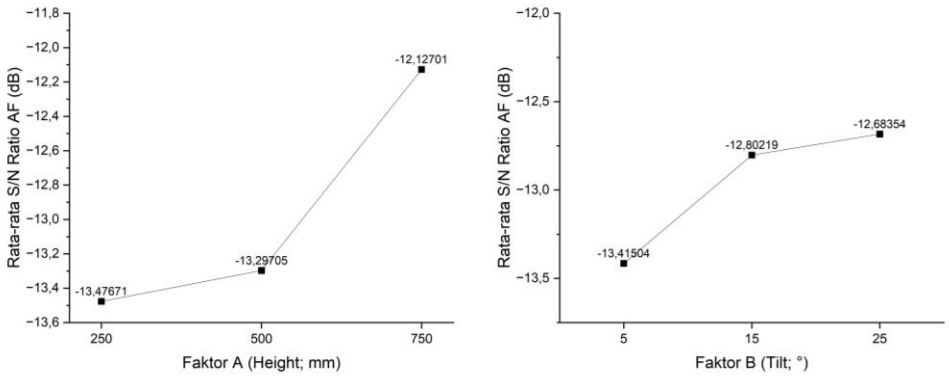
Hasil MEA berdasarkan rata-rata nilai *S/N Ratio* untuk temperatur mod dan faktor percepatan Arrhenius ditunjukkan pada Gambar 7 dan Tabel 6. Terlihat bahwa Faktor A (ketinggian modul) memiliki pengaruh yang paling dominan terhadap kedua respon, ditandai oleh gradien garis yang lebih curam dibandingkan Faktor B (sudut *tilt*).

Gambar 7 menunjukkan main effect plot rata-rata nilai *S/N Ratio* untuk setiap level faktor A dan B terhadap Tmod dan AF. Hal ini ditunjukkan oleh nilai Δ yang lebih besar pada Faktor A untuk temperatur mod maupun faktor percepatan Arrhenius, sehingga perubahan ketinggian modul memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap karakteristik termal modul dibandingkan perubahan sudut *tilt*. Dari Tabel 6, nilai rata-rata *S/N Ratio* tertinggi pada setiap faktor diperoleh pada level A_3 (ketinggian 750 mm) untuk Faktor A dan B_3 (*tilt* 25°) untuk Faktor B, baik untuk respon Tmod maupun AF. Dengan demikian, kombinasi level optimum untuk meminimalkan Tmod dan AF adalah A_3B_3, yaitu ketinggian modul 750 mm dengan sudut *tilt* 25°.

Kesamaan urutan ranking faktor untuk Tmod maupun AF (A > B) menunjukkan bahwa mekanisme konveksi alami yang dipengaruhi ketinggian modul merupakan faktor paling dominan dalam menentukan temperatur operasi dan potensi degradasi termal sistem FPV. Hasil ini selanjutnya diverifikasi menggunakan ANOVA untuk menentukan kontribusi dan tingkat signifikansi masing-masing faktor secara statistik.



Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.



Gambar 7. Main effect plot S/N Ratio: 2 panel berdampingan. Panel kiri: S/N Faktor A (Tmod dan AF). Panel kanan: S/N Faktor B (Tmod dan AF).

Tabel 6. Rata-rata S/N Ratio (dB) untuk Tmod dan AF

Level	Faktor control			
	Tmod		AF	
	A	B	A	B
1	-34,4211	-34,2605	-14,3341	-13,8962
2	-34,1875	-34,0552	-13,6626	-13,2953
3	-33,6347	-33,9276	-12,1323	-12,9376
Δ (max-min)	0,7864	0,3329	2,2018	0,9586
Rank	**1**	2	**1**	2

Hasil Analisis Taguchi–ANOVA

Untuk memverifikasi hasil MEA, dilakukan *Analysis of Variance* (ANOVA) terhadap Tmod dan A ANOVA digunakan untuk mengkuantifikasi kontribusi relatif masing-masing faktor terhadap variasi respon yang diamati serta mengidentifikasi faktor yang paling berpengaruh secara statistik. Interaksi A×B di-*pool* ke dalam error sesuai pendekatan Taguchi klasik sehingga $DOF_{error} = 4$. Hasil perhitungan ANOVA untuk kedua respon ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil ANOVA untuk Faktor Kontrol Konfigurasi FPV

Faktor	DOF	Tmod				AF			
		SS	MS	F	% Kontribusi	SS	MS	F	% Kontribusi
A	2	2	33,0084	16,5042	11,00	72,92	2,1929	1,0964	9,31
B	2	2	6,2580	3,1290	2,09	13,82	0,5171	0,2585	2,20
Error	2	4	6,0022	1,5005	—	13,26	0,4712	0,1178	—
Total	8	8	45,2685	—	—	100,00	3,1811	—	—

Hasil ANOVA pada Tabel 7 menunjukkan bahwa Faktor A (ketinggian modul) merupakan faktor yang paling dominan memengaruhi temperatur mod maupun faktor Arrhenius pada sistem FPV.

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Kontribusi ketinggian terhadap variasi temperatur mod mencapai 72,92% dengan nilai F = 11,00 (p = 0,024), signifikan secara statistik pada α = 0,05. Terhadap variasi AF, kontribusi ketinggian sebesar 68,93% dengan F = 9,31 (p = 0,031), juga signifikan pada α = 0,05. Sementara itu, Faktor B (tilt) memberikan kontribusi 13,82% terhadap Tmod dan 16,25% terhadap AF, namun tidak signifikan secara statistik pada α = 0,05 dengan p = 0,240 (Tmod) dan p = 0,227 (AF).

Temuan tersebut konsisten dengan hasil MEA yang menunjukkan urutan pengaruh faktor A > B untuk kedua respon. Dominasi Faktor A mengindikasikan bahwa peningkatan ketinggian modul secara signifikan meningkatkan efektivitas konveksi alami di bawah panel, sehingga menurunkan akumulasi panas dan menekan Tmod maupun AF. Mekanisme ini sejalan dengan studi termal eksperimental pada sistem FPV yang menegaskan bahwa jarak antara panel dan permukaan air merupakan parameter kritis dalam manajemen termal sistem (Sutanto et al., 2025; Ramanan et al., 2025; Wu et al., 2025). Ketinggian lebih besar menciptakan kanal udara yang lebih luas dan memungkinkan aliran udara konvektif berlangsung lebih bebas, sehingga panas yang terakumulasi di backsheet modul lebih efektif dibuang ke lingkungan sekitar.

Perlu dicatat bahwa meskipun Faktor B tidak signifikan pada α = 0,05, nilai p yang diperoleh (p ≈ 0,07–0,08) masih menunjukkan tren pengaruh yang bermakna secara fisik. Peningkatan sudut kemiringan mendorong orientasi panel yang lebih tegak, memfasilitasi aliran udara konvektif lebih bebas di bawah modul dan sedikit mengurangi luas area proyeksi yang menerima radiasi difus, sehingga berkontribusi pada penurunan Tmod dan AF meskipun dengan *magnitude* lebih kecil dibandingkan pengaruh ketinggian.

Selain itu, nilai error yang relatif kecil (13,26% untuk Tmod dan 14,81% untuk AF) menunjukkan bahwa model dua faktor yang digunakan dalam analisis ini mampu menjelaskan sebagian besar variasi respon yang teramati. Kondisi optimum dari hasil analisis ANOVA, yaitu A_3B_3 (ketinggian 750 mm, tilt 25°), konsisten dengan hasil MEA yang telah diidentifikasi sebelumnya. Pada kondisi optimal tersebut, Tmod = 48,10°C dan AF = 4,0524, mewakili performa terbaik secara prediktif berdasarkan rata-rata level faktor. Selisih AF antara konfigurasi optimal dan konfigurasi terburuk (H=250 mm; T=5°) sebesar 1,8586 (~45,9%) menunjukkan bahwa pemilihan konfigurasi fisik yang tepat berpotensi secara signifikan memperpanjang umur pakai efektif modul dengan memperlambat laju percepatan degradasi termal selama operasi jangka panjang sistem FPV.

KESIMPULAN

Analisis Taguchi–ANOVA terhadap sistem *floating photovoltaic* (FPV) dengan variasi ketinggian modul (250, 500, dan 750 mm) dan sudut *tilt* (5°, 15°, dan 25°) memberikan beberapa temuan utama sebagai berikut. Selama periode pengamatan, temperatur mod berada pada rentang 32,91°C hingga 54,96°C dan menghasilkan nilai Arrhenius Acceleration Factor antara 1,653 hingga 5,911, mencerminkan tingginya dinamika termal yang dialami modul FPV pada kondisi tropis. Daya keluaran berada pada rentang 125,45–139,27 W dan efisiensi 18,19–19,85% pada waktu puncak, dengan konfigurasi ketinggian lebih tinggi secara konsisten menunjukkan performa kelistrikan yang lebih baik akibat temperatur operasi yang lebih rendah. F_A Ketinggian modul (Faktor A) merupakan faktor dominan yang memengaruhi Tmod dan AF pada sistem FPV, dengan kontribusi masing-masing sebesar 72,92% dan 68,93%, serta signifikan secara statistik pada α = 0,05 (F = 11,00 untuk Tmod dan F = 9,31 untuk AF; keduanya melebihi Fkritis = 6,94). Sudut tilt (Faktor B) memberikan kontribusi sebesar

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

13,82% terhadap Tmod dan 16,25% terhadap AF, namun tidak signifikan pada α = 0,05 (F = 2,09 untuk Tmod dan F = 2,20 untuk AF, keduanya di bawah Fkritis = 6,94), meskipun tetap menunjukkan tren pengaruh yang bermakna secara fisik. Konfigurasi optimal berdasarkan analisis MEA dan ANOVA adalah A_3B_3, ketinggian modul 750 mm dengan sudut tilt 25°, yang menghasilkan Tmod = 48,10°C dan AF = 4,0524, mewakili performa termal terbaik secara prediktif berdasarkan rata-rata level faktor (meskipun secara individual, run H=750 mm; T=5° mencatatkan nilai Tmod dan AF sedikit lebih rendah pada pengamatan spesifik tersebut). Selisih AF sebesar 1,8586 (~45,9%) antara konfigurasi optimal dan konfigurasi terburuk (H=250 mm; T=5°) menunjukkan bahwa pemilihan konfigurasi fisik yang tepat berpotensi memperpanjang umur pakai modul secara signifikan melalui pengurangan laju percepatan degradasi termal. Temuan ini menegaskan bahwa ketinggian modul di atas permukaan air merupakan parameter desain kritis yang harus diprioritaskan dalam perencanaan sistem FPV untuk menekan temperatur operasi modul, meningkatkan efisiensi konversi energi, dan memperpanjang keandalan sistem di wilayah beriklim tropis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam pengembangan panduan desain sistem *floating photovoltaic* yang lebih andal dan berkelanjutan.

Sebagai catatan, pengambilan data dilakukan secara satu konfigurasi *height-tilt* per hari, seperti yang ditunjukkan pada skema sistem FPV di Gambar 2. Keterbatasan biaya, yang mana direalisasikan secara mandiri, membuat pembuatan sistem FPV berskala lebih besar tidak dapat dibuat. Kedepannya, perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem FPV dapat dibuat sedemikian rupa agar hasil dan analisisnya lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Absike, H., et al. (2021). Synthesis of CuO thin films based on Taguchi design for solar absorber. *Optical Materials*, *118*, 111224. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111224

Altınkök, S., & Altınkök, A. (2026). Experimental investigation and scaling of integrated PV-TEG systems for thermal management and electrical power gain. Energy, 12, 100707. https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100707

Asefa, N. S., et al. (2025). Maximizing photovoltaic thermal system through computational fluid dynamics-driven multi-factor parametric optimization: A Taguchi-grey relational analysis method. Case Studies in Thermal Engineering, 69, 105991. https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105991

Attanayake, K., et al. (2024). Renewable energy as a solution to climate change: Insights from a comprehensive study across nations. PLOS ONE, 19(6), e0299807. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299807

Bamisile, O., Acen, C., Cai, D., Huang, Q., & Staffell, I. (2025). The environmental factors affecting solar photovoltaic output. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 208, 115073. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115073

Ben Seddik, Z., Ben Taher, M. A., Laknizi, A., Ahachad, M., Bahraoui, F., & Mahdaoui, M. (2022). Hybridization of Taguchi method and genetic algorithm to optimize a PVT in different Moroccan climatic zones. Energy, 250, 123802. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123802

Bugeja, R., Mule' Stagno, L., Godin, C., Luo, W., & Zhang, X. (2025). Advancements and challenges in floating photovoltaic installations focusing on technologies, opportunities, and future directions. Energies, 18(22), 5908. https://doi.org/10.3390/en18225908

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Damo, U. M., Ozoegwu, C. G., Ogbonnaya, C., & Maduabuchi, C. (2023). Effects of light, heat and relative humidity on the accelerated testing of photovoltaic degradation using Arrhenius model. Solar Energy, 250, 335–346. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.002

Eglin, T., Rodriguez-Perez, H., & De Billy, V. (2025). Ecological impacts of floating photovoltaics on lake ecosystems: Eco-design and research perspectives. Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems, (426), 27. https://doi.org/10.1051/kmae/2025023

Faruqui, M. F. I., Jawad, A., & Masood, N.-A. (2023). Techno-economic assessment of power generation potential from floating solar photovoltaic systems in Bangladesh. Heliyon, 9(6), e16785. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16785

Fennessy, A., Onea, V., Walshe, J., Doran, J., Purcar, M., & Amarandei, G. (2025). Suitability of existing photovoltaic degradation models for agrivoltaic systems. Energies, 18(8), 1937. https://doi.org/10.3390/en18081937

Gelis, K., Ozbek, K., Ozyurt, O., & Naci Celik, A. (2023). Multi-objective optimization of a photovoltaic thermal system with different water-based nanofluids using Taguchi approach. Applied Thermal Engineering, 219, 119609. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119609

Hallberg, Ö., & Peck, D. S. (1991). Recent humidity accelerations, a base for testing standards. Quality and Reliability Engineering International, 7(3), 169–180. https://doi.org/10.1002/qre.4680070308

Hamdani, D., Kusuma, R., Munir, R., Natalisanto, A. I., Ummah, A. R., & Rian Dani, A. T. (2026). Optimization of (p–i1–i2–n) a-Si:H solar cell interfaces: An integrated AFORS-HET and Taguchi design of experiments study. World Journal of Engineering, 1–15. https://doi.org/10.1108/WJE-02-2026-0067

Hammami, M., Torretti, S., Grimaccia, F., & Grandi, G. (2017). Thermal and performance analysis of a photovoltaic module with an integrated energy storage system. Applied Sciences, 7(11), 1107. https://doi.org/10.3390/app7111107

Hosseinzadeh, M., Salari, A., Sardarabadu, M., & Passandideh-Fard, M. (2018). Optimization and parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system: 3D numerical model with experimental validation. Energy Conversion and Management, 160, 93–108. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.006

Karadede, K., Adıgüzel, E., Zeynalov, J., & Ersoy, A. (2026). Optimization of PV panels using Taguchi method under environmental factors. IETE Journal of Research, 72(1), 359–369. https://doi.org/10.1080/03772063.2025.2568934

Khoja, I.-U.-R., et al. (2025). A comparative review: Floating photovoltaic, agrivoltaics, and ground-mounted PV systems. IEEE Access, 13, 45853–45873. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3547438

Kobayashi, T., et al. (2024). Cost-efficiency potential of solar energy on a global scale: Case studies for Si solar modules with PERC and heterojunction structures. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 32(11), 799–813. https://doi.org/10.1002/pip.3835

Lazo, J., Trujillo-Baute, E., & Watts, D. (2026). Land-use dilemma: Evaluating the transition from crops to solar PV plants using a real options approach. Journal of Cleaner Production, 540, 147468. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147468

Li, C., Xiong, K., & Liu, J. (2026). Global energy transition through the lens of metacoupling. Engineering. Advance online publication. https://doi.org/10.1016/j.eng.2026.01.015

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Liu, D.-K., Hsieh, C.-C., Liao, T.-W., & Kuo, C.-F. J. (2023). The use of the Taguchi method with grey relational analysis for nanofluid-phase change-optimized parameter design at a rooftop solar photovoltaic thermal composite module for small households. Sustainability, 15(20), 15163. https://doi.org/10.3390/su152015163

Liu, R., Li, X., Liu, Y., Zhang, Z., & Wu, M. (2025). Accelerated aging method of performance attenuation of crystalline silicon photovoltaic modules under full-spectrum conditions. Materials, 18(7), 1507. https://doi.org/10.3390/ma18071507

Liu, X., Zhou, Y., Li, C.-Q., Lin, Y., Yang, W., & Zhang, G. (2019). Optimization of a new phase change material integrated photovoltaic/thermal panel with the active cooling technique using Taguchi method. Energies, 12(6), 1022. https://doi.org/10.3390/en12061022

Lyu, Z., et al. (2025). The aging behavior and service time estimation of photovoltaic backsheets based on artificially accelerated aging and outdoor aging. Solar Energy, 291, 113380. https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113380

Marques Araújo, R. G., Marques Lameirinhas, R. A., Pereira Fernandes, J. F., Tomás Oliveira, R. J., Correia V. Bernardo, C. P., & Torres, J. P. N. (2025). Experimental determination of Arrhenius degradation coefficients for monocrystalline photovoltaic solar cells. Results in Optics, 21, 100861. https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100861

Nayyar, A., Sharma, D., Soni, S. L., Gautam, V., Kumar, C., & Augustine, M. (2023). Study of performance and emissions of a stationary DI variable compression ratio CI engine fueled with n-butanol/diemod blends using Taguchi technique. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45(1), 2972–2998. https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1666937

Nedelcu, A.-T., Faitär, C., Voicu, I., & Panaitescu, M. (2026). Floating photovoltaic systems—Energy performance and environmental challenges in sustainable development. Sustainability, 18(5), 2588. https://doi.org/10.3390/su18052588

Nooni, I. K., Ogou, F. K., Saidou Chaibou, A. A., Fianko, S. K., Atta-Darkwa, T., & Prempeh, N. A. (2025). Relative humidity and air temperature characteristics and their drivers in Africa tropics. Atmosphere, 16(7), 828. https://doi.org/10.3390/atmos16070828

Nugroho, H. W. (2025). The role of energy transition in anticipating the impacts of climate change. Interaction: Community Engagement in Social and Environment, 3(1). https://doi.org/10.61511/icese.v3i1.2025.2087

Octario, B., & Dwiyantoro, B. A. (2025). Analysis and design of floating PV systems in several Batam reservoirs for optimizing the renewable energy mix. Journal of Physics: Conference Series, 2942(1), 012016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2942/1/012016

Oeishee, M. H., & Rahman, Md. M. (2026). A review of floating photovoltaic systems: Prospects, challenges, and sustainability considerations. Global Challenges, 10(2), e00581. https://doi.org/10.1002/gch2.202500581

Park, N. C., Oh, W. W., & Kim, D. H. (2013). Effect of temperature and humidity on the degradation rate of multicrystalline silicon photovoltaic module. International Journal of Photoenergy, 2013, 1–9. https://doi.org/10.1155/2013/925280

Qamar, S. H., et al. (2026). Performance and economic evaluation of floating (FPV) and land-based PV (LBPV) systems on reservoirs: A multi-site case study. Energy Conversion and Management: X, 31, 101886. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101886

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Rahma, S. F., Pratama, D. Y. E., Rohwidianto, F. P., & Sanjaya, M. B. (2025). Photovoltaic efficiency and technology innovation in renewable energy: A systematic literature review. Semesta Teknika, 28(1), 62–76. https://doi.org/10.18196/st.v28i1.25189

Ramanan, C. J., Lim, K. H., & Kurnia, J. C. (2025). Thermal behavior of floating photovoltaics: A comparison of performance at varying heights and benchmarking against land-based photovoltaics. Applied Energy, 388, 125642. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125642

Satpute, J., et al. (2024). Performance optimization for solar photovoltaic thermal system with spiral rectangular absorber using Taguchi method. Scientific Reports, 14(1), 23849. https://doi.org/10.1038/s41598-024-73065-9

Sepúlveda-Oviedo, E. H. (2025). A review of operational factors affecting photovoltaic system performance. Energy Conversion and Management: X, 26, 100942. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100942

Sinha, A., et al. (2020). Prediction of climate-specific degradation rate for photovoltaic encapsulant discoloration. IEEE Journal of Photovoltaics, 10(4), 1093–1101. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2989182

Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Solar Energy, 83(5), 614–624. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008

Sutanto, B., Iacovides, H., Nasser, A., Cioncolini, A., & Afgan, I. (2025). Efficiency improvement of floating photovoltaic panels with natural convection cooling loops: Multi-physics thermal modelling. Solar Energy, 286, 113170. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113170

Wu, R., Ma, C., Liu, Z., Deng, Z., & Zhang, Z. (2025). Thermal characteristics evaluation of floating photovoltaic modules based on an improved dynamic coupled thermal-electrical model. Renewable Energy, 248, 123061. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123061

Yan, B., et al. (2022). Numerical and experimental investigation of photovoltaic/thermal systems: Parameter analysis and determination of optimum flow. Sustainability, 14(16), 10156. https://doi.org/10.3390/su141610156

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.