

## Pengaruh Frame terhadap Kinerja Modul Panel Surya 100 Wp di Iklim Tropis Yogyakarta

### *The Effect of Frame on the Performance of 100 Wp Solar Panel Modules in the Tropical Climate of Yogyakarta*

Rivan Muhfidin<sup>1\*</sup>, Dandung Rudy Hartana<sup>1</sup>, Elis Betin Aryani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

\*Email Korespondensi : rivanm@itny.ac.id

#### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh frame terhadap kinerja termal dan keluaran daya modul fotovoltaik (PV) berkapasitas 100 Wp pada kondisi iklim tropis Yogyakarta. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik berbasis model termal-elektrik dengan membandingkan dua konfigurasi modul, yaitu *framed* (menggunakan aluminium) dan *frameless* (tanpa frame). Temperatur sel ( $T_{cell}$ ) dihitung berdasarkan model empiris Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), sedangkan daya keluaran ditentukan menggunakan koreksi suhu terhadap kondisi standar (STC). Hasil simulasi menunjukkan bahwa modul *framed* memiliki temperatur sel lebih rendah 2–3 °C dibandingkan *frameless*, dengan daya keluaran 2,3% lebih tinggi. Estimasi energi tahunan mencapai 1.596 kWh/kWp/tahun untuk modul *framed* dan 1.560 kWh/kWp/tahun untuk *frameless*. Dengan mempertimbangkan degradasi tahunan (0,5% untuk *framed* dan 0,7% untuk *frameless*), total energi kumulatif selama lima tahun menunjukkan selisih 231 kWh. Hal tersebut menunjukkan bahwa desain frame tidak hanya berfungsi struktural, tetapi juga sebagai elemen disipasi panas pasif yang meningkatkan efisiensi dan keandalan modul PV pada kondisi tropis.

**Kata kunci:** fotovoltaik, frame aluminium, NOCT, efisiensi termal, iklim tropis

#### ABSTRACT

*This study aims to analyze the influence of frame design on the thermal and power output performance of a 100 Wp photovoltaic (PV) module under tropical climate conditions in Yogyakarta, Indonesia. A numerical simulation based on a thermal–electrical model was applied to compare two configurations: framed (anodized aluminum) and frameless (no frame). The cell temperature ( $T_{cell}$ ) was determined using the empirical Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) model, while power output was calculated through temperature correction relative to Standard Test Conditions (STC). The results showed that the framed module operated 2–3 °C cooler than the frameless module, yielding 2.3% higher power output. The estimated annual energy generation was 1,596 kWh/kWp for the framed module and 1,560 kWh/kWp for the frameless one. Considering annual degradation (0.5% for framed and 0.7% for frameless), the cumulative five-year energy output differed by 231 kWh. It shows that the frame serves not only as a structural element but also as a passive heat-dissipation component, enhancing efficiency and reliability of PV modules in tropical environments.*

**Keyword :** photovoltaic, aluminum frame, NOCT, thermal efficiency, tropical climate

#### PENDAHULUAN

Transisi global terhadap energi terbarukan menjadi prioritas utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selama dekade terakhir, energi terbarukan dari matahari mengalami pertumbuhan yang paling cepat diantara sumber terbarukan lainnya. Kapasitas terpasang energi surya global telah tumbuh hampir 20 kali lipat, mencapai 920 GW pada tahun 2021, dengan proyeksi menunjukkan peningkatan berkelanjutan untuk memenuhi target nol bersih [1]. Pertumbuhan ini didukung oleh potensi teknis energi matahari yang luas, yang jauh melebihi permintaan energi primer global, dan penurunan biaya fotovoltaik (PV), yang telah turun empat perlima sejak 2009 [2]. Negara-negara seperti China, Amerika Serikat, Jepang, Jerman, dan India memimpin dalam instalasi PV surya, didukung oleh kebijakan seperti tarif umpan dan insentif pajak yang meningkatkan daya saing surya terhadap bahan bakar fosil [3]. Ekspansi PV yang cepat juga dikaitkan dengan skalabilitasnya, fleksibilitas dalam penggunaan material, dan dampak lingkungan yang minimal, menjadikannya sumber energi yang berkelanjutan dan andal [4].

Pada dasarnya, efisiensi sebuah modul panel surya ditentukan oleh bahan sel surya. Namun, struktur rangka memiliki peran penting yang sering diabaikan dalam menentukan stabilitas termal dan operasional modul panel surya. Desain rangka secara signifikan berdampak pada kemampuan modul untuk menahan tekanan lingkungan seperti siklus termal, beban mekanis, dan variasi suhu, yang sangat penting untuk keandalan dan efisiensi jangka panjang modul.

Efisiensi modul fotovoltaik (PV) secara signifikan dipengaruhi oleh suhu sel, dengan penurunan output daya sekitar 0,4% hingga 0,5% per derajat Celcius peningkatan suhu [5]. Hubungan ini secara konsisten diamati di berbagai penelitian. Libra menemukan bahwa efisiensi konversi energi sel PV silikon monokristalin menurun sekitar 0,5% per derajat Celcius pada rentang suhu yang luas, yang sangat penting untuk aplikasi terestrial dan luar angkasa di mana fluktuasi suhu signifikan [6]. Sensitivitas suhu ini lebih lanjut dikuatkan oleh Salih et al., yang mengamati pengurangan daya keluaran sekitar 0,48W per derajat Celcius peningkatan suhu permukaan modul [7]. Dampak negatif dari peningkatan suhu pada efisiensi PV juga disorot oleh Muhfidin dan Yu, yang mencatat penurunan perkiraan efisiensi dari 13,50% menjadi 11,82% karena suhu lingkungan naik dari 25° C menjadi 50° C [8]. Secara keseluruhan, mengelola lingkungan termal modul PV sangat penting untuk mengoptimalkan kinerjanya dan memperpanjang umurnya, karena panas yang berlebihan tidak hanya mengurangi efisiensi tetapi juga mempercepat degradasi sel [9].

Meskipun efisiensi modul PV ditentukan oleh bahan sel surya, struktur rangka mekanis memiliki peran penting namun sering diabaikan dalam menentukan stabilitas termal dan operasional modul. Stabilitas mekanis modul PV dipengaruhi oleh tekanan yang diinduksi selama siklus termal, yang dapat menyebabkan kerusakan sel dan cacat lainnya jika tidak dikelola dengan benar [10]. Sifat material rangka, seperti modulus elastisitas dan koefisien ekspansi termal, sangat penting dalam mengurangi tekanan ini. Misalnya, bingkai yang terbuat dari poliuretan dengan sifat mekanik tertentu dapat meningkatkan daya tahan modul dengan mengakomodasi ekspansi termal dan kontraksi [11]. Selain itu, desain bingkai, termasuk dimensi lebar dan rongga, dapat secara signifikan mempengaruhi distribusi tegangan dalam modul. Mengoptimalkan parameter ini dapat mengurangi defleksi dan meningkatkan kinerja mekanis modul, seperti yang ditunjukkan oleh sebuah penelitian yang menunjukkan pengurangan defleksi 2,6% dengan desain bingkai yang dioptimalisasi [12].

Temperatur Operasi Sel Nominal (NOCT) sebuah modul PV bergantung pada desain bingkai dan konfigurasi pemasangan. Dengan demikian, bingkai dan konfigurasi pemasangan secara langsung memengaruhi kinerja PV. Di wilayah tropis seperti Indonesia, di mana suhu lingkungan sering melebihi 30 °C, dampak ventilasi yang dibantu bingkai dan pembuangan panas menjadi sangat penting. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur perbedaan kinerja antara modul PV dengan bingkai aluminium anodisasi dan modul PV tanpa bingkai untuk sistem 100 Wp di bawah kondisi iklim Yogyakarta.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis model termal-elektrik untuk menganalisis pengaruh penggunaan frame terhadap kelauran daya modul panel surya (PV). Modul PV yang digunakan dengan dua konfigurasi utama yaitu modul frame aluminium dan modul tanpa frame (*frameless*). Kedua konfigurasi dibandingkan secara sistematis dengan asumsi kondisi lingkungan tropis wilayah Yogyakarta, meliputi temperatur ambien rata-rata 28°C dan intensitas radiasi rata-rata 600 W/m<sup>2</sup>. Temperatur sel ( $T_c$ ) dihitung menggunakan model empiris berbasis *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT) [5]. Model tersebut menggambarkan keseimbangan panas pada sebuah modul PV dengan kondisi steady-state dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{NOCT - 20}{800} \times G \quad (1)$$

Dimana  $T_{cell}$  adalah temperatur sel (°C),  $T_{amb}$  adalah temperatur ambien udara (°C), NOCT adalah suhu operasi sel nominal (°C), dan  $G$  adalah intensitas radiasi matahari (W/m<sup>2</sup>). Nilai NOCT yang digunakan adalah 43 °C untuk modul *framed* dan 46 °C untuk modul *frameless*, berdasarkan literatur pengujian modul silikon kristalin dengan karakteristik ventilasi yang berbeda.

Daya keluaran sesaat dihitung menggunakan koreksi suhu terhadap kondisi standar (STC) menurut persamaan korelasi suhu-daya [5] sebagai berikut:

$$P = P_{STC} \times \frac{G}{1.000} \times [1 + \gamma_p (T_{cell} - 25)] \quad (2)$$

Dimana  $P_{STC}$  adalah daya keluaran pada kondisi standar (100 Wp),  $G$  adalah intensitas radiasi matahari (W/m<sup>2</sup>),  $\gamma_p$  adalah koefisien suhu daya untuk modul silikon monokristalin (-0,0045/°C), dan  $T_{cell}$  adalah temperatur sel (°C). Pemodelan tersebut memperkirakan penurunan daya akibat kenaikan temperatur sel dibandingkan dengan kondisi STC (25°C dan 1.000 W/m<sup>2</sup>).

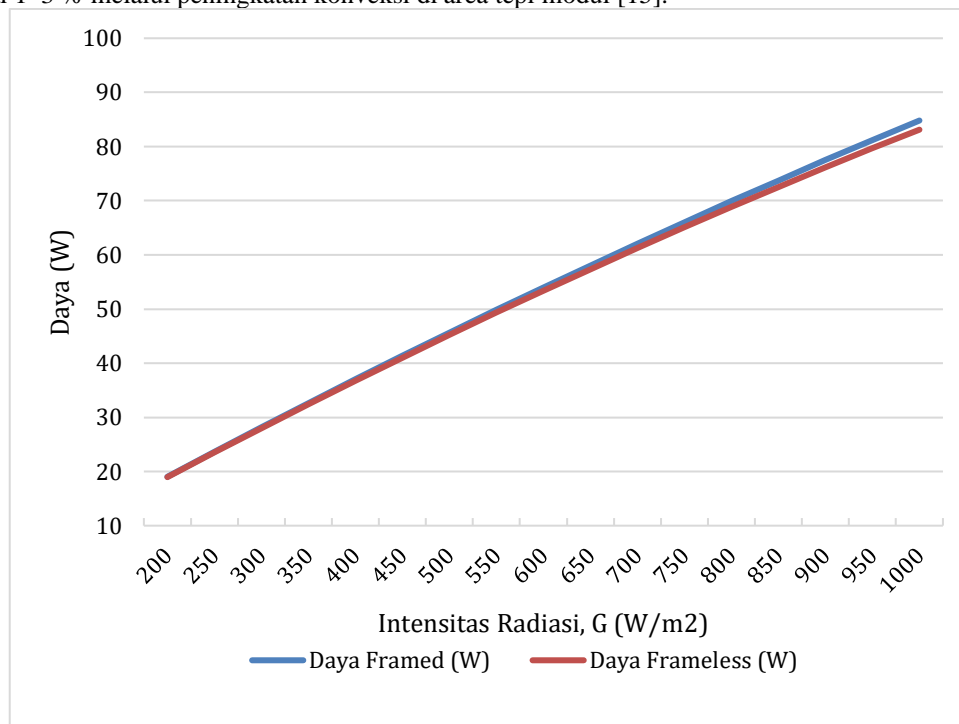
Simulasi numerik ini menggunakan data iklim tropis Yogyakarta dengan nilai *Peak Sun Hours* (PSH) rata-rata tahunan sebesar 4,5 kWh/kWp/hari. Sebagai parameter tambahan, temperatur ambien udara ( $T_{amb}$ ) sebesar 28°C, intensitas matahari (G) sebesar 600 W/m<sup>2</sup>, dan analisa selama 5 tahun. Degradasi performa tahunan diasumsikan 0,5%/tahun untuk modul *framed* dan 0,7%/tahun untuk *frameless* [13][14]. Pendekatan simulasi numerik dilakukan dengan langkah berikut:

1. Menghitung temperatur sel dan menghitung temperatur ambien untuk setiap intensitas radiasi matahari (200-1.000 W/m<sup>2</sup>)
2. Menghitung daya luaran (P) menggunakan model koreksi suhu
3. Mengintegrasikan energi tahunan berdasarkan PSH x 365 hari x faktor suhu
4. Validasi hasil dengan membandingkan tren hasil simulasi terhadap data dan hasil pengukuran [14]

Validasi model dilakukan dengan membandingkan tren hasil simulasi terhadap data literatur yang sudah ada. Analisis dilakukan secara kuantitatif komparatif, dengan fokus pada perbedaan temperatur sel rata-rata, efisiensi daya, dan total energi tahunan antara dua konfigurasi modul.

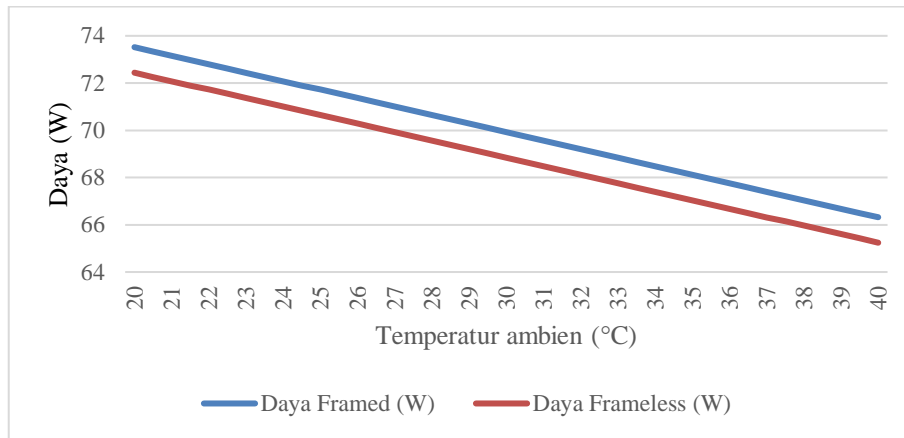
## HASIL DAN ANALISIS

Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa daya keluaran modul PV meningkat seiring kenaikan irradiansi (G) dari 200 hingga 1000 W/m<sup>2</sup>, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pada kondisi ambien 30 °C, modul *framed* menghasilkan daya maksimum 96,3 W pada 1000 W/m<sup>2</sup>, sedangkan modul *frameless* hanya mencapai 94,1 W. Selisih sekitar 2,3 % ini disebabkan oleh perbedaan temperatur sel akibat karakteristik disipasi panas yang lebih baik pada frame aluminium. Ventilasi alami di sisi frame meningkatkan konveksi udara di belakang modul, sehingga temperatur kerja ( $T_{cell}$ ) lebih rendah dan rugi termal menurun. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Olukan (2019) yang melaporkan bahwa peningkatan efisiensi termal dapat mencapai 1–3 % melalui peningkatan konveksi di area tepi modul [15].



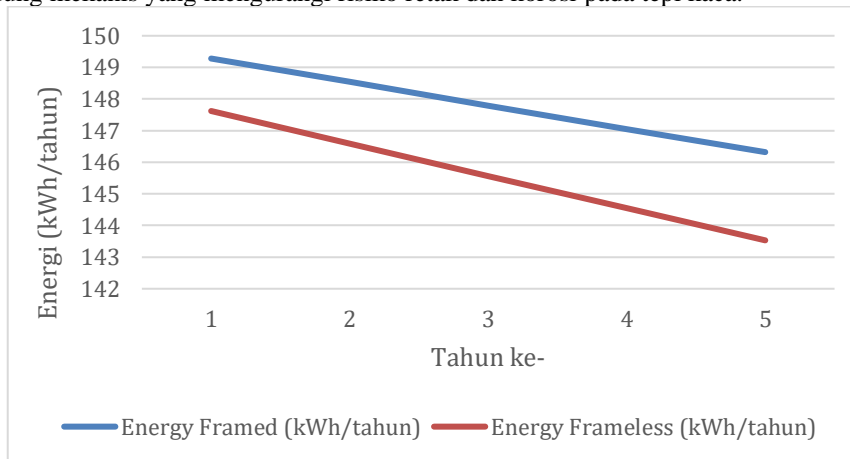
**Gambar 1.** Hubungan antara intensitas radiasi (G) dengan daya output untuk PV frame dan PV Frameless

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara temperatur ambien (20–40 °C) dengan daya keluaran modul pada irradiansi tetap 800 W/m<sup>2</sup>. Kedua jenis modul mengalami penurunan daya secara linear terhadap kenaikan temperatur, sesuai dengan model koreksi suhu yang dikemukakan oleh Skoplaki dan Palyvos (2009). Modul *framed* memiliki laju penurunan sebesar  $-0,43 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ , sedangkan *frameless* mencapai  $-0,47 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ , akibat nilai NOCT yang lebih tinggi. Pada suhu 40 °C, daya keluaran framed turun hingga 87,5 W, sedangkan frameless hanya 85,9 W. Hasil ini mendukung laporan Paudyal (2021) dimana modul silikon kristalin menunjukkan rata-rata penurunan daya 0,45–0,50 % per °C [14].



**Gambar 2.** Hubungan antara temperatur ambien (°C) dengan daya output untuk PV frame dan PV Frameless

Berdasarkan kondisi iklim Yogyakarta (PSH = 4,5 kWh/kWp/hari), diperoleh estimasi energi tahunan 1.596 kWh/kWp/tahun untuk modul *framed* dan 1.560 kWh/kWp/tahun untuk *frameless*. Perbedaan 36 kWh/kWp/tahun ini mencerminkan peningkatan efisiensi sekitar 2,3 % akibat pendinginan pasif oleh frame. Selanjutnya, dengan mempertimbangkan degradasi tahunan sebesar 0,5 % (*framed*) dan 0,7 % (*frameless*), energi kumulatif selama 5 tahun menunjukkan bahwa modul *framed* menghasilkan total 7.777 kWh, sedangkan *frameless* hanya 7.546 kWh yang dapat dilihat pada Gambar 3. Selisih sebesar 231 kWh menunjukkan dampak yang signifikan terhadap kinerja jangka panjang. Selain menurunkan suhu operasi, *frame* juga berfungsi sebagai pelindung mekanis yang mengurangi risiko retak dan korosi pada tepi kaca.



**Gambar 3.** Grafik proyeksi energi tahunan (kWh/tahun) selama 5 tahun untuk PV frame dan PV Frameless

Untuk memvalidasi hasil simulasi, perbandingan hasil penelitian ini dengan beberapa literatur terkait dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Perbandingan hasil penelitian ini dengan beberapa literatur terkait

Penelitian	Metode	Koefisien Suhu Daya ( $\gamma$ )	Selisih Efisiensi /°C	Keterangan
Skoplaki & Palyvos [5]	Model teoritis	-0,0044/°C	0,44%	Model umum NOCT
Hudisteanu [13]	Eksperimen tropis	-0,0051/°C	0,51%	Kondisi tropis
Penelitian ini	Simulasi tropis	-0,0045/°C	0,45%	Iklim Yogyakarta

Dari tabel tersebut terlihat bahwa hasil simulasi sejalan dengan rentang nilai koefisien suhu daya pada berbagai penelitian terdahulu. Ini menunjukkan bahwa model empiris yang digunakan memiliki akurasi yang representatif untuk aplikasi tropis.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbedaan NOCT sebesar 3 °C antara modul *framed* dan *frameless* menyebabkan peningkatan efisiensi tahunan hingga 2–3 %. Secara fisik, *frame* aluminium berfungsi sebagai

jalur konduksi panas pasif dan membantu menjaga kestabilan struktur mekanik modul, terutama saat terpapar angin dan fluktuasi suhu. Desain frame juga memengaruhi aliran udara di bagian belakang panel, sehingga menjadi parameter penting dalam rancangan sistem PV skala atap (*rooftop system*). Dalam konteks aplikasi tropis seperti Indonesia, hasil ini memberikan dasar teknis bahwa pemilihan frame dengan konduktivitas termal tinggi dan ventilasi optimal ( $clearance \geq 10$  cm) dapat meningkatkan performa sistem PV tanpa memerlukan tambahan pendinginan aktif.

## KESIMPULAN

Frame modul fotovoltaik memiliki pengaruh signifikan terhadap performa termal dan efisiensi energi di lingkungan tropis. Modul framed dengan bahan aluminium menghasilkan temperatur sel rata-rata 2–3°C lebih rendah dibandingkan modul *frameless*, sehingga mampu meningkatkan daya keluaran hingga 2,3% dan energi tahunan sebesar 36 kWh/kWp. Dalam proyeksi lima tahun, total energi kumulatif modul framed mencapai 7.777 kWh, lebih tinggi 231 kWh dibandingkan modul *frameless*. Hasil ini menunjukkan bahwa *frame* berfungsi tidak hanya sebagai struktur mekanis, tetapi juga sebagai jalur konduksi panas pasif yang meningkatkan efisiensi sistem dan memperpanjang umur modul PV.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Schmela and R. Rossi, "Advancements in Solar Technology, Markets, and Investments – A Summary of the 2022 ISA World Solar Reports," *Solar compass*, vol. 6, p. 100045, 2023, doi: 10.1016/j.solcom.2023.100045.
- [2] M. Jaxa-Rozen and E. Trutnevite, "Solar futures: a systematic review of long-term global solar photovoltaic adoption scenarios," 2020. doi: 10.5194/EGUSPHERE-EGU2020-18094.
- [3] A. C. Lazaroiu, M. G. Osman, C.-V. Strejoiu, and G. Lazaroiu, "A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality," *Sustainability*, 2023, doi: 10.20944/preprints202310.0605.v1.
- [4] N. Amin, S. A. Shahahmadi, P. Chelvanathan, K. S. Rahman, M. I. Hossain, and Md. Akhtaruzzaman, "Solar Photovoltaic Technologies: From Inception Toward the Most Reliable Energy Resource," 2017, pp. 11–26. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10092-2.
- [5] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614–624, May 2009, doi: 10.1016/j.solener.2008.10.008.
- [6] M. Libra, T. Petrik, V. Poulek, I. I. Tyukhov, and P. Kourim, "Changes in the Efficiency of Photovoltaic Energy Conversion in Temperature Range With Extreme Limits," *IEEE J Photovolt*, vol. 11, no. 6, pp. 1479–1484, 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2021.3108484.
- [7] S. M. Salih, Y. Kh. Jabur, and L. A. Kadhim, "Analysis of Temperature Effect on a Crystalline Silicon Photovoltaic Module Performance," *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, vol. 29, no. 5, pp. 722–727, 2015.
- [8] R. Muhfidin and I.-S. Yu, "Thermal Analysis of PV Module and the Effect on its Efficiency," 2019. doi: 10.1109/IEEECONF48524.2019.9102515.
- [9] S. Saeed, A. Hussain, I. Alam, H. Shahid, M. Anwar, and H. M. Ali, "Photovoltaic Module Efficiency Enhancement System by Novel Cooling Techniques: Effect of Phase Change Material and Fins," *Chemical engineering research & design*, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.06.105.
- [10] S. Thakur, A. Kaisare, and S. Tonapi, "Thermo-mechanical analysis of a typical solar module: A parametric study," 2012, pp. 1255–1263. doi: 10.1109/THERM.2012.6231566.
- [11] H. Ehbing, A. Hoffmann, F. Schauseil, and D. Seidlitz, "Photovoltaic solar module for use in electric energy generating device, has frame made of polyurethane, where frame preset elasticity modulus and specific thermal expansion coefficient, which are measured parallel to module edges," 2008
- [12] A. Tummali, A. J. Beinert, C. Reichel, M. Mittag, and H. Neuhaus, "Holistic design improvement of the PV module frame: Mechanical, optoelectrical, cost, and life cycle analysis," *Prog Photovolt*, vol. 30, no. 8, pp. 1012–1022, 2022, doi: 10.1002/pip.3533.
- [13] V. S. Hudîşteanu, N. C. Cherecheş, F. E. Ţurcanu, I. Hudîşteanu, and C. Romila, "Impact of Temperature on the Efficiency of Monocrystalline and Polycrystalline Photovoltaic Panels: A Comprehensive Experimental Analysis for Sustainable Energy Solutions," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 23, Dec. 2024, doi: 10.3390/su162310566.
- [14] B. R. Paudyal and A. G. Imenes, "Investigation of temperature coefficients of PV modules through field measured data," *Solar Energy*, vol. 224, pp. 425–439, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.013.
- [15] T. A. Olukan and M. Emziane, "A Comparative Analysis of PV Module Temperature Models," *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 694–703, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2014.12.433.