

Pengaruh Suhu Terhadap Kinerja Panel Surya: Literature Review

Teuku Mizan Sya'rani Denk^{1*)}, T. M. Azis Pandria²⁾, Syukri³⁾

¹⁾Progam Studi Instalasi dan Pemeliharaan Jaringan Listrik, Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat
Komplek STTU Alue Peunyareng, Meureubo, Aceh Barat

²⁾Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Teuku Umar
Alue Peunyareng, Meureubo, Aceh Barat

³⁾Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Iskandar Muda
Jl. Kampus Unida, No. 15 Surien, Meuraxa, Banda Aceh

*Corresponding author E-mail: mizan@aknacehbarat.ac.id

ABSTRACT

This review presents a comprehensive study of temperature effects on solar panel performance. Solar panel efficiency is proven to be significantly influenced by operational temperature increases. Previous studies indicate that temperature rise causes a decrease in output voltage and power conversion efficiency, despite a slight increase in current. This review analyzes various thermal parameters that affect solar panel performance, including temperature coefficients, thermal resistance, and cooling methods that can be implemented to overcome the negative effects of high temperatures. Various thermal mitigation techniques are also discussed, including active and passive cooling systems, design modifications, and innovative materials to enhance heat dissipation. The findings of this review can serve as a reference for researchers and practitioners in developing more efficient photovoltaic systems under various climatic conditions.

Keywords: Solar panel, temperature effects, thermal coefficient, photovoltaic efficiency

ABSTRAK

Kajian ini menyajikan studi komprehensif pengaruh suhu terhadap kinerja panel surya. Efisiensi panel surya terbukti dipengaruhi secara signifikan oleh kenaikan suhu operasional. Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan penurunan tegangan keluaran dan efisiensi konversi daya, meskipun terjadi sedikit peningkatan arus. Kajian ini menganalisis berbagai parameter termal yang mempengaruhi performa panel surya, termasuk koefisien suhu, resistansi termal, dan metode pendinginan yang dapat diimplementasikan untuk mengatasi efek negatif suhu tinggi. Berbagai teknik mitigasi termal juga dibahas, termasuk sistem pendinginan aktif dan pasif, modifikasi desain, serta material inovatif untuk meningkatkan disipasi panas. Hasil kajian ini dapat menjadi rujukan bagi peneliti dan praktisi dalam pengembangan sistem fotovoltaik yang lebih efisien pada berbagai kondisi iklim.

Kata Kunci: Panel surya, efek suhu, koefisien termal, efisiensi fotovoltaik

I. PENDAHULUAN

Energi surya telah menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang paling cepat berkembang dalam dekade terakhir [1]. Dengan peningkatan kesadaran akan dampak negatif dari penggunaan bahan bakar fosil dan kebutuhan akan sumber energi yang berkelanjutan, penelitian dalam teknologi panel surya telah mengalami kemajuan yang signifikan [2]. Panel surya atau modul fotovoltaik mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Namun, efisiensi konversi energi ini dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, dengan suhu menjadi salah satu parameter yang paling kritis [3].

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa kinerja panel surya mengalami penurunan seiring dengan peningkatan suhu operasional [4][5]. Suhu mempengaruhi

parameter kelistrikan sel surya, termasuk tegangan rangkaian terbuka Voc, arus hubung singkat Isc, faktor pengisian (FF), dan efisiensi konversi daya [6][7]. Fenomena ini sangat penting untuk dipahami karena panel surya biasanya beroperasi pada suhu yang jauh lebih tinggi daripada suhu standar pengujian sebesar 25°C, terutama pada daerah dengan iradiasi matahari tinggi [8].

Artikel ini bertujuan untuk memberikan tinjauan komprehensif tentang bagaimana suhu mempengaruhi kinerja panel surya berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu. Kajian ini mencakup mekanisme dasar bagaimana suhu mempengaruhi parameter kelistrikan panel surya, metode untuk mengkarakterisasi pengaruh suhu, serta berbagai pendekatan yang telah dikembangkan untuk mengurangi dampak negatif suhu tinggi pada efisiensi panel surya.

A. Mekanisme Pengaruh Suhu pada Kinerja Panel Surya

Secara fisika, efek suhu pada kinerja panel surya dapat dijelaskan melalui prinsip fisika semikonduktor. Panel surya terbuat dari material semikonduktor, umumnya silikon, yang memiliki sensitivitas terhadap perubahan suhu [9]. Peningkatan suhu menyebabkan peningkatan energi termal pada atom-atom dalam kristal semikonduktor, yang mengakibatkan peningkatan jarak antar atom dan melemahnya ikatan atom [10]. Dubey et al. [11] menjelaskan bahwa peningkatan suhu menyebabkan pelebaran celah pita energi (band gap) pada material semikonduktor, yang berpengaruh langsung pada tegangan rangkaian terbuka Voc. Sebaliknya, arus hubung singkat Isc sedikit meningkat dengan kenaikan suhu karena peningkatan jumlah pembawa muatan yang dihasilkan secara termal. Namun, peningkatan arus ini tidak sebanding dengan penurunan tegangan, sehingga daya keluaran keseluruhan mengalami penurunan [12]. Menurut Skoplaki dan Palyvos [13], hubungan antara efisiensi sel surya (η) dan suhu sel T_c dapat dinyatakan dengan Persamaan (1).

$$\eta = \eta_{ref} [1 - \beta (T_c - T_{ref})] \quad (1)$$

di mana η : adalah efisiensi panel surya pada suhu sel T_c , η_{ref} : efisiensi referensi (biasanya 25°C), β adalah koefisien suhu efisiensi (dalam °C-1), T_c adalah sel temperatur dalam °C, T_{ref} : adalah suhu referensi (biasanya 25°C).

Parameter kelistrikan yang dipengaruhi suhu terlihat seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Radziemska [14] menunjukkan bahwa tegangan rangkaian terbuka V_{oc} mengalami penurunan linear dengan peningkatan suhu dengan tingkat sekitar -2.3 mV/°C untuk sel surya silikon kristal. Sebaliknya, arus hubung singkat I_{sc} meningkat sedikit dengan tingkat sekitar 0.05%/°C. Kawamura et al. [15] mengamati bahwa faktor pengisian (FF) juga menurun dengan peningkatan suhu karena perubahan resistansi seri dan paralel dalam sel surya. Kombinasi dari perubahan-perubahan ini menghasilkan penurunan efisiensi konversi daya sebesar 0.4-0.5% per kenaikan suhu 1°C untuk panel surya berbasis silikon kristal [16]. Koefisien suhu tipikal untuk berbagai jenis panel surya berdasarkan penelitian Singh dan Ravindra [17] ditampilkan pada Tabel 1.

TABEL 1. KOEFISIEN SUHU TIPIKAL UNTUK BERBAGAI TEKNOLOGI PANEL SURYA

Teknologi Panel Surya	Koefisien Suhu	Koefisien Suhu	Koefisien Suhu Daya
	Voc (%/°C)	Isc (%/°C)	(%/°C)
Silikon Monokristal	-0.37 hingga -0.52	0.03 hingga 0.07	-0.41 hingga -0.50
Silikon Polikristal	-0.35 hingga -0.47	0.04 hingga 0.09	-0.40 hingga -0.47
Silikon Amorf	-0.20 hingga -0.30	0.08 hingga 0.12	-0.21 hingga -0.25
CdTe	-0.25 hingga -0.35	0.02 hingga 0.04	-0.25 hingga -0.29
CIGS	-0.30 hingga -0.36	0.03 hingga 0.05	-0.30 hingga -0.36
Perovskite	-0.11 hingga -0.15	0.05 hingga 0.08	-0.10 hingga -0.15

B. Pemodelan dan Karakterisasi Efek Suhu

Untuk melakukan prediksi suhu panel surya dapat dilakukan dengan pemodelan karakteristik suhu. Prediksi ini dapat dimodelkan secara matematis. Berbagai model

matematis telah dikembangkan untuk memprediksi suhu operasional panel surya berdasarkan parameter lingkungan. Model yang paling sederhana dan umum digunakan adalah model *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT) yang diusulkan oleh Ross [18]:

$$T_c = T_a + (NOCT - 20) \times \frac{G}{800} \quad (2)$$

dimana T_c adalah suhu sel (°C), T_a adalah suhu lingkungan (*ambient temperature*) dalam °C, $NOCT$ adalah suhu sel pada kondisi operasi nominal, dan G adalah iradiasi matahari (W/m²). Koehl et al. [19] mengembangkan model yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan faktor kecepatan angin:

$$T_c = T_a + G \times \left(\frac{\alpha}{hc} \right) \quad (3)$$

di mana α adalah absorptivitas panel dan hc adalah koefisien transfer panas konvektif yang dipengaruhi oleh kecepatan angin. Model yang lebih baru oleh Faiman [20] menggabungkan efek konveksi dan radiasi:

$$T_c = T_a + \frac{G}{U_0 + U_1 \times v} \quad (4)$$

di mana U_0 dan U_1 adalah koefisien transfer panas, dan v adalah kecepatan angin.

Selain pemodelan matematis, karakteristik juga dapat dilakukan secara eksperimental. Zondag [21] telah meninjau berbagai metode eksperimental untuk mengkarakterisasi pengaruh suhu pada kinerja panel surya. Metode *indoor* biasanya menggunakan simulator surya dengan kontrol suhu, sedangkan metode *outdoor* melibatkan pengukuran pada kondisi alami dengan variasi suhu ambient dan iradiasi. Metode elektroluminesensi dan termografi inframerah telah digunakan oleh Hishikawa et al. [22] untuk mengidentifikasi distribusi suhu pada permukaan panel dan ketidakseragaman termal yang dapat mempengaruhi kinerja. Köntges et al. [23] mengembangkan teknik pengukuran dengan resolusi tinggi untuk mengkarakterisasi koefisien suhu dari parameter kelistrikan individual pada sel surya, yang memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme yang mendasari efek suhu.

II. METODE

Beberapa metode telah digunakan dalam usaha mitigasi pengaruh suhu panel surya yang digunakan oleh beberapa peneliti terdahulu.

A. Metode Mitigasi Efek Suhu

Terdapat beberapa metode pendinginan, pertama adalah teknik pendinginan pasif yang memanfaatkan fenomena alami seperti konveksi, konduksi, dan radiasi tanpa memerlukan input energi tambahan. Chandrasekar et al. [24] mengkaji berbagai teknik pendinginan pasif, termasuk penggunaan sirip pendingin (*heat sink*), material berubah fase (PCM), dan lapisan reflektif. Penelitian oleh Huang et al. [25] menunjukkan bahwa penggunaan sirip pendingin aluminium dapat menurunkan suhu operasional panel surya hingga 10°C dan meningkatkan efisiensi sebesar 5%. Sementara itu, Hasan et al. [26] menunjukkan bahwa material berubah fase seperti parafin dapat menurunkan suhu panel hingga 20°C dengan menyerap panas laten selama proses perubahan fase. Lapisan reflektif dan selektif spektral yang dikembangkan oleh Atkinson et al. [27] dapat

mengurangi penyerapan panas inframerah sambil mempertahankan penyerapan cahaya tampak, sehingga mengurangi pemanasan panel tanpa mengurangi produksi listrik.

Selain pendinginan pasif sebagaimana yang telah dijelaskan, terdapat model pendinginan lainnya seperti sistem pendinginan aktif. Jenis pendinginan ini melibatkan penggunaan energi tambahan untuk mengurangi suhu panel surya. Abdolzadeh dan Ameri [28] meneliti sistem pendinginan air, di mana air disemprotkan atau dialirkan pada permukaan panel surya. Sistem ini dapat menurunkan suhu hingga 30°C dan meningkatkan efisiensi sebesar 10-15%, meskipun memerlukan energi untuk pompa dan suplai air. Pendinginan termoelektrik yang diteliti oleh Najafi dan Woodbury [29] menggunakan efek Peltier untuk mendinginkan panel surya. Meskipun efektif dalam menurunkan suhu, sistem ini membutuhkan energi listrik yang relatif tinggi. Bahaidarah et al. [30] mengembangkan sistem pendinginan aktif berbasis udara yang menggunakan kipas untuk meningkatkan aliran udara di belakang panel. Sistem ini menunjukkan peningkatan efisiensi sebesar 4-5% dengan konsumsi energi yang relatif rendah.

Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, dapat dilakukan penggabungan sistem pendinginan panel surya dengan sistem lain. Dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dan secara bersamaan mendinginkan panel. Sistem fotovoltai-termal (PV/T) yang diteliti oleh Zondag et al. [31] mengintegrasikan panel surya dengan kolektor termal, sehingga panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk aplikasi seperti pemanas air atau udara.

Chow et al. [32] menunjukkan bahwa sistem PV/T dapat mencapai efisiensi total hingga 70%, dengan 15% efisiensi listrik dan 55% efisiensi termal. Selain itu, Krauter [33] mengusulkan sistem terintegrasi dengan desalinasi air, di mana panas dari panel digunakan untuk menguapkan air laut.

B. Perkembangan Material dan Desain untuk Mitigasi Efek Suhu

Pengembangan material dan desain untuk mitigasi pengaruh suhu terhadap panel surya telah banyak dilakukan, termasuk pada pengembangan material semikonduktor dengan koefisien suhu rendah.

Penelitian dalam pengembangan material fotovoltai baru telah menghasilkan beberapa terobosan dalam mengurangi sensitivitas termal. Singh et al. [34] menunjukkan bahwa sel surya tandem multi-junction memiliki koefisien suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan sel surya silikon konvensional.

Teknologi perovskite yang diteliti oleh Emery et al. [35] menunjukkan koefisien suhu daya sekitar -0.11%/°C, jauh lebih baik dibandingkan dengan silikon kristal yang memiliki koefisien sekitar -0.45%/°C. Namun, masalah stabilitas dan durabilitas masih menjadi tantangan untuk adopsi yang lebih luas.

Selain itu dikembangkan juga inovasi pada desain panel surya. Inovasi dalam desain panel surya juga berkontribusi pada mitigasi efek suhu. Micheli et al. [36] mengembangkan desain panel dengan jarak yang lebih baik antara sel dan bagian belakang panel untuk meningkatkan aliran udara dan mengurangi suhu operasional.

Struktur bifacial yang diteliti oleh Guerrero-Lemus et al. [37] memungkinkan iradiasi dan pendinginan dari kedua sisi panel, sehingga mengurangi akumulasi panas dan meningkatkan produksi listrik.

Norton et al. [38] mengusulkan integrasi kanal mikro dalam substrat panel untuk meningkatkan disipasi panas, menunjukkan penurunan suhu hingga 15°C dan peningkatan efisiensi sebesar 7%.

Pengembangan lainnya yang telah dilakukan adalah pengembangan nanoteknologi sebagai usaha manajemen termal. Aplikasi nanoteknologi dalam manajemen termal panel surya telah menjadi area penelitian yang menjanjikan. Nanofluid sebagai media pendingin yang diteliti oleh Sardarabadi et al. [39] menunjukkan peningkatan transfer panas sebesar 25% dibandingkan dengan air biasa.

Lapisan nano-selektif spektral yang dikembangkan oleh Wang et al. [40] dapat memodifikasi respons optik permukaan panel untuk mengurangi penyerapan panas inframerah sambil mempertahankan absorpsi cahaya tampak. Nanokomposit dengan konduktivitas termal tinggi yang diteliti oleh Han et al. [41] sebagai bahan encapsulant menunjukkan peningkatan disipasi panas sebesar 30% dibandingkan dengan encapsulant konvensional.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Evaluasi Ekonomi dan Lingkungan dari Teknik Mitigasi Suhu

Evaluasi ekonomi dari berbagai teknik mitigasi suhu penting untuk implementasi praktis. Moharram et al. [42] melakukan analisis biaya-manfaat dari sistem pendinginan aktif dan pasif, menunjukkan bahwa pendinginan pasif umumnya memiliki periode pengembalian modal yang lebih singkat (1-3 tahun) dibandingkan dengan sistem aktif (3-7 tahun). Penelitian oleh Hosseini et al. [43] menunjukkan bahwa teknik pendinginan pasif seperti sirip pendingin dan material berubah fase dapat meningkatkan nilai bersih sekarang (NPV) dari sistem fotovoltai sebesar 8-12% selama masa pakai 25 tahun.

Terkait dengan implikasi lingkungan, Lamnatou dan Chemisana [44] melakukan analisis siklus hidup (LCA) dari berbagai teknik pendinginan panel surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik pendinginan pasif memiliki dampak lingkungan yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem aktif.

Penggunaan air dalam sistem pendinginan dapat menjadi masalah di daerah dengan kelangkaan air. Penelitian oleh Akbarzadeh dan Wadowski [45] mengusulkan sistem pendinginan tertutup dan daur ulang air untuk mengurangi konsumsi air hingga 95%.

B. Aplikasi dan Studi Kasus

Pengaruh suhu pada kinerja panel surya bervariasi di berbagai kondisi iklim. Dubey dan Tiwari [46] membandingkan kinerja panel surya di iklim tropis, gurun, dan sedang, menunjukkan bahwa penurunan efisiensi karena efek suhu bisa mencapai 20% di daerah gurun dengan suhu tinggi. Huld et al. [47] melakukan studi di berbagai lokasi di Eropa, menunjukkan bahwa wilayah selatan dengan iradiasi tinggi mengalami penurunan efisiensi yang lebih signifikan akibat suhu tinggi dibandingkan dengan wilayah utara yang lebih dingin.

Beberapa studi kasus terhadap pembangkit listrik tenaga surya khususnya skala besar diberbagai belahan dunia telah diteliti guna melihat tantangan dari pengaruh suhu yang timbul. Pembangkit listrik tenaga surya skala besar menghadapi tantangan khusus terkait dengan efek suhu. Alagar et al. [48] meneliti pembangkit 5 MW di India, menunjukkan bahwa fluktuasi suhu menyebabkan variasi output harian sebesar 15-20%. Kurtz et al. [49] melakukan studi jangka panjang pada beberapa pembangkit di Amerika Serikat dan menyimpulkan bahwa degradasi kinerja akibat suhu tinggi berkontribusi sekitar 0.8-1% penurunan efisiensi per tahun.

Sistem fotovoltaiik terintegrasi bangunan (BIPV) menghadapi tantangan khusus terkait dengan peningkatan suhu karena ventilasi yang terbatas. Penelitian oleh Peng et al. [50] menunjukkan bahwa panel BIPV dapat mencapai suhu 15-20°C lebih tinggi dibandingkan dengan panel yang dipasang secara konvensional.

Strategi pendinginan inovatif untuk BIPV telah diteliti oleh Yin et al. [51], termasuk integrasi dengan sistem HVAC bangunan dan penggunaan material berubah fase dalam struktur bangunan untuk manajemen termal.

IV. KESIMPULAN

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu operasional menyebabkan penurunan signifikan efisiensi panel surya, terutama melalui pengurangan tegangan keluaran. Untuk mengatasi masalah ini, penelitian masa depan perlu fokus pada pengembangan material fotovoltaiik dengan koefisien suhu rendah, teknik pendinginan yang efisien, dan pemanfaatan nanoteknologi serta material cerdas untuk pengelolaan termal yang lebih baik. Integrasi sistem PV/T hibrid yang memanfaatkan panas yang dihasilkan juga menjanjikan, namun perlu didukung evaluasi ekonomi dan lingkungan yang komprehensif. Dengan meningkatnya instalasi panel surya di berbagai kondisi iklim global, pemahaman yang lebih baik tentang perilaku termal dan pengembangan strategi mitigasi yang efektif akan berkontribusi signifikan pada optimalisasi kinerja sistem fotovoltaiik dan percepatan transisi energi.

REFERENSI

- [1] International Energy Agency, "Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028," IEA, Paris, 2023.
- [2] REN21, "Renewables 2024 Global Status Report," REN21 Secretariat, Paris, 2024.
- [3] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Sol. Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614–624, 2009.
- [4] D. L. King, J. A. Kratochvil, and W. E. Boyson, "Temperature coefficients for PV modules and arrays: Measurement methods, difficulties, and results," in *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, 1997, pp. 1183–1186.
- [5] B. Ranga Julian, Muliadi, dan Syukri, "Analisis Pengaruh Radiasi Matahari Dan Temperatur Terhadap Daya Keluaran Fotovoltaiik Menggunakan SPSS," *Aceh Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 14–18, 2023.
- [6] D. Putra, N. S. Kamil, and A. Asliffatthi, "Performance degradation of photovoltaic modules due to temperature impact: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 153, p. 111771, 2022.
- [7] T. Nordmann and L. Clavdetscher, "Understanding temperature effects on PV system performance," in *Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Convers.*, 2003, pp. 2243–2246.
- [8] M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier, and J. Wirth, "Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 7, pp. 1638–1646, 2011.
- [9] P. Singh and N. M. Ravindra, "Temperature dependence of solar cell performance—an analysis," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 101, pp. 36–45, 2012.
- [10] D. H. Neuhaus and A. Münzer, "Industrial silicon wafer solar cells," *Adv. Optoelectron.*, vol. 2007, p. 24521, 2007.
- [11] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri, "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—A review," *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311–321, 2013.
- [12] J. Kaldellis, M. Kapsali, and K. Kavadias, "Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece," *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 612–624, 2014.
- [13] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 23–29, 2009.
- [14] E. Radziemska, "The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells," *Renew. Energy*, vol. 28, no. 1, pp. 11–12, 2003.
- [15] T. Kawamura, K. Harada, Y. Ishihara, S. Todaka, T. Oshiro, H. Nakamura, and M. Imataki, "Analysis of NOCT under various meteorological conditions," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 47, pp. 289–293, 1997.
- [16] T. Ishii, K. Otani, T. Itakushima, and Y. Xue, "Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 21, no. 4, pp. 4811–489, 2013.
- [17] P. Singh and N. M. Ravindra, "Temperature coefficients of solar cell parameters," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 101, pp. 36–45, 2012.
- [18] R. G. Ross, "Interface design considerations for terrestrial solar cell modules," in *Proc. 12th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, 1976, pp. 801–806.
- [19] M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier, and J. Wirth, "Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 7, pp. 1638–1646, 2011.
- [20] D. Faiman, "Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 16, no. 4, pp. 307–315, 2008.
- [21] H. A. Zondag, "Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 4, pp. 891–959, 2008.
- [22] Y. Hishikawa, H. Ishimura, T. Ueda, A. Sasaki, and Y. Ishii, "Precise performance characterization of perovskite solar cells," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 16, no. 8, pp. 898–904, 2016.
- [23] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, I. U. Jahn, K. A. Berger, and K. Kato, "Performance and reliability of photovoltaic systems," IEA-PVPS Task 13, Subtask 3.2, Report IEA-PVPS T13-01:2014, 2014.
- [24] M. Chandrasekar, S. Rajkumar, and I. D. Valavan, "A review on the thermal regulation techniques for non-integrated flat PV modules mounted on building top," *Energy Build.*, vol. 86, pp. 692–697, 2015.
- [25] M. J. Huang, P. C. Eames, and B. Norton, "Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 12–13, pp. 2715–2733, 2004.
- [26] A. Hasan, S. J. McCormack, I. M. J. Huang, and B. Norton, "Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 9, pp. 1601–1612, 2010.
- [27] C. Atkinson, C. L. Sansom, H. J. Almond, and C. P. Shaw, "Coatings for concentrating solar systems—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 113–122, 2015.
- [28] M. Abdolzadeh and M. Ameri, "Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 91–96, 2009.
- [29] H. Najafi and K. A. Woodbury, "Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells," *Sol. Energy*, vol. 91, pp. 1152–160, 2013.
- [30] H. M. S. Bahaidarah, A. A. B. Baloch, and P. Gandhidasan, "Uniform cooling of photovoltaic panels: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1520–1544, 2016.
- [31] H. A. Zondag, D. W. de Vries, W. G. J. van Helden, R. J. C. van Zolingen, and A. A. Ivan Steenhoven, "The yield of different combined PV-thermal collector designs," *Sol. Energy*, vol. 74, no. 3, pp. 253–269, 2003.
- [32] T. T. Chow, W. He, and J. Ji, "Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application," *Sol. Energy*, vol. 80, no. 3, pp. 298–306, 2006.
- [33] S. Krauter, "Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 82, no. 1–2, pp. 131–137, 2004.
- [34] P. Singh, S. N. Singh, M. Lal, and M. Husain, "Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no. 12, pp. 1611–1616, 2008.
- [35] K. Emery, J. Burdick, Y. Caiyem, D. Dunlavy, H. Field, B. Kroposki, T. Moriarty, L. Ottosen, S. Rummel, I. T. Strand, and M. W. Wanlass, "Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems," in *Proc. 25th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, 1996, pp. 1275–1278.
- [36] L. Micheli, N. Sarmah, X. Luo, K. S. Reddy, and T. K. Mallick, "Opportunities and challenges in micro- and nano-technologies for concentrating photovoltaic cooling: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 595–610, 2013.
- [37] R. Guerrero-Iemus, R. Vega, T. Kim, A. Kimm, and L. E. Shephard, "Bifacial solar photovoltaics—A technology review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1533–1549, 2016.

- [38] B. Norton, P. C. Eames, T. K. Mallick, M. J. Huang, S. J. McCormack, J. D. Mondol, and Y. G. Yohanis, "Enhancing the performance of building integrated photovoltaics," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1629–1664, 2011.
- [39] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, and S. Zeinali Heris, "Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/TI (photovoltaic thermal units)," *Energy*, vol. 66, pp. 264–272, 2014.
- [40] X. Wang, L. Xu, C. Leng, and X. Zhang, "Nanofluids for direct absorption solar collectors: Development and application," *Energy Convers. Manag.*, vol. 103, pp. 266–277, 2015.
- [41] X. Han, Y. Wang, and L. Zhu, "Electrical and thermal performance of silicon concentrator solar cells immersed in dielectric liquids," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4481–4489, 2011.
- [42] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, and H. I. El-Sherif, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 869–877, 2013.
- [43] R. Hosseini, N. Hosseini, and H. Khorasanizadeh, "An experimental study of combining a photovoltaic system with a heating system," in *IProc. World Renew. Energy Congr.*, 2011, pp. 2993–3000.
- [44] C. Lamnatou and D. Chemisana, "Photovoltaic/thermal (PVT) systems: A review with emphasis on environmental issues," *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 270–287, 2017.
- [45] A. Akbarzadeh and T. Wadowski, "Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 81–87, 1996.
- [46] S. Dubey and G. N. Tiwari, "Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater," *Sol. Energy*, vol. 82, no. 7, pp. 602–612, 2008.
- [47] T. Huld, R. Gottschalg, H. G. Beyer, and M. Topić, "Mapping the performance of IPV modules, effects of module type and data averaging," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 2, pp. 324–338, 2010.
- [48] G. Alagar, U. Arunachalam, M. Umashankar, and A. Subramani, "Effect of temperature on power output of a large-scale grid-connected solar photovoltaic power plant in South India," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2020, Article ID 6465420, 2020.
- [49] S. Kurtz, J. Newmiller, T. Dierauf, A. Kimber, J. Ransome, and J. Stein, "Analysis of photovoltaic system energy performance evaluation method," *IEA-PVPS Task 13, Report IEA-PVPS T13-02:2015*, 2015.
- [50] C. Peng, Y. Huang, and Z. I. Wu, "Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China," *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3592–3598, 2011.
- [51] H. Q. S. Yin, M. J. Huang, M. K. Chyu, Z. Ye, and Y. Chen, "Recent research and applications of phase change materials in building integrated photovoltaic-thermal systems," *Energy Build.*, vol. 251, p. 111353, 2021.