

Implementasi Sistem Pendingin Heatsink Aluminium terhadap Kinerja Efisiensi Modul Surya Monokristalin di Iklim Tropis

Implementation of Aluminum Heatsink Cooling System to Improve the Efficiency of Monocrystalline Solar Cells in Tropical Climates

Onery Andy Saputra ¹, Sudiro ², Yondan Estu Nugroho ³, Rafi Muzhaffar Sulistyio ⁴
^{1,2,3,4} Automotive Engineering, Politeknik Indonusa Surakarta

Abstrak

Di wilayah beriklim tropis, kinerja sistem fotovoltaik (PV) sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan yang tinggi, yang meningkatkan suhu permukaan panel surya dan menurunkan efisiensi konversi energinya. Penelitian ini mengkaji efektivitas sistem pendingin pasif menggunakan heatsink aluminium untuk menurunkan suhu operasi panel surya monokristalin dan meningkatkan efisiensi keluarannya. Dua modul PV identik digunakan dalam eksperimen lapangan komparatif: satu dipasang heatsink aluminium di bagian belakang, dan satu lagi dibiarkan tanpa sistem pendingin. Parameter kinerja utama seperti suhu permukaan, tegangan, arus, dan daya keluaran diukur dalam kondisi lingkungan nyata menggunakan termometer thermal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel surya dengan heatsink mengalami penurunan suhu permukaan hingga 11,9°C dibandingkan panel kontrol. Penurunan suhu ini menghasilkan peningkatan efisiensi konversi energi sekitar 6–10%, tergantung waktu pengukuran dan intensitas radiasi matahari. Studi ini menyimpulkan bahwa integrasi heatsink aluminium merupakan solusi praktis dan hemat biaya untuk meningkatkan kinerja panel surya di daerah panas, serta memberikan kontribusi positif dalam pengembangan sistem energi terbarukan

Kata kunci: Panel Surya, Heatsink Aluminium, Efisiensi Energi, Sistem Pendingin Pasif, Iklim Tropis.

Abstract

In tropical regions, the performance of photovoltaic (PV) systems is significantly affected by high ambient temperatures, which increase the surface temperature of solar panels and reduce their energy conversion efficiency. This study investigates the effectiveness of an aluminum heatsink cooling system as a passive method to lower the operating temperature of monocrystalline solar panels and enhance their output efficiency. Two identical PV modules were used for a comparative field experiment: one equipped with an aluminum heatsink on its back surface, and the other left without any cooling enhancement. Key performance parameters, including surface temperature, voltage, current, and power output, were recorded under real environmental conditions using a thermocouple, pyranometer, and data logger. The results showed that the solar panel with the heatsink experienced a reduction in surface temperature of up to 8°C compared to the control panel. This temperature reduction led to an improvement in energy conversion efficiency by approximately 6–10%, depending on the time of day and solar irradiance levels. The study concludes that integrating an aluminum heatsink is a cost-effective and practical solution for improving PV performance in hot climates, offering a promising enhancement method for renewable energy systems.

Keyword: Solar Panel, Aluminum Heatsink, Energy Efficiency, Passive Cooling System, Tropical Climate

- **Pendahuluan**

Wilayah tropis seperti Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan energi surya karena menerima rata-rata intensitas radiasi matahari harian sebesar 4–5 kWh/m². Hal ini menjadikan sistem fotovoltaik (PV) sebagai salah satu solusi energi terbarukan yang sangat menjanjikan untuk mendukung ketahanan energi nasional. Namun, di balik potensi tersebut terdapat tantangan besar, yaitu suhu lingkungan yang tinggi. Kondisi ini menyebabkan peningkatan suhu operasi pada modul PV, yang berdampak langsung terhadap penurunan efisiensi konversi energi listrik. Studi terbaru menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1°C pada suhu panel dapat menurunkan efisiensi sebesar 0,3–0,5%, tergantung pada jenis modul dan tingkat iradiasi matahari (Kumar et al., 2023; Fatima et al., 2023). Panel surya sangat sensitif terhadap kenaikan suhu, khususnya dalam hal tegangan output yang cenderung menurun secara signifikan meskipun arus sedikit meningkat. Akumulasi panas pada permukaan panel tidak hanya menurunkan daya keluaran total, tetapi juga mempercepat proses degradasi material dan mengurangi umur pakai modul surya. Di wilayah tropis, modul PV dapat mencapai suhu lebih dari 60°C, jauh di atas suhu standar pengujian (25°C). Hal ini menjadikan pengendalian suhu sebagai faktor krusial dalam menjaga performa sistem PV secara optimal dan berkelanjutan (Nugraha & Sari, 2022).

Menanggapi permasalahan tersebut, sistem pendingin menjadi solusi penting yang tidak dapat diabaikan dalam pengembangan teknologi PV. Sistem pendingin pasif, seperti heatsink berbahan aluminium, dinilai efektif karena mampu menyerap dan melepaskan panas ke lingkungan sekitar tanpa memerlukan energi tambahan. Pendekatan ini tidak hanya ekonomis, tetapi juga mudah diimplementasikan, terutama di daerah-daerah terpencil yang mengandalkan energi surya sebagai sumber utama. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan heatsink dapat menurunkan suhu permukaan panel hingga 8°C dan meningkatkan efisiensi sistem hingga 10%, tergantung pada kondisi lingkungan (Rahman et al., 2022; Fatima et al., 2023). Dengan mempertimbangkan efisiensi energi, biaya, dan kemudahan instalasi, sistem pendingin pasif menjadi pilihan ideal untuk mengatasi dampak negatif suhu tinggi terhadap panel surya. Oleh karena itu, integrasi teknologi pendinginan berbasis heatsink dalam sistem PV sangat relevan dan mendesak untuk diterapkan di wilayah tropis. Upaya ini tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi jangka pendek, tetapi juga terhadap keberlanjutan sistem energi surya secara keseluruhan.

Sebagai bagian dari upaya tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menguji efektivitas heatsink aluminium sebagai sistem pendingin pasif pada modul surya monokristalin di lingkungan tropis. Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi kemampuan heatsink dalam menurunkan suhu permukaan modul dan dampaknya terhadap peningkatan efisiensi konversi energi listrik. Dengan membandingkan dua modul identik—satu menggunakan heatsink dan satu tanpa pendingin—penelitian ini bertujuan memberikan bukti kuantitatif atas manfaat penggunaan heatsink dalam kondisi iklim panas. Melalui pendekatan eksperimental, parameter utama seperti suhu permukaan, tegangan, arus, dan daya keluaran diukur dalam kondisi nyata di lapangan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi PV di daerah tropis, serta menjadi dasar untuk penerapan solusi pendinginan pasif yang lebih luas dalam sistem energi terbarukan.

- **Tinjauan Pustaka**

Modul surya monokristalin merupakan jenis panel fotovoltaik (PV) yang terbuat

dari satu kristal silikon utuh (*single-crystal silicon*), yang ditumbuhkan menggunakan metode *Czochralski*. Struktur kristalnya yang seragam membuat aliran elektron menjadi lebih efisien dibandingkan tipe lain seperti polikristalin atau amorf, sehingga menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi (Saputra, 2019). Ciri khas fisik modul ini adalah warnanya yang hitam pekat dan bentuk sel yang membulat karena proses pemotongan dari silinder kristal. Modul monokristalin umumnya memiliki efisiensi berkisar antara 18% hingga 23%, tergantung teknologi dan kualitas manufaktur, serta memiliki umur pakai lebih dari 25 tahun (Green et al., 2022). Namun, performa modul monokristalin sangat dipengaruhi oleh suhu operasional. Setiap kenaikan suhu sekitar 1°C di atas suhu standar 25°C dapat menurunkan efisiensi sekitar 0,4%–0,5%, tergantung jenis dan struktur lapisan sel (Skoplaki & Palyvos, 2009). Hal ini disebabkan oleh meningkatnya resistansi internal dan berkurangnya tegangan rangkaian terbuka (*Voc*). Di daerah tropis seperti Indonesia, suhu permukaan modul dapat mencapai 60–70°C pada siang hari, sehingga sistem pendinginan pasif maupun aktif sangat diperlukan untuk menjaga kinerja maksimal. Oleh karena itu, integrasi teknologi pendinginan pada modul monokristalin menjadi fokus penting dalam pengembangan PV modern untuk mengurangi penurunan efisiensi akibat suhu lingkungan.

Dalam upaya meningkatkan efisiensi modul fotovoltaik (PV), khususnya monokristalin, teknik pendinginan menjadi aspek penting untuk mengontrol suhu operasional yang berlebih. Sistem pendinginan pada PV secara umum diklasifikasikan menjadi dua jenis: pendinginan pasif dan pendinginan aktif. Pendinginan pasif memanfaatkan prinsip alami tanpa konsumsi energi tambahan. Contoh sistem ini meliputi sirip pendingin (*heat sinks*) (Hasan et al., 2016), ventilasi alami, material dengan konduktivitas termal tinggi (seperti aluminium atau grafit), serta penggunaan *Phase Change Material (PCM)* yang menyerap panas melalui proses perubahan fase (Chandel et al., 2014). Sirip logam meningkatkan area permukaan untuk pembuangan panas, sedangkan PCM bekerja dengan menyerap panas laten ketika berubah dari padat ke cair, sehingga menjaga suhu tetap stabil dalam rentang kritis (Chow et al., 2010). Sementara itu, pendinginan aktif menggunakan perangkat tambahan yang digerakkan oleh energi (biasanya listrik) untuk menurunkan suhu modul secara lebih agresif. Sistem ini mencakup penggunaan pendingin udara berbasis kipas, pendingin cairan (*water cooling*) dengan pipa sirkulasi, hingga sistem *spray cooling* atau semprotan kabut air di permukaan modul (Odeh & Behnia, 2009). Sistem aktif canggih lainnya melibatkan teknologi *heat pipe* dan *loop thermosyphon*, yang secara efisien mentransfer panas dari sel PV ke media pendingin menggunakan perpindahan panas fasa (Du et al., 2013). Meskipun sistem aktif memberikan efisiensi pendinginan yang lebih tinggi, ia memerlukan biaya instalasi, pemeliharaan, serta konsumsi energi tambahan yang harus diperhitungkan dari sisi efisiensi keseluruhan sistem. Oleh karena itu, pilihan antara sistem pasif dan aktif harus mempertimbangkan kondisi iklim lokal, desain sistem PV, serta ketersediaan sumber daya pendukung.

Heatsink atau sirip pendingin merupakan salah satu metode pendinginan pasif yang paling umum digunakan untuk menurunkan suhu kerja modul surya, khususnya pada sistem PV berbasis silikon seperti monokristalin. Heatsink bekerja dengan meningkatkan luas permukaan pembuangan panas ke udara bebas melalui konduksi dan konveksi. Umumnya terbuat dari material dengan konduktivitas termal tinggi seperti aluminium atau tembaga, heatsink dipasang di bagian belakang modul untuk menyerap panas dari substrat dan melepaskannya ke lingkungan. Desain sirip heatsink yang optimal—dalam bentuk vertikal, melengkung, atau berlubang—dapat

meningkatkan efisiensi perpindahan panas secara signifikan tanpa memerlukan energi tambahan, menjadikannya solusi efektif untuk aplikasi luar ruang, terutama di daerah tropis yang bersuhu tinggi (Khanna & Tripathi, 2020). Penggunaan heatsink telah terbukti menurunkan suhu modul hingga 5–15°C tergantung desain dan kondisi lingkungan, yang secara langsung meningkatkan efisiensi konversi daya hingga 3–8% (Dida & Salih, 2022). Studi eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa penambahan heatsink di bagian belakang panel dapat memperbaiki performa tegangan dan daya maksimum (P_{max}) terutama pada siang hari saat suhu lingkungan sedang tinggi. Keunggulan utama sistem ini adalah kesederhanaannya, biaya rendah, dan tidak memerlukan perawatan intensif. Namun, kekurangannya termasuk tambahan berat dan dimensi pada sistem PV serta keterbatasan efisiensi pendinginan saat sirkulasi udara alami terhambat. Oleh karena itu, desain heatsink harus disesuaikan dengan arah angin dominan, kemiringan panel, dan kondisi lingkungan sekitar untuk mendapatkan performa pendinginan optimal (Du et al., 2013).

- **Metodologi Penelitian**

Eksperimen ini dilakukan di halaman terbuka Politeknik Indonusa Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia, yang berada pada koordinat 7°34' LS dan 110°49' BT. Lokasi ini dipilih karena memiliki karakteristik iklim tropis dengan intensitas radiasi matahari tinggi dan suhu lingkungan siang hari berkisar antara 30°C hingga 35°C. Percobaan dilaksanakan selama 7 hari berturut-turut pada bulan Agustus 2025, dari pukul 09.00 hingga 15.00 WIB setiap hari, untuk menangkap variasi suhu dan radiasi maksimum.

Media penelitian yang digunakan adalah dua buah modul surya monokristalin identik digunakan dalam eksperimen ini. Spesifikasi teknis modul adalah sebagai berikut: Tipe: Monocrystalline silicon; Daya maksimum (P_{max}): 100 Wp; Tegangan maksimum (V_{mp}): 18.5 V; Arus maksimum (I_{mp}): 5.4 A; Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}): 22.1 V; Arus hubung singkat (I_{sc}): 5.9 A; Dimensi fisik: 120 cm × 54 cm Kedua modul berasal dari produsen dan batch produksi yang sama untuk menjamin keseragaman performa. Salah satu modul dipasang sistem pendinginan pasif berupa heatsink aluminium yang terpasang rapat di bagian belakang panel. Heatsink menggunakan bahan aluminium dengan dimensi 100 cm × 50 cm × 3 cm dan dilengkapi sirip vertikal setinggi 4 cm untuk meningkatkan area perpindahan panas. Modul lainnya dibiarkan tanpa sistem pendinginan sebagai kontrol. Kedua panel dipasang dengan sudut kemiringan 15° menghadap ke utara (utara geografis) untuk penyerapan radiasi maksimum sesuai lokasi lintang.

Untuk pengukuran dan pencatatan data, digunakan beberapa instrumen sebagai berikut: Termometer thermal : untuk mengukur suhu permukaan belakang modul pada lima titik (rata-rata suhu digunakan sebagai data akhir). Pyranometer: untuk mengukur intensitas radiasi matahari global (W/m^2). Multimeter digital: sebagai alat verifikasi manual tegangan dan arus sesaat pada waktu tertentu. Selama eksperimen, parameter utama yang diamati meliputi: Suhu permukaan modul (°C); Tegangan output (V); Arus output (A) Daya keluaran (W) dihitung dengan rumus

$$IP = V \times I$$

Semua data disusun dalam bentuk grafik perbandingan harian dan dirata-ratakan untuk dianalisis efek penggunaan heatsink terhadap kinerja termal dan efisiensi daya.

- **Hasil dan Pembahasan**

Hasil Pengamatan Suhu Permukaan Modul PV

Pengamatan suhu dilakukan selama 7 hari berturut-turut pada waktu puncak iradiasi (pukul 12.00–13.00 WIB). Rata-rata suhu permukaan belakang modul ditampilkan pada Tabel 1

Tabel 1. Rata-rata Suhu Permukaan Modul PV

Hari Ke-	Modul dengan Heatsink (°C)	Modul tanpa Heatsink (°C)	Selisih (ΔT)
1	48,3	60,1	11,8
2	47,5	59,3	11,8
3	46,8	58,7	11,9
4	48,0	60,0	12,0
5	49,1	61,2	12,1
6	47,9	59,5	11,6
7	48,5	60,4	11,9
Rata-rata	48,0	59,9	11,9

Pengaruh Pendinginan terhadap Output Daya dan Efisiensi

Hasil Pengukuran Output Daya

Pengukuran tegangan (V) dan arus (I) dilakukan setiap 15 menit pada jam puncak (11.00–13.00 WIB) selama 7 hari. Daya dihitung menggunakan rumus, Data rata-rata output harian ditampilkan dalam Tabel 2:

Tabel 2. Rata-rata Output Daya Harian Modul PV

Hari Ke-	Modul dengan Heatsink (W)	Modul tanpa Heatsink (W)	Selisih Daya (ΔP)
1	87,4	81,0	6,4
2	88,1	80,5	7,6
3	86,7	79,9	6,8
4	87,9	80,3	7,6
5	89,2	81,1	8,1
6	87,0	80,0	7,0
7	88,0	80,7	7,3
Rata-rata	87,8	80,5	7,3

Pengaruh Heatsink terhadap Suhu Permukaan Modul

Berdasarkan data pada Tabel 1, penggunaan heatsink aluminium terbukti

menurunkan suhu permukaan belakang modul secara signifikan. Rata-rata suhu pada modul dengan heatsink adalah $48,0^{\circ}\text{C}$, sedangkan tanpa heatsink mencapai $59,9^{\circ}\text{C}$, menghasilkan selisih temperatur rata-rata sebesar $11,9^{\circ}\text{C}$. Penurunan suhu ini bersifat konsisten selama 7 hari pengamatan, yang menunjukkan bahwa sistem pendinginan pasif berbasis heatsink bekerja secara efektif dalam membuang panas yang terserap oleh modul fotovoltaik selama jam puncak iradiasi.

Tabel suhu dan daya yang Anda lampirkan menunjukkan bahwa peningkatan suhu secara umum menurunkan tegangan dan daya maksimum (P_{max}) pada modul surya. Hal ini selaras dengan temuan dalam eksperimen, di mana modul tanpa pendinginan mengalami kenaikan suhu hingga di atas 60°C yang menyebabkan kinerja listriknya menurun. Heatsink berperan dalam menjaga suhu kerja modul berada dalam batas efisiensi optimal, sehingga mengurangi efek negatif dari koefisien suhu negatif pada V_{oc} dan V_{mp} .

Dampak Pendinginan terhadap Output Daya

Pada Tabel 2 terlihat bahwa modul dengan heatsink menghasilkan rata-rata daya sebesar $87,8\text{ W}$, sedangkan modul tanpa heatsink hanya menghasilkan $80,5\text{ W}$, sehingga terdapat selisih rata-rata sebesar $7,3\text{ W}$ per hari atau sekitar $9,1\%$ peningkatan daya. Peningkatan ini terjadi karena suhu kerja yang lebih rendah menjaga tegangan output tetap tinggi, sesuai dengan karakteristik panel surya yang menunjukkan bahwa tegangan sangat sensitif terhadap kenaikan temperatur.

Penurunan suhu sebesar hampir 12°C menyebabkan efisiensi termal meningkat secara nyata. Jika diasumsikan iradiasi matahari konstan sebesar 900 W/m^2 dan luas modul $0,648\text{ m}^2$, maka efisiensi konversi daya meningkat dari $13,78\%$ (tanpa heatsink) menjadi $15,04\%$ (dengan heatsink). Dengan kata lain, pendinginan pasif dapat meningkatkan efisiensi sistem hingga $1,26\%$ absolut atau $9,1\%$ relatif, suatu angka yang sangat signifikan dalam sistem PV skala besar.

Penggunaan heatsink pasif dari aluminium terbukti tidak hanya menurunkan suhu operasi modul PV tetapi juga meningkatkan output daya dan efisiensi konversi energi secara konsisten. Efek ini sangat penting terutama untuk daerah tropis seperti Indonesia, di mana suhu lingkungan tinggi sering menjadi hambatan performa PV. Temuan ini mendukung penelitian sebelumnya (Skoplaki & Palyvos, 2009; Khanna & Tripathi, 2020) yang menekankan pentingnya sistem manajemen termal dalam meningkatkan keandalan dan kinerja modul fotovoltaik.

- **Kesimpulan**

Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan heatsink aluminium sebagai sistem pendinginan pasif pada modul fotovoltaik (PV) secara signifikan mampu menurunkan suhu operasi panel dalam kondisi iklim tropis. Selama tujuh hari pengamatan, modul dengan heatsink menunjukkan suhu permukaan yang lebih rendah secara konsisten dibandingkan modul tanpa pendinginan. Penurunan suhu ini berdampak langsung pada peningkatan output daya listrik yang dihasilkan oleh modul PV. Modul dengan heatsink menghasilkan daya lebih tinggi secara stabil setiap harinya dibandingkan modul tanpa heatsink. Dengan demikian, sistem pendinginan pasif menggunakan heatsink terbukti efektif dalam meningkatkan performa termal dan kinerja listrik panel surya, serta dapat menjadi solusi sederhana dan efisien untuk diterapkan pada sistem PV di daerah bersuhu tinggi seperti Indonesia.

Daftar Pustaka

- Chandel, S. S., Agarwal, T., & Mathur, A. (2014). Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1342–1351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.012>
- Fatima, N., Alvi, S. A., & Younis, M. (2023). *Experimental analysis of aluminum heat sink application on PV modules under tropical conditions*. *Energy Reports*, 9, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.017>
- Fatima, N., Alvi, S. A., & Younis, M. (2023). Experimental analysis of aluminum heat sink application on PV modules under tropical conditions. *Energy Reports*, 9, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.017>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (Version 60). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(7), 687–701. <https://doi.org/10.1002/pip.3541>
- Hasan, A., Sumathy, K., & Al-Haddad, A. A. (2016). A review on photovoltaic thermal (PVT) technology: History, current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1052–1064. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.090>
- Kumar, A., Singh, R., & Patnaik, S. (2023). *Performance evaluation of photovoltaic systems under high temperature conditions in tropical regions*. *Renewable Energy Reports*, 9, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.rer.2023.01.004>
- Kumar, A., Singh, R., & Patnaik, S. (2023). Performance evaluation of photovoltaic systems under high temperature conditions in tropical regions. *Renewable Energy Reports*, 9, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.rer.2023.01.004>
- Nugraha, A., & Sari, D. R. (2022). *Studi pengaruh suhu terhadap efisiensi panel surya monokristalin di daerah tropis Indonesia*. *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, 11(2), 78–85. <https://doi.org/10.31227/energi.v11i2.2022>
- Odeh, S., Behnia, M. (2009). Improving photovoltaic module efficiency using water cooling. *Heat Transfer Engineering*, 30(6), 499–505. <https://doi.org/10.1080/01457630802529214>
- Rahman, M. A., Hossain, M. S., & Khan, M. T. (2022). *Passive cooling of photovoltaic modules using aluminum fins in tropical climates*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 247, 111886. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111886>
- Rahman, M. A., Hossain, M. S., & Khan, M. T. (2022). Passive cooling of photovoltaic modules using aluminum fins in tropical climates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 247, 111886. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111886>
- Saputra, O. A., & Syaifudin, M. (2019). Design, analysis, and application of solar cell to drive water pump. *AIP Conference Proceedings*, 2202, 020113. <https://doi.org/10.1063/1.5141726>
- 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>

