PERANCANGAN DAN ANALISIS KOMPARATIF KINERJA LISTRIK PLTS ROOFTOP PADA TIGA KONFIGURASI SISTEM: TANPA PENDINGIN, HEATSINK, DAN HIBRIDA HEATSINK–REFLECTION FOIL

Jerry Purba[1], Stepanus[2], Judo Ignatius Nempung[3]*
[1],[2],[3]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia
Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang, Jakarta Timur 13630, DKI Jakarta
*Corresponding author: purba10.jerry@example.com

Abstrak

Kenaikan temperatur modul surya akibat paparan radiasi matahari yang tinggi menjadi tantangan utama dalam pengoperasian PLTS rooftop. Penelitian ini bertujuan merancang dan menganalisis secara komparatif kinerja listrik PLTS rooftop pada tiga konfigurasi sistem pendinginan pasif: tanpa pendingin, heatsink, dan hibrida heatsink–reflection foil. Pengujian dilaksanakan di lingkungan kampus Universitas Kristen Indonesia (UKI) Jakarta menggunakan tiga modul surya monokristalin 40 Wp yang dipasang pada posisi identik. Data tegangan panel (Vp), tegangan beban (Vcc), arus beban (Icc), temperatur modul, dan intensitas cahaya (lux) diambil setiap 15 menit dari pukul 08.30 hingga 16.00 WIB selama 4 hari kerja. Hasil pengujian menunjukkan bahwa temperatur tertinggi sistem tanpa pendingin mencapai 68,4°C, sedangkan sistem heatsink hanya 61,8°C (selisih 6,6°C). Pada pukul 12.00 WIB, daya keluaran sistem tanpa pendingin sebesar 8,69 W, sistem heatsink 10,01 W, dan sistem hibrida 11,48 W. Efisiensi tertinggi pada pukul 12.15 WIB dicapai sistem hibrida sebesar 26,36%, diikuti sistem heatsink 24,99%, dan tanpa pendingin 21,53%. Konfigurasi hibrida heatsink–reflection foil terbukti paling efektif meningkatkan kinerja listrik PLTS rooftop melalui mekanisme ganda, yaitu reduksi temperatur dan peningkatan radiasi efektif.

Kata Kunci: efisiensi, heatsink, kinerja listrik, PLTS rooftop, reflection foil

Abstract

Rising module temperature due to intense solar radiation is a primary challenge in rooftop photovoltaic (PV) system operation. This study aims to design and comparatively analyze the electrical performance of a rooftop PV system under three passive cooling configurations: no cooling, heatsink, and hybrid heatsink–reflection foil. Testing was conducted at Universitas Kristen Indonesia (UKI), Jakarta, using three 40 Wp monocrystalline PV modules installed at identical positions. Panel voltage (Vp), load voltage (Vcc), load current (Icc), module temperature, and irradiance (lux) were measured every 15 minutes from 08:30 to 16:00 WIB over 4 working days. Results show that the no-cooling system reached a peak module temperature of 68.4°C, while the heatsink system reached only 61.8°C (a difference of 6.6°C). At 12:00, output power was 8.69 W (no cooling), 10.01 W (heatsink), and 11.48 W (hybrid). Peak efficiency at 12:15 was 26.36% (hybrid), 24.99% (heatsink), and 21.53% (no cooling). The hybrid heatsink–reflection foil configuration proved most effective in enhancing rooftop PV electrical performance through a dual mechanism of temperature reduction and increased effective irradiance.

Keywords: electrical performance, efficiency, heatsink, reflection foil, rooftop PV

1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik dunia yang disertai komitmen global terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca mendorong pemanfaatan energi terbarukan, khususnya fotovoltaik (PV). Teknologi ini terus berkembang sebagai solusi transisi energi yang bersih, modular, dan fleksibel [1]. Namun, tantangan teknis utama pada modul PV adalah kenaikan temperatur kerja akibat paparan radiasi matahari. Setiap kenaikan temperatur modul di atas kondisi standar pengujian (STC: 25°C) menyebabkan penurunan tegangan keluaran dan efisiensi konversi energi akibat karakteristik koefisien temperatur negatif pada material semikonduktor [2].

Permasalahan termal ini sangat krusial pada aplikasi PLTS rooftop di wilayah beriklim tropis. Panas yang dipancarkan ulang (re-radiasi) oleh permukaan atap bangunan memperburuk kondisi termal modul dan dapat mempercepat degradasi komponen. Berbagai penelitian telah mengkaji sistem pendinginan pasif sebagai solusi ekonomis tanpa konsumsi energi tambahan. Widodo dan Winarso (2022) membuktikan bahwa heatsink dengan konfigurasi sirip penuh mampu meningkatkan daya keluaran hingga 58,78% [5]. Pawawoi dan Zulfahmi (2019) menunjukkan bahwa penambahan heatsink aluminium menurunkan temperatur panel rata-rata 18,26% dan meningkatkan daya maksimum 10,14% [6]. Di sisi lain, Suryo et al. (2023) melaporkan bahwa aluminium foil dengan sudut 45° meningkatkan daya keluaran hingga 16,70%, walaupun disertai kenaikan temperatur yang perlu diatasi dengan sistem pendingin [8].

Berdasarkan telaah literatur, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan heatsink dan reflection foil secara bersamaan untuk mengatasi panas re-radiasi dari atap pada PLTS rooftop. Penelitian ini mengisi celah tersebut melalui analisis komparatif tiga konfigurasi sistem: tanpa pendingin, heatsink, dan hibrida heatsink–reflection foil.

2. KERANGKA TEORI

2.1 Pengaruh Temperatur pada Modul Fotovoltaik

Kinerja listrik modul surya dipengaruhi secara signifikan oleh temperatur operasi. Tegangan rangkaian terbuka (Voc) berbanding terbalik dengan temperatur, sedangkan arus hubung singkat (Isc) sedikit meningkat namun tidak cukup mengkompensasi penurunan tegangan. Secara keseluruhan, daya maksimum modul menurun sekitar 0,4–0,5% per °C kenaikan temperatur di atas STC [2]. Pada aplikasi rooftop, re-radiasi permukaan atap beton dapat menambah beban termal modul hingga beberapa derajat Celsius, sehingga penurunan kinerja menjadi lebih signifikan.

2.2 Sistem Pendinginan Pasif: Heatsink

Heatsink adalah perangkat penukar panas yang menempel pada sisi belakang modul surya dan berfungsi meningkatkan pelepasan panas melalui konduksi dan konveksi alami. Penggunaan sirip aluminium memperluas area permukaan pelepasan panas sehingga temperatur modul dapat diturunkan tanpa memerlukan energi aktif [3]. Efektivitas heatsink bergantung pada geometri sirip, material, dan kondisi aliran udara sekitar.

2.3 Sistem Hibrida: Heatsink–Reflection Foil

Reflection foil adalah material reflektif yang dipasang di antara permukaan atap dan sisi bawah modul untuk memantulkan radiasi panas dari atap, sekaligus memantulkan sebagian cahaya matahari ke permukaan modul. Kombinasi heatsink dan reflection foil menciptakan sistem hibrida yang secara simultan mengurangi beban termal dari bawah dan meningkatkan irradiance efektif pada permukaan panel [4]. Arus fotovoltaik (Iph) berbanding lurus dengan intensitas cahaya matahari yang diterima, sehingga peningkatan irradiance langsung meningkatkan arus keluaran.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di lingkungan kampus Universitas Kristen Indonesia (UKI), Jakarta. Sistem PLTS dipasang pada area terbuka tanpa halangan bangunan atau pepohonan. Pengambilan data dilakukan setiap 15 menit dari pukul 08.30 WIB hingga 16.00 WIB selama 4 hari kerja. Ketiga sistem dipasang pada lokasi yang sama untuk memastikan kondisi lingkungan yang seragam: intensitas radiasi, temperatur udara, kecepatan angin, dan kelembapan.

3.2 Konfigurasi Sistem dan Spesifikasi Alat

Tiga sistem PLTS dirancang dengan perlakuan berbeda pada sistem pendinginan, sedangkan seluruh komponen lainnya identik. Spesifikasi lengkap ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi Komponen Sistem PLTS

No	Komponen	Spesifikasi
1	Modul Surya	Monocrystalline 40 Wp
2	Dimensi Modul	45 cm × 53 cm (0,2385 m²)
3	Jumlah Modul	3 unit (1 per sistem)
4	Sudut Kemiringan	10°
5	Solar Charge Controller	PWM 10 A
6	Baterai	12 V, 13 Ah
7	Beban	Lampu LED DC 20 W
8	Heatsink Aluminium	20×10×2,5 cm, 5 sirip
9	Reflection Foil	32 cm × 44 cm
10	Alat Ukur	Multimeter XL830, Lux Meter, Thermometer Gun

3.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian meliputi: (1) karakterisasi awal modul dengan mengukur Voc dan Isc setiap unit; (2) pemasangan heatsink pada sistem 2 dan heatsink + reflection foil pada sistem 3; (3) pengukuran tegangan panel (Vp), tegangan beban (Vcc), arus beban (Icc), temperatur modul menggunakan thermometer gun infrared, dan intensitas cahaya (lux) secara bersamaan pada ketiga sistem setiap 15 menit; (4) perhitungan daya keluaran (P = Vcc × Icc), daya input (Pin = G × Amodul), dan efisiensi sistem (η = Pout/Pin × 100%). Intensitas radiasi (G, W/m²) dihitung dengan faktor konversi G = Lux / 120.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Voc dan Isc Modul Surya

Hasil pengujian awal menunjukkan nilai Voc ketiga modul berada pada rentang 20–22,3 V dengan variasi kecil yang menunjukkan karakteristik listrik seragam. Nilai Voc tertinggi sebesar 22,3 V pada Modul 3 pukul 12.45 WIB. Nilai Isc mengikuti pola perubahan intensitas cahaya; pada saat intensitas mencapai 141.000 lux (11.30 WIB), Isc seluruh modul mencapai 2,21–2,26 A. Keseragaman ini mengkonfirmasi bahwa perbedaan kinerja antar sistem lebih dipengaruhi oleh konfigurasi pendinginan, bukan perbedaan spesifikasi panel.

4.2 Analisis Komparatif Temperatur Modul

Data temperatur hari ke-2 menunjukkan bahwa sistem heatsink secara konsisten menghasilkan temperatur lebih rendah dibandingkan sistem tanpa pendingin. Pada pukul 12.15 WIB, temperatur sistem tanpa pendingin mencapai 68,4°C, sedangkan sistem heatsink hanya 61,8°C dan sistem hibrida 67,4°C (Tabel 2). Penurunan oleh heatsink sebesar:

$$\Delta T = 68{,}4°C - 61{,}8°C = 6{,}6°C$$

Penurunan ini tergolong signifikan untuk sistem pendinginan pasif. Temperatur sistem hibrida (67,4°C) sedikit lebih tinggi dari heatsink tunggal karena tambahan radiasi yang dipantulkan foil meningkatkan beban panas, namun hal ini dikompensasi oleh peningkatan arus keluaran.

Tabel 2 Ringkasan Kinerja Tiga Sistem pada Pukul 12.00–12.15 WIB (Hari ke-2)

Parameter	Pukul	Tanpa Pendingin	Heatsink
Temperatur (°C)	12.15	68,4	61,8	67,4
Vp (V)	12.00	21,5	21,6	21,8
Vcc (V)	12.00	12,6	13,0	13,5
Icc (A)	12.00	0,69	0,77	0,85
Pout (W)	12.00	8,69	10,01	11,48
Efisiensi (%)	12.15	21,53	24,99	26,36

4.3 Analisis Tegangan Keluaran

Tegangan panel (Vp) sistem hibrida secara konsisten lebih tinggi dibandingkan dua sistem lainnya. Pada pukul 12.00 WIB: tanpa pendingin 21,5 V, heatsink 21,6 V, dan hibrida 21,8 V. Kenaikan ini sesuai prinsip fotovoltaik bahwa tegangan sel berbanding terbalik dengan temperatur. Dengan temperatur operasi yang lebih rendah, rugi-rugi termal berkurang dan tegangan keluaran meningkat. Selisih Vp antara sistem hibrida dan tanpa pendingin sebesar 0,3 V tampak kecil, namun dalam kondisi iradiasi tinggi dengan banyak modul paralel, perbedaan ini akan lebih berarti.

4.4 Analisis Arus Keluaran

Arus beban (Icc) sistem hibrida menunjukkan peningkatan paling signifikan. Pada pukul 12.00 WIB: tanpa pendingin 0,69 A, heatsink 0,77 A (+11,6%), dan hibrida 0,85 A (+23,2%). Peningkatan arus pada sistem hibrida disebabkan oleh dua faktor: (1) penurunan temperatur oleh heatsink memperbaiki efisiensi konversi, dan (2) reflection foil memantulkan sebagian radiasi ke permukaan panel sehingga irradiance efektif meningkat. Karena arus fotovoltaik (Isc) berbanding lurus dengan intensitas cahaya, tambahan iradiasi ini secara langsung meningkatkan arus keluaran.

4.5 Analisis Daya Keluaran

Daya keluaran (P = Vcc × Icc) pada pukul 12.00 WIB:

• Tanpa pendingin: P = 12,6 × 0,69 = 8,69 W
• Heatsink: P = 13,0 × 0,77 = 10,01 W
• Hibrida: P = 13,5 × 0,85 = 11,48 W

Peningkatan daya sistem hibrida terhadap tanpa pendingin sebesar:

$$\Delta P = (11{,}48 - 8{,}69) / 8{,}69 \times 100\% = 32{,}1\%$$

Sedangkan peningkatan sistem heatsink terhadap tanpa pendingin sebesar 15,2%. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi reflection foil memberikan tambahan peningkatan daya yang signifikan di atas manfaat heatsink saja.

4.6 Analisis Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem dihitung dengan persamaan:

$$\eta = (Pout / Pin) \times 100\%$$

dimana Pin = G × Amodul (G = irradiance dalam W/m², Amodul = 0,2385 m²). Berdasarkan Tabel 2, pada pukul 12.15 WIB efisiensi sistem hibrida mencapai 26,36%, dibandingkan heatsink 24,99% dan tanpa pendingin 21,53%. Secara keseluruhan selama periode pengujian, sistem hibrida secara konsisten menghasilkan efisiensi tertinggi. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi dua mekanisme peningkatan kinerja (pengurangan temperatur + peningkatan irradiance) lebih efektif dibandingkan masing-masing mekanisme secara terpisah.

4.7 Rata-rata Kinerja Selama Periode Pengujian

Selain analisis pada titik waktu puncak (pukul 12.00–12.15 WIB), evaluasi kinerja juga dilakukan terhadap rata-rata seluruh data pengukuran selama 4 hari kerja (08.30–16.00 WIB) untuk memperoleh gambaran performa yang lebih representatif (Tabel 3). Sistem tanpa pendingin menghasilkan daya rata-rata 7,31 W dengan efisiensi rata-rata 8,10%. Penambahan heatsink meningkatkan daya rata-rata menjadi 8,09 W (efisiensi 9,04%), atau naik sekitar 10,7% dibandingkan sistem tanpa pendingin. Sistem hibrida heatsink–reflection foil menghasilkan daya rata-rata tertinggi sebesar 8,62 W dengan efisiensi 9,56%, meningkat sekitar 17,9% dibandingkan sistem tanpa pendingin.

Tabel 3 Rata-rata Daya dan Efisiensi Sistem PLTS Selama 4 Hari Pengujian

Sistem PLTS	Rata-rata Pout (W)	Rata-rata Efisiensi (%)	Keterangan
Tanpa Pendingin	7,31	8,10	Terendah
Heatsink	8,09	9,04	+10,7% dari Sistem 1
Heatsink–Reflection Foil	8,62	9,56	Terbaik (+17,9%)

Konsistensi tren ini pada data rata-rata memperkuat kesimpulan yang diperoleh dari analisis titik puncak, bahwa konfigurasi hibrida memberikan peningkatan kinerja paling optimal secara keseluruhan sepanjang periode pengujian, bukan hanya pada kondisi radiasi maksimum.

4.8 Validasi Model Teoritis Pengaruh Temperatur terhadap Daya

Untuk memperkuat analisis pengaruh temperatur, daya keluaran hasil pengukuran aktual (P = V × I) dibandingkan dengan estimasi daya berdasarkan model koefisien temperatur:

$$P_{teori} = P_{ref} [1 + \tau(T - T_{ref})]$$

dengan P_ref = 40 Wp, T_ref = 25°C, dan τ = −0,45%/°C. Perhitungan dilakukan pada pukul 12.00 WIB untuk empat hari pengujian (Tabel 4). Hasil menunjukkan bahwa daya model teoritis secara konsisten jauh lebih tinggi (selisih 67,7–82,5%) dibandingkan daya aktual, karena model tersebut mengasumsikan radiasi penuh 1000 W/m² (kondisi STC), sedangkan intensitas radiasi aktual di lapangan pada jam yang sama umumnya jauh di bawah nilai tersebut.

Tabel 4 Perbandingan Daya Model Teoritis dan Daya Aktual Pukul 12.00 WIB

Hari	Sistem	T (°C)	P teori (W)	P aktual (W)	Selisih (%)
1	Heatsink	43,3	36,71	6,44	-82,5
1	Hibrida	44,5	36,49	7,50	-79,4
2	Heatsink	49,4	35,61	10,01	-71,9
2	Hibrida	49,7	35,55	11,48	-67,7
3	Heatsink	54,1	34,76	8,00	-77,0
3	Hibrida	53,8	34,82	8,44	-75,8
4	Heatsink	53,0	34,96	7,87	-77,5
4	Hibrida	52,6	35,03	8,57	-75,5

Temuan penting lainnya, pada model teoritis selisih daya antara sistem heatsink dan sistem hibrida relatif kecil (0,06–0,22 W) karena model hanya bereaksi terhadap perbedaan temperatur modul yang tidak jauh berbeda. Sebaliknya, pada data aktual sistem hibrida secara konsisten menghasilkan daya yang lebih tinggi daripada sistem heatsink dengan selisih yang jauh lebih besar. Perbedaan ini menegaskan bahwa keunggulan sistem hibrida tidak semata berasal dari penurunan temperatur, tetapi juga dari peningkatan radiasi efektif akibat pantulan reflection foil—mekanisme yang tidak tertangkap oleh model berbasis temperatur saja.

4.9 Pembahasan Komparatif

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Widodo dan Winarso (2022) yang membuktikan efektivitas heatsink dalam meningkatkan daya keluaran panel surya [5], serta Pawawoi dan Zulfahmi (2019) yang melaporkan penurunan temperatur rata-rata 18,26% dengan sistem pendingin pasif aluminium [6]. Namun, penelitian ini menambahkan dimensi baru melalui integrasi reflection foil yang secara bersamaan meningkatkan irradiance efektif, menghasilkan peningkatan daya 32,1% dibandingkan sistem tanpa pendingin—nilai yang melampaui manfaat heatsink tunggal (15,2%) maupun reflection foil tanpa pendingin seperti dilaporkan Suryo et al. (2023) [8].

Kontribusi utama penelitian ini adalah demonstrasi bahwa re-radiasi termal dari atap beton memberikan pengaruh signifikan terhadap temperatur modul, dan reflection foil sebagai penghalang re-radiasi sekaligus reflektor cahaya merupakan solusi sederhana namun efektif untuk PLTS rooftop skala kecil di wilayah tropis.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian komparatif tiga konfigurasi PLTS rooftop, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1.Sistem tanpa pendingin menghasilkan temperatur tertinggi (68,4°C) dengan kinerja listrik paling rendah: V = 21,5 V, I = 0,69 A, P = 8,69 W, dan efisiensi 21,53% pada pukul 12.00–12.15 WIB.

2.Penggunaan heatsink mampu menurunkan temperatur modul sebesar 6,6°C sehingga meningkatkan daya keluaran 15,2% (10,01 W) dan efisiensi

24,99% dibandingkan sistem tanpa pendingin.
3.Konfigurasi hibrida heatsink–reflection foil memberikan kinerja terbaik: P = 11,48 W (peningkatan 32,1% terhadap tanpa pendingin) dan efisiensi tertinggi 26,36%, melalui mekanisme ganda pengurangan temperatur dan peningkatan irradiance efektif.
4.Konfigurasi hibrida merupakan solusi pendinginan pasif yang paling efektif, ekonomis, dan mudah diterapkan untuk meningkatkan kinerja PLTS rooftop skala kecil, khususnya di wilayah beriklim tropis dengan atap beton.
5.Perbandingan dengan model teoritis pengaruh temperatur ($P = Pref[1 + \tau(T - Tref)]$) menegaskan bahwa keunggulan sistem hibrida tidak hanya berasal dari reduksi temperatur, tetapi juga dari peningkatan radiasi efektif akibat reflection foil, suatu mekanisme yang tidak tertangkap oleh model berbasis temperatur semata.

5.2 Saran

Penelitian lanjutan disarankan: (1) menguji variasi geometri heatsink dan material reflection foil yang berbeda; (2) mengkaji pengaruh kemiringan panel terhadap efektivitas sistem hibrida; (3) melakukan analisis biaya-manfaat untuk menentukan kelayakan implementasi skala besar; dan (4) menguji kinerja jangka panjang untuk mengevaluasi degradasi material.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Kumar, R. P. Saini, and J. S. Dhillon, "A comprehensive review of photovoltaic module temperature and performance enhancement techniques," Solar Energy, vol. 236, pp. 110-129, 2022.
[2] M. Hasanuzzaman, N. A. Rahim, J. Selvaraj, and N. A. A. Malek, "Global analysis of temperature effects on photovoltaic module performance," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 158, Art. no. 112123, 2022.
[3] S. Abdelrazik, M. K. Ahmed, and A. E. Eltamaly, "Passive cooling of photovoltaic panels using aluminum heat sinks: Experimental investigation," Energy Conversion and Management, vol. 259, Art. no. 115132, 2022.
[4] J. M. Linares-Rodriguez, D. Chemisana, and C. Lamnatou, "Performance enhancement of photovoltaic systems using reflective surfaces and passive cooling strategies," Applied Energy, vol. 307, Art. no. 118136, 2022.
[5] B. Widodo and A. Winarso, "Analisis pengaruh konfigurasi sirip heatsink terhadap peningkatan daya keluaran panel surya," Jurnal Teknik Elektro, vol. 14, no. 2, pp. 85-94, 2022.
[6] R. Pawawoi and Zulfahmi, "Optimasi kinerja panel surya menggunakan reflektor dan pendingin heatsink aluminium," Jurnal Energi dan Manufaktur, vol. 12, no. 1, pp. 45-52, 2019.
[7] A. Nadandi, A. Nugroho, and B. Prasetyo, "Rancang bangun sistem PLTS dengan penambahan reflektor aluminium dan sistem monitoring berbasis LabVIEW," Jurnal Teknologi Energi Terbarukan, vol. 10, no. 2, pp. 101-109, 2021.
[8] Suryo, et al., "Pengaruh penambahan reflektor dengan variasi sudut dan sistem pendinginan heatsink-fan terhadap kinerja panel surya," Jurnal Energi Terbarukan Indonesia, 2023.