E-ISSN : 2988-1986
Saintek
https://ejournal.warunayama.org/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin
Volume 10 No 5 Tahun 2025

PANEL SURYA TRANSPARAN HIBRIDA DENGAN PELTIER DAN TEG UNTUK BIPV

Grace Clarissa Aurelia[1], Kent Hsu [2]
(1) XII Teknik, SMA Kristen Immanuel Pontianak
(2) XII Teknik, SMA Kristen Immanuel Pontianak

✉ Corresponding author
imgraceclarissa@gmail.com kenthsu99@gmail.com

Abstrak

Sistem sel surya transparan hibrida yang dapat meningkatkan efisiensi konversi tenaga surya diusulkan dalam pekerjaan ini dengan menggabungkan modul peltier dan Generator Termoelektrik (TEG) untuk Membangun aplikasi Fotovoltaik Terintegrasi (BIPV). Prototipe dibuat dari kaca ITO 7,5 × 9,5 cm dan resin Rhodamine B, pendinginan aktif dilakukan dengan menggunakan Peltier TEC-12706 (limbah panas digunakan misalnya melalui TEG). Pengujian dilakukan selama 4,5 jam di wilayah Pontianak, dengan pengukuran rutin setiap 10 menit dalam kondisi iklim tropis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel hybrid menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 0,1049% atau 181,23% lebih tinggi dibandingkan panel hybrid biasa tanpa pendinginan, dimana suhu permukaan mengalami penurunan hingga 9°C dan uji t berpasangan menunjukkan nilai p = 0,0000159 yang menunjukkan hasil yang lebih baik secara statistik pada efisiensi panel. Panel-suhu-stabil termal dan-kerugian-dikurangi oleh sistem pendingin Peltier, bersama dengan TEG listrik yang dihasilkan dari limbah panas memanfaatkan efek Seebeck, terbukti efektif di wilayah B. Uji ketahanan menunjukkan bahwa panel stabil hingga 52,63 ° Sistem hibrida ini memiliki potensi yang signifikan untuk digunakan dalam aplikasi ramah lingkungan BIPV di iklim tropis.

Kata Kunci: *Panel Surya Transparan, Sistem Hybrid, Peltier, Termoelektrik (TEG), BPIV*

Abstract

A hybrid transparent solar cell system which can improve the efficiency of solar power conversion is proposed in this work by combining peltier module and Thermoelectric Generators (TEG) for Building Integrated Photovoltaics (BIPV) applications. The prototype was constructed from 7.5 × 9.5 cm ITO glass and Rhodamine B resin, active cooling was realised using Peltier TEC-12706 (waste heat utilized for example via TEG). Tests were running for 4.5 h in the Pontianak region, with regular measurements every 10 min under tropical climate conditions. Results indicate that hybrid panels delivered an average efficiency of 0.1049% or 181.23% more compared to plain hybrid panel without cooling, in which the surface temperature decreased up to 9°C and paired t-test showed p-value = 0.0000159 indicating statistically better result on panel efficiency. The panel-temperature-stabilized and thermal-loss-reduced by the Peltier cooling system, along with the TEG electricity generated from

Article History
Received: Oktober 2025
Reviewed: Oktober 2025
Published: Oktober 2025

Plagiarism Checker No 762
Prefix DOI : Prefix DOI : 10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

the waste heat utilizing Seebeck effect, proved to be effective in region B. Durability tests indicated that panels are stable up to 52.63 °C without performance loss. This hybrid system has a significant potential to be used in BIPV eco-friendly applications in tropical climate.

Keyword: *Transparent Solar Panel, Hybrid System, Peltier, Thermoelectric, BIPV*

PENDAHULUAN

Penggunaan energi matahari sebagai energi terbarukan di daerah perkotaan dengan permintaan energi yang tinggi sangat penting untuk pengurangan emisi karbondioksida. Dari segi infrastruktur, BIPV menjadi contoh arsitektur energi baru yang mengintegrasikan fungsi struktural, estetika, dan pembangkit listrik. Meskipun demikian, masalah utama yang dihadapi dalam BIPV adalah panel surya tidak berwarna dengan efisiensi hanya 7-10% (Shiyani, 2023), di bawah panel rata-rata yang memiliki efisiensi 20-22%, karena hanya menggunakan spektrum UV dan IR saat mentransmisikan cahaya tampak.

Semi-transparansi panel surya memungkinkan cahaya alami masuk ke dalam bangunan dan mengurangi ketergantungan pada petir buatan. Panel surya tradisional, karena beroperasi dengan proses yang berbeda, harus dibuat untuk mengumpulkan setiap potongan cahaya yang jatuh ke atasnya; fotovoltaik tembus pandang hanya perlu menangkap sebagian spektrum sambil membiarkan cahaya tampak masuk. Pendinginan terintegrasi diadopsi sebelumnya untuk meningkatkan efisiensi panel surya (Maryani et al., 2021), sementara hanya sedikit karya yang benar-benar menerapkan pendinginan aktif dengan menggunakan limbah panas yang berasal dari PV Transparan.

Untuk meningkatkan efisiensi panel surya transparan, para peneliti mengembangkan add-on hybrid yang menggabungkan panel tersebut dengan pendinginan Peltier dan Pembangkit Termoelektrik (TEG). Sistem gabungan ini menggabungkan dua efek termoelektrik yaitu Efek Peltier sebagai pendinginan aktif sel surya dan efek Seebeck untuk mengubah panas yang ditolak menjadi lebih banyak listrik. Eksperimen ini akan berfokus pada: (1) Membangun sistem hibrid dengan menambahkan modul Peltier dan TEG dengan pengisi daya baterai 12V yang umum; (2) Untuk mengetahui efisiensi listrik yang dihasilkan; (3) Untuk mempelajari perbedaan laju pendinginan antara panel surya uncooling dan panel surya pendingin.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Laboratorium SMA Kristen Immanuel Pontianak pada bulan Mei hingga September 2025. Bahan inti terdiri dari kaca ITO (Indium Tin Oxide), yang merupakan substrat konduktif transparan ukuran 7,5 × 9,5 cm, dan sekitar 50 ml resin transparan mengandung 250 mg pewarna Rhodamine B untuk menyerap sinar UV dan memancarkan fluoresensi. di sisi tepi panel. Modul Peltier TEC-12706 (4 unit) Ã Pusat akuisisi data adalah Arduino Uno, dan sensor suhu DS18B20 dan sensor cahaya BH1750 sebagai pemancar akuisisi data.

Sebuah proses untuk pembuatan panel surya transparan hibrida ini dicapai sebagai berikut: (1) sampai (3), di atas dengan menyiapkan prototipe awal TLSC dengan meletakkan foil tembaga yang memiliki ketebalan 0,1 mm pada bagian tepi sisi konduktif ITO, dilanjutkan dengan menuangkannya di antara dua potong Itoglass., lapping dengan larutan resin-Rhodamine B dan curing same at rest selama 24 jam sehingga sel surya mini melekat pada kedua sisinya menggunakan lem epoksi konduktif. Kedua, penggabungan susunan pemasangan modul Peltier dengan empat permukaan luar rangka aluminium dan pelabelan sisi panasnya secara unik pada setiap modul termoelektrik pettier. Integrasi sistem pemantauan dibentuk dengan BH1750, DS18B20 dan Arduino Uno untuk perekaman waktu nyata.

Eksperimen ini dilakukan di ruang terbuka dengan paparan sinar matahari langsung selama 4,5 h (09.30-14.00 WIB). Jarak antara panel non-hibrida dan hibrida adalah 50 cm. Tegangan (V), arus (a), suhu pengoperasian panel (C°) dan intensitas cahaya yang diukur dalam lux dicatat dengan interval sepuluh menit. untuk mendapatkan fluks cahaya dalam W / m2, kalikan nilai G (lux) Anda dengan faktor konversi empiris ini: g (W / m2) = 0,0079 x g(lux).

Analisis data meliputi perhitungan efisiensi panel surya menggunakan rumus: $\eta = (V \times I) / (G \times A) \times 100\%$, dimana η adalah efisiensi, V adalah tegangan, I adalah arus, G adalah intensitas radiasi (W/m^2), dan A adalah luas panel (m^2). Penurunan suhu dihitung dengan: $\Delta T = T_tanpa_pendingin - T_dengan_pendingin$. Analisis statistik uji-t berpasangan digunakan untuk menguji signifikansi perbedaan efisiensi dengan rumus: $t = \bar{d} / (Sd / \sqrt{n})$, dimana $\bar{d}$ adalah rata-rata selisih, Sd adalah simpangan baku, dan n adalah jumlah pasangan data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur panel yang terbuat dari kaca ITO yang dilapisi dengan resin transparan dan fluorescent Rhodamine B memiliki sifat tembus cahaya, sehingga dapat digunakan sebagai pengganti jendela, kanopi kaca atau atap bangunan tanpa merusak cahaya alami. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem dapat menyesuaikan diri dengan paparan sinar matahari harian yang berbeda, misalnya, Peltier mendinginkan permukaan kaca jika memanas dan TEG mengumpulkan panas untuk menghasilkan lebih banyak energi. Sistem hybrid berpotensi dimanfaatkan untuk bangunan hemat energi di negara tropis dengan efisiensi rata-rata 0,1049% dan kemungkinan peningkatannya dengan optimalisasi material. Gabungan TEG dengan modul Peltier dalam sistem panel surya transparan memiliki dua keunggulan: Sistem pendingin aktif Peltier membuat suhu kerja panel berkurang, yang dapat mengurangi kehilangan panas dan meningkatkan efisiensi konversi fotovoltaik; TEG dapat menggunakan gradien panas antara sisi panas Peltier dan lingkungan untuk menghasilkan lebih banyak daya dengan memanfaatkan efek seebeck. Perangkat ini menerapkan konsep penggunaan energi melingkar, di mana limbah panas diubah menjadi listrik dan mendaur ulangnya meningkatkan efisiensi secara keseluruhan.

Sistem hibrida dengan panel surya transparan mampu menunjukkan bahwa efisiensi konversi energi meningkat secara signifikan dibandingkan dengan panel tanpa perangkat pendingin, seperti yang diungkapkan oleh evaluasi yang dilakukan. Tabel Efisiensi 1 juga menunjukkan perbandingan efisiensi antara kedua sistem ini selama 28

periode pengamatan di mana kinerja secara otomatis disesuaikan dengan bentuk yang menunjukkan peningkatan pada panel HF.

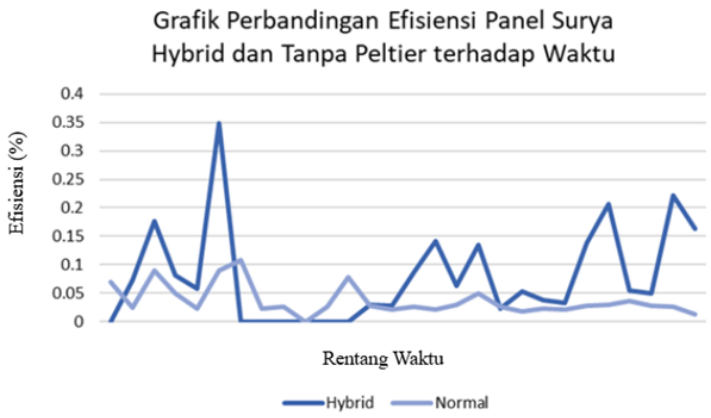
Tabel 1. Perbandingan Efisiensi Panel Surya Hibrida dan Tanpa Peltier

Waktu	Efisiensi Hibrida (%)	Efisiensi Normal (%)	Perbedaan (%)	Peningkatan (%)
09.30	0,2124	0,0694	0,1431	206,25
09.40	0,0724	0,0241	0,0484	201,12
09.50	0,1757	0,0897	0,0861	96,00
10.00	0,0803	0,0500	0,0304	60,75
10.10	0,0573	0,0231	0,0342	147,89
10.20	0,3485	0,0897	0,2588	288,65
10.30	0,2376	0,1072	0,1304	121,68
10.40	0,0402	0,0223	0,0179	80,33
10.50	0,0515	0,0259	0,0257	99,31
11.00	0,0317	0,0174	0,0143	81,94
11.10	0,0795	0,0260	0,0535	206,25
11.20	0,0890	0,0783	0,0106	13,59
11.30	0,0301	0,0275	0,0026	9,44
11.40	0,0274	0,0218	0,0057	26,07
11.50	0,0865	0,0260	0,0605	233,06
12.00	0,1412	0,0216	0,1196	554,41
12.10	0,0628	0,0292	0,0337	115,43
12.20	0,1347	0,0491	0,0856	174,47
12.30	0,0234	0,0264	-0,0030	-11,42
12.40	0,0526	0,0183	0,0343	187,52
12.50	0,0374	0,0219	0,0155	70,60
13.00	0,0328	0,0212	0,0116	54,73
13.10	0,1385	0,0269	0,1116	415,41
13.20	0,2063	0,0299	0,1764	590,94
13.30	0,0549	0,0367	0,0181	49,38

13.40	0,0487	0,0270	0,0217	80,33
13.50	0,2223	0,0258	0,1965	762,89
14.00	0,1624	0,0131	0,1493	1141,72

Perbandingan efisiensi panel hibrid dan panel normal pada 28 titik pengamatan pada penampang konduktif selama periode percobaan ditunjukkan pada Tabel 1. Modul hibrida juga lebih efisien selama periode pengukuran penuh. Akuisisi dengan hybrid adalah 0,2124% dan dengan panel reguler hanya 0,0694%, meningkat +206,25%. Efisiensi maksimum panel hybrid adalah 10: 20 (0,3485%), sedangkan panel normal hanya sebesar 0,0897%, jadi kami telah melipatgandakan keuntungan lebih dari tiga kali lipat (288,65%). Tren efisiensi bervariasi sebagai fungsi dari suhu cahaya dan ruangan, namun panel hybrid lebih efisien di sebagian besar waktu pengamatan kecuali pada pukul 12.30 dengan penurunan efisiensi sebesar 11,42% yang dapat dikaitkan dengan perubahan cuaca yang tiba-tiba.

Gambar 1. Grafik Perbandingan Efisiensi Panel Surya Hibrida dan Normal



Gambar 1 mengilustrasikan efisiensi untuk kedua sistem ini selama pengamatan. Kurva efisiensi panel hibrid berada pada posisi di atas kurva panel normal dan gap terbanyak terjadi pada pukul 10.00-12.00 WIB dan 13.00-14.00 WIB. Peningkatan efisiensi maksimum diamati pada pukul 14.00 WIB yaitu sebesar 1141,72% sehingga panel hibrid menghasilkan radiasi dengan efisiensi sebesar 0,1624 dan hanya untuk panel normal tipe lain sebesar 25 c) 1,31%. Hal ini menunjukkan sistem pendingin Peltier bekerja paling baik dalam suhu tinggi, kondisi cahaya redup di mana pendinginan diperlukan untuk menghindari degradasi yang terjadi pada panel tanpa pendinginan saat panas menumpuk. Dalam kondisi intensitas cahaya tinggi, efisiensi kedua panel serupa, namun sistem hybrid mengungguli dengan peningkatan rata-rata 115-415%. Temuan ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Maryani dkk. (2021) mendemonstrasikan bahwa pendinginan aktif mampu sangat meningkatkan kinerja sel surya dalam kondisi operasional dengan tekanan termal yang tinggi.

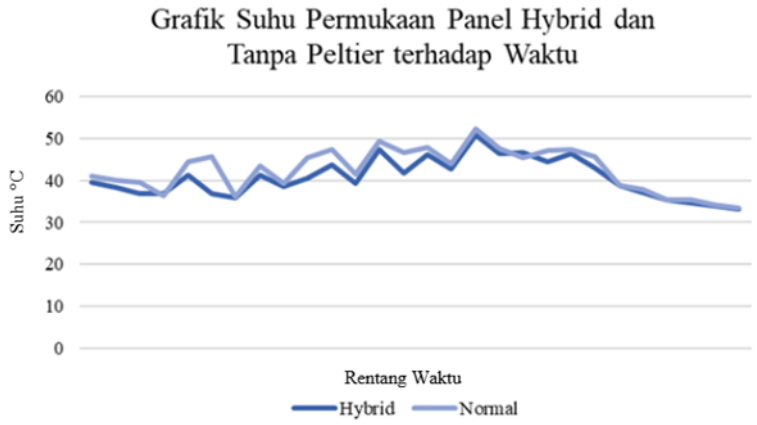
Tabel 2. Perbandingan Suhu Permukaan Panel dan Penurunan Suhu

Waktu	Suhu Panel Hibrida (˚C)	Suhu Panel Normal (˚C)	Penurunan Suhu (˚C)	Suhu Cuaca (˚C)	Kondisi Cuaca
09.30	39,44	40,88	1,44	35,88	Berawan
09.40	38,25	40,06	1,81	40,69	Cerah Berawan
09.50	36,75	39,44	2,69	38,44	Berawan
10.00	36,94	36,25	-0,69	37,38	Berawan
10.10	41,25	44,44	3,19	43,13	Cerah
10.20	36,75	45,75	9,00	38,44	Cerah Berawan
10.30	35,75	36,06	0,31	35,69	Berawan
10.40	41,25	43,44	2,19	42,25	Cerah Berawan
10.50	38,63	39,31	0,68	39,00	Berawan
11.00	40,38	45,44	5,06	45,75	Cerah
11.10	43,63	47,38	3,75	44,69	Panas
11.20	39,31	41,56	2,25	39,31	Cerah Berawan
11.30	47,31	49,31	2,00	51,00	Panas
11.40	41,69	46,63	4,94	48,44	Panas
11.50	46,19	47,75	1,56	46,00	Cerah
12.00	42,69	43,94	1,25	44,88	Cerah
12.10	50,81	52,19	1,38	52,63	Panas
12.20	46,44	47,56	1,12	42,46	Cerah Berawan
12.30	46,50	45,44	-1,06	44,94	Cerah
12.40	44,44	47,00	2,56	45,56	Cerah
12.50	46,31	47,38	1,07	47,44	Cerah
13.00	42,94	45,75	2,81	44,44	Cerah Berawan
13.10	38,69	38,75	0,06	37,38	Berawan
13.20	37,06	37,75	0,69	36,13	Berawan
13.30	35,38	35,44	0,06	35,44	Berawan
13.40	34,75	35,38	0,63	35,06	Berawan

13.50	33,94	34,19	0,25	33,75	Berawan
14.00	33,19	33,38	0,19	33,19	Berawan

Data pada Tabel 2 menyajikan perbandingan suhu permukaan panel dan efektivitas sistem pendingin Peltier selama 28 titik pengamatan. Suhu panel hibrida secara konsisten lebih rendah dibandingkan panel normal, dengan penurunan suhu bervariasi antara 0,06°C hingga 9°C. Penurunan suhu terbesar 9°C terjadi pada pukul 10.20, dimana suhu panel hibrida tercatat 36,75°C sementara panel normal mencapai 45,75°C meskipun suhu cuaca hanya 38,44°C. Fenomena serupa terjadi pada pukul 11.00 dengan penurunan 5,06°C saat suhu cuaca mencapai puncak 45,75°C. Pada periode intensitas cahaya tertinggi, penurunan suhu mencapai 2°C dengan suhu panel hibrida 47,31°C dibandingkan panel normal 49,31°C.

Gambar 2. Grafik Suhu Permukaan Panel Hibrida dan Normal



Gambar 2 memvisualisasikan dinamika termal kedua sistem selama periode pengamatan. Kurva suhu panel normal menunjukkan fluktuasi lebih ekstrem dengan puncak tertinggi 52,19°C pada pukul 12.10, sementara kurva panel hibrida lebih stabil dengan puncak 50,81°C pada waktu yang sama. Pada periode kritis 10.00-13.00 WIB dimana suhu cuaca berkisar 37,38-52,63°C, gap suhu antara kedua panel mencapai 1-9°C. Pola kurva menunjukkan bahwa panel hibrida merespon lebih lambat terhadap kenaikan suhu lingkungan dan lebih cepat dalam penurunan suhu, mengindikasikan sistem pendingin Peltier efektif dalam meredam fluktuasi termal. Periode 13.00-14.00 WIB menunjukkan konvergensi suhu kedua panel seiring menurunnya intensitas cahaya, dengan selisih hanya 0,06-0,69°C.

Gambar 3. Grafik Penurunan Suhu Permukaan Panel Akibat Sistem Pendingin Peltier



Suhu aktual yang diukur dengan sistem pendingin pada setiap titik waktu pengukuran diilustrasikan pada Gambar 3. Kurva mewakili hubungan non-linier antara derajat pengaruh dan pengukuran terhadap suatu lingkungan. Penurunan suhu terendah diamati pada pagi hari (09: 30-10: 30 wib) dan sore hari ketika suhu lingkungan relatif rendah <1˚

Tabel 3. Perbandingan Efisiensi Total Sistem

Parameter	Panel Hibrida	Panel Normal	Peningkatan
Efisiensi Rata-Rata (%)	0,1049	0,0373	181,23%
Efisiensi Maksimal (%)	0,3485	0,1072	225,09%
Standar Deviasi (%)	0,0737	0,0246	-

Tabel 3 data menunjukkan bahwa sistem hybrid menghadirkan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan panel yang berdiri sendiri. Meskipun mungkin tampak kecil secara absolut, untuk peningkatan relatif sebesar 181,23%, nilai rata-rata 0,1049% ini menunjukkan efisiensi pendingin aktif dan integrasi TEG dalam mengurangi kehilangan termal pada bahan transparan. Sistem hibrida menunjukkan deviasi standar yang lebih besar, yang berarti bahwa mereka lebih sensitif terhadap perubahan kondisi cahaya dan karenanya mungkin juga cocok untuk adaptasi dinamis terhadap berbagai faktor lingkungan tropis. Ini berarti bahwa selain peningkatan efisiensi sistem, sistem tersebut sudah memiliki kemampuan yang lebih tinggi dari stabilisasi termal terhadap perubahan sehari-hari di bidang solar power.

Tabel 4. Hasil Analisis Statistik Uji-t Berpasangan

Parameter	Nilai
Jumlah pasangan data (n)	28
Rata-rata selisih efisiensi (%)	0,0667
Simpangan baku selisih (%)	0,0737
Standar error	0,0139
Nilai t-hitung	5,24
Derajat kebebasan (df)	27
p-value	0,0000159
Tingkat signifikansi (α)	0,05

Analisis uji-t berpasangan menunjukkan perbedaan efisiensi yang sangat signifikan antara kedua sistem ($p = 0{,}0000159 < 0{,}05$). Nilai t-hitung 5,24 jauh melampaui nilai kritis (2,052), menegaskan bahwa peningkatan efisiensi bukan hasil kebetulan eksperimental. Dengan demikian, kontribusi sistem pendingin Peltier dan TEG terhadap kinerja panel memiliki validitas statistik kuat. Hasil ini menguatkan bahwa integrasi termal ganda efektif secara ilmiah untuk meningkatkan performa panel surya transparan di kondisi radiasi tinggi.

Tabel 5. Data Pengamatan Tegangan, Arus, dan Intensitas Cahaya

Waktu	Intensitas (lux)	Tegangan Hibrida (V)	Tegangan Normal (V)	Arus Hibrida (A)	Arus Normal (A)
09.30	6639,17	0,063	0,036	0,0126	0,0072
09.40	17072,50	0,059	0,034	0,0118	0,0068
09.50	4854,17	0,049	0,035	0,0098	0,0070
10.00	22293,33	0,071	0,056	0,0142	0,0112
10.10	33931,66	0,074	0,047	0,0148	0,0094

10.20	4854,17	0,069	0,035	0,0138	0,0070
10.30	6713,33	0,067	0,045	0,0134	0,0090
10.40	19533,33	0,047	0,035	0,0094	0,0070
10.50	15886,67	0,048	0,034	0,0096	0,0068
11.00	37708,00	0,058	0,043	0,0116	0,0086
11.10	21900,83	0,070	0,040	0,0140	0,0080
11.20	26199,17	0,081	0,076	0,0162	0,0152
11.30	54612,50	0,068	0,065	0,0136	0,0130
11.40	53030,00	0,064	0,057	0,0128	0,0114
11.50	21900,83	0,073	0,040	0,0146	0,0080
12.00	30450,00	0,110	0,043	0,0220	0,0086
12.10	46837,42	0,091	0,062	0,0182	0,0124
12.20	32510,83	0,111	0,067	0,0222	0,0134
12.30	34972,88	0,048	0,051	0,0096	0,0102
12.40	41083,59	0,078	0,046	0,0156	0,0092
12.50	38942,11	0,064	0,049	0,0128	0,0098
13.00	28137,66	0,051	0,041	0,0102	0,0082
13.10	18103,54	0,084	0,037	0,0168	0,0074
13.20	14577,50	0,092	0,035	0,0184	0,0070
13.30	19586,67	0,055	0,045	0,0110	0,0090
13.40	16114,17	0,047	0,035	0,0094	0,0070

13.50	14125,73	0,094	0,032	0,0188	0,0064
14.00	11984,28	0,074	0,021	0,0148	0,0042

Dari Tabel 5 terlihat bahwa tegangan dan arus keluaran panel hibrida secara konsisten lebih tinggi pada hampir seluruh waktu pengamatan, meskipun intensitas cahaya dan suhu lingkungan berubah-ubah. Peningkatan tegangan hingga 114% dan arus hingga 120% pada kondisi siang harimenunjukkan efektivitas sistem dalam menjaga kinerja fotovoltaik meskipun suhu sekitar mencapai 50°C. Konsistensi output ini penting secara praktis karena menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi stabil pada iklim tropis, menjadikannya kandidat ideal untuk implementasi *Building Integrated Photovoltaics (BIPV)* di daerah dengan radiasi tinggi dan kelembapan ekstrem seperti Indonesia.

Tabel 6. Hasil Uji Ketahanan Panel Surya Transparan

Parameter Uji	Hasil
Suhu maksimal tercatat	52,63°C
Durasi pengujian	4,5 jam (09.30-14.00 WIB)
Kondisi fisik panel	Tidak ada kerusakan
Perubahan tegangan output	Tidak signifikan (< 5%)
Kondisi lapisan resin	Stabil, tidak ada degradasi
Kondisi koneksi elektrik	Tetap optimal
Integritas sistem Peltier	Berfungsi normal
Integritas sistem TEG	Berfungsi normal

Hasil uji ketahanan memperlihatkan bahwa panel mampu mempertahankan stabilitas struktural dan elektrik pada suhu ekstrem tanpa kerusakan fisik atau degradasi resin. Ketahanan hingga 52,63°C menunjukkan bahwa material resin-Rhodamine B dan substrat ITO memiliki kompatibilitas termal baik terhadap modul Peltier dan TEG. Tidak adanya penurunan tegangan lebih dari 5% menandakan bahwa

sistem mampu menjaga long-term stability, yang merupakan parameter penting bagi implementasi di bangunan tropis. Pengujian ini memperkuat validitas teknis sistem dalam aplikasi dunia nyata, bukan sekadar skala laboratorium.

SIMPULAN

Sistem hibrida panel surya transparan yang terintegrasi dengan TEG dan Peltier menunjukkan peningkatan efisiensi konversi energi (181,23%) dibandingkan model bebas lemari es, yang memiliki efisiensi rata-rata 0,1049% dan nilai maksimum 0,3485%. Pendinginan Peltier dapat mengurangi suhu permukaan hingga 9°C, yang sangat bagus untuk meminimalkan kebocoran termal. TEG memanfaatkan limbah panas dan mengubahnya menjadi listrik tambahan berdasarkan efek Seebeck. Panel menunjukkan daya tahan yang baik di lingkungan hingga 52,63° Sistem hibrida ini menjanjikan untuk penerapan BIPV di daerah tropis dengan insolasi matahari yang tinggi dan kondisi lingkungan yang keras.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Siaw Leng, S.T., M.Si. selaku Kepala Sekolah yang telah memberikan masukan dan motivasi, Violetta Vincentia, S.Si. selaku guru pembimbing yang telah memberikan bimbingan dalam penelitian ini, serta orang tua dan keluarga yang telah memberikan dukungan moral dan material. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Laboratorium SMA Kristen Immanuel Pontianak yang telah menyediakan fasilitas penelitian.

REFERENSI

[1] Bayramov, F. M., & Manafov, A. Ş. (2024). TRANSPARENT SOLAR PANELS. Energy Sustainability: Risks and Decision Making., 2(1). https://doi.org/10.61413/vqrj1354

[2] Castelletto, S., & Boretti, A. (2023). Luminescence solar concentrators: A technology update. Nano Energy, 109, 108269. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108269

[3] Dzulfikar, D., & Broto, W. (2016). OPTIMALISASI PEMANFAATAN ENERGI LISTRIK TENAGA SURYA SKALA RUMAH TANGGA. Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF2016), V, SNF2016-76. https://doi.org/10.21009/0305020614

[4] Fitraneti, E., Rizal, Y., Nafiah, S. R., Primawati, I., & Hamama, D. A. (2024). Pengaruh Paparan Sinar Ultraviolet terhadap Kesehatan Kulit dan Upaya Pencegahannya : Tinjauan Literatur. Scientific Journal, 3(3), 185–194. https://doi.org/10.56260/sciena.v3i3.147

[5] Husain, A. A. F., Hasan, W. Z. W., Shafie, S., Hamidon, M. N., & Pandey, S. S. (2018). A review of transparent solar photovoltaic technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 779–791. https://www.elsevier.com/locate/rser

[6] Maryani, S., Kusumanto, N. R., & Rs, N. C. (2023). Solar panel optimization using Peltier Module TEC1-12706. Journal of Mechanical Civil and Industrial Engineering, 4(3), 43–50. https://doi.org/10.32996/jmcie.2023.4.3.6

[7] Ningrum, A. S., Putri, N. M., Jannah, N. A., Sudarti, & Anggraeni, F. K. A. (2024). Analisis penggunaan sinar ultra violet (UV) pada tanaman hidroponik. Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan, 10(23), 1274–1279. https://jurnal.peneliti.net/index.php/JIWP/article/view/11272

[8] Rifal, M., Dera, N. S., & Pido, R. (2020). PERANCANGAN PROTOTYPE HYBRID ENERGI ANTARA SOLAR CELL DAN THERMOELECTRIC GENERATOR (TEG). Gorontalo Journal of Infrastructure and Science Engineering, 3(2), 1. https://doi.org/10.32662/gojise.v3i2.1179

[9] Rifky, R., Fikri, A., Mujirudin, M., & Avorizano, A. (2023). HIBRIDISASI PANEL SURYA DENGAN MODUL TERMOELEKTRIK SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA. Prosiding Sains Nasional Dan Teknologi, 13(1), 108–123. https://doi.org/10.36499/psnst.v13i1.8604

[10] Sahithi, B., Anupama, D. S., Ganesh, G., Kiran, D. S., Chanti, D., & Karteek, M. S. (2023). Experimental investigation on the performance of solar PV-TEC hybrid system. International Journal of Research Publication and Reviews, 4(10), 1559–1567. http://www.ijrpr.com

[11] Shiyani, T. (2023). Transparent solar PV panels. In IntechOpen eBooks. https://doi.org/10.5772/intechopen.110062

[12] Sugianto, S. (2020). Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline. INTEK Jurnal Penelitian, 7(2), 92–100. https://doi.org/10.31963/intek.v7i2.2625

[13] Umam, F. (2017). Perancangan Thermoelectric Generator (TEG) sebagai Sumber Energi Terbarukan. DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals). https://doi.org/10.21107/rekayasa.v10i2.6345

[14] Wahyu, W. (2023). Desain dan Analisis Sistem Hybrid Panel Surya dan Termoelektrik. MSI Transaction on Education, 4(1), 45–58. https://doi.org/10.46574/mted.v4i1.106

[15] Zhang, Z., Ji, R., Jia, X., Wang, S., Deconinck, M., Siliavka, E., & Vaynzof, Y. (2023). Semitransparent Perovskite Solar Cells with an Evaporated Ultra-Thin Perovskite Absorber. Advanced Functional Materials. https://doi.org/10.1002/adfm.202307471