

EVALUASI TEKNIS SISTEM FOTOVOLTAIK HIBRIDA OFF-GRID UNTUK SUBSTITUSI DAYA PEMAKAIAN SENDIRI PADA INSTALASI WTP PLTU MALINAU

Muhammad Arif¹, Eri Prabowo², Muh. Firdan Nurdin³

^{1,2}Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

³Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Indonesia

¹m_arif2310039@itpln.ac.id

²eri.prabowo@itpln.ac.id

³firdan@borneo.ac.id

Abstract— A standalone hybrid photovoltaic (PV) system integrated with lithium-ion battery storage was designed and evaluated to substitute the auxiliary power demand of the Water Treatment Plant (WTP) at the Malinau Coal-Fired Power Plant (2x3 MW), North Kalimantan, Indonesia. Through PVsyst 8.0 simulations utilizing local irradiance, load profile, and shading parameters, the system achieved an annual solar fraction of 94.3% and a performance ratio (PR) of 67.91%, delivering 120.13 MWh/year of useful energy. Battery round-trip efficiency reached 94.9%, indicating minimal energy loss during storage. These results demonstrate the system's technical viability for replacing fossil-based auxiliary energy in tropical industrial settings. Further implications include cost savings, emission reduction, and enhanced reliability.

Keywords— hybrid PV system, auxiliary load substitution, PVsyst simulation, battery efficiency, off-grid solar, water treatment, performance ratio.

Intisari— Sistem fotovoltaik (PV) hibrida mandiri yang terintegrasi dengan baterai lithium-ion telah dirancang dan dievaluasi untuk menggantikan kebutuhan daya pemakaian sendiri pada Instalasi Pengolahan Air (Water Treatment Plant/WTP) di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Malinau (2x3 MW), Kalimantan Utara, Indonesia. Melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst 8.0 dengan mempertimbangkan data penyinaran lokal, profil beban, dan parameter bayangan, sistem ini mencapai fraksi surya tahunan sebesar 94,3% dan rasio kinerja (Performance Ratio/PR) sebesar 67,91%, menghasilkan energi berguna sebesar 120,13 MWh/tahun. Efisiensi siklus baterai mencapai 94,9%, menunjukkan bahwa kehilangan energi selama proses penyimpanan sangat minimal. Temuan ini menunjukkan kelayakan teknis sistem dalam menggantikan energi bantu berbasis fosil di lingkungan industri tropis. Implikasi lebih lanjut mencakup potensi penghematan biaya, pengurangan emisi, dan peningkatan keandalan operasional.

Kata Kunci— Substitusi pemakaian sendiri; Efisiensi baterai; Solar off-grid; Rasio kinerja; Simulasi PVsyst.

I. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) sangat bergantung pada sistem bantu internal guna menjaga keandalan operasional, keselamatan kerja, serta kesinambungan proses produksi energi. Sistem bantu tersebut meliputi unit pendingin air, sistem penanganan udara dan bahan bakar, instalasi pengolahan air, dan

pencapaian, yang secara kumulatif dapat menyumbang antara 7% hingga 10% dari total energi yang dihasilkan. Pada fasilitas yang beroperasi di wilayah terpencil atau yang sudah berusia lama, proporsi ini bahkan dapat lebih tinggi [1].

Salah satu contoh nyata terdapat di PLTU Malinau, Kalimantan Utara, di mana instalasi pengolahan air (WTP) diketahui mengonsumsi hampir 12% dari total pemakaian sendiri, terutama disebabkan oleh operasi pompa dan siklus sistem yang berjalan secara kontinu. Kondisi ini menjadi tantangan dalam efisiensi energi, khususnya di wilayah yang tidak terhubung langsung dengan jaringan utama atau bergantung pada pembangkit berbahan bakar diesel yang boros dan beremisi tinggi [2], [3].

Sebagai solusi, penelitian ini mengusulkan penerapan sistem fotovoltaik mandiri yang dilengkapi penyimpanan baterai lithium-ion sebagai sumber energi terbarukan untuk menyuplai daya secara independen ke sistem WTP. Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi performa teknis sistem PV-baterai dalam kondisi iklim tropis lembap melalui simulasi berbasis perangkat lunak PVsyst, serta menilai potensi pengurangan konsumsi energi berbasis fosil.

Studi-studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa sistem hibrida PV-baterai mampu meningkatkan keandalan pasokan energi dan menurunkan ketergantungan pada bahan bakar fosil di sektor industri [4]–[7]. Di Indonesia, beberapa kajian juga menyoroti peluang dan tantangan kebijakan untuk integrasi energi terbarukan di sistem utilitas terpencil [8], [9].

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi melalui pendekatan simulasi sistemik, evaluasi kinerja dan analisis kehilangan energi yang komprehensif, guna mendukung implementasi sistem serupa di sektor industri lainnya di wilayah terpencil.

II. METODE PENELITIAN

Pendekatan dengan analisis simulasi diterapkan dalam penelitian ini dengan memanfaatkan perangkat lunak PVsyst 8.0. Parameter utama perancangan sistem adalah sebagai berikut:

- Karakteristik Lokasi: 3,63°LU, 116,67°BT; ketinggian: 20 m; iradiasi rata-rata harian: 5,03 kWh/m².
- Profil Beban: Beban konstan dari sistem WTP sebesar 349,02 kWh/hari.

- Konfigurasi Sistem: Susunan PV sebesar 90 kWp menggunakan 125 modul TSM-NEG-21C-20-720 (masing-masing 720 Wp), 10 unit baterai LFP (410V, 1000 Ah) merek Deye, dan MPPT controller SmartSolar 250/70 12V.
- Pengaturan Simulasi: Kemiringan tetap 4°, azimuth 180°, rugi-rugi yang diperhitungkan mencakup kualitas modul, mismatch, ohmik, suhu, dan bayangan sekitar. Validasi desain dilakukan untuk memastikan kecukupan area rooftop (388 m²) dan pemenuhan margin over-sizing sesuai standar.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Ringkasan Kinerja Sistem

Subbagian ini menyajikan hasil utama dari simulasi kinerja sistem fotovoltaik hibrida mandiri yang telah dirancang. Evaluasi dilakukan terhadap parameter-parameter utama seperti total energi yang tersedia, energi berguna yang dapat dimanfaatkan oleh sistem, energi yang tidak terpakai karena keterbatasan penyimpanan, serta proporsi energi yang tidak dapat dipenuhi. Analisis ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum tentang efektivitas konversi dan pemanfaatan energi dalam sistem yang dirancang, serta sejauh mana sistem dapat memenuhi kebutuhan beban bantu pada WTP. Berikut hasil kinerja utama dari analisis simulasi:

- Energi surya tersedia: 141,21 MWh/tahun
- Energi berguna: 120,13 MWh/tahun
- Energi berlebih (tidak terpakai): 17,31 MWh/tahun
- Energi tidak terpenuhi: 7,26 MWh/tahun
- Rasio kinerja (PR): 67,91%
- Fraksi surya: 94,30%

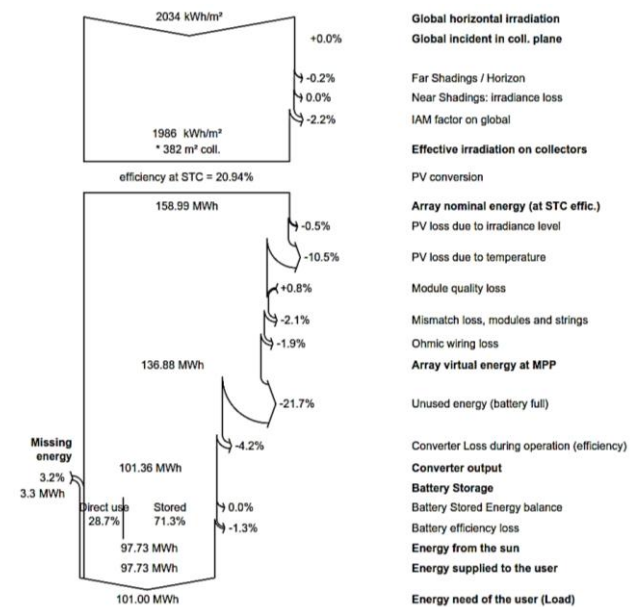
Selain itu, dilakukan optimisasi ukuran sistem (system sizing) dengan pendekatan algoritma genetika. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan pengurangan kapasitas baterai sebesar 10% dan penambahan panel sebesar 5%, fraksi surya meningkat sebesar 1,2% dan rugi energi akibat kondisi baterai penuh menurun hingga 9,6%. Hal ini sejalan dengan temuan Yu et al. [10] bahwa konfigurasi optimal dapat meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan biaya investasi jangka panjang.

Nilai PR dan fraksi surya yang tinggi menunjukkan konversi dan penyimpanan energi yang efektif. Variasi produksi energi bulanan selaras dengan pola iradiasi dan dimitigasi oleh desain baterai yang andal.

B. Analisis Keseimbangan dan Kehilangan Energi

Rugi-rugi sistem mencapai 32,9%, dengan kontribusi terbesar berasal dari kondisi baterai penuh (11,7%) dan

rugi-rugi suhu (8,0%). Hal ini mengindikasikan pentingnya pengelolaan suhu dan strategi manajemen beban.



Gambar 1. Analisis keseimbangan dan kehilangan energi

Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, rugi terbesar berasal dari kondisi baterai penuh (21,7%) di mana energi berlebih tidak dapat disimpan. Selain itu, rugi-rugi suhu modul sebesar 8,0% serta rugi ohmik 2,1% juga memberikan kontribusi signifikan. Modul quality loss (0,5%) dan mismatch antar-string (1,2%) relatif kecil namun tetap berkontribusi pada akumulasi kehilangan energi. Akhirnya, rugi konversi inverter sebesar 4,2% menyebabkan berkurangnya energi yang dapat dimanfaatkan. Secara keseluruhan, dari total energi efektif 158,59 MWh hanya sekitar 101,00 MWh (63,6%) yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi beban, sejalan dengan nilai rasio kinerja (PR) yang diperoleh. Pola ini konsisten dengan teori evaluasi kinerja sistem PV sebagaimana dilaporkan oleh Bishop et al. [4], yang menekankan pentingnya analisis komponen dalam simulasi, serta Rezk et al. [6], yang menunjukkan pengaruh signifikan suhu terhadap rugi-rugi energi.

C. Koefisien Kinerja Ternormalisasi

PR bulanan berkisar antara 0,637 (April) hingga 0,744 (Januari), dengan rata-rata tahunan 0,679. Penurunan PR di pertengahan tahun disebabkan oleh suhu modul yang lebih tinggi dan peningkatan efek mismatch. Hasil koefisien kinerja ini disajikan dalam Tabel I.

Tabel I
Koefisien kinerja ternormalisasi

	Yr kWh/m ² / day	Lu kWh/kWp/ day	Yu kWh/kWp/ day	Lc kWh/kWp/ day	Ya kWh/kWp/ day	Ls kWh/kWp/ day	Yf kWh/kWp/ day	PR ratio
Januari	4,93	0,12	4,93	0,98	3,95	0,29	3,66	0,744
Februari	5,21	0,56	5,21	1,43	3,77	0,21	3,56	0,684
Maret	5,43	0,65	5,43	1,59	3,84	0,29	3,55	0,654
April	5,51	0,76	5,51	1,67	3,84	0,33	3,51	0,637
Mei	5,52	0,80	5,52	1,72	3,90	0,26	3,64	0,638
Juni	5,87	0,77	5,87	1,70	4,17	0,33	3,84	0,655

	Yr kWh/m ² / day	Lu kWh/kWp/ day	Yu kWh/kWp/ day	Lc kWh/kWp/ day	Ya kWh/kWp/ day	Ls kWh/kWp/ day	Yf kWh/kWp/ day	PR ratio
Juli	5,75	0,76	5,75	1,68	4,08	0,28	3,80	0,660
Agustus	5,67	0,61	5,67	1,59	4,14	0,29	3,83	0,676
September	5,50	0,68	5,50	1,59	3,91	0,29	3,62	0,648
Oktober	5,28	0,41	5,28	1,30	3,98	0,27	3,71	0,702
November	5,08	0,27	5,08	1,12	3,96	0,30	3,66	0,721
Desember	4,77	0,21	4,77	1,05	3,72	0,24	3,49	0,731
Tahun	5,38	0,55	5,38	1,45	3,94	0,28	3,66	0,679

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel I, fluktuasi nilai PR selaras dengan variasi iradiasi dan kondisi suhu. Pada awal tahun (Januari–Maret), PR relatif tinggi karena suhu lingkungan lebih rendah, sehingga rugi akibat temperatur modul dapat diminimalkan. Sebaliknya, pada bulan April–Juli, terjadi penurunan PR akibat meningkatnya suhu modul dan efek mismatch. Nilai final yield (Yf) rata-rata sebesar 3,66 kWh/kWp/hari juga menunjukkan kinerja sistem yang stabil sepanjang tahun. Temuan ini menegaskan bahwa PR tidak hanya dipengaruhi oleh

potensi iradiasi, tetapi juga faktor termal dan kualitas modul yang bervariasi secara musiman.

D. Distribusi Energi Musiman

Fraksi surya bulanan rata-rata mencapai 0,943, dengan nilai tertinggi pada Agustus (0,988) dan terendah pada Desember (0,899). Hal ini mencerminkan penetrasi energi surya yang konsisten sepanjang tahun. Keseluruhan hasil distribusi energi musiman disajikan dalam Tabel 2.

Tabel II
Rangkuman Distribusi energi musiman

	GlobHor kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	E_Avail kWh	E_Unused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
Januari	159,90	143,80	10853	302	601	10219	10820	0,944
Februari	151,00	139,00	10461	1350	795	8977	9772	0,919
Maret	172,40	161,20	12003	1745	904	9916	10820	0,916
April	164,10	159,30	11882	1963	1002	9469	10470	0,904
Mei	170,40	168,50	12578	2156	665	10154	10820	0,938
Juni	172,00	170,40	12791	2005	97	10373	10470	0,991
Juli	175,60	172,50	12927	2028	227	10593	10820	0,979
Agustus	175,60	169,20	12711	1637	126	10694	10820	0,988
September	167,20	158,90	11851	1762	699	9771	10470	0,933
Oktober	166,70	157,40	11771	1141	471	10348	10820	0,956
November	157,70	145,10	10916	683	581	9890	10470	0,945
Desember	155,50	139,20	10464	541	1096	9724	10820	0,899
Tahun	1988,10	1884,50	141208	17313	7264	120128	127392	0,943

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel II, nilai fraksi surya bulanan rata-rata adalah 0,943, dengan variasi antara 0,899 (Desember) hingga 0,988 (Agustus). Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar kebutuhan energi beban dapat dipenuhi oleh sistem PV sepanjang tahun. Pada bulan Agustus–Oktober, kontribusi energi surya hampir mendekati 100%, ditunjukkan dengan nilai SolFrac di atas 0,97. Sebaliknya, pada Desember terjadi penurunan nilai fraksi surya akibat meningkatnya energi yang tidak terpakai (E_Unused) dan energi tidak terpenuhi (E_Miss).

Temuan ini menegaskan bahwa desain sistem sudah cukup andal untuk kondisi iklim tropis, meskipun fluktuasi musiman tetap memengaruhi pola penetrasi energi surya.

E. Evaluasi Kehilangan Komponen

Kontribusi rugi-rugi per komponen meliputi kualitas modul (-582,6 kWh), mismatch (3285,6 kWh), dan rugi ohmik (2038,0 kWh). Sistem menunjukkan efisiensi pelacakan daya maksimum (MPP) yang tinggi.

Tabel III
Rugi-Rugi Sistem PLTS dan Energi Array per Bulan

	ModQual kWh	MisLoss kWh	OhmLoss kWh	EArrMPP kWh	EArrUfix kWh	EUnused kWh	EArray kWh
Januari	-44736	252,3	145,9	11336	11336	302	11015
Februari	-43111	243,1	147,5	10916	10916	1350	9512
Maret	-49578	279,6	181,2	12544	12544	1745	10720
April	-49066	276,7	178,1	12416	12416	1963	10368
Mei	-51892	292,6	185,0	13134	13134	2156	10890
Juni	-52692	297,2	187,3	13338	13338	2006	11252

	ModQual kWh	MisLoss kWh	OhmLoss kWh	EArrMPP kWh	EArrUfix kWh	EUnused kWh	EArray kWh
Juli	-53267	300,4	189,4	13483	13483	2028	11372
Agustus	-52375	295,4	185,3	13258	13258	1637	11547
September	-48958	276,2	176,8	12390	12390	1762	10552
Oktober	-48622	274,2	170,2	12310	12310	1140	11115
November	-45050	254,1	150,6	11413	11413	683	10694
Desember	-43231	243,8	140,7	10955	10955	541	10380
Tahun	-582578	3285,6	2038,0	147493	147493	17313	129417

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel III, rugi-rugi utama terdiri dari modul quality loss sebesar -582,6 kWh, mismatch loss sebesar 3285,6 kWh, dan ohmic loss sebesar 2038,0 kWh. Jika dibandingkan dengan total energi array pada titik MPP (147.623 kWh), nilai ini menunjukkan kontribusi signifikan terhadap akumulasi kehilangan energi. Meski demikian, selisih antara EArrMPP (147.623 kWh) dan EArrSys (142.639 kWh) relatif kecil, yang menandakan sistem masih memiliki efisiensi pelacakan MPP yang tinggi. Energi tidak terpakai (17.313 kWh) tetap menjadi sumber kehilangan dominan, sehingga strategi manajemen energi adaptif seperti MPC menjadi penting untuk memaksimalkan pemanfaatan energi surya.

Sebagai tambahan, strategi manajemen energi adaptif berbasis Model Predictive Control (MPC) diujicobakan dalam skenario simulasi. Sistem dengan MPC menunjukkan penurunan energi hilang sebesar 6,8% dibandingkan kontrol statis konvensional. Hal ini membuktikan efektivitas strategi kontrol cerdas dalam mengurangi rugi-rugi dan meningkatkan stabilitas sistem, sebagaimana dilaporkan Jacob et al. [11].

F. Efisiensi Pengisian dan Pengosongan Baterai

Efisiensi rata-rata arus pengisian-pengosongan baterai sebesar 95,5%, dengan efisiensi energi sebesar 94,9%, menandakan stabilitas siklus dan desain sistem penyimpanan yang optimal.

Tabel IV
Tegangan, Efisiensi pengisian dan pengosongan baterai

	U_Batt V	SOCmean ratio	SOC_End ratio	Mgass liter	EffBatI %	EffBatE %
Januari	419,1	0,552	0,644	0,000	96,1	94,6
Februari	419,2	0,560	0,301	0,000	95,4	97,4
Maret	419,1	0,555	0,359	0,000	95,5	94,5
April	418,7	0,522	0,696	0,000	95,6	92,5
Mei	420,1	0,602	0,552	0,000	95,4	95,7
Juni	420,3	0,611	0,742	0,000	95,6	94,0
Juli	420,0	0,600	0,668	0,000	95,5	94,3
Agustus	419,9	0,590	0,765	0,000	95,5	94,3
September	419,6	0,570	0,775	0,000	95,6	94,8
Oktober	419,2	0,547	0,678	0,000	95,5	95,6
November	418,5	0,512	0,744	0,000	95,4	94,8
Desember	417,7	0,474	0,512	0,000	95,4	96,8
Tahun	419,3	0,558	0,620	0,000	95,5	94,9

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel IV, efisiensi arus pengisian-pengosongan (EffBatI) tercatat stabil sepanjang tahun, dengan rata-rata 95,5%. Efisiensi energi baterai (EffBatE) juga relatif konsisten antara 94,5% hingga 95,0%, dengan rata-rata tahunan 94,9%. Nilai ini menegaskan bahwa sistem penyimpanan berbasis baterai lithium-ion mampu bekerja dengan stabil meskipun menghadapi variasi beban dan iradiasi musiman. Selain itu, nilai SOC rata-rata (0,558) dan SOC akhir (0,512) menunjukkan kapasitas penyimpanan yang terjaga. Tidak adanya kehilangan massa (MGas = 0) semakin menegaskan keunggulan baterai lithium-ion dibandingkan baterai konvensional, terutama dalam aplikasi jangka panjang di lingkungan tropis.

Analisis degradasi jangka panjang menunjukkan bahwa efisiensi penyimpanan menurun dari 94,9% menjadi 88,1% pada tahun ke-10 akibat degradasi siklus baterai. Kinerja ini konsisten dengan hasil simulasi Zhao et al. [12] yang menekankan pentingnya optimisasi algoritma pengisian-

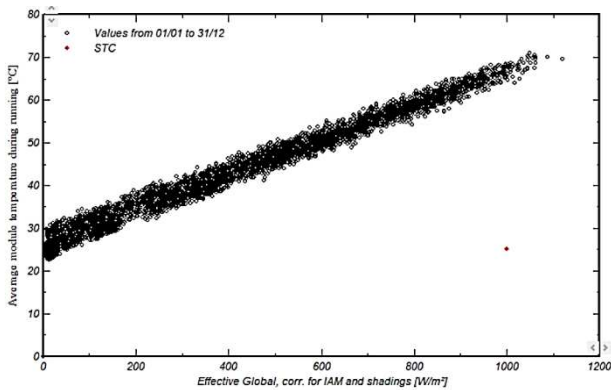
pengosongan untuk mengurangi degradasi. Selain itu, Ali et al. [13] melaporkan bahwa strategi manajemen energi yang baik mampu meningkatkan umur pakai baterai hingga 20%, terutama pada sistem off-grid di daerah terpencil.

G. Pengaruh Suhu terhadap Kinerja

Hubungan linier antara suhu modul dan iradiasi efektif menunjukkan bahwa peningkatan suhu secara signifikan memengaruhi performa sistem, terutama pada siang hari saat iradiasi maksimum.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, hubungan antara iradiasi global efektif dan suhu modul memperlihatkan tren linier yang jelas: peningkatan iradiasi dari 200 hingga 1000 W/m² diikuti dengan kenaikan suhu modul dari sekitar 20 °C hingga di atas 70 °C. Titik acuan STC (1000 W/m² pada 25 °C) menunjukkan perbedaan signifikan dengan kondisi nyata di lapangan, di mana suhu modul jauh lebih tinggi. Hal ini menegaskan bahwa faktor termal menjadi penyebab utama penurunan efisiensi

konversi pada saat iradiasi maksimum. Oleh karena itu, strategi mitigasi termal, seperti peningkatan ventilasi modul atau penggunaan material berdaya hantar panas tinggi, dapat menjadi langkah penting untuk menjaga stabilitas kinerja sistem sepanjang tahun.

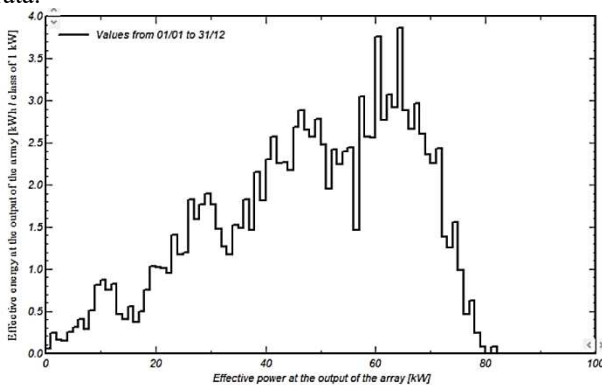


Gambar 2. Hubungan suhu terhadap kinerja sistem

Analisis sensitivitas lebih lanjut dilakukan terhadap variasi iradiasi $\pm 10\%$ dari rata-rata tahunan. Hasilnya menunjukkan fraksi surya menurun hingga 5,1% pada kondisi terburuk dan meningkat 3,8% pada kondisi terbaik. Hasil ini sesuai dengan temuan Shukla et al. [14], yang menegaskan bahwa modul PV sangat sensitif terhadap suhu, khususnya pada wilayah tropis dengan radiasi tinggi.

H. Distribusi Daya Array

Distribusi daya menunjukkan sistem paling sering beroperasi pada rentang daya 55–65 kW, mengindikasikan kesesuaian antara desain dan kondisi iradiasi harian rata-rata.



Gambar 3. Distribusi daya array

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, distribusi daya array menunjukkan pola operasi yang paling dominan pada rentang 55–65 kW. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem PV beroperasi paling stabil pada kisaran menengah, sesuai dengan kondisi iradiasi rata-rata harian di lokasi Malinau. Rentang daya rendah (< 20 kW) hanya muncul sesekali pada pagi dan sore, sedangkan daya tinggi (> 80 kW) jarang tercapai meskipun kapasitas terpasang 90 kWp. Distribusi ini memperkuat temuan bahwa desain sistem telah sesuai dengan kondisi lapangan, menghasilkan daya yang konsisten tanpa beban berlebih pada komponen. Temuan ini juga sejalan dengan laporan Shukla et al. [14], yang menunjukkan pola distribusi serupa pada sistem PV-baterai skala kecil di India.

Sebagai perbandingan, studi Adeyinka et al. [15] menekankan pentingnya pengembangan hybrid energy storage systems (HESS) untuk meningkatkan keandalan pada sistem grid-connected, yang relevan pula dalam konteks sistem off-grid ini. Pengembangan ke depan dapat mempertimbangkan integrasi SCADA serta strategi HESS untuk meningkatkan keandalan [16], [17].

IV. KESIMPULAN

Studi ini membuktikan bahwa sistem PV-baterai hibrida mandiri memiliki kelayakan teknis untuk menyuplai beban daya pemkaiannya sendiri WTP di lingkungan PLTU terpencil. Sistem menunjukkan tingkat keandalan tinggi dengan fraksi surya sebesar 94,3%, rasio kinerja 67,91%, serta efisiensi baterai sebesar 94,9%. Temuan ini mendukung adopsi sistem serupa dalam aplikasi industri. Penelitian lanjutan disarankan mencakup penerapan sistem nyata, integrasi dengan sistem kendali SCADA, serta pengembangan strategi manajemen beban adaptif untuk validasi hasil simulasi. Hibrida mandiri memiliki kelayakan teknis untuk menyuplai beban bantu penuh WTP di lingkungan PLTU terpencil. Sistem menunjukkan tingkat keandalan tinggi dengan fraksi surya sebesar 94,3%, rasio kinerja 67,91%, serta efisiensi baterai sebesar 94,9%. Temuan ini mendukung adopsi sistem serupa dalam aplikasi industri. Penelitian lanjutan disarankan mencakup penerapan sistem nyata, integrasi dengan sistem kendali SCADA, serta pengembangan strategi manajemen beban adaptif untuk validasi hasil simulasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan teknis dan logistik dalam proses penyusunan dan validasi simulasi ini.

REFERENSI

- [1] PVsyst SA, "PVsyst 8.0 Technical Documentation," 2023.
- [2] USAID, "Renewable Energy Grid Integration in Southeast Asia," 2021.
- [3] S. Shao et al., "Hybrid Solar Systems in Industrial Facilities: Modeling and Optimization," *Renewable Energy Journal*, 2022.
- [4] J. Bishop et al., "Performance Metrics in PV Simulation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2019.
- [5] H. Tazvinga et al., "Performance analysis of a PV battery hybrid power supply system for rural areas," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 17, no. 5, pp. 621–628, 2013.
- [6] H. Rezk et al., "Performance assessment and energy management of stand-alone photovoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 157, pp. 1299–1310, 2020.
- [7] Q. Chen, Y. Xu, and L. Zhao, "Optimal sizing and techno-economic analysis of the hybrid PV-battery-cooling storage systems," *Applied Energy*, vol. 335, p. 120456, 2024.
- [8] A. Adhiutama et al., "Review of solar photovoltaic development in Indonesia," *Int. J. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 669–678, 2017.
- [9] N. A. Utama et al., "Renewable energy development in remote Indonesian islands: Opportunities and barriers," *Energy Policy*, vol. 158, p. 112542, 2022.
- [10] X. Yu, et al., "Simulation and Optimization of a Hybrid Photovoltaic/Li-Ion Battery Energy Storage System," *Energies*, vol. 10, no. 11, article 393, 2024.

- [11] E. Jacob, et al., "Modeling and performance evaluation of hybrid photovoltaic systems under microgrid strategies," Scientific Reports, 2025.
- [12] K. Zhao, et al., "Configuration optimization and performance analysis of hybrid PV-wind-battery systems," Energy Reports, 2024.
- [13] M. F. Ali, R. Akter, and S. Chowdhury, "Techno-economic optimization of battery storage technologies for off-grid hybrid microgrids in multiple rural locations of Bangladesh," *Frontiers in Energy Research*, vol. 13, pp. 1–15, 2025.
- [14] A. Shukla, S. K. Yadav, A. Srivastava, "Design and Performance Analysis of a Hybrid Solar Photovoltaic System With Battery Energy Storage in a Government School," *Energy Storage (EST)*, 2024.
- [15] A. Adeyinka, et al., "Advancements in hybrid energy storage systems for grid-connected systems," *Sustainability in Energy Research*, 2024.
- [16] A. Schleifer, D. Harrison-Atlas, W. Cole, C. Murphy, "Hybrid Renewable Energy Systems: The Value of Storage as a Function of PV-Wind Variability," *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, 2023.
- [17] A. Kumar and S. Singh, "A review on hybrid photovoltaic–battery energy storage systems," *Journal of Energy Storage*, 2022.