

Perancangan dan Analisis Tekno-Ekonomi PLTS *Off-grid* Pembersih Sampah Terapung Berbasis HOMER-PVsyst

Abdul Azis^{1*}, Andrias Fadillah², Dwi Andika³, Ulinnuha Latifa⁴

^{1,2,3,4} Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang

Email: ¹2210631160023@student.unsika.ac.id, ²22210631160028@student.unsika.ac.id,

³2210631160035@student.unsika.ac.id, ⁴ulinnuha.latifa@ft.unsika.ac.id

*Penulis Korespondensi

I. PENDAHULUAN

Abstract— *The accumulation of waste in rivers triggers environmental risks and requires automatic cleaning technology such as the Floating Litter Automatic Waste-Bin (FLOW). However, operating this device outside the reach of the electrical grid demands a reliable independent power supply, whereas conventional design for dynamic loads often leads to power failures or investment inefficiency. This study aims to conduct the design and techno-economic analysis of an off-grid Photovoltaic (PV) system to power the FLOW device. The method involves an integrated simulation using PVsyst software to validate technical performance and HOMER Pro to optimize life-cycle economic feasibility. Simulation results indicate excellent technical reliability, achieving a 95% Solar Fraction, 194.25 kWh/year of energy production, and an unmet load of only 0.04%. Although the Performance Ratio (PR) is 55.72% with 36.8% excess electricity, this surplus strategically functions as a critical safety margin during cloudy conditions. Economically, the system configuration is proven feasible with a Net Present Cost (NPC) of IDR 7,782,690 and a Cost of Energy (COE) of IDR 2,539.74/kWh over a 20-year project lifespan, where battery replacement is the largest cost contributor. In conclusion, the design of this off-grid PV system is validated as highly reliable for supplying dynamic loads and techno-economically feasible as a sustainable energy solution for river cleaning operations.*

Intisari— Akumulasi sampah di sungai memicu risiko lingkungan dan memerlukan teknologi pembersih otomatis seperti alat *Floating Litter Automatic Waste-Bin* (FLOW). Namun, operasional alat ini di luar jangkauan jaringan listrik menuntut sistem catu daya mandiri yang andal, sementara perancangan konvensional pada beban dinamis sering memicu kegagalan daya atau inefisiensi investasi. Penelitian ini bertujuan melakukan perancangan dan analisis tekno-ekonomi sistem catu daya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* untuk alat FLOW. Metode yang digunakan adalah simulasi terintegrasi menggunakan *software* PVsyst untuk memvalidasi performa teknis dan HOMER Pro untuk optimasi kelayakan ekonomi siklus hidup. Hasil simulasi menunjukkan keandalan teknis yang baik dengan *Solar Fraction* mencapai 95%, produksi energi 194,25 kWh/tahun, dan kekurangan daya (*unmet load*) hanya sebesar 0,04%. Meskipun *Performance Ratio* (PR) bernilai 55,72% dengan kelebihan energi (*excess electricity*) 36,8%, surplus ini secara strategis berfungsi sebagai margin keamanan kritis saat cuaca mendung. Secara ekonomi, konfigurasi sistem terbukti layak dengan nilai investasi *Net Present Cost* (NPC) Rp 7.782.690 dan *Cost of Energy* (COE) Rp 2.539,74/kWh selama umur proyek 20 tahun, di mana biaya baterai menjadi penyumbang terbesar. Kesimpulannya, perancangan sistem PLTS *off-grid* ini terbukti valid, sangat andal dalam menyuplai beban dinamis, dan layak secara tekno-ekonomi sebagai solusi energi berkelanjutan untuk operasional kebersihan sungai.

Kata Kunci— PLTS *Off-grid*, Analisis Tekno-Ekonomi, HOMER Pro, PVsyst, Alat Pembersih Sampah.

Sungai merupakan komponen vital dalam ekosistem lingkungan yang saat ini menghadapi tekanan berat akibat pencemaran limbah padat, khususnya sampah plastik domestik. Akumulasi sampah di badan air tidak hanya mendegradasi kualitas lingkungan, tetapi juga menghambat aliran irigasi dan memicu risiko bencana banjir di kawasan hilir [1]. Permasalahan ini terekam jelas di wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum, Kabupaten Karawang, yang mencatat volume timbunan sampah mencapai lebih dari 6,6 juta ton per tahun dengan tingkat penanganan yang belum optimal [1][2][3]. Kondisi faktual ini terkonfirmasi melalui observasi secara langsung pada saluran irigasi di Desa Mekarjati, di mana penumpukan sampah domestik ditemukan mengapung dan menghambat debit aliran air secara signifikan. Untuk menanggulangi masalah sampah terapung ini secara efektif, penggunaan teknologi pembersih sampah otomatis (*automatic waste cleaner*) mulai diterapkan untuk menggantikan metode manual. Namun, tantangan mendasar dari implementasi teknologi ini yaitu kebutuhan akan sistem catu daya mandiri (*stand-alone power system*) yang andal, mengingat lokasi operasional di badan sungai umumnya tidak terjangkau oleh jaringan listrik konvensional.

Sejalan dengan inovasi teknologi lingkungan, berbagai macam prototipe alat pembersih sampah terapung berbasis energi surya telah dikembangkan, mulai dari mekanisme hisap *seabin* hingga wahana kapal tanpa awak [4][5][6]. Namun, mayoritas penelitian tersebut masih berfokus pada aspek mekanik dan sistem *monitoring IoT*, sementara perancangan sub-sistem catu daya secara mendalam sering kali dilakukan menggunakan pendekatan estimasi manual (*manual sizing*) tanpa analisis mendalam [7][8]. Pendekatan konvensional ini memiliki keterbatasan dalam memprediksi keandalan sistem terhadap profil beban dinamis, yang berisiko menyebabkan kegagalan daya (*undersizing*) saat cuaca mendung atau pemborosan biaya investasi (*oversizing*) akibat ketidakakuratan kapasitas baterai [6]. Di sisi lain, studi literatur menegaskan bahwa metode simulasi terintegrasi menggunakan perangkat lunak PVsyst dan HOMER Pro telah terbukti valid untuk mengevaluasi kelayakan teknis serta ekonomi sistem energi terbarukan [9][10][11][12]. Meskipun demikian, penerapan simulasi hibrida ini umumnya masih terbatas pada beban statis skala perumahan atau bangunan, dan belum secara komprehensif diaplikasikan pada sistem daya mikro untuk robotika lingkungan yang beroperasi dengan karakteristik beban kontinu di badan air atau alat pembersih sungai seperti FLOW [13][14][15].

Kekosongan studi pada beban dinamis tersebut menjadi dasar pengembangan alat FLOW (*Floating Litter Automatic Waste-Bin*), yang beroperasi menggunakan mekanisme pergerakan vertikal dari linear aktuator yang mampu menaikkan dan menurunkan tabung atau bodi tempat terkumpulnya sampah. Sehingga, menghasilkan efek isapan dan didukung oleh sistem pompa untuk menghisap air serta memerangkap sampah terapung. Mekanisme pada operasional ini memunculkan permasalahan mendasar terkait karakteristik beban yang bersifat induktif dan dinamis, terutama dari komponen motor pompa dan aktuator linear. Berbeda dengan beban resistif pada rumah tangga, beban induktif memerlukan arus awal (*inrush current*) yang tinggi, sehingga strategi pencocokan (*matching*) antara kapasitas panel surya dan karakteristik motor menjadi sangat penting [16]. Selain itu, kondisi lingkungan operasional di wilayah perairan terbuka seperti Karawang memiliki tantangan tersendiri berupa temperatur lingkungan yang tinggi dan potensi *mismatch* akibat bayangan parsial, yang secara teknis dapat menurunkan efisiensi keluaran daya pada panel surya [17]. Ketiadaan analisis rugi-rugi (*loss analysis*) yang presisi terhadap faktor-faktor lingkungan ini dapat mengakibatkan ketidakakuratan desain sistem, baik berupa kegagalan suplai daya saat beban puncak maupun pembengkakan biaya investasi akibat kapasitas baterai yang berlebihan (*oversizing*).

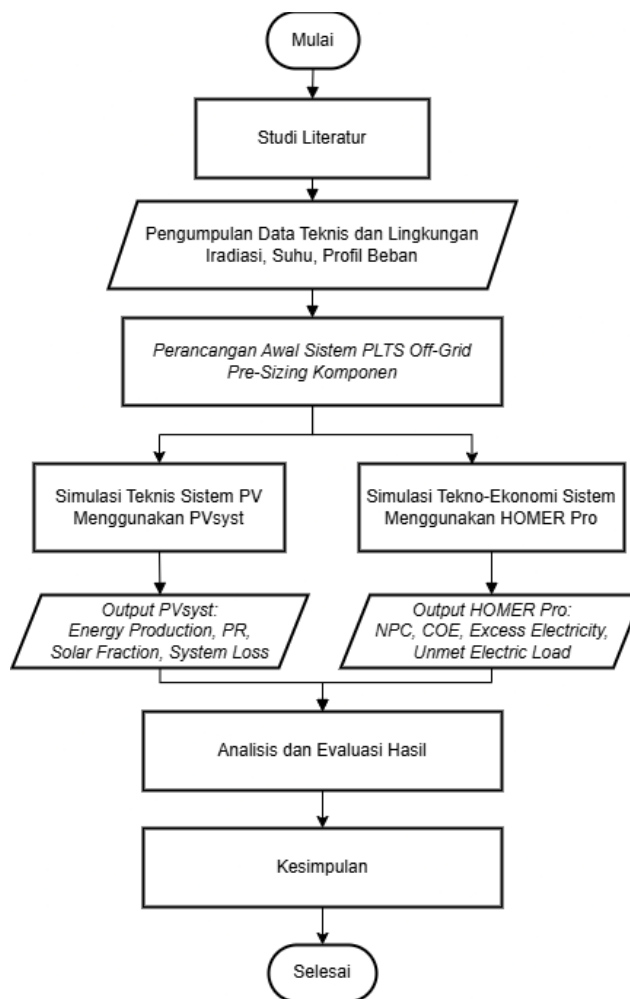
Berdasarkan identifikasi permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan perancangan dan analisis tekno-ekonomi sistem catu daya PLTS *off-grid* pada alat pembersih sampah terapung bernama FLOW dengan menggunakan pendekatan simulasi terintegrasi. Metode penelitian menerapkan strategi simulasi hibrida, di mana perangkat lunak PVsyst digunakan untuk memvalidasi performa teknis melalui analisis rugi-rugi (*loss analysis*) akibat faktor lingkungan, sedangkan HOMER Pro digunakan untuk mengoptimalkan konfigurasi komponen berdasarkan indikator ekonomi *Net Present Cost* (NPC) dan *Cost of Energy* (COE) terendah. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi berupa model perancangan sistem daya mandiri yang presisi, andal dalam melayani beban dinamis motor pompa, serta efisien secara biaya siklus hidup untuk mendukung operasional teknologi kebersihan sungai yang berkelanjutan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode simulasi dan analisis tekno-ekonomi terintegrasi untuk memverifikasi kelayakan desain sistem daya pada sebuah alat pembersih sampah terapung di sungai. Pendekatan berbasis simulasi dipilih sebagai solusi mitigasi atas keterbatasan metode perancangan konvensional yang umumnya masih mengandalkan estimasi kapasitas statis. Metode konvensional tersebut memiliki risiko ketidakakuratan dalam memprediksi performa sistem terhadap fluktuasi cuaca dan beban dinamis, yang berpotensi menyebabkan *oversizing* (pemborosan biaya) atau *undersizing* (kegagalan daya) pada tahap implementasi [11], [13], [15]. Kerangka alur dan tahapan sistematis dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1.

Untuk menghasilkan desain yang presisi, penelitian ini mengadopsi pendekatan simulasi hibrida yang menggabungkan analisis profil beban intermiten dengan

optimasi biaya siklus hidup. Proses validasi dilakukan menggunakan dua perangkat lunak terstandarisasi. HOMER Pro akan digunakan untuk menentukan konfigurasi komponen paling optimal berdasarkan indikator *Net Present Cost* (NPC) terendah, merujuk pada validitas metode ini dalam studi kelayakan energi wilayah Karawang. Sementara itu, PVsyst akan digunakan untuk analisis teknis mendalam guna mengevaluasi parameter performa sistem, termasuk pengaruh variabel lingkungan spesifik seperti rugi-rugi koleksi (*array losses*) dan rugi-rugi termal (*thermal losses*) terhadap efisiensi total serta ketersediaan energi (*solar fraction*) sistem [10][11][13][18].



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

A. Lokasi dan Potensi Energi

Alat FLOW (*Floating Litter Automatic Waste-Bin*) direncanakan akan dipasang pada area bantaran sungai di Desa Mekarjati, Kabupaten Karawang, Jawa Barat. Lokasi ini dipilih karena dari hasil observasi merupakan titik krusial aliran sungai di wilayah hilir yang sering mengalami penumpukan sampah. Secara geografis, titik koordinat penempatan alat terletak pada 6°15' Lintang Selatan dan 107°17' Bujur Timur seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penempatan Alat FLOW pada Saluran Irigasi Desa Mekarjati

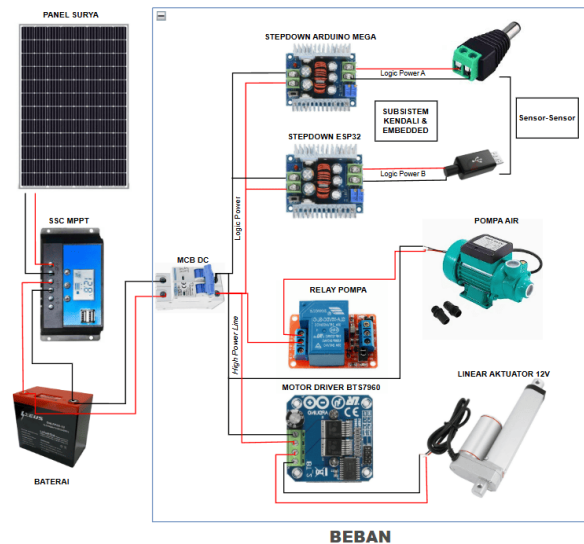
Untuk parameter simulasi energi, data radiasi matahari dan temperatur diambil dari data basis NASA *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)* dan *Meteonorm 8.2* yang terintegrasi dalam *software* simulasi. Pemilihan lokasi ini sangat strategis karena wilayah Karawang memiliki potensi energi surya yang tinggi dan stabil sepanjang tahun, sehingga sangat mendukung penerapan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber daya utama alat [13]. Data potensi energi matahari di lokasi penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data potensi energi matahari di Desa Mekarjati, Kabupaten Karawang, Jawa Barat

Bulan	Iradiasi Matahari Global (kWh/m ² /hari)	Suhu Lingkungan (°C)	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	4.35	25.4	1.20
Februari	4.51	25.3	1.20
Maret	4.92	25.7	1.08
April	4.86	25.9	0.90
Mei	4.68	26.5	0.90
Juni	4.47	25.8	0.99
Juli	4.68	25.7	1.09
Agustus	4.96	26.0	1.30
September	5.09	26.1	1.30
Oktober	5.13	26.8	1.10
November	4.53	26.0	1.00
Desember	4.53	25.7	1.10
Rata-rata	4.73	25.9	1.1

B. Konfigurasi Sistem dan Profil Beban

Sistem catu daya alat pembersih sampah terapung dirancang menggunakan konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *off-grid* yang mampu beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik. Sistem ini berfungsi sebagai sumber energi utama untuk semua komponen listrik pada alat FLOW. Konfigurasi sistem menggunakan topologi *DC-coupled off-grid*, di mana energi dari modul surya disimpan pada baterai melalui *solar charge controller* (SCC) tipe MPPT dan langsung digunakan untuk menyuplai seluruh beban DC. Penggunaan inverter DC-AC tidak digunakan untuk meminimalkan rugi-rugi konversi energi dan juga beban tidak ada yang menggunakan listrik AC.



Gambar 3. Skema Rangkaian Distribusi Daya dan Konfigurasi Beban

Analisis kebutuhan energi dilakukan dengan mengidentifikasi spesifikasi daya seluruh komponen aktif yang tertera pada skema rangkaian Gambar 3. Strategi manajemen energi diterapkan melalui metode operasional intermiten pada beban mekanik utama untuk meminimalkan *depth of discharge* baterai. Berdasarkan perhitungan akumulatif sebagaimana dirincikan pada Tabel 2, total kebutuhan energi harian sistem diproyeksikan mencapai 560,18 *Wh/hari* dengan beban puncak 220,23 *Watt*. Data profil beban ini akan digunakan sebagai parameter masukan utama dalam simulasi kinerja sistem menggunakan perangkat lunak PVsyst.

Tabel 2. Kebutuhan daya alat pengisap sampah sungai (FLOW)

Komponen	Tegangan (V)	Daya (W)	Waktu Operasi (Jam/Hari)	Total Energi (Wh/hari)
Pompa Air Utama (180W)	12	180,00	2,4 Jam*	432,00
Linear Actuator	12	38,40	2,4 Jam*	92,16
Relay Module	12	0,36	2,4 Jam*	0,86
ESP32 (Master IoT)	5	0,75	24 Jam	18,00
Arduino Mega (Slave)	7	0,35	24 Jam	8,40
Sensor Ultrasonik (3 Unit)	5	0,24	24 Jam	5,76
Sensor Arus INA219	5	0,005	24 Jam	0,12
Stepdown Converter Loss	12	0,12	24 Jam	2,88
Total		220,23 Watt		560,18 Wh/hari

*Durasi 2,4 jam merupakan akumulasi dari 48 siklus operasional harian dengan durasi 3 menit per siklus untuk mengoptimalkan konsumsi daya beban mekanik.

C. Perhitungan Kapasitas Komponen (Manual Sizing)

1. Penentuan Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai dihitung berdasarkan total konsumsi energi harian (E_{total}), tegangan sistem (V_{sys}), dan batas aman pengurasan atau *Depth of Discharge (DoD)*. Sistem menggunakan V_{sys} sebesar 12 V dan batas aman *DoD* sebesar 80% (0,8) untuk menjaga umur pakai baterai. Kapasitas baterai minimum (C_{bat})dihitung menggunakan Persamaan (1) [19]:

$$C_{bat} = \frac{E_{total}}{V_{sys} \cdot DoD} \tag{1}$$

Dengan mengacu pada Tabel 2 total konsumsi energi harian sebesar 560,18 Wh, maka kebutuhan kapasitas baterai dihitung sebagai berikut:

$$C_{bat} = \frac{560,18 Wh}{12V \cdot 0,8} = 58,33 Ah \tag{2}$$

Berdasarkan hasil perhitungan pada persamaan 2, kapasitas baterai minimum yang dibutuhkan adalah 58,33 Ah. Oleh karena itu, dipilih baterai dengan kapasitas nominal 60 Ah (12 V) yang merupakan kapasitas komersial terdekat untuk memenuhi kebutuhan energi sistem serta menyediakan cadangan daya yang memadai.

2. Penentuan Kapasitas Panel Surya

Kapasitas daya puncak panel surya (P_{peak}) ditentukan untuk memenuhi kebutuhan energi harian sistem dengan mempertimbangkan faktor keamanan (*Safety Factor, SF*) sebesar 1,4 serta durasi penyinaran efektif matahari (*Peak Sun Hours*) yaitu selama 5 jam per hari. Persamaan yang digunakan untuk menghitung kapasitas daya puncak panel surya ditunjukkan pada Persamaan (3) [19]:

$$P_{peak} = \frac{E_{total} \cdot SF}{T_{sun}} \tag{3}$$

Dengan menyubstitusikan nilai parameter yang digunakan, maka diperoleh:

$$P_{peak} = \frac{560,18 Wh \cdot 1,4}{5 h} = 156,8 Wp \tag{4}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, kebutuhan daya puncak minimum pada panel surya adalah 156,8 Wp. Oleh karena itu, dipilih panel surya dengan kapasitas 200 Wp, yang merupakan kapasitas komersial terdekat, untuk meningkatkan keandalan sistem dan memastikan pengisian baterai yang optimal pada kondisi cuaca yang bervariasi.

3. Penentuan Solar Charge Controller (SCC)

Spesifikasi pada arus minimum Solar Charge Controller (SCC) ditentukan berdasarkan arus hubung singkat (*Short Circuit Current, I_{sc}*) dari panel surya yang digunakan, dengan penambahan faktor keamanan sebesar 25% (faktor pengali 1,25). Penentuan arus minimum SCC dirumuskan pada Persamaan (5) [19]:

$$I_{min} = I_{sc} \cdot 1,25 \tag{5}$$

Mengacu pada spesifikasi panel surya Maysun MS200M-60 (200 Wp) yang memiliki nilai I_{sc} sebesar 11,67 A, maka arus minimum SCC dihitung sebagai berikut:

$$I_{min} = 11,67 A \cdot 1,25 = 14,59 A \tag{6}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, dipilih *Solar Charge Controller* dengan kapasitas 20 A, yang memberikan margin keamanan yang memadai dibandingkan SCC berkapasitas 10 A yang berada di bawah kebutuhan arus minimum sistem.

D. Konfigurasi Simulasi

Simulasi dilakukan untuk memvalidasi desain teknis dan kelayakan ekonomi sistem PLTS *off-grid* yang terpasang di tepi sungai. Perangkat lunak PVsyst digunakan untuk analisis potensi energi dan rugi-rugi sistem, sedangkan HOMER Pro digunakan untuk analisis ekonomi dan optimasi komponen.

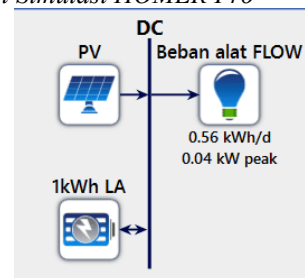
1. Konfigurasi Simulasi PVsyst

Simulasi PVsyst difokuskan pada evaluasi performa energi sistem berdasarkan kondisi lingkungan sungai dan konfigurasi modul surya yang digunakan. Parameter utama simulasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Simulasi PVsyst

Parameter	Nilai
Jenis Sistem	Off-grid (stand-alone)
Lokasi	Karawang, Jawa Barat
Sumber Data Iklim	Meteonorm 8.0
Kapasitas Panel	200 Wp
Orientasi (Azimuth)	0° (Utara)
Kemiringan (Tilt)	10°
Albedo	0,20
System Losses	Default PVsyst

2. Konfigurasi Simulasi HOMER Pro



Gambar 4. Skema Konfigurasi Sistem PLTS *Off-grid* pada Simulasi HOMER Pro

Pemodelan sistem dilakukan menggunakan topologi *DC-coupled* yang menghubungkan komponen panel surya, baterai, dan beban elektrik alat FLOW pada satu bus DC, sebagaimana ditunjukkan pada skema Gambar 4. Simulasi HOMER Pro digunakan untuk mengevaluasi kelayakan tekno-ekonomi sistem berdasarkan konfigurasi teknis dan biaya komponen yang digunakan. Parameter simulasi dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Simulasi HOMER Pro

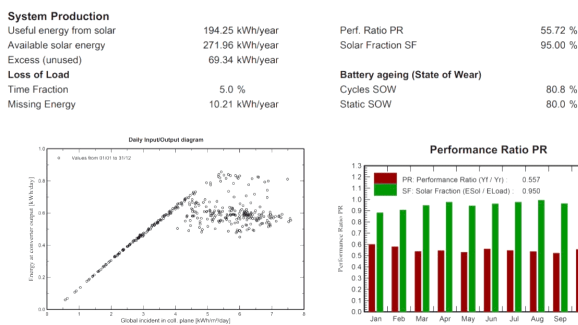
Parameter	Nilai
Kapasitas PV	200 Wp
Kapasitas Baterai	12 V – 60 Ah
Strategi Operasi	Cycle Charging

Parameter	Nilai
Umur Proyek	20 Tahun
Discount Rate	6%
Profil Beban	560,18 Wh/hari (Random Variability 10%)
Biaya Panel Surya	Rp 6.000/Wp
Biaya Baterai	Rp 1.500.000
Biaya SCC MPPT	Rp 500.000
Biaya O&M	Rp 50.000/tahun

III. HASIL PENELITIAN

A. Hasil Simulasi Teknis Menggunakan PVsyst

Evaluasi kinerja teknis dilakukan untuk memvalidasi keandalan desain sistem PLTS *off-grid* dalam memenuhi kebutuhan energi alat pembersih sampah terapung atau FLOW terhadap dinamika kondisi lingkungan di lokasi penelitian. Visualisasi hasil simulasi utama terkait parameter produksi energi dan efisiensi sistem disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Ringkasan Hasil Simulasi Performa Sistem (PVsyst)

Berdasarkan hasil simulasi *software* Pvsyst, konfigurasi sistem dengan kapasitas array PV 200 Wp mampu menghasilkan energi berguna (*useful energy*) sebesar 194,25 kWh/tahun. Analisis efisiensi pada sistem menunjukkan nilai *Performance Ratio* (PR) tahunan sebesar 55,72%. Meskipun nilai PR ini tampak moderat jika dibandingkan dengan sistem *grid-tied* (yang umumnya >75%), nilai tersebut merupakan karakteristik wajar bagi sistem *off-grid* mandiri [20]. Rendahnya PR pada kasus ini bukan semata-mata diakibatkan oleh inefisiensi komponen, melainkan adanya pembatasan produksi energi saat baterai mencapai kondisi penuh (*fully charged*), sehingga potensi energi surya tidak dapat diserap sepenuhnya oleh sistem [21]. Fenomena pada pembatasan daya ini terkonfirmasi secara visual melalui grafik *Daily Input/Output* pada Gambar 5 yang terketak di kiri bawah. Sebaran titik data menunjukkan pola mendatar (*plateau*) pada tingkat iradiasi tinggi, yang mengindikasikan bahwa sistem secara aktif memangkas produksi energi (*clipping*) ketika kapasitas penyimpanan baterai telah mencapai batas maksimum, meskipun potensi energi matahari masih tersedia.

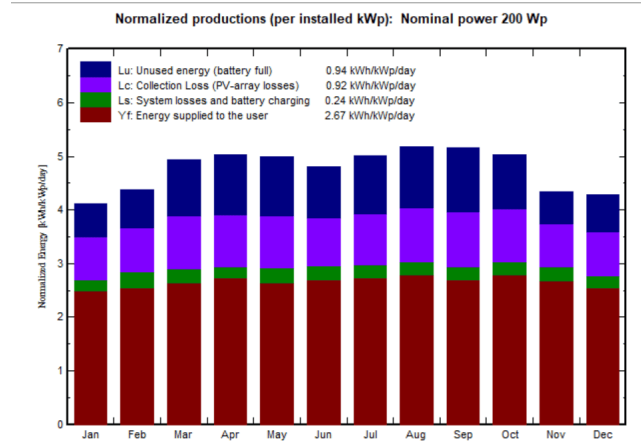
Keandalan suplai daya dievaluasi melalui parameter *Solar Fraction* yang mencapai 95%, mengindikasikan bahwa mayoritas kebutuhan beban tahunan dapat dipasok atau disuplai secara langsung oleh energi surya. Adapun energi yang tidak dapat terpenuhi (*missing energy*) tercatat sebesar 10,21 kWh/tahun atau setara dengan 5% dari total kebutuhan beban tahunan (204,46 kWh). Mengingat aplikasi alat pembersih ini bukan merupakan beban kritis (*critical load*) seperti peralatan medis, tingkat kegagalan suplai sebesar 5%

masih berada dalam batas toleransi operasional yang dapat diterima. Data neraca energi bulanan sistem ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Neraca Energi Tahunan Hasil Simulasi PVsyst

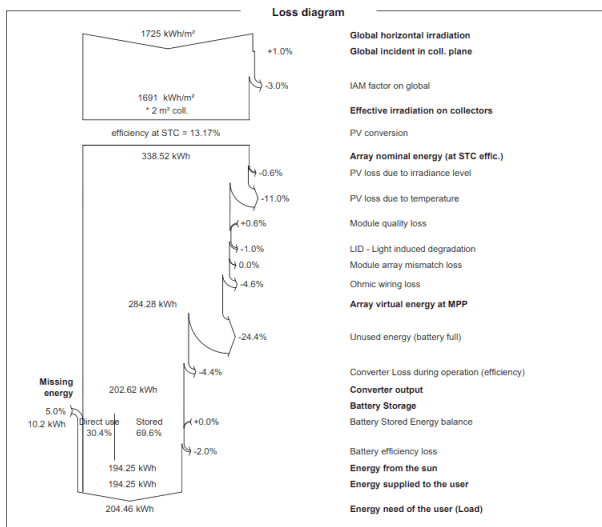
Bulan	Iradiasi Global (kWh/m ²)	Energi Tersedia (kWh)	Energi ke Beban (kWh)	Energi Hilang (kWh)	Solar Fraction
Januari	134,7	19,64	15,31	2,057	0,882
Februari	126,2	19,13	14,21	1,479	0,906
Maret	152,4	23,66	16,42	0,941	0,946
April	145,9	23,60	16,38	0,420	0,975
Mei	145,1	24,11	16,36	1,004	0,942
Juni	134,0	22,73	16,15	0,654	0,961
Juli	145,0	24,42	16,94	0,427	0,975
Agustus	153,9	25,18	17,25	0,117	0,993
September	152,7	24,12	16,17	0,630	0,962
Oktober	158,9	24,32	17,29	0,070	0,996
November	136,0	20,41	15,98	0,821	0,951
Desember	140,4	20,64	15,77	1,592	0,908
Total/Rata-rata	1725,3	271,96	194,25	10,212	0,950

Validasi kinerja sistem diperdalam menggunakan standar IEC 61724 melalui grafik produksi ternormalisasi (*Normalized Productions*) yang ditampilkan pada Gambar 6. Grafik ini memetakan proporsi energi harian menjadi tiga komponen utama: energi tersuplai (Y_f), kerugian koleksi (Y_c), dan kerugian sistem (Y_s).



Gambar 6. Grafik Produksi Ternormalisasi (*Normalized Productions*)

Terlihat pada Gambar 6 terkait grafik ternormalisasi didominasi batang berwarna biru gelap (*Unused energy, L_u*) yang signifikan sepanjang tahun. Temuan ini konsisten dengan pola saturasi pada Gambar 5 sebelumnya, yang mengonfirmasi bahwa kapasitas panel surya menghasilkan surplus energi yang besar melampaui kapasitas penyerapan baterai. Surplus ini tentunya berfungsi sebagai margin keamanan (*safety margin*) untuk menjamin ketersediaan daya saat kondisi cuaca mendung. Selanjutnya, Analisis terkait faktor-faktor yang mempengaruhi penurunan performa sistem diuraikan melalui diagram rugi-rugi (*Loss Diagram*) pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram Rugi-rugi (Loss Diagram) dan Aliran Energi Sistem Hasil Simulasi PVsyst

Berdasarkan Gambar 7, teridentifikasi bahwa rugi-rugi terbesar pada sisi koleksi (*array capture losses*) yang didominasi oleh pengaruh temperatur modul termal. Fenomena ini sejalan dengan kondisi lokasi penelitian di Karawang yang memiliki temperatur lingkungan rata-rata cukup tinggi. Temuan penting lainnya yaitu tingginya nilai energi tak terpakai (*unused energy*) sebesar 69,34 kWh/tahun. Hal ini mengonfirmasi bahwa kapasitas pada panel surya 200 Wp sesungguhnya menghasilkan surplus energi yang signifikan, namun tidak dapat dimanfaatkan dengan alasan keterbatasan kapasitas penyimpanan baterai (*battery full scenarios*). Meskipun menurunkan nilai efisiensi (PR), surplus energi ini justru berperan positif sebagai margin keamanan (*safety margin*) untuk menjamin ketersediaan daya saat kondisi cuaca mendukung berkepanjangan secara tiba-tiba.

B. Hasil Simulasi Homer Pro Keandalan Dan Penyimpanan Energi

Evaluasi terhadap kontinuitas suplai daya (*continuity of supply*) dilakukan dengan menganalisis keseimbangan antara produksi energi surya dan profil beban dinamis alat FLOW. Hasil simulasi operasional sistem selama satu tahun penuh disajikan secara komprehensif pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil Simulasi Ringkasan Kinerja Elektrikal Sistem (HOMER Pro)

Tabel 6. Parameter Kinerja Teknis Hasil Optimasi

Parameter	Nilai (kWh/tahun)	Persentase
Produksi Panel Surya (PV)	368	100%
Konsumsi Beban (<i>Load</i>)	204	100%
Energi Berlebih (<i>Excess</i>)	135	36,8%
Kekurangan Daya (<i>Unmet Load</i>)	0,087	0,04%
Kekurangan Kapasitas	0,185	0,09%

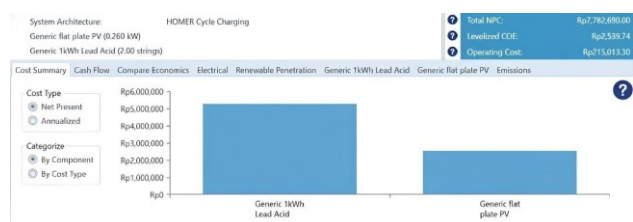
Berdasarkan data pada Gambar 8 didukung dengan Tabel 6, sistem PLTS *off-grid* yang dirancang menunjukkan performa stabilitas yang sangat tinggi. Hal ini dikuantifikasi melalui parameter *Unmet Electric Load* yang tercatat hanya sebesar 0,0870 kWh/tahun, atau hanya setara dengan 0,0425% dari total kebutuhan energi tahunan. Nilai ini sangat jauh di bawah ambang batas toleransi kegagalan sistem mandiri konvensional yang umumnya mensyaratkan nilai *Loss of Load Probability* (LOLP) maksimum sebesar 1% untuk menjamin kontinuitas suplai daya [22], [23]. Hal ini tentunya mengindikasikan bahwa sistem mampu melayani kebutuhan beban alat secara penuh hampir sepanjang waktu operasional tanpa insiden pemutusan daya (*blackout*) yang signifikan. Indikator keandalan ini turut diperkuat oleh nilai *Capacity Shortage* yang sangat rendah, yaitu hanya sekitar 0,09%.

Tingginya tingkat keandalan tersebut didukung oleh neraca energi positif (*positive energy balance*), di mana total produksi energi tahunan mencapai sebesar 368 kWh, hal ini jauh melampaui total konsumsi beban DC sebesar 204 kWh. Selisih signifikan ini tentunya menghasilkan surplus energi (*excess electricity*) sebesar 135 kWh/tahun atau sebesar 36,8% dari total produksi. Dalam konteks sistem mandiri, besarnya surplus energi ini bukan merupakan inefisiensi, melainkan berfungsi penting sebagai margin keamanan (*safety margin*) untuk memastikan baterai dapat terisi penuh kembali (*recharge*) dengan cepat setelah mengalami siklus pengosongan dalam (*deep discharge*), terutama pasca kondisi cuaca mendukung dilokasi.

Analisis visual terhadap grafik batang produksi bulanan (*Monthly Electric Production*) pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa produksi energi relatif stabil di yang hanya berada pada kisaran 25 – 35 kWh/bulan sepanjang tahun. Bahkan pada bulan-bulan dengan curah hujan tinggi (seperti pada bulan Januari-Februari), produksi energi minimum masih berada di atas kebutuhan beban bulanan (rata-rata 17 kWh/bulan). Konsistensi profil produksi ini, dikombinasikan dengan adanya surplus energi (*Excess Electricity*) yang mencapai hingga 135 kWh/tahun, sehingga hal ini menegaskan bahwa konfigurasi sistem memiliki ketahanan (*resilience*) yang memadai untuk beroperasi secara mandiri di lingkungan sungai yang memiliki variabilitas cuaca tinggi, karena cadangan daya dapat dipulihkan dengan cepat setelah pemakaian malam hari.

C. Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi dan Siklus Hidup Sistem

Analisis kelayakan ekonomi dilakukan untuk dapat mengestimasi total biaya investasi awal (*Initial Capital*) dan biaya operasional sistem selama umur proyek 20 tahun.



Gambar 9. Ringkasan Kelayakan Ekonomi dan Biaya Siklus Hidup (HOMER Pro)

Berdasarkan hasil simulasi *software Homer pro* pada Gambar 9, sistem PLTS *off-grid* yang dirancang memiliki nilai *Net Present Cost* (NPC) total sebesar Rp 7.782.690. Adapun hasil Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik atau *Levelized Cost of Energy* (COE) tercatat sebesar Rp 2.539,74/kWh.

Nilai investasi dan biaya energi tersebut merepresentasikan kelayakan ekonomi untuk mendukung operasional mandiri (*energy independence*) pada alat FLOW di lingkungan sungai. Mengingat lokasi operasional di sungai yang tentunya memiliki keterbatasan akses energi, besaran biaya ini dapat dijustifikasi sebagai investasi strategis untuk menjamin keberlanjutan fungsi pembersihan sampah secara kontinu selama 20 tahun tanpa membebani biaya operasional rutin.

Rincian struktur biaya siklus hidup (*lifecycle cost breakdown*) untuk setiap komponen sistem diuraikan secara detail pada Tabel 7.

Tabel 7. Rincian Biaya Siklus Hidup Sistem (*Cost Breakdown*) menggunakan Homer Pro

Komponen	Capital (Rp)	Replacement (Rp)	Biaya O&M	Total NPC
Baterai (<i>Lead Acid</i>)	3.000.000	2.251.308	0	5.251.308
Panel Surya (PV) & SCC	1.557.838	0	973.544	2.531.382
Total Sistem	4.557.838	2.251.308	973.544	7.782.690

Data pada Tabel 7 menampilkan dominasi komponen penyimpanan energi terhadap total anggaran proyek. Komponen baterai menyumbang biaya terbesar yakni mencapai sekitar Rp 5,25 juta atau setara dengan 67,5% dari total NPC sistem. Tingginya porsi biaya ini karena disebabkan oleh karakteristik teknis baterai *Lead-Acid* yang memiliki masa pakai (*lifetime*) terbatas, sehingga membutuhkan alokasi biaya penggantian (*replacement cost*) periodik sekitar Rp 2,25 juta, selama 20 tahun masa proyek.

Sebaliknya, Pada komponen pembangkitan yang terdiri dari Panel Surya dan *Charge Controller* (SCC) hanya berkontribusi sebesar 32,5% dari total biaya sebesar Rp 2,53 juta. Berbeda dengan baterai, struktur biaya panel surya tentunya didominasi oleh modal awal (*Capital Cost*) sebesar Rp 1,55 juta dan biaya operasional pemeliharaan (*O&M*) sekitar Rp 973 ribu, tanpa adanya beban biaya penggantian komponen utama selama periode operasi. Analisis ini mengimplikasikan bahwa keberlanjutan ekonomi sistem sangat bergantung pada manajemen pemeliharaan baterai untuk meminimalkan frekuensi penggantian di masa depan.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan memvalidasi analisis tekno-ekonomi sistem catu daya PLTS *off-grid* untuk pemenuhan energi alat pembersih sampah terapung (FLOW)

menggunakan simulasi terintegrasi. Secara teknis, konfigurasi sistem terbukti sangat andal dalam melayani beban dinamis alat. Hal ini dibuktikan dengan tingkat pemenuhan energi (*Solar Fraction*) yang mencapai 95% serta tingkat kekurangan daya (*Unmet Electric Load*) yang sangat kecil, yaitu hanya sebesar 0,04% per tahun. Meskipun sistem mencatat nilai *Performance Ratio* (PR) tahunan sebesar 55,72% dan menghasilkan kelebihan energi (*excess electricity*) sebesar 36,8%, hal ini bukan merupakan pemborosan. Surplus tersebut justru berfungsi secara strategis sebagai margin keamanan (*safety margin*) yang krusial guna menjamin alat tetap beroperasi saat menghadapi kondisi cuaca yang buruk. Dari perspektif tekno-ekonomi, sistem catu daya mandiri ini terbukti layak dan efisien untuk diimplementasikan. Simulasi kelayakan ekonomi selama umur proyek 20 tahun menunjukkan total nilai investasi *Net Present Cost* (NPC) sebesar Rp 7.782.690 dan *Cost of Energy* (COE) yang sangat kompetitif, yakni Rp 2.539,74/kWh. Komponen baterai *Lead-Acid* menjadi penyumbang biaya dominan sebesar 67,5% dari total NPC akibat keharusan penggantian secara berkala. Implikasi dari penelitian ini menegaskan bahwa desain PLTS *off-grid* ini sangat strategis dan dapat diandalkan sebagai solusi krisis daya untuk operasional alat pelestarian lingkungan sungai yang berada di luar jangkauan jaringan listrik konvensional. Keberlanjutan sistem ke depannya akan sangat bergantung pada efektivitas manajemen pemeliharaan baterai guna menekan pengeluaran jangka panjang.

REFERENSI

- [1] A. Nggilu, N. R. Arrazaq, and T. Thayban, "DAMPAK PEMBUANGAN SAMPAH DI SUNGAI TERHADAP LINGKUNGAN DAN MASYARAKAT DESA KARYA BARU," *Norm. (Jurnal Pendidikan)*, vol. 10, no. 3, Feb. 2023, Accessed: Feb. 12, 2026. [Online]. Available: <https://ejurnal.pps.ung.ac.id/index.php/JN/article/view/1795>
- [2] SIPSAN, "Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional," SIPSAN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. Accessed: Feb. 12, 2026. [Online]. Available: <https://portal-sipsn.kemlnh.go.id/>
- [3] S. Permatasari, R. Arifin, and P. Kotabaru, "Analysis of Seabins Using Lightweight Concrete to Clean Up Plastic Waste on The Coast of Semayap Village, Kotabaru Regency," *J. IPTEK*, vol. 29, no. 2, pp. 241–248, Dec. 2025, doi: 10.31284/j.ipitek.2025.v29i2.8436.
- [4] S. K. Sahoo, A. Nizami, S. Wahajuddin, and G. Smruthi, "Design and Fabrication of Seabin Project for Efficient Collection of Water Waste Using Solar Energy," *CVR J. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 144–147, 2021, doi: 10.32377/cvrjst2121.
- [5] M. R. K. N. Aditya, P. Muzdalifah, D. Aulia Rahman, H. Tri Saputra, Y. Adi Pratama, and R. Entikaria Rachmanita, "RC Boat Trash Collector berbasis Solar Cell sebagai Solusi Pembersihan Sampah Anorganik pada Permukaan Air Sungai," *ARMATUR Artik. Tek. Mesin Manufaktur*, vol. 5, no. 1, pp. 8–14, 2024, doi: 10.24127/armatur.v5i1.4875.
- [6] A. Mahmuda, J. Iriani, I. A. Ginting, T. Listrik, T. Elektro, and P. N. Medan, "RANCANG BANGUN TRASH TRAP TENAGA SURYA PADA SALURAN AIR DI KEL. TITI RANTAI," *Pros. Konf. Nas. Soc. Eng. Polmed*, vol. 5, no. 1, pp. 940–946, 2024, doi: 10.51510/KONSEP.V5I1.1921.
- [7] H. Mukhtar, D. Perdana, P. Sukarno, and A. Mulyana, "Sistem Pemantauan Kapasitas Sampah Berbasis IoT (SiKaSiT) untuk Pencegahan Banjir di Wilayah Sungai Citarum Bojongsong Kabupaten Bandung," *J. Teknol. Lingkungan*, vol. 21, p. 56, Jan. 2020, doi: 10.29122/jtl.v21i1.3622.
- [8] E. Prayetno, A. Hekso Yunianto, I. Fatiroh, and R. Asyhar, "Perancangan Alat Penghisap dan Pengangkat Sampah pada Permukaan Laut Berbasis Mikrokontroler," *J. Sustain. J. Has.*

- Penelit. dan Ind. Terap.*, vol. 9, no. 1, pp. 23–30, May 2020, doi: 10.31629/sustainable.v9i1.1983.
- [9] S. Arif, J. Taweekun, H. M. Ali, A. Ahmed, and A. A. Bhutto, “Building Resilient communities: Techno-economic assessment of standalone off-grid PV powered net zero energy (NZE) villages,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, p. e21426, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21426.
- [10] M. R. Ahmed, S. M. Saklain, M. Saumik, N. Rahman, A. Al Noman, and R. Islam, “Techno-economic investigation of a solar Photovoltaic (PV) energy model using PVsyst, Homer, RETScreen: a case study in Bangladesh,” *Discov. Electron.* 2025 21, vol. 2, no. 1, pp. 81–, Oct. 2025, doi: 10.1007/s44291-025-00119-1.
- [11] I. Hartopo, A. Y. Rosyadi, I. Hartopo, and A. Y. Rosyadi, “Desain Sistem PLTS Hybrid dengan Pemodelan HOMER Pro dan PVSyst di Desa Semang, NTT, Indonesia,” *JTERA (Jurnal Teknol. Rekayasa)*, vol. 10, no. 1, pp. 113–122, Jun. 2025, doi: 10.31544/jtera.v10.i1.2025.113-122.
- [12] A. T. Anggito, “Model dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hybrid di Kepulauan Siau Sebagai Alternatif Energi Terbaru,” *Pendas J. Ilm. Pendidik. Dasar*, vol. 10, no. 04, pp. 1–13, Dec. 2025, doi: 10.23969/IP.V10I04.36631.
- [13] F. N. Husna and D. B. Santoso, “Simulasi PLTS Off-Grid Rumah Tangga di Karawang Menggunakan Homer Pro,” *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 9, no. 2, pp. 548–555, Apr. 2025, doi: 10.36277/jteuniba.v9i2.1256.
- [14] D. T. Laksono *et al.*, “Simulasi dan Perancangan PLTS Offgrid 3 kW Menggunakan Software PVsyst,” *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 9, no. 2, pp. 581–588, Apr. 2025, doi: 10.36277/jteuniba.v9i2.1264.
- [15] A. Irma Aryanti, C. Angel, M. Rezky, A. . Shiddiq Yunus, D. Nur, and Y. Yanafirana, “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Atap Kantor PT. Sinopacific Peralatan Indonusa Makassar dengan Sistem Hybrid,” *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 22, no. 1, pp. 143–157, Sep. 2024, doi: 10.31963/sinergi.v22i1.5000.
- [16] R. J. Chilundo, U. S. Mahanjane, D. Neves, R. J. Chilundo, U. S. Mahanjane, and D. Neves, “Design and Performance of Photovoltaic Water Pumping Systems: Comprehensive Review towards a Renewable Strategy for Mozambique,” *J. Power Energy Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 32–63, Jul. 2018, doi: 10.4236/jpee.2018.67003.
- [17] M. Artiyasa, M. Natsir, and B. Ozsut, “Design and Performance Analysis of OFFGRID PV mini-grid systems Simulation PVSYST in Sukabumi, West Java, Indonesia,” *Int. J. Eng. Appl. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 33–39, May 2023, doi: 10.52005/ijeat.v6i1.82.
- [18] D. A. Saputra and D. P. Setianingsih, “Analisis dan Perencanaan Kapasitas Optimal Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Software PVSyst,” *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 10, no. 1, pp. 714–722, 2025, doi: 10.36277/jteuniba.v10i1.1278.
- [19] M. I. Kamil, F. Arifin, and T. Dewi, “Design and Implementation of Solar Energy in ATG, CCDS and Pantry Maintenance Monitoring Systems,” *Int. J. Res. Vocat. Stud.*, vol. 4, no. 3, pp. 08–16, 2024, doi: 10.53893/ijrvocas.v4i3.295.
- [20] P. Fernandes, A. Reis, L. N. Velasco, T. M. Francisco, Ê. C. Resende, and L. C. G. Freitas, “Evaluation of a Grid-Connected Photovoltaic System at the University of Brasilia Based on Brazilian Standard for Performance Monitoring and Analysis,” *Sustainability*, vol. 16, no. 24, 2024, doi: 10.3390/su162411212.
- [21] T. M. N. T. Mansur, N. H. Baharudin, and R. Ali, “Performance analysis of self-consumed solar PV system for a fully DC residential house,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 391–398, 2017, doi: 10.11591/ijeecs.v8.i2.pp391-398.
- [22] E. Quiles, C. Roldán-Blay, G. Escrivá-Escrivá, and C. Roldán-Porta, “Accurate Sizing of Residential Stand-Alone Photovoltaic Systems Considering System Reliability,” *Sustainability*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.3390/su12031274.
- [23] Z. Šimić, M. Barukčić, G. Knežević, and D. Topić, “Optimization of an Off-Grid PV System with Respect to the Loss of Load Probability Value,” *Energies*, vol. 18, no. 19, 2025, doi: 10.3390/en18195174.