

ANALISIS TEKNO-EKONOMI PLTS ON-GRID ROOFTOP IGD RSUD SOEDOMO TRENGGALEK

Muhamad Dwi Maulana^{1*)}, Feri Adriyanto² dan Inayati³

^{1,2}Magister Teknik Elektro, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

³Teknik Kimia, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

*) E-mail: dwimaulana@student.uns.ac.id

Abstrak

Tingginya kebutuhan listrik ruang IGD RSUD dr. Soedomo Trenggalek dan ketergantungan pada pasokan berbasis fosil mendorong pemanfaatan PLTS *on-grid rooftop* untuk mendukung *Smart Green Hospital* dan target *Net Zero Emission*. Penelitian ini mengevaluasi kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan dari sistem PLTS eksisting melalui analisis konsumsi energi, konfigurasi sistem, pemodelan dengan PVsyst, perhitungan LCOE dan indikator finansial, serta analisis lingkungan di lokasi. Hasil pengujian selama tujuh hari dengan radiasi harian 4,848 kWh/m², sistem memproduksi energi rata-rata 216,56 kWh/hari, *Performance Ratio* 81,22%, rugi sistem sekitar 22,1%, investasi awal Rp 2.044.546.285, biaya operasi dan pemeliharaan Rp 8.500.000/tahun, tarif listrik Rp 1.444,70/kWh, serta tingkat diskonto 6%, sistem menghasilkan sekitar 79,04 MWh/tahun, menghemat Rp 114.195.445/tahun, memberikan *Payback Period* ±18 tahun, dan mereduksi emisi sekitar 1.323,6 ton CO₂ selama 25 tahun beroperasi. Berdasarkan simulasi PVsyst dengan parameter PLTS eksisting, diprediksi menghasilkan energi bersih 83,322 MWh/tahun, *Performance Ratio* 0,8444, *Payback Period* 22,1 tahun, dan mereduksi emisi 1.258,693 ton CO₂. Penambahan baterai justru menaikkan investasi sistem menjadi Rp 2.446.937.325, menurunkan produksi menjadi 73,7 MWh/tahun, *Performance Ratio* 0,747, meningkatkan LCOE Rp 1.264.2920/kWh, memperpanjang *Payback Period* 33,6 tahun, reduksi emisi 1.258,693 ton, sehingga kurang optimal secara ekonomi meskipun tetap berkontribusi pada efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon.

Kata kunci: PLTS on-grid rooftop, IGD RSUD Soedomo Trenggalek, LCOE, Smart Green Hospital, Net Zero Emission

Abstract

The high electricity demand of the emergency department at RSUD dr. Soedomo Trenggalek and its reliance on fossil-based supply motivate the adoption of an on-grid rooftop PV system to support a Smart Green Hospital and the Net Zero Emission target. This study evaluates the technical, economic, and environmental feasibility of the existing system using energy-consumption analysis, system-configuration assessment, PVsyst modelling, LCOE and financial indicators, and on-site environmental evaluation. Seven-day measurements with an average irradiation of 4.848 kWh/m² show an average production of 216.56 kWh/day, a performance ratio of 81.22%, system losses of about 22.1%, an initial investment of IDR 2,044,546,285, annual O&M costs of IDR 8,500,000, an electricity tariff of IDR 1,444.70/kWh, and a 6% discount rate. Under these conditions, the system produces 79.04 MWh/year, saves IDR 114,195,445/year, achieves an 18-year payback period, and reduces about 1,323.6 tons of CO₂ over 25 years. PVsyst simulations predict 83.322 MWh/year of net energy, a performance ratio of 0.8444, a 22.1-year payback period, and 1,258.693 tons of CO₂ reduction. Adding batteries increases investment to IDR 2,446,937,325, lowers output to 73.7 MWh/year, yields a performance ratio of 0.747, raises LCOE to IDR 1,264.2920/kWh, and extends payback to 33.6 years, making this option less economical.

Keywords: PLTS on-grid rooftop, IGD RSUD Soedomo Trenggalek, LCOE, Smart Green Hospital, Net Zero Emission

1. Pendahuluan

Indonesia sebagai negara tropis menerima radiasi matahari rata-rata sekitar ~4,8 kWh/m² per hari dengan potensi teknis lebih dari ribuan GigaWatt, sehingga sangat prospektif untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) [1]. Namun demikian, pemanfaatannya baru mencapai sekitar 1% dari potensi

tersebut. Kondisi ini menunjukkan perlunya kebijakan pengelolaan energi termasuk penggunaan PLTS *rooftop* dan manajemen energi digital di rumah sakit. Sektor rumah sakit khususnya Instalasi Gawat Darurat (IGD) sebagai unit yang beroperasi selama 24 jam penuh dan sangat bergantung pada keandalan suplai energi untuk peralatan kritis sehingga rentan terhadap gangguan pasokan dan fluktuasi biaya. Saat ini mayoritas kebutuhan

energi didominasi pada sumber fosil sehingga transisi menuju energi bersih penting untuk menekan ketergantungan dan dampak lingkungannya [2]. Sejalan dengan target *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060, peningkatan penggunaan energi terbarukan sebagai kunci utama. Implementasi PLTS *on-grid rooftop* menjadi strategi efektif untuk menekan biaya operasional, meningkatkan keandalan suplai energi, dan mengurangi emisi secara signifikan [3][4].

Meskipun demikian, penelitian terkait PLTS *on-grid rooftop* pada rumah sakit Indonesia umumnya masih terbatas pada analisis teknis, produksi energi, ekonomi gedung tanpa mengkaji data operasional aktual di ruang IGD, sehingga kajian yang menyoroti validasi performa dan integrasi manajemen energi menuju *Smart Green Hospital* masih jarang dilakukan. Kondisi ini menunjukkan perlunya analisis berbasis data beban nyata IGD dan simulasi presisi menggunakan *software* PVsyst untuk menghitung produksi energi, rasio kinerja, kerugian sistem, optimasi desain, serta reduksi emisi, yang kemudian dievaluasi secara ekonomi menggunakan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) dan indikator lain sebagai dasar perbandingan dengan tarif konvensional dan perumusan strategi pengembangan PLTS *rooftop* sesuai kebutuhan kritis IGD.

Mengingat pentingnya transisi energi dan penghematan energi di IGD, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kelayakan teknis, ekonomi dan lingkungan antara sistem PLTS eksisting dengan hasil simulasi PVsyst pada skenario tanpa dan dengan baterai. Analisis difokuskan pada studi kasus IGD RSUD dr. Soedomo, sehingga hasil diharapkan memberikan gambaran objektif pengembangan PLTS di rumah sakit. Selain itu, temuan penelitian ini dapat menjadi rujukan bagi pengambil kebijakan dalam merancang strategi implementasi PLTS yang optimal pada fasilitas kesehatan lainnya.

PLTS adalah sistem pembangkit listrik yang mengubah energi matahari menjadi listrik. Berdasarkan instalasi, sistem PLTS dibagi menjadi tiga yaitu *off-grid*, *on-grid*, dan *hybrid* dengan pola distribusi terpusat maupun tersebar [5]. Sistem PLTS umumnya terdiri dari modul surya untuk mengubah radiasi matahari menjadi listrik, *inverter* untuk mengubah arus *Direct Current* (DC) ke *Alternating Current* (AC), *mounting system* sebagai penyangga, dan *monitoring system* untuk memastikan kinerja optimal [6]. Setiap komponen memiliki karakteristik efisiensi dan biaya berbeda sehingga pemilihannya perlu dipertimbangkan dengan cermat.

Performa PLTS dipengaruhi parameter teknis seperti *irradiance*, *performance ratio* (PR), efisiensi modul, koefisien temperatur, sudut kemiringan, orientasi, bayangan, dan kerugian sistem. *Irradiance* menentukan besarnya energi surya yang diterima panel, sedangkan PR

menunjukkan efisiensi sistem setelah memperhitungkan kerugian operasional [7]. Efisiensi modul menggambarkan kemampuan konversi energi, namun temperatur tinggi dan *shading* dapat menurunkannya [8][9]. Sudut kemiringan dan orientasi panel menentukan intensitas radiasi, sementara kerugian kabel dan *inverter* perlu diperhitungkan.

Optimalisasi parameter disesuaikan dengan lokasi dan pola beban IGD [10]. Secara umum, kinerja sistem PLTS dapat mengalami penurunan disebabkan berbagai faktor seperti rugi-rugi kabel (*wiring*), debu pada permukaan (*soiling losses*), suhu modul (*temperature losses*), efek bayangan (*shading losses*), *Balance of System* (BOS), serta *mismatch losses* [11][12]. Setiap jenis kerugian tersebut memiliki karakteristik dan besaran yang berbeda, tergantung pada desain sistem, kualitas komponen, kondisi lingkungan, serta pola operasi dan pemeliharaan yang diterapkan.

Sistem tanpa baterai diminati karena biaya investasi dan operasional lebih rendah, namun sepenuhnya bergantung pada keandalan jaringan PLN [13]. Sebaliknya, sistem dengan baterai memerlukan biaya dan kompleksitas lebih tinggi, namun meningkatkan keandalan saat PLN padam. Analisis literatur menunjukkan mayoritas penelitian terdahulu masih berfokus pada simulasi teknis, sementara evaluasi lapangan dan tantangan operasional seperti degradasi panel dan baterai pada IGD belum banyak dikaji.

RSUD Soedomo Trenggalek sebagai fasilitas kesehatan publik membutuhkan pasokan listrik berkelanjutan, stabil, efisien dan rendah emisi untuk mendukung konsep *Smart Green Hospital*. Implementasi PLTS *on-grid rooftop* berkapasitas 55 kWp pada ruang IGD terbukti menjadi langkah strategis meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan pada listrik konvensional, dengan penghematan biaya listrik dari lebih Rp 100 juta menjadi sekitar Rp 90 juta per bulan. Ketersediaan luas atap juga memungkinkan optimalisasi PLTS sebagai sumber energi utama.

Baterai merupakan komponen utama PLTS yang menyimpan energi dari panel surya. Nilai *Depth of Discharge* (DoD) menunjukkan persentase kapasitas baterai yang digunakan selama proses pengisian dan pengosongan. DoD tinggi memungkinkan pengosongan lebih dalam dan fleksibilitas cadangan, harga lebih mahal dan mempercepat penurunan umur pakai. Sebaliknya DoD rendah dapat memperpanjang siklus hidup meskipun kapasitas cadangan terbatas [14]. Pemilihan DoD yang optimal harus mempertimbangkan kebutuhan energi, durasi operasional, serta umur pakai baterai, terutama pada unit kritis seperti IGD. Pada sistem *on-grid*, baterai berfungsi sebagai cadangan penyimpanan energi dan sumber alternatif saat terjadi gangguan listrik.

Tabel 1. Jenis-Jenis Baterai [5]

Kategori	Lithium-Ion	Lead-acid	Flow Batteries
Densitas Energi	Sangat Tinggi	Lebih Rendah	Bervariasi
Efisiensi	Tinggi	Sedang	Tinggi
Keunggulan	Respon cepat	Biaya murah	Skala besar
Kekurangan	Biaya tinggi	Berat	Ukuran besar
Waktu Pengisian	5x lebih cepat dari Lead Acid	Lambat	Bervariasi
Daur Ulang	Fasilitas terbatas	Mudah didaur ulang	Fasilitas terbatas

Aspek kelayakan tekno-ekonomi PLTS *on-grid rooftop* mencakup kesesuaian potensi sumber daya surya dengan pola kebutuhan beban, keandalan kinerja sistem, serta kemampuan integrasi dengan jaringan eksisting, termasuk penentuan kapasitas agar produksi energi mendekati konsumsi sehingga *ekspor-impor* energi dapat diminimalkan. Secara ekonomi, analisis meninjau besarnya investasi awal, biaya operasi dan pemeliharaan, penghematan tagihan listrik, umur proyek, serta indikator finansial seperti *Capital Expenditure* (CAPEX), *Operational Expenditure* (OPEX), LCOE, dan *Payback Period* (PP) untuk memastikan proyek layak, menguntungkan dan kompetitif dibanding pasokan listrik konvensional [15].

Kontribusi terhadap reduksi dampak lingkungan menjadi indikator utama dalam menentukan aspek kelayakan lingkungan, karena tanpa melibatkan proses pembakaran maka PLTS *on-grid rooftop* tidak menghasilkan emisi atau polusi udara selama masa operasionalnya. Implementasi sistem PLTS *rooftop* mampu menurunkan emisi karbon dibandingkan pembangkit berbahan fosil.

2. Metode

Penelitian ini menerapkan metode kuantitatif berbasis eksperimen, menggabungkan pengukuran aktual dan simulasi untuk membandingkan performa teknis, ekonomi, dan dampak lingkungan dari sistem PLTS dengan setiap variable uji pada kondisi terkendali untuk memastikan hasil akurat.

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di ruang IGD RSUD Soedomo Trenggalek dengan koordinat *Latitude* -8.0595° N dan *Longitude* 111.7039° E sebagai lokasi pembanding dalam pengembangan PLTS, baik melalui implementasi lapangan maupun simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst.

2.2. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan penelitian dipilih berdasarkan kebutuhan analisis teknis sistem PLTS meliputi perangkat keras

(*hardware*) berupa modul surya, *inverter* dan *monitoring system*, serta perangkat lunak (*software*) PVsyst 7.4 untuk simulasi dan *Photoshop* 2024 untuk desain. Data pendukung mencakup profil beban listrik IGD bulan Desember Tahun 2024, data meteorologi *Global Solar Atlas*, harga komponen dari Vendor dan biaya operasional.

2.3. Sumber Data

Penelitian ini memanfaatkan data primer yang diperoleh langsung dari PLTS eksisting, sementara data sekunder dari sumber eksternal untuk mendukung analisis teknis, ekonomi, dan lingkungan secara komprehensif.

Tabel 2. Profil Beban Listrik IGD Bulan Desember Tahun 2024

Kategori Peralatan	Nama Peralatan	Jumlah Kebutuhan Daya (W)
Kategori A (Peralatan Medis)	Monitor pasien, ventilator, mesin EKG, lampu operasi, pompa infus elektrik, <i>infant warmer</i> , X-ray, <i>Defibrillator</i> , USG, <i>Nebulizer</i> , Kompresor Oksigen, <i>Sterilizer</i>	92.282
Kategori B (AC dan Ventilasi)	AC ruangan, <i>exhaust fan</i>	24.800
Kategori C (Penerangan dan Elektronik)	Lampu ruangan, TV, printer, Wifi, kulkas/frezezer, peralatan komunikasi, CCTV, printer termal	96.230
Total Beban		213.312

Tabel 3. Konfigurasi Sistem PLTS Eksisting

Nama Komponen	Spesifikasi	Keterangan
Panel Surya	Hicell 510 Wp	Array 12x9
<i>Inverter</i>	Hicell 50 kW <i>On-grid</i>	-
<i>Mounting system</i>	Betor cor, <i>Fixed tilt</i> , <i>roof mounted</i>	Panel menghadap utara, kemiringan 12%
Kabel	DC : PV1-F AC : NYY 6 mm ²	-
Proteksi	MCB DCAC, Fuse DC	-
<i>Monitoring system</i>	Hicell inverter	-

Data radiasi matahari dalam penelitian ini bersumber dari *Global Solar Atlas*, yang akurat hampir setara pengukuran lapangan dengan *Global Horizontal Irradiation* (GHI) 4,848 kWh/m²/hari. Selain itu integrasi baterai Huawei Luna2000 ke sistem PLTS *on-grid* untuk meningkatkan keandalan suplai di IGD, sebagai cadangan saat gangguan PLN sesuai konsep *Smart Green Hospital*. Baterai dipilih karena efisiensi tinggi, umur siklus panjang, performa unggul, dan kompatibilitas *inverter*.

Tingkat inflasi nasional Indonesia sebesar 2,86% (Oktober 2025) digunakan untuk menyesuaikan proyeksi biaya dalam analisis LCOE dan *lifecycle cost* (LCC)

sistem PLTS sehingga estimasi biaya energi lebih realistis dan mencerminkan kondisi ekonomi aktual sektor kesehatan. Investasi untuk membangun PLTS ini sebesar Rp 2.044.546.285, sedangkan umumnya biaya operasional dan pemeliharaan untuk wilayah Indonesia sebesar 1% dari total biaya investasi awal [17][18].

Tabel 4. Estimasi Biaya Pembangunan Sistem PLTS [16]

Jenis Pengadaan	Jumlah	Biaya (Rp)
PV Module	108 buah	909.823.096,83
Inverter	1 buah	218.357.543,24
Instalasi dan Kontruksi	1 kali	218.357.543,24
Balance of System (BOS)	1 kali	181.964.619,37
Perizinan	1 kali	54.589.385,81
Asuransi	1 kali 13%	236.554.005,17
Total Biaya		1.819.646.193,65
PPN 11%		224.900.091,35
Total		2.044.546.285,00

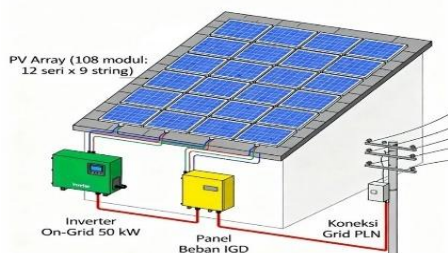
2.4. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun sistematis sebagai berikut:

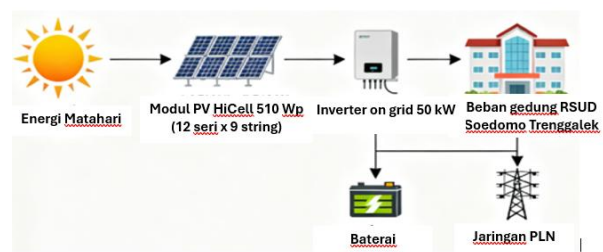
- Studi pendahuluan dan pengumpulan data
- Evaluasi kinerja sistem PLTS *on-grid* eksisting
- Pemodelan eksisting dan simulasi sistem menggunakan PVsyst dengan dua skenario (*on-grid* tanpa baterai berdasarkan data aktual dan *on-grid* dengan integrasi tambahan baterai)
- Analisis teknis mencakup kinerja energi, PR, dan *losses* antar skenario. Sementara analisis ekonomi dengan menghitung CAPEX, OPEX, PP, dan LCOE berdasarkan hasil simulasi dan data biaya aktual.
- Analisis penurunan emisi CO₂
- Penentuan skenario optimal serta penyusunan rekomendasi



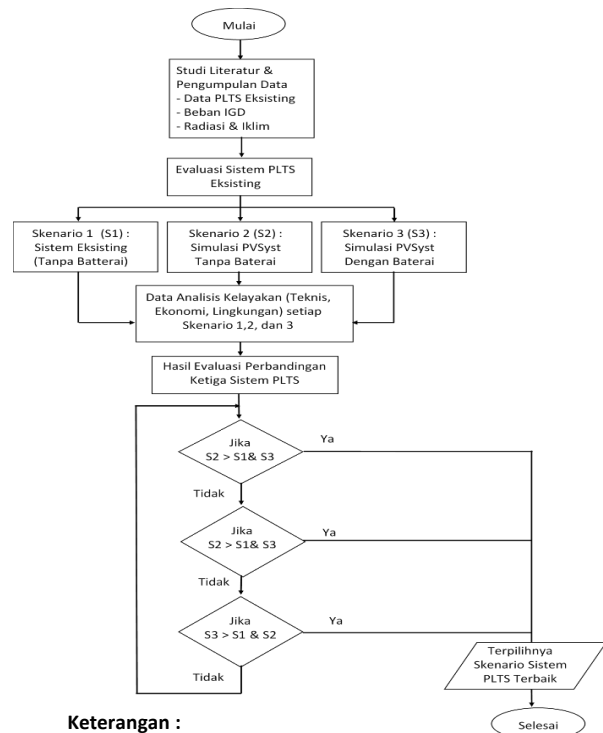
Gambar 1. Sistem PLTS *On-Grid* Tanpa Baterai (Kondisi Eksisting)



Gambar 2. Desain PLTS *On-grid* Tanpa Baterai Menggunakan PVsyst



Gambar 3. Desain PLTS *On-grid* Dengan Baterai Menggunakan PVsyst



Keterangan :

S1: Skenario 1

S2: Skenario 2

S3: Skenario 3

Gambar 4. Diagram Alir Analisis

Diagram alir pada Gambar 4 menggambarkan alur kerja mulai tahap pengumpulan data hingga penentuan skenario PLTS yang paling optimal. Proses diawali studi literatur dan pengumpulan data teknis terkait PLTS eksisting yang terpasang, profil konsumsi listrik IGD, serta data radiasi dan iklim sebagai dasar analisis. Selanjutnya dievaluasi performa sistem PLTS eksisting berbasis data aktual di lapangan. Kemudian dilakukan pemodelan dan simulasi dengan tiga skenario. Skenario 1 (S1) yaitu sistem PLTS *rooftop* eksisting tanpa baterai yang telah terpasang dan digunakan sebagai kondisi *baseline* pembandingan. Skenario 2 (S2) yaitu sistem PLTS hasil simulasi PVsyst tanpa baterai dengan optimasi kapasitas dan konfigurasi untuk beban IGD. Sedangkan skenario 3 (S3) yaitu sistem PLTS hasil simulasi PVsyst dengan penambahan baterai (*hybrid PV-battery*) untuk meningkatkan pemanfaatan energi surya pada beban IGD.

Pada setiap skenario dilakukan analisis kelayakan secara menyeluruh dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Aspek teknis berfokus pada pengukuran *Performance Ratio* (PR), *Energy Yield*, dan efisiensi dan kebutuhan IGD. Aspek ekonomi mencakup perhitungan CAPEX, OPEX, LCOE, dan *Payback Period*. Serta aspek lingkungan dihitung dari reduksi emisi CO₂. Hasil ketiga skenario kemudian dibandingkan secara objektif untuk mengidentifikasi sistem yang paling unggul.

Percabangan dalam diagram menunjukkan pengambilan keputusan berdasarkan indikator kelayakan sehingga sistem yang terpilih merupakan skenario sistem yang paling efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan serta mendukung konsep *Smart Green Hospital*. Rangkaian proses ini ditutup dengan penyusunan kesimpulan dan rekomendasi kebijakan di rumah sakit.

2.5. Persamaan Penelitian

Peak Sun Hours (PSH) digunakan untuk memperkirakan lamanya waktu radiasi matahari efektif dalam sehari [19]. Diasumsikan nilai PR sebesar 0,8 karena sistem PLTS dikatakan layak apabila nilai PR berada pada 70%-90% [20]

$$PSH = \frac{\text{Total radiasi harian (kWh/m}^2)}{1 \text{ kW/m}^2} \quad (1)$$

$$= \frac{4,848}{1}$$

$$= 4,848 \text{ jam}$$

$$\text{Kapasitas PLTS} = \frac{\text{Kebutuhan energi (kWh)}}{\frac{PSH \times PR}{213.312 \text{ Wh}}} \quad (2)$$

$$= \frac{55.000}{4,848 \text{ jam} \times 0,8}$$

$$= 55 \text{ kWp}$$

Penelitian ini menggunakan modul panel surya Hicell 510 Wp sebanyak 108 buah [21]

$$\text{Jumlah modul PV} = \frac{\text{Total kapasitas (Wh)}}{\text{Kapasitas modul (Wp)}} \quad (3)$$

$$= \frac{55.000}{510}$$

$$= 107,843 \text{ dibulatkan } 108 \text{ buah}$$

Inverter menggunakan HiCell 50 kWp (3-phase) sebanyak satu unit dengan spesifikasi daya modul sebesar 510 Wp, tegangan 41,6 V, arus 12,42 A. Sistem beroperasi pada tegangan 250-950 V dan arus 120 A [22]

$$P_{\text{total}} = N_{\text{seri}} \times N_{\text{paralel}} \times P_{\text{modul}} \quad (4)$$

$$= 12 \times 9 \times 510$$

$$= 55.080 \text{ Wp}$$

$$V_{\text{array}} = N_{\text{seri}} \times V_{\text{modul}} \quad (5)$$

$$= 12 \times 41,6$$

$$= 499,2 \text{ V}$$

$$I_{\text{array}} = N_{\text{paralel}} \times I_{\text{modul}} \quad (6)$$

$$= 9 \times 12,42$$

$$= 111,78 \text{ A}$$

Hasil perhitungan menunjukkan tegangan array 499,2 V dan arus 111,78 A masih dalam rentang aman dan di bawah batas maksimum masukan sistem fotovoltaik sehingga konfigurasi ini layak dioperasikan dalam kondisi normal. Penelitian ini menggunakan baterai LiFePO₄ dengan efisiensi 90% dan *Inverter* berefisiensi lebih dari 98,2%, maka total energi yang harus disediakan baterai dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut [23].

$$P_{\text{beban}} = \frac{\text{beban harian (kW)}}{\text{waktu}} \quad (7)$$

$$= \frac{213.312 \text{ W}}{24 \text{ jam}}$$

$$= 8,89 \text{ kW/jam}$$

$$E_{\text{baterai aktual}} = \frac{E_{\text{baterai}}}{\text{Efisiensi sistem}} \quad (8)$$

$$= \frac{8,89 \text{ kWh}}{0,982 \times 0,9}$$

$$= 10,06 \text{ kWh}$$

Jika menggunakan tegangan sistem sebesar 51,2 VDC dan DoD baterai *lithium-ion* sebesar 80%, maka kapasitas baterai [21].

$$C_{\text{nominal}} = \frac{C_{\text{baterai}}}{\frac{\text{DoD}}{10,06 \times 1000}} \quad (9)$$

$$= \frac{51,2}{0,8}$$

$$= 245,6 \text{ Ah}$$

Baterai *lithium-ion* memiliki tegangan sebesar 3,2 V, kapasitas 100 Ah per modul, maka jumlah sel yang harus disusun sebagai berikut [21]

$$N_{\text{seri}} = \frac{V_{\text{sistem}}}{V_{\text{cell}}} \quad (10)$$

$$= \frac{51,2 \text{ V}}{3,2 \text{ V}}$$

$$= 16 \text{ sel seri}$$

$$E_{\text{per string}} = V_{\text{sistem}} \times \text{Kapasitas baterai} \quad (11)$$

$$= 51,2 \text{ V} \times 100 \text{ Ah}$$

$$= 5,12 \text{ kWh}$$

$$N_{\text{paralel}} = \frac{E_{\text{total}}}{E_{\text{string}}} \quad (12)$$

$$= \frac{8,89 \text{ kWh}}{5,12 \text{ kWh}}$$

$$= 1,74 \text{ dibulatkan menjadi } 2 \text{ string}$$

Tabel 5. Jenis-Jenis Baterai [21]

Kategori	Lithium-Ion	Lead-acid	Flow Batteries
Densitas Energi	Sangat Tinggi	Lebih Rendah	Bervariasi
Efisiensi	Tinggi	Sedang	Tinggi
Keunggulan	Respon cepat	Biaya murah	Skala besar
Kekurangan	Biaya tinggi	Berat	Ukuran besar
Waktu Pengisian	5x lebih cepat dari Lead Acid	Lambat	Bervariasi

Total biaya awal pembangunan PLTS hingga siap beroperasi mencakup investasi awal, biaya operasional berupa perawatan tahunan, penggantian *inverter* dan baterai sesuai umur teknis, serta pemantauan dan administrasi sistem pemantauan dan data energi. Selain itu, evaluasi aspek ekonomi pada penelitian ini menggunakan metode LCOE yaitu biaya rata-rata produksi listrik sepanjang umur sistem [24].

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + O_t + M_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (13)$$

Dengan

I_t : biaya investasi pada tahun ke-t (Rp)

O_t : biaya operasional pada tahun ke-t (Rp)

M_t : biaya pemeliharaan pada tahun ke-t (Rp)

E_t : energi listrik hasil tahun ke-t (kWh)

i : tingkat diskonto

n : umur sistem (tahun)

Manfaat ekonomi untuk RSUD dr. Soedomo dinilai layak apabila masa pengembalian investasi kurang dari operasi maksimum sistem [18].

$$Pengehematan\ tahunan = E_{prod} \times Tarif\ listrik \quad (14)$$

$$Payback\ Period = \frac{Total\ investasi\ (CAPEX)}{Pengehematan\ per\ tahun} \quad (15)$$

Dimana:

Tarif listrik dari PLN sebesar Rp 1.444,70 per kWh

Dampak positif terhadap lingkungan diwujudkan melalui penurunan konsumsi energi fosil, dengan estimasi reduksi emisi karbon dihitung menggunakan faktor emisi listrik PLN Indonesia. Selain itu, faktor daur ulang baterai juga dapat mempengaruhi pengolahan limbah [25].

$$E_{tahun} = P_{panel} \times GHI \times 365 \times PR \quad (16)$$

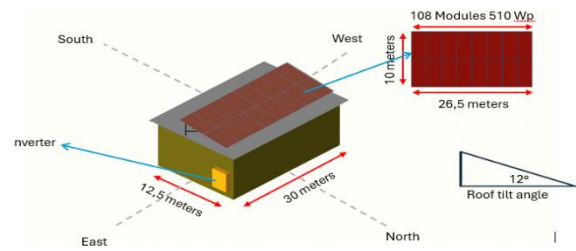
$$Emisi\ CO_2 = E_{prod} \times Faktor\ emisi\ PLN \quad (17)$$

$$Total\ Emisi\ CO_2 = Emisi\ per\ tahun \times durasi \quad (18)$$

Dimana:

Faktor emisi PLN sebesar 0,85 kg CO₂/kWh

3. Hasil dan Pembahasan

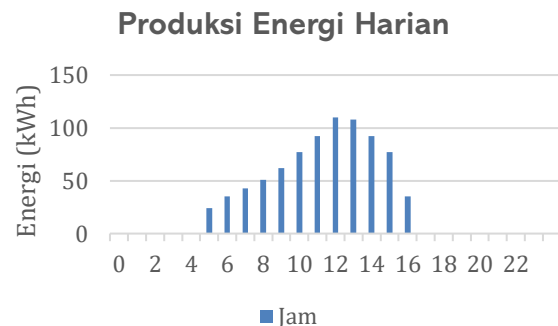


Gambar 5. Desain PLTS *On-grid Rooftop* Eksisting

Rooftop IGD RSUD Soedomo Trenggalek memiliki luas total 375 m² dengan area bersih tersedia untuk PLTS sebesar 265 m² setelah dikurangi *zona restricted* meliputi AC unit, pipa utilitas maupun akses *maintenance*. Dari pengukuran lapangan didapatkan dimensi efektif 10 m x 26,5 m, dengan jumlah *array* 12x9 (108 panel Hicell 510 Wp) serta rasio *space efficiency* mencapai ±70% setelah alokasi *spacing*.

3.1. Hasil Pengujian PLTS Eksisting

Pengambilan data dilakukan selama tujuh hari dari pukul 06.00 s.d 18.00 WIB di lokasi IGD sesuai PLTS *on-grid rooftop* eksisting.



Gambar 6. Jumlah Produksi Energi Harian Pada IGD selama tujuh hari

Tabel 6. Total Produksi Energi Harian

Hari ke-	Total Produksi (kWh)
1	214,17
2	231,44
3	190,67
4	201,91
5	224,55
6	221,15
7	232,02
Rata-Rata Harian	216,56

Pada sistem eksisting, kerugian sistem diasumsikan disebabkan karena *temperature* pada modul tipe *free mounted* sebesar 8%, *ohmic* sebesar 1,5%, *mismatch* modul sebesar 0,6%, *soiling* sebesar 3%, *module quality* sebesar 3%, *wiring DC* sebesar 2,6%, *Light Induced*

Degradation (LID) sebesar 2%. Selain itu, kerugian daya pada inverter dihitung berdasarkan selisih antara daya masukan dari PV (input DC) dan daya keluaran AC yang disalurkan ke jaringan listrik (grid).

$$\text{Losses inverter (\%)} = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (19)$$

$$= \frac{17.206 - 16.705}{17.206} \times 100\% = 2,91\% \quad (20)$$

$$\text{Losses system} = \frac{1 - \text{jumlah losses}}{1} = \frac{1 - 0,779}{1} = 0,221$$

Energi produksi harian rata-rata sebesar 216,56 kWh, GHI rata-rata sebesar 4,848 kWh/m²/hari, dan kapasitas sistem sebesar 55 kWp, maka Performance Ratio sistem sebagai berikut.

$$PR = \frac{E_{AC \text{ day}}}{P_{nominal} \times GHI} \times 100\% \quad (21)$$

$$= \frac{216,56}{55 \times 4,848} \times 100\% = 81,22\%$$

Investasi awal pembangunan PLTS ini berkapasitas 55 kW adalah sebesar Rp 2.044.546.285, dengan asumsi umur operasi sistem selama 25 tahun. Biaya operasi dan pemeliharaan tahunan diasumsikan konstan sebesar Rp 20.445.462,85, sedangkan tingkat diskonto yang digunakan ditetapkan sebesar 6% per tahun dan faktor emisi sebesar 0,85.

$$\text{Energi/tahun} = E_{prod} \times 365 \quad (22)$$

$$= 216,56 \text{ kWh} \times 365 = 79,0444 \text{ MWh/tahun}$$

$$\text{Efisiensi/tahun} = E_{prod} \times 365 \times \text{Tarif listrik} \quad (23)$$

$$= 216,56 \times 365 \times 1444,70 = \text{Rp } 114.195.445$$

$$PP = \frac{\text{Total investasi (CAPEX)}}{\text{Penghematan per tahun}} \quad (24)$$

$$= \frac{\text{Rp } 2.044.546.285}{\text{Rp } 114.195.445} = 17,90 \text{ dibulatkan menjadi } 18 \text{ tahun}$$

$$PV_{OM} = C_{OM} \times \frac{1 - (1 + r)^{-N}}{r} \quad (25)$$

$$= 20.445.462,85 \times \frac{1 - (1 + 0,06)^{-20}}{0,06} = \text{Rp } 234.507.848,17$$

$$PV_E = E_{tahun} \times \frac{1 - (1 + r)^{-N}}{r} \quad (26)$$

$$= 79.044,4 \times \frac{1 - (1 + 0,06)^{-20}}{0,06} = 906.633,0408 \text{ kWh}$$

$$LCOE = \frac{I_0 + PV_{OM}}{PV_E} \quad (27)$$

$$= \frac{2.044.546.285 + 234.507.848,17}{906.633,0408} = \text{Rp } 2.513,75 / \text{kWh}$$

$$E_{tahun} = Cap_{panel} \times GHI \times 365 \times PR \quad (28)$$

$$= 55 \times 4,848 \times 365 \times 0,8 = 77.858,88 \text{ kWh}$$

$$\text{Emisi } CO_2 = E_{prod} \times \text{Faktor emisi PLN} \quad (29)$$

$$= 77.858,88 \times 0,85 = 66.180,048 \text{ kg } CO_2/\text{tahun}$$

$$\text{Total Emisi } CO_2 = \text{Emisi tahunan} \times \text{masa operasi} \quad (30)$$

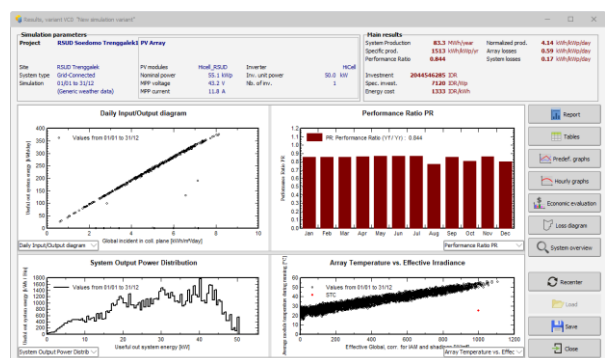
$$= 66.180,048 \times 25 = 1.654.501,2 \text{ ton } CO_2$$

3.2. Hasil Pengujian Simulasi

Selain simulasi lapangan, dilakukan juga pengambilan data menggunakan sekunder Software PVSyst dengan untuk mengetahui potensi optimal dari penggunaan panel surya.

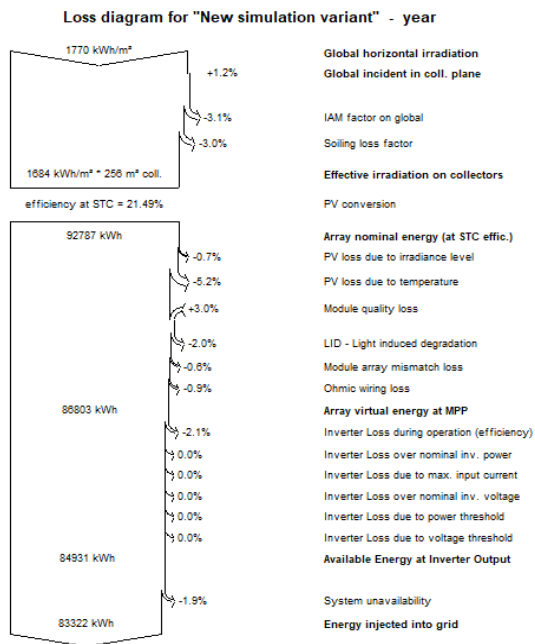
3.2.1. Hasil Pengujian Simulasi Skenario 2

Dari analisis PVSyst, diketahui bahwa sistem PLTS tersebut menghasilkan produksi energi tahunan sebesar 83,3 MWh/tahun dengan nilai Performance Ratio (PR) sebesar 0,844. Energi tahunan tersebut diperoleh dengan mempertimbangkan kapasitas terpasang PLTS dan intensitas radiasi surya yang tersedia di lokasi kajian.



Gambar 7. Hasil simulasi sistem PLTS pada skenario 2

Pada sistem PLTS, nilai GHI tahunan mengalami penyesuaian akibat faktor sudut datang (IAM) dan rugi kotoran (*soiling*), sehingga iradiasi yang efektif diterima permukaan modul berkurang. Kemudian berkurang lagi oleh rugi sistem sehingga energi pada titik kerja maksimum turun menjadi 88.803 kWh per tahun. Energi DC tersebut selanjutnya melewati *inverter* yang menimbulkan rugi efisiensi operasi sekitar 2,1%, rugi ketidaktersediaan sistem sekitar 1,9%, sehingga energi akhir yang dapat disalurkan ke jaringan listrik sebesar 83.322 kWh per tahun. Hal ini menunjukkan bahwa setiap aspek terdapat rugi-rugi yang secara langsung memengaruhi besarnya produksi energi tahunan PLTS.

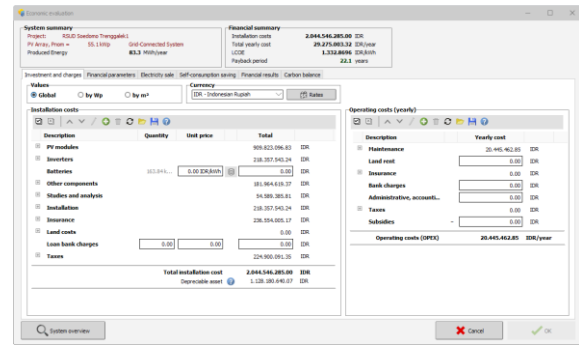


Gambar 8. Loss diagram sistem PLTS pada Skenario 2

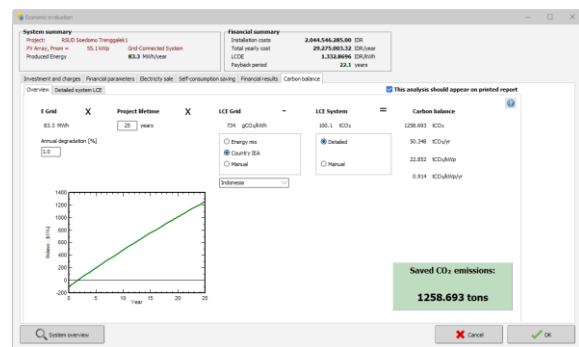
Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) umumnya diasumsikan sekitar 1% dari total biaya investasi awal yang mencakup alokasi penggantian *inverter*, *salary*, perbaikan, dan pembersihan modul [18].

$$\begin{aligned} \text{Biaya O/M} &= \text{Total investasi} \times 1\% \\ &= \text{Rp } 2.044.546.285 \times 1\% \\ &= \text{Rp } 20.445.462,85 \text{ per tahun} \end{aligned}$$

Analisis dampak lingkungan sistem PLTS dilakukan menggunakan fitur *carbon balance* pada PVsyst untuk menghitung total emisi CO₂ yang berhasil dihindari sepanjang umur operasi sistem, yang kemudian dirangkum dalam tabel sebagai dasar penilaian manfaat lingkungan proyek.



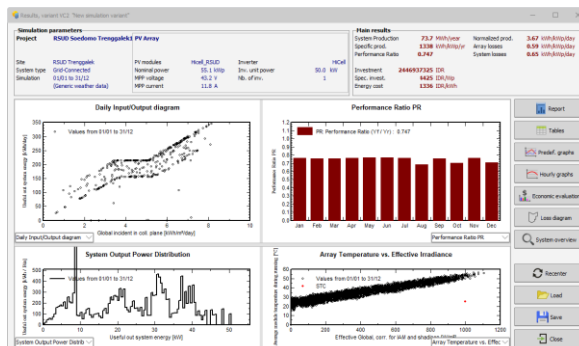
Gambar 9. Inisialisasi besar biaya O&M PLTS pada Skenario 2



Gambar 10. Besar biaya pengurangan Emisi CO₂ pada Skenario 2

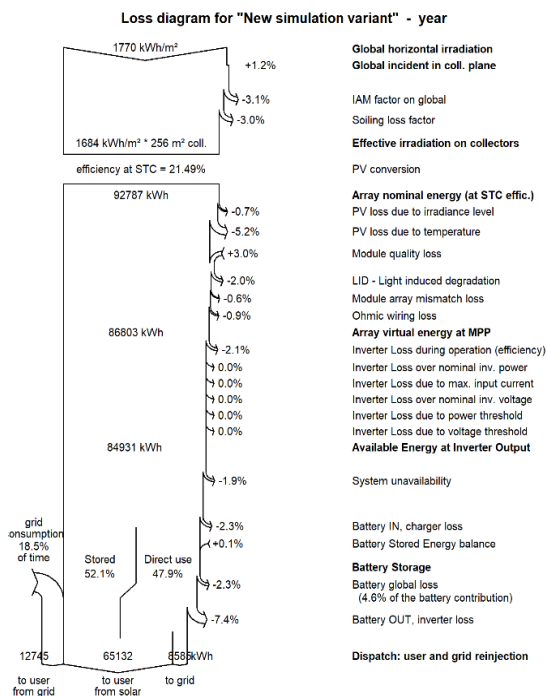
3.2.2. Hasil Pengujian Simulasi Skenario 3

Dari analisis PVsyst, penambahan baterai pada lokasi penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat menghasilkan energi sebesar 73,7 MWh/tahun. Apabila diasumsikan harga baterai sebesar Rp 2.000.000/kWh yang dimasukkan sebagai bagian dari investasi awal maka besar investasi meningkat menjadi sebesar Rp 2.446.937.325, biaya operasi dan pemeliharaan Rp 20.445.462,85, maka *Performance Ratio* (PR) menjadi sebesar 0,747 serta *Payback Period* bertambah menjadi 33,6 tahun.



Gambar 11. Loss diagram sistem PLTS pada Skenario 3

Diagram rugi-rugi tahunan PLTS dengan baterai menunjukkan bahwa dari total radiasi global tahunan sebesar 1.770 kWh/m², hanya sekitar 1.684 kWh/m² yang efektif mengenai bidang kolektor setelah dikoreksi oleh faktor sudut datang (IAM) dan rugi kotoran (*soiling*). Pada sisi modul, energi nominal *array* sebesar 92,787 MWh berkurang akibat *irradiance*, suhu sel, kualitas modul, LID, *mismatch*, dan rugi kabel DC, sehingga energi virtual pada titik MPP turun menjadi 86,803 MWh. Setelah melewati *inverter* dengan rugi efisiensi sekitar 2,1%, energi yang tersedia pada keluaran *inverter* menjadi 84,931 MWh dan langsung disalurkan ke jaringan. Rugi-rugi tersebut menjelaskan perbedaan antara potensi energi teoritis dan energi bersih yang akhirnya dapat dimanfaatkan sistem.



Gambar 12. Loss diagram sistem PLTS pada Skenario 3

Hasil simulasi *carbon balance* menunjukkan bahwa selama 25 tahun operasi, kombinasi PLTS dengan baterai mampu mengurangi emisi sekitar 1.258,693 ton CO₂ dengan menggantikan sebagian konsumsi listrik fosil. Investasi awal sekitar Rp 2,44 miliar beserta biaya operasi dan pemeliharaan tahunan membuat sistem ini tidak hanya berkontribusi signifikan terhadap penurunan emisi karbon, tetapi berpotensi menghemat biaya listrik jangka panjang yang mendukung kelayakan finansial penerapan PLTS berbaterai di lingkungan rumah sakit.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian yang dilakukan selama tujuh hari menunjukkan implementasi PLTS berkapasitas 55 kWp di IGD RSUD Soedomo Trenggalek kondisi eksisting

menghasilkan energi tahunan rata-rata sebesar 216,56 kWh/hari (PR 81,22% dan total rugi sistem 22,1%). Investasi awal yang dimasukkan sebesar Rp 2.044.546.285, biaya operasi dan pemeliharaan konstan Rp 20.445.462,85/tahun, tarif listrik Rp 1.444,70/kWh, serta tingkat diskonto 6%, sistem menghasilkan sekitar 79,04 MWh/tahun, menghemat Rp 114.195.445/tahun, memberikan *PP* ±18 tahun, dan mereduksi emisi sekitar 1.654.501,2 ton CO₂ selama 25 tahun beroperasi.

Simulasi PVsyst dengan parameter PLTS eksisting sebagai masukan, diprediksi menghasilkan energi 83,322 MWh/tahun, PR 0,8444, *PP* 22,1 tahun, dan reduksi emisi 1.258,693 ton CO₂. Penambahan baterai justru menaikkan investasi, LCOE menjadi Rp 1.264.2920/kWh, memperpanjang *PP* 33,6 tahun, dan reduksi emisi 1258,693 ton CO₂, namun juga menurunkan produksi energi dan *PR*. Dari ketiga skenario sistem PLTS *on-grid* tanpa baterai menggunakan PVsyst memberikan kinerja teknis dan indikator finansial yang lebih baik dibanding konfigurasi baterai maupun eksisting, karena dengan penambahan baterai dapat meningkatkan CAPEX, LCOE, dan *PP* meskipun turut berkontribusi andal suplai saat gangguan jaringan. Oleh karena itu, untuk konteks rumah sakit dengan akses jaringan yang relatif andal, PLTS *on-grid rooftop* tanpa baterai dapat direkomendasikan sebagai opsi utama, sedangkan integrasi baterai lebih tepat untuk beban sangat kritis dengan memperhitungkan *trade-off* antara biaya ekstra dan peningkatan keandalan.

Referensi

- [1]. M. S. A. Ipung, S. Thamrin, and R. Laksmono W, "Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Alternatif Energi Masa Depan", *JPkMN*, vol. 4, no. 3, pp. 2427-2435, Aug. 2023.
- [2]. S. Herindrasti, B. Angelina, and P. Putriwinata, "Pengembangan Kebijakan Energi Terbarukan di Indonesia, Vietnam, dan Laos", *Jurnal Sospol*, vol. 10, no. 2, pp. 154-172, Dec. 2024.
- [3]. P. G. B. Jara, M. T. Castro, E. A. Esparcia, and J. D. Ocon, "Quantifying the Techno-Economic Potential of Grid-Tied Rooftop Solar Photovoltaics in the Philippine Industrial Sector", *Energies*, vol. 13, issue 19, pp. 5070, Sep. 2020, <https://doi.org/10.3390/en13195070>.
- [4]. M. F. M. Zublie, Md. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Modeling, Energy Performance and Economic Analysis of Rooftop Solar Photovoltaic System for Net Energy Metering Scheme in Malaysia", *Energies*, vol. 16, issue 2, pp. 723, Jan. 2023, <https://doi.org/10.3390/en16020723>.
- [5]. Datika, W. *Perancangan PV On Grid Dengan Baterai Dalam Pengembangan Kawasan Electrifying Lifestyle Di Alun-Alun Pagaram*. Thesis. Bandung : Magister Tekik Elektro Institut Teknologi Bandung; 2025.
- [6]. Oktarina, A. H.. *Analisa Pengaruh Perubahan Intensitas Cahaya Terhadap Keluaran Daya Panel Surya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid 450 VA Di Politeknik Negeri Sriwijaya*. Other Thesis. Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya; 2021.

- [7]. M. Hadi, I. Syaekani, H. Nuryadi, and P. I. Kencana, "Literature Review: Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia", *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi)*, vol. 8, no. 1, pp. 280-289, 2025.
- [8]. S. Utami, and A. Daud, "Pengaruh Temperatur Panel Surya Terhadap Efisiensi Panel Surya Sistem Monitoring Menggunakan Internet of Things (IoT)", *Jurnal Teknik Energi*, vol. 11, no. 1, pp. 7-10, Dec. 2021.
- [9]. L. Asdiyan, S. I. Ayu, D. Giriantara, N. Setiawan, and L. Setiawan, "Analisis Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap *On-grid* 11,2 kWp di Residensial Bukit Gading Mediterania, Jakarta Utara", *SPEKTRUM*, vol. 10, no. 1, pp. 32-43, Mar. 2023.
- [10]. E. Rodriguez-Ubinas, M. Alantali, S. Alzarouni, and N. Alhammadi, "Evaluating the performance of PV modules in buildings (BIPV/BAPV) and the soiling effect in the UAE desert setting", *Energy and Sustainability*, vol. 5, pp. 293-301, 2020, doi: <https://doi.org/10.2495/eq-v5-n4-293-301>.
- [11]. L. Alhmod, "Why Does the PV Solar Power Plant Operate Ineffectively?", *Energies*. Vol. 16, issue 10, pp. 4074, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16104074>.
- [12]. A. Dani and D. Erivianto, "Studi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Off Grid* Skala Rumah Tangga pada Daerah Bagan Deli Menggunakan Pvsyst", *jist*, vol. 3, no. 09, pp. 961-972, Sep. 2022.
- [13]. Syah, D. S. H. *Optimasi Relokasi dan Penambahan Kapasitas SPKLU Pada Wilayah Suburban (Studi Kasus Provinsi Jawa Barat)*. Bandung: Institut Teknologi Bandung; 2025.
- [14]. Suhendar. *Dasar-Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya*. Tangerang: Media Edukasi Indonesia. 2022.
- [15]. A. Husain, M. Phesal, M. Kadir, and U. Amirulddin, "Techno-Economic Analysis of Commercial Size Grid-Connected Rooftop Solar PV Systems in Malaysia under the NEM 3.0 Scheme", *Applied Sciences*, vol. 21, issue 21, pp. 10118, <https://doi.org/10.3390/app112110118>.
- [16]. S. Sunardiyo, and T. Winarsih. *Evaluation of 35 kWp on grid solar power plant based on economic and environmental factors in ESDM office Jawa Tengah, Indonesia*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Semarang. 2022; 969:012033.
- [17]. E. J. Wati, M. I. Sari, and Y. Hidayatullah, "Dampak Inflasi Terhadap Daya Beli Masyarakat di Indonesia: Tinjauan Literatur", *Jurnal Media Akademik (JMA)*, vol. 3, no. 11, Nov. 2025, doi: [10.62281/2ach3252](https://doi.org/10.62281/2ach3252)
- [18]. S. D. A. Febriani, and C. T. Rani, "Kajian Tekno Ekonomi Sistem *On-Grid* pada *Smart Greenhouse*", *J-TETA*, vol. 3, no. 1, pp. 1-9, Apr. 2024.
- [19]. V. M. J. Mamangkey, G. M. Ch. Mangindaan, and L. S. Patras. *Potensi Pengembangan Plts Di Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi*. Manado: Universitas Sam Ratulangi; 2022.
- [20]. S. Ramadhan, H. Aziz, and R. A. Diantari. *Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berkapasitas 1, 8 Kwp Sebagai Sumber Energi Green House*. Jakarta: Institut Teknologi PLN; 2021
- [21]. M. Iswahyudi, and T. Wati. *Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Perusahaan Daerah Pasar Surya*. Senasains 3rd. Sidoarjo. 2021; 2(1)
- [22]. A.F. Nariyana, I. Widiastuti, and D. Nugroho, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Rooftop* Penukai Kandang Ayam Pedaging Dengan Sistem *On Grid* Di Desa Tegalharjo Trangkil Pati", *Elektrika*, vol. 16, no. 1, pp. 52-61, Apr. 2024.
- [23]. N. Setiaji, S. Sumpena, and A. Sugiharto, "Analisis Konsumsi Daya dan Distribusi Tenaga Listrik", *JTI*, vol. 11, no. 1, Oct. 2022.
- [24]. Radhiansyah, N. A. Syam, Muzakkir, and D. Sahidin, "Analisis *Levelized Cost of Electricity* (LCoE) pada PLTS Terapung dengan PLTS di Daratan: Study Kasus Pulau Kodingareng, Makassar Sulawesi Selatan", *Globe*, vol. 3, no. 1, pp. 58-67, Mar. 2025.
- [25]. Pemerintah Kota Surabaya, Dinas Lingkungan Hidup, and A. Dipareza. *Kajian Investasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kota Surabaya Tahun 2022*. Surabaya : Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya. 2022.