

ANALISIS PERENCANAAN INSTALASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP DENGAN BEBAN LANGGANAN PLN KAPASITAS 900VA MENGGUNAKAN KONFIGURASI *OFF-GRID*

Roy Bayu Negara

Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik
Politeknik Negeri Padang
Email: roybayu@pnp.ac.id

Satrio Dwi Nugroho

Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik
Politeknik Negeri Padang
Email: satrio@pnp.ac.id

Shindy Aliffianti Ulfiah

Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik
Politeknik Negeri Padang
Email: shindyaliffiantiulfiah@pnp.ac.id

Fanji Azhary Aرسال

Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik
Politeknik Negeri Padang
Email: fanjiazhary@pnp.ac.id

Yani Kamisa Putri

Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik
Politeknik Negeri Padang
Email: yanikamisaputri@pnp.ac.id

ABSTRAK

Analisis perencanaan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap pada bangunan pada koordinat -00.939643°, 100.410544° untuk memenuhi kebutuhan energi harian sebesar 2,65 kWh. Bangunan yang direncanakan dilakukan pemasangan PLTS pada koordinat tersebut adalah tempat hunian kontrakan. Sistem yang direncanakan sesuai dengan perhitungan analisis aspek teknis dan analisis aspek biaya. Analisis aspek teknis pada PV Area sebesar 6,095 m², *wattpeak* panel surya sebesar 1.297,128 Wp, jumlah panel surya yang digunakan adalah 3 unit, kapasitas SCC sebesar 16,38 A, kapasitas inverter sebesar 2.062,5 W, dan kapasitas baterai sebesar 145,3 Ah. Analisis aspek biaya pada investasi awal sebesar Rp 28.972.000, biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) dari sisi penggantian baterai sebesar Rp 31.940.000 per 25 tahun kemudian dari sisi pemeliharaan rutin sebesar Rp 289.720 per tahun, biaya siklus hidup (LCC) sebesar Rp 63.541.800, dan biaya produksi listrik per kWh (COE) sebesar Rp 7.227 per kWh.

Kata kunci: Perencanaan PLTS, PLTS Atap, PLTS *Off-Grid*, Analisis Teknis, Analisis Biaya.

ABSTRACT

Analysis of the planning of a rooftop solar power plant (SPP) on a building at coordinates -00.939643°, 100.410544° to meet daily energy needs of 2.65 kWh. The building planned for the installation of the PLTS at these coordinates is the rental residence. The planned system is in accordance with the calculations of the technical analysis and cost analysis. The technical analysis shows a PV area of 6.095 m², a solar panel wattpeak of 1,297.128 Wp, 3 solar panels used, an SCC capacity of 16.38 A, an inverter capacity of 2,062.5 W, and a battery capacity of 145.3 Ah. The cost analysis for the initial investment is IDR 28,972,000, operational and maintenance (O&M) costs for battery replacement amount to IDR 31,940,000 per 25 years, while routine maintenance costs amount to IDR 289,720 per year, the life cycle cost (LCC) is IDR 63,541,800, and the electricity production cost per kWh (COE) is IDR 7,227 per kWh.

Keywords: SPP Planning, Roof-mounted SPP, *Off-Grid* SPP, Technical Analysis, Cost Analysis.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap merupakan salah satu teknologi energi terbarukan yang terus berkembang pesat di Indonesia [1]. Dengan kondisi geografis yang berada di garis khatulistiwa maka Indonesia memiliki intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun [2]. Oleh karena itu, potensi tersebut dapat dibuat pengembangan teknologi PLTS untuk skala rumah tangga, komersial, maupun industri [3]. Pemanfaatan energi surya tidak hanya memberikan kemandirian energi namun juga mendukung upaya pemerintah dalam menurunkan emisi karbon dan meningkatkan bauran energi bersih nasional [4][5].

Pemanfaatan energi surya meningkat seiring dengan dorongan pemerintah untuk menuju transisi energi bersih dan meningkatnya akan kebutuhan energi listrik di rumah tangga [6]. Khususnya pada pelanggan rumah tangga dengan kapasitas daya 900VA yang terbatas kapasitas listriknya, dilain sisi juga menginginkan mandiri energi. Kondisi tersebut ada solusi yang dapat dilakukan yaitu dengan penerapan sistem PLTS atap dengan konfigurasi *off-grid* menjadi solusi yang efektif karena mampu menyediakan sumber energi secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan PLN [7]. Sistem ini sangat sesuai untuk rumah tangga daya kecil seperti kapasitas 900VA untuk mengurangi biaya tagihan listrik dan kemandirian energi, serta digunakan untuk jangka panjang sebagai suplai energi utama [8].

Pada koordinat -00.939643° , 100.410544° terdapat sebuah bangunan yaitu tempat hunian kontrakan dilakukan analisis perencanaan instalasi sistem PLTS atap. Perencanaan instalasi sistem PLTS atap menggunakan konfigurasi *off-grid* yang tidak bergantung pada jaringan PLN. Diperlukan perhitungan aspek teknis dan aspek biaya agar sistem PLTS atap dapat bekerja secara optimal. Ada beberapa parameter penting dalam perencanaan instalasi sistem PLTS ini meliputi aspek teknis yaitu luas area panel surya (PV area), kapasitas daya puncak (*wattpeak*) panel surya, jumlah panel surya, kapasitas *solar charge controller* (SCC), kapasitas inverter, dan kapasitas baterai [9]. Pada aspek biaya yaitu menghitung investasi awal, biaya operasional dan perawatan (O&M), biaya siklus hidup (LCC), dan biaya produksi listrik per kWh (CoE) [10].

Parameter aspek teknis dan aspek biaya tersebut akan dilakukan perhitungan dan dianalisis untuk memastikan bahwa PLTS atap yang diinstall mampu memenuhi kebutuhan energi harian, mempertahankan umur baterai, dan mengoptimalkan efisiensi sistem [11]–[13]. Sehingga, penelitian ini dengan judul “Analisis Perencanaan Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap dengan Beban Langgan PLN Kapasitas 900VA Menggunakan Konfigurasi *Off-Grid*” untuk mengetahui komponen-komponen yang dibutuhkan berikut kapasitasnya untuk analisis teknis dan untuk analisis biaya dihitung selama sistem beroperasi. Selain itu, untuk mendukung pemerintah dalam menurunkan emisi karbon dan meningkatkan bauran energi bersih nasional.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui tahapan sistematis yang meliputi pengumpulan data teknis beban dan melakukan perhitungan untuk mengetahui kapasitas masing-masing komponen, kemudian dilakukan analisis dari sisi biaya [14][15][16]. Metode penelitian direncanakan untuk memastikan bahwa perencanaan sistem PLTS atap bagi rumah tangga kapasitas 900 VA dapat dihitung secara akurat dan dapat diterapkan. Selain itu, penelitian ini mengintegrasikan aspek teknis dan aspek biaya untuk dapat memberikan gambaran yang komprehensif di sisi teknis dan biaya instalasi sistem PLTS atap *off-grid* [14].

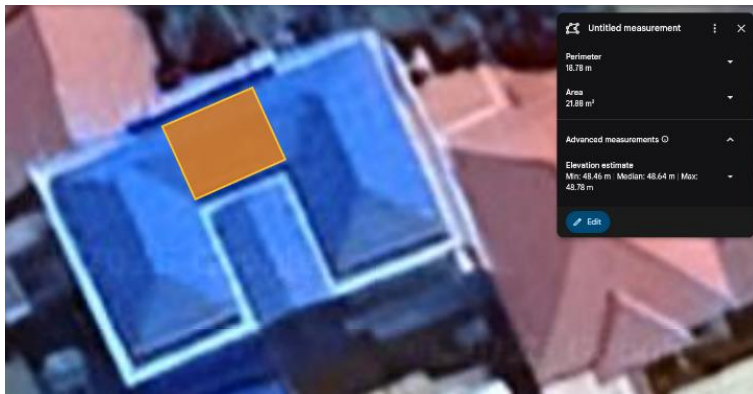
2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi pada tempat hunian kontrakan yang menjadi studi kasus yang lokasi koordinatnya adalah -00.939643° , 100.410544° yang berlokasi di Kota Padang, Sumatera Barat. Pada penelitian ini tidak seluruh unit bangunan dalam kompleks kontrakan dianalisis. Analisis perhitungan teknis dan biaya hanya difokuskan pada unit kontrakan bagian lantai 2 No. 3B saja sebagai objek tunggal penelitian.

Pada lokasi penelitian ini dicari data bebannya selama satu hari penuh. Daya yang digunakan dilakukan perhitungan dengan memperhatikan jumlah perangkat yang ada dan lama waktu penggunaan dalam satuan jam. Setelah itu dihitung energi yang dibutuhkan dalam satuan kWh. Data parameter pada penelitian ini diperoleh ketika bulan Agustus 2025 dengan total energi hariannya adalah 2.650 Wh yang dapat dilihat pada tabel 1. Kemudian untuk data radiasi matahari diperoleh dari Global Solar Atlas dengan menyesuaikan koordinat -00.939643° , 100.410544° , sehingga diperoleh 4.807 kWh/m² per harinya.



Gambar 1. Tempat hunian kontrakan



Gambar 2. Luas atap hunian kontrakan diatas lantai 2 No. 3B

2.2. Desain Penelitian

Penelitian ini adalah merencanakan sistem PLTS atap dengan konfigurasi *off-grid* pada rumah tangga dengan daya langganan PLN sebesar 900 VA. Prosesnya mencakup penentuan kapasitas panel surya, penentuan *solar charge controller* (SCC), inverter, dan baterai. Semua itu berdasarkan kebutuhan energi harian dan data radiasi matahari harian. Selain itu, dilakukan perhitungan biaya sistem PLTS atap dengan perhitungan investasi awal, biaya operasional dan pemeliharaan (O&M), siklus hidup (LCC), dan perhitungan biaya energi atau *cost of energy* (CoE).

3.3. Data dan Sumber Data

3.3.1. Data untuk Analisis Teknis

Data untuk analisis teknis meliputi informasi terkait kebutuhan energi harian tempat hunian kontrakan dengan daya 900 VA. Untuk data radiasi matahari diperoleh dari Global Solar Atlas berdasarkan koordinat lokasi penelitian. Spesifikasi komponen PLTS yang meliputi panel surya, SCC, inverter, dan baterai. Parameter efisiensi seperti η_{PV} , η_{ef} , DoD, serta tegangan sistem juga digunakan dalam perhitungan kapasitas PLTS atap *off-grid*.

3.3.2. Data untuk Analisis Biaya

Data untuk analisis biaya meliputi harga komponen PLTS (panel, baterai, SCC, inverter, mounting, kabel, proteksi, skun, konektor, dll). Harga-harga komponen tersebut nantinya akan digunakan sebagai acuan harga biaya investasi awal PLTS atap. Perhitungan operasional dan pemeliharaan disesuaikan dengan pemakaian baterai selama 25 tahun sistem PLTS atap. Perhitungan siklus hidup umur pakai sistem PLTS atap dihitung melalui perhitungan LCC. Terakhir adalah perhitungan biaya energi (COE) untuk mencari biaya produksi energi sistem PLTS atap dalam satuan Rupiah per kWh (Rp/kWh).

3.4. Perhitungan Perencanaan PLTS Atap

Perencanaan PLTS atap dilakukan untuk memperoleh kapasitas sistem yang sesuai dengan kebutuhan energi di lokasi penelitian. Tahapan perhitungannya mencakup analisis teknis dan analisis biaya. Fokus

analisis biaya ada di kapasitas komponen PLTS atap, sedangkan analisis biaya fokus kepada biaya sistem PLTS atap dalam 25 tahun operasi.

3.4.1. Analisis Teknis

Analisis teknis mengacu pada rumus perencanaan PLTS atap *off-grid*. Cakupan perhitungannya antara lain PV area untuk mengukur luas permukaan panel surya dalam meter persegi (m²). Kemudian perhitungan *Wattpeak* untuk perhitungan daya maksimum yang dibutuhkan. Kemudian perhitungan jumlah panel, kapasitas SCC, kapasitas inverter, dan kapasitas baterai.

3.4.1.1. Luas PV Area

Perhitungan luas PV area dilakukan untuk menentukan kebutuhan luasan panel surya yang diperlukan supaya sistem PLTS atap mampu menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan energi harian beban [17].

$$PV\ Area = \frac{E_b}{G_{sr} \times \eta_{PV} \times \eta_{ef}} \quad (1)$$

Dimana:

PV Area = Luas permukaan panel surya (m²)

E_b = Energi harian (kWh/hari)

G_{sr} = Intensitas matahari (kW/m²/hari)

η_{PV} = Efisiensi panel surya (%)

η_{ef} = Efisiensi keluaran (%)

3.4.1.2. Daya Puncak (*Wattpeak*)

Perhitungan daya puncak dilakukan untuk mengetahui kapasitas maksimum daya yang harus mampu disuplai oleh suatu sistem kelistrikan. Nilai daya puncak ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan ukuran peralatan utama seperti inverter, panel surya, baterai, kabel, dan pengaman [18]. Sehingga, sistem dapat beroperasi aman, andal, dan tidak mengalami kelebihan beban. Dengan mengetahui daya puncak, perencanaan instalasi PLTS atap menjadi lebih tepat karena tidak kekurangan kapasitas yang menyebabkan gangguan dan tidak berlebihan yang membuat biaya menjadi lebih mahal.

$$P_{wp} = PV\ Area \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2)$$

Dimana:

P_{wp} = Daya puncak

PV Area = Luas PV area

PSI = Intensitas radiasi matahari

η_{PV} = Efisiensi panel surya

3.4.1.3. Jumlah Panel Surya

Perhitungan jumlah panel surya dilakukan untuk menentukan berapa banyak modul panel yang harus dipasang agar daya yang dihasilkan mampu memenuhi kebutuhan sistem secara optimal. Perhitungan ini didasarkan pada perbandingan antara daya puncak yang dibutuhkan oleh beban dengan daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh satu panel surya pada kondisi kerja terbaiknya [12]. Dengan perhitungan yang tepat, dapat berimplikasi ke sistem PLTS atap agar tidak kekurangan daya saat digunakan dan tetap efisien dari segi biaya, karena jumlah panel yang dipasang sesuai dengan kebutuhan energi yang direncanakan.

$$Jumlah\ Panel = \frac{P_{wp}}{P_{mpp}} \quad (3)$$

Dimana:

P_{wp} = Daya puncak sistem (Wp)

P_{mpp} = Daya maksimum panel surya

3.4.1.4. Kapasitas Solar Charge Controller (SCC)

Perhitungan *solar charge controller* (SCC) dilakukan untuk menentukan alat pengatur pengisian yang tepat agar listrik dari panel surya dapat masuk ke baterai dengan aman. SCC berfungsi mengatur tegangan dan arus dari panel surya ke baterai agar tidak terjadi overcharge maupun overdischarge yang dapat merusak baterai [17]. Dengan memilih SCC yang sesuai, proses

pengisian baterai menjadi lebih stabil, umur baterai lebih panjang, dan sistem PLTS dapat bekerja dengan lebih andal.

$$C_{scc} = \frac{D_w \times S_f}{V_{mpp}} \quad (4)$$

Dimana:

C_{scc} = Kapasitas SCC

D_w = Daya maksimum panel surya

S_f = Faktor keamanan

V_{mpp} = Tegangan kerja total

3.4.1.5. Kapasitas Inverter

Perhitungan kapasitas inverter dilakukan untuk memastikan inverter mampu melayani beban listrik maksimum yang terpasang pada sistem. Penentuan kapasitas ini mengacu pada total daya beban yang bekerja secara bersamaan dan juga memperhitungkan arus awal dari peralatan tertentu [19]. Dengan kapasitas inverter yang sesuai proses perubahan listrik DC menjadi AC dapat berjalan stabil dan aman sehingga sistem bekerja andal dan umur peralatan lebih panjang.

$$C_{Inv} = D_w \times S_f \quad (5)$$

Dimana:

C_{Inv} = Kapasitas inverter

D_w = Daya maksimum panel surya

S_f = Faktor keamanan

3.4.1.6. Kapasitas Baterai

Perhitungan kapasitas baterai dilakukan untuk menentukan ukuran baterai yang mampu menyimpan energi listrik sesuai dengan kebutuhan sistem. Perhitungan ini bertujuan agar pasokan energi tetap tersedia saat panel surya tidak menghasilkan daya [18]. Lama hari cadangan energi digunakan untuk memastikan sistem tetap dapat beroperasi dalam kondisi tertentu. Kebutuhan energi harian dan tegangan sistem menjadi dasar dalam menentukan besarnya kapasitas baterai. Batas pengosongan baterai diperhitungkan agar baterai tidak digunakan secara berlebihan. Efisiensi sistem juga diperhatikan sehingga baterai dapat bekerja lebih stabil dan memiliki umur pakai yang lebih panjang.

$$C_{Bat} = \frac{DoA \times E_{day}}{V_s \times DOD \times \eta_{ef}} \quad (6)$$

Dimana:

C_{Bat} = Kapasitas Baterai

DoA = Hari otonomi

E_{day} = Total energi harian

V_s = Tegangan sistem

η_{ef} = Efisiensi sistem = 95%

3.4.2. Analisis Biaya

Analisis biaya mencakup estimasi total biaya yang dikeluarkan untuk PLTS atap yang direncanakan.

3.4.2.1. Biaya Investasi Awal

Biaya investasi awal ini adalah jumlah seluruh biaya pengadaan dan instalasi komponen-komponen di sistem PLTS atap. Tahapannya adalah menghitung biaya investasi awal yaitu dari pembelian panel surya, SCC, inverter, baterai, mounting, kabel, proteksi, biaya instalasi, dan lain sebagainya. Biaya ditekan supaya tidak melebihi spesifikasi yang sudah dilakukan ketika perhitungan analisis teknis supaya tidak terlalu banyak mengeluarkan biaya. Informasi dan penentuan biaya diperoleh dari *marketplace* di Indonesia.

3.4.2.2. Biaya Operasional dan Pemeliharaan (O&M)

Biaya operasional dan pemeliharaan dilakukan untuk memastikan sistem PLTS atap dapat bekerja secara normal dan berkelanjutan. Terdapat dua hal fundamental yaitu pada penggantian baterai yang dilakukan selama 25 tahun sistem PLTS atap beroperasi dan pemeliharaan rutin yang

diperoleh dari 1% dari biaya investasi awal [20]. Pergantian baterai memperhatikan siklus baterai, karena setiap produk terdapat berbeda-beda spesifikasinya.

Mencari umur siklus baterai terlebih dahulu supaya tahu per berapa tahun baterai dapat bertahan, persamaannya sebagai berikut:

$$Umur\ siklus = \frac{Siklus\ LiFePo_4}{365\ Hari} \quad (7)$$

Kemudian setelah diperoleh umur siklus dapat dicari kebutuhan penggantian baterai dari 25 tahun sistem PLTS atap.

$$Kebutuhan\ baterai = \frac{N_{tahun}}{Umur\ Siktus} \quad (8)$$

3.4.2.3. Biaya Siklus Hidup (LCC)

Biaya siklus hidup atau *life cycle cost* (LCC) dihitung untuk mengetahui total biaya yang dikeluarkan oleh sistem PLTS selama masa operasinya [10]. Perhitungan ini mencakup biaya investasi awal di tambah biaya baterai dan nilai *annual worth* (AW). LCC digunakan untuk menilai efisiensi ekonomi sistem dalam jangka panjang. Diawali dengan mencari nilai AW terlebih dahulu.

$$A_w = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (9)$$

Kemudian setelah diperoleh nilai Aw dapat dilakukan perhitungan nilai LCC, persamaannya sebagai berikut:

$$LCC = I + BC + Aw \quad (10)$$

Dimana:

LCC = Biaya siklus hidup

I = Biaya investasi awal

BC = Biaya penggantian baterai

Aw = nilai biaya tahunan

3.4.2.4. Biaya Cost of Energy (COE)

Biaya *cost of energy* (COE) merupakan parameter ekonomi yang menunjukkan biaya pembangkitan listrik dalam satuan rupiah per kWh. Nilai COE diperoleh dengan membagi total biaya tahunan sistem dengan total energi listrik yang dihasilkan selama satu tahun dalam satuan kWh [18]. Diawali dengan mencari nilai CRF terlebih dahulu.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (11)$$

Kemudian setelah diperoleh nilai CRF dapat dilakukan perhitungan nilai C_{annual} , persamaannya sebagai berikut:

$$C_{annual} = LCC \times CRF \quad (12)$$

Setelah memperoleh C_{annual} , mencari nilai nkWh dengan menghitung total energi harian dikalikan 365 hari, persamaannya sebagai berikut:

$$nkWh = Total\ energi\ harian \times 365\ hari \quad (13)$$

Setelah semuanya diperoleh maka dapat dilakukan perhitungan nilai COE, persamaannya sebagai berikut:

$$COE = \frac{C_{annual}}{nkWh} \quad (14)$$

Dimana:

CRF = Porsi biaya tahunan

COE = Biaya produksi energi listrik

C_{annual} = Biaya ekonomi tahunan

nkWh = Jumlah energi total tahunan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan menyajikan hasil perhitungan serta analisis yang diperoleh dari perencanaan dan perhitungan sistem PLTS atap. Pada bagian ini dijelaskan nilai-nilai teknis dan nilai-nilai biaya yang dibutuhkan. Hasil yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui ukuran komponen dan biaya yang dibutuhkan dalam perencanaan sistem PLTS atap.

4.1. Potensi Energi

Potensi energi yang ada di lokasi penelitian ini yaitu tempat hunian kontrakan dengan koordinat -00.939643°, 100.410544° adalah 4,807 kWh/m² per day [21].

4.2. Kebutuhan Daya

Kebutuhan daya listrik pada tempat hunian kontrakan ditentukan berdasarkan pengamatan langsung terhadap peralatan elektronik yang digunakan setiap harinya. Pengamatan daya dilakukan ketika bulan Agustus 2025. Lokasi ini memiliki daya dengan kategori rumah tangga kecil yaitu 900 VA. Beban yang digunakan umumnya terdiri dari peralatan berdaya rendah dan digunakan pada waktu tertentu saja begitu juga dengan lama durasi penggunaannya. Pengamatan dilakukan dengan mencatat daya terpasang pada peralatan elektronik, jumlah perangkat, serta durasi pemakaian harian. Hal ini bertujuan untuk mengetahui gambaran konsumsi energi yang realistis. Data yang diperoleh kemudian dikalkulasi sehingga diperoleh total kebutuhan energi harian (kWh) sebagai dasar perencanaan PLTS atap. Berikut adalah data beban harian terdapat pada tabel 1.

Tabel 1. Total Energi Harian

Peralatan Listrik	Daya (W)	Jumlah	Jam	Energi (Wh)
Lampu Ruang Tengah	18	2	2	72
Lampu Kamar Mandi	5	1	12	60
Lampu Kamar Tidur	5	1	12	60
Lampu Tidur	2	1	4	8
Komputer	120	1	4	480
Laptop	60	1	4	240
Penanak Nasi	150	1	8	1.200
Kipas Angin	45	1	10	450
Charger HP	40	1	2	80
Total Energi Harian				2.650

Berdasarkan tabel, dapat dilihat beban terbesar berasal dari penanak nasi dengan konsumsi energi harian mencapai 1.200 Wh, diikuti oleh komputer sebesar 480 Wh, dan kipas angin sebesar 450 Wh. Untuk daya pada beban lampu relatif kecil namun menyala dalam durasi cukup lama sehingga daya yang digunakan sebesar 210 Wh setiap harinya. Pada perangkat lain seperti laptop dan charger HP juga memberikan tambahan konsumsi energi sebesar 240 Wh dan 80 Wh.

Akumulasi penggunaan daya oleh beban listrik harian di lokasi ini adalah sebesar 2.650 Wh atau 2,65 kWh per hari. Energi sebesar ini menunjukkan bahwa konsumsi energi harian menjadi dasar penting dalam menentukan kapasitas panel surya, SCC, inverter, baterai, dan komponen-komponen lainnya supaya sistem PLTS atap dapat menyuplai kebutuhan energi harian.

4.3. Analisis Aspek Teknis

4.3.1. Perhitungan PV Area

Diketahui E_b bernilai 2,65 kWh, untuk perhitungan kebutuhan daya akan dikalikan 2 supaya dapat mengantisipasi hari tanpa sinar matahari. Untuk G_{sr} diketahui 4,807 kWh/m²/hari dan η_{PV} yang digunakan sebagai acuan adalah tipe 550W MBB Half-cell Module JAM72S30 525-550/MR/1.500V Series 550 Wp dari produsen panel surya JA Solar sebesar 21,28%. Kemudian ada juga nilai efisiensi komponen sistem PLTS atap sebesar 85%. Sesuai perhitungan menggunakan persamaan (1), PV area yang dibutuhkan pada perencanaan PLTS atap adalah 6,095 m².

4.3.2. Perhitungan Wattpeak Panel Surya

Perhitungan *wattpeak* panel surya dilakukan setelah PV area diketahui, dimana nilai sebesar 6,095 m². Kemudian nilai *peak solar insolation* (PSI) sebesar 1.000 W/m². Sesuai perhitungan menggunakan persamaan (2), nilai *wattpeak* yang dibutuhkan pada perencanaan PLTS adalah sebesar 1.297,128 Wp.

4.3.3. Perhitungan Jumlah Panel Surya

Perhitungan jumlah panel surya dilakukan setelah perhitungan *wattpeak* panel surya dilakukan. Nilai *wattpeak* panel surya (P_{wp}) yang dibutuhkan adalah 1.297,128 Wp. Untuk panel surya yang digunakan sebagai acuan adalah tipe 550W MBB Half-cell Module JAM72S30 525-550/MR/1500V Series 550 Wp dari produsen panel surya JA Solar maka, (P_{mpp}) sebesar 550 Wp.

Sesuai perhitungan menggunakan persamaan (3), nilai *wattpeak* panel surya yang dibutuhkan pada perencanaan PLTS atap adalah 2,348 unit. Jumlah unit panel surya dibulatkan ke atas menjadi 3 unit.

Pada sistem ini digunakan panel surya monokristalin sebanyak 3 unit yang dirangkai secara seri. Setiap panel memiliki spesifikasi tegangan V_{mpp} sebesar 41,96 V, spesifikasi arus I_{mpp} sebesar 13,11 A, dan spesifikasi daya P_{mpp} sebesar 550 Wp per panel. Sistem, direncanakan menggunakan SCC dengan sistem 48 V yang memiliki tegangan maksimum 150 VDC dan arus maksimum 60A. Berdasarkan konfigurasi tiga panel surya yang dihubungkan secara seri, tegangan kerja total pada V_{mpp} adalah sebagai berikut:

$$V_{mpp} = 41,96 \times 3 = 125,88 \text{ V}$$

Dengan demikian, total daya maksimum yang dihasilkan oleh panel surya yang tersusun adalah sebagai berikut:

$$D_w = 125,88 \times 13,11 = 1.650 \text{ W}$$

4.3.4. Perhitungan Kapasitas Solar Charge Controller (SCC)

Kapasitas SCC ditentukan berdasarkan kebutuhan sistem PLTS atap dengan mempertimbangkan faktor keamanan (*safety factor*). Pada penelitian ini diketahui jika daya maksimum yang dihasilkan oleh panel surya adalah sebesar 1.650 W. Faktor keamanan yang digunakan adalah 1,25 dan tegangan kerja V_{mpp} adalah 125,88 V.

Dari hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (4), untuk nilai arus SCC dibutuhkan nilai arus minimumnya sebesar 16,38 A atau lebih baik lagi jika nilainya melebihi nilai minimum tersebut. Dengan mempertimbangkan ketersediaan produk di pasaran serta untuk pengembangan dimasa yang akan datang, maka SCC yang digunakan adalah tipe MPPT dengan kapasitas arus maksimum 60 A dan tegangan input maksimum hingga 150 Vdc. SCC yang digunakan sebagai acuan adalah SCC MPPT 60A yang terdapat di inverter Techfine 3800 VA (3.000 W) Hybrid Low Frequency dengan sistem pengisian daya (*charging power*) sebesar 48 V.

4.3.5. Perhitungan Kapasitas Inverter

Kapasitas inverter ditentukan berdasarkan daya maksimum sistem dengan mempertimbangkan faktor keamanan (S_f) untuk menjamin keandalan operasi sistem PLTS atap. Pada sistem PLTS atap yang direncanakan ini daya maksimum yang dihasilkan oleh panel surya adalah sebesar 1.650 W.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (5), kapasitas inverter yang dibutuhkan oleh sistem PLTS atap minimal memiliki daya sebesar 2.062,5 W atau dibulatkan menjadi 2.100 W. Sehingga, inverter yang digunakan pada sistem PLTS atap ini harus memiliki kapasitas di atasnya.

Disisi lain perlu mempertimbangkan ketersediaan inverter di pasaran serta kebutuhan pengembangan sistem dikemudian hari dipilahlah inverter dengan kapasitas nominal 3.000 W. Tegangan input 48 VDC dan tegangan keluaran 220 VAC yang berjumlah hanya 1 unit karena sudah mencukupi bahkan lebih untuk kapasitas inverter yang digunakan. Pemilihan inverter lebih besar dari yang minimum dibutuhkan memiliki tujuan untuk memberikan cadangan daya, keandalan sistem, danantisipasi lonjakan beban sesaat yang biasa terjadi di sistem tenaga listrik. Untuk inverter yang digunakan adalah inverter yang sudah memiliki SCC MPPT 60 A yaitu Inverter Techfine 3.800 VA (3.000 W) Hybrid Low Frequency.

4.3.6. Perhitungan Kapasitas baterai

Sistem PLTS atap ini berkonfigurasi *off-grid* membutuhkan baterai untuk memenuhi kebutuhan harian. dalam perhitungannya mempertimbangkan *depth of discharge* (DoD) sebesar 80% serta efisiensi sistem baterai. Pada penelitian ini sistem PLTS atap mempertimbangkan hari otonomi selama 2 hari. Konsumsi energi harian yang telah diketahui adalah sebesar 2.650 Wh dengan tegangan sistem 48 V.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (6), diperoleh kapasitas baterai minimum yang dibutuhkan oleh sistem PLTS atap sebesar 145,3 Ah pada sistem 48 V. Sehingga, pada sistem PLTS atap ini digunakan 1 unit baterai 48 V dengan kapasitas ≥ 150 Ah. Kapasitas tersebut lebih besar dari kebutuhan minimum hasil perhitungan, sehingga mampu memenuhi kebutuhan energi harian selama 2 hari otonomi. Begitu juga baterai untuk menjamin masa pakai lebih panjang dijaga batas amannya dengan menggunakan DoD sebesar 80% saja.

4.4. Analisis Aspek Biaya

Analisis biaya PLTS dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya yang dibutuhkan dalam perencanaan sistem PLTS atap. Pada penelitian ini, sistem PLTS yang direncanakan adalah PLTS atap dengan konfigurasi *off-grid*. Komponen-komponen seperti panel surya, inverter, baterai, dan lain-lain sudah ditentukan sehingga tinggal menghitung aspek biaya. Untuk harga komponen-komponen diperoleh dari harga pasar terkini di *marketplace* disesuaikan dengan spesifikasi teknis dalam perencanaan sistem PLTS atap.

4.4.1. Perhitungan Investasi Awal

Biaya investasi awal adalah biaya yang dikeluarkan pada tahap awal perencanaan sistem PLTS atap. Terdapat komponen utama dan komponen pendukung serta biaya jasa instalasi. Rincian biaya sebagai investasi awalnya dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Harga komponen investasi awal

Komponen	Jumlah	Harga (Rp)	Total (Rp)
JaSolar 550 Wp JAM72S30 525-550/MR	3	1.499.000	4.497.000
Inverter hybrid Techfine 3800 VA (3000 Watt) 48V MPPT 60A Low Frequency	1	4.750.000	4.750.000
Baterai CUBEBATT Lifepo4 48 V 150 Ah 3500 Cycle	1	15.970.000	15.970.000
Kabel SUPREME FLEKSIBEL NYAF 6mm	40	19.500	780.000
PowMr 3M 6mm ² 10AWG Kabel Ekstensi Surya Kawat PV Tembaga Lapis untuk Kabel Panel Surya Pengendali Surya dengan Konektor - 3M Black+3M Red	1	140.000	140.000
Aksesoris (Skun, konektor, Mur, klem, skrup, fisher, mcb, dll)	1	700.000	700.000
Panel Box	1	270.000	270.000
Rak Baterai	1	365.000	365.000
Jasa Instalasi	1	1.500.000	1.500.000
Total			28.972.000

Berdasarkan data tabel 2 tersebut, sistem PLTS atap ini komponen utamanya adalah panel surya, inverter, SCC, dan baterai LiFePo₄. Untuk komponen pendukung berupa kabel DC dan AC, aksesoris, panel box, rak baterai, dan jasa instalasi. Jika ditotal seluruh komponen sesuai dengan data tabel 2, investasi awal ini dapat dinyatakan juga sebagai total seluruh biaya komponen sistem PLTS atap. Sehingga, total biaya investasi awal dapat dilihat pada tabel 2 menyesuaikan dengan total biaya komponen adalah sebesar Rp 28.972.000. Nilai ini adalah total biaya yang dibutuhkan untuk membangun sistem PLTS atap dengan sistem *off-grid*. Biaya investasi awal ini selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis biaya lanjutan, yaitu biaya O&M, biaya LCC, dan biaya CoE.

4.4.2. Perhitungan Biaya Operasional dan Pemeliharaan (O&M)

Biaya operasional dan pemeliharaan pada sistem PLTS terdiri dari biaya penggantian baterai dan pemeliharaan rutin tahunan.

4.4.2.1. Perhitungan Biaya Penggantian Baterai

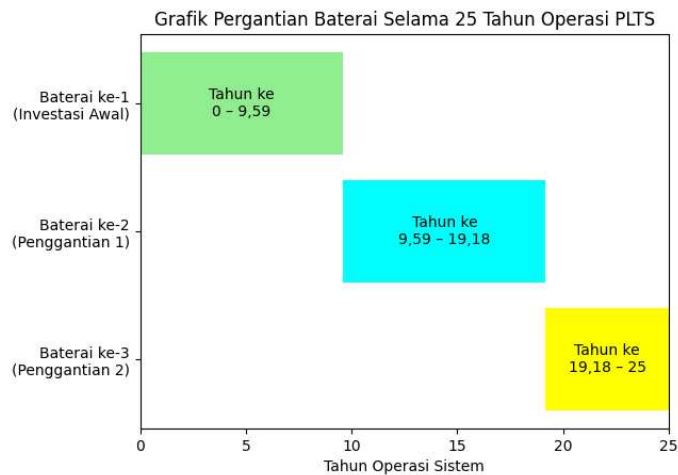
Penggantian baterai akan menggunakan baterai lithium terbaru yaitu LifePo₄. Biaya penggantian baterai dengan menggunakan baterai LiFePO₄ relatif lebih mahal dari baterai asam timbal dengan harga satuannya Rp 15.970.000. Baterai yang digunakan adalah CUBEBATT LiFePo₄ 48 V 150 Ah

3.500 Cycle. Untuk umur siklus baterai LiFePO_4 di data spesifikasi adalah 3.500 siklus dapat dibagi selama 365 hari.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (7), baterai LiFePO_4 dapat bertahan selama 9,59 tahun. Oleh karena itu, kebutuhan baterai dalam 25 tahun dapat dihitung setelah memperoleh perhitungan umur siklus dari baterai LiFePO_4 .

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (8), baterai yang dibutuhkan adalah 2,61 unit baterai LiFePO_4 . Kebutuhan baterai dibulatkan menjadi 3 unit baterai selama umur operasi sistem PLTS atap.

Kebutuhan baterai adalah 3 unit selama 25 tahun operasional sistem PLTS atap. Baterai pertama dari tahun ke 0 – 9,59 adalah baterai ketika investasi awal. Kebutuhan penggantian baterai hanya membutuhkan 2 buah baterai saja ketika tahun ke 9,59 – 19,18 dan tahun ke 19,18 – 28,77. Pergantian kedua ditahun ke 19,18 – 28,77 melewati tahun ke-25 operasional sistem PLTS atap karena masih menggunakan baterai ke-3. Grafik pergantian baterai dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Grafik pergantian baterai LiFePO_4

Dari gambar 3 dapat dilihat jika penggantian baterai adalah sebanyak 2 unit baterai selama sistem PLTS atap beroperasi. Sehingga biaya baterai ini cukup dikalikan 2 dari harga baterai, totalnya untuk biaya penggantian baterai adalah Rp 31.940.000. Maka, biaya penggantian baterai pada perencanaan PLTS atap adalah sebesar Rp 31.940.000 per 25 tahun.

4.4.2.2. Perhitungan Biaya Pemeliharaan Rutin

Biaya pemeliharaan rutin per tahun adalah 1% dari biaya investasi awal sebesar Rp 28.972.000. Maka, diperoleh jumlahnya adalah Rp 289.720 per tahun. Maka, biaya pemeliharaan rutin pada perencanaan PLTS atap adalah sebesar Rp 289.720 per tahun.

4.4.3. Perhitungan Biaya Life Cycle Cost (LCC)

Biaya LCC digunakan untuk mengetahui total biaya yang dikeluarkan selama umur operasional sistem PLTS atap. Perhitungan biaya LCC membutuhkan nilai biaya pemeliharaan tahunan yang sudah diketahui adalah sebesar Rp 289.720 dengan umur operasional 25 tahun dan tingkat diskonto sebesar 10%. Setelah itu menghitung nilai *annual worth* (AW) untuk mengetahui biaya tahunan.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (9), diperoleh nilai Aw adalah sebesar Rp 2.629.800. Kemudian setelah diperoleh nilai Aw dapat dilakukan perhitungan nilai LCC.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (10), diperoleh biaya siklus hidup (LCC) sistem PLTS atap adalah sebesar Rp 63.541.800 yang merepresentasikan total biaya yang harus disiapkan selama masa operasi 25 tahun PLTS atap.

4.4.4. Perhitungan Biaya Cost of Energy (COE)

Biaya COE adalah biaya produksi energi listrik per kWh yang dihasilkan oleh sistem PLTS atap selama umur operasionalnya. Perhitungan dimulai dari menghitung nilai *capital recovery factor*

(CRF) dimana menghitung porsi biaya tahunan yang sama dengan suatu biaya total selama umur sistem disesuaikan dengan tingkat diskonto.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (11), diperoleh nilai CRF adalah sebesar 0,11. Setelah memperoleh nilai CRF selanjutnya menghitung biaya tahunan sistem. Kemudian, berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (12), diperoleh nilai biaya ekonomi tahunan adalah sebesar Rp 6.989.598 per tahun.

Nilai ini menyatakan biaya ekonomi tahunan yang setara dengan seluruh biaya sistem PLTS atap selama 25 tahun. Setelah itu dilakukan perhitungan biaya CoE, namun sebelum menghitung biaya CoE harus dilakukan perhitungan kWh atau energi tahunan sistem PLTS atap. Dimana total energi harian dikalikan hari sealama satu tahun.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (13), diperoleh nilai energi tahunan adalah sebesar 967,25 kWh/tahun. Kemudian menghitung nilai COE sesuai perhitungan menggunakan persamaan (14), maka biaya COE pada perencanaan PLTS atap diperoleh biaya per kWh adalah sebesar Rp 7.227.

4. KESIMPULAN

Sistem PLTS atap dengan konfigurasi *off-grid* pada bangunan pada koordinat -00.939643°, 100.410544° telah berhasil dilakukan analisis perencanaan untuk memenuhi kebutuhan energi harian sebesar 2,65 kWh/hari pada rumah tangga dengan daya 900 VA dari PLN. Hasil perhitungan analisis aspek teknis menunjukkan bahwa kebutuhan luas panel surya (PV area) sebesar 6,095 m². Perhitungan *wattpeak* panel surya diperoleh sebesar 1.297,128 Wp. Perhitungan jumlah panel surya diperoleh sebesar 3 unit yang menghasilkan tegangan kerja total sebesar 125,88 V dan arus 13,11 A sehingga daya total maksimum panel surya yang tersusun adalah 1.650 W.

Sistem penyimpanan energi sistem PLTS atap menggunakan 1 unit baterai LiFePO₄ 48 V dengan kapasitas 150 Ah yang mampu memenuhi kebutuhan energi selama 2 hari otonomi dengan batas kedalaman pengosongan (DoD) sebesar 80% dan efisiensi sistem 95%. Untuk umur baterai yaitu selama ±9,59 tahun menyesuaikan dengan spesifikasi siklus baterai LiFePO₄ yang digunakan dengan umur operasi PLTS atap selama 25 tahun dibutuhkan 3 unit baterai. Baterai 1 ada di investasi awal dan 2 unit sebagai penggantian saat operasional selama 25 tahun.

Pada SCC membutuhkan arus minimum sebesar 16,38 A, oleh karena itu dipilih SCC MPPT 60 A. Pemilihan SCC MPPT 60 A untuk menjamin keandalan sistem karena arusnya lebih besar dari yang dibutuhkan sistem PLTS atap. Sementara itu untuk kapasitas inverter minimum yang dibutuhkan adalah sebesar 2.062,5 W. Sehingga, digunakan inverter yang berkapasitas 3.000 W yang berguna untuk memberikan cadangan daya dikemudian hari serta mengatasi lonjakan beban sesaat. Untuk inverter dan SCC sudah menggunakan perangkat yang sudah jadi satu kesatuan, didalam inverter 3000W tersebut sudah terdapat SCC MPPT 60A.

Hasil perhitungan analisis aspek biaya pada total investasi awal sistem PLTS atap adalah sebesar Rp 28.972.000. Biaya operasional dan perawatan (O&M) terdiri dari biaya penggantian baterai sebesar Rp 31.940.000 selama operasional sistem 25 tahun dan pemeliharaan rutin Rp 289.720 per tahun. Nilai annual worth (AW) pada tingkat diskonto 10% diperoleh sebesar Rp 2.629.800. Sehingga, nilai LCC sistem PLTS atap adalah sebesar Rp 63.541.800. Nilai LCC ini memberikan representasi total biaya yang harus disiapkan selama sistem beroperasi, akan tetapi tidak seluruhnya dikeluarkan pada tahap awal pembangunan sistem PLTS atap.

Nilai LCC digunakan untuk menghitung CoE dengan nilai CRF sebesar 0,11 dan energi listrik tahunan (kWh) sebesar 967,25 kWh/tahun. Sehingga, diperoleh nilai CoE sebesar Rp 7.227 per kWh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Pambudi *et al.*, "Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development," *Sustain.*, vol. 15, no. 3, 2023, doi: 10.3390/su15032342.
- [2] Handayani N A and Ariyanti D, "Potency of Solar Energy Applications in Indonesia Article History," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 1, no. 2, pp. 33–38, 2012.
- [3] D. F. Silalahi, A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and L. Hayes, "Indonesia's vast solar energy potential," *Energies*, vol. 14, no. 17, 2021, doi: 10.3390/en14175424.

- [4] F. Afif and A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 6, no. 1, p. 43, 2022, doi: 10.30588/jeemm.v6i1.997.
- [5] L. Asdiyan Salsabila Ayu, I. Ayu Dwi Giriantari, and I. Nyoman Setiawan, "Analisis Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap On-Grid 11,2 kWp Di Residensial Bukit Gading Mediterania, Jakarta Utara," *J. SPEKTRUM*, vol. 10, no. 1, pp. 32–43, 2023.
- [6] A. Kurnia, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya Fotovoltaik Sebagai Energi Baru Dan Terbarukan Peluang Serta Kendala," *J. TEDC*, vol. 19, no. 1, p. 42, 2025, doi: 10.70428/tedc.v19i1.1200.
- [7] H. Gusmedi, R. P. Putra, A. S. Samosir, U. Lampung, and K. B. Lampung, "DESAIN PEMBANGKIT LISTRIK," vol. 13, no. 1, 2025.
- [8] B. D. P. K. L. P. P. Fidelchristo Pijoh, "Pijoh," *Ind. Syst. Eng. Journals*, vol. 2, no. 2, pp. 201–207, 2024.
- [9] I. Johnson, A. Uwakwe, N. Ubani, and H. Udeani, "Design modelling of stand-alone solar photovoltaic systems for a three-room bungalow in Umuahia city, Abia state, Nigeria," *Poljopr. Teh.*, vol. 50, no. 3, pp. 27–45, 2025, doi: 10.5937/poljiteh2503027j.
- [10] M. L. Kolhe *et al.*, "Reliability analysis and life cycle costing of rooftop solar photovoltaic (PV) system operating in a composite environment," *Sci. Technol. Energy Transit.*, vol. 80, 2025, doi: 10.2516/stet/2025012.
- [11] A. N. Sifa, "Rancang Bangun Pembangkit Tenaga Surya (Plts) 200Wp Untuk Suplai Daya Sistem Kendali Dan Monitoring Pemeliharaan Tanaman Media Air," *Orbith Maj. Ilm. Pengemb. Rekayasa dan Sos.*, vol. 19, no. 2, pp. 187–200, 2023, doi: 10.32497/orbith.v19i2.5002.
- [12] R. A. Setiawan *et al.*, "Analisis Perhitungan Kebutuhan Sistem pada Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Rumah Tangga 900 Watt," *Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. 2, pp. 11–26, 2025.
- [13] K. R. M. Supapo, L. Lozano, and E. M. Querikiol, "Performance Evaluation of an Existing Renewable Energy System at Gilutongan Island, Cebu, Philippines," *J. Eng.*, vol. 2024, no. 1, 2024, doi: 10.1155/2024/3131377.
- [14] R. Tinggal and D. Kota, "Analisis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Offgrid Untuk Rumah Tinggal Di Kota Banjarbaru," vol. 4, no. 1, pp. 1–7, 2021.
- [15] I. P. D. P. Ariantika, I. N. Setiawan, and I. W. Sukerayasa, "ANALISA EKONOMI RANCANGAN PLTS OFF-GRID PADA ADIDAYA WORKSHOP," vol. 10, no. 3, pp. 78–85, 2023.
- [16] N. I. Sijabat *et al.*, "Perencanaan PLTS Off-Grid Gedung Kantor Kelurahan Amban Manokwari Papua Barat," vol. 19, no. 03, pp. 349–357, 2025.
- [17] D. Solar *et al.*, "Vol 10, No. 1, Juli 2024," vol. 10, no. 1, pp. 136–145, 2024.
- [18] W. DATIKA, *PERANCANGAN PV ON GRID DENGAN BATERAI DALAM PENGEMBANGAN KAWASAN ELECTRIFYING WELLA DATIKA NIM: 23222397 (Program Studi Magister Teknik Elektro) INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG Januari 2025 ABSTRAK DALAM PENGEMBANGAN KAWASAN ELECTRIFYING NIM: 23222397 (Pr*, vol. 23222397, 2025.
- [19] T. E. K. Zidane, S. M. Zali, M. R. Adzman, M. F. N. Tajuddin, and A. Durusu, "PV array and inverter optimum sizing for grid-connected photovoltaic power plants using optimization design," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1878, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1878/1/012015.
- [20] A. Livera, M. Theristis, L. Micheli, E. F. Fernandez, J. S. Stein, and G. E. Georghiou, "Operation and Maintenance Decision Support System for Photovoltaic Systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 42481–42496, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3168140.
- [21] Global Solar Atlas, "Global Solar Atlas - Global Horizontal Irradiation per Day," 2025. <https://globalsolaratlas.info/detail?c=-0.939508,100.410683,19&s=-0.939643,100.410544&m=site>