

Studi Teknoekonomi PLTS Apung 141,4 kWp Bendungan Telaga Tunjung Bali

Julius Mahendra Sihombing^{1*}, Surung Rafael Sihaloho²,
 I Nyoman Satya Kumara³, I Wayan Sukerayasa⁴, Wayan Gede Ariastina⁵

¹⁻⁵Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

*Penulis Korespondensi: Julius.mahendra106@student.unud.ac.id¹

Abstract. The increasing demand for electrical energy and the issue of climate change are driving the utilization of renewable energy, one of which is through Solar Power Plants (PLTS). The Province of Bali targets the development of PLTS of 108.2 MW, equivalent to 8.62% of the total solar energy potential of 1,254 MW by 2025. However, land limitations pose an obstacle to the construction of large-scale PLTS. Floating solar power plant design can be a solution to this issue. By utilizing 4,955.32 m² of water surface at the Telaga Tunjung Dam, the Floating Solar Power Plant at Telaga Tunjung Dam has a potential capacity of 141.4 kWp, using 280 Trina Solar modules of type TSM-DEG18MC.20(II) (505 Wp) combined with one SG110CX inverter with a capacity of 110 kW. The annual electricity production of the floating solar power plant, based on Helioscope software, is 201.1 MWh. The economic feasibility parameters used in this study include initial investment cost, Profitability Index (PI), and Payback Period (PP). The analysis results show that the 141.4 kWp floating solar power plant project at Telaga Tunjung Dam has an initial investment value of IDR 1,248,764,582, a PI of 1.26, and a PP of 3.91 years. Therefore, this project is considered economically feasible and contributes positively to reducing CO₂ emissions.

Keywords: CO₂ Emission Reduction; Economic Feasibility Analysis; Floating PV System; Renewable Energy; Telaga Tunjung Dam

Abstrak. Peningkatan kebutuhan energi listrik dan isu perubahan iklim mendorong pemanfaatan energi terbarukan, salah satunya melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), di mana provinsi Bali menargetkan pengembangan PLTS sebesar 108,2 MW atau setara 8,62% dari total potensi energi surya yang mencapai 1.254 MW pada tahun 2025, namun keterbatasan lahan menjadi hambatan dalam pembangunan PLTS skala besar. Perancangan PLTS apung dapat menjadi jawaban atas permasalahan tersebut, dengan memanfaatkan 4.955,32 m² muka air Bendungan Telaga Tunjung, PLTS Apung Bendungan Telaga Tunjung memiliki potensi sebesar 141,4 kWp, dengan menggunakan 280 modul surya Trina Solar berjenis TSM-DEG18MC.20(II) (505 Wp) dan dipadukan dengan 1 unit *inverter* berjenis SG110CX berkapasitas 110 kW, produksi energi listrik tahunan PLTS apung dengan menggunakan software *Helioscope* adalah sebesar 201,1 MWh. Parameter kelayakan ekonomi yang digunakan pada penelitian ini meliputi biaya investasi awal, *Profability Index* (PI) dan *Payback Period* (PP). Hasil analisis menunjukkan bahwa proyek PLTS apung 141,4 kWp di bendungan Telaga Tunjung memiliki nilai investasi awal sebesar Rp 1.248.764.582, PI sebesar 1,26, dan nilai PP sebesar 3,91 tahun, Dengan demikian, proyek ini dinilai layak secara ekonomi serta berkontribusi positif terhadap pengurangan emisi CO₂.

Kata kunci: Analisis Kelayakan Ekonomi; Bendungan Telaga Tunjung; Energi Terbarukan; Pengurangan Emisi CO₂; PLTS Apung

1. LATAR BELAKANG

Indonesia, yang merupakan negara kepulauan beriklim tropis dan berada di kawasan garis khatulistiwa, memiliki cadangan potensi energi surya yang melimpah dan dapat dimanfaatkan sepanjang tahun. Di sisi lain, Indonesia juga memiliki kekayaan sumber daya air yang luar biasa, berupa danau, waduk, sungai, dan wilayah pesisir yang luas. Merujuk pada Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), Provinsi Bali memiliki target untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sebesar 108,2 MW atau sekitar 8,62% dari total potensi yang mencapai 1.254 MW pada tahun 2025.

Adapun terdapat beberapa tantangan dalam upaya pengembangan PLTS di Provinsi Bali di antaranya dalam pembangunan PLTS dalam skala besar membutuhkan lahan yang luas untuk penempatan modul surya, sebagai contoh PLTS Kayubihi dengan kapasitas 1 MWp yang dioperasikan secara *ground mounted* di Kabupaten Bangli membutuhkan lahan seluas 2 hektar.

Selain itu, Selain itu, Bali adalah pulau dengan luas wilayah yang terbatas dan sektor pariwisata yang sangat diminati oleh wisatawan, sehingga ketersediaan lahan menjadi terbatas dan harga lahan pun cenderung tinggi. Guna mengatasi tantangan tersebut, Teknologi PLTS terapung, yakni pemasangan panel di atas permukaan air, dapat menjadi alternatif solusi untuk mengatasi kendala keterbatasan lahan yang ada. Berdasarkan latar belakang tersebut, dilakukan kajian tentang perancangan PLTS apung di Bendungan Telaga Tunjung guna mendukung Bali Energi Bersih.

2. KAJIAN TEORITIS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari dan mengonversinya menjadi energi listrik melalui sel fotovoltaik. Sel tersebut bekerja dengan mengubah cahaya matahari menjadi listrik, di mana jumlah daya yang dihasilkan bergantung pada intensitas radiasi matahari yang mengenai permukaan modul fotovoltaik.

PLTS Apung

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terapung, yang dalam bahasa Inggris dikenal sebagai *Floating Photovoltaics* (FPV), merupakan salah satu bentuk inovasi pemanfaatan energi surya untuk menghasilkan listrik. Jika dibandingkan dengan sistem PLTS berbasis darat, teknologi ini menawarkan sejumlah keunggulan, terutama di wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi atau lahan terbatas yang sulit dialih fungsikan.

Komponen PLTS Terapung

Komponen PLTS Terapung terdiri dari:

a. Modul Surya

Modul surya, atau panel surya, adalah perangkat yang berfungsi mengubah cahaya menjadi arus listrik melalui komponen kecil bernama sel fotovoltaik. Sel fotovoltaik sendiri tersusun dari dua jenis material berbeda yang mampu menghasilkan listrik ketika terkena cahaya. Secara sederhana, sel surya dibuat dari bahan semikonduktor tipe P dan tipe N,

yang saat menerima paparan sinar matahari akan memicu pergerakan elektron sehingga tercipta aliran arus Listrik.

b. Inverter

Inverter merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) yang selanjutnya dapat disalurkan menuju beban atau jaringan PLN. Rangkaian inverter terdiri dari rangkaian osilator, rangkaian saklar dan transformator. Penggunaan inverter juga bertujuan supaya arus listrik yang dihasilkan oleh PLTS adalah arus AC yang konstan arus searah (DC) yang diproduksi oleh panel surya tidak konstan karena bergantung pada intensitas penyinaran matahari.

c. *Floater*

Floater merupakan komponen krusial dalam sistem PLTS terapung karena berfungsi sebagai struktur pendukung modul surya di atas permukaan air. Material pembuat *floater* umumnya dipilih berdasarkan kekuatan mekanisnya, ketahanannya terhadap paparan sinar ultraviolet (UV) dan korosi, serta kemudahan dalam perawatan. Beberapa bahan yang sering digunakan antara lain aluminium dan *High Density Polyethylene* (HDPE).

d. *Anchor* dan *Mooring*

Sistem *anchor* dan *mooring* berfungsi untuk menjaga kestabilan posisi *floater* agar tidak bergeser akibat pengaruh arus air maupun hembusan angin. Secara umum, sistem ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu *catenary mooring* dan *taut leg mooring*.

Peraturan Pemerintah Terkait Penggunaan Bendungan

Berdasarkan Peraturan Menteri PUPR No.6 tahun 2020, pasal 105 ayat (3) tentang pemanfaatan ruang pada waduk. Pemanfaatan muka air untuk PLTS terapung hanya dapat menggunakan 5% dari total luas muka air normal. sehingga dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$L_{PLTS} = \text{Luas Muka Air Bendungan} \times 5\%$$

Helioscope

HelioScope adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh *Folsom Labs* dengan tujuan untuk menyederhanakan proses perancangan, rekayasa, dan pemasaran sistem pembangkit listrik tenaga surya.

Analisa Ekonomi

Life Cycle Cost

Life Cycle Cost (LCC) atau Biaya Siklus Hidup merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk mengevaluasi dan menghitung keseluruhan biaya yang timbul sepanjang

masa operasional suatu proyek atau sistem, mulai dari investasi awal, biaya operasional, pemeliharaan, hingga biaya akhir seperti pembongkaran atau daur ulang.

Perhitungan LCC mencakup seluruh pengeluaran, mulai dari biaya instalasi awal, biaya operasional dan pemeliharaan dalam jangka waktu tertentu, hingga penggantian komponen di masa depan. Secara lebih rinci, LCC meliputi biaya investasi awal, biaya operasional rutin, pemeliharaan, penggantian peralatan, aspek keamanan, asuransi, serta nilai sisa atau nilai jual kembali dari sistem atau produk tersebut.

Cost of Energy

Biaya Energi (*Cost of Energy*) merupakan rasio antara total biaya tahunan suatu sistem dengan total energi yang dihasilkan pada periode yang sama. Dari sudut pandang ekonomi, struktur biaya energi pada sistem PLTS memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utama terletak pada proporsi biayanya, di mana PLTS membutuhkan investasi awal yang relatif besar untuk pembangunan dan pemasangan, namun memiliki biaya operasional serta pemeliharaan yang rendah selama masa operasinya.

Capital Recovery Factor

Faktor Pemulihan Modal adalah suatu parameter yang berfungsi untuk mengonversi seluruh arus kas yang berasal dari biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost*) menjadi rangkaian pembayaran tahunan dengan jumlah tetap. Dengan kata lain, faktor ini memudahkan perhitungan dengan mengubah total biaya proyek sepanjang masa operasionalnya menjadi biaya tahunan ekuivalen, sehingga mempermudah analisis kelayakan dan perbandingan antarproyek dari sisi pembiayaan.

Net Present Value

Net Present Value (NPV) merupakan selisih antara nilai kini dari arus kas masuk dan arus kas keluar, yang diperoleh dengan mendiskontokan nilai tersebut menggunakan *cost of capital* sebagai tingkat diskonto. Secara sederhana, NPV merepresentasikan estimasi nilai arus kas di masa depan yang telah dikonversi ke nilai saat ini, sehingga dapat digunakan untuk menilai kelayakan finansial suatu proyek berdasarkan potensi keuntungan yang dihasilkan setelah memperhitungkan faktor waktu dan biaya modal.

Profitability Index

Profitability Index (PI) adalah suatu indikator yang digunakan untuk mengukur tingkat keuntungan yang dihasilkan dari sebuah proyek selama masa operasionalnya. PI juga menggambarkan rasio antara total nilai kini (*present value*) dari arus kas bersih dengan besarnya investasi awal (*initial investment*).

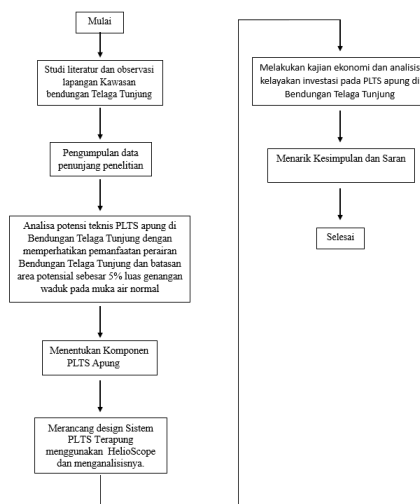
Discounted Payback Period

Discounted Payback Period (DPP) adalah periode waktu yang diperlukan untuk mengembalikan nilai investasi awal dengan menggunakan arus kas masuk yang telah disesuaikan melalui proses diskonto. Metode ini mempertimbangkan nilai waktu dari uang, sehingga perhitungan pengembalian modal menjadi lebih realistis. Suatu proyek dinilai layak secara finansial apabila DPP yang diperoleh lebih pendek dibandingkan umur proyek yang telah direncanakan, karena hal tersebut menunjukkan bahwa investasi dapat kembali sebelum masa operasional berakhir.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan Bendungan Telaga Tunjung, yang berada di Desa Timpag, Kecamatan Kerambitan, Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali, dan dilaksanakan dalam rentang waktu Januari hingga Agustus 2025. Sumber data yang digunakan meliputi data sekunder dari Balai Wilayah Sungai (BWS) Bali Penida, serta data primer yang dikumpulkan melalui observasi lapangan langsung dan wawancara dengan petugas terkait serta warga setempat.

Tahapan penelitian secara rinci ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

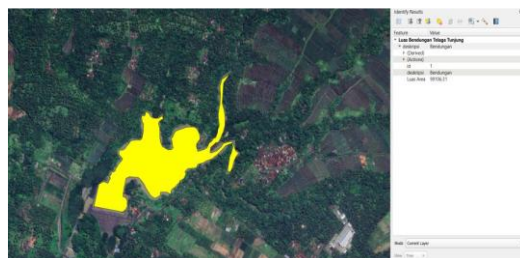
Gambaran Umum Bendungan Telaga Tunjung

lokasi Bendungan Telaga Tunjung secara geografis terletak pada koordinat 8°28'26" LS dan terletak pada 115°5'54"BT. Wilayah hilir Bendungan Telaga Tunjung melewati 11 Desa di dua Kecamatan yaitu Kecamatan Kerambitan meliputi Desa Timpag, Desa Meliling, Desa Baturiti, Desa Tista, Desa Belumbang, Desa Tibubiyu dan melewati Kecamatan Selemadeg Timur meliputi Desa Gadungan, Desa Batas, Desa Mambang, Desa Tanguntiti, Desa Beraban.

Manfaat bendungan untuk mengairi irigasi seluas 2.522 ha dan air baku 120 lt/det. Bendungan Telaga Tunjung mendapatkan Persetujuan *Design* dari Menteri Pekerjaan Umum pada 9 Juni 2005 melalui sertifikat nomor 05/KKB/M/2005. Kemudian, izin pengairan awal waduk dikeluarkan pada 25 April 2007 dengan sertifikat nomor 02/KKB/M/2007, sedangkan izin mengoperasikan bendungan diterbitkan pada 28 Februari 2014 dengan nomor PR.01.04-Mn/109

Analisis Luasan Muka Air untuk PLTS Terapung di Bendungan Telaga Tunjung

Berdasarkan Peraturan Menteri PUPR No.6 tahun 2020 pemanfaatan muka air untuk PLTS terapung hanya dapat menggunakan 5% dari total luas muka air normal. Untuk mengetahui luas muka air bendungan dapat menggunakan citra satelit seperti pada gambar 2 berikut.



Gambar 2. Menghitung Luas Muka Air Bendungan Telaga Tunjung

Sehingga pemanfaatan luas muka air Bendungan Telaga Tunjung dalam pemasangan PLTS terapung dapat dihitung dengan persamaan

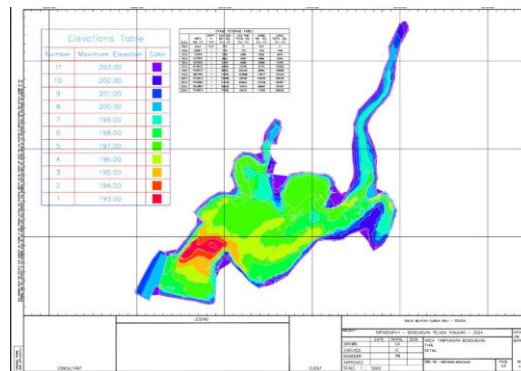
$$L_{PLTS} = \text{Luas Muka Air Bendungan} \times 5\%$$

$$L_{PLTS} = 99.106m^2 \times 5\%$$

$$L_{PLTS} = 4.955,32 m^2$$

Menentukan Lokasi Strategis PLTS Apung di Bendungan Telaga Tunjung

Muka air bendungan Telaga Tunjung terdiri dari kedalaman yang bervariasi, berdasarkan klasifikasi kedalaman dari Balai Wilayah Sungai Bali-Penida bahwa kedalaman memiliki 4 zona elevasi yang bervariasi dari 193 m hingga 203 m, seperti pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Peta *Elevation Grid* Bendungan Telaga Tunjung

Berdasarkan peta *elevation grid* pada gambar 3 dapat dilihat bahwa variasi kedalaman dari bendungan Telaga Tunjung di bagi menjadi 4 zona kedalaman yang ditandai dengan warna ungu dan biru yang memiliki elevasi 200 m hingga 203 m dan yang berwarna merah hingga orange dengan kedalaman 193 m hingga 195 m. Penentuan lokasi pemasangan PLTS apung pada umumnya berada di muka air yang kedalamannya dangkal, sehingga zona muka air bendungan Telaga Tunjung yang berwarna merah hingga kuning sangat cocok sebagai lokasi pemasangan PLTS apung.

Konfigurasi Komponen PLTS

Panel Surya

Jenis panel surya yang digunakan adalah tipe *monocrystalline* dengan mempertimbangkan berbagai faktor seperti kondisi iklim Indonesia, efisiensi, biaya, serta panel surya tersebut harus memiliki resistensi terhadap tingkat kelembapan dan tingkat korosi yang lebih tinggi dikarenakan faktor muka air yang memiliki tingkat kelembapan lebih tinggi di bandingkan daratan. Ketentuan khusus panel surya yang digunakan harus disertifikasi dengan standar IEC 61215 dan IEC 61730 sesuai dengan Peraturan Menteri ESDM No.2 Tahun 2021.

Tabel 1. Standar Sertifikasi Panel Surya di Indonesia

No	Standar	Tentang
1	SNI IEC 61215	Modul Fotovoltaik (PV) terestrial - Kualifikasi desain dan pengesahan jenis.
2	SNI IEC 61730	Kualifikasi keamanan modul fotovoltaik (PV).

Panel surya yang digunakan diproduksi oleh Trina Solar berjenis *bifacial dual glass monocrystalline module* dengan tipe Vertex DEG18MC.20(II) dengan kapasitas maksimum 505 Wp yang sudah tersertifikasi IEC61216, IEC61730, IEC61701, IEC62716, UL1703 yang memiliki berat 30,1 kg dengan panjang 2187 mm, lebar 1102 mm dan memiliki ketebalan 35mm.

Inverter

Di Indonesia, standar inverter untuk PLTS telah ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN) melalui Standar Nasional Indonesia (SNI) serta oleh PT PLN melalui Standar PLN (SPLN). SNI yang berkaitan dengan PLTS dan diterbitkan oleh BSN dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. SPLN Terkait Inverter

No	Standar	Tentang
1	SNI IEC 61215	Modul Fotovoltaik (PV) terestrial - Kualifikasi desain dan pengesahan jenis.
2	SNI IEC 61730	Kualifikasi keamanan modul fotovoltaik (PV).

Jenis Inverter yang digunakan pada perancangan PLTS Apung di bendungan Telaga tunjung ditentukan dengan mempertimbangkan standar spesifikasi yang dikeluarkan oleh PLN, inverter yang digunakan berjenis string inverter yang diproduksi oleh Sungrow dengan tipe SG110CX dengan kapasitas 110 kW yang telah memiliki sertifikasi AS/NZS 4777.2:2015, IEC 60068, VDE 0126-1-1/A1 VFR 2014, CEI 0-21, IEC 62116, UTE C15-712-1:2013, IEC 61727, EN 50549, IEC 61683, VDE-AR-N 4120:2018, IEC 62109, VDE-AR-N 4110:2018, dan IEC 61000-6-3.

Floater

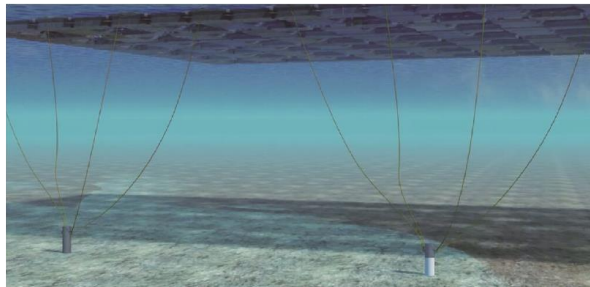
Produk yang digunakan pada perancangan PLTS apung Bendungan Telaga Tunjung menggunakan SGF-TS30M yang dikembangkan oleh Sungrow FPV berbahan dasar HDPE (*High-Density Polyethylene*) yang sangat tahan terhadap degradasi akibat paparan sinar ultraviolet (UV) dari matahari, *Floats System* ini memiliki toleransi suhu dari -40°C hingga 85°C, juga memiliki fleksibilitas terhadap sudut kemiringan hingga 15°.



Gambar 4. *Floater Sungrow SGF-TS30M*

Anchoring dan Mooring System

Anchoring dan Mooring system atau sistem penambatan berfungsi agar PLTS apung tidak berpindah akibat pergerakan air atau hembusan angin, pada perancangan PLTS apung di Bendungan Telaga Tunjung akan menggunakan *Catenary Mooring System* dikarenakan kondisi muka air bendungan Telaga Tunjung yang dapat berubah tergantung dengan cuaca pada lokasi bendungan.



Gambar 5. *Catenary Mooring System*

Konfigurasi Seri-Paralel Panel Surya pada PLTS Apung

Konfigurasi panel surya, baik secara seri maupun paralel, ditentukan berdasarkan tegangan input maksimum inverter serta tegangan *open circuit* (V_{oc}) dari panel yang digunakan. Perhitungan konfigurasi seri-paralel ini sangat krusial dalam tahap perencanaan, karena memungkinkan untuk mengetahui besarnya tegangan dan arus input DC yang akan masuk ke inverter. Adapun perhitungan untuk menentukan jumlah modul yang disusun secara seri maupun paralel dapat dilakukan dengan langkah berikut.

Diketahui :

- a. Panel Surya

Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{oc}) = 51,7 V

Tegangan Pada Titik Daya Maksimum (V_{mpp}) = 43,7 V

Arus Pada Titik Daya Maksimum (I_{mpp}) = 11,56 A

- b. Inverter

Max. Input Current Inverter (A) = 234 A

Min. DC Input Voltage Inverter = 200 V

Max. DC Input Voltage Inverter = 1100 V

Maka konfigurasi seri-paralel panel surya:

1) Rangkaian Seri Minimal

$$\text{Minimal Modul Seri} = \frac{V_{\min \text{ inverter}}}{V_{oc} \text{ Modul}}$$

$$\text{Minimal Modul Seri} = \frac{200}{51,7} = 4 \text{ unit}$$

2) Rangkaian Seri Maksimal

$$\text{Max Modul Seri} = \frac{V_{\max \text{ inverter}}}{V_{mpp \text{ modul}}}$$

$$\text{Maksimal Modul Seri} = \frac{1100}{43,7} = 26 \text{ Unit}$$

3) Rangkaian Paralel / String

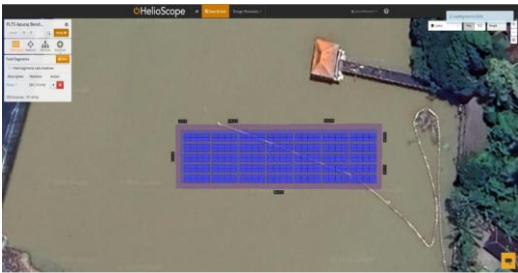
$$\text{Max Modul Paralel} = \frac{I_{\max \text{ Inverter}}}{I_{mpp \text{ modul}}}$$

$$\text{Max Modul Paralel} = \frac{234}{11,56} = 21 \text{ Rangkaian}$$

Berdasarkan hasil perhitungan konfigurasi seri-paralel panel surya pada persamaan sebelumnya, diperoleh bahwa untuk satu unit inverter diperlukan jumlah minimum modul yang dirangkai secara seri sebanyak 4 unit. Adapun jumlah maksimum modul dalam satu rangkaian seri adalah 26 unit. Sementara itu, jumlah maksimum *string* panel surya yang dapat dihubungkan ke inverter mencapai 21 rangkaian. Temuan ini menjadi acuan dalam menentukan rancangan sistem agar sesuai dengan kapasitas kerja inverter dan tetap berada dalam batas spesifikasi teknis yang aman

Peletakan PLTS Apung

Simulasi peletakan PLTS Apung menggunakan software HelioScope yang terdiri dari sebuah pulau berkapasitas 141 kWp yang terdiri dari 280 buah panel surya Vertex DEG18MC.20(II) dan 1 buah inverter SG110CX. Perancangan PLTS apung menggunakan sistem *fixed tilt tracking* dengan ketinggian panel surya terhadap permukaan air adalah 1,6 ft (0,5 m) dengan sudut kemiringan panel surya sebesar 8° yang menghadap ke arah utara (0°). Penggambaran PLTS Apung dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Layout PLTS Apung

Analisa Hasil Produksi PLTS Apung

Dari hasil produksi bulanan PLTS apung di Bendungan Telaga Tunjung, diperoleh sejumlah parameter produksi, antara lain *Global Horizontal Irradiance* (GHI), *Plane of Array* (POA), *Shaded Irradiance*, daya keluaran PLTS apung sesuai *nameplate*, serta total energi yang diinjeksi ke jaringan PLN. Data tersebut disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Data Hasil Simulasi Produksi Energi Listrik Bulanan

Month	GHI (kWh/m ²)	POA (kWh/m ²)	Shaded (kWh/m ²)	Namesplate (kWh)	Grid (kWh)
January	138.3	137.3	136.9	16,557.5	14,721.6
February	128.1	127.2	123.7	15,957.4	14,469.9
March	148.3	149.0	145.3	18,243.5	16,803.3
April	149.1	151.4	148.5	20,212.3	17,320.7
May	148.0	153.4	150.4	20,281.2	17,830.9
June	149.0	158.9	155.1	22,231.3	17,881.9
July	143.5	149.1	146.4	19,810.4	17,804.0
August	146.4	148.1	145.7	18,918.4	17,048.9
September	151.4	148.7	146.2	21,916.4	16,944.9
October	148.4	146.3	143.8	17,913.4	15,837.9
November	138.6	134.6	132.4	17,901.4	15,449.9
December	138.7	134.0	131.5	17,802.4	15,448.8

Produksi energi listrik tertinggi tercatat pada bulan Mei sebesar 19.300,7 kWh, sedangkan produksi terendah terjadi pada bulan Januari dengan nilai 14.273,6 kWh. Rata-rata produksi energi listrik bulanan berada pada kisaran 16.765,39 kWh.

⚡ Annual Production			
	Description	Output	% Delta
Irradiance (kWh/m ²)	Annual Global Horizontal Irradiance	1,710.3	
	POA Irradiance	1,742.4	1.9%
	Shaded Irradiance	1,737.3	-0.3%
	Irradiance after Reflection	1,678.4	-3.4%
	Irradiance after Soiling	1,644.9	-2.0%
	Total Collector Irradiance	1,644.9	0.0%
Energy (kWh)	Nameplate	232,680.4	
	Output at Irradiance Levels	231,468.4	-0.5%
	Output at Cell Temperature Derate	215,871.0	-6.7%
	Output after Electrical Mismatch	206,949.1	-4.1%
	Optimal DC Output	205,999.3	-0.5%
	Constrained DC Output	205,232.2	-0.4%
	Inverter Output	202,142.2	-1.5%
	Energy to Grid	201,131.5	-0.5%
Temperature Metrics			
	Avg. Operating Ambient Temp	26.9 °C	
	Avg. Operating Cell Temp	36.7 °C	
Simulation Metrics			
	Operating Hours	4618	
	Solved Hours	4618	

Gambar 7. Tampilan *Annual Production* pada Simulasi PLTS Apung

Dapat dilihat pada gambar 7, total maksimum produksi energi listrik tahunan oleh PLTS apung sebesar 232,675,6 kWh. Terdapat perbedaan jumlah energi listrik pada saat diproduksi dan pada saat diinjeksi pada *grid*. Perbedaan ini disebabkan adanya rugi-rugi yang terjadi pada sistem sejak dibangkitkan dan saat disalurkan ke *grid*. Penurunan jumlah produksi energi listrik terjadi setelah memperhitungkan rugi-rugi intensitas iradiasi matahari dan efek kurva *I/V* sebesar 0,5%, penurunan sebesar 6,7% setelah memperhitungkan rugi-rugi kenaikan temperatur terhadap kurva *I/V*, penurunan sebesar 4,1 % setelah memperhitungkan rugi-rugi *missmatch* pada perangkaian *string*, penurunan sebesar 0,4% setelah memperhitungkan rugi-rugi kabel konduktor, penurunan sebesar 1,5% setelah memperhitungkan efisiensi dan performa karakteristik dari inverter. Total produksi energi listrik dari hasil simulasi PLTS Apung setelah memperhitungkan berbagai rugi-rugi di atas, didapatkan sebesar 201,142,9 kWh yang terinjeksi ke jaringan *grid* dengan nilai *performance ratio* sebesar 81,6%

Analisis Ekonomi pada PLTS Apung di Bendungan Telaga Tunjung

Biaya Investasi Awal

Biaya CAPEX juga mencakup biaya investasi awal dan juga biaya pergantian komponen. Adapun biaya investasi yang dikeluarkan yaitu Rp 1.248.764.582. Pada biaya perancangan PLTS Telaga Tunjung terdiri atas biaya komponen utama seperti modul surya, biaya transmisi dan biaya pekerjaan sipil.

a) Biaya Operasional dan Pemeliharaan

Biaya Operasional dan pemeliharaan atau OPEX setiap tahun ditentukan berdasarkan studi pustaka diasumsikan Biaya operasional dan pemeliharaan panel surya selama satu tahun diperkirakan sebesar 1% dari total investasi awal. Biaya ini mencakup kegiatan perawatan sistem secara rutin untuk memastikan kinerja pembangkit tetap optimal..

$$PO = 1\% \times Co$$

$$PO = 1\% \times Rp1.248.764.582$$

$$PO = Rp 12.487.645$$

b) *Life Cycle Cost* (LCC)

Life Cycle Cost merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menilai serta menghitung seluruh biaya yang timbul sepanjang masa operasional suatu proyek atau sistem, mulai dari tahap perencanaan, pembangunan, hingga pemeliharaan. Dalam konteks PLTS dengan umur operasional 25 tahun, pendekatan ini mencakup perhitungan biaya investasi awal, biaya operasional dan pemeliharaan, penggantian komponen, hingga potensi biaya penonaktifan sistem di akhir masa pakai.

$$DF = \frac{1}{(1+i)^n}$$

$$DF = \frac{1}{(1+5,50\%)^1}$$

$$DF = 0,95$$

Proses perhitungan biaya operasional serta pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dilakukan dengan mempertimbangkan keseluruhan umur proyek yang direncanakan selama 25 tahun. Perhitungan ini menggunakan tingkat diskonto sebesar 5,75% untuk menyesuaikan nilai biaya di masa mendatang menjadi nilai saat ini, sehingga dapat diperoleh estimasi biaya yang lebih akurat dan relevan dalam analisis kelayakan ekonomi sistem:

$$MoM = PO \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

$$MoM = Rp\ 12.487.645 \left[\frac{(1+0,0575)^{25} - 1}{0,0575(1+0,0575)^{25}} \right]$$

$$Mom = Rp\ 165.920.309$$

Setelah ketiga faktor LCC terpenuhi, maka siklus hidup selama umur proyek 25 tahun adalah berikut:

$$LCC = CO + Po + MoM$$

$$LCC = Rp\ 1.248.764.582 + Rp\ 12.487.645 + Rp\ 165.920.309$$

$$LCC = Rp\ 1.427.172.536$$

c) CRF

Faktor pemulihan modal dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

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

$$CRF = \frac{0,0575(1+0,0575)^{25}}{(1+0,0575)^{25} - 1}$$

$$CRF = 0,076$$

d) Cost Of Energy

Faktor pemulihan modal (CRF) dan jumlah produksi energi tahunan PLTS digunakan untuk menghitung biaya energi (*Cost of Energy*), yang dapat diperoleh melalui persamaan berikut.:

$$COE = \frac{(LCC \times CRF)}{kWh} \quad (11)$$

$$COE = \frac{Rp\ 1.427.172.536 \times 0,076}{232.675,6}$$

$$COE = Rp\ 466,02\ per\ kWh$$

e) *Net Present Value*

Arus kas bersih dihitung dengan mengurangi arus kas keluar dari arus kas masuk. Komponen arus kas keluar mencakup biaya operasional dan pemeliharaan sebesar Rp 12.487.645, serta biaya penggantian komponen sebesar Rp 24.975.290 yang terjadi pada tahun ke-11 dan tahun ke-21. Dengan demikian, perhitungan arus kas bersih dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$ArusKasBersih = aruskasmasuk - aruskaskeluar$$

Tabel 4. Arus Kas PLTS Apung

Tahun	Produksi (Kwh)	Arus Kas Masuk (Rp)	Arus Kas Keluar (Rp)	Arus Kas Bersih (Rp)
1	236.675,60	341.925.190	12.487.645	329.437.545
2	231.941,50	335.085.865	12.487.645	322.598.220
3	227.302,67	328.384.243	12.487.645	315.896.598
4	222.756,60	321.816.503	12.487.645	309.328.858
5	218.201,40	315.380.208	12.487.645	302.892.403
6	213.935,40	309.072.481	12.487.645	296.584.836
7	209.656,70	302.890.896	12.487.645	290.403.341
8	205.463,60	296.833.348	12.487.645	284.345.703
9	201.354,30	290.896.579	12.487.645	278.408.934
10	197.327,20	285.078.620	12.487.645	272.590.975
11	193.327,20	279.299.795	119.164.194	160.065.601
12	189.513,05	273.789.538	12.487.645	261.301.893
13	185.722,70	268.313.639	12.487.645	255.825.994
14	182.008,30	262.927.384	12.487.645	250.439.739
15	178.368,10	257.688.353	12.487.645	245.200.708
16	174.800,80	252.534.637	12.487.645	240.047.026
17	171.800,70	248.420.707	12.487.645	235.712.825
18	167.878,60	242.534.203	12.487.645	230.046.558
19	164.521,10	237.683.561	12.487.645	225.195.916
20	161.236,60	232.929.759	12.487.645	220.442.114
21	158.006,07	228.271.384	119.164.194	109.107.190
22	154.845,90	223.705.859	12.487.645	211.218.214
23	151.749,03	219.231.817	12.487.645	206.744.172

Tahun	Produksi (Kwh)	Arus Kas Masuk (Rp)	Arus Kas Keluar (Rp)	Arus Kas Bersih (Rp)
24	148.714,05	214.847.175	12.487.645	202.359.530
25	145.739,77	210.550.226	12.487.645	198.062.581

f) *Profability Index*

$$PI = \frac{NPV + \text{Biaya Investasi Awal}}{\text{Biaya Investasi Awal}}$$

$$PI = \frac{329.437.545 + 1.248.764.582}{1.248.764.582}$$

$$PI = 1,26$$

g) *Discounted Payback Period*

$$PP = n + \left\{ \frac{(a - b)}{(c - d)} \right\} \times 1 \text{ tahun}$$

$$PP = 3 + \left\{ \frac{(1.248.764.582 - 967.932.363)}{(1.277.261.221 - 967.932.363)} \right\} \times 1 \text{ tahun}$$

$$PP = 3,91 \text{ tahun}$$

5. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan PLTS apung di Bendungan Telaga Tunjung berkapasitas 141 kWp, diperoleh potensi energi surya sebesar 16,765.39 kWh/bulan dari pemanfaatan 4.955,32 m², dengan menggunakan 280 unit panel surya berjenis Trina Solar, TSM-DEG18MC.20(II) (505Wp), 1 unit inverter tipe SG110CX (2020) (Sungrow) (110 kW), dengan rata-rata *solar access* mencapai 99.76%, TOF mencapai 99,6%,

Hasil perhitungan PI bernilai 1,26 atau (PI>1) artinya investasi PLTS Apung di Bendungan Telaga Tunjung dikatakan layak untuk dilaksanakan karena memenuhi kriteria. Biaya investasi awal sistem PLTS Apung relatif besar jika dibandingkan PLTS *ground mounted*, adapun penyebab biaya investasi PLTS apung lebih tinggi dari biaya investasi PLTS *ground mounted* adalah karena dalam PLTS apung dibutuhkan komponen tambahan berupa *floater*, *sistem anchoring*, dan *mooring*.

DAFTAR REFERENSI

- Al-Ezzi, A. S. (2022). Photovoltaic solar cells: A review. *MDPI*.
- Badan Standard Nasional. (2017). *Panduan studi kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) fotovoltaik*. Retrieved August 8, 2025, from <https://akses-sni.bsn.go.id/dokumen/2017/SNI%208395-2017/#p=1>
- Balai Wilayah Sungai Bali-Penida. (2006). *Pemeriksaan besar Bendungan Telaga Tunjung di Kabupaten Tabanan*.
- Esparza, I. (2024). Floating PV systems as an alternative power source: Case study. *Sustainability*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/su16031345>
- Fiddiansyah, D. B. (2024). The planning study of 145 MW grid connected Cirata's floating PV to support the security of supply in Jawa Bali power systems. *Journal of Technology and Policy in Energy and Electric Power*, 1.
- Fitriana, I. (2017). *Outlook energi Indonesia 2017*. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- Jifaturohman, M. I. (2025). Hydrodynamic modeling of unstretched length variations in. *MDPI*.
- Kunaifi. (2011). Desain pembangkit listrik hybrid (PLTS-diesel) untuk meningkatkan pelayanan kesehatan di Puskesmas Kecamatan Gema Kabupaten Kampar. *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, 10, 15–21.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2021). *Penerapan standar kualitas modul fotovoltaik silikon kristalin*.
- Nafeh, A. E. A. (2009). Design and economic analysis of a stand-alone PV system to electrify a remote area household in Egypt. *Open Renewable Energy Journal*, 2, 33–37. <https://doi.org/10.2174/1876387100902010033>
- Nathawibawa, A. N. B. B. (2017). Analisis produksi energi dari inverter pada grid-connection PLTS 1 MWp di Desa Kayuhibi Kabupaten Bangli. *Teknologi Elektro*, 16. <https://doi.org/10.24843/MITE.1601.18>
- Pawitra, A. (2020). Review perkembangan PLTS di Provinsi Bali menuju. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 19. <https://doi.org/10.24843/MITE.2020.v19i01.P08>
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2020 tentang perubahan atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 tentang bendungan. (2020).
- Ridwan Margana, R. (2024). Analisis kelayakan investasi proyek pengadaan alat pengembangan chamber balai uji dengan menggunakan net present value, internal rate return, dan payback period di PT DEF. *Lentera Bisnis*, 5(2). <https://doi.org/10.46306/lb.v5i2.683>
- Schema, S. (2011). Study of inverter design and topologies for. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1109/INECCE.2011.5953934>
- Solomin, E. (2021). Hybrid floating solar plant designs: A review. *Energies*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/en14102751>
- Thyra, M. F., & K. A. M. (2015). Analisis ekonomi penggunaan inverter sel surya pelanggan rumah tangga terhubung dengan jaringan pada perumahan Syailendra Residence Banyumanik Semarang, 1–15.

- Yuki, K. (2017). Analisis tekno-ekonomi terhadap desain sistem PLTS pada bangunan komersial di Surabaya, Indonesia.
- Yusof, N. B. M. (2020). The study of output current in photovoltaic cells in series and parallel connections. *International Journal of Technology, Innovation and*, 1, 7–12. <https://doi.org/10.29210/88701>