



JOURNAL OF APPLIED MECHANICAL ENGINEERING AND RENEWABLE ENERGY (JAMERE)

Vol. 5 No. 1, Agustus 2025

ISSN: 2775-1031

STUDI KELAYAKAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA TERAPUNG DI DANAU SINGKARAK

Dion Agung Prasetyo Manullang¹, Hery Teguh Setiawan², Andriyatna Agung Kurniawan³

¹ Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, UNIVERSITAS TIDAR

¹ dionagung25@gmail.com

Abstract

This study analyzes the planning and feasibility of a floating solar power plant (PLTS) on Lake Singkarak with an installed capacity of 775.14 MWp, covering 5% of the lake's surface. The system uses 1,696,852 LONGI 600 Wp panels and 113 Sungrow inverters. First-year energy production is estimated at 1.055 GWh, with an annual degradation rate of 0.5% and total system losses of 20%. The initial investment is IDR 8.75 trillion with annual OPEX at 1.5% of CAPEX. The LCOE is calculated at IDR 796.39/kWh, lower than the national electricity tariff. The project yields an NPV of IDR 4.45 trillion, an IRR of 11.11%, and a payback period of 8.38 years, indicating economic feasibility. Additionally, it could reduce 20.79 million tons of CO₂ and contribute 1.82% toward the national renewable energy target.

Keywords: floating solar PV, feasibility, Lake Singkarak, renewable energy

Abstrak

Penelitian ini menganalisis perencanaan dan kelayakan PLTS terapung di Danau Singkarak dengan kapasitas 775,14 MWp yang menempati 5% luas danau. Sistem menggunakan 1.696.852 panel LONGI 600 Wp dan 113 inverter Sungrow. Produksi energi tahun pertama diperkirakan 1,055 GWh dengan degradasi 0,5% per tahun dan rugi-rugi sistem 20%. Investasi awal sebesar Rp8,75 triliun dan OPEX tahunan 1,5% dari CAPEX. LCOE dihitung Rp796,39/kWh, lebih rendah dari tarif listrik nasional. Proyek ini menunjukkan NPV Rp4,45 triliun, IRR 11,11%, dan Payback Period 8,38 tahun, yang menandakan kelayakan ekonomi. Selain itu, proyek ini dapat mengurangi 20,79 juta ton CO₂ dan berkontribusi 1,82% terhadap target energi terbarukan nasional.

Kata kunci: PLTS terapung, kelayakan, Danau Singkarak, energi terbarukan

1. Pendahuluan

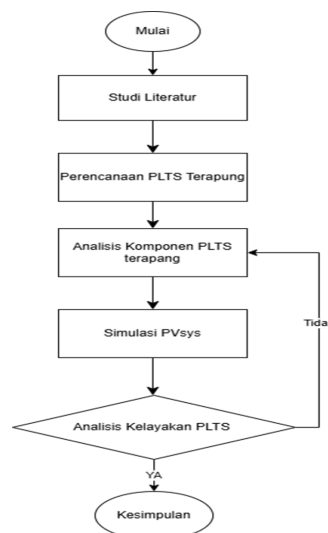
Kebutuhan energi yang terus meningkat mendorong pengembangan energi terbarukan sebagai alternatif energi fosil. Salah satu solusi yang berkembang pesat adalah pemanfaatan energi surya melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Namun, keterbatasan lahan darat di beberapa wilayah mendorong lahirnya inovasi berupa PLTS terapung, yang dipasang di atas permukaan air seperti danau atau waduk. PLTS terapung memiliki keuntungan tambahan, seperti pengurangan evaporasi air, pendinginan alami yang meningkatkan efisiensi panel, serta optimalisasi ruang yang tidak digunakan.[1]

Energi surya merupakan salah satu energi baru terbarukan (EBT) yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia, mengingat kondisi geografisnya yang menerima radiasi matahari tinggi sepanjang tahun. Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung (PLTS Terapung) menjadi alternatif yang menjanjikan dalam mengatasi keterbatasan lahan, serta mengoptimalkan perairan seperti danau dan waduk.[2]

Danau Singkarak di Sumatera Barat adalah salah satu lokasi strategis untuk penerapan teknologi ini. Dengan memanfaatkan maksimal 5% dari luas permukaan danau (sesuai Permen PUPR No. 6 Tahun 2020), proyek ini dirancang memiliki kapasitas 775,14 MWp dan berpotensi menghasilkan energi bersih sebesar lebih dari 1 TWh per tahun.[3] Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi dari pembangunan PLTS terapung di Danau Singkarak dengan menggunakan simulasi perangkat lunak PVsyst serta perhitungan indikator investasi seperti LCOE, NPV, IRR, dan Payback Period. Harapannya, studi ini bisa menjadi model percontohan nasional dalam pengembangan energi bersih dan berkelanjutan.[4]

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu studi literatur, perencanaan teknis PLTS terapung, analisis komponen sistem, serta simulasi kinerja menggunakan perangkat lunak PVsyst. Hasil simulasi digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis kelayakan teknis dan ekonomi dari sistem PLTS terapung yang dirancang.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

2.1. PLTS terapung

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terapung merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan panel surya yang dipasang di atas permukaan air, seperti danau, waduk, atau bendungan. Teknologi ini menjadi alternatif efisien untuk mengatasi keterbatasan lahan darat, sekaligus mengurangi evaporasi air dan meningkatkan efisiensi panel akibat pendinginan alami dari permukaan air. Selain itu, PLTS terapung berpotensi besar dikembangkan di wilayah tropis dengan intensitas radiasi matahari tinggi sepanjang tahun.[5]

2.2 Perencanaan PLTS Terapung

Perencanaan teknis dan desain sistem. Ini mencakup penentuan lokasi pembangunan PLTS terapung, memasukkan data radiasi matahari dan luas wilayah, serta menghitung titik koordinat untuk menentukan kemiringan panel surya agar penyerapan sinar matahari optimal. Setelah perencanaan awal, dilakukan perhitungan untuk menentukan jumlah komponen yang akan digunakan. Ini termasuk analisis untuk memilih panel surya dan inverter yang sesuai[6]

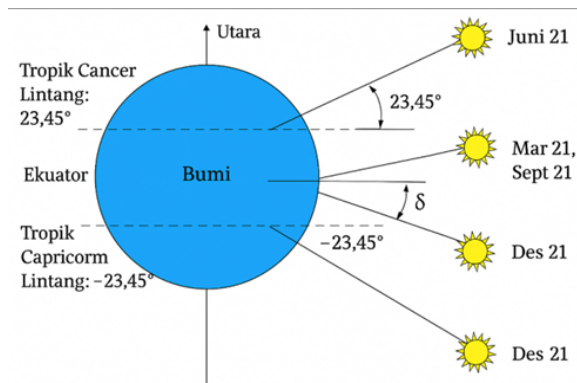
2.2 Lokasi penelitian

Lokasi penelitian perencanaan PLTS terapung berada di Danau Singkarak dengan koordinat sekitar 0,61036° LS dan 100,510654° BT dengan jarak panel ke daratan sekitar 566 m.

2.3 Orientasi Matahari dan kemiringan panel

Untuk memaksimalkan penyerapan energi matahari sepanjang tahun, orientasi dan kemiringan panel surya perlu disesuaikan dengan posisi semu matahari yang berubah-ubah setiap

harinya. Salah satu parameter penting dalam menentukan posisi matahari adalah sudut deklinasi (δ), yaitu sudut antara garis khatulistiwa bumi dengan garis imajiner yang menghubungkan pusat bumi dan matahari.[7]



Gambar 1 Deklinasi Matahari

Berdasarkan Gambar 4.2, sudut deklinasi berubah secara periodik setiap tahun antara $-23,45$ hingga $+23,45$, tergantung pada posisi bumi dalam orbitnya mengelilingi matahari. Berdasarkan gambar, pada 21 Maret deklinasi matahari terhadap bumi mencapai 0 (hari ke-81 dari tanggal 1 Januari). [8]

$$\delta = 23^{\circ} \times \sin\left(\frac{360^{\circ}}{365} \times (n - 81)\right)$$

dimana

δ = Deklinasi Matahari
 23.45° = Kemiringan sumbu Bumi
 $360/365$ = Faktor konversi hari ke sudut
 N = Nomor hari dalam setahun
 -81 = Konstanta penyesuaian fasa agar rumus sesuai dengan posisi Matahari sebenarnya
 Penentuan sudut kemiringan panel surya tetap (*fixed tilt*) merupakan salah satu faktor penting dalam optimalisasi penyerapan radiasi matahari. Sudut kemiringan ini biasanya disesuaikan dengan posisi lintang geografis lokasi pemasangan agar panel dapat menangkap radiasi matahari secara maksimal sepanjang tahun. Berikut ini merupakan gambar matahari sejajar dengan garis normal panel yang akan digunakan untuk menentukan kapan matahari akan sejajar dengan panel surya.[9]

1) Kapasitas komponen

Berdasarkan PUPR NO 6 tahun 2020 luas danau yang digunakan adalah 5% dari luas permukaan danau atau waduk yang digunakan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi jumlah panel surya antara lain dimensi panel surya dan area efektif untuk panel surya. Dimensi panel surya merupakan ukuran panel surya yang digunakan dalam PLTS terapung, dibawah ini merupakan rumus perhitungan dimensi panel

$$N_{pv} = \frac{\text{Luas Efektif}}{\text{Luas Panel}}$$

Keterangan:

N_{pv} = Jumlah Panel Surya
 Luas Efektif = Luas area untuk PLTS
 Luas Panel = Luas Panel surya

2) Menentukan string array

$$N_{inverter} = \frac{P_{total}}{P_{inverter} \times \text{koeffisien AC/DC}}$$

keterangan

$N_{inverter}$ = Jumlah inverter
 P_{total} = Kapasitas total sistem
 $P_{inverter}$ = kapasitas inverter
 AC/DC = kapasitas konversi inverter yang digunakan

3) Analisis teknis PLTS terapung

Untuk menganalisis kapasitas komponen PLTS terapung, beberapa Langkah teknis yang digunakan meliputi perhitungan efisiensi, daya maksimum, dan energi yang dihasilkan. Langkah ini bertujuan untuk memastikan bahwa PLTS terapung dapat direncanakan secara optimal untuk menghasilkan yang sesuai dengan kapasitas yang direncanakan. Dibawah ini merupakan analisis PLTS terapung.[10]

a. Fill Factor

Fill Factor digunakan untuk mengukur kualitas kinerja Panel surya dalam menghasilkan daya yang merupakan faktor penting dalam mengukur kinerja. Berikut ini merupakan perhitungan *Fill Factor*.

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Keterangan:

V_{mp} = Tegangan pada titik daya maksimum
 I_{mp} = Arus pada titik daya maksimum.
 V_{oc} = Tegangan rangkaian terbuka
 I_{sc} = Arus hubung singkat

b. Perhitungan Daya Input (Pin)

Daya input merupakan seberapa banyak energi matahari yang tersedia untuk diubah menjadi

listrik, yang berfungsi untuk menghitung efisiensi panel surya. Dibawah ini merupakan perhitungan daya input yang dihasilkan satu panel surya.

$P_{in} = \text{Irradiance NOCT} \times \text{dimensi satu unit panel}$
 Keterangan:

Irradiance STC = iradiasi pada kondisi standar pengujian (1000 W/m²).

Dimensi panel = Luas fisik panel surya (m²)

c. Efisiensi Panel Surya (η_{panel})

Efisiensi panel surya dihitung berdasarkan perbandingan antara daya maksimum (P_{max}) dan daya input (P_{in}). Berikut ini merupakan rumus untuk menghitung efisiensi panel surya.

$$\eta_{\text{panel}} = \frac{P_{\text{MaxNOCT}}}{P_{\text{maxSTC}}} \times 100\%.$$

Keterangan:

P_{max} : Daya maksimum dari panel surya.

P_{in} : Daya input dari radiasi matahari.

η_{panel} : Efisiensi panel surya dalam persentase

d. Perhitungan daya keluaran (P_{out})

Daya keluaran adalah daya yang keluar dari sistem PLTS, setelah mempertimbangkan efisiensi dalam sistem yang dikeluarkan oleh sistem secara langsung. Dibawah ini merupakan rumus perhitungan daya keluaran.

$$P_{\text{out}} = P_{\text{max}} \times N_{\text{panel}}$$

Keterangan:

P_{out} = Daya keluaran

P_{Maks} = Daya maksimum

N_{panel} = jumlah panel

e. Menentukan energi ideal yang dihasilkan dalam satu tahun (E_{ideal})

Energi ideal yang dihasilkan panel surya dalam satu tahun dihitung dengan menggali spesifikasi panel dengan jumlah panel dan total radiasi pada sudut optimal panel surya.

$$E_{\text{ideal}} = P_{\text{panel}} \times N_{\text{panel}} \times H_{\text{tilt}} \times 365$$

Keterangan:

P_{panel} = Daya spesifikasi tiap panel (Wp)

N_{panel} = Jumlah panel fotovoltaik.

H_{tilt} = Radiasi matahari total pada sudut optimal (kWh/m²).

f. Menentukan Performance Ratio (PR)

$$PR = \frac{E_{\text{Actual}}}{E_{\text{Ideal}}}$$

Keterangan

E aktual = Total energi listrik satu tahun

E ideal = Energi maksimum dihasilkan oleh sistem jika tidak ada kerugian

2.4 Kelayakan Ekonomi

Analisis ekonomi adalah proses untuk menilai kelayakan finansial suatu proyek dengan mempertimbangkan semua biaya dan manfaat yang timbul selama masa operasional proyek. Dalam konteks PLTS terapung, analisis ini bertujuan untuk mengetahui apakah investasi proyek layak secara ekonomi, efisien, dan menguntungkan dalam jangka panjang. Berikut ini merupakan komponen untuk menentukan kelayakan ekonomi PLTS terapung di danau singkarak.

1) Capital expenditure (pengeluaran modal),

sebagai investasi awal berfungsi untuk membuat perhitungan secara terperinci untuk mengetahui investasi awal yang akan dikeluarkan dalam pembangunan PLTS terapung. maka perhitungan meliputi biaya komponen yang dibutuhkan, biaya instalasi, biaya perizinan dan biaya lainnya.

2) OPEX (Operational Expenditure):

Operational expenditure (OPEX), atau sering disebut sebagai pengeluaran operasional yang dikeluarkan setiap tahun biaya berulang yang terkait dengan pemeliharaan dan pengoperasian peralatan.

$$\text{Total biaya OPEX} = 1.5\% \times \text{CapEx}$$

3) LCOE (Levelized Cost of Electricity)

biaya rata rata per unit energi yang dihitung sepanjang umur dari PLTS terapung untuk menghasilkan 1 kwh. LCOE digunakan untuk membandingkan biaya produksi dari PLTS terapung.[11]

$$LCOE = \frac{CAPEX_{FPV, \text{total}} + \sum_{i=1}^n \frac{OPEX_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_{NCF, i}}{(1+r)^i (1-k)^i}}$$

Keterangan

$CAPEX_{FPV, \text{total}}$ = Investasi awal

$OPEX_i$ = Biaya O&M tahun i

r = Discount rate (%)

$E_{FPV, i}$ = Energi Yield tahun i (MWh)

n = Umur sistem PLTS

k = Faktor degradasi panel surya

C_t = Aliran kas pada periode t

NCF_t = Pendapatan bersih

i = Tahun yang akan dihitung

4) PBP (*Payback Period*)

Payback period adalah lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan nilai investasi melalui keuntungan yang dihasilkan PLTS terapung. [11]

$$PBP = Y_{full} + \frac{S_i}{NGF_{yfull+1}}$$

Keterangan:

PBP = Periode pengembalian modal

Y_{full} = Jumlah tahun sebelum investasi awal

Si = Sisa investasi yang belum tertutupi pada akhir tahun Yfull.

$$NCF_{Yfull}^{+1} = \text{Arus kas bersih pada tahun setelah } Yfull.$$

5) NPV (Net Present Value)

Selisih nilai sekarang antara pendapatan dan biaya

$$NPV = -CAPEXFPV_{total} + \sum_{i=1}^n \frac{NCF_t}{(1+r)^i}$$

Keterangan;

NPV = *Net Present Value*

CAPEX total = biaya investasi awal

$$r = \text{Discount rate}$$

n = Masa kerja sistem

I = Tahun yang akan dihitung

NCF = Net cash inflow

i = merupakan nilai uang

6) IRR (*Internal Rate of Return*)

Internal of return (IRR) adalah indikator tingkat efisiensi dari sebuah investasi. IRR dikenal juga sebagai metode untuk menghitung tingkat bunga suatu investasi dan menyamakan dengan nilai investasi saat ini berdasarkan perhitungan kas bersih di masa mendatang. dengan syarat perhitungan menentukan salah satu npv yang bernilai negatif.[12]

$$0 = NPV = \sum_{t=1}^T \frac{Ct}{(1 + IRR)^t} - CAPEX_{FPV, total}$$

keterangan

C_t = (*net cash flow*) pada tahun ke- t

T = Total periode proyek

IRR = Tingkat pengembalian internal

CAPEX = Investasi awal proyek

2.5. Penurunan emisi karbon

Penurunan emisi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung di Danau Singkarak berkontribusi signifikan terhadap upaya pengurangan emisi gas rumah kaca, khususnya emisi karbon dioksida (CO_2) dari sektor ketenagalistrikan. Dengan memanfaatkan energi surya sebagai sumber daya terbarukan Berdasarkan data faktor emisi dari jaringan listrik di Pulau Sumatera (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2019), yang mana wilayah Sumatera Barat termasuk di dalamnya, telah ditetapkan bahwa faktor emisi yang relevan untuk perhitungan ini adalah 0,84 ton CO_2 per MWh

$$\text{CO2 Emission} = \text{Energy Output (kWh)} \times \text{Emission Factor (kg/kWh)}$$

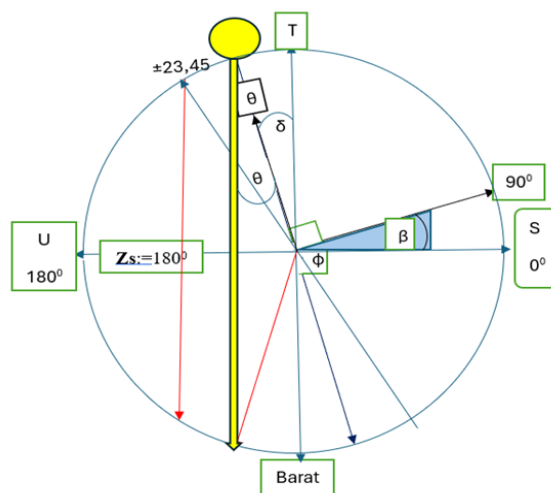
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Lokasi penelitian

perencanaan PLTS terapung berada di Danau Singkarak dengan koordinat sekitar $0,61036^{\circ}$ LS dan $100,510654^{\circ}$ BT dengan jarak panel ke daratan sekitar 566 m dari permukaan air.

3.2 Orientasi matahari dan kemiringan panel

Kemiringan panel surya sebesar 5° dan 10° banyak digunakan di Indonesia karena sesuai dengan posisi geografis yang berada di wilayah tropis, di mana matahari bersinar hampir tegak lurus sepanjang tahun. Sudut ini cukup untuk mengoptimalkan penyerapan radiasi matahari tanpa perlu kemiringan besar seperti di negara empat musim. Berikut ini merupakan perhitungan deklinasi matahari ketika panel 5° di titik koordinat danau singkarak.



Gambar 2. matahari tegak lurus terhadap panel

pada gambar 2 di atas menunjukkan Panel surya dipasang dengan kemiringan β terhadap permukaan horizontal, sementara garis normal panel ditarik tegak lurus dari permukaan panel. Sudut θ (incidence angle) adalah sudut antara arah sinar matahari dan garis normal panel. Ketika $\theta = 0^\circ$, berarti sinar matahari datang tegak lurus ke permukaan panel, membentuk sudut 90° dengan permukaan panel. Deklinasi matahari (δ) adalah sudut antara garis khatulistiwa langit (ekuator imajiner) dengan arah sinar matahari. Sudut ini berubah setiap hari karena gerak semu matahari sepanjang tahun, dari $+23,45^\circ$ (utara ekuator) hingga $-23,45^\circ$ (selatan ekuator). Lintang lokasi (L) menunjukkan posisi pengamat di bumi, dengan $-0,61^\circ$ untuk lokasi di selatan ekuator. Sudut azimuth (Zs) diukur dari arah selatan (180°). Hour angle (h) tidak digambarkan di sini, namun secara konsep h adalah sudut posisi matahari relatif terhadap meridian (arah utara-selatan). Pada saat jam 12 siang waktu matahari, $h = 0^\circ$ karena matahari berada tepat di meridian. Jika matahari bergerak ke barat setelah siang, h bertambah positif, dan jika sebelum siang h bernilai negatif. Berikut ini merupakan perhitungan untuk menentukan rumus deklinasi matahari.

Panel Menghadap Utara (Belahan Bumi Selatan, $Zs=180^\circ$):

$$\cos(\theta) = \sin(L+\beta) \sin(\delta) + \cos(L+\beta) \cos(\delta) \cos(h)$$

Kondisi $\theta = 0^\circ$ sejajar dengan garis normal permukaan panel yang membentuk 90° dengan posisi matahari berada pada meridian (Jam 12 siang) $h = 0^\circ$

$$1 = \sin(L+\beta) \sin(\delta) + \cos(L+\beta) \cos(\delta)$$

Dengan menggunakan persamaan trigonometri.

$$\cos(A-B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$$

maka dapat persamaan

$$1 = \cos[(L+\beta) - \delta]$$

Maka persamaan tersebut bisa diturunkan kembali jika $\cos x = 0^\circ$ di karnakan deklinasi δ berkisar $-23,45^\circ$ hingga $+23,45^\circ$, hanya solusi $x = 0^\circ$ yang mungkin.

$$(L+\beta) - \delta = 0^\circ \text{ Atau } \delta = L+\beta$$

Karena Danau Singkarak berada di Lintang Selatan maka $L = -0.61^\circ$, maka:

Panel dengan kemiringan 5°

$$\delta = (-0.61036^\circ) + 5^\circ = 4,38964^\circ$$

Tanggal ke 95 adalah 5 April non kabisat dan

Tanggal ke 252 adalah 9 September non kabisat

3.3 Panel surya

Jumlah panel surya yang akan digunakan pada sistem PLTS terapung dapat ditentukan berdasarkan luas efektif area pemasangan dan dimensi fisik dari modul surya. Dalam perencanaan ini, luas efektif yang tersedia untuk instalasi panel adalah sebesar $4.581.500 \text{ m}^2$. Dengan mengetahui luas satu panel surya, maka jumlah total panel yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} N_{\text{panel}} &= \text{Luas efektif panel} / \text{dimensi panel} \\ &= 4.581.500 \text{ m}^2 / 2,70 \text{ m}^2 \\ &= 1.696.852 \text{ Panel surya} \end{aligned}$$

Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik oleh sistem PLTS terapung di Danau Singkarak. Parameter yang dihitung meliputi fill factor, daya input, efisiensi panel, kapasitas sistem, energi ideal, energi aktual, dan performance ratio (PR).

1. Fill Factor (FF)

$$FF = \frac{41,72 \text{ V} \times 10,95 \text{ A}}{49,74 \text{ V} \times 11,67 \text{ A}} = 0.789$$

2. Daya input per panel

$$\begin{aligned} P_{\text{in}} &= 800 \text{ W/m}^2 \times 2,701 \text{ m}^2 \\ &= 2160,8 \text{ W} \end{aligned}$$

3. Efisiensi panel

dihitung berdasarkan kondisi STC dan NOCT.

$$\eta_{\text{panel}} = \frac{41,72 \times 10,95}{43,90 \times 13,67} \times 100\% = \frac{456,834}{600,813} = 76,04\%$$

4. Kapasitas total

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= 1.696.852 \times 456.7 \text{ Wp} \\ &= 775.140.084 \text{ Wp} \end{aligned}$$

5. Energi ideal

$$\begin{aligned} E_{\text{ideal}} &= 775.140,1 \text{ kWp} \times 4.501 \text{ kWh/kWp/hari} \times 365 \text{ hari/tahun} \\ &= 1.287.596.847,21 \text{ kWh/tahun} \\ &= 1.287,60 \text{ GWh/tahun} \end{aligned}$$

6. Energi aktual tahunan setelah memperhitungkan total kerugian sistem sebesar 18% adalah 1.055,83 GWh/tahun.

7. Performance Ratio

$$PR = \frac{E_{\text{aktual}}}{E_{\text{ideal}}} = \frac{1055,832 \text{ GWh/tahun}}{1.287,60 \text{ GWh/tahun}} = 0,82 \text{ atau } 82\%$$

Performance Ratio sistem sebesar 82%, sesuai standar IEC dan menunjukkan efisiensi konversi yang tinggi untuk sistem PLTS skala besar.

3.4 Inverter

1. Menentukan jumlah string array maksimal
 menentukan jumlah inverter yang diperlukan
 diperlukan menghitung jumlah panel yang akan
 digunakan dalam konfigurasi string dan
 konfigurasi array pada Inverter adalah sebagai
 berikut.

$$\text{Minimal panel seri} = \frac{915 \text{ V}}{43,9 \text{ V}} = 20,84$$

Dibulatkan menjadi 21 Panel surya

$$\text{Max panel seri} = \frac{1500 \text{ V}}{49,74 \text{ V}} = 30,16$$

Dibulatkan menjadi 30 panel

perhitungan jumlah maksimal string paralel per
 MPPT berdasarkan batas arus maksimum inverter
 dan arus operasi panel surya.

$$\text{Maksimal String Paralel per MPPT} = \frac{7994 \text{ A}}{4} = 1998,5 \text{ A}$$

$$\text{Maximal paralel per MPPT} = \frac{1998,5 \text{ A}}{10,95} = 182 \text{ string/MPPT}$$

2. Menentukan jumlah inverter

Berdasarkan daya keluaran panel surya (Pout) dan
 kapasitas inverter, jumlah inverter yang diperlukan
 untuk sistem PLTS terapung dengan rasio DC/AC
 diterapkan untuk menentukan kapasitas inverter
 relatif terhadap kapasitas array panel surya,
 dengan mempertimbangkan optimasi pemanenan
 energi dan karakteristik operasional inverter sesuai
 dengan ini ditentukan melalui perhitungan berikut:

$$\text{Kapasitas AC Total} = \frac{775.140,1 \text{ kW}}{1,1} = 704.672,8 \text{ kW}$$

$$\text{Jumlah Inverter} = \frac{704.672,8 \text{ kW}}{6250 \text{ kW}} = 112,7 \text{ Unit}$$

Dibulatkan menjadi 113 inverter

Setelah jumlah inverter ditentukan (dibulatkan
 menjadi 113 unit), langkah selanjutnya adalah
 menghitung jumlah string, Perhitungan ini esensial
 untuk memastikan operasi sistem yang efisien dan
 didasarkan pada jumlah inverter dan spesifikasi
 teknisnya.

3. Konfigurasi PLTS Terapung di danau Singkarak

Berdasarkan simulasi, jumlah panel yang akan
 digunakan dalam satu string adalah 26 panel.
 Selanjutnya, tegangan untuk setiap MPPT dihitung
 sebagai berikut:

$$\text{Tegangan Per MPPT} = 26 \times 41,72 \text{ V} = 1084,72 \text{ V}$$

$$\text{Jumlah String} = \frac{1.696.852 \text{ panel}}{26 \text{ panel / String}} = 65.263,53 \text{ String}$$

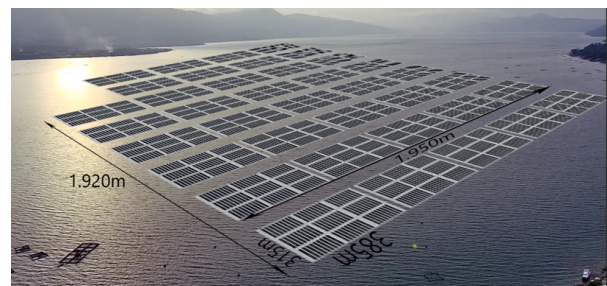
Dengan konfigurasi 26 panel per string, terbentuk
 sebanyak 65.263 string, sehingga menggunakan
 1.696.838 panel dari total 1.696.852 panel yang
 tersedia, dengan 14 panel tidak terpakai. Setiap
 string menghasilkan tegangan sebesar 1.084,72 V,
 yang berada dalam rentang tegangan maksimum
 power point tracking (MPPT) inverter, yaitu
 875–1300 V, sehingga masih memenuhi batas
 input dan aman untuk kinerja sistem inverter
 secara optimal. Konfigurasi array paralel per
 MPPT ditentukan setelah menetapkan jumlah total
 string berdasarkan penggunaan 113 inverter
 dengan total 452 MPPT. Hal ini dilakukan untuk
 mengoptimalkan kinerja sistem sesuai spesifikasi
 teknis yang direncanakan.

$$\text{String per MPPT} = \frac{65.263 \text{ string}}{452 \text{ MPPT}} = 144,38 \text{ string/MPPT}$$

$$\text{Arus per MPPT} = 10,95 \text{ A} \times 144 = 1576,8 \text{ A}$$

Perhitungan menunjukkan bahwa 144 string
 paralel terhubung ke setiap MPPT, menghasilkan
 arus sebesar 1576,8 A per MPPT dan total arus
 input inverter sebesar 6307,2 A, berada di bawah
 batas maksimum arus DC inverter (7994 A).

3.5 Floater



No	Floater	Fungsi	Jumlah
1	Panel	Menopang panel surya (rasio 1:1)	1.696.852
2	Kabel	Menopang kabel transmisi	5.933
3	Walkway	Jalur akses operasional	861.840
4	Proteksi	Pelindung sisi angin/gelombang	34.440

Combiner box

berfungsi menggabungkan beberapa string panel surya menjadi satu jalur arus DC sebelum masuk ke inverter. Komponen ini mempermudah instalasi, monitoring, dan proteksi sistem. Pada sistem PLTS terapung ini digunakan 2.260 unit combiner box, dengan 5 unit per MPPT inverter.

3.6 Mooring dan anchoring

Danau Singkarak (kedalaman < 500 m), digunakan sistem catenary mooring berbahan rantai-kawat-rantai yang dinilai lebih ekonomis. Dengan keliling tiap blok 1.400 m dan jarak antar titik 10 m, diperlukan 140 titik mooring per blok. Total untuk 38 blok adalah 5.320 titik, dengan panjang tiap kabel 300 m, menghasilkan total 1.596.000 meter kabel atau rantai mooring.

3.7 CAPEX

merupakan nilai investasi awal yang akan digunakan untuk membangun PLTS terapung di danau Singkarak.

Total A + B	-	Rp6.943.254.981.800
Overhead	10%	Rp694.325.498.180
PPN	11%	Rp763.758.047.998
Profit	5%	Rp347.162.749.090
CAPEX	-	Rp8.748.501.277.068

3.8 OPEX

Operational Expenditure (OPEX). OPEX mencakup seluruh pengeluaran yang dibutuhkan untuk menjaga agar sistem pembangkit tetap beroperasi dengan optimal selama umur proyek

$$\text{OPEX tahunan} = 1.5\% \times \text{Rp}8.748.501.277.068 \\ = \text{Rp}131.227.519.156,02$$

3.9 LCOE

Levelized Cost of Electricity adalah indikator finansial kunci untuk menghitung rata-rata biaya produksi listrik per kilowatt-jam (Rp/kWh) sepanjang umur proyek. Proyek PLTS terapung di Danau Singkarak dirancang untuk beroperasi selama 25 tahun dan menghasilkan energi sebesar 1.055,83 GWh pada tahun pertama. Penurunan produksi akibat degradasi panel diasumsikan sebesar 0,5% per tahun, dengan tingkat diskonto 5,75%, mengacu pada suku bunga acuan Bank

Indonesia. nilai LCOE dengan total OPEX dan Energi yang telah diskontokan maka dapat ditentukan nilai LCOE

$$\text{LCOE} = \frac{8.748.501.277.068 + 1.718.128.670.054,79}{13.143.579.414,57}$$

$$\text{LCOE} = \text{Rp } 796,39/\text{kWh}$$

LCOE sebesar Rp 796,93/kWh menunjukkan bahwa biaya produksi listrik dari PLTS terapung di Danau Singkarak masih lebih rendah dibandingkan tarif jual listrik nasional sebesar Rp1.134,55/kWh (setara 6,95 sen USD/kWh, kurs Rp16.310/USD), sesuai Perpres No. 112 Tahun 2022. Hal ini mengindikasikan bahwa proyek layak secara finansial dan kompetitif dalam pasar energi.

3.10 Payback Period

Perhitungan *payback period* untuk proyek PLTS terapung di Danau Singkarak ditunjukkan sebagai berikut:

Investasi awal (CAPEX) proyek ini adalah sebesar Rp8.748.501.277.068. Dan berdasarkan akumulasi NCF bersih, pada akhir Tahun ke-8, akumulasi NCF mencapai Rp8.361.263.890.164 Nilai ini masih kurang dari CAPEX (Rp8.748.501.277.068) Mengingat NCF tahun ke-9 adalah Rp1.013.822.012.099. maka dibutuhkan waktu menutupi sisa tersebut adalah sebagai berikut.

$$\text{Fraksi Tahun} = \frac{\text{Rp}387.237.386.904}{\text{Rp}1.013.822.012.099} = 0,3821 \text{ tahun.}$$

diperkirakan akan mengembalikan investasi awalnya dalam waktu sekitar 8,3821 tahun.

3.11 NPV

Net Present Value merupakan metode evaluasi finansial yang digunakan untuk menilai kelayakan suatu proyek investasi dengan mempertimbangkan nilai waktu dari uang (*time value of money*). Nilai sekarang dari setiap arus kas dihitung menggunakan faktor diskonto sebesar 8% per tahun. Dengan Total PV NCF (Present Value of Net Cash Flow) adalah Rp10.557.683.983.165 dan Investasi Awal (CAPEX) sebesar Rp8.748.501.277.068

$$\text{NPV} = \text{Rp}13.193.853.636.844 - \text{Rp } 8.748.501.277.068$$

$$\text{NPV} = \text{Rp}4.445.352.359.776$$

dimana nilai Npv masih bernilai positif membuktikan bahwa PLTS terapung di danau singkarak Layak

3.12 Internal Rate of Return (IRR)

adalah metrik keuangan yang digunakan dalam analisis modal untuk memperkirakan potensi profitabilitas suatu investasi. Secara sederhana, IRR adalah tingkat diskonto (tingkat pengembalian) yang membuat *Net Present Value* (NPV) suatu proyek menjadi nol dengan syarat bahwa salah satu NPV bernilai negatif dimana NPV 5,75% bernilai Rp4.445.352.359.776 dan NPV 12% bernilai Rp-737.371.241.025(negatif).

$$IRR = 5,75\% + \left(\frac{Rp4.445.352.359.776}{Rp4.445.352.359.776 - (-737.371.241.025)} \right) \times (6,25\%)$$

$$IRR = 5,75\% + \left(\frac{Rp4.445.352.359.776}{Rp 5.128.723.600.801} \right) \times (6,25\%)$$

IRR= 11,11%

Perhitungan IRR menggunakan interpolasi linier antara tingkat diskonto 5,75% (NPV positif Rp4,45 triliun) dan 12% (NPV negatif Rp737 miliar) menghasilkan nilai IRR sebesar 11,11%. Karena nilai ini lebih tinggi dari BI Rate sebesar 5,75%, maka proyek dinyatakan layak secara finansial, dengan tingkat pengembalian yang melebihi batas minimum investasi pada kondisi pasar saat ini.

3.13 Penurunan Emisi

Proyek PLTS terapung di Danau Singkarak berkontribusi pada pengurangan emisi karbon sektor ketenagalistrikan. Dengan faktor emisi regional sebesar 0,84 ton CO₂/MWh (ESDM, 2019) dan produksi energi tahunan rata-rata, proyek ini diperkirakan mampu menurunkan emisi sebesar 20,79 juta ton CO₂ selama 25 tahun. Hal ini menunjukkan efektivitasnya sebagai solusi energi bersih dalam mendukung target dekarbonisasi nasional 2050.

4. Kesimpulan

Analisis kelayakan PLTS terapung on-grid di Danau Singkarak menunjukkan bahwa proyek ini layak secara teknis dan ekonomis. Dengan kapasitas 775.140,1 kWp yang memanfaatkan 5% luas danau, sistem menghasilkan energi sebesar 1.055,83 GWh per tahun menggunakan 1.696.852 panel surya monocrystalline LONGi 600 Wp dan 113 inverter. Total investasi sebesar Rp8,75 triliun dengan biaya operasional 1,5% per tahun menghasilkan LCOE sebesar Rp 796,39/kWh, lebih rendah dari tarif nasional. Nilai NPV sebesar Rp4,45 triliun, IRR 11,11%, dan Payback Period

8,38 tahun menunjukkan kelayakan finansial. Selain itu, proyek ini diproyeksikan menurunkan emisi karbon sebesar 20,79 juta ton CO₂ selama 25 tahun dan berkontribusi 1,82% terhadap target EBT nasional 2032, menjadikannya solusi strategis untuk transisi energi bersih di Indonesia

Daftar Rujukan

- [1]Nugroho, N., & Hakim, I., “Analisis Pengaruh Variasi Suhu Air terhadap Efisiensi PLTS Terapung,” *Jurnal Rekayasa Energi*, vol. 11, no. 3, pp. 32–40, 2021.
- [2]Prasetyo, A., Setiawan, D., & Kurniawan, R., “Analisis Kinerja PLTS Terapung dengan Variasi Sudut Kemiringan Panel,” *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, vol. 10, no. 1, pp. 25–34, 2020.
- [3]Rahman, R., & Kusnadi, T., “Analisis Keandalan Sistem PLTS Terapung terhadap Variasi Beban,” *Jurnal Teknik Energi*, vol. 16, no. 3, pp. 88–97, 2022.
- [4]Ramadhan, R., & Susanto, H., “Pemanfaatan PLTS Terapung untuk Mendukung Ketahanan Energi Nasional,” *Jurnal Energi dan Lingkungan*, vol. 15, no. 4, pp. 56–67, 2022.
- [5]Rizky, R., & Satria, A., “Implementasi Smart Inverter untuk PLTS Terapung,” *Jurnal Elektronika dan Energi Terbarukan*, vol. 19, no. 1, pp. 55–63, 2023.Ahmad, J., & Khan, Z. A., “A comprehensive review on floating photovoltaic power plants: Trends, challenges, and future prospects,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, pp. 111197, 2021.
- [6]Chen, L., & Zhang, H., “Advancements in photovoltaic inverter technology for high-efficiency solar farms,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 228, pp. 111235, 2022.
- [7]Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi (EBTKE), *Buku Panduan Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terapung*, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2021.
- [8]Gonzalez, A., Fernandez, R., & Lopez, J., “Optimization strategies for string configuration in large-scale solar farms,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 3, pp. 349–359, 2023.
- [9]Heo, D., Lee, B., & Lee, J., “Performance analysis of a floating photovoltaic system considering cooling effect and wind speed in

- South Korea,” *Energy Conversion and Management*, vol. 269, pp. 116037, 2022.
- [10] Hidayat, H., & Subekti, P., “Evaluasi Efisiensi Panel Surya Monokristalin dan Polikristalin pada Sistem PLTS Terapung,” *Jurnal Teknologi Energi*, vol. 12, no. 2, pp. 78–85, 2021.
- [11] Hilal, H., Riza, A., Prastawa, A., & Matsumura, T., “Turning renewable energy be a dispatchable electric generation through energy management system technology: Sumba smart micro grid case,” in *Proceedings of the Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, pp. 29–31, Solo, Indonesia, October 2018.
- [12] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, *Faktor Emisi Grid Nasional Tahun 2021*, Direktorat Inventarisasi Gas Rumah Kaca dan Monitoring, Pelaporan, dan Verifikasi, Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim, 2021.
- [13] Khatri, S., & Maharjan, L., “Optimization of floating solar PV power plant configuration for maximum energy yield: A case study approach,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 405, pp. 136952, 2023.
- [14] Kumar, P., & Patel, S., “Financial feasibility of floating solar farms: A case study approach,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 14, no. 1, pp. 121–130, 2021.
- [15] Mahendra, M., & Suryadi, R., “Pengaruh Konfigurasi String pada Performa Inverter di PLTS Terapung,” *Jurnal Ilmu Teknik Elektro*, vol. 14, no. 1, pp. 110–118, 2024.
-