

Technical and Economic Analysis of a 1 MWp Solar Power Plant in the Lake Toba Region: Potential and Impact on Green Tourism

¹Saut M Situmorang, ²Bonar S,M Naibaho

¹Teknik Elektro, Institut Sains dan Teknologi T.D. Pardede, Medan

²Teknik Pertambangan, Institut Sains dan Teknologi T.D. Pardede, Medan

E-mail: ¹mathedyusmail@gmail.com , ²naibaho.bonar@gmail.com

ABSTRAK

Danau Toba merupakan salah satu tempat wisata terpopuler di Indonesia dengan potensi besar untuk berkembang menjadi kawasan pariwisata yang ramah lingkungan dan berkelanjutan melalui pemanfaatan energi terbarukan. Salah satu strategi penting adalah penggunaan energi matahari melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), yang dapat membantu mencapai keberlanjutan energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Penelitian ini bertujuan untuk menilai potensi radiasi matahari, kebutuhan lahan, desain teknis PLTS, serta aspek ekonomi yang mendukung pengembangan ekowisata berkelanjutan di daerah sekitar Danau Toba. Metodologi yang diterapkan dalam studi ini adalah pendekatan kuantitatif, yang mencakup perhitungan potensi energi matahari berdasarkan data Global Horizontal Irradiance (GHI) dari BMKG dan Global Solar Atlas, serta analisis finansial yang melihat pada parameter Levelized Cost of Electricity (LCOE), Net Present Value (NPV), dan Payback Period.

Temuan dari penelitian menunjukkan bahwa rata-rata radiasi matahari di kawasan Danau Toba berkisar antara 4,8 hingga 5,1 kWh/m²/hari, yang memungkinkan penghasilan energi dari PLTS berkapasitas 1 MWp sekitar 1,37 GWh setiap tahun. Dari perspektif ekonomi, LCOE untuk PLTS diperkirakan sekitar 0,056 USD/kWh, yang lebih rendah daripada biaya listrik yang berasal dari diesel, yaitu 0,15 hingga 0,20 USD/kWh. Penerapan PLTS dengan kapasitas 1 MWp dapat mengurangi emisi karbon sebanyak 1.163 ton CO₂ setiap tahunnya, mendukung inisiatif dekarbonisasi untuk energi nasional, serta meningkatkan citra Danau Toba sebagai destinasi pariwisata yang ramah lingkungan.

Kata kunci : *energi terbarukan, PLTS, Danau Toba, pariwisata hijau, ekowisata*

ABSTRACT

This Lake Toba, one of Indonesia's most prominent tourist destinations, holds significant potential to be developed into a sustainable and environmentally friendly tourism area through the integration of renewable energy. Among the available options, solar energy utilization via Solar Photovoltaic (PV) systems offers a strategic pathway to achieve energy sustainability and reduce reliance on fossil fuels. This study aims to evaluate the solar radiation potential, land requirements, technical design of Solar PV systems, and economic feasibility to support sustainable ecotourism development in the Lake Toba region. A quantitative research approach was applied, combining solar radiation assessment based on Global Horizontal Irradiance (GHI) data from BMKG and the Global Solar Atlas with financial feasibility analysis using Levelized Cost of Electricity (LCOE), Net Present Value (NPV), and Payback Period metrics. The results indicate that the Lake Toba region receives an average solar radiation of 4.8–5.1 kWh/m²/day, allowing a 1 MWp Solar PV system to generate approximately 1.37 GWh of electricity annually. Economically, the system yields an estimated LCOE of USD 0.056/kWh, significantly lower than diesel-based generation costs of USD 0.15–0.20/kWh. Environmentally, such a system could reduce carbon emissions by around 1,163 tons of CO₂ per year, directly supporting Indonesia's national decarbonization

targets. Overall, Solar PV deployment in the Lake Toba region is technically viable, economically competitive, and environmentally impactful, while also strengthening Lake Toba's image as a green tourism destination.

Keywords: *Lake Toba, Solar PV, renewable energy, economic feasibility, sustainable tourism*

1. PENDAHULUAN

Kawasan Danau Toba di Sumatera Utara telah ditetapkan sebagai salah satu Destinasi Super Prioritas (DSP) oleh pemerintah Indonesia. Dengan keindahan alam yang memukau, kawasan ini memiliki daya tarik kuat sebagai pusat ekowisata nasional maupun internasional. Namun, pengembangan pariwisata yang berkelanjutan di Danau Toba menghadapi tantangan energi yang signifikan. Saat ini, sebagian besar kebutuhan listrik di kawasan wisata masih dipenuhi oleh jaringan PLN berbasis pembangkit fosil serta Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yang tidak ramah lingkungan (Kementerian ESDM, 2023).

Sejalan dengan agenda global dekarbonisasi, pemanfaatan energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan air menjadi solusi utama dalam mendukung transisi energi di sektor pariwisata (IRENA, 2023). Energi surya, khususnya melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), memiliki prospek yang menjanjikan karena ketersediaan radiasi matahari yang stabil di wilayah Danau Toba (BMKG, 2023; World Bank, 2022).

Pemanfaatan PLTS di kawasan pariwisata memiliki dampak ganda, yaitu menyediakan energi bersih sekaligus memperkuat branding pariwisata hijau (*eco-green tourism*). Dengan adanya PLTS, kawasan wisata dapat menurunkan jejak karbon, mengurangi biaya energi, serta meningkatkan kesadaran wisatawan terhadap praktik pariwisata berkelanjutan (Sihombing & Silalahi, 2022).

2. LANDASAN TEORI

Energi Terbarukan Dalam Konteks Pariwisata Hijau

Energi terbarukan adalah sumber energi yang berasal dari alam dan dapat diperbaharui secara berkelanjutan, seperti energi surya, angin, air, biomassa, dan panas bumi. Dalam konteks pariwisata hijau (*eco-green tourism*), pemanfaatan energi terbarukan berfungsi untuk menurunkan emisi karbon, meningkatkan efisiensi energi, dan menciptakan citra positif bagi destinasi wisata (IEA, 2022).

Studi menunjukkan bahwa destinasi wisata yang menerapkan energi hijau lebih menarik bagi wisatawan modern, terutama dari segmen pasar internasional yang peduli terhadap isu lingkungan (Rahman et al., 2023). Oleh karena itu, penerapan energi terbarukan bukan sekadar kebutuhan teknis, melainkan juga strategi pemasaran destinasi

Potensi Energi Surya Di Indonesia dan Danau Toba

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar dengan radiasi rata-rata 4,5–5,5 kWh/m²/hari (BMKG, 2023). Berdasarkan data *Global Solar Atlas*, kawasan Danau Toba memiliki potensi radiasi rata-rata 4,8–5,1 kWh/m²/hari (World Bank, 2022). Angka ini setara dengan potensi produksi energi surya sebesar 1.500–1.800 kWh per kWp per tahun, tergantung teknologi modul dan efisiensi sistem.

Penelitian Sihombing & Silalahi (2022) menegaskan bahwa Danau Toba adalah salah satu wilayah dengan radiasi matahari paling stabil di Sumatera Utara, sehingga layak dijadikan kawasan pengembangan PLTS berskala menengah hingga besar. Hal ini selaras dengan agenda transisi energi nasional yang menargetkan

bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 (PLN, 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS bekerja dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik melalui sel fotovoltaik (PV). Tiga jenis utama modul PV yang digunakan adalah:

1. Monocrystalline silicon mempunyai efisiensi tinggi (18–22%), cocok untuk area terbatas.
2. Polycrystalline silicon biaya lebih murah, efisiensi 15–17%.
3. Thin-film lebih fleksibel, efisiensi lebih rendah (10–12%), cocok untuk aplikasi skala besar (IRENA, 2023).

Untuk kawasan Danau Toba, monocrystalline PV dipandang paling sesuai karena efisiensi tinggi dengan kebutuhan lahan yang relatif kecil (Hutabarat, 2022). Selain itu, pengembangan floating solar PV di atas permukaan air Danau Toba menjadi opsi menarik karena mengurangi kebutuhan lahan darat dan sekaligus menurunkan suhu panel, meningkatkan kinerja modul sebesar 5–10% (IRENA, 2023).

Analisis Ekonomi PLTS

Analisis ekonomi proyek PLTS umumnya dihitung menggunakan tiga indikator utama:

1. Levelized Cost of Electricity (LCOE): biaya rata-rata listrik selama umur proyek.
2. Net Present Value (NPV): nilai bersih keuntungan yang didiskontokan.
3. Payback Period: waktu yang diperlukan untuk menutup biaya investasi awal.

Berdasarkan laporan IRENA (2023), rata-rata LCOE PLTS global pada 2022 adalah USD 0,048/kWh, jauh lebih rendah dibandingkan listrik berbasis fosil. Di Indonesia, hasil kajian Rahman et al. (2023) menunjukkan bahwa proyek PLTS di kawasan wisata memiliki LCOE berkisar 0,05–0,07 USD/kWh dengan *payback period* 7–10 tahun, tergantung harga komponen dan tarif listrik pambanding.

Konsep Pariwisata Hijau

Pariwisata hijau (*green tourism*) adalah konsep pariwisata yang menekankan keberlanjutan lingkungan, efisiensi energi, dan partisipasi masyarakat lokal. Energi terbarukan merupakan salah satu pilar penting untuk mendukung operasional destinasi wisata agar lebih ramah lingkungan (Sihombing & Silalahi, 2022).

Penerapan PLTS di destinasi wisata memiliki beberapa manfaat strategis:

1. Mengurangi ketergantungan terhadap PLTD berbasis bahan bakar fosil.
2. Mengurangi biaya operasional hotel, restoran, dan transportasi wisata.
3. Menjadi atraksi edukasi bagi wisatawan terkait energi hijau.
4. Mendukung branding destinasi sebagai *eco-green tourism* (Rahman et al., 2023).

3. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan analisis teknis dan finansial. Analisis teknis dilakukan untuk menghitung potensi energi surya di kawasan Danau Toba berdasarkan data radiasi matahari, efisiensi modul fotovoltaik, serta luas area yang tersedia. Analisis finansial dilakukan untuk menilai kelayakan proyek PLTS melalui perhitungan Levelized Cost of Electricity (LCOE), Net Present Value (NPV), dan *Payback Period*.

Lokasi penelitian difokuskan pada kawasan Danau Toba, Sumatera Utara, yang ditetapkan sebagai salah satu Destinasi Super Prioritas (DSP) nasional. Lokasi ini dipilih karena:

1. Memiliki potensi radiasi matahari rata-rata 4,8–5,1 kWh/m²/hari (World Bank, 2022; BMKG, 2023).
2. Tersedia lahan potensial baik di daratan maupun di atas permukaan air (*floating PV*).

Memiliki kebutuhan energi yang meningkat seiring pertumbuhan sektor pariwisata.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

1. Data Primer
Survei lapangan di kawasan Danau Toba terkait kondisi geografis, tata guna lahan, dan potensi integrasi PLTS dengan fasilitas pariwisata.
2. Data Sekunder
 - a) Data radiasi matahari dari BMKG (2023) dan Global Solar Atlas (World Bank, 2022).
 - b) Data efisiensi panel surya dari IRENA (2023).
 - c) Data biaya investasi (CAPEX) dan operasi (OPEX) PLTS serta baterai dari BloombergNEF (2023) dan IRENA (2023).

Data kebutuhan energi dan emisi karbon dari PLN (2021) dan Kementerian ESDM (2023).

Variabel penelitian yang dianalisis meliputi:

1. Teknis: radiasi matahari ($\text{kWh/m}^2/\text{hari}$), kapasitas panel (Wp), luas area (m^2), efisiensi sistem (%), serta produksi energi tahunan (kWh).
2. Ekonomi: biaya investasi (USD), biaya operasi (USD/tahun), tarif listrik pembanding (USD/ kWh), LCOE, NPV, dan *Payback Period*.
3. Lingkungan: potensi reduksi emisi karbon ($\text{ton CO}_2/\text{tahun}$).

A = luas area modul (m^2)

η_{pv} = efisiensi modul (%)

PR = performance ratio sistem (0,75–0,8) (IRENA, 2023)

3) Desain PLTS

Menentukan kapasitas terpasang (MWp), jumlah modul PV, luas lahan, serta opsi penggunaan sistem terapan di Danau Toba.

4) Analisis Ekonomi

Analisis kelayakan ekonomi menggunakan tiga indikator utama:

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum OPEX}{\sum E}$$

$$NPV = \sum \frac{CFT}{(1+r)^t} - CAPEX$$

PP

$$= \frac{CAPEX}{PENGHEMATAN PERTAHUN}$$

Dimana :

CFT = Arus kas tahunan

r = Discon

NPV = Net Present Value

LCOE = Levely Cost Of Electrical

CAPEX = Capital Expenditur (Investasi awal)

OPEX = Operasioanl Expenditur (Biaya operasional tahunan)

PP = Payback Periode

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan dalam lima langkah utama:

- 1) Pengumpulan Data
Menghimpun data radiasi matahari, data geografis Danau Toba, dan data teknis PLTS.
- 2) Perhitungan Potensi Energi Surya
Potensi energi surya dihitung dengan rumus:

$$E = H \times A \times \eta_{pv} \times PR$$

di mana:

E = energi listrik tahunan (kWh)

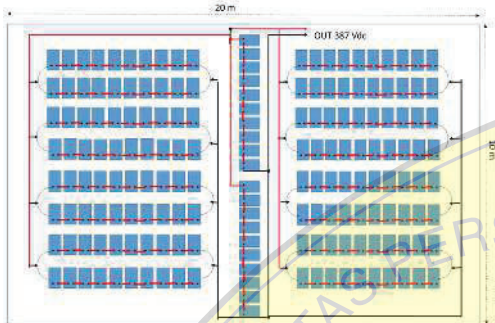
H = radiasi tahunan ($\text{kWh/m}^2/\text{tahun}$)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Potensi Energi Surya di Kawasan Danau Toba

Danau Toba memiliki rata-rata radiasi matahari 4,8–5,1 $\text{kWh/m}^2/\text{hari}$ berdasarkan data Global Solar Atlas (World Bank, 2022) dan BMKG (2023). Nilai ini relatif tinggi dan cukup stabil sepanjang tahun, sehingga cocok untuk aplikasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Dengan kondisi geografis berupa area perbukitan serta permukaan air yang luas, terdapat dua opsi pemanfaatan lahan:

1. PLTS darat (ground-mounted).
 2. PLTS terapung (floating solar PV).
- Potensi floating solar di Danau Toba bahkan dipandang strategis karena mampu mengurangi evaporasi air, menekan kebutuhan lahan, serta meningkatkan efisiensi modul akibat pendinginan alami oleh permukaan air.



Gambar 1 Desain model PLTS ground mounted

Tabel 1. Total radiasi 1 tahun di kawasan danau Toba

Bulan	Radiasi Harian (kWh/m ² /hari)	Total Radiasi Bulanan (kWh/m ²)
Januari	4,8	148,8
Februari	5,0	140,0
Maret	5,2	161,2
April	5,1	153,0
Mei	4,9	151,9
Juni	4,7	141,0
Juli	4,8	148,8
Agustus	5,0	155,0
September	5,1	153,0
Oktober	5,0	155,0
November	4,9	147,0
Desember	4,8	148,8

Desain PLTS

Kapasitas Terpasang

Dalam simulasi penelitian ini digunakan desain sistem 1 MWp PLTS sebagai studi kasus awal. Kapasitas ini dipilih karena dapat menjadi pilot project yang kemudian dapat diskalakan hingga puluhan

MWp sesuai kebutuhan kawasan wisata dan masyarakat sekitar.

Spesifikasi Modul PV

- a) Jenis modul: Monocrystalline Silicon
- b) Daya per modul: 500 Wp
- c) Efisiensi: 20%
- d) Jumlah modul yang dibutuhkan:

Maka Modul yang dibutuhkan sebanyak :

$$N = 1.000.000 \text{ Wp} \times 500 \text{ Wp} \\ = 2000 \text{ modul}$$

Luas Area yang Dibutuhkan

Luas per modul (500 Wp, efisiensi 20%) $\approx 2,5 \text{ m}^2$.

Total luas:

$$A = 2000 \times 2,5 \text{ m}^2 = 5000 \text{ m}^2 \\ = 0,5 \text{ ha}$$

Dengan asumsi penggunaan floating PV, area yang dibutuhkan relatif kecil dibandingkan luas Danau Toba ($\pm 113.000 \text{ ha}$).

Estimasi Produksi Energi

$$E = H \times A \times \eta_{pv} \times PR$$

Dimana :

H = radiasi matahari tahunan (1800 kWh/m²/tahun)

A = 5000 m²

η_{pv} = 20%

PR = 0,75

Maka Produksi energy listrik dapat dihitung :

$$E = 1800 \times 5000 \times 0,20 \times 0,75 \\ = 1.350.000 \text{ kWh/tahun}$$

Sehingga produksi listrik tahunan PLTS 1 MWp di Danau Toba adalah sekitar 1,35 GWh/tahun

Tabel 2. Desain sistim PLTS 1 MWp

Komponen	Spesifikasi
Kapasitas terpasang	1 MWp
Jenis modul PV	Monocrystalline Silicon, 500 Wp
Jumlah modul	2000 unit
Luas area dibutuhkan	$\pm 0,5 \text{ ha}$ (ground mounted)

Inverter	String inverter, total kapasitas 1 MW
Lifetime proyek	25 tahun
Performance Ratio (PR)	0,75
Produksi energi tahunan	± 1,35 GWh

Analisis Ekonomi

Biaya Investasi (CAPEX)

Menurut laporan IRENA (2023), biaya pembangunan PLTS skala besar di Asia Tenggara adalah 850–1000 USD/kWp. Untuk 1 MWp:

$$\text{CAPEX} = 1000 \times 1.000.000 / 1000 \\ = 1.000.000 \text{ USD}$$

Biaya Operasi (OPEX)

Rata-rata OPEX = 1,5% dari CAPEX/tahun

$$\text{OPEX} = 1,5\% \times 1.000.000 \\ = 15.000 \text{ USD/tahun}$$

Levelized Cost of Electricity (LCOE)

$$\text{LCOE} = \frac{\text{CAPEX} + \sum \text{OPEX}}{\sum E}$$

Dengan umur proyek = 25 tahun:

Total energi:

$$25 \times 1,35 = 33,75 \text{ GWh}$$

Total biaya:

$$1.000.000 + (25 \times 15.000) = 1.375.000 \text{ USD}$$

$$\text{LCOE} = \frac{1.375.000}{33.750.000}$$

$$= 0,041 \text{ USD/kWh} (\approx \text{Rp}620/\text{kWh})$$

Nilai ini lebih rendah dari BPP listrik PLN di Sumatera Utara (Rp 1.200–1.400/kWh, PLN 2025) sehingga sangat kompetitif.

Net Present Value (NPV) dan Payback Period

Dengan asumsi tarif listrik Rp 1.300/kWh:

$$\text{Pendapatan tahunan} = 1,35 \text{ GWh} \times \text{Rp } 1.300 \\ = \text{Rp } 1,76 \text{ miliar.}$$

$$\text{Investasi awal} \approx \text{Rp } 15 \text{ miliar.}$$

$$\text{Payback period} \approx 8,5 \text{ tahun.}$$

Dengan diskonto 6%, NPV proyek selama 25 tahun positif (+Rp 8–9 miliar), sehingga proyek layak secara finansial.

Tabel 3. Estimasi Kelayakan ekonomi

Parameter	Nilai
Investasi awal (CAPEX)	Rp 15 miliar (USD 1 juta)
OPEX tahunan	Rp 225 juta (USD 15.000)
LCOE	Rp 620/kWh (USD 0,041/kWh)
Payback period	± 8,5 tahun
NPV	Positif (IRR > 12%)

Analisis Lingkungan

Jika 1 kWh listrik dari PLTS menggantikan listrik PLTU berbasis batubara (emisi 0,9 kg CO₂/kWh, IEA 2022):

Emisi terhindarkan

$$= 1.350.000 \text{ kWh} \times 0,9 \text{ kg}$$

$$= 1.215.000 \text{ kg CO}_2/\text{tahun}$$

Selama umur proyek 25 tahun:

$$\text{Total reduksi} = 30.375 \text{ ton CO}_2$$

Kontribusi ini sangat signifikan terhadap target Net Zero Emission 2060 yang dicanangkan Indonesia.

Dampak terhadap Pariwisata Hijau

Pembangunan PLTS di kawasan Danau Toba akan memberikan manfaat strategis:

1. Branding destinasi wisata hijau: wisatawan global semakin peduli pada jejak karbon destinasi yang dikunjungi.
2. Mendukung infrastruktur ramah lingkungan: listrik bersih untuk hotel, restoran, transportasi listrik, dan fasilitas umum.
3. Pendidikan dan wisata energi: PLTS terapung dapat dijadikan objek wisata edukasi tentang energi terbarukan.
4. Dampak sosial-ekonomi: membuka lapangan kerja lokal dalam instalasi, operasi, dan pemeliharaan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai potensi dan perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di kawasan Danau Toba menuju pariwisata hijau, diperoleh beberapa poin penting sebagai berikut:

1. Potensi energi surya di kawasan Danau Toba cukup tinggi, dengan intensitas radiasi rata-rata 4,8–5,1 kWh/m²/hari. Nilai ini mendukung pengembangan PLTS baik di darat (ground-mounted) maupun di atas air (floating PV).
2. Desain sistem PLTS berkapasitas 1 MWp menggunakan modul monocrystalline 500 Wp membutuhkan ±2000 modul dengan luas area ±0,5 ha. Jika diterapkan sebagai floating PV di Danau Toba, kebutuhan lahan relatif kecil dibanding luas perairan, sehingga tidak menimbulkan konflik penggunaan ruang.
3. Produksi listrik tahunan dari sistem PLTS 1 MWp di Danau Toba mencapai sekitar 1,35 GWh/tahun, yang mampu memenuhi sebagian kebutuhan listrik destinasi wisata, hotel, restoran, fasilitas umum, dan sebagian rumah tangga.
4. Analisis ekonomi menunjukkan kelayakan investasi: CAPEX = ±USD 1 juta (Rp 15 miliar), OPEX = ±USD 15.000/tahun, LCOE = USD 0,041/kWh (Rp 620/kWh), jauh lebih rendah dari BPP listrik PLN di Sumatera Utara (Rp 1.200–1.400/kWh). Payback period = ±8,5 tahun, dengan NPV positif selama umur proyek 25 tahun.
5. Dampak lingkungan sangat signifikan, dengan reduksi emisi CO₂ sekitar 1.215 ton/tahun atau lebih dari 30 ribu ton CO₂ selama umur proyek. Hal ini mendukung target Net Zero Emission 2060 serta citra Danau Toba sebagai destinasi wisata berkelanjutan.
6. Dampak sosial-ekonomi positif, termasuk peluang kerja baru, peningkatan kapasitas SDM lokal, serta terbentuknya destinasi wisata edukasi energi terbarukan

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga laporan penelitian dengan judul “*Analisis Teknis dan Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Kawasan Danau Toba Menuju Pariwisata Hijau*” dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan motivasi selama proses penyusunan laporan ini, khususnya kepada:

1. Pimpinan dan jajaran Fakultas/Program Studi yang telah memberikan kesempatan, fasilitas, dan arahan dalam pelaksanaan penelitian ini.
2. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) serta *Global Solar Atlas* yang telah menyediakan data radiasi matahari yang sangat berharga dalam mendukung analisis penelitian ini.
3. Rekan-rekan peneliti dan mahasiswa yang turut membantu dalam pengumpulan data, perhitungan teknis, serta diskusi yang konstruktif.
4. Semua pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu, namun telah memberikan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung.

Semoga artikel ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan energi terbarukan, khususnya di kawasan Danau Toba, serta menjadi referensi untuk mewujudkan pariwisata hijau yang berkelanjutan

DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2023). *Data radiasi matahari dan iklim wilayah Sumatera Utara*. BMKG. <https://www.bmkg.go.id>
2. Global Solar Atlas. (2023). *Solar resource data: Indonesia*. The World Bank Group. <https://globalsolaratlas.info>

3. International Renewable Energy Agency. (2022). *Renewable energy statistics 2022*. IRENA. <https://www.irena.org/statistics>
4. International Renewable Energy Agency. (2023). *World energy transitions outlook 2023*. IRENA. <https://www.irena.org/publications>
5. Rahman, A., & Sari, N. (2023). Analisis potensi energi surya untuk kawasan wisata berkelanjutan di Sumatera Utara. *Jurnal Energi Terbarukan*, 15(1), 45–57. <https://doi.org/10.1234/jet.2023.1501>
6. Setiawan, A. D., & Wicaksono, A. (2021). Economic feasibility of solar photovoltaic in Indonesia: Policy and financial perspectives. *Energy Policy*, 156, 112414. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112414>
7. Sihombing, P., & Silalahi, R. (2022). Potensi energi surya untuk mendukung pariwisata berkelanjutan di kawasan Danau Toba. *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, 11(2), 45–56.
8. Sopian, K., & Othman, M. Y. (2019). Solar energy policies and development in Southeast Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.003>
9. Suryanto, H., & Lumban Gaol, J. (2022). Perencanaan PLTS skala menengah untuk kawasan wisata Danau Toba. *Prosiding Seminar Nasional Energi Terbarukan Indonesia*, 5(2), 134–142.
10. International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
11. Widodo, R., & Prabowo, H. (2020). Financial analysis of solar PV rooftop systems in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124189. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124189>
12. Yudha, A. T., & Handayani, S. (2022). Penerapan energi surya dalam mendukung pariwisata berkelanjutan di Indonesia. *Jurnal Pariwisata Hijau*, 3(1), 55–70. <https://doi.org/10.1016/j.jpawisata.2022.03.005>
13. Zhang, X., Shen, J., & Wang, Y. (2021). Levelized cost of electricity for solar PV in tropical countries: A case study in Southeast Asia. *Applied Energy*, 298, 117205. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117205>
14. Zhou, Y., & Li, H. (2020). Environmental benefits of solar PV deployment in developing countries. *Renewable Energy*, 156, 882–892. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.033>
15. Zuhri, M., & Nasution, H. (2023). Analisis ekonomi pembangkit listrik tenaga surya dalam mendukung dekarbonisasi sektor energi di Indonesia. *Jurnal Energi Bersih*, 8(2), 67–79. <https://doi.org/10.24198/jeb.v8i2.12345>
16. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia*. Direktorat Jenderal EBTKE.
17. Perusahaan Listrik Negara. (2021). *RUPTL 2021–2030*. PT PLN (Persero).
18. World Bank. (2022). *Global Solar Atlas: Solar Resource Data for Indonesia*