



Studi Karakteristik Energi Surya untuk Pemanenan Energi: Studi Awal di Kota Kendari

La Ode Ahmad Barata^{1*}, Samhuddin¹, Rizqi Fitri Naryanto², Mera Kartika Delimayanti³, La Baride⁴

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Halu Oleo, Kendari 93232

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang

³Jurusan Teknik Komputer dan Informatika, Politeknik Negeri Jakarta

⁴Jurusan Teknik Mesin, Universitas Dayanu Ikhsanuddin, Baubau

Riwayat Artikel:

Diajukan: 01/05/2025

Diterima: 10/06/2025

Daring: 16/06/2025

Terbit: 30/Juni/2025

Kata Kunci:

Energi surya

Sudut zenit

Indeks kecerahan

PLTS

Kota Kendari

Keywords:

Solar energy

Zenith angle

Clearness index

Solar power generation

Kendari city

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik energi surya di wilayah Andoonuhu, Kota Kendari, Sulawesi Tenggara, sebagai studi awal untuk pengembangan sistem pembangkitan listrik tenaga surya (PLTS). Pengumpulan data dilakukan menggunakan pendekatan simulasi dan pengukuran langsung selama periode Maret hingga Mei 2024. Parameter utama yang dianalisis meliputi intensitas radiasi surya, indeks kejernihan (clearness index), sudut zenit, sudut insidensi, sudut jam matahari, serta respon keluaran daya panel fotovoltaik tipe SP-50-P36. Hasil studi menunjukkan bahwa intensitas radiasi rata-rata harian berada pada kisaran 4,5–6,4 kWh/m²/hari, dengan puncak energi terjadi pada bulan Mei. Analisis posisi matahari pada tanggal 23 Maret (momen ekuinoks) menunjukkan sudut zenit minimum mendekati 4–5°, yang menandakan kondisi penyinaran hampir tegak lurus terhadap permukaan bumi. Panel surya yang dipasang dengan kemiringan 15° menghadap utara menunjukkan nilai sudut insidensi yang relatif kecil pada siang hari, mendukung performa penangkapan radiasi optimal. Radiasi sorot maksimum tercatat pada pukul 12.00 siang, sementara kontribusi radiasi difusi lebih signifikan pada pagi dan sore hari. Indeks kejernihan berkorelasi positif terhadap sudut matahari, dengan nilai optimum saat sudut elevasi berada di atas 60°. Uji kinerja panel menunjukkan penurunan efisiensi konversi pada pukul 12.00 (Maret) dan 13.00 (Mei) akibat peningkatan temperatur permukaan modul. Studi ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan PV energi surya di wilayah Kendari cukup baik dan dapat dioptimalkan melalui desain sistem tetap maupun pelacakan. Penelitian ini memberikan dasar teknis bagi pengembangan sistem PLTS yang efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap karakteristik radiasi lokal utamanya di wilayah tengah-timur Indonesia.

Abstract

This research aims to evaluate the solar energy characteristics in the Andoonuhu area, Kendari City, Southeast Sulawesi, as a preliminary study for the development of a solar power generation (PLTS). Data collection was conducted using a simulation approach and direct measurements during the period from March to May 2024. The main parameters analyzed include solar radiation intensity, clearness index, zenith, incidence, solar hour angle, and the power output response of the photovoltaic panel SP-50-P36. The study results show that the average daily radiation intensity ranges from 4.5–6.4 kWh/m²/day, with peak energy occurring in May. Analysis of the sun's position on March 23 (equinox) revealed a minimum zenith angle of about 4–5°, indicating near-vertical sunlight conditions relative to the Earth's surface. Solar panels installed at a 15° facing north exhibited relatively small incidence angles during the day, supporting optimal radiation capture performance. Maximum beam radiation was recorded at 12:00 noon, while diffuse radiation contributed more significantly in the morning and evening. The clearness index showed a positive correlation with the solar angle, with optimal values when the elevation angle was above 60°. Panel performance tests revealed a decrease in thermal efficiency due to an increase in module surface temperature up to 49.25°C. This study indicates that the utilization of solar PV energy in Kendari is quite

*Korespondensi: ahmad.barata@uho.ac.id



favorable and can be optimized through fixed or tracking system designs. The research provides a technical fundamental data for the development of efficient, sustainable, and adaptive PLTS systems tailored to local radiation characteristics, particularly in the central-eastern region of Indonesia.

Nomenklatur

Uraian simbol parameter karakteristik radiasi matahari dan prestasi pembangkitan listrik dalam penelitian ini diberikan pada sebagai berikut;

Parameter	Uraian	Satuan
K_t	Indeks kecerahan cuaca atmosfer	-
I_g	Energi radiasi global sinar matahari	W/m ²
I_G	Energi radiasi matahari ekstraterestial	W/m ²
I_{sc}	Konstanta radiasi matahari	W/m ²
V_{oc}	Tegangan listrik luaran pada kondisi <i>open circuit</i>	V
$\cos \theta_z$	Sudut cosinus <i>zenith</i> matahari	°
θ_i	Sudut tiba	°
ω	Sudut jam	°
D_f	Fraksi radiasi difusi	-
I_b	Radiasi sorot	W/m ²
I_d	Radiasi difusi	W/m ²
P_{in}	Daya masukan energi matahari	W
P_{out}	Daya luaran panel PLTS	W
A_p	Luasan efektif dari permukaan panel surya	m ²
η_{pv}	Efisiensi system	%

Pendahuluan

Indonesia merupakan negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa, memiliki potensi energi surya yang sangat besar. Rata-rata intensitas radiasi matahari harian mencapai 4,8 kWh/m², menjadikan Indonesia memiliki potensi energi surya yang setara dengan 112.000 gigawatt peak (GWp). Radiasi matahari yang tinggi ini menjadikan energi surya sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial untuk memenuhi kebutuhan energi nasional. Distribusi radiasi matahari di Indonesia bervariasi berdasarkan lokasi geografis, kondisi atmosfer, dan pola cuaca.

Secara umum, wilayah Indonesia bagian timur, seperti Nusa Tenggara, Sulawesi, dan Papua, memiliki intensitas radiasi matahari yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah barat, seperti Sumatra dan Jawa. Wilayah timur cenderung memiliki tingkat perawanan yang lebih rendah dan atmosfer yang lebih bersih, sehingga intensitas penyinaran matahari lebih maksimal. Berdasarkan data dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), wilayah dengan potensi energi surya terbaik di Indonesia meliputi Kupang, Sumba, dan Merauke, dengan lama penyinaran matahari yang bisa mencapai 8-9 jam per hari [1]. Hal ini merupakan potensi besar dalam pengembangan dan pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi listrik berbasis panel fotovoltaik (PV).

Realisasi pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), pada tahun 2023, bauran EBT dalam energi primer nasional mencapai 13,09%, meningkat 0,79% dari tahun sebelumnya, namun masih di bawah target yang ditetapkan sebesar 17,87%. Kapasitas terpasang pembangkit listrik EBT mencapai 13.155 megawatt (MW), dengan kontribusi terbesar berasal dari tenaga air sebesar 6.784,2 MW, sedangkan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) baru mencapai 573,8 MW. Meskipun demikian, terdapat tren positif dalam pengembangan PLTS di Indonesia. Pemerintah menargetkan akumulasi kapasitas terpasang panel surya mencapai 770,7 MW pada tahun 2023. Namun, hingga semester I 2023, total kapasitas PLTS yang telah terpasang baru sebesar 322,6 MW. Sementara itu, target capaian kapasitas terpasang PLTS menjacapai 5.4 GW pada tahun 2030. Hal Percepatan transisi energi dan pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia telah ditetapkan dalam peta jalan kebijakan pengembangan energi baru dan terbarukan hingga tahun 2030. Target bauran energi terbarukan sebesar 23% dalam bauran energi nasional dapat dicapai tahun 2025 dengan fokus pada pengembangan PLTS atap, PLTS skala besar, dan pembangkit listrik tenaga air. Pada tahun 2030, ditargetkan bauran EBT menjadi 28%, termasuk memperluas infrastruktur pendukung seperti jaringan listrik dan penyimpanan energi (battery storage). Implementasi program energi baru dan terbarukan dalam bauran energi nasional juga didorong oleh komitmen pemerintah dalam mengurangi pengoperasian PLTU hingga tahun 2045 [2],[3].

Prospek energi surya di Indonesia tetap cerah dengan adanya dukungan pemerintah dan meningkatnya kesadaran masyarakat akan pentingnya transisi energi. Implementasi PLTS yang baru-baru ini misalnya adanya pembangunan PLTS terapung di Waduk Cirata, Jawa Barat dengan kapasitas 145 MW, PLTS Kupang dengan kapasitas 5 MW, PLTS Likupang 15 MW, dan lain-lain [4]. Selain itu, pengembangan PLTS di wilayah terpencil juga dapat menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan listrik daerah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik konvensional.

Melalui optimalisasi potensi energi surya, Indonesia dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, mendukung upaya mitigasi perubahan iklim, dan mendorong pembangunan ekonomi yang

berkelanjutan. Pemanfaatan energi surya yang lebih luas akan menjadi langkah strategis untuk mencapai target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan menciptakan masa depan energi yang lebih ramah lingkungan [5].

Potensi energi surya di Sulawesi Tenggara cukup besar mengingat wilayah ini berada di dekat garis khatulistiwa. Menurut [6] Sulawesi Tenggara mendapatkan rata-rata radiasi matahari harian yang cukup besar, berkisar antara 4,5 hingga 5,5 kWh/m²/hari. Ini menjadikannya ideal untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Durasi Penyinaran Matahari rata-rata 8–10 jam penyinaran matahari per hari, wilayah ini memiliki durasi optimal untuk pengoperasian sistem PLTS. Secara geografis, provinsi Sultra memiliki banyak pulau-pulau dan pedesaan yang potensial untuk PLTS *off-grid*, karena akses listrik dari jaringan listrik utama cukup terbatas. Hal ini juga sesuai dengan yang dinyatakan dalam [7].

Pemerintah Sulawesi Tenggara telah mulai memperhatikan energi terbarukan sebagai bagian dari Rencana Umum Energi Daerah (RUED), termasuk potensi pengembangan PLTS untuk meningkatkan bauran energi terbarukan [8].

Model PLTS skala kecil yang telah diimplementasikan di area Kota Kendari adalah unit PLTS Universitas Halu Oleo sebesar 33kWp. Sementara itu, PLTS skala penerangan jalan/taman tersebar di beberapa tempat/daerah di Sulawesi Tenggara. Sistem PLTS lainnya adalah PLTS Tambolusu 71,9 KWp, PLTS Towea Muna Barat dengan kapasitas maksimum 89,38KW [9]. Namun demikian, analisa data penelitian lapangan terkait potensi dan pemanfaatan tenaga surya masih diperlukan sebagai referensi dan acuan pemanfaatan dan pengembangan teknologi PV sebagai sumber energi listrik. Fokus penelitian ini adalah menganalisis data radiasi matahari relatif terhadap lokasi pengambilan data (Andounuhu), kota kendari, dan menguji pemanenan daya listrik di area tersebut.

Parameter Radiasi Matahari

Beberapa parameter radiasi matahari yang digunakan dalam penelitian ini dituliskan dalam persamaan 1-6 berikut.

$$K_t = \frac{I_g}{I_G} \quad (1)$$

$$I_G = I_{sc} \times \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right)\right) \cos \theta_z \quad (2)$$

$$D_f = \frac{I_d}{I_g} \quad (3)$$

Korelasi parameter radiasi difusi matahari yang merupakan fungsi dari indeks kecerahan cuaca diajukan oleh Erbs, et al.1982 [10] yakni;

$$\bullet \quad K_t \leq 0.22, \quad D_f = 1 - 0.09K_t \quad (4)$$

$$\bullet \quad 0.22 < K_t \leq 0.8, \quad D_f = 0.9511 - 0.1604K_t + 4.388K_t^2 - 16.638K_t^3 + 12.336K_t^4 \quad (4a)$$

$$\bullet \quad K_t > 0.8, \quad D_f = 0.165 \quad (4b)$$

Nethwedi dan Winkle, 2019 [11] merumuskan relasi K_t dan fraksi radiasi pada persamaan (6) sebagai

$$0.331 - 0.2333K_t = \frac{I_d}{I_g} \quad (5)$$

$$I_g = I_b + I_d \quad (6)$$

Parameter Prestasi PV-panel

1. Daya listrik masukan dari radiasi matahari

$$P_{in} = I_G \times A_p \quad (7)$$

2. Daya luaran PLTS per unit panel surya

$$P_{out} = I_{sc} \times V_{oc} \quad (8)$$

3. Efisiensi panel surya

$$\eta_{pv} = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\% \quad (9)$$

Metodologi Penelitian

Pengumpulan data karakteristik matahari di lakukan di Kota Kendari, Rahandouna dengan koordinat lokasi *Latitude* 122.6 dan *longitude* -4.002 selama bulan Maret – Mei 2024. Pengambilan sampel dilakukan setiap bulan selama 5 hari pada minggu ke-3 setiap bulannya. Pengambilan data radiasi matahari juga dilakukan melalui data-data satelit NASA POWER [12] dan data berasal dari [13].

Pengukuran prestasi pembangkitan daya listrik PV model dilakukan dengan menggunakan panel surya SP-50-P36, S-Series PUL, Polycrystalline dengan daya *wattpeak* 50WP selama 8 jam mulai pukul

8.00 – 16.00. Data radiasi sinar matahari diukur menggunakan solar power meter *SM-206*, dan daya output panel diukur berdasarkan data tegangan dan arus keluaran menggunakan multimeter *WEILAI, WL2905A*. Adapun skema pengukuran radiasi sinar matahari dan daya keluaran model PV-panel ditunjukkan pada **Gambar 1**.



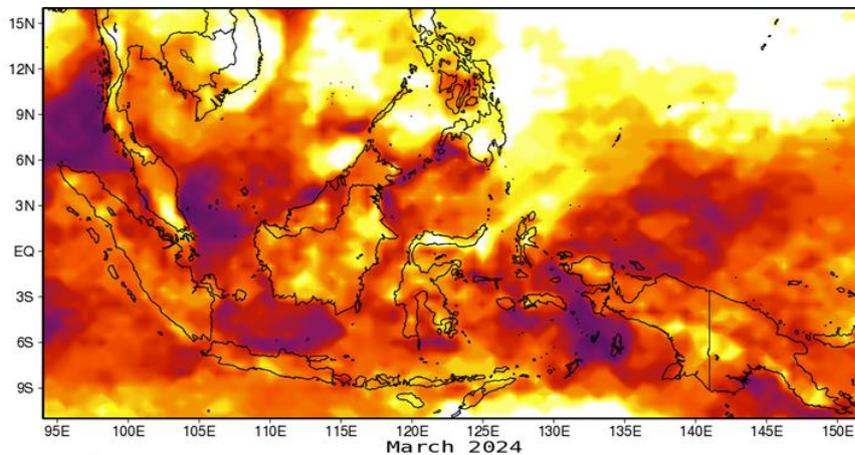
Gambar 1. Instalasi pengujian pembangkitan daya listrik

Hasil dan Pembahasan

A. Karakteristik Radiasi Matahari pada Lokasi Studi

Gambar 2 menampilkan peta wilayah Indonesia dan sekitarnya yang menunjukkan jumlah hari dengan kondisi gelombang panas (*heat wave*) selama bulan Maret 2024. Peta merepresentasikan jumlah hari dengan temperatur ekstrem, dengan gradasi dari kuning muda (lebih sedikit hari gelombang panas) hingga ungu tua (lebih banyak hari gelombang panas).

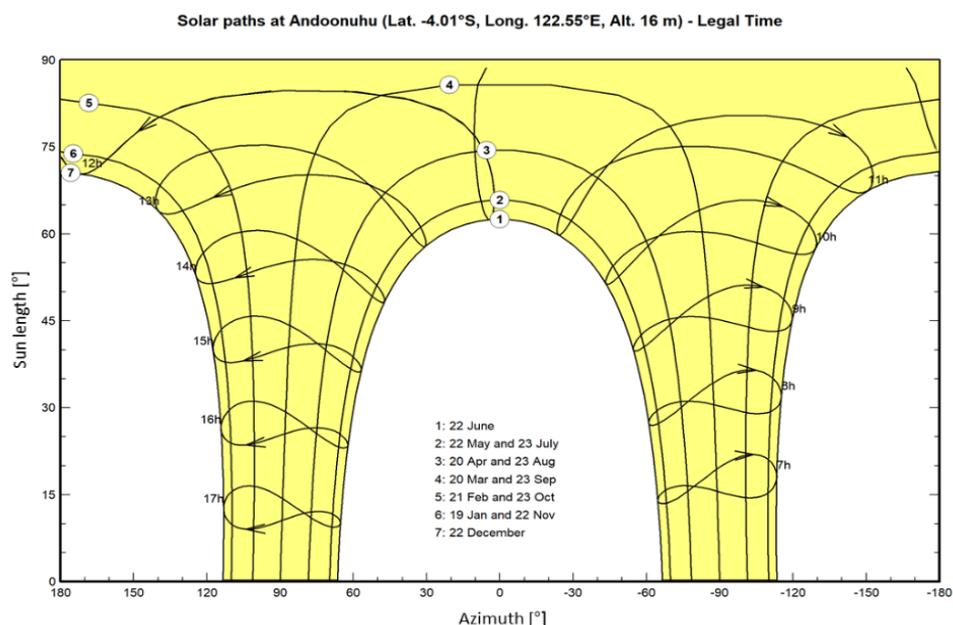
Distribusi gelombang panas, dapat dilihat bahwa Sulawesi Tenggara mengalami jumlah hari gelombang panas yang cukup signifikan, berkisar antara 12 hingga 18 hari, berdasarkan gradasi warna kuning hingga oranye muda.



Gambar 2. Gelombang panas kawasan Indonesia dan sekitarnya periode Maret 2024 [12]

Area Sulawesi Tenggara akan mengalami sejumlah hari dengan gelombang panas pada Maret 2024, yang mana secara teoritis, temperatur udara rata-rata akan melebihi 30°C, dan bahkan dapat mencapai kisaran 35–38°C pada siang hari. Implikasi dari keadaan ini,

temperatur permukaan PV-panel dapat berada 10–15°C di atas temperatur udara karena paparan langsung terhadap sinar matahari, temperatur operasional panel dapat mencapai 45–55°C. Dalam kondisi tersebut, terdapat penurunan efisiensi konversi listrik PV-panel sekitar 5–7% jika dibandingkan dengan kondisi yang ideal. Pada penelitian ini, temperatur udara rata-rata pada hari pengambilan data (5 hari) di siang hari berkisar 33°C, dengan temperatur permukaan PV-panel mencapai rata-rata maksimum 49,25°C. Angka ini masih dalam toleransi standar dari spesifikasi PV-panel yakni maksimum 80°C, dari kondisi normal 25°C. Hal ini mengindikasikan kenaikan temperatur panel di atas kondisi idealnya dapat menurunkan efisiensi konversi [14], [15].



Gambar 3. Posisi elevasi dan azimuth matahari di lokasi Kota Kendari (sumber: Penulis, disintesis dari data perangkat lunak PV syst.8.0)

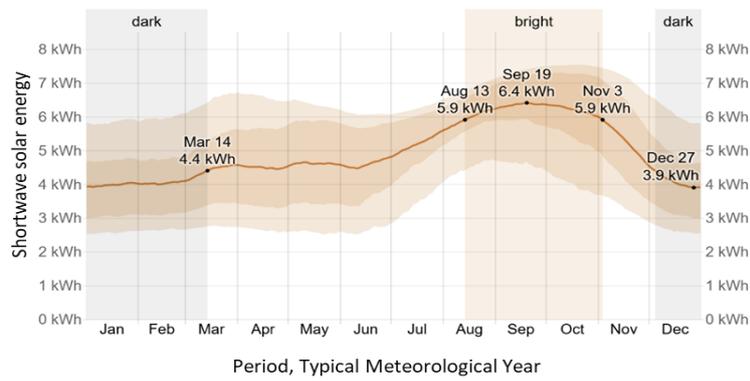
Gambar 3 menunjukkan diagram jalur matahari (*solar path diagram*) di area pengambilan data dalam penelitian ini, yakni pada koordinat -4,01°LS dan 122,55°BT, serta ketinggian 16 meter di atas permukaan laut. Diagram ini mengilustrasikan pergerakan semu matahari sepanjang tahun pada area tersebut, yang penting untuk perencanaan dan optimalisasi sistem energi surya.

Berdasarkan **Gambar 3** bahwa lintasan matahari mengalami variasi musiman yang relatif kecil dibandingkan dengan lokasi lintang yang lebih tinggi, mengingat Andoonuhu terletak dekat dengan ekuator. Pergerakan matahari berlangsung hampir vertikal di atas kepala (*zenith*) pada waktu-waktu tertentu dalam setahun, khususnya sekitar tanggal 20 Maret dan 23 September, bertepatan dengan ekuinoks, seperti ditunjukkan oleh jalur bernomor 4 pada diagram. Tinggi maksimum matahari (*solar altitude*) tercapai mendekati 90° pada tengah hari selama ekuinoks, dengan lintasan harian yang hampir simetris terhadap sumbu utara-selatan. Hal ini menunjukkan bahwa lokasi tersebut mendapatkan distribusi radiasi matahari yang cukup merata. Pada bulan Juni (jalur 1) dan Desember (jalur 7), terjadi deviasi kecil ke utara dan selatan, akibat kemiringan sumbu rotasi bumi sebesar 23,5°.

Diagram ini juga menunjukkan jam-jam posisi matahari dari pukul 7:00 hingga 17:00 waktu lokal, yang terdistribusi secara konsisten dalam pola parabola melengkung. Hal ini menandakan durasi siang hari di Andoonuhu relatif stabil sepanjang tahun, berkisar antara 11 hingga 13 jam.

Diagram jalur matahari dapat menentukan orientasi dan kemiringan optimal panel surya, dimana area Andoonuhu, pergerakan matahari yang hampir tegak lurus di atas kepala pada periode ekuinoks yang memungkinkan sudut kemiringan panel surya optimal dapat mendekati horizontal (0°–10°) untuk memaksimalkan penerimaan energi sepanjang tahun. Namun, untuk mempertimbangkan aliran air hujan dan pembersihan permukaan panel, kemiringan minimal 10° tetap direkomendasikan. Hal ini juga dapat disimpulkan bahwa pergeseran jalur lintasan matahari relative terhadap posisi panel (panel dengan *multi array*) dianggap tidak menimbulkan efek bayangan yang dapat menurunkan kinerja PV-panel.

Keberadaan dua puncak waktu (sekitar ekuinoks) dengan ketinggian matahari maksimum juga membuka peluang penggunaan sistem pelacak matahari (*solar tracker*) satu sumbu (*east-west axis*) untuk meningkatkan perolehan energi hingga 20% dibandingkan dengan sistem tetap (*fixed tilt*).



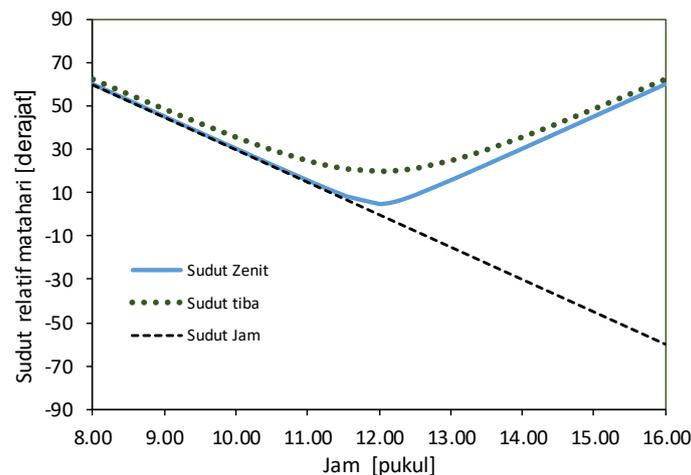
Gambar 4. Data radiasi datang matahari rata-rata pada lokasi studi [13]

Gambar 4 menunjukkan variasi tahunan energi surya gelombang pendek (*shortwave solar energy*) yang diterima di area Andoonuhu, Sulawesi Tenggara, dalam satuan kWh per meter persegi per hari. Grafik ini memberikan gambaran mengenai pola fluktuasi radiasi matahari sepanjang tahun yang relevan untuk desain, pengelolaan, dan optimasi sistem pembangkitan listrik berbasis fotovoltaik (PV-panel).

Secara umum, energi surya harian yang diterima bervariasi antara 3,9 kWh/m² hingga 6,4 kWh/m². Nilai terendah tercatat pada 27 Desember (3,9 kWh/m²), sedangkan nilai puncak terjadi pada 19 September (6,4 kWh/m²). Pola ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat fluktuasi musiman, amplitudo perubahan energi surya di Andoonuhu relatif moderat, dengan selisih maksimum sekitar 2,5 kWh/m²/hari sepanjang tahun.

Periode bulan Juni hingga Oktober, yang ditandai dengan latar berwarna terang pada grafik (*bright season*), memperlihatkan intensitas radiasi yang lebih tinggi dan stabil. Selama periode ini, energi harian konsisten berada di atas 5,5 kWh/m², menjadikannya musim paling optimal untuk produksi energi listrik dari sistem PV. Kondisi ini bertepatan dengan musim kemarau di kawasan ini, yang umumnya dicirikan dengan langit cerah dan tingkat kekeruhan atmosfer yang rendah, sehingga meningkatkan transmisivitas radiasi surya.

Sebaliknya, periode Desember hingga Maret, yang ditandai dengan latar berwarna gelap (*dark season*), menunjukkan tingkat penerimaan energi surya yang lebih rendah, berkisar antara 3,9 hingga 4,4 kWh/m². Ini berhubungan dengan musim penghujan di kawasan Sulawesi Tenggara, di mana awan tebal, curah hujan tinggi, dan tingkat aerosols di atmosfer berkontribusi terhadap penurunan intensitas radiasi yang mencapai permukaan bumi. Pada periode April – hingga awal Juni merupakan periode transisi musim dimana kondisi cuaca (tingkat kecerahan) masih fluktuatif sehingga kuantitas energi surya relatif tidak mengalami kenaikan yang berarti. Dengan kondisi ini, maka pola pengelolaan meliputi perawatan, suplai dan penyimpanan energi *PV-system* dapat dioptimalkan sesuai dengan dinamika cuaca di area tersebut.



Gambar 5. Posisi pergerakan matahari relative terhadap area pengambilan data pada 23 Maret 2024

Perubahan sudut zenit, sudut insidensi, dan sudut jam matahari sepanjang hari pada tanggal 23 Maret di wilayah Andoonuhu, Sulawesi Tenggara ditunjukkan pada Gambar 5. Tanggal tersebut mendekati periode ekuinoks Maret (tanggal 21), dimana saat posisi semu matahari melintasi garis khatulistiwa.

Sudut zenit (θ_z) merepresentasikan sudut antara garis vertikal dan arah sinar matahari. Seperti terlihat pada grafik, sudut ini sekitar 60° pada pukul 8.00 (90° pada pukul 06.00 dan 18.00; matahari

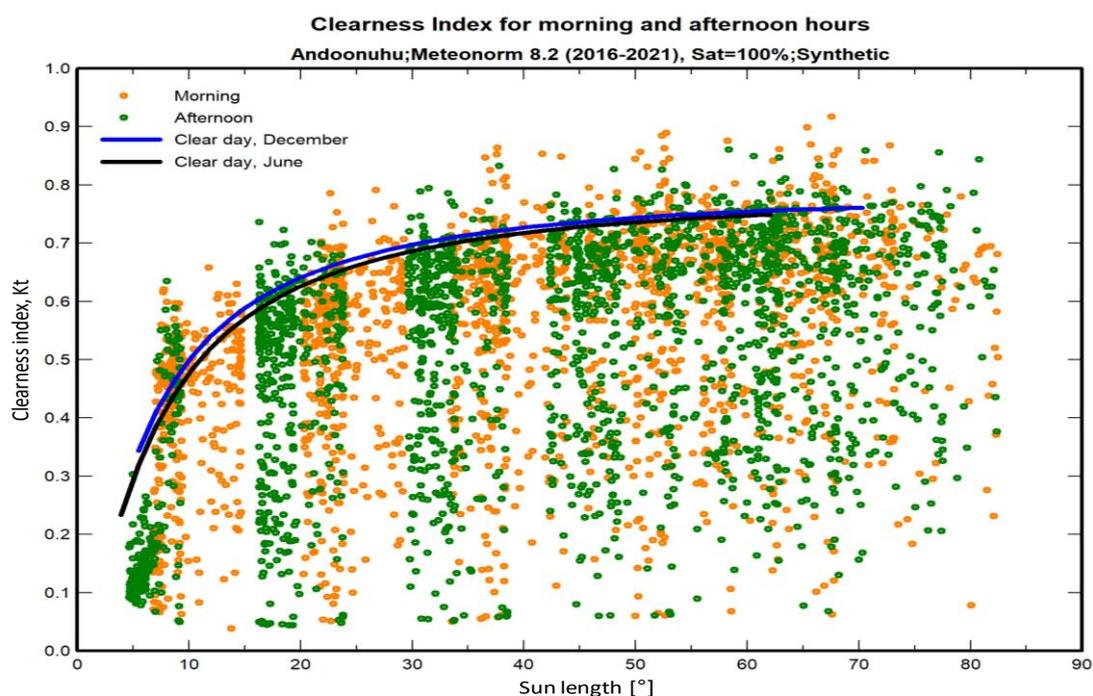
terbit dan terbenam), lalu menurun secara bertahap hingga mencapai titik minimum sekitar $4-5^\circ$ di tengah hari, yang menandakan bahwa matahari berada hampir tegak lurus terhadap permukaan Bumi. Hal ini menggambarkan distribusi energi surya yang kuat di siang hari pada tanggal tersebut.

Sudut insidensi (θ_i) adalah sudut antara sinar matahari dengan garis normal mengoptimalkan penerimaan radiasi tahunan, khususnya pada musim-musim ketika posisi matahari condong ke utara. Namun, pada hari ekuinoks atau sekitar ekuinos 23 Maret, kemiringan 15° menyebabkan peningkatan sudut insidensi di sekitar tengah hari, dibandingkan jika kemiringan disesuaikan dengan lintang lokasi. Karenanya, θ_i tidak mencapai nol, meskipun terjadi penurunan tajam mendekati waktu tengah hari (sekitar pukul 12.00 waktu lokal). Kondisi ini menunjukkan bahwa panel tetap menerima radiasi yang cukup besar, namun tidak maksimal pada waktu-waktu tertentu akibat deviasi sudut antara θ_i terhadap θ_z . Meskipun demikian, tren θ_i relatif rendah selama rentang waktu yang cukup panjang (antara pukul 09.00–15.00), yang mengindikasikan efisiensi konversi energi selama sebagian besar pada rentang waktu tersebut.

Sudut jam matahari (ω) menunjukkan pergeseran waktu matahari dari tengah hari sejati, dengan nilai -90° pada pukul 06.00 dan $+90^\circ$ pada pukul 18.00. Variasi ω berperan dalam menentukan posisi relatif matahari terhadap permukaan panel sepanjang hari. Saat ω bernilai nol (tengah hari sejati), θ_z dan θ_i sama-sama mendekati nilai minimum, yang merupakan waktu optimal untuk penyerapan energi surya.

Penerapan kemiringan panel (β) 15° memberikan keuntungan pada saat lintasan matahari condong ke utara, misalnya selama bulan April hingga September. Namun, pada saat ekuinoks, hal ini menyebabkan sedikit deviasi dari orientasi optimal. Walaupun demikian, sistem panel tetap berkinerja baik karena kondisi radiasi di wilayah ekuator seperti Andoonuhu relatif merata.

Secara umum, data ini menunjukkan bahwa pada tanggal 23 Maret, meskipun kemiringan panel 15° menyebabkan sedikit peningkatan sudut insidensi dibandingkan dengan kemiringan optimal lintang, sistem PV tetap bekerja secara efisien berkat posisi matahari yang tinggi dan lintasan harian yang hampir simetris. Hal ini berguna menjadi pertimbangan desain sistem PV tetap (fixed-tilt) serta sebagai dasar evaluasi bila ingin mengadopsi sistem pelacak (*solar tracking*) untuk lebih memaksimalkan potensi energi sepanjang tahun khususnya di area ini.



Gambar 6. Data indeks kecerahan cuaca rata-rata berdasarkan tinggi matahari (sumber: Penulis, disintesis dari data PV syst.8.0)

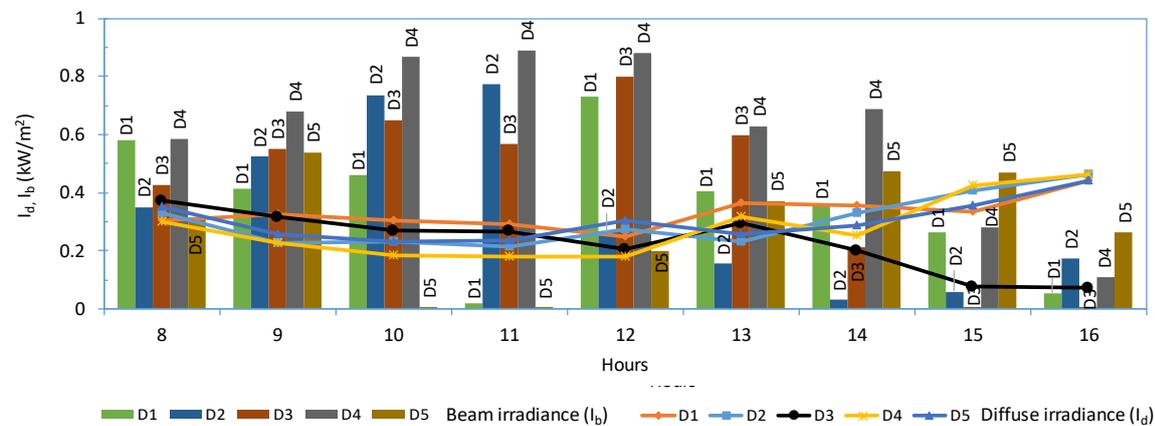
Gambar 6 menunjukkan hubungan antara indeks kejernihan (K_t) dan sudut matahari di Andoonuhu berdasarkan data Meteonorm 8.2 (2016–2021). Titik oranye menandakan data pagi hari dan hijau untuk sore hari, sedangkan garis biru (Desember) dan hitam (Juni) merupakan model hari cerah (*clear day*) bulanan. Terlihat bahwa K_t cenderung meningkat dengan naiknya sudut matahari, mencerminkan berkurangnya redaman atmosfer saat matahari hampir tegak lurus [16]. Pada sudut rendah (matahari baru terbit atau terbenam), nilai K_t relatif rendah karena lintasan sinar lebih panjang melalui atmosfer; sebaliknya pada sudut tinggi nilai K_t mencapai sekitar 0,7–0,8 pada hari cerah. Sebaran titik-titik pagi dan sore menunjukkan pola yang tidak simetris: radiasi pagi dan sore dapat

berbeda karena kondisi atmosfer lokal yang berubah-ubah, sesuai pengamatan bahwa pola irradiansi pagi dan sore tidak selalu sama [17].

Indeks kejernihan cuaca (K_t) merupakan ukuran kejernihan langit yang berbanding lurus dengan fraksi radiasi matahari yang sampai ke permukaan. Nilai K_t mendekati satu mengindikasikan langit sangat cerah (irradiasi maksimum), sedangkan K_t mendekati nol mengindikasikan kondisi mendung/terhalang awan. Saat langit benar-benar tertutup awan tebal, $K_t \approx 0$. Sebaliknya, saat langit sangat cerah (irradiasi penuh), K_t idealnya mendekati 1 [18]. Dengan demikian, K_t tinggi pada foto hari cerah berarti lebih banyak energi matahari yang mencapai panel surya, sehingga potensi produksi energi meningkat secara signifikan. Sebaliknya, K_t rendah (banyak awan) mengindikasikan dominasi radiasi difusi, yang mana menurunkan intensitas radiasi langsung dan output panel surya.

Secara praktis, perilaku K_t tersebut berdampak pada kinerja dan efisiensi panel surya. Pada hari cerah (K_t tinggi) radiasi langsung dominan, sehingga orientasi panel sangat krusial agar permukaan panel sejajar dengan arah matahari untuk memaksimalkan penyerapan sinar. Sebaliknya, pada hari berawan (K_t rendah) radiasi difusi lebih merata ke segala arah, sehingga efek orientasi panel menjadi kurang sensitif. Studi sebelumnya menyimpulkan bahwa orientasi optimal panel PV umumnya menghadap ekuator (tenggara di belahan bumi selatan) dengan sudut kemiringan mendekati lintang lokasi [17]. Misalnya, Yang dan Lu dalam [17] menunjukkan bahwa di Hong Kong (lintang $\sim 23^\circ N$), sudut kemiringan optimal sekitar 20° (sedikit lebih rendah dari lintang) menghasilkan keluaran energi maksimum. Analisis global juga menunjukkan korelasi kuat antara sudut kemiringan optimal dan lintang lokal.

Lokasi Andoonuhu dengan lintang $\sim 4^\circ LS$, kemiringan panel dapat relatif kecil (mendekati horizontal), dengan penyesuaian musiman bila diperlukan untuk mengakomodasi perbedaan posisi matahari bulan Desember versus Juni.



Gambar 7. Data radiasi matahari terukur pada lokasi studi pada bulan Maret 2024

Gambar 7 merupakan grafik kombinasi batang dan garis untuk lima hari pengukuran (D1–D5) radiasi sorot harian (irradiance langsung) serta radiasi difusi. Sumbu horizontal menunjukkan waktu pada jam sehari dari pukul 08.00 sampai 16.00, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan irradiansi matahari (kW/m^2). Grafik batang berwarna menunjukkan komponen radiasi sorot (beam irradiance) pada masing-masing hari D1–D5, sedangkan kurva berwarna (dengan penanda berbeda untuk D1–D5) menunjukkan profil radiasi difusi harian. Radiasi sorot (direct normal irradiance, DNI) adalah komponen radiasi matahari yang langsung dari Matahari dan dipengaruhi oleh penghalangan atmosfer serta keadaan cuaca. Sebaliknya, radiasi difusi (diffuse horizontal irradiance, DHI) adalah komponen yang datang dari pemantulan dan hamburan oleh atmosfer [16], [19].

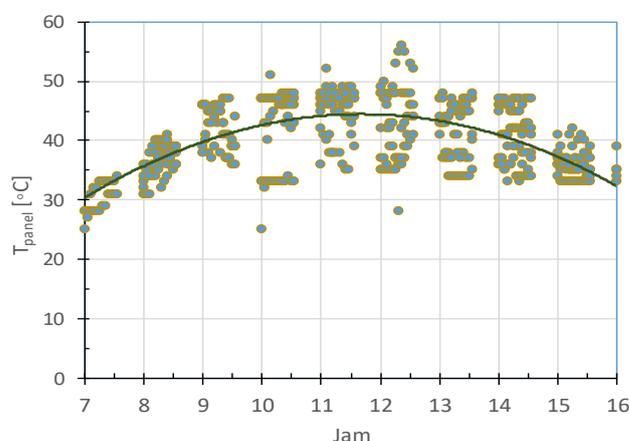
Gambar 7 menunjukkan puncak irradiansi sekitar tengah hari (sekitar pukul 11–13) pada setiap hari pengamatan. Misalnya, pada hari D2 dan D4 terlihat bar tertinggi di sekitar jam 12, mencerminkan keadaan cuaca cerah yang memungkinkan sebagian besar sinar Matahari langsung mencapai permukaan. Sebaliknya, beberapa hari seperti D5 menunjukkan nilai irradiansi lebih rendah di siang hari, menandakan adanya awan atau kondisi atmosferik yang menghambat sinar langsung. Secara umum, pola ini sesuai dengan fenomena fisik bahwa *irradiansi langsung* maksimal ketika sudut matahari mendekati tegak lurus terhadap panel (zenith), dan turun ketika sinar melintas lebih banyak melalui atmosfer pada pagi/siang/. Fluktuasi antar-hari juga mencerminkan variabilitas cuaca harian: hari yang lebih berawan akan menghasilkan nilai radiasi sorot lebih rendah (bar pendek), sedangkan hari yang cerah menghasilkan bar yang tinggi.

Sebaliknya, tren harian radiasi difusi pada **Gambar 7** (garis-garis berwarna) relatif lebih halus dan kurang bervariasi pada siang hari, tetapi cenderung sedikit naik pada pagi dan sore. Hal ini mengindikasikan bahwa komponen *difusi* yang disebabkan oleh hamburan cahaya langit relatif lebih besar kontribusinya saat Matahari rendah di ufuk atau ketika langit berawan. Secara umum, radiasi difusi pada hari yang sama sedikit menurun di sekitar tengah hari (karena jalur sinar yang lebih pendek) dan meningkat di ujung pagi/sore (jalur lebih panjang dan hamburan lebih banyak). Pola ini konsisten dengan karakteristik DHI yang sekitar 10–20% dari GHI pada kondisi cerah, namun dalam

grafik ini terlihat proporsi difusi yang tinggi, menandakan adanya kondisi atmosferik berkabut, atau awan tipis) yang meningkatkan hamburan. Meskipun intensitas absolutnya lebih rendah dibandingkan radiasi sorot, radiasi ini tetap penting karena datang dari semua arah langit dan cenderung memberikan suplai energi yang lebih merata meski intensitasnya lebih rendah.

Perbandingan antara komponen langsung (beam) dan difusi sangat berpengaruh pada kinerja PV-panel. Grafik menunjukkan nilai radiasi sorot yang umumnya lebih tinggi (peak mendekati 0.8–0.9 kW/m² pada hari cerah) dibanding difusi (sekitar 0.4–0.6 kW/m²), terutama pada jam puncak. Sebagaimana diketahui, keluaran daya PV-panel secara langsung bergantung pada besaran sinar matahari yang jatuh pada permukaan panel, sehingga energi yang dihasilkan lebih besar ketika irradiansi global ($GHI = DNI \cdot \cos(z) + DHI$) tinggi. Radiasi sorot menyediakan mayoritas energi pada saat puncak hari, sehingga hari-hari cerah menghasilkan output energi yang tinggi namun sangat bergantung pada orientasi panel. Sebaliknya, radiasi difusi yang lebih luas penjurua langit memperkecil kebergantungan terhadap sudut pemantulan panel, sehingga panel dapat memanen energi meski sinar tidak tepat tegak lurus terhadap permukaan panel. Namun, karena intensitas difusi lebih rendah, hari berawan (proporsi difusi besar) maka menghasilkan produksi energi harian yang lebih rendah daripada hari cerah, meski outputnya lebih merata sepanjang hari.

Implikasi pada desain sistem PV mencakup penentuan sudut kemiringan (tilt) dan penggunaan pelacakan matahari (tracking). Sesuai literatur, sudut optimal panel ditentukan berdasarkan kombinasi radiasi langsung dan difusi. Pada lokasi lintang rendah seperti di sekitar Andoonuhu ($\pm 4^\circ LS$), idealnya panel dipasang hampir mendatar agar menangkap maksimal radiasi global rata-rata tahunan. Kondisi radiasi yang diukur menunjukkan bahwa komponen difusi tidak bisa diabaikan, sehingga kemiringan panel moderat atau bahkan datar dapat berguna untuk menangkap difusi langit saat intensitas radiasi sorot menurun.



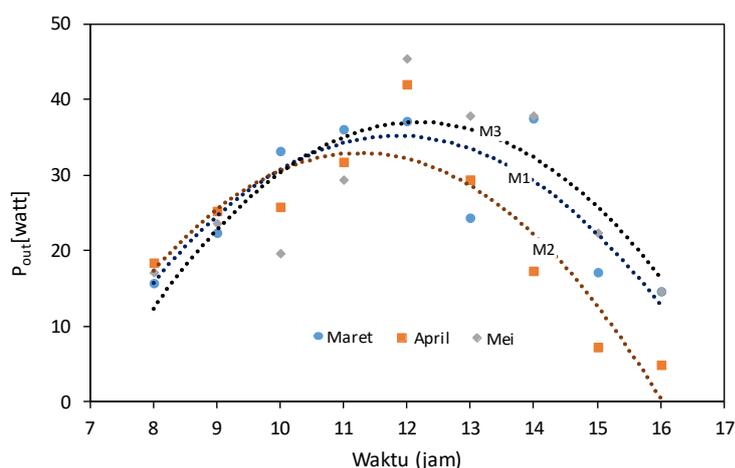
Gambar 8. Distribusi temperature PV-panel sepanjang hari pengambilan data (Maret - Mei)

Posisi pergerakan matahari yang mempengaruhi perbedaan sudut radiasi tiba pada PV-panel yang dijelaskan di atas mempengaruhi profil temperatur permukaan panel. **Gambar 8** menunjukkan bahwa peak atau puncak kenaikan PV-panel terjadi pada periode dimana intensitas radiasi matahari menjadi maksimum. Posisi ini terjadi ketika sudut zenith matahari menjadi relatif kecil atau terjadi pada rentang waktu sekitar pukul 11 – 13. Kenaikan temperatur PV-panel memiliki korelasi dengan berkurangnya kinerja konversi PV-panel [14].

B. Pembangkitan energi listrik

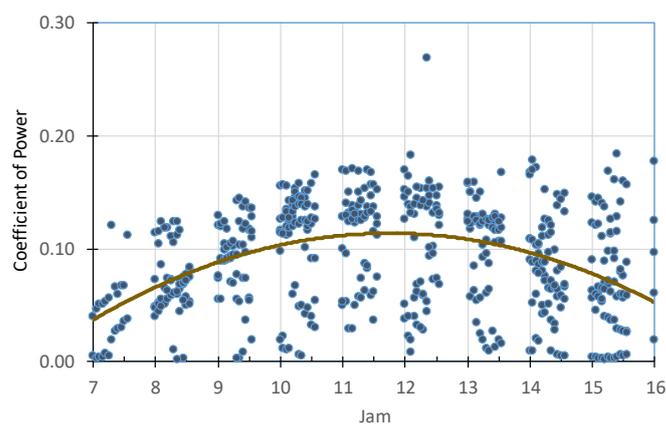
Daya listrik rata-rata yang dibangkitkan oleh model panel surya ditunjukkan pada **Gambar 9**. Jika diasumsikan bahwa puncak pembangkitan daya listrik pada pukul 12.00, maka daya rata-rata sesaat maksimum dicapai pada bulan Mei dan terendah pada bulan Maret. Namun demikian, periode puncak pemanenan daya listrik berlangsung pada jam 11 – 14.00, yang mana intensitas radiasi matahari dalam kondisi maksimum. Hal ini diakibatkan karena radiasi sorot mencapai angka maksimum, atau posisi zenith mendekati tegak lurus. Data kecenderungan prestasi pembangkitan daya yang ditunjukkan pada **Gambar 9** mengindikasikan bahwa pemanenan daya listrik rata-rata pada periode puncak terendah dicapai pada bulan April akibat indeks kecerahan cuaca yang rendah atau waktu penyinaran matahari yang rendah terutama pada periode puncak harian.

Parameter utama pembangkitan daya listrik oleh panel surya adalah intensitas radiasi matahari yang berkorelasi dengan tingkat kecerahan cuaca. Selain itu, kemampuan konversi PV-panel juga dapat dipengaruhi oleh temperatur permukaan panel sehingga kuantitas pemanenan daya listrik tidak sepenuhnya terjadi pada pukul 12.00.



Gambar 9. Daya listrik rata-rata yang dihasilkan oleh PV-panel pada bulan Maret (M1), April (M2), dan Mei (M3) 2024

Profil distribusi kinerja konversi listrik PV-panel selama periode pengujian (Maret – April 2024) ditunjukkan pada **Gambar 10**. Efisiensi konversi listrik dari *input energy* matahari terjadi pada puncak intensitas radiasi ketika sudah tiba radiasi matahari mendekati posisi zenith. Hal ini juga mengkonfirmasi bahwa pemilihan sudut orientasi panel 15° masih cukup andal dari aspek optimalisasi penyerapan energi surya. Kinerja sesaat PV-panel (setiap 5 menit) menunjukkan kinerja yang cukup baik pada sore hari (>jam 3) dibandingkan dengan kondisi pada pagi hari (< jam 10).



Gambar 10. Distribusi kinerja konversi daya listrik PVpanel sepanjang hari pengambilan data (Maret - Mei)

Kesimpulan

Hasil studi ini menunjukkan bahwa potensi energi surya di wilayah Andoonuhu, Kota Kendari, Sulawesi Tenggara sangat menjanjikan untuk dimanfaatkan sebagai sumber pembangkitan listrik berbasis fotovoltaik (PV). Berdasarkan pengukuran dan pemodelan data selama Maret hingga Mei 2024, diperoleh karakteristik radiasi matahari dengan intensitas energi harian rata-rata berkisar antara 4,5 hingga 6,4 kWh/m²/hari, dengan durasi penyinaran efektif antara 8 hingga 10 jam per hari. Nilai ini mencerminkan prediksi ketersediaan sumber energi surya yang relatif stabil sepanjang tahun, khususnya selama musim kemarau (Juni–Oktober).

Analisis posisi matahari dan sudut insidensi menunjukkan bahwa pada tanggal ekuinoks (23 Maret), posisi zenit mendekati 90° , yang berarti matahari hampir berada tepat di atas kepala. Dalam kondisi ini, penggunaan panel dengan kemiringan 15° menghadap utara masih menunjukkan performa baik, walaupun tidak optimal secara geometri terhadap sudut datang sinar matahari. Namun, efisiensi sistem tetap tinggi karena deviasi sudut insidensi berada dalam rentang toleransi. Hal ini mendukung penggunaan desain sistem tetap (fixed-tilt) dengan kemiringan moderat untuk aplikasi skala kecil hingga menengah di kawasan ekuator.

Pola radiasi sorot (beam) dan difusi (diffuse) harian memperlihatkan bahwa puncak radiasi sorot terjadi pada pukul 11.00–13.00 waktu lokal, dengan nilai hingga 0,9 kW/m². Sedangkan radiasi difusi menunjukkan kontribusi yang lebih dominan pada pagi dan sore hari, serta pada hari-hari berawan. Rasio radiasi difusi terhadap total radiasi global pada beberapa hari menunjukkan pengaruh indeks kejernihan (clearness index, Kt) yang fluktuatif, dengan nilai tertinggi pada sudut matahari antara 60° – 80° , mengindikasikan kondisi langit cerah.

Pengujian performa panel surya tipe SP-50-P36 selama periode studi menghasilkan daya keluaran tertinggi pada bulan Mei, dan terendah pada bulan April, yang secara korelatif berkaitan dengan indeks kejernihan dan lamanya penyinaran pada masing-masing bulan. Temperatur permukaan panel yang mencapai rata-rata 49,25°C selama siang hari mengindikasikan adanya penurunan efisiensi termal sebesar 5–7% dari kondisi standar (25°), namun masih dalam ambang spesifikasi teknis panel.

Secara keseluruhan, studi ini menguatkan bahwa pengembangan sistem PLTS di wilayah Kendari layak untuk diperhitungkan, baik untuk sistem *on-grid* maupun *off-grid*. Dengan memahami karakteristik radiasi lokal, distribusi sudut matahari, serta dinamika indeks kecerahan cuaca, perancangan sistem PV dapat dioptimalkan untuk mencapai efisiensi optimal dan produksi energi yang konsisten. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas cakupan spasial dan temporal data, serta menguji performa sistem skala besar pada konfigurasi pelacakan (tracking) dan penyimpanan energi (*battery storage*) guna mendukung transisi energi berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] Solargis, "Solar Resource and Photovoltaic Power Potential of Indonesia," 2017.
- [2] IESR, "Peta jalan mempercepat pensiun pltu batubara pada 2045 (Roadmap to Accelerate the Retirement of Coal-Fired Power Plants at 2045)." Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://iesr.or.id/peta-jalan-mempercepat-pensiun-pltu-batubara-pada-2045/>
- [3] ESDM, *Handbook Of Energy & Economic Statistics Of Indonesia 2023*. 2023.
- [4] D. R. Armanda, "PEMANFAATAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) PADA SISTEM KELISTRIKAN SULAWESI UTARA DAN GORONTALO," *Inst. Teknol. PLN, Jakarta, Indones.*, no. April, 2021.
- [5] B. Indonesian Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics), "Dinamika Atmosfer." Accessed: Jan. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.bmkg.go.id/iklim/dinamika-atmosfer>
- [6] K. E. RI, *Sultra Raih Penghargaan Dewan Energi Nasional*. 2025.
- [7] F. D. Putra, H. Radhiati, L. O. A. Barata, and L. K. Mangalla, "Studi Karakteristik PV Panel sebagai Pemanenan Energi Listrik: Efek Solar Tracking," *Enthalpy J. Ilm. Mhs. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2025, doi: <http://dx.doi.org/10.55679/enthalpy.v9i4.1>.
- [8] GUBERNUR SULAWESI TENGGARA (South East Sulawesi Governor), *RENCANA UMUM ENERGI DAERAH PROVINSI SULAWESI TENGGARA (Regional Energy General Plan)*. South East Sulawesi, 2021.
- [9] L. A. Ningtyas, "Empat Kabupaten di Sultra Terima Bantuan PLTS." Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.rri.co.id/daerah/1341460/empat-kabupaten-di-sultra-terima-bantuan-plts>
- [10] D. G. Erbs, S. A. Klein, and J. A. Duffie, "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation," *Sol. Energy*, vol. 28, no. 4, pp. 293–302, 1982, doi: 10.1016/0038-092X(82)90302-4.
- [11] L. C. Nethwadi and H. Winkler, "Calculation of direct and diffuse solar irradiance components using a Slob Algorithm model in Gauteng conditions," no. December 2018, 2019.
- [12] N. Power, "Reports." Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [13] www.weatherspark.com, "Average Daily Incident Shortwave Solar Energy in Kendari." Accessed: Jan. 25, 2025. [Online]. Available: <https://weatherspark.com/y/137856/Average-Weather-in-Kendari-Indonesia-Year-Round>
- [14] M. Aljuwaysir Salah Fahad, K. Osman, U. Abidin, M. S. Ahmad, E. M. H. Ismaeil, and M. U. Farooq, "Review of Cooling Techniques for Improving Solar Photovoltaic Panel Efficiency," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 125, no. 1, pp. 193–219, 2025, doi: 10.37934/arfmts.125.1.193219.
- [15] M. M. Abdel-Aziz and A. A. ElBahloul, "Innovations in improving photovoltaic efficiency: A review of performance enhancement techniques," *Energy Convers. Manag.*, vol. 327, no. March, p. 119589, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.enconman.2025.119589.
- [16] Muhammad Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. Toronto: Academic Press, 1983. doi: 10.1016/b978-0-12-373750-2.x5001-0.
- [17] M. H. Naraghi and E. Atefi, "Optimum Solar Panel Orientation and Performance: A Climatic Data-Driven Metaheuristic Approach," *Energies*, vol. 15, no. 2, 2022, doi: 10.3390/en15020624.
- [18] J. Ramos and J. A. Valladares, "University of XXX-solar radiation clearness and variability index," *ASEE Annu. Conf. Expo. Conf. Proc.*, 2014.
- [19] S. Himran, *Energi Surya: Konversi Termal dan Fotovoltaik (Solar Energi: Thermal Conversion and Photovoltaic)*. ANDI, Yogyakarta, 2021.

Ucapan penghargaan

Artikel ini merupakan bagian dari kegiatan penelitian mandiri studi karakteristik energi surya untuk pemanasan energi listrik. Terimakasih kepada Asrul dan Hafiluddin atas bantuannya dalam pengumpulan data lapangan.

Pernyataan Penulis

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam publikasi artikel ini. Semua penulis menyetujui penerbitan artikel ini.

Lampiran

"Tidak tersedia"