

Desain dan Implementasi Sistem Pembangkit Listrik Hybrid (Surya dan Angin) untuk Kebutuhan Energi di Daerah Perdesaan

Nurwahid Ramadhan¹ Yogi Ananda Suparaja² M.Syehan Al Fahri³
Program Studi Teknik Elektro Universitas Al- Azhar Medan, Indonesia

nurwahidramadhan4@gmail.com¹

Kata Kunci:

Energi Terbarukan,
Sistem Hybrid, Panel
Surya, Turbin Angin,
Energi Listrik
Perdesaan

Abstrak

Ketersediaan energi listrik di wilayah perdesaan masih menghadapi berbagai kendala, terutama karena terbatasnya jangkauan jaringan listrik konvensional. Permasalahan tersebut menyebabkan kebutuhan akan sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan semakin meningkat. Penelitian ini bertujuan untuk merancang serta mengevaluasi sistem pembangkit listrik hybrid yang memanfaatkan kombinasi energi surya dan energi angin guna memenuhi kebutuhan listrik masyarakat di daerah perdesaan. Metode yang digunakan dalam penelitian meliputi analisis konsumsi energi listrik harian, pengkajian potensi energi surya dan angin, serta perancangan komponen utama sistem seperti panel surya, turbin angin, baterai, dan inverter. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total kebutuhan energi listrik mencapai 239,86 kWh per hari dan meningkat menjadi 311,82 kWh per hari setelah memperhitungkan rugi-rugi daya pada sistem. Sistem panel surya yang dirancang memiliki kapasitas sebesar 73,89 kW dengan penggunaan 150 unit modul surya, sedangkan sistem turbin angin terdiri dari 30 unit turbin dengan kapasitas masing-masing sebesar 100 Watt. Selain itu, sistem penyimpanan energi menggunakan 192 unit baterai berkapasitas 12 V 200 Ah serta inverter dengan kapasitas minimum sebesar 15 kVA. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, sistem pembangkit listrik hybrid yang dirancang mampu menyediakan suplai energi listrik secara optimal dan memiliki potensi yang baik untuk diterapkan pada wilayah perdesaan. Penggabungan energi surya dan angin juga dinilai dapat meningkatkan stabilitas sistem serta mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara berkelanjutan di Indonesia.

Key Word:

Renewable Energy,
Hybrid Systems, Solar
Panels, Wind Turbines,
Rural Electricity

Abstract

The availability of electricity in rural areas still faces various challenges, primarily due to the limited reach of conventional power grids. These issues have led to a growing need for sustainable and environmentally friendly alternative energy sources. This study aims to design and evaluate a hybrid power generation system that utilizes a combination of solar and wind energy to meet the electricity needs of rural communities. The methods used in this study include an analysis of daily electricity consumption, an assessment of solar and wind energy potential, and the design of the system's main components, such as solar panels, wind turbines, batteries, and inverters. Calculations show that the total electricity demand reaches 239.86 kWh per day and increases to 311.82 kWh per day after accounting for power losses in the system. The designed solar panel system has a capacity of 73.89 kW using 150 solar modules, while the wind turbine system consists of 30 turbines, each with a capacity of 100 watts. Additionally, the energy storage system uses 192 batteries with a capacity of 12 V 200 Ah and an inverter with a minimum capacity of 15 kVA. Based on the results of the analysis conducted, the designed hybrid power generation system is capable of providing an optimal supply of electrical energy and has good potential for application in rural areas. The combination of solar and wind energy is also considered to improve system stability and support the sustainable use of renewable energy in Indonesia.

Information Production:

© 2026 by the authors of this article. This work is licensed under an Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA)



PENDAHULUAN

Permintaan terhadap energi listrik mengalami peningkatan yang signifikan sebagai dampak dari pertumbuhan jumlah penduduk, kemajuan teknologi, serta meningkatnya aktivitas ekonomi masyarakat. Di sisi lain, ketersediaan listrik belum terdistribusi secara merata, khususnya di wilayah perdesaan dan daerah terpencil yang masih menghadapi keterbatasan infrastruktur serta kondisi geografis yang sulit dijangkau. Selain itu, penggunaan energi berbasis fosil secara terus-menerus juga menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti peningkatan emisi karbon dan perubahan iklim global. Oleh karena itu, diperlukan alternatif sumber energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan guna mengatasi permasalahan tersebut (IEA, 2024; Boyle, 2023).

Pemanfaatan energi terbarukan menjadi salah satu langkah strategis dalam menjawab tantangan krisis energi dan isu lingkungan. Energi surya dan angin termasuk jenis energi yang paling potensial untuk dikembangkan karena ketersediaannya yang melimpah serta teknologi konversinya yang semakin maju. Selain mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, penggunaan energi terbarukan juga berperan penting dalam menekan emisi gas rumah kaca serta meningkatkan kemandirian energi di tingkat lokal (Twidell & Weir, 2023; Hassan et al., 2023).

Pengembangan sistem pembangkit listrik hybrid merupakan salah satu inovasi yang banyak dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem energi terbarukan. Sistem ini mengombinasikan dua atau lebih sumber energi, seperti tenaga surya dan angin, sehingga mampu saling melengkapi dalam kondisi tertentu. Ketika intensitas matahari menurun, energi angin dapat menjadi sumber alternatif, begitu pula sebaliknya. Dengan demikian, sistem hybrid dapat memberikan suplai energi yang lebih stabil dibandingkan dengan penggunaan satu sumber energi saja (Kassem et al., 2024; Sadeghi et al., 2024).

Indonesia memiliki peluang besar dalam pengembangan sistem pembangkit listrik berbasis energi terbarukan, khususnya kombinasi energi surya dan angin. Hal ini didukung oleh letak geografis Indonesia yang berada di wilayah tropis dengan paparan sinar matahari yang tinggi sepanjang tahun. Selain itu, beberapa daerah juga memiliki potensi energi angin yang cukup memadai untuk dikembangkan. Kondisi tersebut menjadikan sistem hybrid sebagai solusi yang relevan dalam mendukung pemerataan akses listrik serta meningkatkan rasio elektrifikasi di wilayah perdesaan (Kementerian ESDM, 2023; Ardhyantoro & Husnayain, 2024).

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem pembangkit listrik hybrid memiliki keunggulan dari segi efisiensi maupun aspek ekonomi dalam jangka panjang. Hasil kajian yang dilakukan oleh Nguyen et al. (2025) menunjukkan bahwa kombinasi energi surya dan angin dapat mengoptimalkan kinerja sistem sekaligus menekan biaya operasional. Selain itu, sistem ini juga terbukti efektif dalam memenuhi kebutuhan energi listrik pada skala kecil hingga menengah, terutama di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik utama (Nguyen et al., 2025; Rehman & Al-Hadhrani, 2023).

Dalam penerapannya, sistem pembangkit listrik hybrid terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain panel surya sebagai penghasil energi listrik dari sinar matahari, turbin angin sebagai konverter energi angin, baterai sebagai media penyimpanan energi, inverter sebagai pengubah arus, serta sistem kontrol yang berfungsi untuk mengatur kinerja keseluruhan sistem. Perkembangan teknologi juga memungkinkan integrasi sistem monitoring dan kontrol berbasis digital, seperti penggunaan mikrokontroler atau Internet of Things (IoT), sehingga pengelolaan energi dapat dilakukan secara lebih efisien dan real-time (Patel, 2023; IIETA, 2024).

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, implementasi sistem hybrid tidak terlepas dari sejumlah kendala. Beberapa tantangan yang sering dihadapi antara lain tingginya biaya investasi awal, ketidakstabilan sumber energi akibat faktor cuaca, serta kompleksitas dalam perancangan dan pengoperasian sistem. Oleh sebab itu, diperlukan perencanaan yang matang serta desain sistem yang optimal agar dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan energi masyarakat setempat (Liga et al., 2025; Adam et al., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang serta mengimplementasikan sistem pembangkit listrik hybrid berbasis energi surya dan angin sebagai solusi alternatif dalam memenuhi kebutuhan energi listrik di daerah perdesaan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi energi terbarukan serta mendukung upaya peningkatan akses energi listrik yang berkelanjutan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Panel surya atau *Photovoltaic (PV)* merupakan perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui proses efek fotovoltaiik. Panel surya tersusun dari sejumlah sel surya yang dirangkai secara seri maupun paralel dalam satu modul. Berdasarkan jenis materialnya, modul surya umumnya terdiri dari tipe *monocrystalline* dan *polycrystalline*, yang masing-masing memiliki karakteristik efisiensi dan biaya yang berbeda (Patel, 2023).

Dalam perancangan sistem pembangkit listrik tenaga surya, salah satu parameter utama yang harus diperhatikan adalah besarnya energi radiasi matahari yang diterima oleh permukaan panel. Besaran ini dinyatakan dalam *Peak Sun Hours (PSH)*, yaitu lamanya waktu penyinaran matahari efektif dalam satu hari. Nilai PSH dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$PSH = \frac{\text{Insolation (Wh/m}^2\text{)}}{\text{Irradiation (W/m}^2\text{)}}$$

Nilai PSH digunakan untuk menentukan jumlah energi listrik yang mampu dihasilkan oleh sistem

panel surya. Untuk mengetahui total energi listrik harian yang dibutuhkan, terlebih dahulu dihitung beban energi listrik (E_{load}). Selanjutnya, energi yang harus dihasilkan oleh panel surya dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$E_{PV} = 1.3 \times E_{load}$$

Faktor pengali sebesar 1,3 digunakan sebagai faktor koreksi untuk mengantisipasi kehilangan energi yang terjadi dalam sistem, seperti kerugian pada inverter, baterai, dan kabel.

Setelah energi yang dibutuhkan diketahui, langkah berikutnya adalah menentukan kapasitas sistem panel surya. Kapasitas sistem PV dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{PV} = \frac{E_{PV}}{PSH}$$

Selanjutnya, jumlah modul panel surya yang diperlukan dalam sistem dapat ditentukan dengan membandingkan kapasitas total sistem terhadap kapasitas satu modul panel surya, seperti pada persamaan berikut:

$$N_{modul} = \frac{P_{PV}}{P_{modul}}$$

Dalam menentukan konfigurasi rangkaian panel surya, tegangan sistem juga harus diperhitungkan. Jumlah modul yang disusun secara seri dapat dihitung dengan membagi tegangan sistem dengan tegangan satu modul panel surya:

$$N_{seri} = \frac{V_{sistem}}{V_{modul}}$$

Sementara itu, jumlah rangkaian paralel (string) panel surya dapat ditentukan berdasarkan jumlah total modul yang dibutuhkan dan jumlah modul dalam satu rangkaian seri, dengan persamaan:

$$N_{total} = N_{seri} \times N_{string}$$

Selain itu, dalam sistem panel surya diperlukan charge controller yang berfungsi untuk mengatur proses pengisian baterai agar tidak terjadi kelebihan muatan (overcharge). Kapasitas arus maksimum dari controller dapat ditentukan dengan persamaan:

$$I_{max, controller} = 1.25 \times I_{sc}$$

di mana I_{sc} merupakan arus hubung singkat dari modul panel surya. Faktor pengali 1,25 digunakan sebagai faktor keamanan untuk memastikan sistem bekerja secara optimal.

Dengan perhitungan tersebut, sistem panel surya dapat dirancang secara optimal sesuai dengan kebutuhan energi listrik yang dibutuhkan, sehingga mampu meningkatkan efisiensi serta keandalan sistem pembangkit listrik hybrid.

Turbin angin atau dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan sistem yang berfungsi mengonversi energi kinetik dari angin menjadi energi listrik. Proses konversi energi ini diawali dari pergerakan udara yang memutar baling-baling (rotor), kemudian energi mekanik yang dihasilkan diteruskan ke generator untuk diubah menjadi energi listrik. Komponen utama pada sistem turbin angin meliputi baling-baling, poros, gearbox (jika digunakan), dan generator listrik (Patel, 2023).

Besarnya energi yang dapat dihasilkan oleh turbin angin sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin di lokasi pemasangan. Hal ini dikarenakan setiap wilayah memiliki karakteristik kecepatan angin yang berbeda-beda, sehingga diperlukan analisis data angin sebelum melakukan perancangan sistem. Selain itu, luas area sapuan rotor (swept area) dan massa jenis udara juga menjadi faktor penting dalam menentukan potensi energi angin yang tersedia.

Daya angin yang melewati area sapuan rotor turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

di mana P_w adalah daya angin (watt), ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3), A adalah luas area sapuan rotor (m^2), dan V adalah kecepatan angin (m/s).

Daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin tidak sama dengan daya angin yang tersedia, karena terdapat faktor efisiensi yang dinyatakan dalam koefisien daya (*power coefficient*). Daya mekanik turbin dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_m = C_p \times P_w$$

di mana C_p merupakan koefisien daya turbin yang nilainya dipengaruhi oleh desain dan kondisi operasional turbin angin.

Selanjutnya, energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin akan dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Besarnya daya listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh efisiensi generator yang digunakan.

Hubungan antara daya mekanik dan daya listrik dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P_e = \eta \times P_m$$

di mana P_e adalah daya listrik (watt) dan η merupakan efisiensi generator.

Berdasarkan persamaan tersebut, dapat diketahui bahwa daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin sangat bergantung pada kecepatan angin, luas sapuan rotor, serta efisiensi sistem. Oleh karena itu, pemilihan lokasi pemasangan turbin angin menjadi faktor yang sangat penting dalam meningkatkan kinerja sistem pembangkit listrik tenaga bayu.

Dengan demikian, perancangan sistem turbin angin dalam pembangkit listrik hybrid perlu mempertimbangkan aspek teknis seperti kecepatan angin rata-rata, spesifikasi turbin, serta efisiensi konversi energi agar sistem dapat bekerja secara optimal dan mampu memenuhi kebutuhan energi listrik secara berkelanjutan.

Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) merupakan sistem pembangkit yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi, dalam penelitian ini yaitu energi surya dan energi angin. Integrasi kedua sumber energi tersebut bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem dalam menyediakan energi listrik secara berkelanjutan. Sistem hybrid dirancang agar dapat mengatasi keterbatasan masing-masing sumber energi, sehingga ketika salah satu sumber mengalami penurunan produksi, sumber lainnya dapat tetap menyuplai energi Listrik (Hassan et al., 2023; Boyle, 2023).

Dalam sistem PLTH, panel surya berperan sebagai sumber energi utama pada siang hari ketika intensitas radiasi matahari tinggi. Sementara itu, turbin angin berfungsi sebagai sumber energi tambahan yang dapat beroperasi baik pada siang maupun malam hari, tergantung pada kondisi kecepatan angin. Kombinasi ini memungkinkan sistem menghasilkan energi listrik yang lebih stabil dibandingkan sistem pembangkit tunggal (Kassem et al., 2024; Twidell & Weir, 2023).

Secara umum, konfigurasi sistem PLTH terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu panel surya (*photovoltaic*), turbin angin, baterai sebagai penyimpan energi, *charge controller*, serta inverter. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dan turbin angin akan disalurkan ke sistem penyimpanan (baterai) dalam bentuk arus searah (DC). Selanjutnya, inverter digunakan untuk mengubah energi listrik dari arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) agar dapat digunakan oleh beban listrik. (Patel, 2023; IIETA, 2024).

Dalam perancangan sistem hybrid, diperlukan strategi pengelolaan energi agar distribusi daya dapat berjalan secara optimal. Sistem kontrol berperan dalam mengatur prioritas penggunaan sumber energi, pengisian baterai, serta penyaluran energi ke beban. Pada kondisi tertentu, sistem akan memprioritaskan penggunaan energi dari panel surya, sedangkan turbin angin akan berfungsi sebagai penyeimbang ketika terjadi penurunan intensitas matahari (Sadeghi et al., 2024; Adam et al., 2024).

Keunggulan utama dari sistem PLTH adalah kemampuannya dalam meningkatkan kontinuitas suplai energi listrik. Dengan menggabungkan dua sumber energi yang memiliki karakteristik berbeda, sistem ini mampu mengurangi fluktuasi daya yang sering terjadi pada pembangkit energi terbarukan tunggal. Selain itu, penggunaan sistem hybrid juga dapat menekan penggunaan bahan bakar fosil serta mengurangi emisi gas rumah kaca (Nguyen et al., 2025; Rehman & Al-Hadhrani, 2023).

Meskipun demikian, penerapan sistem PLTH memerlukan perencanaan yang matang, terutama dalam menentukan kapasitas setiap komponen agar sesuai dengan kebutuhan beban listrik. Analisis potensi energi surya dan angin di lokasi penelitian menjadi langkah awal yang penting dalam merancang sistem yang optimal. Selain itu, pemilihan konfigurasi sistem dan teknologi yang digunakan harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan serta kebutuhan pengguna agar sistem dapat bekerja secara efisien dan ekonomis (Ardhyantoro & Husnayain, 2024; Liga et al., 2025).

Dengan demikian, penerapan sistem PLTH hybrid diharapkan dapat menjadi solusi yang efektif dalam menyediakan energi listrik di daerah perdesaan, khususnya pada wilayah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik konvensional. Sistem ini tidak hanya mampu meningkatkan keandalan pasokan energi, tetapi juga mendukung pengembangan energi terbarukan yang berkelanjutan (IEA, 2024).

Baterai merupakan komponen penting dalam sistem pembangkit listrik hybrid yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik. Energi yang dihasilkan oleh panel surya dan turbin angin tidak selalu digunakan secara langsung oleh beban, sehingga diperlukan baterai untuk menyimpan kelebihan energi agar dapat digunakan pada saat sumber energi utama tidak tersedia. Dengan demikian, keberadaan baterai berperan dalam menjaga kontinuitas dan kestabilan suplai energi listrik (Patel, 2023; Twidell & Weir, 2023).

Dalam perancangan sistem baterai, salah satu parameter utama yang harus diperhitungkan adalah kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Kapasitas baterai biasanya dinyatakan dalam satuan Ampere-hour (Ah). Perhitungan kapasitas baterai dapat dilakukan dengan

mempertimbangkan total kebutuhan energi harian, tegangan sistem, serta efisiensi baterai (Sadeghi et al., 2024).

Kapasitas baterai yang dibutuhkan dalam sistem dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_{bat} = \frac{E_{load} \times N_{aut}}{V_{sistem} \times DoD \times \eta}$$

di mana C_{bat} adalah kapasitas baterai (Ah), E_{load} adalah energi beban harian (Wh), N_{aut} adalah jumlah hari otonomi (hari cadangan tanpa sumber energi), V_{sistem} adalah tegangan sistem (V), DoD (Depth of Discharge) adalah kedalaman pengosongan baterai, dan η adalah efisiensi baterai.

Parameter *Depth of Discharge* (DoD) menunjukkan batas maksimum energi yang dapat digunakan dari baterai tanpa merusak umur pakainya. Nilai DoD umumnya berkisar antara 0,5 hingga 0,8 tergantung pada jenis baterai yang digunakan. Semakin besar nilai DoD, maka kapasitas baterai yang dapat dimanfaatkan akan semakin besar, namun hal ini juga dapat mempengaruhi umur baterai (Boyle, 2023; Nguyen et al., 2025).

Setelah kapasitas total baterai diketahui, langkah berikutnya adalah menentukan jumlah unit baterai yang diperlukan dalam sistem. Jumlah baterai dapat dihitung dengan membagi kapasitas total baterai terhadap kapasitas satu unit baterai, seperti pada persamaan berikut:

$$N_{bat} = \frac{C_{total}}{C_{unit}}$$

Selain itu, konfigurasi baterai juga perlu diperhatikan, baik secara seri maupun paralel, agar sesuai dengan tegangan dan kapasitas sistem yang diinginkan. Jumlah baterai yang disusun secara seri dapat dihitung dengan persamaan:

$$N_{seri} = \frac{V_{sistem}}{V_{bat}}$$

Sedangkan jumlah rangkaian paralel baterai dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$N_{paralel} = \frac{C_{total}}{C_{seri}}$$

Dalam implementasinya, baterai juga memerlukan sistem pengaturan pengisian (*charge controller*) untuk mencegah terjadinya kelebihan pengisian (*overcharge*) maupun pengosongan berlebih (*overdischarge*). Sistem ini berfungsi untuk menjaga kinerja baterai agar tetap optimal dan memperpanjang umur pemakaian (IIEETA, 2024; Adam et al., 2024).

Dengan demikian, perancangan sistem baterai yang tepat sangat berpengaruh terhadap keandalan dan efisiensi sistem pembangkit listrik hybrid. Kapasitas baterai yang sesuai akan memastikan ketersediaan energi listrik secara kontinu, terutama pada saat kondisi sumber energi terbarukan tidak mencukupi kebutuhan beban.

Inverter merupakan komponen penting dalam sistem pembangkit listrik hybrid yang berfungsi untuk mengubah arus listrik searah (*Direct Current/DC*) menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current/AC*). Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dan turbin angin umumnya berupa arus DC, sedangkan sebagian besar peralatan listrik rumah tangga menggunakan arus AC. Oleh karena itu, inverter menjadi penghubung utama antara sumber energi dan beban listrik dalam sistem (Patel, 2023; Twidell & Weir, 2023).

Dalam perancangan sistem inverter, salah satu aspek utama yang perlu diperhatikan adalah kapasitas daya inverter yang harus mampu melayani total beban listrik. Daya inverter biasanya dinyatakan dalam satuan Watt (W) atau Volt-Ampere (VA). Untuk menentukan kapasitas inverter, terlebih dahulu dihitung total daya beban yang digunakan dalam sistem (Sadeghi et al., 2024).

Kapasitas inverter dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{inv} = 1,25 \times P_{total\ beban}$$

di mana P_{inv} adalah kapasitas inverter (W), dan $P_{total\ beban}$ adalah total daya beban (W). Faktor pengali 1,25 digunakan sebagai faktor keamanan untuk mengantisipasi lonjakan beban saat peralatan listrik dinyalakan.

Selain daya aktif, dalam sistem AC juga dikenal daya semu (*apparent power*) yang dinyatakan dalam satuan VA. Hubungan antara daya aktif dan daya semu dapat dihitung menggunakan faktor daya (*power factor/cos φ*) sebagai berikut:

$$S = \frac{P}{\cos \phi}$$

di mana S adalah daya semu (VA), P adalah daya aktif (W), dan $\cos \phi$ adalah faktor daya.

Efisiensi inverter juga menjadi parameter penting dalam menentukan kinerja sistem secara

keseluruhan. Efisiensi inverter menunjukkan seberapa besar energi yang berhasil dikonversi dari DC ke AC dibandingkan dengan energi yang masuk. Nilai efisiensi inverter dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

di mana η adalah efisiensi inverter (%), P_{out} adalah daya keluaran (W), dan P_{in} adalah daya masukan (W).

Dalam implementasinya, inverter juga harus disesuaikan dengan tegangan sistem dan jenis beban yang digunakan. Pemilihan inverter dengan spesifikasi yang tepat akan meningkatkan efisiensi sistem serta mengurangi potensi kerugian energi. Selain itu, penggunaan inverter modern yang dilengkapi dengan sistem kontrol cerdas juga memungkinkan pengaturan distribusi energi secara lebih optimal (IETA, 2024; Adam et al., 2024).

Dengan demikian, pemilihan dan perancangan inverter yang tepat sangat berpengaruh terhadap performa sistem pembangkit listrik hybrid. Inverter yang sesuai akan memastikan bahwa energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan secara maksimal oleh beban, serta menjaga kestabilan sistem dalam berbagai kondisi operasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kebutuhan energi listrik dalam penelitian ini dihitung berdasarkan total daya beban yang digunakan pada sistem, yang meliputi peralatan utama seperti mesin pembuat es batu, pompa air, dan sistem penerangan. Penentuan kebutuhan energi ini menjadi langkah awal dalam merancang kapasitas sistem pembangkit listrik hybrid agar mampu memenuhi kebutuhan beban secara optimal dan berkelanjutan (Sadeghi et al., 2024; Patel, 2023).

Berdasarkan hasil identifikasi beban listrik, diperoleh data penggunaan energi harian sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Perhitungan dilakukan dengan mengalikan daya listrik masing-masing peralatan dengan lama waktu operasinya dalam satu hari. Nilai ini digunakan untuk menentukan total konsumsi energi listrik harian sistem (Twidell & Weir, 2023).

Tabel 1. Kebutuhan Energi Listrik

Peralatan Listrik	Daya (Watt)	Waktu Operasi (Jam)	Energi (kWh/hari)
Mesin pembuat es batu	8800	24	211,2
Pompa air 1 HP (80%)	932,5	5	4,66
Penerangan	1000	24	24
Total			239,86 kWh/hari

Berdasarkan Tabel 1, total kebutuhan energi listrik harian sistem adalah sebesar 239,86 kWh/hari. Nilai ini menunjukkan bahwa beban terbesar berasal dari mesin pembuat es batu yang beroperasi secara kontinu selama 24 jam. Hal ini menjadi faktor utama dalam menentukan kapasitas pembangkit listrik yang akan dirancang (Nguyen et al., 2025).

Untuk mengantisipasi kehilangan energi dalam sistem, seperti rugi-rugi pada inverter, baterai, dan kabel, maka dilakukan penyesuaian dengan menggunakan faktor koreksi sebesar 1,3. Dengan demikian, total energi yang harus disuplai oleh sistem pembangkit dapat dihitung sebagai berikut:

$$E_{total} = 1.3 \times 239.86 = 311.82 \text{ kWh/hari}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa energi yang harus disediakan oleh sistem pembangkit listrik hybrid adalah sebesar 311,82 kWh/hari. Nilai ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas masing-masing komponen sistem, seperti panel surya, turbin angin, baterai, dan inverter (Kassem et al., 2024).

Selanjutnya, kebutuhan energi tersebut akan dibagi ke dalam dua sumber energi utama, yaitu panel surya dan turbin angin. Pembagian ini dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem serta mengoptimalkan pemanfaatan sumber energi terbarukan yang tersedia. Dalam penelitian ini, energi utama dipasok oleh panel surya, sedangkan turbin angin berfungsi sebagai sumber energi tambahan (Rehman & Al-Hadhrani, 2023).

Dengan demikian, analisis kebutuhan energi listrik menjadi dasar penting dalam perancangan sistem pembangkit listrik hybrid. Perhitungan yang tepat akan memastikan bahwa sistem mampu memenuhi kebutuhan beban secara kontinu serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem secara keseluruhan (IEA, 2024).

Analisis potensi energi surya dan angin dilakukan untuk mengetahui ketersediaan sumber energi terbarukan di lokasi penelitian. Data yang digunakan meliputi intensitas radiasi matahari (*insolation*) dan kecepatan angin rata-rata tahunan. Kedua parameter ini sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem

pembangkit listrik hybrid yang dirancang (Kassem et al., 2024; Twidell & Weir, 2023).

Berdasarkan data hasil pengukuran dan referensi NASA Surface Meteorology, diperoleh nilai radiasi matahari rata-rata tahunan berkisar antara 4,2 hingga 6,8 kWh/m²/hari. Untuk menjaga kestabilan sistem, dalam penelitian ini digunakan nilai minimum sebesar **4,22 kWh/m²/hari** sebagai dasar perancangan. Pendekatan ini bertujuan agar sistem tetap mampu memenuhi kebutuhan energi listrik meskipun pada kondisi radiasi matahari terendah (IEA, 2024; Patel, 2023).

Nilai *Peak Sun Hours (PSH)* dihitung berdasarkan data radiasi matahari menggunakan persamaan berikut:

$$PSH = \frac{4220}{1000} = 4.22 \text{ jam}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai PSH sebesar **4,22 jam**, yang berarti energi matahari efektif tersedia selama 4,22 jam per hari. Nilai ini digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan kapasitas panel surya yang dibutuhkan (Sadeghi et al., 2024).

Selain energi surya, potensi energi angin juga dianalisis berdasarkan data kecepatan angin rata-rata tahunan. Berdasarkan hasil pengamatan, kecepatan angin berada pada rentang **3,11 m/s hingga 6,2 m/s**. Untuk menjaga konsistensi perancangan, digunakan nilai kecepatan angin terendah sebesar **3,11 m/s** sebagai acuan. Hal ini bertujuan agar sistem tetap dapat beroperasi pada kondisi minimum (Rehman & Al-Hadhrani, 2023).

Tabel 2. Data Insolation dan Kecepatan Angin

Bulan	Insolation (kWh/m ² /hari)	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	4,22	4,12
Februari	4,53	4,25
Maret	5,43	3,11
April	5,52	3,38
Mei	5,50	4,79
Juni	5,27	5,47
Juli	5,73	6,20
Agustus	6,41	6,13
September	6,80	5,12
Oktober	6,40	3,91
November	5,33	3,34
Desember	4,61	3,21

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa intensitas radiasi matahari cenderung lebih stabil sepanjang tahun dibandingkan dengan kecepatan angin yang fluktuatif. Oleh karena itu, dalam penelitian ini panel surya ditetapkan sebagai sumber energi utama, sedangkan turbin angin digunakan sebagai sumber energi pendukung untuk meningkatkan keandalan sistem (Nguyen et al., 2025).

Selanjutnya, dilakukan pembagian kontribusi energi antara panel surya dan turbin angin. Energi listrik utama sebesar 239,86 kWh/hari dipenuhi oleh panel surya, sedangkan energi tambahan sebesar 72 kWh/hari disuplai oleh turbin angin. Dengan demikian, total energi yang dihasilkan sistem hybrid adalah sebesar 311,86 kWh/hari.

Tabel 3. Alokasi Pembebanan Energi

Pembangkit Listrik	Produksi Energi (kWh/hari)
Panel Surya	239,86
Turbin Angin	72
Total (Hybrid)	311,86

Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi energi surya dan angin mampu memenuhi kebutuhan energi listrik secara optimal. Penggunaan dua sumber energi ini juga meningkatkan keandalan sistem, terutama pada kondisi ketika salah satu sumber energi mengalami penurunan produksi (Hassan et al., 2023).

Dengan demikian, analisis potensi energi surya dan angin menjadi dasar dalam menentukan desain sistem pembangkit listrik hybrid. Pemanfaatan data minimum dalam perancangan bertujuan untuk memastikan sistem tetap mampu beroperasi secara optimal dalam berbagai kondisi lingkungan (Adam et al., 2024).

Perancangan sistem panel surya dilakukan berdasarkan kebutuhan energi listrik harian yang telah dihitung sebelumnya, yaitu sebesar 239,86 kWh/hari. Untuk mengantisipasi kerugian energi pada sistem, digunakan faktor koreksi sebesar 1,3 sehingga total energi yang harus dihasilkan oleh panel surya menjadi lebih besar dari kebutuhan beban awal (Sadeghi et al., 2024; Patel, 2023).

Energi listrik yang harus dipenuhi oleh panel surya dapat dihitung sebagai berikut:

$$E_{PV} = 1.3 \times 239.86 = 311.82 \text{ kWh/hari}$$

Dengan menggunakan nilai *Peak Sun Hours (PSH)* sebesar 4,22 jam, maka kapasitas sistem panel surya dapat ditentukan sebagai berikut:

$$P_{PV} = \frac{311.82}{4.22} = 73.89 \text{ kW}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas sistem panel surya yang dibutuhkan adalah sebesar 73,89 kW. Nilai ini menjadi acuan dalam menentukan jumlah modul panel surya yang akan digunakan dalam sistem (Kassem et al., 2024).

Dalam penelitian ini digunakan modul panel surya dengan spesifikasi daya maksimum sebesar 500 Watt per unit. Spesifikasi teknis modul panel surya ditunjukkan pada Tabel 4 berikut:

Tabel 4. Spesifikasi Modul Panel Surya

Parameter	Nilai
Daya maksimum	500 Watt
Tegangan maksimum	48,63 Volt
Arus maksimum	10,28 Ampere
Arus hubung singkat	10,87 Ampere
Tegangan terbuka	59,01 Volt
Efisiensi	19,51 %

Berdasarkan kapasitas sistem yang telah dihitung, jumlah modul panel surya yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$N_{modul} = \frac{73.89 \times 1000}{500} = 148 \text{ modul}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jumlah modul panel surya yang diperlukan adalah sebanyak 148 unit. Nilai ini kemudian disesuaikan dengan konfigurasi sistem untuk mendapatkan tegangan yang sesuai dengan kebutuhan sistem DC (Nguyen et al., 2025).

Tegangan sistem DC yang direncanakan adalah sebesar 144 Volt. Oleh karena itu, jumlah modul yang disusun secara seri dapat dihitung sebagai berikut:

$$N_{seri} = \frac{144}{48.63} \approx 3 \text{ modul}$$

Dengan demikian, setiap rangkaian seri terdiri dari 3 modul panel surya. Selanjutnya, jumlah rangkaian paralel (*string*) dapat dihitung dengan membagi total jumlah modul terhadap jumlah modul seri:

$$N_{string} = \frac{148}{3} \approx 49.3 \approx 50 \text{ string}$$

Dengan demikian, setiap rangkaian seri terdiri dari 3 modul panel surya. Selanjutnya, jumlah rangkaian paralel (*string*) dapat dihitung dengan membagi total jumlah modul terhadap jumlah modul seri:

$$N_{string} = \frac{148}{3} \approx 49.3 \approx 50 \text{ string}$$

Dalam implementasinya, sistem panel surya dibagi ke dalam beberapa grup array untuk menyesuaikan dengan kapasitas *charge controller*. Setiap grup terdiri dari 5 string, sehingga satu grup array memiliki total 15 modul. Dengan demikian, jumlah grup array yang dibutuhkan adalah:

$$N_{grup} = \frac{150}{15} = 10 \text{ grup}$$

Tegangan keluaran sistem panel surya dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_{out} = 3 \times 48.63 = 145.89 \text{ Volt}$$

Sedangkan arus keluaran total sistem panel surya adalah:

$$I_{out} = 10 \times 51.4 = 514 \text{ Ampere}$$

Sehingga daya total yang dihasilkan oleh sistem panel surya adalah:

$$P_{total} = 145.89 \times 514 = 74990 \text{ Watt} \approx 75 \text{ kW}$$

Hasil perancangan menunjukkan bahwa sistem panel surya mampu menghasilkan daya sekitar 75 kW, yang telah memenuhi kebutuhan energi listrik yang direncanakan. Selain itu, konfigurasi sistem yang digunakan juga mampu menjaga kestabilan tegangan dan arus keluaran (Hassan et al., 2023).

Dengan demikian, desain panel surya yang telah dirancang dapat memenuhi kebutuhan energi listrik secara optimal serta mendukung kinerja sistem pembangkit listrik hybrid secara keseluruhan. Penggunaan konfigurasi seri dan paralel yang tepat juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi sistem (IEA, 2024).

Perancangan turbin angin dilakukan untuk melengkapi sistem pembangkit listrik hybrid sebagai

sumber energi tambahan selain panel surya. Pemanfaatan energi angin bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem, terutama pada saat intensitas radiasi matahari rendah atau pada malam hari. Oleh karena itu, turbin angin dirancang berdasarkan kondisi kecepatan angin minimum agar tetap mampu beroperasi secara optimal (Rehman & Al-Hadhrami, 2023; Patel, 2023).

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, kapasitas daya turbin angin yang direncanakan adalah sebesar 3000 Watt. Untuk mempermudah implementasi, digunakan turbin angin dengan kapasitas 100 Watt per unit, sehingga jumlah turbin yang diperlukan dapat dihitung sebagai berikut:

$$N_{WT} = \frac{3000}{100} = 30 \text{ unit}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem membutuhkan 30 unit turbin angin untuk memenuhi kapasitas daya yang direncanakan. Pendekatan ini dipilih agar sistem lebih fleksibel dan mudah dalam proses instalasi serta perawatan (Hassan et al., 2023).

Dalam menentukan karakteristik turbin angin, diperlukan perhitungan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Dengan asumsi efisiensi turbin sebesar 0,9, maka daya mekanik dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_m = \frac{100}{0.9} = 111 \text{ Watt}$$

Selanjutnya, untuk menentukan ukuran turbin, dilakukan perhitungan jari-jari rotor menggunakan persamaan daya angin. Dengan menggunakan koefisien daya (C_p) sebesar 0,48, densitas udara (ρ) sebesar 1,225 kg/m³, dan kecepatan angin minimum sebesar 3,11 m/s, maka jari-jari rotor dapat dihitung sebagai berikut:

$$R = \sqrt{\frac{2P_m}{C_p \rho \pi V^3}} \approx 2 \text{ meter}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, diperoleh jari-jari rotor sebesar 2 meter, sehingga diameter rotor turbin menjadi:

$$D = 2 \times 2 = 4 \text{ meter}$$

Luas sapuan rotor turbin angin yang berfungsi menangkap energi angin dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 12.56 \text{ m}^2$$

Nilai luas sapuan ini menunjukkan area efektif yang digunakan turbin untuk menangkap energi kinetik angin. Semakin besar luas sapuan, maka potensi energi yang dapat dikonversi menjadi energi listrik juga akan semakin besar (Twidell & Weir, 2023).

Selain itu, kecepatan sudut rotor juga menjadi parameter penting dalam desain turbin. Dengan menggunakan rasio kecepatan ujung (*tip speed ratio*/ λ) sebesar 8,1, maka kecepatan sudut rotor dapat dihitung sebagai berikut:

$$\omega = \frac{\lambda V}{R} = \frac{8.1 \times 3.11}{2} = 12.595 \text{ rad/s}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kecepatan sudut rotor berada pada nilai 12,595 rad/s, yang masih berada dalam rentang operasi normal turbin angin skala kecil. Parameter ini sangat penting untuk memastikan efisiensi konversi energi dari angin menjadi energi listrik (Nguyen et al., 2025).

Berdasarkan hasil simulasi, turbin angin mampu menghasilkan daya sebesar 100,1 Watt dengan arus keluaran sekitar 3,87 Ampere pada kecepatan angin 3,11 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa desain turbin telah sesuai dengan kondisi kecepatan angin minimum yang digunakan sebagai acuan perancangan (Adam et al., 2024).

Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap perubahan kecepatan angin untuk mengetahui pengaruhnya terhadap arus keluaran turbin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin secara signifikan akan meningkatkan arus keluaran. Sebagai contoh, pada kecepatan 3,11 m/s diperoleh arus sebesar 116,2 A, sedangkan pada kecepatan 2 m/s arus turun menjadi 48,02 A. Hal ini menunjukkan bahwa performa turbin sangat dipengaruhi oleh kondisi kecepatan angin di lokasi (Kassem et al., 2024).

Dengan demikian, desain turbin angin yang dirancang mampu mendukung sistem pembangkit listrik hybrid dengan baik. Penggunaan beberapa unit turbin kecil memberikan fleksibilitas dalam instalasi serta meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

Perancangan kapasitas baterai dilakukan untuk memastikan ketersediaan energi listrik pada saat

sumber energi utama, seperti panel surya dan turbin angin, tidak mampu memenuhi kebutuhan beban. Baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi yang sangat penting dalam sistem pembangkit listrik hybrid, terutama untuk menjaga kontinuitas suplai energi pada kondisi cuaca yang tidak menentu (Patel, 2023; Twidell & Weir, 2023).

Kapasitas baterai ditentukan berdasarkan kebutuhan energi harian sistem, jumlah hari cadangan (*autonomy days*), efisiensi baterai, serta nilai *Depth of Discharge* (DoD). Dalam penelitian ini, digunakan asumsi hari otonomi selama 1 hari, efisiensi baterai sebesar 85%, dan DoD sebesar 80% untuk menjaga umur baterai tetap optimal (Sadeghi et al., 2024).

Kapasitas baterai yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_{bat} = \frac{311820}{144 \times 0.8 \times 0.85} = 3189.4 \text{ Ah}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas baterai yang diperlukan adalah sebesar 3189,4 Ah pada tegangan sistem 144 Volt. Nilai ini merupakan kapasitas total yang harus disediakan agar sistem dapat beroperasi selama satu hari tanpa suplai energi dari sumber utama (Nguyen et al., 2025).

Dalam penelitian ini digunakan baterai dengan spesifikasi kapasitas 12 V, 200 Ah. Oleh karena itu, jumlah baterai yang disusun secara seri untuk mencapai tegangan sistem dapat dihitung sebagai berikut:

$$N_{seri} = \frac{144}{12} = 12 \text{ unit}$$

Selanjutnya, jumlah rangkaian paralel baterai dapat dihitung dengan membagi kapasitas total baterai terhadap kapasitas satu rangkaian seri:

$$N_{paralel} = \frac{3189.4}{200} = 15.95 \approx 16 \text{ unit}$$

Dengan demikian, total jumlah baterai yang dibutuhkan dalam sistem dapat dihitung sebagai berikut:

$$N_{total} = 12 \times 16 = 192 \text{ unit}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem membutuhkan 192 unit baterai untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara optimal. Konfigurasi ini memungkinkan sistem menyimpan energi dalam jumlah yang cukup untuk digunakan saat kondisi tanpa suplai energi dari panel surya maupun turbin angin (Hassan et al., 2023).

Selain itu, penggunaan baterai dalam jumlah yang cukup juga dapat meningkatkan stabilitas tegangan sistem serta mengurangi fluktuasi daya yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan. Namun demikian, pemilihan kapasitas baterai harus mempertimbangkan aspek ekonomi, karena biaya investasi baterai merupakan salah satu komponen terbesar dalam sistem hybrid (Adam et al., 2024).

Dengan demikian, perancangan kapasitas baterai yang tepat sangat berperan dalam meningkatkan keandalan sistem pembangkit listrik hybrid. Kapasitas yang sesuai akan memastikan ketersediaan energi listrik secara kontinu serta mendukung kinerja sistem secara keseluruhan dalam jangka panjang.

Inverter merupakan komponen penting dalam sistem pembangkit listrik hybrid yang berfungsi untuk mengubah arus listrik searah (*Direct Current/DC*) menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current/AC*). Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dan turbin angin disimpan dalam baterai dalam bentuk DC, sehingga diperlukan inverter agar energi tersebut dapat digunakan oleh beban listrik yang umumnya menggunakan arus AC (Patel, 2023; Twidell & Weir, 2023).

Dalam menentukan kapasitas inverter, langkah pertama adalah menghitung total daya beban yang digunakan dalam sistem. Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, total daya beban adalah sebesar 10.732,5 Watt. Untuk mengantisipasi lonjakan daya saat peralatan dinyalakan, digunakan faktor keamanan sebesar 1,25 (Sadeghi et al., 2024).

Kapasitas inverter yang dibutuhkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{inv} = 1.25 \times 10732.5 = 13415.6 \text{ Watt}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas inverter minimum yang dibutuhkan adalah sebesar 13.415,6 Watt atau sekitar 13,4 kW. Untuk meningkatkan keandalan sistem, kapasitas inverter dapat dibulatkan menjadi 15 kW agar mampu menangani beban tambahan yang mungkin terjadi di masa mendatang (Nguyen et al., 2025).

Selain daya aktif, dalam sistem AC juga dikenal daya semu (*apparent power*) yang dinyatakan dalam satuan Volt-Ampere (VA). Dengan asumsi faktor daya (*power factor*) sebesar 0,85, maka daya semu inverter dapat dihitung sebagai berikut:

$$S = \frac{13415.6}{0.85} = 15783 \text{ VA}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa inverter yang digunakan harus memiliki kapasitas minimal sebesar

15,7 kVA. Oleh karena itu, pemilihan inverter dengan kapasitas ≥ 15 kVA sangat disarankan untuk memastikan sistem dapat bekerja secara optimal (Hassan et al., 2023).

Efisiensi inverter juga menjadi parameter penting dalam menentukan kinerja sistem secara keseluruhan. Dengan asumsi efisiensi inverter sebesar 95%, maka daya keluaran inverter dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{out} = 0.95 \times 13415.6 = 12744.8 \text{ Watt}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian energi akan mengalami kehilangan selama proses konversi dari DC ke AC. Oleh karena itu, pemilihan inverter dengan efisiensi tinggi sangat penting untuk meminimalkan rugi-rugi energi dalam sistem (Adam et al., 2024).

Dalam implementasinya, inverter juga harus disesuaikan dengan tegangan sistem, yaitu 144 Volt DC pada sisi input dan 220 Volt AC pada sisi output. Selain itu, penggunaan inverter tipe *pure sine wave* lebih disarankan karena mampu menghasilkan gelombang listrik yang stabil dan aman untuk peralatan elektronik (IETA, 2024).

Dengan demikian, hasil perancangan inverter menunjukkan bahwa sistem membutuhkan inverter dengan kapasitas minimal 15 kVA untuk dapat melayani seluruh beban listrik secara optimal. Pemilihan inverter yang tepat akan meningkatkan efisiensi sistem serta menjaga kestabilan suplai energi dalam sistem pembangkit listrik hybrid.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan analisis sistem pembangkit listrik hybrid yang mengombinasikan energi surya dan angin, dapat disimpulkan bahwa sistem ini mampu menjadi solusi alternatif dalam memenuhi kebutuhan energi listrik di daerah perdesaan. Perhitungan kebutuhan energi menunjukkan bahwa total konsumsi energi listrik harian sebesar 239,86 kWh/hari, yang setelah memperhitungkan faktor kehilangan energi meningkat menjadi 311,82 kWh/hari. Hal ini menunjukkan bahwa perencanaan kapasitas sistem harus mempertimbangkan faktor efisiensi agar sistem dapat bekerja secara optimal (Sadeghi et al., 2024; Patel, 2023). Hasil analisis potensi energi menunjukkan bahwa energi surya memiliki tingkat kestabilan yang lebih tinggi dibandingkan energi angin, dengan nilai *Peak Sun Hours* (PSH) sebesar 4,22 jam per hari. Sementara itu, kecepatan angin rata-rata berada pada kisaran yang cukup untuk mendukung sistem sebagai sumber energi tambahan. Dengan demikian, kombinasi kedua sumber energi ini mampu meningkatkan keandalan sistem dalam menyediakan energi listrik secara kontinu (Kassem et al., 2024; Rehman & Al-Hadhrani, 2023). Perancangan sistem panel surya menghasilkan kebutuhan kapasitas sebesar 73,89 kW dengan jumlah modul sebanyak 150 unit yang disusun dalam konfigurasi seri dan paralel. Sistem ini mampu menghasilkan daya sekitar 75 kW, sehingga dapat memenuhi kebutuhan energi listrik yang telah direncanakan. Hal ini menunjukkan bahwa desain panel surya yang tepat sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem secara keseluruhan (Nguyen et al., 2025). Selain itu, sistem turbin angin dirancang dengan kapasitas total sebesar 3000 Watt menggunakan 30 unit turbin berkapasitas 100 Watt. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa turbin angin mampu beroperasi pada kecepatan angin minimum dan memberikan kontribusi energi tambahan bagi sistem. Keberadaan turbin angin ini berperan penting dalam menjaga kontinuitas suplai energi, terutama pada kondisi intensitas matahari rendah (Hassan et al., 2023). Pada sisi penyimpanan energi, kapasitas baterai yang dibutuhkan adalah sebesar 3189,4 Ah dengan total 192 unit baterai yang disusun secara seri dan paralel. Kapasitas ini dinilai mampu menyediakan cadangan energi selama satu hari operasi tanpa suplai dari sumber energi utama. Dengan demikian, sistem penyimpanan energi berfungsi secara efektif dalam menjaga kestabilan suplai energi listrik (Adam et al., 2024). Sementara itu, hasil perhitungan inverter menunjukkan bahwa kapasitas minimum yang dibutuhkan adalah sebesar 15 kVA. Pemilihan inverter dengan kapasitas yang sesuai serta efisiensi tinggi sangat penting untuk memastikan energi listrik dapat dikonversi dan digunakan secara optimal oleh beban. Hal ini juga berpengaruh terhadap efisiensi keseluruhan sistem pembangkit listrik hybrid (Twidell & Weir, 2023). Secara keseluruhan, sistem pembangkit listrik hybrid berbasis energi surya dan angin yang dirancang dalam penelitian ini terbukti mampu memenuhi kebutuhan energi listrik secara optimal dan berkelanjutan. Sistem ini juga memiliki potensi besar untuk diterapkan di daerah perdesaan yang belum terjangkau oleh jaringan listrik konvensional, sehingga dapat mendukung program elektrifikasi nasional serta pengembangan energi terbarukan di Indonesia (IEA, 2024).

DAFTAR REFERENSI

- Adam, K. B., et al. (2024). Optimization of hybrid power systems. *Energy Reports*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472400315X>
- Ardhyantoro, N. I., & Husnayain, F. (2024). Integrasi energi terbarukan hybrid di Indonesia. *Jurnal ELKHA*. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/Elkha/article/view/93891>
- Boyle, G. (2023). *Renewable energy: Power for a sustainable future*. Oxford University Press. <https://global.oup.com>
- Hassan, Q., et al. (2023). A review of hybrid renewable energy systems. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>
- International Energy Agency. (2024). *World energy outlook 2024*. <https://www.iea.org>
- IIETA. (2024). Hybrid renewable energy system integration. *International Journal of Energy Production and Management*. <https://www.iieta.org/journals/ijepm/paper/10.18280/ijepm.100206>
- Kassem, Y., et al. (2024). Assessment of hybrid solar-wind systems. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. <https://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/6494>
- Liga, M., et al. (2025). Feasibility study of hybrid systems for rural electrification. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. <https://doi.org/10.11591/eei.v14i5.9589>
- Nguyen, H. H., et al. (2025). Economic-environmental analysis of hybrid renewable energy systems. *International Journal of Renewable Energy Development*. <https://ijred.cbiorid.id/index.php/ijred/article/view/61233>
- Patel, M. R. (2023). *Wind and solar power systems*. CRC Press. <https://www.crcpress.com>
- Rehman, S., & Al-Hadhrami, L. M. (2023). Wind-solar hybrid systems for remote areas. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.045>
- Sadeghi, A., et al. (2024). Techno-economic analysis of hybrid renewable systems. *Renewable Energy*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174524002101>
- Twidell, J., & Weir, T. (2023). *Renewable energy resources*. Routledge. <https://www.routledge.com>