

Analisis Potensi Energi Listrik pada *Hybrid Renewable Energy System* (HRES) Berbasis Surya dan Angin

Muhamad Fahmi Amrillah¹, Eko Nugroho Widjatmoko², Lia Kamelia³

^{1,2}Politeknik Transportasi Sungai, Danau dan Penyeberangan

Jalan Sabar Jaya No. 116, Banyuasin

³UIN Sunan Gunung Djati Bandung

Jl. A.H. Nasution No 105, Bandung

e-mail: muhamadfahmiamrillah@gmail.com

Abstrak—Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia mendorong pengembangan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi listrik pada *Hybrid Renewable Energy System* (HRES) berbasis energi surya dan angin melalui integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Metode penelitian dilakukan melalui studi literatur, pengumpulan data radiasi matahari dan kecepatan angin, perancangan sistem HRES, serta analisis performa sistem. Sistem yang digunakan terdiri dari panel surya *monocrystalline* 300 Wp, turbin angin 300 W, MPPT *hybrid* 12 VDC 60 A, dan baterai 4 × 20 Ah. Data radiasi matahari diperoleh melalui Global Solar Atlas, sedangkan data kecepatan angin diperoleh menggunakan Windy.com. Hasil penelitian menunjukkan bahwa potensi produksi energi listrik PLTS mencapai 1.381,2 kWh/tahun dengan produksi tertinggi sebesar 128,9 kWh pada bulan Agustus. Kecepatan angin di lokasi penelitian berkisar antara 1,54–4,11 m/s. Integrasi PLTS dan PLTB menghasilkan daya maksimum lebih dari 550 W dan mampu meningkatkan stabilitas serta kontinuitas suplai energi listrik. Sistem HRES berpotensi diterapkan sebagai solusi energi berkelanjutan untuk wilayah *off-grid* di Indonesia.

Kata kunci: HRES, energi surya, energi angin, PLTS, PLTB.

Abstract—The increasing electricity demand in Indonesia encourages the development of sustainable and environmentally friendly renewable energy sources. This study aims to analyze the electrical energy potential of a solar–wind-based Hybrid Renewable Energy System (HRES) through the integration of Solar Power Plants (PLTS) and Wind Power Plants (PLTB). The research method includes literature study, solar irradiation and wind speed data collection, HRES system design, and system performance analysis. The proposed system consists of a 300 Wp monocrystalline solar panel, a 300 W wind turbine, a 12 VDC 60 A hybrid MPPT controller, and a 4 × 20 Ah battery storage system. Solar irradiation data were obtained from Global Solar Atlas, while wind speed data were collected using Windy.com. The results show that the annual electrical energy production potential of the PLTS reached 1,381.2 kWh/year, with the highest production of 128.9 kWh occurring in August. Wind speed at the research location ranged from 1.54 to 4.11 m/s. The integration of PLTS and PLTB generated a maximum output power of more than 550 W and improved the stability and continuity of electricity supply. Therefore, the HRES system has strong potential as a sustainable energy solution for off-grid areas in Indonesia.

Keywords: HRES, solar energy, wind energy, photovoltaic, wind turbine.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam dua dekade terakhir seiring dengan pertumbuhan industri, urbanisasi, dan peningkatan taraf hidup masyarakat. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), konsumsi listrik nasional terus mengalami peningkatan setiap tahunnya dan diproyeksikan akan terus bertambah hingga tahun 2030 [1]. Namun demikian, sistem ketenagalistrikan nasional masih didominasi oleh pembangkit berbahan bakar fosil, khususnya batubara dan

gas alam, yang menyumbang lebih dari 60% total kapasitas pembangkit listrik nasional [2]. Ketergantungan terhadap energi fosil menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain tingginya emisi karbon, pencemaran lingkungan, serta ancaman terhadap ketahanan energi akibat keterbatasan cadangan bahan bakar fosil [3].

Sebagai upaya mengatasi permasalahan tersebut, pemerintah Indonesia menargetkan peningkatan kontribusi energi baru terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 [4]. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah energi surya dan energi

angin. Secara geografis, Indonesia terletak di wilayah khatulistiwa yang memiliki intensitas radiasi matahari rata-rata sebesar 4–5,5 kWh/m²/hari, sehingga sangat potensial untuk pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) [5]. Selain itu, beberapa wilayah pesisir dan kepulauan Indonesia juga memiliki potensi energi angin dengan kecepatan rata-rata 2–6 m/s yang cukup optimal untuk pengoperasian turbin angin skala kecil hingga menengah [6].

Pemanfaatan energi surya maupun angin secara tunggal masih menghadapi kendala utama berupa sifat intermiten yang dipengaruhi kondisi cuaca dan lingkungan [7]. Panel surya hanya mampu menghasilkan energi listrik secara optimal pada siang hari dengan intensitas cahaya matahari yang tinggi, sedangkan turbin angin sangat bergantung pada kestabilan dan kecepatan angin [8]. Kondisi tersebut menyebabkan kontinuitas suplai energi menjadi kurang stabil apabila hanya menggunakan satu jenis sumber energi terbarukan [9]. Oleh karena itu, pengembangan *Hybrid Renewable Energy System* (HRES) yang mengombinasikan beberapa sumber energi terbarukan menjadi salah satu solusi yang efektif untuk meningkatkan keandalan sistem energi listrik [10].

HRES berbasis surya dan angin menjadi salah satu konfigurasi yang paling banyak dikembangkan karena kedua sumber energi tersebut memiliki karakteristik yang saling melengkapi (*complementary*) [11]. Energi surya cenderung maksimum pada siang hari, sedangkan energi angin pada beberapa wilayah cenderung meningkat pada malam hari atau saat kondisi mendung [12]. Integrasi kedua sumber energi tersebut mampu meningkatkan kontinuitas suplai daya dan mengurangi fluktuasi energi listrik [13]. Selain itu, berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem HRES mampu meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya operasional, serta mengurangi emisi karbon dibandingkan sistem konvensional berbasis diesel [14].

Penelitian terkait HRES telah berkembang secara luas dalam beberapa tahun terakhir. Beberapa studi menunjukkan bahwa kombinasi PLTS dan turbin angin dapat meningkatkan *capacity factor* sistem serta menurunkan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) secara signifikan [15]. Penelitian lain juga menjelaskan bahwa penerapan HRES sangat efektif diterapkan pada wilayah terpencil dan kepulauan yang belum terjangkau jaringan listrik utama (*off-grid system*) [16]. Dalam konteks Indonesia, penerapan HRES memiliki prospek yang sangat besar karena masih terdapat banyak daerah terpencil yang mengalami keterbatasan akses energi listrik [17].

Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS), masih terdapat ribuan desa di wilayah terluar dan kepulauan yang belum memperoleh akses listrik secara optimal [18]. Selama ini, sebagian besar wilayah tersebut masih mengandalkan generator diesel yang memiliki biaya operasional tinggi dan menghasilkan emisi karbon yang besar [19]. Pengembangan HRES berbasis surya dan angin dapat menjadi solusi elektrifikasi berkelanjutan yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan [20]. Selain mendukung pemerataan akses listrik, implementasi HRES juga berkontribusi terhadap pencapaian target Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya tujuan ke-7 yaitu *Affordable and Clean Energy* [21].

Dalam beberapa penelitian terbaru, penggunaan perangkat lunak optimasi seperti HOMER (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*) banyak digunakan untuk menganalisis konfigurasi optimal sistem HRES [22]. Analisis tersebut mencakup potensi energi,

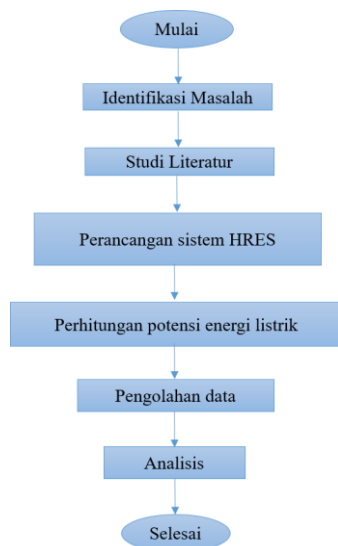
kapasitas sistem, biaya investasi, biaya operasional, serta keandalan sistem energi [23]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi HRES berbasis surya dan angin yang dilengkapi sistem penyimpanan energi (*battery storage*) mampu meningkatkan stabilitas tegangan dan frekuensi sistem [24]. Selain itu, integrasi teknologi smart energy management juga dinilai mampu meningkatkan efisiensi distribusi energi pada sistem HRES modern [25].

Perkembangan teknologi panel surya dan turbin angin yang semakin efisien turut mendorong peningkatan implementasi HRES di berbagai negara [26]. Efisiensi modul fotovoltaik yang semakin tinggi serta penurunan harga komponen sistem dalam satu dekade terakhir menjadikan investasi HRES lebih ekonomis [27]. Di sisi lain, teknologi turbin angin skala kecil juga mengalami peningkatan performa sehingga lebih sesuai diterapkan pada wilayah dengan kecepatan angin rendah seperti Indonesia [28]. Kombinasi kedua teknologi tersebut memberikan peluang besar dalam mendukung transisi energi nasional menuju sistem energi berkelanjutan [29][30]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi listrik pada *Hybrid Renewable Energy System* (HRES) berbasis surya dan angin melalui pengujian parameter tegangan, arus, daya keluaran, dan stabilitas sistem.

II. METODE

Metode penelitian pada studi ini disusun secara sistematis melalui beberapa tahapan utama sebagaimana ditunjukkan pada flowchart penelitian. Tahap awal diawali dengan identifikasi masalah untuk menganalisis peningkatan kebutuhan energi listrik, ketergantungan terhadap energi fosil, serta potensi pemanfaatan energi terbarukan berbasis surya dan angin sebagai sumber energi alternatif pada sistem *Hybrid Renewable Energy System* (HRES). Selanjutnya dilakukan studi literatur secara komprehensif melalui kajian terhadap jurnal ilmiah, buku referensi, standar teknis, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan teknologi pembangkit listrik tenaga surya, turbin angin, sistem hybrid, serta metode analisis potensi energi listrik guna memperoleh landasan teoritis dan parameter penelitian yang relevan. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem HRES dengan menentukan konfigurasi optimal sistem yang meliputi panel surya, turbin angin, baterai penyimpanan energi, inverter, dan sistem kontrol sesuai karakteristik beban listrik dan potensi sumber energi yang tersedia. Setelah itu dilakukan perhitungan potensi energi listrik berdasarkan data intensitas radiasi matahari, kecepatan angin, dan profil kebutuhan beban listrik untuk mengetahui kapasitas daya dan energi yang dapat dihasilkan oleh sistem. Data yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis menggunakan pendekatan teknis dan simulasi sistem guna mengevaluasi performa HRES berdasarkan parameter produksi energi, efisiensi sistem, keandalan suplai daya, serta potensi pengurangan emisi karbon dan konsumsi energi fosil. Tahap akhir penelitian dilakukan dengan menarik kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang diperoleh untuk menentukan tingkat kelayakan dan potensi implementasi *Hybrid Renewable Energy System* berbasis surya dan angin sebagai solusi

penyediaan energi listrik yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

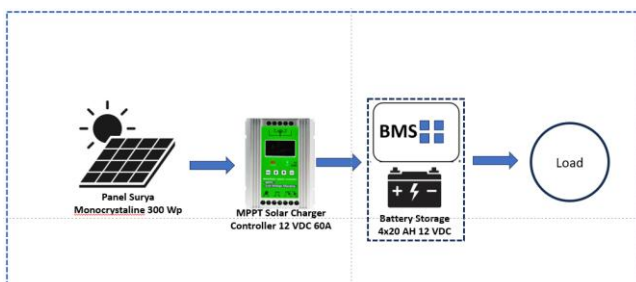


Gambar 1. Flowchart penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

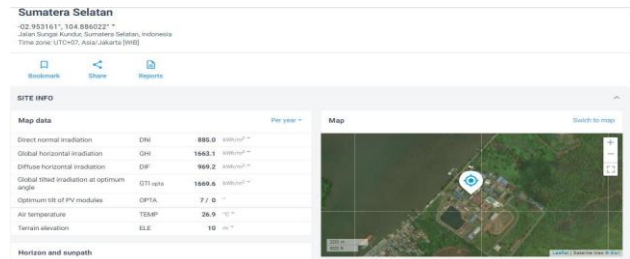
A. Hasil dan Pembahasan Sistem PLTS

Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), energi radiasi matahari dimanfaatkan melalui modul panel surya *monocrystalline* berkapasitas 300 Wp untuk menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus searah (DC). Energi listrik DC yang dihasilkan panel surya kemudian dialirkan menuju *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) *solar charge controller* dengan spesifikasi 12 VDC 60 A. Perangkat MPPT ini berfungsi untuk mengoptimalkan titik operasi panel surya agar mampu bekerja pada titik daya maksimum (*maximum power point*), sehingga efisiensi konversi energi dari iradiasi matahari ke energi listrik dapat tercapai secara optimal. Selanjutnya, keluaran dari MPPT dapat diarahkan secara langsung untuk menyuplai beban listrik apabila kebutuhan energi terjadi secara simultan dengan ketersediaan energi surya. Selain itu, apabila energi listrik yang dihasilkan melebihi kebutuhan beban, MPPT secara otomatis mengalirkan energi ke sistem penyimpanan energi (*battery storage*) berkapasitas 4×20 Ah pada tegangan 12 VDC yang terintegrasi dengan *Battery Management System* (BMS). BMS berfungsi untuk mengendalikan proses pengisian dan pengosongan baterai guna menjaga umur pakai serta mencegah terjadinya kondisi *overcharge* maupun *overdischarge*. Dengan demikian, sistem PLTS ini mampu menyediakan suplai energi listrik yang stabil dan berkelanjutan baik secara langsung ke beban maupun melalui mekanisme penyimpanan energi.



Gambar 2. Blok diagram sistem kerja PLTS

Panel surya dapat menghasilkan energi listrik yang bersumber dari matahari dengan memanfaatkan irradiasi matahari yang akan dikonversi menjadi energi listrik. Untuk mengetahui potensi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh panel surya, maka diperlukan data irradiasi matahari. Penelitian ini mengambil data irradiasi matahari menggunakan aplikasi web bernama *globalsolaratlas*. Data irradiasi ini diambil di wilayah sekitar Politeknik Transportasi Sungai, Danau dan Penyeberangan Palembang

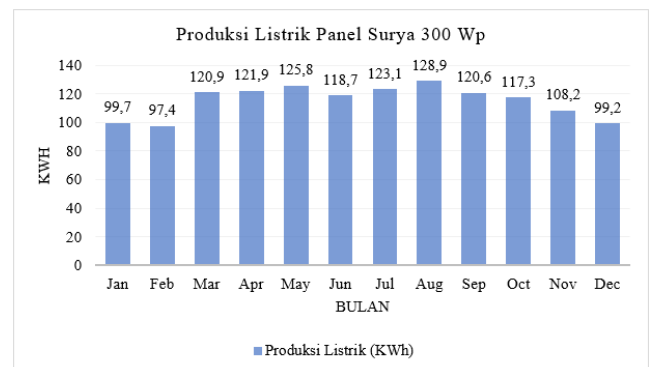


Gambar 3. Letak geografis pengambilan data irradiasi matahari

Hasil nilai irradiasi ini nantinya akan menjadi data utama dalam perhitungan potensi energi listrik yang akan dihasilkan oleh PV dengan kapasitas 300 Wp. Data irradiasi yang merupakan data nilai irradiasi matahari selama satu tahun. Pengukuran nilai irradiasi tersebut menggunakan sensor pengukuran irradiasi matahari yang dihubungkan dengan bigdata aplikasi website *globalsolaratlas* sehingga memungkinkan data irradiasi setiap daerah dapat diakses darimanapun.

Potensi energi listrik tahunan yang dapat dihasilkan oleh PV kapasitas 300 Wp adalah sebesar 1.381,2 kWh dengan puncak produksi listrik terbesar terjadi pada bulan Agustus sebesar 128,9 kWh. Sementara itu, produksi energi listrik terkecil terjadi di bulan Februari sebesar 97,4 kWh.

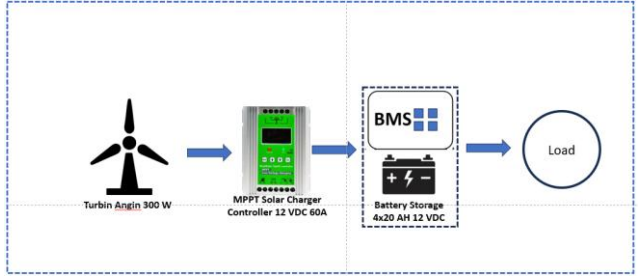
Hasil produksi listrik PV kapasitas 300 Wp selama satu tahun tersebut tentunya sangat dipengaruhi oleh musim yang sedang terjadi pada lokasi tempat penelitian. Hal itu sesuai dengan kondisi geografis dimana lokasi tempat penelitian memiliki dua musim dalam satu tahun yaitu musim kemarau dan musim hujan. Pada musim hujan tentunya penyinaran matahari terhadap bumi akan lebih maksimal sehingga irradianse yang diterima oleh PV akan lebih maksimal dibandingkan dengan musim hujan.



Gambar 4. Potensi produksi listrik tahunan

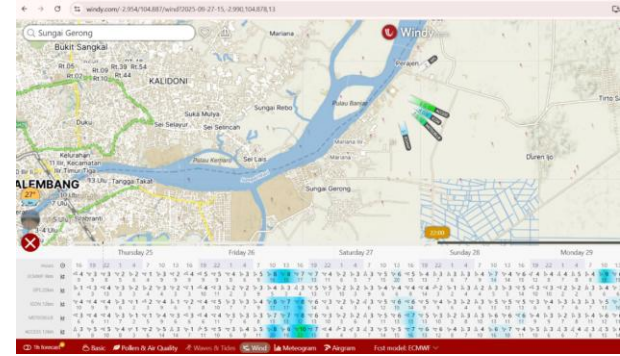
B. Hasil dan Pembahasan Sistem PLTB

Tahapan kerja sistem konversi energi angin pada Gambar di atas dimulai dari pemanfaatan energi kinetik angin yang digunakan untuk memutar bilah turbin angin. Proses ini menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus bolak-balik (AC) dengan kapasitas nominal sebesar 300 W. Selanjutnya, keluaran listrik AC dari turbin diarahkan menuju *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), yang berfungsi sebagai pengatur utama dalam mengoptimalkan daya yang dihasilkan serta memastikan proses konversi dari tegangan AC ke tegangan DC berlangsung secara efisien. Tegangan DC yang dihasilkan kemudian dialirkan ke dua jalur utama, yaitu langsung menuju beban listrik (*load*) atau disalurkan terlebih dahulu ke unit penyimpanan energi berupa baterai. Sistem penyimpanan energi menggunakan konfigurasi baterai 4 × 20 Ah, 12 VDC yang dilengkapi dengan *Battery Management System* (BMS) untuk menjaga kestabilan operasi, mencegah *overcharging* maupun *over-discharging*, serta meningkatkan umur pakai baterai. Dengan demikian, sistem ini memungkinkan pemanfaatan energi angin secara lebih andal dan berkesinambungan baik untuk suplai beban langsung maupun untuk cadangan energi saat kecepatan angin tidak mencukupi.



Gambar 5. Blok diagram sistem kerja PLTB

Pengukuran data angin dilakukan menggunakan aplikasi Windy.com, sebuah perangkat lunak berbasis web-based *meteorological application* yang menyediakan parameter meteorologi secara *real-time* dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi. Aplikasi ini memanfaatkan beberapa model numerik atmosfer global (seperti ECMWF, GFS, METEOBLUE) untuk menghasilkan prakiraan dan data observasi kecepatan angin pada titik koordinat tertentu.



Gambar 6. Letak geografis pengambilan data kecepatan angin

Dalam penelitian ini, titik koordinat pengukuran ditetapkan pada area Politeknik Transportasi Sungai, Danau, dan Penyeberangan Palembang, dengan koordinat geografis (2.954° LS, 104.887° BT). Pengukuran dilakukan pada hari Minggu, 22 Juli 2025, dengan rentang waktu observasi selama 24 jam penuh (00:00 – 23:00 WIB). Data kecepatan

angin diperoleh dalam satuan knot, kemudian dikonversi ke dalam satuan internasional (SI), yaitu meter per detik (m/s).

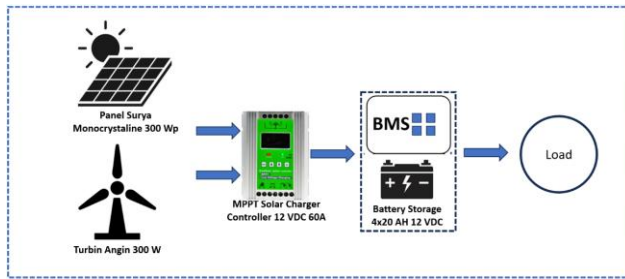
Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 1 yang merepresentasikan variasi kecepatan angin dalam satuan knot dan hasil konversi dalam satuan m/s pada setiap interval waktu pengukuran. Dari tabel terlihat bahwa kecepatan angin bervariasi antara 1,54 m/s hingga 4,11 m/s, dengan pola peningkatan signifikan pada siang hari (10:00 – 15:00 WIB).

Tabel 1. Data kecepatan angin

Waktu	Kecepatan Angin (Knot)	Kecepatan Angin (m/s)
00.00	4	2,056
01.00	4	2,056
02.00	4	2,056
03.00	4	2,056
04.00	3	1,542
05.00	3	1,542
06.00	3	1,542
07.00	5	2,57
08.00	5	2,57
09.00	5	2,57
10.00	8	4,112
11.00	8	4,112
12.00	8	4,112
13.00	8	4,112
14.00	8	4,112
15.00	8	4,112
16.00	7	3,598
17.00	7	3,598
18.00	7	3,598
19.00	7	3,598
20.00	7	3,598
21.00	4	2,056
22.00	4	2,056
23.00	4	2,056

C. Hasil dan Pembahasan HRES

Sistem Hybrid Renewable Energy System (HRES) bertujuan untuk mengintegrasikan dua sumber energi terbarukan, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis panel surya *monocrystalline* dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) berbasis turbin angin, sehingga mampu menyediakan suplai energi listrik yang lebih stabil, berkelanjutan, dan efisien. Pada rancangan sistem ini, kedua sumber energi dihubungkan ke sebuah *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) *Hybrid Solar Charger Controller*, yang berfungsi sebagai pusat pengaturan aliran daya menuju beban (*load*) atau baterai penyimpanan (*battery storage*).



Gambar 7. Blok diagram sistem HRES

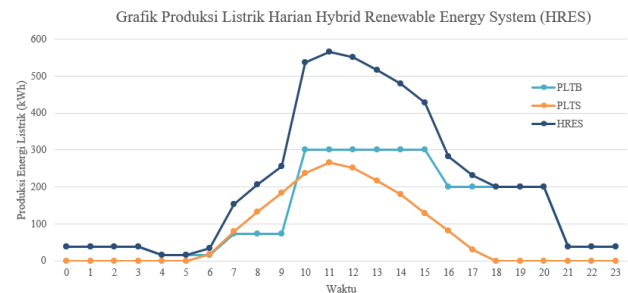
Blok diagram sistem HRES yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 7. Diagram ini menggambarkan alur konversi energi dari panel surya dan turbin angin menuju MPPT, kemudian ke baterai penyimpanan, serta distribusi energi ke beban listrik. Panel surya yang digunakan adalah jenis *monocrystalline* kapasitas 300 Wp, Panel surya berfungsi untuk mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Karakteristik panel *monocrystalline* yang digunakan adalah memiliki efisiensi konversi tinggi dan kinerja yang relatif stabil pada intensitas cahaya yang bervariasi.

Turbin angin yang digunakan memiliki kapasitas 300 W, dimana turbin angin berfungsi untuk mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik, yang selanjutnya diproses oleh generator turbin untuk menghasilkan energi listrik arus bolak-balik (AC). Energi listrik AC yang dihasilkan tidak dapat langsung disimpan di dalam baterai, sehingga diperlukan proses konversi melalui MPPT *Hybrid* agar sesuai dengan sistem penyimpanan berbasis DC. MPPT *hybrid* yang digunakan memiliki spesifikasi 12 VDC 60A. MPPT berperan penting dalam mengoptimalkan daya keluaran baik dari panel surya maupun turbin angin. Fungsi utama MPPT adalah untuk melakukan tracking terhadap titik daya maksimum (*Maximum Power Point*) dari sumber energi, sehingga daya yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal. Selain itu, berfungsi juga untuk mengubah dan menyeragamkan karakteristik keluaran energi listrik, baik dari sisi tegangan maupun jenis arus. Dalam hal ini, listrik DC dari panel surya dan listrik AC dari turbin angin disamakan menjadi listrik DC agar kompatibel dengan sistem penyimpanan baterai maupun distribusi ke beban. Mengatur aliran energi menuju beban listrik secara langsung, atau menyimpannya terlebih dahulu di dalam baterai penyimpanan sesuai dengan kondisi ketersediaan energi dan kebutuhan beban.

Battery storage yang digunakan sebagai media penyimpanan energi listrik memiliki kapasitas 4x20 Ah, 12 VDC dengan BMS (*Battery Management System*). Energi listrik DC yang telah diproses oleh MPPT kemudian disalurkan ke sistem penyimpanan berupa baterai dengan konfigurasi 4 unit berkapasitas 20 Ah, 12 VDC. Penggunaan *Battery Management System* (BMS) dimaksudkan untuk menjaga keamanan, umur pakai, serta kestabilan baterai dengan cara mengontrol proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*), mencegah terjadinya *overcharge* maupun *deep discharge*, serta menjaga keseimbangan antar sel baterai.

Berdasarkan hasil perancangan integrasi PLTS dan PLTB menjadi HRES diperoleh data prediksi produksi listrik harian. Hasil integrasi keluaran daya dari Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada tanggal 22 Juli 2025 yang diukur secara per jam. Secara umum terlihat bahwa kontribusi daya dari PLTB bersifat lebih stabil dengan

kisaran 30–300 W, sedangkan PLTS menunjukkan pola fluktuatif yang sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari dengan puncak produksi daya terjadi pada rentang pukul 10.00–12.00 WIB sebesar ± 260 W. Integrasi kedua sistem menghasilkan kurva total *Hybrid Renewable Energy System* (HRES) yang memperlihatkan peningkatan signifikan pada siang hari, dengan daya puncak mencapai lebih dari 550 W pada pukul 11.00 WIB.



Gambar 8. Potensi produksi listrik sistem HRES

Pada malam hari hingga dini hari (pukul 00.00–05.00 WIB), suplai energi hanya bersumber dari PLTB dengan daya konstan sekitar 40 W, menunjukkan peran penting turbin angin dalam menjaga kontinuitas pasokan energi ketika sumber surya tidak tersedia. Memasuki pagi hari pukul 06.00–09.00 WIB, mulai terjadi peningkatan kontribusi PLTS seiring dengan meningkatnya radiasi matahari, yang kemudian terakumulasi dengan keluaran PLTB sehingga daya total HRES meningkat progresif hingga mencapai titik maksimum. Setelah pukul 13.00 WIB, daya keluaran PLTS mengalami penurunan bertahap akibat berkurangnya intensitas cahaya matahari, sementara daya dari PLTB tetap relatif konstan. Dengan demikian, integrasi kedua sumber energi ini mampu menghasilkan profil keluaran daya yang lebih stabil, mengurangi ketergantungan tunggal terhadap salah satu sumber, serta meningkatkan reliabilitas sistem pembangkit listrik berbasis energi terbarukan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem *Hybrid Renewable Energy System* (HRES) berbasis energi surya dan angin memiliki potensi yang baik untuk diterapkan sebagai sumber energi listrik alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Hasil analisis pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menunjukkan bahwa panel surya *monocrystalline* berkapasitas 300 Wp mampu menghasilkan potensi energi listrik tahunan sebesar 1.381,2 kWh dengan produksi energi tertinggi terjadi pada bulan Agustus sebesar 128,9 kWh dan terendah pada bulan Februari sebesar 97,4 kWh. Produksi energi listrik PLTS dipengaruhi secara signifikan oleh intensitas radiasi matahari dan kondisi musim pada lokasi penelitian. Hasil analisis pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menunjukkan bahwa kecepatan angin di lokasi penelitian berkisar antara 1,54 m/s hingga 4,11 m/s, dengan kecepatan angin tertinggi terjadi pada rentang waktu siang hari. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa potensi energi angin di wilayah penelitian cukup memadai untuk mendukung sistem pembangkit listrik skala kecil berbasis turbin angin 300 W. Integrasi antara

PLTS dan PLTB pada sistem HRES mampu menghasilkan profil keluaran daya yang lebih stabil dibandingkan penggunaan sistem tunggal. Daya keluaran maksimum sistem HRES tercatat mencapai lebih dari 550 W pada pukul 11.00 WIB akibat kombinasi optimal antara energi surya dan energi angin. Selain itu, integrasi kedua sumber energi terbarukan melalui Maximum Power Point Tracking (MPPT) hybrid dan sistem penyimpanan energi berbasis baterai mampu meningkatkan kontinuitas suplai daya, menjaga stabilitas sistem, serta mengurangi fluktuasi energi listrik akibat sifat intermiten sumber energi terbarukan. Pada malam hari, sistem PLTB tetap mampu menyuplai energi listrik ketika PLTS tidak beroperasi, sehingga meningkatkan reliabilitas sistem secara keseluruhan.

REFERENSI

- [1] Kementerian ESDM, Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2023, Jakarta, Indonesia, 2023.
- [2] International Energy Agency, Indonesia Energy Outlook 2023, Paris, France, 2023.
- [3] M. Z. Jacobson et al., "100% clean and renewable wind, water, and sunlight energy systems," *Joule*, vol. 3, no. 9, pp. 2057–2110, 2019.
- [4] Pemerintah Republik Indonesia, Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), Jakarta, Indonesia, 2020.
- [5] A. S. Sambo et al., "Solar energy potential in tropical countries," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2356–2367, 2020.
- [6] T. M. I. Mahlia et al., "Wind energy potential and assessment in Southeast Asia," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 42, 2020.
- [7] M. S. Ismail et al., "Techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 797–813, 2018.
- [8] S. Rehman and L. M. Al-Hadhrani, "Study of a solar PV–wind hybrid power system," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 305–313, 2017.
- [9] M. A. Hannan et al., "Hybrid renewable energy systems for sustainable development," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35343–35360, 2018.
- [10] O. Olatomiwa et al., "Hybrid renewable energy systems for rural electrification," *Energy Reports*, vol. 4, pp. 62–72, 2018.
- [11] H. Ibrahim et al., "Hybrid renewable energy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 247–257, 2019.
- [12] A. Maleki and F. Pourfayaz, "Optimal operation of hybrid renewable energy systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 290–297, 2019.
- [13] M. A. Baseer et al., "Hybrid renewable energy systems for electrification," *Renewable Energy Focus*, vol. 27, pp. 81–93, 2018.
- [14] A. Kaabeche and R. Ibtouen, "Techno-economic optimization of hybrid systems," *Applied Energy*, vol. 112, pp. 745–755, 2017.
- [15] S. Bahramara et al., "Optimal planning of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 609–620, 2018.
- [16] M. Hossain et al., "Hybrid renewable energy systems for off-grid applications," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 2, pp. 535–563, 2019.
- [17] A. Nugroho et al., "Renewable energy development in Indonesia," *Energy Policy*, vol. 142, 2020.
- [18] Badan Pusat Statistik, Statistik Indonesia 2023, Jakarta, Indonesia, 2023.
- [19] A. M. Eltamaly and M. A. Mohamed, "Hybrid renewable energy systems and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 397–420, 2018.
- [20] S. Mandelli et al., "Off-grid systems for rural electrification," *Renewable Energy*, vol. 99, pp. 473–485, 2017.
- [21] United Nations, Sustainable Development Goals Report 2023, New York, USA, 2023.
- [22] HOMER Energy, HOMER Pro Microgrid Software, 2024.
- [23] M. Das et al., "Economic analysis of hybrid renewable energy systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 1214–1227, 2019.
- [24] M. A. Faisal et al., "Battery storage integration in hybrid renewable systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181103–181117, 2020.
- [25] A. Chauhan and R. P. Saini, "Smart energy management in hybrid systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 188–202, 2017.
- [26] International Renewable Energy Agency, Renewable Power Generation Costs in 2023, Abu Dhabi, UAE, 2024.
- [27] N. Amin et al., "Advances in photovoltaic technologies," *Solar Energy*, vol. 188, pp. 911–928, 2019.
- [28] Y. Sawle et al., "Small-scale wind turbine systems in low wind speed regions," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 573–586, 2021.
- [29] B. K. Das et al., "Hybrid renewable energy systems status and future prospects," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 23, pp. 1917–1935, 2021.
- [30] R. Saidur et al., "A review on global renewable energy scenario," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 1–10, 2018.