



Optimalisasi Pada Sistem Pembangkit Listrik Hybrid (PLTS & PLTB) Di Kawasan Pesisir Danau Tondano

Moh Zaid Nursalam¹, Ali Akbar Steven Ramchie², Ventje Ferdy Aror³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, Manado, Indonesia

e-mail: ¹zaidmuhammad343@gmail.com, ²ali.a.s.ramschie@gmail.com, ³ventjearor@gmail.com

Abstrak

Pembangunan berkelanjutan saat ini menjadi prioritas global untuk menjaga kelestarian lingkungan sekaligus memenuhi kebutuhan energi masyarakat. Penggunaan sumber daya energi yang dapat diperbarui, seperti energi matahari dan angin perlu dioptimalkan, khususnya di wilayah yang memiliki potensi besar seperti kawasan pesisir Danau Tondano. Fokus penelitian ini adalah untuk memaksimalkan pemanfaatan energi secara efisien. terbarukan melalui pemanfaatan pembangkit listrik hybrid kombinasi antara energi matahari dan eneri angin, di kawasan pesisir Danau Tondano. Dalam penelitian ini digunakan dua pendekatan, yaitu eksperimen dan simulasi. Proses eksperimen dijalankan dengan cara melakukan pengujian langsung terhadap sistem PLTS dan PLTB skala kecil di lokasi penelitian, sedangkan simulasi digunakan untuk membandingkan hasil aktual dengan hasil estimasi berbasis data sekunder dan perhitungan manual menggunakan perangkat lunak spreadsheet (Microsoft Excel). Hasil observasi menunjukkan bahwa kombinasi PLTS dan PLTB dapat meningkatkan efisiensi sistem, berdasarkan data pengujian sistem PLTS dapat menghasilkan 297 Wh / hari dan data pengujian sistem PLTB dapat menghasilkan 431 Wh / hari sehingga didapat hasil dari kombinasi kedua sistem ini adalah 729 Wh / hari.

Kata kunci - Optimalisasi, Pembangkit Listrik Hybrid, PLTS, PLTB, Energi Terbarukan, Danau Tondano

Abstract

Sustainable development is currently a global priority in order to preserve the environment while meeting the energy needs of the community. The use of renewable energy sources, such as solar and wind energy, needs to be optimized, especially in areas with great potential such as the coastal region of Lake Tondano. The focus of this research is to maximize the efficient use of renewable energy through the use of a hybrid power plant that combines solar and wind energy in the coastal area of Lake Tondano. Two approaches were used in this study, namely experimentation and simulation. The experimental process was carried out by conducting direct tests on small-scale solar power plants and wind power plants at the research site, while simulations were used to compare actual results with estimated results based on secondary data and manual calculations using spreadsheet software (Microsoft Excel). The observation results showed that the combination of PLTS and PLTB could increase system efficiency. Based on the PLTS system test data, it could produce 297 Wh/day, and the PLTB system test data showed that it could produce 431 Wh/day, resulting in a combined output of 729 Wh/day from the two systems.

Keywords - Optimization, Hybrid Power Plant, Solar Power Plant, Wind Power Plant, Renewable Energy, Lake Tondano

1. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga hybrid merupakan salah satu alternatif sistem pembangkit yang tepat diaplikasikan pada daerah-daerah yang sukar dijangkau oleh sistem pembangkit besar seperti jaringan PLN. Sistem ini menggabungkan dua atau lebih sumber energi yang berbeda untuk saling melengkapi dalam menghasilkan energi listrik yang berkelanjutan. Sistem energi terbarukan hibrida menggabungkan sumber energi yang saling melengkapi, terutama tenaga surya dan angin, untuk meningkatkan keandalan dan keberlanjutan pasokan listrik di daerah yang tidak terhubung dengan jaringan listrik[1].

Pembangkit listrik tenaga hybrid ini memanfaatkan energi terbarukan (renewable energy) sebagai sumber utama (primer) yang dikombinasikan dengan sumber energi lainnya sebagai sumber cadangan (sekunder), guna meningkatkan keandalan pasokan listrik di daerah terpencil. Integrasi energi terbarukan seperti tenaga surya fotovoltaik dan tenaga angin mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil sambil meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan[2].

Pada sistem pembangkit hybrid, sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin dikombinasikan sehingga menjadi suatu sistem yang menghasilkan energi yang optimal dan efektif dalam memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Sistem hibrida surya dan angin dapat saling melengkapi ketidakstabilan pasokan energi masing-masing, sehingga memastikan pasokan energi yang lebih stabil sepanjang tahun.

Kawasan pesisir Danau Tondano di Sulawesi Utara memiliki potensi besar dalam pengembangan sistem pembangkit hybrid energi terbarukan karena memiliki intensitas sinar matahari yang tinggi sepanjang tahun serta kecepatan angin yang cukup untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Penelitian oleh Rahman dan Tumundo menunjukkan bahwa Wilayah Danau Tondano menerima radiasi matahari sebesar 5,2–5,8 kWh/m²/hari dan kecepatan angin rata-rata 3,5–5,0 m/s, sehingga cocok untuk aplikasi hibrida surya-angin[3]. Namun, untuk menghasilkan energi yang optimal masih menjadi permasalahan utama dalam sistem pembangkit ini. Salah satu solusi adalah dengan mendesain sistem yang efisien melalui analisis teknis dan ekonomi. Rashid menyatakan bahwa Teknik optimisasi multi-objektif membantu menentukan konfigurasi hibrida terbaik dengan mempertimbangkan biaya energi, efisiensi sistem, dan keandalan[4].

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dan kinerja sistem pembangkit listrik tenaga hybrid surya-bayu agar dapat bekerja secara efisien dan menghasilkan energi listrik yang optimal sesuai kondisi alam di kawasan Danau Tondano. Arista dalam studinya di Indonesia menyebutkan bahwa Sistem hybrid surya-angin yang dioptimalkan dapat mengurangi biaya energi sebesar 30–40% dibandingkan dengan sistem yang menggunakan satu sumber energi[5]. Selain memberikan manfaat ekonomi, pemanfaatan energi terbarukan ini juga mendukung pengembangan teknologi pembangkit yang ramah lingkungan serta transisi menuju energi bersih.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Teknologi Hybrid

Teknologi hybrid adalah salah satu inovasi terpenting dalam dunia transportasi dan energi. Konsep hybrid menggabungkan perpaduan antara satu atau lebih sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, mikro, atau minihidro, serta biomasa, untuk meningkatkan kinerja lebih baik, efisiensi, atau keandalan.[6]

2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH)

Pembangkit listrik tenaga hybrid (PLTH) adalah pembangkit listrik yang terdiri dari lebih dari satu macam pembangkit dimana menggabungkan beberapa sumber energi yang dapat diperbaharui (*renewable*) atau tidak dapat diperbaharui (*unrenewable*).

Pada pembangkit listrik tenaga hybrid, energi terbarukan yang dimanfaatkan berasal dari matahari dan angin, kombinasi kedua sumber energi ini diharapkan dapat menghasilkan listrik secara optimal, karena kedua pembangkit tersebut saling melengkapi dalam pengoperasiannya. Sistem pembangkit listrik hybrid ini mampu menyediakan pasokan listrik berkualitas selama 24 jam, asalkan kondisi cuaca mendukung[7].

Sistem Energi Listrik Hybrid Off-Grid: Sistem ini digunakan di tempat-tempat terpencil atau tanpa akses ke jaringan listrik utama. Ini menggabungkan panel surya dan turbin angin dengan baterai penyimpanan energi dengan menggunakan rumus (1) untuk menggabungkan-nya;

$$E_{total} = E_{PV} + E_{wind} \quad (1)$$

Dengan:

- E_{total} = Energi listrik dari PLTS & PLTB (kWh)
- E_{pv} = Daya listrik yang dihasilkan PLTS (kW)



- E_{wind} = Daya listrik yang dihasilkan PLTB (kW)

Energi matahari dan angin mengisi baterai selama kondisi cuaca yang baik, dan baterai menyediakan listrik saat dibutuhkan.

2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atau *solar power plant (SPP)* adalah teknologi yang mengubah energi dari sinar matahari menjadi listrik. Energi matahari merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan menjadi salah satu yang paling populer serta berkelanjutan di dunia saat ini. Dengan memanfaatkan sinar matahari yang melimpah dan gratis, PLTS dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang terbatas serta membantu menurunkan emisi gas rumah kaca penyebab perubahan iklim. Di tengah tantangan perubahan iklim dan kekhawatiran akan ketersediaan energi, PLTS menjadi solusi yang potensial untuk mendukung keberlanjutan energi.[8]

Menghitung Energi Untuk PLTS Energi yang diperoleh dari PLTS dihitung menggunakan rumus (2) berikut:

$$E_{PV} = P_{PV} \times H_{GHI} \times PR \times D \quad (2)$$

Dengan:

- E_{PV} = Energi listrik dari PLTS (kWh/bulan)
- P_{PV} = Daya panel surya (kW)
- H_{GHI} = Radiasi matahari rata-rata harian (kWh/m²/hari)
- PR = Efisiensi Panel
- D = Jumlah hari

2.4. PLTS terinterkoneksi (On Grid)

Grid connected PV system atau PLTS terinterkoneksi merupakan solusi *green energy* bagi penduduk perkotaan baik perumahan ataupun perkantoran. Sistem ini menggunakan modul surya (*photovoltaic module*) untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan dan bebas emisi. Dengan adanya sistem ini akan mengurangi tagihan listrik rumah tangga, dan memberikan nilai tambah pada pemiliknya, sesuai namanya, *grid connected photo voltaic (PV)*, maka sistem ini akan tetap berhubungan dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi PV untuk menghasilkan energi listrik semaksimal mungkin.[9]

2.5. PLTS terpusat (Off Grid)

PLTS terpusat (Off Grid) *stand alone PV system* atau sistem pembangkit listrik tenaga surya terpusat merupakan sistem pembangkit alternatif untuk daerah – daerah terpencil/pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN.[9]

2.6. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) adalah sistem pembangkit yang memanfaatkan energi kinetik dari angin untuk menghasilkan listrik. Prinsip kerjanya dimulai saat hembusan angin mengenai baling – baling atau rotor turbin, yang kemudian memuntahkan energi kinetiknya ke rotor dan memutar poros. Poros ini berlanjut ke generator, sehingga menghasilkan arus listrik[10].

Pembangkit listrik tenaga bayu ini memiliki 2 komponen yaitu turbin dan generator, turbin angin yang digunakan untuk mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik berupa putaran rotor untuk memutar generator, pada saat yang sama generator akan bekerja sebagai mesin untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik[11].

Energi angin juga dapat diandalkan karena angin merupakan sumber energi yang tersedia secara kontinu dan dapat diukur, sehingga

$$P_{\text{wind}} = \left(\frac{1}{2} \times \rho \times \pi R^2 \times V^2 \times C_p \right) \times T \quad (3)$$

Dengan :



- P_{wind} = Energi Angin
- ρ = Kerapatan udara (kg/m^3)
- R = Jari-jari (m)
- V = Kecepatan Angin (m/s)
- C_p = Koefisien Performa Turbin
- T = Waktu Pengoprasian

dapat diprediksi dengan baik. Daya berbanding lurus dengan kecepatan angin dan kerapatan udara serta lamanya waktu pengoprasian sebagaimana pada persamaan (3) diatas.

2.7. Turbin Angin

Turbin angin, juga dikenal sebagai kincir angin modern, adalah perangkat mesin yang digunakan untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik atau listrik. Prinsip kerja turbin angin mirip dengan kincir angin tradisional, tetapi lebih canggih dan efisien dalam menghasilkan energi. Turbin angin berfungsi dengan mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik berupa putaran rotor dan poros. Putaran tersebut kemudian diteruskan ke generator untuk menghasilkan listrik.[7]

Turbin angin sumbu vertikal atau *Vertical axis wind turbine* (VAWT) memiliki poros vertikal. Keunggulan utamanya adalah turbin tidak perlu diarahkan ke sumber angin agar beroperasi secara efektif, sehingga cocok untuk lokasi dengan arah angin yang sering berubah. Desain ini memungkinkan generator dan gearbox ditempatkan dekat tanah, memudahkan akses untuk perawatan tanpa memerlukan menara tinggi, hal ini juga menurunkan biaya pemeliharaan dan meningkatkan efisiensi. Salah satu varian VAWT, yaitu *savious*, menggunakan gaya drag aerodinamis untuk memutar rotor. Turbin *savionus* memiliki konstruksi yang sederhana dan mudah dibuat.[12]

Turbin angin sumbu horizontal atau *Horizontal axis wind turbine* (HAWT) memiliki rotor dan generator yang ditempatkan di bagian atas menara. Mayoritas HAWT adalah desain *upwind*, artinya berhadapan langsung dengan arah angin. Tingginya menara memungkinkan turbin menangkap angin yang lebih kencang di lokasi dengan *wind shear*, kecepatan angin dapat meningkat sekitar 20% setiap kenaikan 10 meter, sehingga potensi daya yang dihasilkan juga melonjak.[13]

2.8. Energi Angin

Angin adalah pergerakan udara yang terjadi karena adanya perbedaan tekanan udara, dimana udara bergerak dari daerah dengan tekanan tinggi menuju daerah dengan tekanan rendah. Daerah yang lebih banyak menerima sinar matahari akan memiliki tekanan udara lebih rendah, sedangkan daerah yang kurang terpapar sinar matahari memiliki tekanan udara yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan hukum gas ideal, yang menyatakan bahwa suhu berbanding terbalik dengan tekanan artinya, suhu yang tinggi menyebabkan tekanan menjadi rendah, dan sebaliknya.[7]

2.9. Optimalisasi Energi Terbarukan

Optimalisasi energi terbarukan adalah proses yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem energi terbarukan. Metode analisis dalam optimalisasi penggunaan energi terbarukan meliputi pendekatan matematis yang dirancang untuk memaksimalkan output energi dari sumber yang tersedia.

Validasi Dan Pembahasan, proses melakukan validasi dengan membandingkan hasil pengujian aktual terhadap hasil simulasi. Proses validasi dilakukan dengan menghitung deviasi antara nilai simulasi dan nilai aktual dari energi yang dihasilkan dan dihitung menggunakan rumus (4) dan (5)

- Deviasi Absolut:

$$D_{\text{abs}} = |E_{\text{simulasi}} - E_{\text{aktual}}| \quad (4)$$

Mengukur selisih absolut energi antara hasil simulasi dan data aktual.

- Deviasi Relatif (%):

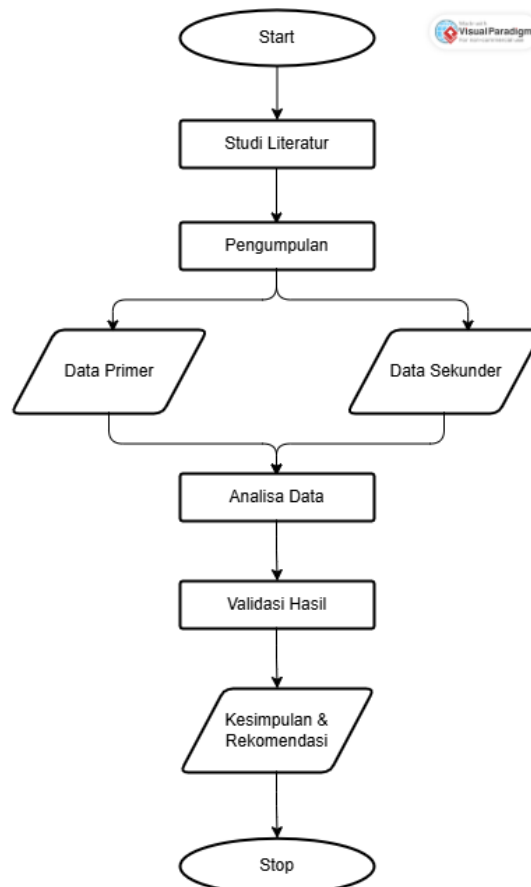
$$D_{\text{error}} = |E_{\text{simulasi}} - E_{\text{aktual}}| / E_{\text{aktual}} \times 100\% \quad (5)$$



Menunjukkan kesalahan simulasi terhadap nilai aktual dalam persen.
Hasil dari validasi ini digunakan sebagai dasar untuk memberikan rekomendasi terhadap peningkatan sistem atau potensi replikasi di lokasi serupa.

2.10. Metode dan Jenis Penelitian

Metode penelitian adalah suatu proses dalam memecah masalah yang logis, metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode analisa data, metode analisa data adalah metode menganalisis kemungkinan yang akan terjadi dengan menggunakan data yang di dapat dari studi literatur.



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

3. PEMBAHASAN DAN HASIL

3.1. Potensi Energi Matahari dan Angin

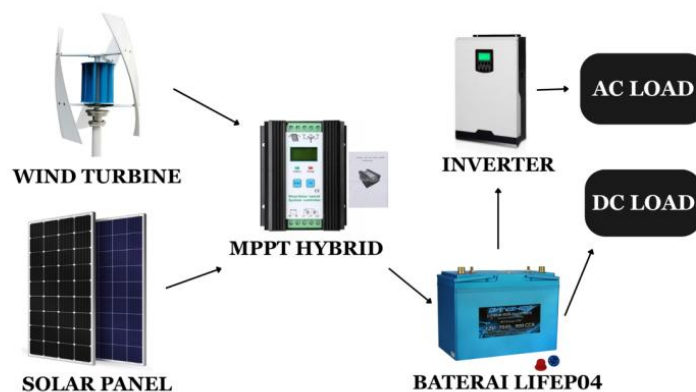
Tabel 1. Potensi energi matahari dan kecepatan angin pada tanggal 27 juli – 31 juli 2025

Hari	Potensi Matahari (kW-hr/m ² /day)	Potesni Angin (m/s)
Senin	6.18	6.21
Selasa	6.61	6.56
Rabu	6.17	7.12
Kamis	5.95	7.87
Jumat	5.09	7.53

Tabel 1 di atas merupakan data potensi energi angin dan matahari yang di dapatkan dari hasil pengumpulan data melalui web NASA POWER.

3.2. Pengoptimalan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid

a. Block Diagram



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Pada gambar 2.2 menjelaskan perencanaan desain pada pembuatan alat pembangkit listrik tenaga hybrid (PLTS & PLTB) yang menggabungkan kedua sumber pembangkit untuk mensuplai beban. Sumber utama yang dimanfaatkan adalah sinar matahari yang akan diserap oleh panel surya (fotovoltaik) dan kecepatan angin untuk memutarakan generator.

- Panel surya, berfungsi untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan berupa arus searah (DC) dan dikirimkan ke MPPT untuk dioptimalkan sebelum masuk ke baterai
- Wind Turbin, berfungsi untuk mengonversi energi angin menjadi energi listrik. Energi yang dihasilkan akan digunakan untuk mengisi baterai dan memasok beban sesuai kebutuhan.
- MPPT, adalah pengontrol pengisian daya yang mengoptimalkan daya yang diperoleh dari panel surya dan wind turbin sebelum dikirimkan ke baterai. Alat ini berfungsi untuk meningkatkan efisiensi pengisian daya agar baterai dapat menyimpan energi secara maksimal.
- Baterai, berfungsi sebagai penyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dan turbin angin. Energi yang tersimpan dalam baterai ini kemudian digunakan untuk memasok listrik ke beban melalui inverter.
- Inverter, berperan dalam mengubah arus searah (DC) dari baterai menjadi arus bolak balik (AC) yang dapat digunakan oleh beban listrik, seperti lampu dan perangkat elektronik lainnya.
- *Dc load*, yang akan mengontrol beban serta memonitoring beban dari tegangan (V), Arus (I), dan kWh
- *Ac load*, beban utama dalam sistem ini adalah beberapa lampu dan stop kontak yang menggunakan listrik hasil konversi dari inverter. Beban – beban ini beroperasi dengan daya yang diambil dari sistem hybrid PLTS & PLTB.

b. Data yang digunakan

Data yang di gunakan meliputi :

- Beban yang digunakan 450 Wh / hari
- Spesifikasi teknis panel surya 100 Wp dan turbin angin 300 W.
- Faktor performa (performance ratio) sistem PLTS sebesar 45%.
- Capacity factor turbin angin sebesar 30%.
- Kapasitas Baterai 50 Ah

c. Simulasi Dan Perhitungan Teknis

Agar memperoleh hasil yang lebih tepat dan menyeluruh, studi ini juga akan melibatkan simulasi sistem pembangkit listrik hibrida yang menggabungkan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). secara langsung. Simulasi ini akan dilakukan menggunakan prototipe yang telah dirancang dan dibangun sebelumnya, dengan tujuan untuk menganalisis kinerja dan efisiensi sistem hybrid dalam mendukung pemanfaatan listrik di kawasan pesisir Danau Tondano.

- Perhitungan Energi PLTS energi yang dihasilkan oleh PLTS dihitung menggunakan rumus (2) berikut:

$$E_{PV} = 0,1 \times 6,64 \times 0,45 \times 1 = 0,5 \text{ kWh/hari}$$

- Perhitungan Energi PLTB energi dari turbin angin dihitung menggunakan persamaan (3) :

$$P_{wind} = (0,3 \times 0,5 \times 1,151 \times 2,5 \times 421) \times 24 = 372 \text{ Wh/hari}$$

- Simulasi Energi Hybrid simulasi dilakukan dengan menjumlahkan rumus total energi (1) listrik harian dari kedua sistem (PLTS dan PLTB), sehingga didapatkan total energi yang dihasilkan sistem hybrid setiap hari:

$$E_{total} = 266 + 372 = 638 \text{ W / hari}$$

d. Metode Analisis Data

Dalam studi ini diterapkan dua pendekatan, yaitu eksperimen dan simulasi. Proses eksperimen dilakukan dengan cara melakukan pengujian langsung terhadap sistem PLTS dan PLTB skala kecil di lokasi penelitian, sedangkan simulasi digunakan untuk membandingkan hasil aktual dengan hasil estimasi berbasis data sekunder dan perhitungan manual menggunakan perangkat lunak spreadsheet (Microsoft Excel). Simulasi dilakukan untuk mengestimasi potensi energi listrik yang dihasilkan oleh sistem hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan kapasitas kecil, yang direncanakan untuk diaplikasikan di kawasan pesisir Danau Tondano

e. Pengujian Sistem Hybrid (PLTS & PLTB)

Penelitian ini juga melibatkan kegiatan pengujian sistem PLTS dan PLTB yang telah rancang dan dirakit. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh data aktual mengenai kinerja masing-masing sistem dalam kondisi nyata di lokasi penelitian. Berikut adalah prosedur pengujian lapangan yang dilakukan:

- Persiapan alat dan sistem; Panel surya 100 Wp dan turbin angin 300 W dirakit dan dipasang sesuai arah optimal penerimaan energi dan multimeter dan alat ukur arus serta tegangan disiapkan untuk pengukuran manual.
- Waktu pengujian; Pengukuran dilakukan selama 2 hari berturut-turut dan waktu pengambilan data dimulai pukul 08.00 hingga 16.00 WITA setiap hari.
- Parameter yang diukur; Tegangan (V) dan arus (I) output dari sistem PLTS dan PLTB dan data dicatat setiap rata rata dari hasil pengukuran dalam 1 hari (8 jam).
- Pengolahan data: Data tegangan dan arus digunakan untuk menghitung daya ($P = V \times I$) dan energi dihitung berdasarkan integrasi dari daya terhadap waktu (jam).
- Analisis hasil; Hasil energi aktual dibandingkan dengan hasil estimasi simulasi dan selisih antara hasil simulasi dan aktual dianalisis untuk melihat efektivitas sistem dan potensi optimalisasi lebih lanjut.

Pengujian ini memberikan gambaran nyata tentang performa sistem energi terbarukan skala kecil dan menjadi dasar validasi hasil simulasi energi hybrid.

f. Kriteria Optimasi

Optimasi pada sistem hybrid ini dilakukan dengan mempertimbangkan:

- Kombinasi pemanfaatan sumber energi matahari dan angin agar dapat saling melengkapi
- Efisiensi konversi energi dari masing-masing sistem



- Perbandingan hasil simulasi dan aktual untuk mencari kombinasi sistem optimal dalam pemanfaatan energi terbarukan.
Tujuan optimasi adalah untuk mendapatkan konfigurasi sistem yang menghasilkan energi maksimal.

g. Validasi dan pembahasan

Setelah diperoleh data hasil pengujian di lapangan, langkah selanjutnya adalah melakukan validasi dengan membandingkan hasil tersebut terhadap hasil simulasi. Proses validasi dilakukan dengan menghitung deviasi antara nilai simulasi dan nilai aktual dari energi yang dihasilkan menggunakan rumus (4) dan (5) :

- Deviasi Absolut:

$$D_{\text{abs PV}} = |292 - 269| = 23$$

$$D_{\text{abs Wind}} = |430 - 413| = 17$$

$$D_{\text{abs Hybrid}} = |722 - 683| = 39$$

Mengukur selisih absolut energi antara hasil simulasi dan data aktual.

- Deviasi Relatif (%):

$$D_{\text{error PV}} = 23/269 \times 100\% = 8,5\%$$

$$D_{\text{error Wind}} = 17/413 \times 100\% = 4,1\%$$

$$D_{\text{error Hybrid}} = 39/683 \times 100\% = 5,7\%$$

Menunjukkan seberapa besar kesalahan relatif (simulasi) terhadap energi aktual lisih simulasi antara nilai aktual dalam persen.

3.3. Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid

Simulasi energi listrik dilakukan berdasarkan data sekunder dari NASA POWER dan asumsi teknis perangkat sistem dengan cara yaitu;

- Energi PLTS

Untuk simulasi energi yang dapat dihasilkan Pada PLTS, proses perhitungan biasanya dilakukan secara manual dengan bantuan persamaan matematis daya output yang dihasilkan dalam 1 hari dari pv 100 wp efisiensi 45% serta dengan nilai *iradiance*-nya 6,48 kWh/m²/hari di hari pertama dan 6,64 kWh/m²/hari di hari kedua diambil dari data sumber NASA POWER berikut rumus yang digunakan yaitu persamaan (1.2) untuk output daya yang hasilkan

- Energi PLTB

Untuk simulasi energy yang dapat dihasilkan pada sistem pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) masih sama dengan menggunakan proses perhitungan manual bersama nilai yang ketahui dari kecepatan angin pada hari pertama 7,3 m/s dan hari kedua 7,7 m/s data di ambil dari NASA POWER dengan menggunakan wind turbin 300 watt dengan efisiensi 30% proses simulasi ini menggunakan rumus persamaan (1.3)

- Energi Hybrid

Untuk simulasi hybrid disini kita hanya menggunakan persamaan (1.1) yaitu menambahkan daya PLTS dan PLTB

Hasil perhitungan simulasi menunjukkan estimasi energi harian yang dihasilkan oleh masing-masing sistem (PLTS dan PLTB) serta total energi hybrid lebih jelas nya dapat kita lihat juuga pada tabel 2:

Tabel 2. Hasil Simulasi data output PLTH (PLTS & PLTB)

Hari	Energi PLTS (W)	Energi PLTB (W)	Total Energi Hybrid (W/Hari)
H-1	292	430	722
H-2	299	466	765

Dari tabel 2 diatas dapat kita lihat Rata-rata energi harian yang dapat dihasilkan oleh sistem hybrid ini adalah sekitar 743,5 Wh.



3.4. Hasil Output Pengujian dari Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Setelah melakukan pengujian sistem, dan sistem telah berjalan adapun hasil pengujian dari sistem PLTS.

Tabel 3. Hasil Pengujian data output PLTS hari pertama

Waktu	Intensitas Cahaya (Lux)	Tegangan (V)	Arus (I)	Energi (W)
09.00	58790	11,18	3,1	34,658
09.30	58789	11,8	3	35,4
10.00	62234	12,5	3,3	41,25
10.30	63450	12,8	3,2	40,96
11.00	65356	13	4,1	53,3
11.30	65007	12,88	4,2	54,096
12.00	70427	12,7	4	50,8
12.30	65567	13	3,9	50,7
13.00	39901	13,3	4,1	54,53
13.30	23067	13,2	4,2	55,44
14.00	15025	12	1,7	20,4

Tabel 4. Hasil Pengujian data output PLTS hari kedua

Waktu	Intensitas Cahaya (Lux)	Tegangan (V)	Arus (I)	Energi (W)
09.00	14879	11	0,4	4,4
09.30	14990	11,3	1,5	16,95
10.00	15025	11,5	2	23
10.30	23456	11,8	2,1	24,78
11.00	25987	12	2,3	27,6
11.30	29087	12,2	2,5	30,5
12.00	35112	12,3	3	36,9
12.30	38761	12,5	3	37,5
13.00	62345	12,6	3,1	39,06
13.30	63521	12,7	3,4	43,18
14.00	65353	12,9	3,7	47,73

Berdasarkan hasil pengujian data output dari PLTS hari pertama dan hari kedua, dapat diketahui tegangan dan arus rata – rata yang dihasilkan pada hari pertama yaitu, 12,57V, dan 3,52A. Pada hari kedua rata – rata tegangan dan arusnya yaitu, 12,07V dan 2,45A. Selain itu total daya yang dihasilkan dari pengujian hari pertama selama 5 jam yaitu, 491,534 Watt. Pada hari kedua total daya yang dihasilkan selama 5 jam yaitu, 331,6 Watt.

3.5. Hasil Output Pengujian dari Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Setelah melakukan pengujian sistem, dan sistem telah berjalan adapun hasil pengujian PLTB.

Tabel 5. Hasil Pengujian data output PLTB hari ketiga

Waktu	Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan (V)	Arus (I)	Energi (W)
09.00	6	11	2,45	27,21
09.00	7	11,5	3,75	43,21
10.00	6	11	2,7	27,21
11.00	6,7	11,3	3,35	36,89
12.00	7	11,5	3,75	43,21
13.00	6,3	11,1	2,8	31,1
14.00	7,7	11,8	4,83	57,52
15.00	7,1	11,6	3,8	45,1
16.00	8	12	5,3	64,51



Tabel 6. Hasil Pengujian data output PLTB hari keempat

Waktu	Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan (V)	Arus (I)	Energi (W)
09.00	6,1	11,05	2,58	28,59
09.00	6,5	11,2	3,08	34,6
10.00	7	11,5	3,75	43,21
11.00	6,7	11,3	3,3	37,89
12.00	7	11,5	3,75	43,21
13.00	6,8	11,4	3,53	39,61
14.00	6,5	11,2	3,08	34,6
15.00	7	11,5	3,75	43,21
16.00	7	11,5	3,75	43,25

Berdasarkan hasil pengujian data output dari PLTB hari ketiga dan keempat, dapat diketahui bahwa tegangan dan arus rata – rata yang dihasilkan pada hari ketiga yaitu, 11,42V dan 3,63A, pada hari keempat rata – rata tegangan dan arusnya yaitu, 11,35V dan 3,39A, selain itu total daya yang dihasilkan oleh PLTB pada hari ketiga selama jam yaitu, 375,96 Watt. Pada hari keempat total daya yang dihasilkan oleh PLTB selama 8 jam yaitu, 348,,17 Watt.

3.6. Hasil Output Pengujian dari Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH)

Tabel 7. Hasil Pengujian data output PLTH hari kelima

Jam	Energi PLTS (W)	Energi PLTB (W)	Total Energi Hybrid
08.00	-	27,625	27,625
09.00	37,5	34,496	71,996
10.00	43,18	34,496	77,676
11.00	47,73	46,4	94,13
12.00	52,4	42,55	94,95
13.00	40,96	41,61	82,57
14.00	47,73	56,994	104,724
15.00	-	63,6	63,6
16.00	-	65,88	65,88
Total Daya Hybrid / Hari (Wh) =			683,151

Tabel 8. Hasil Pengujian data output PLTH hari keenam

Jam	Energi PLTS	Energi PLTB	Tota Energi Hybrid
08.00	-	25,3	25,3
09.00	47,73	34,72	82,45
10.00	52	36,48	88,48
11.00	59,4	36,48	95,88
12.00	43,52	48,72	92,24
13.00	47,73	58,31	106,04
14.00	47,36	58,31	105,67
15.00	-	64,66	64,66
16.00	-	68,75	68,75
Total Daya Hybrid / Hari (Wh) =			729,47

Berdasarkan hasil pengujian data dari output PLTH hari kelima dan keenam, dapat diketahui bahwa PLTH dapat menghasilkan daya output pada hari kelima sebesar 683,151 Watt, dan pada hari keenam PLTH dapat menghasilkan daya output sebesar 729,47 Watt.

3.7. Hasil Perbandingan Simulasi Dan Aktual

Dari hasil simulasi dan pengujian aktual, diperoleh deviasi dengan cara menggunakan persamaan (2.4) dan (5) dapat dilihat pada tabel 9

Tabel 3.8 Hasil Pengujian data output PLTH hari keenam

Hari	Deviasi PLTS (%)	Deviasi PLTB (%)	Deviasi Hybrid (%)
H-1	8,5%	4,1%	5,7%
H-2	0,6%	7,5%	4,9%

Perbedaan ini umumnya disebabkan oleh variabilitas cuaca aktual yang tidak sepenuhnya sama dengan data historis NASA POWER, serta efisiensi sistem di lapangan yang mungkin menurun akibat faktor teknis seperti orientasi panel, koneksi, dan performa alat.

3.8. Evaluasi Kriteria Optimasi

Berdasarkan hasil lapangan, sistem hybrid PLTS-PLTB memenuhi sebagian besar kriteria optimasi:

- Komplementer sumber: PLTS dominan siang hari, PLTB aktif saat berangin.
- Efisiensi memadai: walaupun belum maksimal, namun cukup untuk aplikasi awal.
- Kapasitas baterai mencukupi: untuk menyuplai beban lampu LED selama 12 jam.

3.9. Implikasi Hasil Penelitian

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem hybrid skala kecil dapat dimanfaatkan di wilayah pesisir seperti Danau Tondano untuk kebutuhan listrik ringan tanpa tergantung pada jaringan PLN. Potensi ini mendukung pengembangan energi terbarukan lokal, terutama di daerah terpencil.

3.10. Keterbatasan Penelitian

- Durasi pengujian yang terbatas (6 hari) belum merepresentasikan variasi musiman.
- Tidak dilakukan perhitungan biaya (LCOE).
- Tidak diuji untuk beban besar atau fluktuatif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kawasan pesisir Danau Tondano memiliki potensi energi terbarukan yang cukup besar, khususnya dari energi surya dan energi angin. Melalui integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dalam suatu sistem hybrid, pemanfaatan energi dapat dioptimalkan untuk menghasilkan suplai listrik yang lebih stabil dan berkelanjutan. Hasil pengujian dan simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi hybrid mampu meningkatkan efisiensi kinerja system, berdasarkan data pengujian sistem PLTS dapat menghasilkan 297 Wh / hari dan data pengujian sistem PLTB dapat menghasilkan 431 Wh / hari sehingga didapat hasil dari kombinasi kedua sistem ini adalah 729 Wh / hari. dibandingkan jika hanya mengandalkan salah satu sumber energi secara tunggal. Hal ini membuktikan bahwa sistem hybrid lebih adaptif terhadap fluktuasi cuaca harian, sehingga mampu mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil dan memberikan alternatif penyediaan listrik ramah lingkungan.



5. SARAN

Berdasarkan kesimpulan diatas, maka beberapa saran yang dapat diajukan adalah pertama, pembangunan infrastruktur pembangkit listrik hybrid (PLTS & PLTB) di kawasan pesisir Danau Tondano perlu dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan efisiensi teknis, biaya investasi, dan dampak lingkungan, kedua diperlukan sistem monitoring data radiasi matahari dan kecepatan angin secara real-time agar perancangan dan operasional sistem hybrid dapat dilakukan secara lebih akurat dan efisien dan, ketiga dukungan pemerintah daerah sangat penting, baik dalam bentuk regulasi, insentif investasi, maupun subsidi, sehingga implementasi energi terbarukan dapat berjalan optimal dan berkesinambungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Islam, A. Hossain, and M. F. Rahman, "Hybrid renewable energy systems for off-grid power generation: A review.," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 134, 2020.
- [2] A. A. Chowdhury, M. Haque, and T. K. Das, "Optimization of hybrid renewable energy systems: A comprehensive review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 259, 2022.
- [3] S. J. Rahman and A. P. Tumundo, "Potensi energi terbarukan di kawasan Danau Tondano untuk sistem pembangkit listrik hybrid, vol. 9, no. 2, pp. 56–64, 2021.," *J. Energi dan Kelistrikan Indones.*, vol. 9, 2021.
- [4] M. M. Rashid, M. H. Rahman, and S. K. Das, "Multi-objective optimization of hybrid renewable energy system for rural electrification," *Energy Reports*, vol. 8, 2022.
- [5] J. T. Arista, "Techno-economic analysis of solar–wind hybrid system in rural Indonesia," *Renew. Energy*, vol. 185, 2022.
- [6] A. Ansori, B. Yunitasari, S. Soeryanto, and M. Muhaji, "Model Hybrid Pembangkit Listrik Di Pedesaan," *Otopro*, vol. 13, no. 2, p. 58, 2019, doi: 10.26740/otopro.v13n2.p58-62.
- [7] Delfiyana and M. Syahrul, "Uji Kerja Pembangkit Listrik Hibryd Tenaga Surya Dan Bayu Tipe Vawt Cross-Flow Untuk Penerangan Jalan," pp. 1–104, 2022.
- [8] F. Pijoh, Brahmana Duta P. K, and Purba Parulian Lasman, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Energi RamahLingkungan yang Berkelanjutan," *Ind. Syst. Eng. Journals*, vol. 2, no. 2, pp. 201–207, 2024.
- [9] Galuh Prawestri Citra Handani, Binar Surya Gumilang, and Afidah Zuroida, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk Suplai Daya Sistem Pemberian Pakan Ikan Otomatis," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 3, pp. 183–187, 2023, doi: 10.33795/elposys.v9i3.655.
- [10] Montolalu, "Review Jurnal: Efisiensi Penggunaan PLTB Pada Kondisi Struktur Geografis Indonesia," *J. Elektr.*, vol. 03, no. 01, pp. 23–37, 2024.
- [11] Tharo Zuraidah, Anisah Siti, and Rahman Fatur, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) Surya-Bayu Sebagai Media Pembelajaran," *Semin. Nas. Sinergi Multi Disiplin Sos. Hum. dan Sains Teknol.*, vol. 1, no. 1, pp. 169–182, 2024.
- [12] C. Wardana, I. S. Siswantoro, MT., and . D. S. S. T. . M. E., "Pengaruh Kontroler Maximum Power Point Tracking (Mppt) Terhadap Efisiensi Daya Vertical Axis Wind Turbine (Vawt) Tipe Savonius Dua Sudu," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 4, no. 3, pp. 209–223, 2023, doi: 10.14710/jebt.2023.19034.
- [13] F. Rahman, I. Nurjannah, H. N. Sari, A. Christian, and M. K. Hidayat, "Optimalisasi Metode Blade Turbin Angin Sumbu Horizontal," *Otopro*, vol. 18, no. 2, pp. 59–64, 2023, doi: 10.26740/otopro.v18n2.p59-64.