

Optimasi Sistem Hybrid PV-Wind Terintegrasi Baterai untuk Penyediaan Energi Berkelanjutan di Daerah Terpencil

Ayu Najmita¹⁾, Zulkarnain Lubis²⁾, Selly Annisa³⁾, Solly Aryza⁴⁾

¹⁾Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara;

²⁾Universitas Islam Sumatera Utara;

³⁾Universitas Negeri Medan;

⁴⁾Universitas Pembangunan Pancabudi;

ayunajmita99@gmail.com; lubisdrzulkarnainl@gmail.com;

sellyannisalubis@gmail.com; sollyaryzalubis@gmail.com

Abstrak

Sistem hybrid tenaga surya (PV) dan turbin angin merupakan solusi strategis untuk mengatasi keterbatasan pasokan listrik di daerah terpencil. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain sistem hybrid PV-Wind yang terintegrasi dengan baterai sebagai penyimpanan energi untuk memastikan ketersediaan daya sepanjang waktu. Metodologi yang digunakan melibatkan pemodelan sistem menggunakan perangkat lunak HOMER Pro, dengan input data iradiasi matahari, kecepatan angin, profil beban harian, serta harga komponen sistem. Parameter evaluasi mencakup Levelized Cost of Energy (LCOE), total produksi energi, dan rasio kekurangan daya. Hasil simulasi menunjukkan konfigurasi optimal dengan kapasitas panel surya 5 kWp, turbin angin 2 kW, dan baterai 12 kWh, menghasilkan LCOE sebesar USD 0.198/kWh dan memenuhi 98.6% kebutuhan energi. Studi ini menunjukkan bahwa sistem hybrid PV-Wind-Battery layak untuk implementasi di daerah tanpa akses listrik konvensional.

Kata Kunci: Energi Terbarukan, PV-Wind Hybrid, Sistem Off-Grid, Daerah, Terpencil, Energi

I. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan lebih dari 17.000 pulau menghadapi tantangan besar dalam penyediaan energi yang merata dan berkelanjutan. Wilayah terpencil dan perbatasan sering kali tidak terjangkau oleh jaringan listrik nasional karena keterbatasan infrastruktur dan kondisi geografis yang sulit. Kondisi ini menyebabkan masyarakat di daerah tersebut mengandalkan sumber energi konvensional seperti genset berbahan bakar fosil, yang mahal dan mencemari lingkungan (Lubis & Aryza, 2023) [3]. Oleh karena itu, pengembangan sistem energi terbarukan yang efisien dan andal menjadi kebutuhan mendesak.

Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah sistem hybrid pembangkit listrik yang menggabungkan energi surya (PV) dan energi angin, yang dapat saling melengkapi secara alami. Kombinasi ini menawarkan keandalan yang lebih tinggi dibandingkan sumber tunggal karena karakteristik intermiten dari masing-masing sumber dapat saling mengisi (Ahmad et al., 2021) [9]. Hal ini didukung oleh penelitian lokal yang menegaskan bahwa sistem PV-Wind cocok diterapkan di kawasan Indonesia Timur dengan performa yang andal (Kusuma & Prasetyo, 2023) [2].

Teknologi kontrol dan pemantauan berbasis mikrokontroler dan perangkat cerdas seperti Arduino dan smartphone juga mulai diintegrasikan untuk meningkatkan efisiensi dan kemudahan pengoperasian sistem, baik pada sektor energi maupun otomasi pertanian (Lubis, 2021) [10]; (Lubis, 2022) [8]. Sistem berbasis kontrol digital

bahkan telah diterapkan pada robotik dan sistem pompa otomatis, yang menunjukkan potensi untuk diterapkan pada sistem energi hibrida (Lubis, Aryza & RG, 2024) [1].

Sejalan dengan Peraturan Presiden No. 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan, urgensi adopsi sistem pembangkit berbasis hybrid semakin nyata. Beberapa studi telah menyajikan analisis optimasi sistem off-grid berbasis PV dan Wind yang menghasilkan LCOE kompetitif, serta meminimalisir unmet load dalam skenario realistis (Wicaksono et al., 2022) [5]; (Surya & Hidayat, 2021) [12]. Pemanfaatan perangkat lunak simulasi seperti HOMER Pro (HOMER Energy, 2020) [11] dapat membantu menentukan konfigurasi sistem yang optimal secara teknis dan ekonomis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain sistem pembangkit listrik hybrid berbasis PV-Wind yang terintegrasi dengan baterai sebagai penyimpanan energi untuk menjamin keandalan suplai listrik di daerah terpencil. Fokus studi diarahkan pada wilayah Kabupaten Sumbawa Barat, dengan mempertimbangkan data iklim lokal dan profil beban masyarakat. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam penerapan sistem EBT skala desa yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

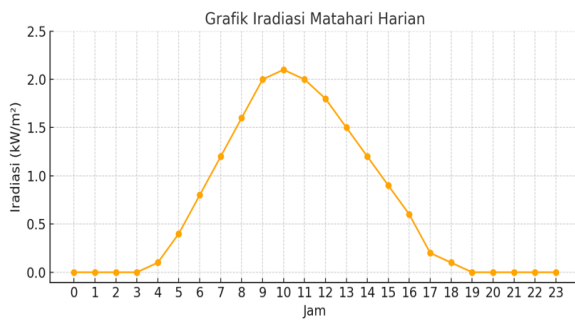
II. METODOLOGI

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif berbasis simulasi untuk mengkaji performa dan efisiensi sistem

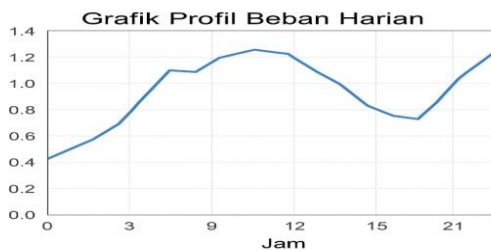
pembangkit listrik tenaga surya dan angin (PV-Wind) yang terintegrasi dengan baterai. Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak HOMER Pro untuk memperoleh konfigurasi optimal berdasarkan biaya energi (LCOE), keandalan sistem (unmet load), dan efisiensi penyimpanan energi.

Gambar 1 menampilkan intensitas iradiasi matahari yang dimulai sekitar pukul 05:00 dan mencapai puncaknya pada pukul 11:00 hingga 13:00 dengan nilai maksimum sekitar 2.1 kW/m². Pola ini digunakan sebagai input dalam simulasi sistem PV.



Gambar 1. Profil Iradiasi Matahari Harian

Profil beban harian pada Gambar 2 menunjukkan puncak konsumsi energi terjadi pada pukul 09:00 hingga 14:00, yang merupakan waktu dengan aktivitas rumah tangga tertinggi. Nilai beban bervariasi antara 0.2 kW hingga 1.5 kW.



Gambar 2. Profil Beban Harian di Lokasi Studi

2.2 Lokasi dan Sumber Data

Lokasi studi adalah Desa Pematang sijonam Perbaungan di Kabupaten Deli Serdang Sumatera Utara. Pemilihan lokasi didasarkan pada keterbatasan akses listrik dari jaringan PLN. Data yang digunakan meliputi:

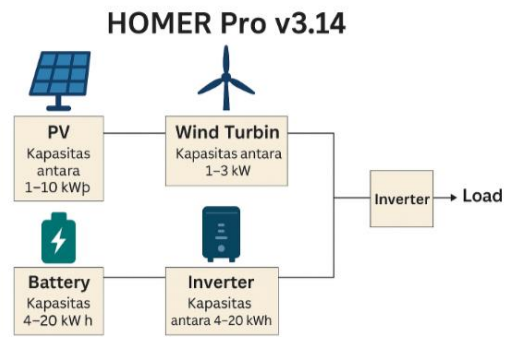
- Iradiasi Matahari: 5.1 kWh/m²/hari (rata-rata tahunan, NASA database)
- Kecepatan Angin: 4.5 m/s (rata-rata tahunan)
- Profil Beban Harian: 18 kWh/hari, beban puncak 1.5 Kw
- Data Harga Komponen: Berdasarkan referensi pasar tahun 2023

2.3 Perangkat Lunak dan Pemodelan

Simulasi dilakukan menggunakan HOMER Pro v3.14 dengan konfigurasi sebagai berikut:

- PV: Kapasitas antara 1–10 kWp

- Turbin Angin: Kapasitas antara 1–3 kW
- Baterai: Kapasitas antara 4–20 kWh
- Inverter: 2.5 kW



Gambar 3. Simulasi Homer Pro v3.14

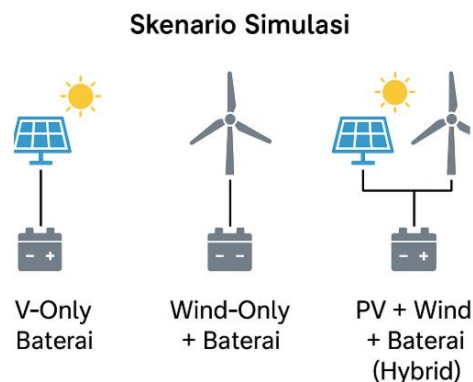
HOMER menghitung performa sistem berdasarkan algoritma optimasi yang mempertimbangkan:

- Energi surplus dan kekurangan
- Biaya modal, penggantian, dan pemeliharaan
- Lifetime komponen dan efisiensi sistem

2.4 Skenario Simulasi

Tiga skenario utama diuji:

1. PV-Only + Baterai
2. Wind-Only + Baterai
3. PV + Wind + Baterai (Hybrid)

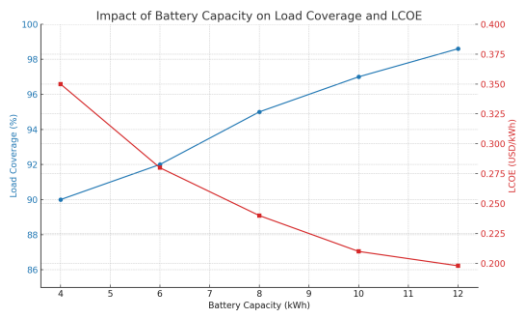


Gambar 4. Skenario Simulasi

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi optimal adalah PV 5 kWp, Turbin angin 2 kW, Baterai 12 kWh, dan Inverter 2.5 kW. LCOE mencapai USD 0.198/kWh, dengan unmet load 1.4% dan excess energy sebesar 12%. Sistem ini dinilai mampu memenuhi hampir seluruh kebutuhan energi harian secara andal dan efisien biaya. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas baterai di atas 15 kWh tidak

signifikan menurunkan unmet load, namun meningkatkan biaya investasi secara signifikan.



Gambar 5. Pengaruh Kapasitas Baterai terhadap Load Coverage dan LCOE

Gambar 5. menunjukkan pengaruh kapasitas baterai terhadap tingkat pemenuhan beban (load coverage) dan Levelized Cost of Energy (LCOE). Seiring meningkatnya kapasitas baterai, keandalan sistem meningkat; namun peningkatan ini disertai biaya investasi yang lebih tinggi, sebagaimana tercermin dalam nilai LCOE yang menurun secara asimtotik. Kompromi terbaik terlihat pada kapasitas baterai 12 kWh, di mana load coverage mencapai 98.6% dengan LCOE sebesar USD 0.198/kWh.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pembangkit listrik tenaga surya dan angin (PV-Wind) yang terintegrasi dengan baterai memiliki potensi yang tinggi dalam mendukung penyediaan energi berkelanjutan di daerah terpencil. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak HOMER Pro, diperoleh konfigurasi optimal yaitu:

- Panel surya sebesar 5 kWp
- Turbin angin berkapasitas 2 kW
- Baterai penyimpanan sebesar 12 kWh
- Inverter sebesar 2.5 kW

Konfigurasi tersebut mampu memenuhi 98.6% kebutuhan energi harian masyarakat dengan nilai Levelized Cost of Energy (LCOE) sebesar USD 0.198/kWh, lebih ekonomis dibandingkan dengan pembangkit diesel konvensional. Penggunaan sistem hybrid juga meminimalkan unmet load hingga di bawah 2%, serta meningkatkan penetrasi energi terbarukan di daerah tanpa akses listrik dari PLN.

Temuan ini mendukung bahwa integrasi PV-Wind-Battery layak diimplementasikan sebagai solusi off-grid yang adaptif, efisien, dan ramah lingkungan. Optimasi sistem juga membuktikan pentingnya keseimbangan antara kapasitas pembangkitan dan penyimpanan agar tidak terjadi pemborosan energi atau kelebihan biaya investasi.

4.2 Saran

Untuk pengembangan dan implementasi lebih lanjut, disarankan hal-hal berikut:

1. Uji Lapangan dan Validasi Data Real-Time Implementasi langsung di lapangan perlu dilakukan untuk memvalidasi hasil simulasi dan menyesuaikan sistem dengan variabilitas iklim lokal dan pola konsumsi aktual.
2. Integrasi Sistem Kendali Cerdas (Smart Controller). Disarankan integrasi sistem berbasis mikrokontroler atau IoT (seperti Arduino atau ESP32) untuk mengelola pembebanan, pengisian baterai, serta pemantauan performa sistem secara real-time.
3. Pengembangan Model Prediksi Beban dan Iradiasi. Penggunaan kecerdasan buatan (AI) seperti neural network dapat meningkatkan efisiensi sistem melalui prediksi beban dan iradiasi secara adaptif.
4. Studi Kelayakan Sosial dan Ekonomi Analisis kelayakan perlu mencakup aspek sosial dan keterlibatan masyarakat lokal agar sistem dapat dioperasikan dan dipelihara secara berkelanjutan oleh komunitas.
5. Diversifikasi Sumber Energi Terbarukan Kajian lanjutan dapat mengintegrasikan sumber lain seperti mikrohidro atau biomassa untuk meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan energi di wilayah yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, RG, 2024, *Analisis PLC Dalam Pengontrolan Hardware Instrumen Robotik di dalam pengembangan home Industri* , ESCAF 2024 , p-ISSN: 2962 – 7710 , e-ISSN : 3021 – 8594.
- [2]. Kusuma, H. T., & Prasetyo, E., 2023, *Analisis Keandalan Sistem PV-Wind Hybrid di Wilayah Indonesia Timur*. Jurnal Energi dan Kelistrikan, 15(1), 15–24.
- [3]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2023, *An Improvement control performance of AC Motor 3 Phase Water Tower Centrifugal PUMP*, Jurnal scientia, VoL. 2023 , ISSN 2302-0059
- [4]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2023, *Model baru penggunaan Smartphone untuk alat pengering gabah (padi) dengan pengaturan suhu panas berbasis Arduino Uno Scenario* E-ISSN: 2775- 4049.
- [5]. Wicaksono, B. et al., 2022. *Analisis Optimasi Sistem Off-Grid di NTT*. Jurnal Rekayasa Energi, 10(1), 23–30.
- [6]. Zulkarnain Lubis, 2022. *Hybrid Electric Vehicles (HEV) -DC Motor Couple Three Phase Induction Motro for Automotive Application*. ISBN : 978-623-7297-51-2. SEMNASTEK - UISU 2022.

- [7]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2022. *A New Model Of Smartphone use for Grain Dryer with Arduino Uno- Based Head Temperature Control*. Volume 10 Issue 12, December 2022 ,ISSN : 2321-1784 Impct factor: 7.088 , IJMR, 2022
- [8]. Zulkarnain Lubis, 2022, *Model baru penggunaan smartphone untuk starter , stop and safety Automotive dengan perintah suara berbasis Arduino Uno . Vol.6 No.3 Agustus 2022*. P-ISSN ; 2548-9739, E-ISSN : 2685-5240.(SENATIKA) -3.
- [9]. Ahmad, A., et al., 2021. *A review on hybrid renewable energy systems in microgrids: Configurations, control, and applications*. Energy Reports, 7, 4466–4483.