

PERANCANGAN SISTEM PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK HYBRID PLTS DAN PLTB UNTUK VILLA DAN PETERNAKAN DI PESISIR PANTAI PARANGTRITIS BERBASIS HOMER ENERGY

Ahmad Rifqi Apriyanto¹, Imam Taufiqurrahman²

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi ^{1,2}

Email: ahmadrifqi082004@gmail.com

Informasi	Abstract
Volume : 3 Nomor : 10 Bulan : Oktober Tahun : 2026 E-ISSN : 3062-9624	<i>The coastal area of Parangtritis Beach, Bantul Regency, Special Region of Yogyakarta, is experiencing growth in tourism facilities and livestock farming that demands a reliable electricity supply, while the reliability of the distribution network in coastal areas remains limited. This study aims to design a hybrid PV–wind power generation system to serve the combined load of a villa and a horse farm through simulation and optimisation using HOMER Energy software. Resource data were obtained from the NASA POWER database, with an annual average global horizontal irradiance (GHI) of 4.80 kWh/m²/day, an annual average wind speed of 4.24 m/s at 50 m height, and an average air temperature of 24.80 °C. The load profile was constructed hourly over 24 hours, yielding a daily energy demand of approximately 47–48 kWh/day. Initial capacity sizing was performed analytically for the PV array, the number of wind turbines, and the battery bank, and was subsequently verified through HOMER optimisation. The optimal configuration consists of a 12.0 kW PV system (400 Wp monocrystalline modules), five Aeolos-V1kW wind turbines (5.00 kW total), ten Fortress Power LFP-10 Lithium Ferro Phosphate batteries (96 kWh total), and a Schneider Conext XW+ 5548 converter. The system produces 20,185 kWh annually, with contributions of 78.8% from PV and 21.2% from wind, serving an AC primary load of 16,356 kWh/year with 2,539 kWh (12.6%) of excess electricity. Economically, the system yields a Net Present Cost (NPC) of IDR 330,581,600.00 and a Levelized Cost of Energy (COE) of IDR 1,053.13/kWh with an annual operating cost of IDR 7,730,206.00. These results indicate that the hybrid PV–wind system is technically feasible and economically competitive for autonomous energy supply in the southern coastal region of Java.</i> Keyword: renewable energy, HOMER Energy, PV–wind hybrid, levelized cost of energy, Parangtritis.

Abstrak

Kawasan pesisir Pantai Parangtritis, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, mengalami pertumbuhan fasilitas wisata dan peternakan yang menuntut pasokan energi listrik yang andal, sementara keandalan jaringan distribusi di wilayah pesisir masih terbatas. Penelitian ini bertujuan merancang sistem pembangkit listrik hibrida PLTS–PLTB untuk melayani beban gabungan villa dan peternakan kuda melalui simulasi dan optimasi menggunakan perangkat lunak HOMER Energy. Data sumber daya diperoleh dari basis data NASA POWER, dengan rata-rata radiasi matahari global horizontal (GHI) tahunan 4,80 kWh/m²/hari, rata-rata kecepatan angin tahunan 4,24 m/s pada ketinggian 50 m, dan suhu udara rata-rata 24,80 °C. Profil beban disusun secara per jam selama 24 jam dan menghasilkan kebutuhan energi harian sekitar 47–48 kWh/hari. Penentuan kapasitas awal dilakukan melalui perhitungan analitis terhadap kapasitas PV, jumlah turbin angin, dan kapasitas

baterai, kemudian diverifikasi melalui optimasi HOMER. Konfigurasi optimal yang diperoleh terdiri atas PLTS 12,0 kW (modul 400 Wp monokristalin), lima unit turbin angin Aeolos-V1kW (total 5,00 kW), sepuluh unit baterai Lithium Ferro Phosphate Fortress Power LFP-10 (total 96 kWh), dan konverter Schneider Conext XW+ 5548. Sistem menghasilkan energi tahunan 20.185 kWh dengan kontribusi PLTS 78,8% dan PLTB 21,2%, melayani beban primer AC 16.356 kWh/tahun dengan kelebihan energi 2.539 kWh (12,6%). Dari sisi ekonomi diperoleh Net Present Cost (NPC) sebesar Rp330.581.600,00 dan Levelized Cost of Energy (COE) sebesar Rp1.053,13/kWh dengan biaya operasi tahunan Rp7.730.206,00. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem hibrida PLTS–PLTB layak secara teknis dan kompetitif secara ekonomi untuk penyediaan energi mandiri di kawasan pesisir selatan Jawa.

Kata Kunci : energi terbarukan, HOMER Energy, hibrida PLTS–PLTB, levelized cost of energy, Parangtritis.

A. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan sektor pariwisata, pertanian, dan peternakan. Perkembangan tersebut terlihat pada meningkatnya pembangunan fasilitas seperti villa wisata dan area peternakan yang membutuhkan pasokan energi listrik yang andal dan berkelanjutan. Namun, ketersediaan energi listrik dari jaringan PLN di beberapa wilayah pesisir sering kali terbatas atau tidak stabil akibat faktor geografis dan infrastruktur distribusi yang belum memadai. Kondisi tersebut menuntut adanya solusi penyediaan energi mandiri yang efisien, ramah lingkungan, serta mampu beroperasi secara kontinu untuk mendukung aktivitas ekonomi di wilayah tersebut [1], [2].

Pemanfaatan sumber energi terbarukan merupakan langkah strategis dalam mengatasi permasalahan tersebut. Energi surya dan energi angin merupakan dua sumber daya alam yang melimpah di wilayah pesisir Indonesia. Radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun serta kecepatan angin yang relatif stabil menjadikan daerah pesisir, seperti Parangtritis, sebagai lokasi yang potensial untuk penerapan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). Kedua sumber energi tersebut memiliki karakteristik yang saling melengkapi: PLTS menghasilkan energi maksimum pada siang hari saat radiasi matahari tinggi, sedangkan PLTB dapat beroperasi baik pada siang maupun malam hari bergantung pada kondisi angin. Kombinasi keduanya dalam bentuk sistem hibrida PLTS–PLTB terbukti mampu meningkatkan keandalan dan kontinuitas suplai energi listrik serta menurunkan kebutuhan kapasitas penyimpanan dibandingkan sistem sumber tunggal [3]–[5].

Dalam konteks kebutuhan energi di kawasan villa dan peternakan kuda, sistem hibrida menjadi pilihan yang sesuai. Villa memerlukan pasokan listrik yang stabil untuk kebutuhan kenyamanan penghuni, seperti penerangan, pendingin ruangan, dan peralatan elektronik.

Sementara itu, peternakan kuda membutuhkan energi untuk keperluan operasional seperti pompa air, mesin pakan otomatis, dan sistem ventilasi kandang. Melalui sistem pembangkit listrik hibrida, kedua sektor tersebut dapat memperoleh pasokan energi yang berkelanjutan tanpa bergantung sepenuhnya pada jaringan PLN, sekaligus berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan energi bersih [6], [7].

Sejumlah penelitian terdahulu telah menunjukkan efektivitas perangkat lunak HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) dalam merancang sistem hibrida berbasis energi terbarukan. Penelitian pada skala rumah tinggal di daerah perbukitan memperlihatkan bahwa kombinasi PLTS dan PLTB off-grid mampu memenuhi kebutuhan penerangan dan aktivitas rumah tangga [8]. Kajian pada tingkat desa terpencil di Indonesia juga menunjukkan bahwa optimasi berbasis HOMER dapat menghasilkan konfigurasi dengan Net Present Cost (NPC) dan Levelized Cost of Energy (COE) terendah untuk berbagai kombinasi sumber daya [9]–[11]. Meskipun demikian, kajian yang secara spesifik merancang sistem hibrida PLTS–PLTB untuk beban gabungan villa dan peternakan di kawasan pesisir selatan Jawa, yang memiliki karakteristik beban campuran antara beban domestik malam hari dan beban operasional siang hari, masih terbatas.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui potensi energi surya dan angin di wilayah pesisir Pantai Parangtritis; (2) menentukan kebutuhan daya listrik untuk villa dan peternakan kuda; (3) merancang sistem pembangkit listrik hibrida PLTS–PLTB menggunakan perangkat lunak HOMER Energy; (4) melakukan simulasi untuk memperoleh konfigurasi sistem yang paling efisien dan ekonomis; serta (5) menganalisis hasil simulasi guna mengetahui kapasitas komponen yang optimal dalam memenuhi kebutuhan energi. Kontribusi penelitian ini terletak pada penyediaan model perancangan sistem hibrida skala kecil berbasis profil beban campuran villa–peternakan yang dapat direplikasi pada kawasan pesisir lain di Indonesia.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi dan optimasi berbantuan perangkat lunak HOMER Energy. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data sumber daya energi, penyusunan profil beban, pemodelan komponen sistem, perhitungan analitis kapasitas komponen, simulasi optimasi, serta analisis teknis dan ekonomis terhadap konfigurasi terbaik.

2.1 Lokasi Penelitian dan Data Sumber Daya Energi

Lokasi perancangan berada di wilayah pesisir Pantai Parangtritis, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Kawasan ini memiliki kondisi geografis terbuka dengan iklim tropis serta merupakan kawasan wisata dan peternakan yang berkembang, sehingga membutuhkan pasokan energi listrik yang andal dan berkelanjutan.

Data sumber daya energi diperoleh dari basis data NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) [12]. Data radiasi matahari berupa Global Horizontal Irradiance (GHI) merupakan rata-rata bulanan untuk periode 1983–2005, sedangkan data kecepatan angin pada ketinggian 50 meter di atas permukaan tanah dan data suhu udara merupakan rata-rata bulanan untuk periode 1984–2013. Ringkasan parameter sumber daya energi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan parameter sumber daya energi lokasi penelitian

Parameter	Rata-rata Tahunan	Nilai Maksimum	Nilai Minimum
Radiasi matahari, GHI (kWh/m ² /hari)	4,80	5,54 (September)	4,28 (Januari)
Kecepatan angin pada 50 m (m/s)	4,24	5,29 (Agustus)	3,35 (Maret)
Suhu udara (°C)	24,80	25,34 (April)	23,62 (Juli)
Indeks kejernihan atmosfer (-)	0,396–0,564	0,564	0,396

Sumber: NASA POWER Database [12]

2.2 Penyusunan Profil Beban

Beban listrik disusun berdasarkan inventarisasi peralatan yang terpasang pada villa dan area peternakan. Rincian jenis beban, daya nominal, jumlah unit, dan pola pemakaian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Daftar beban terpasang pada villa dan peternakan

Jenis Beban	Daya (W)	Jumlah	Total (W)	Keterangan
Lampu LED villa	15	15	225	Penerangan malam
Kipas angin	60	4	240	Siang-malam
Kulkas	150	1	150	24 jam
Pompa air	500	1	500	Operasional 2 jam/hari
Televisi	100	1	100	Malam hari
Charger dan gadget	50	4	200	Malam hari
Peralatan dapur (rice cooker, blender, dll.)	500	1	500	Pagi-siang
Pendingin ruangan (AC)	400	2	800	Malam hari
Lampu kandang	15	10	150	Malam
Pompa air kandang	500	1	500	Pagi-sore
Kipas kandang	80	5	400	Siang

Jenis Beban	Daya (W)	Jumlah	Total (W)	Keterangan
Mesin pakan otomatis	200	1	200	2 jam/hari

Berdasarkan pola operasi masing-masing beban, disusun profil konsumsi energi per jam selama 24 jam sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Profil tersebut membedakan kontribusi beban villa dan beban peternakan agar karakteristik waktu pemakaian dapat direpresentasikan secara akurat pada model HOMER.

Tabel 3. Profil konsumsi beban harian per jam

Jam	Villa (W)	Peternakan (W)	Total (W)	Total (kWh)
00:00	1200	150	1350	1,35
01:00	1200	150	1350	1,35
02:00	1000	150	1150	1,15
03:00	800	150	950	0,95
04:00	800	200	1000	1,00
05:00	1000	400	1400	1,40
06:00	1200	800	2000	2,00
07:00	1500	1200	2700	2,70
08:00	1800	1300	3100	3,10
09:00	1500	1100	2600	2,60
10:00	1300	1000	2300	2,30
11:00	1300	1000	2300	2,30
12:00	1500	1200	2700	2,70
13:00	1200	1000	2200	2,20
14:00	1100	1000	2100	2,10
15:00	1200	1000	2200	2,20
16:00	1300	800	2100	2,10
17:00	1500	500	2000	2,00
18:00	1800	400	2200	2,20
19:00	2200	200	2400	2,40
20:00	2300	200	2500	2,50
21:00	2000	200	2200	2,20
22:00	1600	150	1750	1,75
23:00	1400	150	1550	1,55

Total konsumsi energi harian ≈ 48 kWh/hari; beban harian rata-rata yang digunakan pada perhitungan perancangan sebesar 47,2 kWh/hari.

2.3 Pemodelan Komponen Sistem

Sistem dimodelkan sebagai konfigurasi hibrida dua bus, yaitu bus DC untuk larik fotovoltaik dan baterai, serta bus AC untuk turbin angin dan beban. Kedua bus dihubungkan

melalui konverter dua arah. Spesifikasi teknis dan parameter ekonomi setiap komponen yang dimasukkan ke dalam HOMER dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi teknis dan parameter ekonomi komponen sistem

Komponen	Model / Tipe	Parameter Teknis	Biaya Modal & Penggantian	Biaya O&M / Umur
Panel surya (PLTS)	Solar Panel 400 Wp Mono Crystalline, flat plate, bus DC	Kapasitas 12 kW; derating factor 80%	Rp2.500.000 per kW	Rp50.000/tahun; 25 tahun
Turbin angin (PLTB)	Aeolos-V1kW, bus AC (kode G1)	Daya terukur 1 kW/unit; tinggi poros 17 m; optimasi 1-5 unit	Rp7.000.000 per unit	Rp100.000/tahun; 20 tahun
Baterai	Fortress Power LFP-10 (Lithium Ferro Phosphate), model idealized	48 V; 9,6 kWh (200 Ah) per unit; efisiensi roundtrip 98%; SOC minimum 5%; throughput maksimum 40.000 kWh	Rp5.000.000 per unit	Rp50.000/tahun; 10 tahun
Konverter	Schneider Conext XW+ 5548 (grid-forming dan grid-following)	Efisiensi inverter dan rectifier 93,00%; kapasitas relatif rectifier 92,70%	Rp40.000.000 per unit	Rp800.000/tahun; 10 tahun

Faktor derating sebesar 80% pada larik PV merepresentasikan susut daya akibat suhu lingkungan, kerugian pengawatan, debu, serta degradasi modul. Konverter Conext XW+ 5548 dikonfigurasi agar dapat beroperasi paralel dengan sumber AC lain, sehingga mendukung skema hibrida yang melibatkan turbin angin pada bus AC. Jumlah baterai ditentukan secara otomatis oleh HOMER Optimizer untuk memperoleh ukuran yang paling optimal secara teknis dan ekonomis.

2.4 Formulasi Matematis Perancangan

Kebutuhan energi harian total dihitung sebagai penjumlahan hasil kali daya setiap beban dengan durasi operasinya, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (1).

$$E_{load} = \sum (P_i \times t_i) \quad (1)$$

Energi harian yang harus dipasok oleh PLTS ditentukan melalui fraksi target x terhadap beban total, seperti pada Persamaan (2).

$$E_{PV} = x \times E_{load} \quad (2)$$

Kapasitas puncak larik fotovoltaik dihitung menggunakan Persamaan (3), dengan H

adalah rata-rata radiasi matahari harian ($\text{kWh/m}^2/\text{hari}$) dan PR adalah performance ratio sistem.

$$P_{PV} = E_{PV} / (H \times PR) \quad (3)$$

Fraaksi kontribusi energi angin terhadap total produksi sistem dinyatakan pada Persamaan (4), sedangkan energi rata-rata per turbin dan jumlah turbin yang dibutuhkan dihitung melalui Persamaan (5) dan (6).

$$f_{wind} = (E_{wind,total} / E_{total}) \times 100\% \quad (4)$$

$$E_{per\ turbin} = E_{wind,total} / N \quad (5)$$

$$N = E_{wind,target} / E_{per\ turbin} \quad (6)$$

Kapasitas nominal bank baterai ditentukan berdasarkan energi harian beban, kedalaman pengosongan (Depth of Discharge, DoD), dan efisiensi sistem penyimpanan η , sebagaimana Persamaan (7). Jumlah unit baterai dihitung melalui Persamaan (8) dengan E_{unit} adalah kapasitas energi satu unit baterai.

$$E_{batt} = E_{load} / (DoD \times \eta) \quad (7)$$

$$N_{batt} = E_{batt} / E_{unit} \quad (8)$$

Evaluasi ekonomi pada HOMER didasarkan pada total biaya bersih sekarang (Net Present Cost, NPC) dan biaya energi terlevelisasi (Levelized Cost of Energy, COE). NPC merupakan nilai sekarang dari seluruh biaya siklus hidup sistem dikurangi nilai sekarang pendapatan, yang dihitung melalui Persamaan (9), dengan $C_{ann,tot}$ adalah biaya tahunan total, i tingkat diskonto riil, dan n umur proyek. Faktor pemulihan modal (Capital Recovery Factor, CRF) dinyatakan pada Persamaan (10), sedangkan COE dihitung melalui Persamaan (11) dengan E_{served} adalah energi tahunan yang benar-benar dilayani.

$$NPC = C_{ann,tot} / CRF(i, n) \quad (9)$$

$$CRF(i, n) = [i(1 + i)^n] / [(1 + i)^n - 1] \quad (10)$$

$$COE = C_{ann,tot} / E_{served} \quad (11)$$

Selain itu, kelebihan energi listrik (excess electricity) dinyatakan sebagai selisih antara total produksi dan energi yang dilayani, dinormalisasi terhadap total produksi sebagaimana Persamaan (12).

$$f_{excess} = (E_{total} - E_{served} - E_{losses}) / E_{total} \times 100\% \quad (12)$$

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Potensi Sumber Daya Energi Lokasi

Hasil pengolahan data NASA POWER menunjukkan bahwa nilai rata-rata tahunan GHI di Parangtritis sebesar 4,80 kWh/m²/hari. Radiasi tertinggi terjadi pada bulan September sebesar 5,54 kWh/m²/hari dan terendah pada bulan Januari sebesar 4,28 kWh/m²/hari. Variasi tersebut mencerminkan pengaruh musiman terhadap intensitas penyinaran matahari. Nilai indeks kejernihan atmosfer berkisar antara 0,396 hingga 0,564, yang menunjukkan tingkat kejernihan udara yang cukup baik; nilai yang lebih tinggi mengindikasikan proporsi radiasi langsung yang lebih besar mencapai permukaan bumi. Kecenderungan peningkatan indeks kejernihan dan radiasi terjadi pada periode musim kemarau (Mei–Oktober), yang merupakan waktu optimal bagi produksi energi PLTS.

Data kecepatan angin menunjukkan rata-rata tahunan sebesar 4,24 m/s pada ketinggian 50 meter. Nilai tertinggi tercatat pada bulan Agustus sebesar 5,29 m/s dan terendah pada bulan Maret sebesar 3,35 m/s. Kecepatan angin cenderung meningkat dari Mei hingga September, bertepatan dengan musim kemarau dan arah angin dominan dari tenggara menuju barat laut, sedangkan pada musim penghujan (Desember–Maret) kecepatan angin relatif menurun. Karakteristik ini menunjukkan bahwa wilayah Parangtritis sesuai untuk turbin angin yang dirancang beroperasi pada kecepatan angin sedang.

Suhu udara rata-rata tahunan sebesar 24,80 °C dengan nilai tertinggi pada bulan April (25,34 °C) dan terendah pada bulan Juli (23,62 °C). Rentang variasi suhu antarbulan yang kecil menandakan kondisi iklim tropis pantai selatan Jawa yang dipengaruhi sirkulasi udara laut dan darat. Tidak terdapatnya fluktuasi suhu ekstrem merupakan kondisi yang menguntungkan bagi operasi peralatan energi terbarukan karena membatasi susut daya akibat efek termal pada modul fotovoltaik.

Perlu dicatat bahwa profil musiman kedua sumber daya bersifat komplementer secara parsial: bulan-bulan dengan radiasi tertinggi (September) berdekatan dengan bulan berkecepatan angin tertinggi (Agustus), sehingga puncak produksi kedua pembangkit terjadi pada periode yang berimpit. Kondisi ini berimplikasi pada perlunya kapasitas penyimpanan yang memadai untuk mengelola surplus energi pada musim kemarau dan menutup defisit pada musim penghujan.

3.2 Penentuan Kapasitas Komponen

Berdasarkan profil beban pada Tabel 3, beban harian rata-rata yang digunakan sebagai dasar perancangan adalah 47,2 kWh/hari. Fraksi target kontribusi PLTS ditetapkan sebesar 80% dan PLTB sebesar 20%, sesuai dengan karakteristik sumber daya lokasi yang lebih dominan pada potensi surya.

Dengan menerapkan Persamaan (2), energi harian yang harus dipasok PLTS adalah:

$$E_{PV} = 0,80 \times 47,2 = 37,76 \text{ kWh/hari}$$

Selanjutnya, dengan $H = 4,80 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ dan performance ratio $PR = 0,75$, Persamaan (3) menghasilkan kapasitas puncak larik fotovoltaik sebesar:

$$P_{PV} = 37,76 / (4,80 \times 0,75) \approx 10,49 \text{ kW}_p$$

Dokumen perancangan awal mencatat nilai sebesar 11,185 kWp, yang merefleksikan penggunaan performance ratio efektif sedikit lebih rendah dari 0,75 pada tahap perhitungan manual. Kedua nilai tersebut berada pada rentang yang sama, dan kapasitas terpasang selanjutnya dibulatkan ke atas menjadi 12 kW. Pembulatan ke atas ini memberikan margin perancangan terhadap faktor derating sebesar 80% serta terhadap degradasi modul sepanjang umur pakai 25 tahun, sehingga kapasitas 12 kW digunakan sebagai masukan pada simulasi HOMER.

Untuk komponen PLTB, target fraksi energi angin sebesar 20% dari total produksi sistem. Dengan total produksi tahunan hasil optimasi sebesar 20.185 kWh, target energi angin berdasarkan Persamaan (6) adalah $0,20 \times 20.185 = 4.037 \text{ kWh/tahun}$. Keluaran simulasi HOMER menunjukkan bahwa lima unit turbin Aeolos-V1kW menghasilkan energi total 4.274 kWh/tahun, sehingga energi rata-rata per turbin berdasarkan Persamaan (5) adalah:

$$E_{per \text{ turbin}} = 4.274 / 5 = 854,8 \text{ kWh/tahun}$$

Fraksi kontribusi energi angin berdasarkan Persamaan (4) adalah:

$$f_{wind} = (4.274 / 20.185) \times 100\% = 21,2\%$$

Nilai tersebut sedikit melampaui target 20%, sehingga jumlah lima unit turbin dinilai memadai untuk memenuhi porsi energi angin yang direncanakan tanpa menambah biaya modal secara berlebihan.

Kapasitas bank baterai dihitung menggunakan Persamaan (7) dengan $DoD = 0,6$ dan efisiensi sistem penyimpanan $\eta = 0,9$:

$$E_{batt} = 47,2 / (0,6 \times 0,9) = 47,2 / 0,54 = 87,40 \text{ kWh}$$

Kapasitas nominal yang diperlukan dengan demikian mendekati 90 kWh. Dengan kapasitas satu unit baterai Fortress Power LFP-10 sebesar 9,6 kWh (48 V, 200 Ah), jumlah unit yang dibutuhkan berdasarkan Persamaan (8) adalah:

$$N_{batt} = 87,40 / 9,6 = 9,10 \approx 10 \text{ unit}$$

Pembulatan ke atas menghasilkan 10 unit baterai dengan kapasitas total 96 kWh. Rekapitulasi konfigurasi optimal hasil perancangan dan optimasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Konfigurasi optimal sistem hibrida PLTS–PLTB

Komponen	Model	Kapasitas Terpasang
PLTS	Solar Panel 400 Wp Mono Crystalline	12,0 kW
PLTB	Aeolos-V1kW (G1)	5 unit; total 5,00 kW
Penyimpanan energi	Fortress Power LFP-10 (LFP)	10 unit; total 96 kWh
Konverter	Schneider Conext XW+ 5548	1 unit

3.3 Analisis Produksi Energi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi optimal menghasilkan total energi tahunan sebesar 20.185 kWh. Komponen PLTS menyumbang 15.912 kWh/tahun atau 78,8% dari total energi, sedangkan PLTB menyumbang 4.274 kWh/tahun atau 21,2%. Proporsi ini mendekati target konfigurasi yang ditetapkan, yaitu PLTS 80% dan PLTB 20%. Rekapitulasi produksi energi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Produksi energi tahunan sistem hibrida

Sumber / Parameter	Nilai (kWh/tahun)	Proporsi (%)
PLTS (Solar Panel 400 Wp, 12,0 kW)	15.912	78,8
PLTB (Aeolos-V1kW, 5,00 kW)	4.274	21,2
Total produksi energi	20.185	100,0
Beban primer AC yang dilayani	16.356	81,0
Kelebihan energi (excess electricity)	2.539	12,6

Secara bulanan, produksi energi mencapai puncak pada pertengahan tahun, yaitu periode Mei hingga September, dengan produksi gabungan melampaui 1,5 MWh setiap bulan dan puncak tertinggi dicapai pada bulan Agustus. Pola ini konsisten dengan karakteristik sumber daya yang diuraikan pada Subbab 3.1, yaitu meningkatnya radiasi matahari dan kecepatan angin pada musim kemarau.

Meskipun total produksi mencapai 20.185 kWh, konsumsi beban primer AC hanya sebesar 16.356 kWh sehingga terdapat kelebihan listrik (excess electricity) sebesar 2.539 kWh atau 12,6% dari total produksi berdasarkan Persamaan (12). Sistem juga mencatat nilai maximum renewable penetration sebesar 1.053%, yang menunjukkan bahwa pada kondisi tertentu daya sesaat yang dibangkitkan dari sumber terbarukan jauh melampaui daya beban sesaat. Nilai penetrasi yang tinggi ini menegaskan ketergantungan penuh sistem pada sumber terbarukan, namun sekaligus mengindikasikan perlunya strategi pemanfaatan surplus energi, misalnya melalui penambahan beban tertunda (deferrable load) seperti pemompaan air ke

tangki penyimpanan, pendinginan pakan, atau pengisian kendaraan listrik operasional peternakan. Pemanfaatan semacam ini akan meningkatkan faktor kapasitas sistem tanpa menambah biaya modal pembangkit.

3.4 Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi menunjukkan bahwa arsitektur sistem hibrida optimal memiliki Net Present Cost (NPC) sebesar Rp330.581.600,00 dengan Levelized Cost of Energy (COE) sebesar Rp1.053,13 per kWh dan biaya operasi tahunan sebesar Rp7.730.206,00. Rincian komponen biaya disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Ringkasan indikator dan komponen biaya sistem

Parameter Ekonomi	Nilai
Total Net Present Cost (NPC)	Rp330.581.600,00
Levelized Cost of Energy (COE)	Rp1.053,13 per kWh
Biaya operasi tahunan (operating cost)	Rp7.730.206,00
Total biaya modal awal (capital cost)	Rp182.222.222,22
Total biaya penggantian (replacement cost)	Rp128.521.844,16
Biaya modal panel surya	Rp75.000.000,00
Biaya modal baterai	Rp50.000.000,00
Biaya penggantian baterai Fortress Power LFP-10	Rp73.130.981,54

Dari perspektif biaya komponen, sistem penyimpanan energi (Fortress Power LFP-10) dan panel surya merupakan kontributor terbesar terhadap total NPC. Biaya modal awal tertinggi berasal dari panel surya sebesar Rp75.000.000,00, diikuti komponen baterai sebesar Rp50.000.000,00. Namun demikian, komponen baterai memiliki biaya penggantian tertinggi, yaitu Rp73.130.981,54, karena umur pakai baterai yang ditetapkan selama 10 tahun mengharuskan penggantian beberapa kali sepanjang umur proyek 25 tahun. Dengan demikian, apabila biaya modal dan biaya penggantian dijumlahkan, sistem penyimpanan energi menjadi penggerak biaya jangka panjang yang paling dominan dalam proyek ini, meskipun PLTS memiliki biaya modal awal tertinggi.

Nilai COE sebesar Rp1.053,13/kWh tergolong kompetitif untuk sistem mandiri berbasis energi terbarukan di kawasan pesisir. Sebagai pembandingan, kajian sistem hibrida PLTS–PLTB pada pulau kecil di Indonesia melaporkan nilai COE pada kisaran yang sebanding untuk konfigurasi berbasis penyimpanan baterai [9], [10], sementara penelitian pada komunitas pesisir di wilayah beriklim dingin memperoleh nilai COE yang lebih tinggi akibat kebutuhan kapasitas penyimpanan yang lebih besar [1], [4]. Rendahnya biaya energi pada sistem ini

dipengaruhi oleh tingginya ketersediaan radiasi matahari sepanjang tahun serta penggunaan baterai LFP dengan efisiensi roundtrip 98% yang menekan susut energi pada siklus penyimpanan.

Implikasi praktis dari struktur biaya tersebut adalah bahwa upaya penurunan COE paling efektif dilakukan melalui perpanjangan umur efektif baterai, misalnya dengan pengaturan strategi dispatch yang membatasi kedalaman pengosongan harian, serta melalui pemanfaatan surplus energi sebesar 12,6% agar denominator pada Persamaan (11) meningkat. Sebaliknya, penambahan kapasitas PLTS tanpa penambahan beban produktif berpotensi memperbesar kelebihan energi dan justru menaikkan COE.

3.5 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, profil beban disusun berdasarkan asumsi pola operasi peralatan dan belum diverifikasi melalui pengukuran lapangan, sehingga nilai beban harian aktual dapat berbeda, terutama karena okupansi villa bersifat musiman mengikuti pola kunjungan wisata. Kedua, data sumber daya energi berasal dari basis data satelit NASA POWER dengan resolusi spasial regional dan periode rekaman yang berakhir pada 2005 untuk radiasi dan 2013 untuk angin, sehingga pengukuran in-situ diperlukan untuk validasi, khususnya terhadap kecepatan angin pada tinggi poros 17 meter. Ketiga, analisis belum mencakup kuantifikasi reduksi emisi karbon, analisis sensitivitas terhadap variasi harga komponen dan tingkat diskonto, serta aspek pemeliharaan terkait korosi akibat lingkungan pesisir yang bersifat salin. Aspek-aspek tersebut dapat menjadi arah pengembangan penelitian selanjutnya.

D. KESIMPULAN

Perancangan sistem pembangkit listrik hibrida PLTS–PLTB untuk villa dan peternakan di pesisir Pantai Parangtritis menunjukkan bahwa wilayah tersebut memiliki potensi sumber energi terbarukan yang memadai, ditandai dengan rata-rata radiasi matahari tahunan sebesar 4,80 kWh/m²/hari dan rata-rata kecepatan angin tahunan sebesar 4,24 m/s. Berdasarkan simulasi HOMER Energy untuk memenuhi kebutuhan energi harian rata-rata sekitar 47 kWh/hari, diperoleh konfigurasi sistem yang paling optimal dan ekonomis.

Konfigurasi optimal tersebut terdiri atas PLTS berkapasitas 12,0 kW, PLTB sebanyak 5 unit turbin Aeolos-V1kW dengan total kapasitas 5,00 kW, 10 unit baterai Lithium Ferro Phosphate dengan kapasitas total 96 kWh, dan konverter Schneider Conext XW+ 5548. Sistem ini menghasilkan total energi tahunan sebesar 20.185 kWh dengan kontribusi PLTS sebesar

78,8% dan PLTB sebesar 21,2%, sesuai dengan target fraksi energi yang ditetapkan sebesar 80% dan 20%.

Secara ekonomi, konfigurasi tersebut menghasilkan Net Present Cost (NPC) sebesar Rp330.581.600,00 dan Levelized Cost of Energy (COE) sebesar Rp1.053,13 per kWh. Analisis biaya komponen menunjukkan bahwa meskipun panel surya memiliki biaya modal awal tertinggi sebesar Rp75.000.000,00, komponen baterai menjadi pendorong biaya jangka panjang yang paling dominan dengan biaya penggantian tertinggi senilai Rp73.130.981,54. Tingkat penetrasi energi terbarukan maksimum mencapai 1.053%, yang mengonfirmasi kemampuan sistem dalam menyediakan pasokan energi mandiri berbasis sumber terbarukan, meskipun terdapat kelebihan listrik sebesar 2.539 kWh (12,6% dari total produksi) yang perlu dikelola melalui penambahan beban tertunda agar pemanfaatan energi menjadi lebih optimal.

E. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. S. Islam, B. K. Das, P. Das, dan M. H. Rahaman, "Techno-economic optimization of a zero emission energy system for a coastal community in Newfoundland, Canada," *Energy*, vol. 220, art. no. 119709, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119709.
- [2] M. S. Islami, T. Urmee, dan I. N. S. Kumara, "Developing a framework to increase solar photovoltaic microgrid penetration in the tropical region: A case study in Indonesia," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, art. no. 101311, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101311.
- [3] C. Malanda, A. B. Makokha, C. Nzila, dan C. Zalengera, "Techno-economic optimization of hybrid renewable electrification systems for Malawi's rural villages," *Cogent Engineering*, vol. 8, no. 1, 2021, doi: 10.1080/23311916.2021.1910112.
- [4] C. Li, D. Zhou, H. Wang, Y. Lu, dan D. Li, "Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China," *Energy*, vol. 192, art. no. 116702, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116702.
- [5] E. S. Bayu, B. Khan, I. G. Hagos, O. P. Mahela, dan J. M. Guerrero, "Feasibility analysis and development of stand-alone hybrid power generation system for remote areas: A case study of Ethiopian rural area," *Wind*, vol. 2, no. 1, pp. 68–86, 2022, doi: 10.3390/wind2010005.
- [6] G. M. Shafiullah et al., "Prospects of hybrid renewable energy-based power system: A case study, post analysis of Chipendeke micro-hydro, Zimbabwe," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 73433–73452, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078713.

- [7] N. F. Khairunnisa, Fadilah, Z. Saleh, W. A. Oktaviani, dan Y. Apriani, "Analisis perencanaan energi pada sistem pembangkit listrik hybrid PLTMH–PLTS menggunakan simulasi HOMER Pro," *Jurnal Ampere*, vol. 10, no. 1, 2025, doi: 10.31851/ampere.
- [8] A. E. Lewi, W. P. Muljanto, dan B. R. P. D. Palevi, "Perancangan sistem hybrid PLTS dan PLTB off grid pada skala rumah tinggal di daerah perbukitan," *Magnetika: Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro*, Institut Teknologi Nasional Malang, 2024.
- [9] H. Hidayatullah, I. Adhevina, dan A. B. Muljono, "Desain sistem pembangkit listrik hybrid off-grid menggunakan software HOMER untuk elektrifikasi di Desa Suryawangi, Kecamatan Labuhan Haji, Kabupaten Lombok Timur," *JEITECH (Journal of Electrical Engineering and Information Technology)*, vol. 2, no. 2, pp. 34–44, 2024.
- [10] F. U. Rahman, C. P. Maharani, N. Habiiburrahman, M. D. Pratama, dan A. B. Muljono, "Desain sistem pembangkit listrik optimal on-grid tenaga surya," *JEITECH (Journal of Electrical Engineering and Information Technology)*, vol. 2, no. 2, pp. 45–55, 2024.
- [11] E. Birahmatihi, A. Natsir, dan A. B. Muljono, "Perencanaan penyediaan daya listrik pembangkit listrik tenaga hibrida (PLTMH dan PLTS) di Desa Kawinda To'i menggunakan HOMER," *Dielektrika*, vol. 8, no. 1, pp. 8–14, 2021.
- [12] NASA Langley Research Center, "NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Database." [Daring]. Tersedia: <https://power.larc.nasa.gov>. [Diakses: 2025].