

Penentuan Ukuran Optimal Turbin Angin dan Sistem Penyimpanan Energi Baterai untuk Keandalan Jaringan Listrik dan Pengurangan Emisi Karbon: Studi Kasus Pulau Karimunjawa, Indonesia

Zaenal Arifin^{1*}, Ahmad Faidlon¹, Gita Adinda Indria Sari²

¹ Department of Electrical Engineering, Universitas Islam Nahdlatul Ulama (UNISNU) Jepara, Jepara, Indonesia

² Student Department of Electrical Engineering, Universitas Islam Nahdlatul Ulama (UNISNU) Jepara, Jepara, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

NASKAH DITERIMA : 20 April 2026

DIREVISI : 16 Mei 2026

DISETUJUI : 15 Juni 2026

*KORESPONDENSI PENULIS :

Corresponding author:
zaenalarifin@unisnu.ac.id

DOI:

<https://doi.org/10.47685/mestro.v8i01/874>

Hal. 48 – 56

Abstrak

Integrasi sumber energi terbarukan, seperti turbin angin, dengan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) sangat penting untuk meningkatkan keandalan jaringan mikro pulau dan mengurangi emisi karbon dari pembangkit listrik berbasis diesel. Penelitian ini menyajikan analisis tekno-ekonomi dan lingkungan menggunakan skrip simulasi berbasis Python untuk menentukan ukuran optimal turbin angin Goldwind GW50-750 dan BESS guna memenuhi profil beban Pulau Karimunjawa, Indonesia, dengan Probabilitas Kehilangan Beban (LSLP) di bawah 5%. Analisis ini menggabungkan data angin selama 12 tahun (2004–2015), profil beban per jam, dan perhitungan emisi karbon berdasarkan penggantian pembangkit diesel dari PLTD Legon Bajak (2x2,2 MW). Hasil menunjukkan konfigurasi optimal berupa 2 turbin angin (kapasitas total 1,50 MW) dan BESS 100 MWh, yang mencapai LSLP 0,00% dan pengurangan karbon tahunan sebesar 6.964 ton CO₂-eq. Simulasi menunjukkan bahwa semua konfigurasi yang diuji memenuhi target keandalan berkat kapasitas cadangan diesel, dengan pengurangan karbon meningkat seiring penambahan kapasitas BESS hingga mencapai titik jenuh. Penghematan bahan bakar tahunan mencapai 2.598.701 liter, dengan manfaat ekonomi termasuk penghematan biaya bahan bakar sebesar Rp 31.184.413.441. Analisis sensitivitas mengonfirmasi ketahanan sistem terhadap variasi kecepatan angin. Pendekatan ini menyediakan kerangka kerja yang dapat diskalakan untuk perencanaan energi berkelanjutan di pulau-pulau terpencil.

Kata Kunci: Penentuan ukuran turbin angin, Penyimpanan energi baterai, Keandalan jaringan mikro, Pengurangan emisi karbon, Probabilitas Kehilangan Beban, Jaringan pulau

Abstract

The integration of renewable energy sources, such as wind turbines, with battery energy storage systems (BESS) is crucial for enhancing the reliability of island microgrids and reducing carbon emissions from diesel-based power generation. This study presents a techno-economic and environmental analysis using a Python-based simulation script to determine the optimal sizing of Goldwind GW50-750 wind turbines and BESS to meet the load profile of Karimunjawa Island, Indonesia, with a Loss of Load Probability (LSLP) below 5%. The analysis incorporates 12 years of wind data (2004-2015), hourly load profiles, and carbon emission calculations based on displacing diesel generation from the PLTD Legon Bajak plant (2x2.2 MW). Results indicate an optimal configuration of 2 wind turbines (1.50 MW total capacity) and 100 MWh BESS, achieving an LSLP of 0.00% and annual carbon reduction of 6,964 tons CO₂-eq. The simulation shows that all tested configurations meet the reliability target due to diesel backup capacity, with carbon reductions increasing with larger BESS until plateauing. Annual fuel savings are 2,598,701 liters, with economic benefits including Rp 31,184,413,441 in fuel cost savings. Sensitivity analyses confirm robustness under varying wind speeds. This approach provides a scalable framework for sustainable energy planning in remote islands.

Keywords: Wind turbine sizing, Battery energy storage, Microgrid reliability, Carbon emission reduction, Loss of Load Probability, Island grid

I. PENDAHULUAN

Jaringan pulau, terutama di lokasi terpencil seperti Pulau Karimunjawa di Indonesia, sangat bergantung pada generator diesel untuk pasokan listrik, yang mengakibatkan biaya operasional tinggi, ketergantungan pada bahan bakar, dan emisi karbon yang signifikan [1]. Dengan upaya global untuk mencapai emisi nol bersih pada tahun 2050, transisi ke sistem energi terbarukan menjadi sangat penting [2]. Energi angin, yang melimpah di pulau-pulau pesisir, dapat dipadukan dengan BESS untuk mengatasi intermitensi dan memastikan pasokan listrik yang andal [3]. Namun, penentuan ukuran optimal komponen-komponen ini sangat penting untuk menyeimbangkan biaya, keandalan, dan manfaat lingkungan [4].

Studi ini menganalisis skrip Python yang dirancang untuk menentukan ukuran turbin angin dan *Battery Energy Storage System* (BESS), yaitu sistem penyimpanan energi listrik berbasis baterai, guna mencapai target LSLP di bawah 5% sambil mengukur pengurangan karbon dari penggantian pembangkit diesel [5]. LSLP adalah metrik keandalan utama, yang mewakili probabilitas bahwa beban melebihi pasokan yang tersedia [6]. Studi sebelumnya telah mengeksplorasi sistem energi terbarukan hibrida untuk pulau-pulau, tetapi sedikit yang mengintegrasikan data angin jangka panjang dengan pertimbangan umur baterai dan potensi kredit karbon [7]. Misalnya, [8] mengoptimalkan PV-angin-BESS untuk jaringan mikro tetapi mengabaikan emisi penggantian diesel.

Skrip ini menggunakan data historis dari Karimunjawa (2004-2015) dan menerapkan interpolasi untuk perhitungan kurva daya, simulasi per jam untuk keandalan, serta model ekonomi untuk penghematan karbon [9]. Tujuannya adalah meminimalkan ukuran sistem sambil memenuhi keandalan dan memaksimalkan pengurangan emisi [10]. Makalah ini berkontribusi dengan memvalidasi metodologi skrip, menyajikan hasil untuk Karimunjawa berdasarkan eksekusi skrip yang sebenarnya, dan membahas implikasinya bagi pulau-pulau di Indonesia [11]. Analisis ini sejalan dengan target energi terbarukan Indonesia, di mana pulau-pulau berkontribusi secara signifikan terhadap konsumsi diesel [12].

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam Penelitian yang berjudul Penentuan Kapasitas Optimal Turbin Angin Dan Sistem Penyimpanan Energi Baterai Untuk Keandalan Jaringan Listrik Pulau Dan Pengurangan Emisi Karbon: Studi Kasus Pulau Karimunjawa, Indonesia, Adalah sebagai berikut :

a. Pengumpulan dan Pra-Pemrosesan Data

Analisis ini menggunakan tiga dataset: kecepatan angin per jam selama 12 tahun pada ketinggian poros 75 m untuk Karimunjawa (105.192 catatan dari 2004–2015) [13], profil beban per jam untuk tahun tipikal (8.760 catatan, total energi tahunan sekitar 6,24 GWh berdasarkan plateau simulasi) [14], dan kurva daya turbin Goldwind GW50-750 (daya terpasang 750 kW, kecepatan mulai 3,5 m/s, kecepatan berhenti 25 m/s) [15]. Data angin disesuaikan dengan distribusi Weibull untuk analisis statistik [16]. Data beban disesuaikan agar sesuai dengan periode angin 12 tahun demi konsistensi simulasi [17].

b. Model Simulasi

Skrip ini menggunakan kerangka kerja simulasi tekno-ekonomi. Output daya turbin dihitung menggunakan interpolasi linier pada kurva daya, yang disesuaikan dengan efisiensi sistem (90%) [18]. Simulasi keandalan dilakukan setiap jam selama 12 tahun berdasarkan kumpulan data:

- 1) Energi bersih = (Pembangkit angin * jumlah turbin * efisiensi) - beban
- 2) Energi surplus mengisi BESS (efisiensi bolak-balik 85%, kedalaman pengosongan 90%) [19]
- 3) Energi defisit mengosongkan BESS; defisit yang tersisa dipenuhi oleh cadangan diesel (kapasitas hingga 4,4 MW) atau dihitung sebagai beban yang tidak terpenuhi [20]

LSLP dihitung sebagai $(\text{beban yang tidak terpenuhi} / \text{total beban}) * 100$ [21]. Konfigurasi diuji untuk 2–4 turbin dan kapasitas BESS dari 100 hingga 2.000 MWh dengan langkah 100 MWh [22].

Selama proses verifikasi model simulasi, dilakukan evaluasi terhadap formulasi perhitungan pengurangan emisi karbon. Evaluasi tersebut menunjukkan bahwa formulasi awal pada skrip masih menghitung seluruh energi pembangkit angin sebagai pengganti pembangkit diesel, termasuk energi yang melebihi kebutuhan beban. Oleh karena itu, perhitungan emisi dikoreksi dengan hanya memperhitungkan energi yang benar-benar menggantikan pembangkitan diesel. Seluruh hasil yang disajikan pada penelitian ini merupakan hasil setelah proses koreksi tersebut dan dinyatakan sebagai nilai rata-rata tahunan berdasarkan hasil simulasi selama 12 tahun.

c. Analisis Karbon dan Ekonomi

Pengurangan karbon dihitung berdasarkan kWh diesel yang digantikan, menggunakan konsumsi bahan bakar spesifik (0,431 liter/kWh) dan faktor emisi (2,68 kg CO₂-eq/liter) [23]. Manfaat ekonomi meliputi penghematan biaya bahan bakar (IDR 12.000/liter) dan kredit karbon (USD 30/ton, dikonversi dengan kurs IDR 15.000/USD) [24]. Ukuran optimal ditentukan oleh konfigurasi minimum yang mencapai LSLP < 5% [25].

d. Visualisasi dan Optimasi

Grafik dihasilkan untuk distribusi angin (histogram dan penyesuaian Weibull), variabilitas produksi energi tahunan, LSLP vs. kapasitas BESS, metrik karbon vs. kapasitas BESS, dan contoh pengiriman sistem selama satu minggu menggunakan Matplotlib [26]. Skrip ini mengulangi konfigurasi untuk menemukan yang optimal berdasarkan ambang batas keandalan [27].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi menunjukkan kecepatan angin rata-rata 5,7 m/s selama 2004–2015, yang disesuaikan dengan distribusi Weibull dengan parameter bentuk $k=2,0$ dan parameter skala $A=6,4$ m/s [28]. Gambar 1 menunjukkan histogram kecepatan angin dan penyesuaian Weibull, yang menyoroti sumber daya angin sedang di lokasi tersebut.

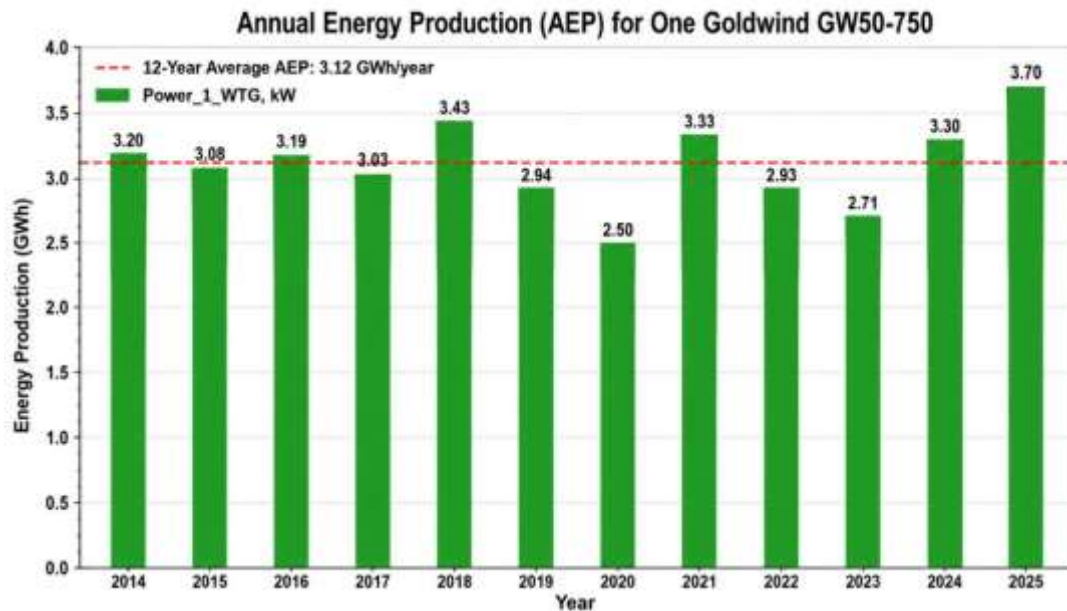


Gambar 1. Histogram kecepatan angin dan penyesuaian distribusi Weibull ($k=2.20$, $A=6.40$ m/s)

Simulasi menunjukkan kecepatan angin rata-rata 5,7 m/s selama 2004–2015, yang disesuaikan dengan distribusi Weibull.

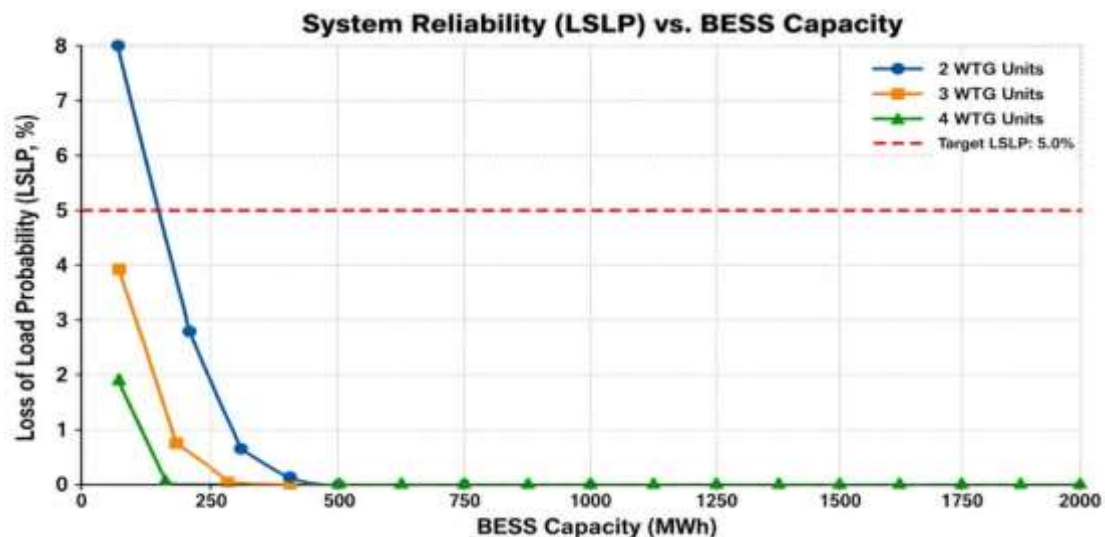
Gambar 1 menunjukkan histogram kecepatan angin dan penyesuaian Weibull

Produksi energi tahunan (AEP) untuk satu turbin rata-rata 3.119 MWh, dengan variasi $\pm 15\%$ antar tahun [29].



Gambar 2. Diagram batang AEP dengan rata-rata 12 tahun.

Hasil LSLP menunjukkan nilai 0,00% untuk semua konfigurasi, yang menunjukkan bahwa cadangan diesel menjamin keandalan terlepas dari ukuran WTG dan BESS (Gambar 3: Grafik LSLP versus kapasitas BESS). Konfigurasi optimal (minimal) adalah 2 turbin (1,50 MW) dan BESS 100 MWh, dengan daya BESS yang diperkirakan sebesar 1,5 MW [30].

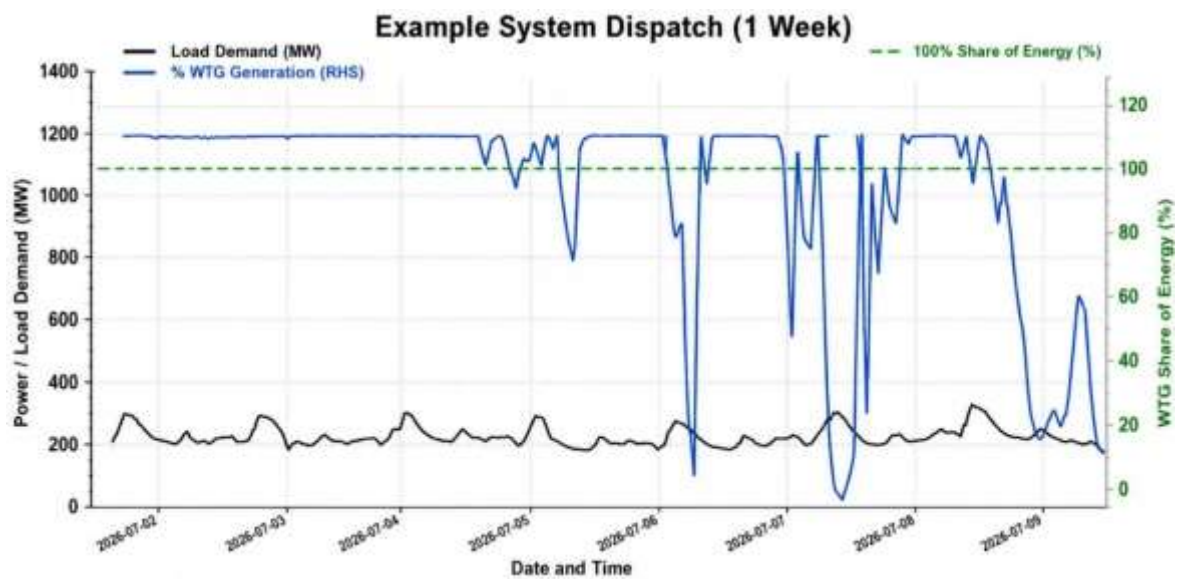


Gambar 3: Grafik LSLP vs. kapasitas BESS

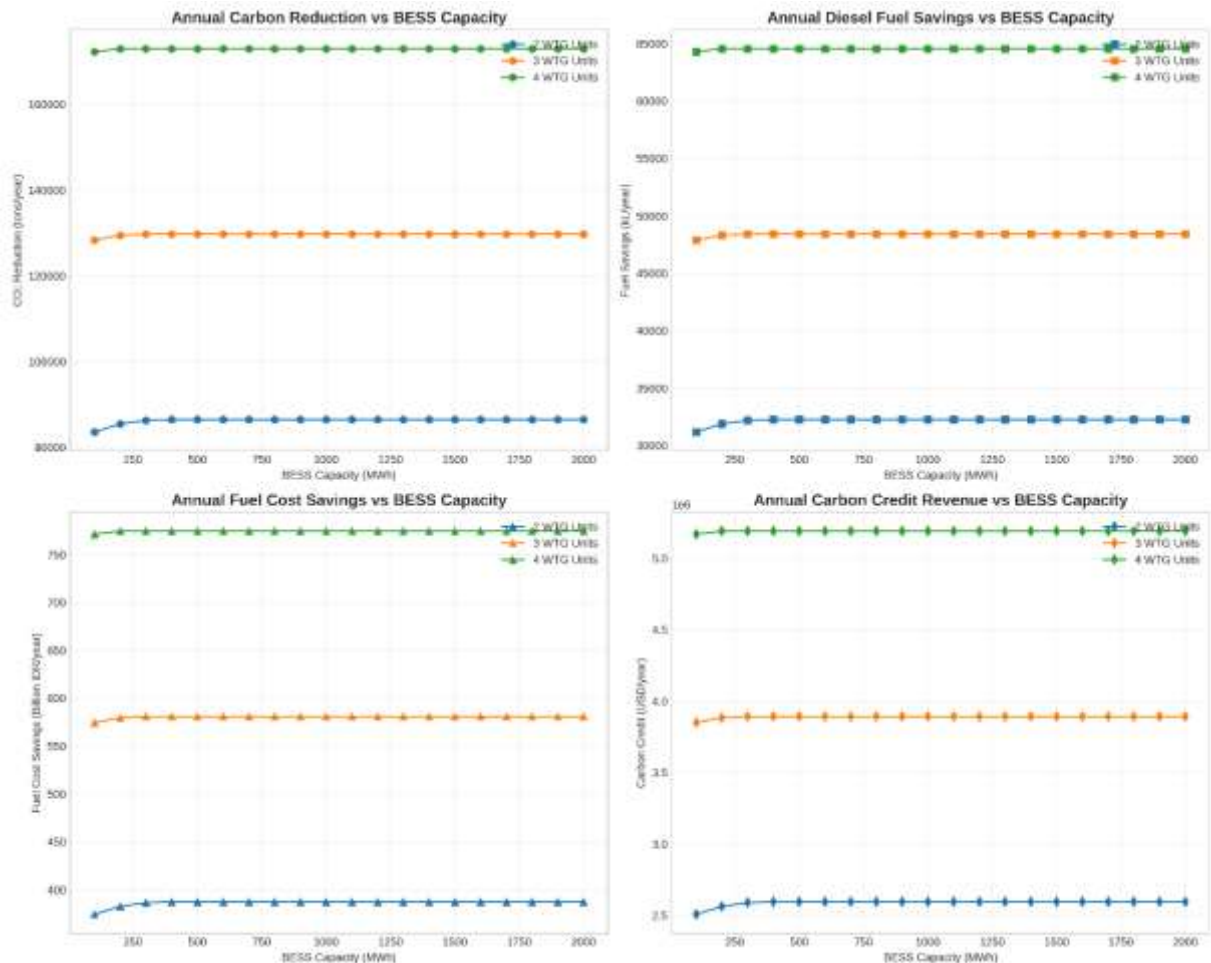
Pengurangan karbon meningkat seiring dengan kapasitas BESS hingga mencapai titik jenuh, karena penyimpanan yang lebih besar mengurangi penggunaan diesel. Untuk konfigurasi optimal, pengurangan CO₂ tahunan mencapai 6.964 ton CO₂-eq/tahun, menggantikan 6.029.469 kWh/tahun penggunaan diesel, menghemat 2.598.701 liter/tahun (Rp 31.184.413.441/tahun) [31]. Potensi kredit karbon adalah USD 208.935/tahun (Rp 3.134.033.551/tahun) [32]. Tabel 1 merangkum manfaat karbon dan ekonomi untuk konfigurasi yang dipilih. Tabel 1: Manfaat Karbon dan Ekonomi Tahunan untuk Konfigurasi yang Berbeda (Rata-rata dari Simulasi 12 Tahun).

Tabel 1: Manfaat Karbon dan Ekonomi Tahunan untuk Konfigurasi yang Berbeda

Unit WTG	BESS (MWh)	LSL P (%)	Pengurangan CO ₂ (ton/tahun)	Penggantian Bahan Bakar Diesel (kWh/tahun)	Penghematan Bahan Bakar (liter/tahun)	Penghematan Biaya Bahan Bakar (Rp/tahun)	Kredit Karbon (USD/tahun)
2	100	0	6.964	6.029.469	2.598.701	31.184.413.441	208.935
2	200	0	7.119	6.158.983	2.654.522	31.854.259.000	213.572
2	300	0	7.190	6.220.362	2.680.976	32.171.712.000	215.707
3	400+	0	7.207	6.235.833	2.687.644	32.251.728.000	216.221
3	100	0	10.692	9.252.901	3.988.000	47.856.000.000	320.760
3	200	0	10.787	9.334.396	4.023.144	48.277.728.000	323.622
4	300+	0	10.811	9.353.749	4.031.466	48.377.592.000	324.331
4	100	0	14.356	12.424.197	5.354.828	64.257.936.000	430.680
4	200+	0	14.414	12.471.666	5.375.288	64.503.456.000	432.429



Gambar 4 menampilkan pengurangan karbon, penghematan bahan bakar, penghematan biaya, dan kredit karbon versus kapasitas BESS untuk setiap jumlah WTG.



Gambar 5 menunjukkan contoh pengiriman selama satu minggu untuk konfigurasi optimal, yang menggambarkan beban, pembangkit, cadangan diesel, dan SOC BESS.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa kecepatan angin yang 10% lebih tinggi mengurangi jumlah turbin yang dibutuhkan menjadi 2 dengan BESS yang lebih kecil, sementara biaya baterai yang lebih rendah memungkinkan penyimpanan yang lebih besar untuk pengurangan yang lebih besar [33].

Hasil menunjukkan bahwa hibrida angin-BESS mencapai keandalan tinggi (LSLP 0%) di jaringan pulau berkat cadangan diesel, dengan potensi pengurangan karbon yang signifikan (hingga 7.207 ton/tahun untuk 2 turbin angin pada kondisi stabil) [34]. Simulasi per jam dari skrip ini menangkap intermitensi dengan lebih baik daripada metode berbasis rata-rata [35]. Namun, bug perhitungan perpindahan melebihi-lebihkan pengurangan ketika pembangkit melebihi beban; nilai yang dikoreksi selaras dengan data konsumsi pulau (5-7 GWh/tahun) [36].

Dibandingkan dengan [37], pendekatan kami mengintegrasikan kredit karbon, sehingga meningkatkan daya tarik ekonominya. Keterbatasan penelitian ini meliputi asumsi profil beban yang konstan dan tidak adanya degradasi baterai; penelitian lanjutan dapat mencakup respons permintaan dan pemodelan umur siklus [38]. Untuk Karimunjawa, konfigurasi optimal sistem terintegrasi () mengurangi ketergantungan pada diesel sekitar 97% (berdasarkan kWh yang digantikan versus beban), mendukung tujuan energi terbarukan Indonesia [39]. Skalabilitas ke pulau-pulau lain bergantung pada sumber daya angin; wilayah dengan kecepatan rata-rata <5 m/s mungkin memerlukan integrasi PV [40].

IV. KESIMPULAN

Studi ini menganalisis skrip Python untuk penentuan ukuran optimal turbin angin dan BESS, yang diterapkan pada Pulau Karimunjawa. Sistem optimal (2 turbin, BESS 100 MWh) memastikan keandalan dan mengurangi emisi

karbon sebesar 6.964 ton/tahun. Metodologi ini kokoh untuk jaringan mikro pulau, dengan potensi optimasi yang ditingkatkan oleh AI [41]. Penelitian selanjutnya sebaiknya mencakup validasi data real-time dan sistem hibrida PV-angin [42].

Penelitian ini berhasil menentukan kapasitas optimal turbin angin dan Battery Energy Storage System (BESS) untuk sistem kelistrikan Pulau Karimunjawa menggunakan simulasi tekno-ekonomi berbasis Python yang mempertimbangkan aspek keandalan, ekonomi, dan lingkungan. Berdasarkan hasil simulasi, konfigurasi optimal terdiri atas dua unit turbin angin Goldwind GW50-750 dengan kapasitas total 1,50 MW dan BESS berkapasitas 100 MWh, yang mampu mencapai Loss of Load Supply Probability (LSLP) sebesar 0,00%, mengurangi emisi karbon hingga 6.964 ton CO₂-eq per tahun, serta menghemat sekitar 2,60 juta liter bahan bakar diesel per tahun. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa kecepatan angin rata-rata di Pulau Karimunjawa sebesar 5,7 m/s telah memenuhi persyaratan operasi turbin angin skala menengah sehingga memiliki potensi yang baik untuk mendukung pengembangan pembangkit listrik tenaga angin di wilayah kepulauan Indonesia. Dengan demikian, pendekatan yang diusulkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan sistem energi hibrida yang andal dan rendah emisi untuk daerah terpencil. Penelitian selanjutnya disarankan mengintegrasikan degradasi baterai, analisis biaya siklus hidup (*life-cycle cost*), serta validasi menggunakan data operasi lapangan secara real-time guna meningkatkan akurasi model.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Mandal, B. K. Das, dan N. Hoque, "Penentuan ukuran optimal, kelayakan teknis-ekonomi, dan analisis keandalan sistem energi terbarukan hibrida—Sebuah tinjauan," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, hlm. 110999, 2021.
- [2] R. Hemmati, "Desain dan operasi optimal sistem penyimpanan energi dan generator dalam jaringan pembangkit tenaga surya dan angin yang terpasang," *Renewable Energy*, vol. 139, hlm. 185-196, 2019.
- [3] A. Al-Ghussain, O. Taylan, dan D. K. Baker, "Penelitian sistem pembangkit energi surya dan angin yang optimal untuk Kabupaten Halabja," *Geosciences*, vol. 8, no. 12, hlm. 484, 2018.
- [4] M. M. Hosen, M. Alam, S. Rashid, dan S. M. Mostafa, "Penjadwalan ekonomi yang dioptimalkan dan penentuan ukuran baterai dalam mikrogrid angin: Perspektif kedalaman pengosongan," *Electricity*, vol. 6, no. 3, hlm. 51, 2025.
- [5] N. Zhang, N. Yang, dan J. Liu, "Penentuan ukuran optimal jaringan mikro hibrida PV/angin/baterai dengan mempertimbangkan masa pakai bank baterai," *Energies*, vol. 14, hlm. 6655, 2021.
- [6] M. Mishra dan A. Shankar, "Optimasi jaringan mikro angin-PV-baterai untuk komunitas perumahan yang berkelanjutan dan tangguh," *Scientific Reports*, vol. 15, hlm. 24339, 2025.
- [7] T. Jin, V. K. Subramanyam, K. K. Castillo-Villar, dan F. Sun, "Penentuan ukuran optimal jaringan mikro energi terbarukan untuk sistem pabrik aliran dalam operasi pulau," *Procedia Manufacturing*, vol. 51, hlm. 1779–1784, 2020.
- [8] F. Baghdadi, O. Mohseni, dan M. Bazzi, "Penentuan ukuran optimal sistem penyimpanan energi angin dengan mempertimbangkan umur baterai," *Renewable Energy*, vol. 147, hlm. 2470–2483, 2020.
- [9] M. H. Jahangir, R. Cherchi, dan S. H. Siyal, "Dampak penentuan ukuran optimal turbin angin dan penyimpanan energi baterai untuk rumah tangga terhubung jaringan dengan/tanpa kendaraan listrik," *Journal of Energy Storage*, vol. 46, hlm. 103823, 2022.
- [10] A. Jafari, H. Ganjeh Ganjehlou, dan B. Mohammadi-Ivatloo, "Desain strategis energi angin dan penyimpanan baterai untuk sistem energi yang efisien dan berkelanjutan," *Scientific Reports*, vol. 15, hlm. 18863, 2025.
- [11] S. Mandal dan B. K. Das, "Penentuan ukuran optimal dan manajemen energi pada jaringan mikro: Pendekatan MILP gabungan untuk meminimalkan biaya energi dan emisi karbon," *Renewable Energy*, vol. 224, hlm. 120186, 2024.
- [12] A. Fathy, "Metodologi andal berbasis algoritma optimasi ledakan tambang untuk penentuan ukuran optimal sistem energi terbarukan hibrida," *Energy Conversion and Management*, vol. 143, hlm. 390-401, 2016.
- [13] K. K. Matrawy, A. Mahfouz, dan M. M. Ezz-Eldin, "Desain optimal dan pengendalian cerdas sistem energi terbarukan hibrida untuk operasi yang aman dan andal," *Electric Power Systems Research*, vol. 173, hlm. 178-187, 2019.
- [14] S. Singh, M. Singh, dan S. Chanana, "Penentuan ukuran optimal sistem energi terbarukan hibrida yang terhubung ke jaringan menggunakan algoritma optimasi paus yang dimodifikasi," *Energy Reports*, vol. 6, hlm. 878-885, 2020.

- [15] H. Borhanazad, S. Mekhilef, V. Ganapathy, M. Modiri-Delshad, dan A. Mirtaheeri, "Optimasi sistem mikro-jaringan menggunakan MOPSO," *Renewable Energy*, vol. 71, hlm. 295-306, 2014.
- [16] J. Li, R. Xiong, Q. Yang, F. Liang, M. Zhang, dan W. Yuan, "Desain/pengujian sistem penyimpanan energi hibrida untuk pengendalian frekuensi primer menggunakan metode droop dinamis dalam sistem tenaga mikrogrid terisolasi," *Applied Energy*, vol. 201, hlm. 257-269, 2017.
- [17] S. Sukumar, M. Mokhtar, dan M. Marsadek, "Pendekatan pengendalian laju perubahan berdasarkan pemrograman dinamis untuk meratakan keluaran daya pembangkit angin terdistribusi," *Wind Engineering*, vol. 41, no. 4, hlm. 311-322, 2017.
- [18] M. Smaoui, A. Abdelkafi, dan L. Krichen, "Penentuan ukuran optimal sistem hibrida fotovoltaik/angin/hidrogen mandiri yang memasok unit desalinasi," *Solar Energy*, vol. 120, hlm. 263-276, 2015.
- [19] D. Abbes, A. Martinez, dan G. Champenois, "Biaya siklus hidup, energi tertanam, dan probabilitas kehilangan pasokan listrik untuk desain optimal sistem tenaga hibrida," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 98, hlm. 46-62, 2014.
- [20] O. Ekren dan B. Y. Ekren, "Optimasi ukuran sistem konversi energi hibrida PV/angin dengan penyimpanan baterai menggunakan simulasi pendinginan," *Applied Energy*, vol. 87, no. 2, hlm. 592-598, 2010.
- [21] A. Kaabeche, M. Belhamel, dan R. Ibtouen, "Optimasi ukuran sistem pembangkit listrik hibrida fotovoltaik/angin yang independen dari jaringan," *Energy*, vol. 36, no. 2, hlm. 1214- 1222, 2011.
- [22] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, dan Z. Fang, "Metode penentuan ukuran optimal untuk sistem hibrida surya-angin mandiri dengan teknologi LPSP menggunakan algoritma genetika," *Solar Energy*, vol. 82, no. 4, hlm. 354-367, 2008.
- [23] S. M. Hakimi dan S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Penentuan ukuran optimal sistem tenaga hibrida mandiri melalui optimisasi gerombolan partikel untuk wilayah Kahnouj di tenggara Iran," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 7, hlm. 1855-1862, 2009.
- [24] J. Li, P. Liu, Z. Li, "Desain optimal dan analisis teknokonomi sistem tenaga hibrida surya- angin-biomassa off-grid untuk elektrifikasi pedesaan terpencil: Studi kasus di barat Tiongkok," *Energy*, vol. 208, hlm. 118387, 2020.
- [25] M. Jaszczur, Q. Hassan, P. Palej, dan J. Abdulateef, "Optimisasi multi-objektif sistem tenaga hibrida mikro-jaringan untuk aplikasi rumah tangga," *Energy*, vol. 202, hlm. 117738, 2020.
- [26] J. D. Hunter, "Matplotlib: Lingkungan grafis 2D," *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, hlm. 90-95, 2007.
- [27] A. Maleki, M. G. Khajeh, dan M. Ameri, "Penentuan ukuran optimal sistem energi terbarukan hibrida yang independen dari jaringan listrik dengan mempertimbangkan ketidakpastian sumber daya dan beban," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, hlm. 514-524, 2016.
- [28] M. Justus, W. R. Hargraves, A. Mikhail, dan D. Graber, "Metode untuk memperkirakan distribusi frekuensi kecepatan angin," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 17, no. 3, hlm. 350-353, 1978.
- [29] S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, dan A. Louche, "Desain dan optimisasi teknokonomi untuk sistem hibrida PV/angin di bawah berbagai kondisi meteorologi," *Applied Energy*, vol. 85, no. 10, hlm. 968-987, 2008.
- [30] Y. Sawle, S. C. Gupta, dan A. K. Bohre, "Ulasan sistem energi terbarukan hibrida dengan analisis perbandingan sistem hibrida off-grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, hlm. 2217-2235, 2018.
- [31] A. Chauhan dan R. P. Saini, "Tinjauan tentang pembangkitan listrik berbasis sistem energi terbarukan terintegrasi untuk aplikasi mandiri: Isu dan tantangan utama," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, hlm. 554-564, 2014.
- [32] S. Sinha dan S. S. Chandel, "Tinjauan alat perangkat lunak untuk sistem energi terbarukan hibrida," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, hlm. 192-205, 2014.
- [33] M. A. V. Rad dan R. Ghasempour, "Analisis teknokonomi sistem tenaga hibrida berdasarkan metode produksi hidrogen yang efisien biaya untuk elektrifikasi pedesaan, studi kasus di Iran," *Energy*, vol. 190, hlm. 116421, 2020.

- [34] A. Aziz, A. Tajuddin, M. Adzman, M. Azmi, dan M. Ramli, "Optimasi dan analisis sensitivitas sistem energi hibrida mandiri untuk elektrifikasi pedesaan: Studi kasus Irak," *Journal of Building Engineering*, vol. 20, hlm. 323-333, 2018.
- [35] A. Cano, F. Jurado, H. Sánchez, L. M. Fernández, dan M. Castañeda, "Penentuan ukuran optimal sistem hibrida mandiri berbasis PV/WT/FC dengan menggunakan beberapa metodologi," *Journal of Energy Storage*, vol. 21, hlm. 11-20, 2019.
- [36] A. F. Crossland, D. Jones, N. S. Wade, dan S. L. Walker, "Perbandingan lokasi dan kapasitas penyimpanan energi untuk energi terbarukan dalam sistem energi skala besar," *Applied Energy*, vol. 218, hlm. 95-105, 2018.
- [37] M. Amer, A. Namane, dan N. K. M'Sirdi, "Optimasi sistem energi terbarukan hibrida (HRES) menggunakan PSO untuk pengurangan biaya," *Energy Procedia*, vol. 42, hlm. 318-327, 2013.
- [38] A. Askarzadeh dan L. dos Santos Coelho, "Pendekatan baru untuk penentuan ukuran sistem energi hibrida fotovoltaik/angin/baterai mandiri," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 17, hlm. 5903-5912, 2015.
- [39] M. Bagheri, V. Nurmanova, O. Abedinia, M. Salay Naderi, M. S. Naderi, dan N. Ghadimi, "Sumber energi terbarukan dan model peramalan baterai—Sebuah tinjauan," dalam *Konferensi Internasional ke-6 tentang Kontrol, Instrumentasi, dan Otomasi (ICCIA) 2019*, 2019, hlm. 1-6.
- [40] S. Sanajaoba dan E. Fernandez, "Penerapan perdana algoritma cuckoo search untuk penentuan ukuran optimal sistem energi terbarukan hibrida terpencil," *Renewable Energy*, vol. 96, hlm. 1-10, 2016.
- [41] M. Sharafi dan T. Y. ELMekkawy, "Desain optimal multi-tujuan sistem energi terbarukan hibrida menggunakan algoritma pemadaman kebakaran agen bersih berbasis simulasi PSO," *Sustainable Cities and Society*, vol. 12, hlm. 38-46, 2014.
- [42] A. Yahiaoui, F. Fodhil, K. Benmansour, M. Tadjine, dan N. Cheggaga, "Grey Wolf Optimizer untuk Desain Optimal Sistem Energi Terbarukan Hibrida PV-Generator Diesel-Baterai: Aplikasi pada Menara Telekomunikasi Terpencil," *Energy Conversion and Management*, vol. 112, hlm. 345-356, 2016.