

Optimisasi Desain Sistem Tenaga Listrik Hybrid Menggunakan Multi-Objective Genetic Algorithm: Studi Kasus Pulau Adonara Nusa Tenggara Timur

Ardiansyah Noviana Saelan¹

¹Pascasarjana, Institut Teknologi PLN, Indonesia;

Email : ardiansyah2210529@itpln.ac.id

Abstrak : Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain sistem tenaga listrik hybrid Diesel-Surya-Angin dengan penyimpanan energi berbasis Battery Energy Storage System (BESS) menggunakan Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). Studi kasus dilakukan pada sistem kelistrikan di Pulau Adonara, Nusa Tenggara Timur, dengan mempertimbangkan data aktual selama satu tahun. Empat parameter utama yang dioptimasi meliputi daya array PV, daya turbin angin, jumlah unit BESS, dan daya generator diesel. Fungsi objektif dalam optimasi ini mencakup minimisasi biaya energi, pengurangan emisi karbon, serta peningkatan kontribusi energi terbarukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MOGA mampu menjadi metode yang efektif dalam menentukan konfigurasi optimal sistem tenaga listrik hybrid. Parameter terbaik yang diperoleh dalam optimasi adalah nilai crossover probability (P_c) sebesar 0,9 dan jumlah populasi (N_{pop}) sebanyak 100. Optimasi menghasilkan tiga solusi utama berdasarkan Pareto front: (1) Solusi L dengan emisi karbon terendah (50.682,39 kgCO₂) dan total biaya energi sebesar 81.248.439,76 USD, di mana sistem didominasi oleh PV-BESS dan WT dengan proporsi masing-masing 80% dan 20%; (2) Solusi C sebagai titik keseimbangan dengan proporsi energi dari PV-BESS 79%, WT 6%, dan DG 15%, menghasilkan total biaya energi 45.070.628,08 USD serta emisi karbon 214.932,59 kgCO₂; (3) Solusi R dengan biaya energi terendah sebesar 26.779.712,28 USD, dengan kontribusi PV-BESS 60%, WT 1%, dan DG 39%, namun menghasilkan emisi karbon tertinggi sebesar 498.696,48 kgCO₂.

Kata Kunci : NZE, sistem tenaga listrik hybrid, multi-objective genetic algorithm, biaya total sistem tahunan, emisi CO₂

Abstract : This research aims to optimize the design of a Diesel-Solar-Wind hybrid power system with energy storage based on Battery Energy Storage System (BESS) using Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). The case study was conducted on the electricity system in Adonara Island, East Nusa Tenggara, by considering actual data for one year. The four main parameters optimized include PV array power, wind turbine power,

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2025, Vol. 6, No. 1, pp 124 – 144

Received : 9 Februari 2025

Accepted : 10 Maret 2025

Published : 31 Maret 2025



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

number of BESS units, and diesel generator power. The objective functions in this optimization include energy cost minimization, carbon emission reduction, as well as increased renewable energy contribution. The results show that MOGA is able to be an effective method in determining the optimal configuration of hybrid power systems. The best parameters obtained in the optimization are the crossover probability (P_c) value of 0.9 and the population size (N_{pop}) of 100. The optimization resulted in three main solutions based on the Pareto front: (1) Solution L with the lowest carbon emission (50,682.39 kgCO₂) and total energy cost of 81,248,439.76 USD, where the system is dominated by PV-BESS and WT with the proportion of 80% and 20% respectively; (2) Solution C as the equilibrium point with the proportion of energy from PV-BESS 79%, WT 6%, and DG 15%, resulting in a total energy cost of 45.070,628.08 USD and carbon emissions of 214,932.59 kgCO₂; (3) Solution R with the lowest energy cost of 26,779,712.28 USD, with the contribution of PV-BESS 60%, WT 1%, and DG 39%, but resulting in the highest carbon emissions of 498,696.48 kgCO₂.

Keywords : NZE, hybrid power system, multi-objective genetic algorithm, annual total system cost, CO₂ emission

1. Pendahuluan

Net Zero Emissions (NZE) atau emisi nol bersih mengacu pada keadaan di mana jumlah emisi karbon yang dibuang ke atmosfer tidak melebihi kapasitas bumi untuk menyerap emisi (Indonesia Research Institute for Decarbonization, 2022). Mencapai hal ini memerlukan transisi dari sistem energi berbasis fosil ke sistem energi bersih untuk membangun keseimbangan antara aktivitas manusia dan keseimbangan alam (United Nations, 2015). Sebagai bagian dari upaya untuk mengaktualisasikan program NZE sesuai hasil ratifikasi Paris Agreement 2015, pemerintah Indonesia berkomitmen untuk mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) 29% pada tahun 2030 dengan kemampuan sendiri dan 41% dengan dukungan korporasi internasional (KESDM, 2023). Untuk memenuhi komitmen tersebut, pemerintah Indonesia menargetkan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) 23% pada tahun 2025 melalui program pengembangan potensi EBT seperti tenaga surya, angin, panas bumi, dan biomasa (IESR, 2021).

PLN sebagai perusahaan pemerintah dalam mengelola elektrifikasi di Indonesia telah meluncurkan program yang selaras dengan komitmen tersebut melalui Transformation 2.0 yang berfokus pada 4 pilar yaitu Growth, Digital, dan NZE Moonshots, serta didukung oleh Moonshot Launchpad sebagai Enabler (PT. PLN, 2023a). NZE Moonshots disebut sebagai pilar paling awal di transformasi karena sejalan dengan program pengembangan potensi EBT seperti sistem tenaga listrik hybrid (HES), de-dieselsiasi, dan retirement pembangkit listrik berbahan bakar fosil (PT. PLN, 2020).

Di Indonesia, infrastruktur jaringan listrik sangat luas untuk memastikan pasokan listrik yang konsisten dan andal (PT. PLN, 2023b). Namun banyak daerah terpencil yang tidak terintegrasi ke jaringan listrik pusat, biasanya sistem energi berbasis diesel muncul sebagai pilihan yang layak untuk memenuhi kebutuhan energi di area tersebut disebabkan desainnya yang ringkas, output daya tinggi per satuan berat, dan investasi awal yang relatif rendah (PT. PLN, 2020). Karena harga bahan bakar fosil yang meningkat beberapa tahun terakhir imbas invasi Rusia-Ukraina, biaya pokok produksi (BPP), dan pemeliharaannya juga meningkat (IEA, 2023). Selain itu, biaya operasional dan pemeliharaan generator diesel sangat dipengaruhi oleh pola permintaan beban, dengan efisiensi

optimal dicapai hanya ketika generator beroperasi mendekati kapasitas maksimumnya (Rajput, 2021). Pembakaran bahan bakar fosil juga melepaskan gas seperti karbondioksida (CO₂), yang merupakan kontributor utama fenomena yang dikenal sebagai efek Gas Rumah Kaca (IEA, 2023). Oleh karena itu, urgensi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil perlu untuk segera ditindaklanjuti. Sistem tenaga listrik hybrid hadir sebagai solusi dari permasalahan tersebut (Mandelli et al., 2016).

Sistem tenaga listrik hybrid (HES) merupakan sebuah sistem yang secara sinergis mengintegrasikan dua atau lebih sumber energi yang berbeda untuk menghasilkan daya listrik (Ghofrani & Hosseini, 2016). Implementasi sistem tenaga listrik hybrid merupakan pendekatan yang sangat efektif dalam pemanfaatan teknologi berbasis EBT. Melalui integrasi simultan dari beberapa sistem konversi energi, manfaat unik dari setiap sumber energi dapat dimanfaatkan sepenuhnya (Hassan et al., 2023). Selain itu, mengatasi kekurangan sumber energi tunggal dan meningkatkan efektivitas biaya, keandalan, dan ketersediaan energi yang diperlukan merupakan keuntungan tambahan dari implementasi sistem tenaga listrik hybrid (Marqusee et al., 2021). Terlepas dari keuntungan yang diberikan di atas, optimasi desain dan ukuran menjadi salah satu masalah utama pada sistem tenaga listrik hybrid (Rezaei et al., 2024). Optimasinya lebih rumit dibandingkan dengan sumber energi tunggal karena perilaku nonlinier sumber daya sistem dan tingginya jumlah faktor yang harus dipertimbangkan (Pamuk, 2024). Beberapa penelitian terkait optimasi desain dan ukuran sistem tenaga listrik hybrid telah dilakukan, dengan mengadopsi berbagai metode dan algoritma seperti Genetic Algorithm (Al-Shamma'a et al., 2020), Lightning Search Algorithm (Hamanah et al., 2020), hybrid golden search algorithm (Huang et al., 2024), Movable Damped Wave Algorithm (Kharrich et al., 2022), dan lainnya.

Al-Shamma'a et al. (2020), menentukan desain optimasi sistem tenaga listrik hybrid dengan metode Genetic Algorithm (GA). Untuk setiap skenario biaya bahan bakar, sistem hybrid telah dirancang dan dioptimalkan untuk mendapatkan rasio penetrasi energi terbarukan yang maksimum dengan biaya energi yang rendah. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem tenaga listrik hybrid dengan nol Loss of Power Supply Probability (LPSP) adalah sistem yang paling hemat biaya dengan prospek ekonomi yang baik dalam transisi sistem energi berbasis diesel ke sistem hybrid, dengan peluang pengurangan biaya sekitar 41% dari biaya energi.

Hamanah et al. (2020) menyajikan metodologi baru untuk mengoptimalkan konfigurasi sistem tenaga listrik hybrid dengan pembangkit listrik tenaga angin, PV, diesel dan BESS. Meminimalkan biaya tahunan dianggap sebagai fungsi objektif dengan kendala yang berbeda dengan mempertimbangkan Energy Not Served (ENS) dan Renewable Energy Fraction (REF). Lightning Search Algorithm (LSA) digunakan untuk mendapatkan nilai biaya terbaik dari konstruksi sistem tenaga listrik hybrid. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem hybrid lebih baik untuk digunakan sepanjang waktu dibandingkan dengan sistem generator diesel.

Huang et al. (2024) mengembangkan dan menerapkan algoritma optimasi baru, yang dikenal sebagai hybrid golden search algorithm (HGSA), untuk merencanakan dan mengoptimalkan kapasitas HES diesel-surya-angin-BESS (Battery Energy Storage System) secara jangka panjang di daerah terpencil yang tidak terhubung dengan jaringan listrik. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa penggunaan HGSA dapat secara signifikan mengurangi biaya dan meningkatkan keandalan sistem energi terbarukan hybrid di daerah terpencil dengan penurunan biaya tahunan bersih sekitar 7,3%.

Kharrich et al. (2022) menggunakan algoritma Movable Damped Wave Algorithm (MDVP) dalam optimasi desain sistem tenaga listrik hybrid yang terdiri dari empat model yang berbeda, untuk memilih salah satu yang terbaik yang dapat memenuhi kebutuhan listrik dengan biaya yang paling rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MDVP dapat mengurangi biaya, meningkatkan keandalan sistem, waktu komputasinya cepat, dan konvergensinya baik.

Dalam tinjauan literatur, meskipun banyak penelitian yang mengklarifikasi desain optimal sistem tenaga listrik hybrid dengan teknik optimasi yang berbeda, beberapa algoritma tersebut hanya terdiri dari penyelesaian satu fungsi objektif saja yakni terkait minimisasi biaya energi. Pendekatan optimasi multi objektif perlu dilakukan untuk mengatasi tantangan optimasi yang memiliki lebih dari satu fungsi obyektif dan untuk mencapai solusi yang berkelanjutan dan efisien (Hemeida et al., 2022; Rezaei et al., 2024; Rongjie, 2020). Teorema ini memastikan pentingnya penggunaan algoritma optimasi multi objektif untuk mencapai solusi optimal terbaik. Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) hadir sebagai salah satu algoritma optimasi multi objektif metaheristik dalam menyelesaikan permasalahan tersebut. Menggunakan MOGA dalam optimasi desain sistem tenaga listrik hybrid memberikan keunggulan dalam hal kemampuan eksplorasi dan eksploitasi yang baik untuk menemukan solusi mendekati optimal dalam masalah optimasi yang kompleks, dan multidimensi (Mishra et al., 2013; Nouri et al., 2023), fleksibilitas solusi trade-off untuk pengambil keputusan (Konak et al., 2006; Yin, 2024), serta kemampuan dalam keserbagunaan dan keefektifannya di berbagai domain (Chang, 2015; Nematzadeh et al., 2024). Hal ini menjadikan MOGA sebagai pilihan yang kuat dan layak untuk digunakan pada penelitian ini.

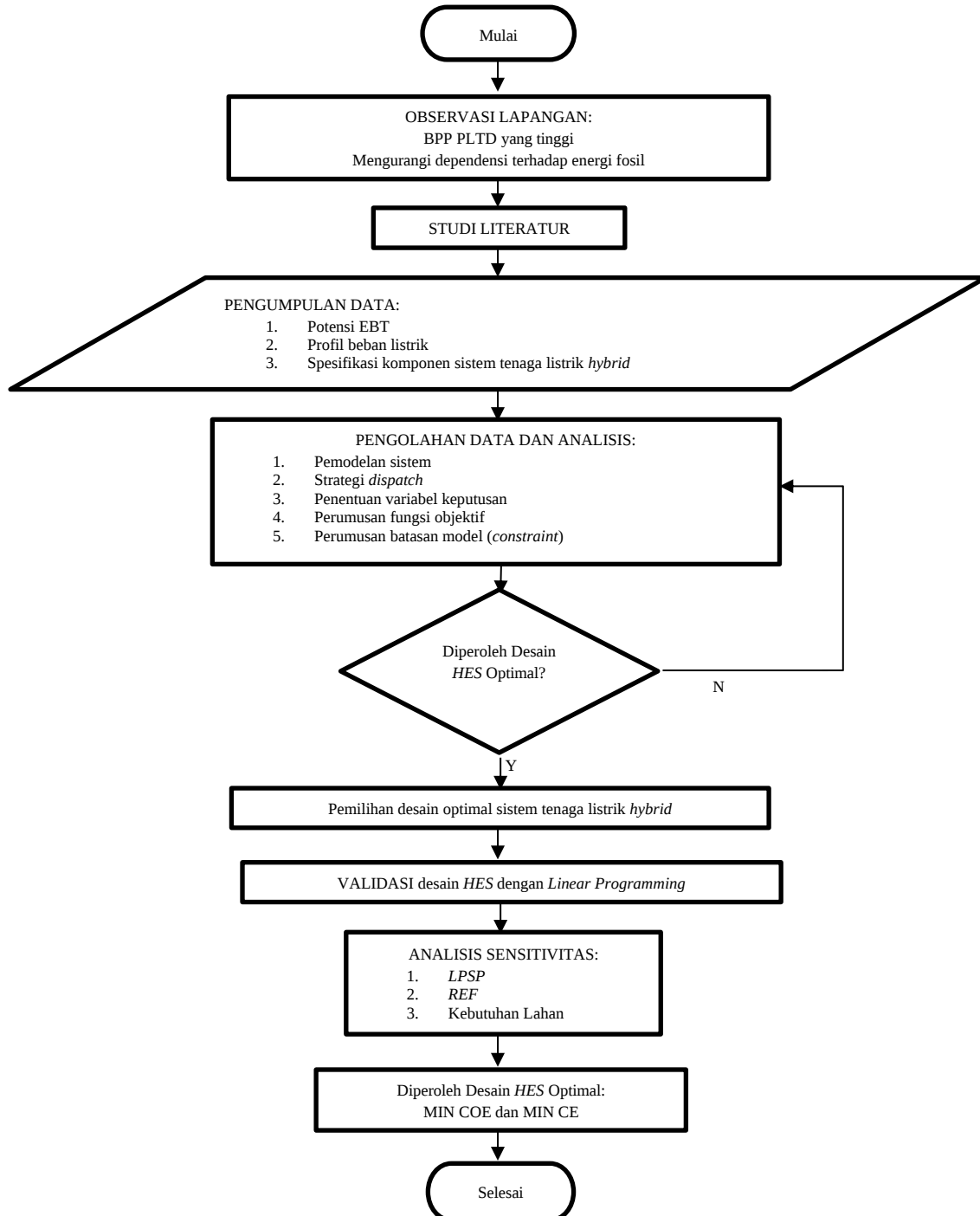
Dalam penelitian ini, sistem tenaga listrik hybrid Diesel-Surya-Angin dengan BESS sebagai sistem penyimpanan energi diusulkan untuk diterapkan secara tekno ekonomi, dengan mempertimbangkan sumber energi alam yang sebenarnya dan data nyata selama 1 tahun untuk studi kasus praktis di sistem kelistrikan isolated di pulau Adonara, Nusa Tenggara Timur. Teknik optimasi MOGA diterapkan pada masalah optimasi. Empat parameter dimasukkan dalam desain yang diusulkan; daya array PV, daya turbin angin, jumlah BESS, dan daya pengenalan generator diesel. Fungsi objektif dan batasan (constraints) diformulasikan untuk mengoptimalkan kapasitas komponen sistem tenaga listrik hybrid. Analisis sensitivitas juga dilakukan untuk menunjukkan efek dari berbagai faktor pada levelized cost of electricity (LCOE), emisi CO₂, fraksi energi terbarukan, dan efek biaya bahan bakar pada pembangkitan energi. Hasil penelitian mengkonfirmasi kelayakan dan efektivitas metode optimasi MOGA melalui peningkatan keandalan, mengurangi biaya sistem, dan mengurangi emisi CO₂.

2. Metode

2.1 Desain penelitian

Desain penelitian Optimisasi Desain Sistem Tenaga Listrik Hybrid Menggunakan Multi-Objective Genetic Algorithm: Studi Kasus Pulau Adonara Nusa Tenggara Timur (Gambar 2.1), menggunakan metode multivariatif dengan pendekatan kuantitatif dikarenakan penelitian ini adalah penelitian ilmiah yang sistematis dan terukur. Tujuan dari penelitian multivariatif adalah untuk menggali hubungan antara berbagai variabel, mempelajari sistem atau fenomena yang melibatkan banyak faktor, termasuk sosial, ekonomi, teknologi, dan lingkungan. Dalam metode multivariatif peneliti bisa memahami konteks secara menyeluruh, termasuk faktor eksternal yang memengaruhi sistem (Syahza, 2021).

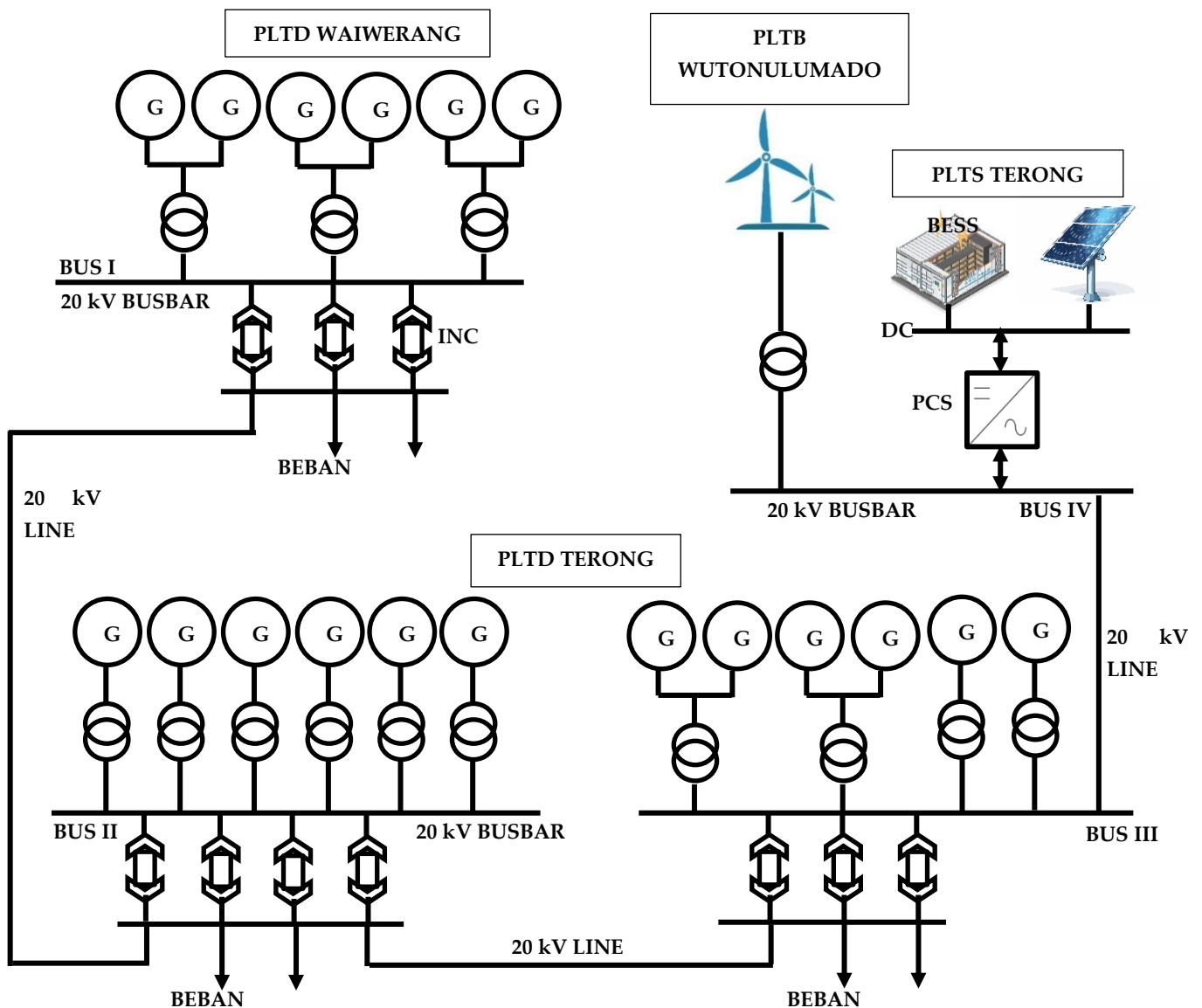
Pendekatan kuantitatif dipakai untuk menguji suatu teori, untuk menyajikan suatu fakta atau mendeskripsikan statistik, untuk menunjukkan hubungan antar variabel, dan adapula yang bersifat mengembangkan konsep, mengembangkan pemahaman atau mendeskripsikan banyak hal (Raihan, 2017). Proses pengukuran adalah bagian yang utama dalam penelitian kuantitatif karena akan memberikan dampak yang sangat penting antara pengamatan empiris dan ekspresi matematis.



Gambar 2.1 Desain penelitian

2.2 Pemodelan sistem

Sistem tenaga listrik hybrid yang diusulkan, ditunjukkan pada Gambar 2.2, terdiri dari PLTS (modul solar PV), PLTB (turbin angin), BESS, dan generator diesel. Sistem ini beroperasi sebagai entitas yang berdiri sendiri, melayani area yang terisolasi dari sumber energi listrik terintegrasi. Setiap modul solar PV telah dirancang dengan cermat menggunakan unit yang sesuai dengan konverter elektronik daya yang ditentukan. Dalam pemodelan sistem, beberapa langkah prosedural harus dijalankan, termasuk strategi dispatch, identifikasi variabel keputusan, perumusan fungsi objektif yang berkaitan dengan masalah, dan pembentukan batasan model.



Gambar 2.2 Single line diagram sistem tenaga listrik *hybrid* Adonara

2.3 Strategi *dispatch* sistem tenaga listrik *hybrid* Adonara

Selama satu tahun, penilaian analitis dilakukan dengan pertimbangan variabel termasuk permintaan beban, radiasi matahari, dan daya keluaran yang dihasilkan oleh turbin angin. Strategi implementasi untuk sistem tenaga listrik *hybrid* Adonara dilaksanakan sesuai dengan pendekatan deterministik, yang secara fundamental memerlukan peningkatan kapasitas daya untuk menegakkan margin cadangan minimum yang diperlukan. Margin cadangan digambarkan sebagai perbedaan antara total kapasitas pembangkit yang tersedia dan beban sistem tahunan puncak. Kriteria cadangan minimum wajib untuk sistem terisolasi yang mengalami pertumbuhan signifikan, seperti sistem Adonara, mengharuskan pemanfaatan dua unit pembangkit besar untuk menangani pemeliharaan satu unit secara preventif sekaligus mengakomodasi potensi pemadaman paksa unit lain. Manajemen energi dalam sistem tenaga listrik *hybrid* yang diusulkan, diuraikan sebagai berikut:

1. Inisialisasi semua data input, dan kondisi simulasi ditentukan. Selanjutnya, program optimasi menghitung keseimbangan energi, dilambangkan sebagai:

$$E_B(t) = (P_{PV}(t) \times \eta_{INV} + P_{WT}(t) - P_L(t)) \times \Delta t$$

2. Dalam kasus di mana daya yang dihasilkan oleh sistem tenaga listrik *hybrid* tidak memenuhi permintaan beban, BESS akan mengeluarkan energinya.

$$P_L(t) \times \Delta t = P_W(t) \times \Delta t + (P_{PV}(t) \times \Delta t + E_{DIS}(t)) \times \eta_{INV}$$

3. Jika BESS tidak dapat memenuhi permintaan beban, defisit daya akan ditambah oleh DG, dengan perhitungan dilakukan sebagai berikut:

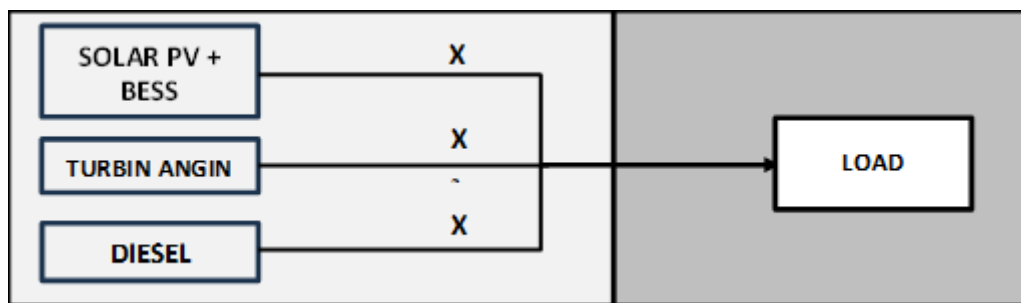
$$P_{DG}(t) \times \Delta t = (P_L(t) - P_{WT}(t) - P_{PV}(t) \times \eta_{INV}) \times \Delta t$$

4. Dalam situasi di mana total daya yang dihasilkan oleh sumber daya terbarukan hibrida melebihi permintaan beban, BESS akan mengisi ulang energinya.

$$P_L(t) \times \Delta t = P_W(t) \times \Delta t + P_{PV}(t) \times \Delta t \times \eta_{INV} - E_{CH}(t) \times \eta_{CON}$$

2.4 Penentuan variabel keputusan

Berdasarkan pemodelan sistem yang diusulkan, sistem tenaga listrik *hybrid* Adonara menggabungkan tiga sumber catu daya listrik yang berbeda, yang meliputi serangkaian panel surya (PV) + BESS, turbin angin, dan generator diesel. Ketiga sumber catu daya ini masing-masing mewakili variabel keputusan yang digunakan dalam penelitian ini. Secara kolektif, ketiga sumber akan beroperasi secara terkoordinasi untuk memenuhi persyaratan pasokan listrik dari sistem kelistrikan Adonara, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Variabel keputusan sistem tenaga listrik *hybrid* Adonara

Masalah yang harus diatasi melalui model optimasi berkaitan dengan menentukan tingkat beban daya yang akan dipenuhi oleh masing-masing sumber catu daya individu. Penyediaan listrik harus memenuhi kebutuhan listrik sistem Adonara secara memadai selama periode 24 jam/hari, sehingga memerlukan aliran listrik yang konstan setiap saat.

Selanjutnya, untuk memastikan biaya yang dikeluarkan dalam pengadaan panel PV, turbin angin, dan BESS, penting untuk memasukkan spesifikasi kapasitas panel PV, turbin angin, dan BESS yang akan digunakan sebagai komponen penyusun sistem tenaga listrik hybrid. Setiap ukuran kapasitas dikaitkan dengan harga, spesifikasi, dan tingkat efisiensi yang berbeda. Akibatnya, pemilihan jenis panel PV, turbin angin, dan BESS akan dimasukkan sebagai salah satu variabel keputusan dalam model ini. Interpretasi variabel keputusan dari model optimasi dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 2.1 Interpretasi variabel keputusan

Variabel	Deskripsi
X_1	Proporsi beban listrik yang dipenuhi oleh PLTS (PV) + BESS
X_2	Proporsi beban listrik yang dipenuhi oleh PLTB (WT)
X_3	Proporsi beban listrik yang dipenuhi oleh Generator Diesel
Y_1	Tipe panel PV
Y_2	Tipe BESS
Y_3	Tipe turbin angin

2.5 Perumusan fungsi objektif

Tujuan yang harus dicapai dalam tantangan optimasi ini adalah untuk memastikan desain sistem tenaga listrik hybrid yang paling efisien, yang ditandai dengan biaya operasional terendah yang layak, dan sistem yang menghasilkan emisi CO₂ paling minimal. Dengan demikian, fitness function yang digunakan dalam model optimasi penelitian ini mencakup persamaan biaya keseluruhan dari sistem tenaga listrik hybrid dan persamaan emisi CO₂.

1. Biaya PLTS + BESS (CPV)

$$C_{PVBESS} = COE_{PVBESS} \times X_1 \times C_{ACQ} \times E_{total}$$

Dimana COE_{PV} adalah konversi biaya penggunaan energi PV per satuan kWh dan C_{ACQ} adalah biaya awal pembelian dan pemasangan PV+BESS.

2. Biaya PLTB (CWT)

$$C_{WT} = COE_{WT} \times X_2 \times C_{ACQ} \times E_{total}$$

Dimana COE_{WT} adalah konversi biaya penggunaan energi WT per satuan kWh dan C_{ACQ} adalah biaya awal pembelian dan pemasangan WT.

3. Biaya generator diesel (CDG)

$$C_{DG} = COE_{DG} \times X_3 \times E_{total} + C_{OM}$$

Dimana COE_{DG} adalah biaya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan generator listrik per kWh dan C_{OM} adalah biaya perawatan dan rutin bulanan.

4. Emisi CO2 PLTS + BESS

$$CE_{PVBESS} = k_{PVBESS} \times X_1 \times E_{total}$$

Dimana k_{PV} adalah konstanta emisi yang dihasilkan per kWh (kg CO2-eq/kWh) oleh pembangkit listrik tenaga surya (PV).

5. Emisi CO2 PLTB

$$CE_{WT} = k_{WT} \times X_2 \times E_{total}$$

Dimana k_{WT} adalah konstanta emisi yang dihasilkan per kWh (kg CO2-eq/kWh) oleh pembangkit listrik tenaga angin (PLTB).

6. Emisi CO2 generator diesel

$$CE_{BESS} = k_{DG} \times X_3 \times E_{total}$$

Dimana k_{DG} adalah konstanta emisi yang dihasilkan per kWh (kg CO2-eq/kWh) oleh generator diesel.

Fungsi objektif dalam optimasi desain sistem tenaga listrik hybrid ini adalah:

$$Fitness (1) \text{ Min } C_{total} = C_{PVBESS} + C_{WT} + C_{DG}$$

$$Fitness (2) \text{ Min } CE_{total} = CE_{PVBESS} + CE_{WT} + CE_{DG}$$

2.6 Perumusan batasan model

Agar berhasil menyimpulkan proses optimasi penelitian ini dan mendapatkan solusi yang selaras dengan tujuan yang ditetapkan, sangat penting untuk menetapkan batasan tertentu yang didasarkan pada faktor-faktor kendala yang ditemui. Batasan yang diterapkan dalam skenario ini termasuk kapasitas beban listrik sistem Adonara dan kapasitas beban listrik yang dapat dipasok oleh sistem tenaga listrik hybrid.

1. Batasan beban listrik sistem Adonara

Batasan utama berkaitan dengan besarnya beban listrik sistem Adonara yang harus dipenuhi oleh sistem tenaga listrik hybrid. Besarnya pasokan listrik tidak boleh jatuh di bawah permintaan beban yang diperlukan, karena nilai keandalan sistem ini diukur pada 100%, artinya listrik harus tersedia secara kontinu selama 24 jam.

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1$$

2. Batasan kapasitas beban listrik oleh sumber energi terbarukan

Batasan kedua berkaitan dengan beban yang dapat disediakan oleh PLTS dan PLTB. Kendala ini secara inheren terkait dengan intermitensi yang dihasilkan oleh catudaya listrik yang berasal dari sumber terbarukan, seperti surya dan angin. Akibatnya, pasokan listrik dari PLTS dan PLTB tidak tersedia secara konsisten selama 24 jam. Oleh karena itu, berdasarkan model ini, listrik yang dihasilkan dari PLTS dan PLTB hanya dapat digunakan selama kurang lebih 10 jam setiap hari.

$$X_1 \leq E_{PVmax}, X_2 \leq E_{WTmax}$$

3. Batasan nilai proporsi pemenuhan beban

Batasan nilai proporsi ini bertujuan untuk membatasi nilai minimal proporsi beban yang akan dipenuhi oleh masing-masing sistem sumber catu daya.

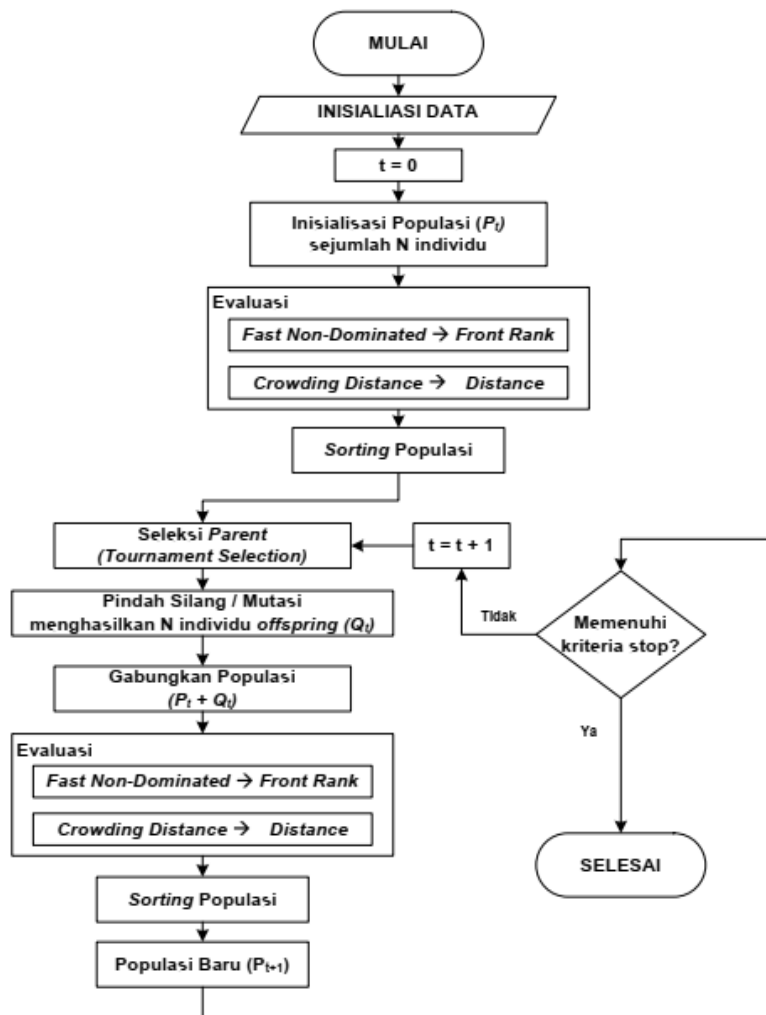
$$X_1, X_2, X_3 \geq 0$$

4. Batasan jumlah tipe panel surya, BESS, dan turbin angin
Batasan ini terkait nilai batas atas dan batas bawah untuk variabel keputusan y yang diperoleh dari jumlah tipe panel PV, BESS, dan turbin angin, yang digunakan dalam penelitian ini.

$$Y_1 \geq 1, Y_2 \geq 1, Y_3 \geq 3$$

2.7 Metode analisis data

Pengolahan dan analisis data yang digunakan untuk menjawab rumusan masalah yang telah dirumuskan peneliti adalah dengan menggunakan pendekatan data kuantitatif. Analisis kuantitatif digunakan untuk menganalisis data yang berupa angka hasil dari pemodelan desain sistem tenaga listrik hybrid berdasarkan formulasi yang diperoleh dari berbagai referensi relevan. Kemudian hasil perhitungan pemodelan desain HES akan divalidasi dan dioptimasi untuk menentukan konfigurasi dengan kapasitas komponen diesel-surya-angin-BESS seoptimal mungkin dengan biaya operasional tahunan ekonomis dan layak, serta emisi CO₂ paling minimum, menggunakan metode optimasi MOGA melalui aplikasi MATLAB. Di mana prosedur optimasi MOGA dijabarkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram alir NSGA-II

Hasil optimasi desain HES yang diperoleh akan melalui proses validasi melalui pendekatan Metric Pareto-Front berbasis aplikasi MATLAB. Jika hasil keluaran kongruen atau selaras erat (berada dalam margin error variance yang dapat diterima), dapat disimpulkan bahwa desain optimal sistem tenaga listrik hybrid yang dihasilkan adalah valid. Suatu model dikatakan valid apabila nilai dari:

1. Hypervolume Indicator (HV), mengukur luas area yang dikuasai oleh Pareto-front dibandingkan dengan titik referensi. Semakin besar nilai HV, semakin baik solusi Pareto yang diperoleh.
2. Generational Distance (GD), mengukur seberapa dekat solusi Pareto yang ditemukan ke Pareto-optimal sebenarnya. Semakin kecil nilai GD, semakin baik solusi Pareto yang ditemukan.
3. Spacing (S), mengukur seberapa merata solusi tersebar di sepanjang Pareto-front. Nilai spacing yang kecil berarti solusi tersebar merata.
4. Spread (Δ), mengukur penyebaran solusi di sepanjang Pareto-front. Spread mendekati 1 menunjukkan Pareto-front yang ideal.

Untuk menguji keandalan dan ketahanan desain optimal dari sistem tenaga listrik hybrid diesel-surya-angin-BESS yang telah diperoleh, dilakukan analisis sensitivitas seperti analisis perubahan biaya bahan bakar, loss of power supply probability (LPSP), fraksi energi terbarukan (REF), dan kebutuhan lahan terhadap kontinuitas penyaluran energi listrik, dengan tujuan untuk memastikan bahwa konfigurasi yang dipilih tetap optimal dan efisien dalam berbagai kondisi yang mungkin terjadi di masa depan. Analisis sensitivitas dalam penelitian ini dilakukan menggunakan persamaan yang diperoleh dari berbagai referensi relevan.

3. Hasil dan Pembahasan

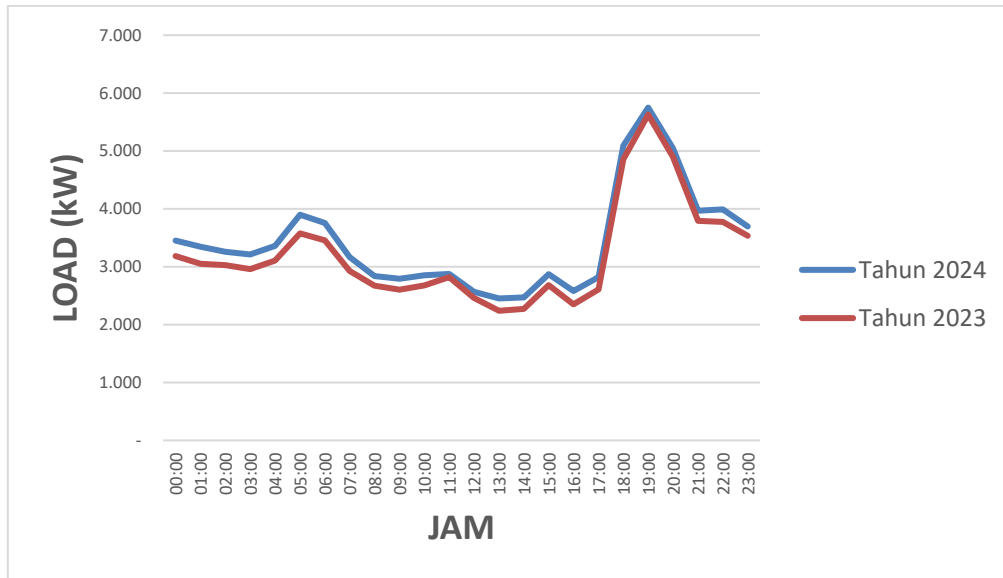
Bagian ini menjelaskan hasil yang diperoleh dari penelitian mengenai optimisasi desain sistem tenaga listrik hybrid diesel-surya-angin-BESS yang memanfaatkan Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) di pulau Adonara, yang terletak di Nusa Tenggara Timur. Hasil penyelidikan ini mencakup beragam dimensi teknis, ekonomi, dan lingkungan yang berkaitan dengan konfigurasi sistem tenaga listrik hybrid yang optimal. Pembahasan akan dilakukan untuk menjelaskan implikasi dari pemrosesan data dan hasil simulasi, serta mengevaluasi kinerja sistem tenaga listrik hybrid dalam kaitannya dengan kemajuan energi terbarukan di sistem kelistrikan pulau Adonara, NTT.

3.1 Kondisi kelistrikan sistem Adonara

Adonara adalah sebuah pulau yang terletak di Kepulauan Nusa Tenggara, sebelah timur pulau Flores. Pulau ini dibatasi oleh laut Flores di sebelah utara, selat Solor di selatan, serta selat Lowotobi di barat. Secara administratif, pulau Adonara merupakan bagian dari kabupaten Flores Timur, dengan ibu kota kabupaten Larantuka. Kabupaten Flores Timur sendiri terdiri dari 3 bagian yaitu Flores Daratan (ujung timur pulau Flores), Pulau Adonara dan Pulau Solor. Pulau Adonara terdiri dari 8 kecamatan dengan Adonara Timur, Waiwerang sebagai episentrum dari populasi masyarakat Adonara.

Infrastruktur kelistrikan di wilayah ini merupakan sistem terisolasi dan hanya dipasok oleh PLTD Waiwerang dan PLTD Terong melalui jaringan 20 kV. Wilayah ini meliputi area seluas 519,64 km², yang merupakan rumah bagi populasi 114.124 individu yang sebagian besar memanfaatkan transportasi laut dari pelabuhan Larantuka.

PLTD di sistem Adonara mampu beroperasi selama 24 jam melalui integrasi keduanya, dengan pola beban seperti Gambar 3.1. Melalui pola operasi seperti ini dibutuhkan energi listrik sebanyak 82.113 kWh per hari atau 29.971.245 kWh per tahun.



Gambar 3.1 Kurva beban harian sistem Adonara (UIW NTT, 2024)

Beban puncak sistem Adonara pada rentang tahun 2023 adalah 5.830 kW (pukul 19.00), sedangkan beban di siang hari (pukul 11.00) sekitar 3.255 kW. Perbedaan perkiraan beban antara siang dan malam hari adalah 2.575 kW atau 44%. Sedangkan beban puncak sistem Adonara pada rentang tahun 2024 (sampai September 2024) tercatat 5.943 kW (pukul 19.00) dan beban siang hari sekitar 3.600 kW (pukul 11.00).

Dengan pola operasi sistem Adonara saat ini, yang hanya dipasok oleh PLTD, menyebabkan lonjakan biaya pokok penyediaan (BPP) energi listrik yang relatif tinggi. Pada tahun 2023 nilai BPP PLTD sistem Adonara mencapai Rp.3.171,13/kWh. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan tarif tenaga listrik (TTL) tertinggi di periode yang sama yakni sebesar Rp.1.699,53/kWh.

Tabel 3.1 BPP PLTD sistem Adonara 3 tahun terakhir (UIW NTT, 2024)

Tahun	BPP PLTD Sistem Adonara	
	Rp/kWh	USD/kWh
2022	3.171	0,196
2023	3.357	0,207
2024	3.689	0,228

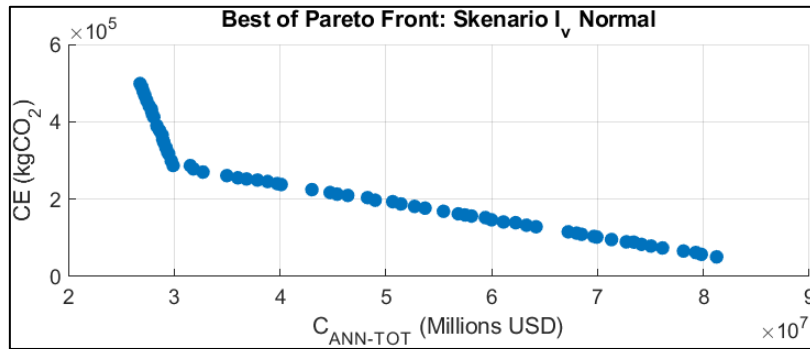
3.2 Hasil optimasi desain sistem tenaga hybrid dengan MOGA

Pada bagian ini akan dilakukan penyelesaian masalah dengan menggunakan parameter MOGA yang telah dilakukan simulasi. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, total biaya paling rendah diperoleh dari percobaan dengan parameter $P_c = 0,9$ dan $N_{pop} = 100$. Sehingga untuk proses optimasi ini digunakan parameter yang sama dengan simulasi. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.1.1, optimasi perancangan desain sistem tenaga listrik hybrid pada sistem kelistrikan isolated pulau Adonara dilakukan dengan dua skenario insulasi matahari, yaitu hari terang (normal)

dan hari berawan (minimal). Berikut ini adalah hasil dari proses optimasi menggunakan model MOGA yang telah dilakukan pada penelitian ini.

1. Optimasi pada skenario IV normal

Hasil dari optimasi MOGA untuk skenario kondisi normal adalah 70 titik optimal Pareto front dengan jumlah iterasi sebanyak 150 generasi. Gambar 3.2 adalah grafik dari best of Pareto front yang berisi solusi optimal pada akhir iterasi.



Gambar 3.2 Grafik best of pareto front skenario IV normal

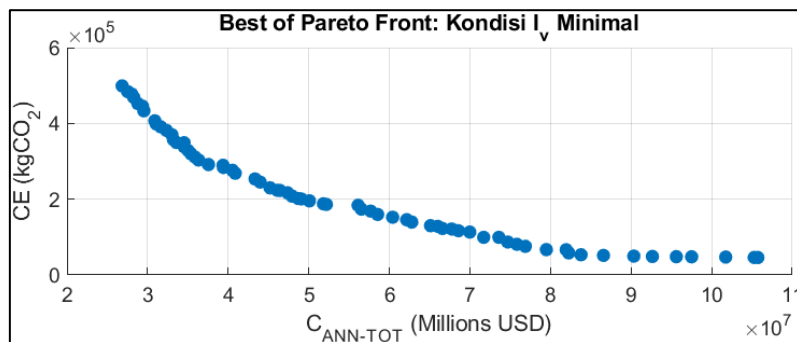
Tabel 3.2 merepresentasikan hasil solusi ekstrim dari best Pareto front. Solusi L (left) memiliki biaya terendah dan emisi tertinggi, dan solusi R (right) memiliki biaya tertinggi dan emisi terendah. Sebagai tambahan disertakan solusi C (center) yang merupakan solusi dengan keadaan seimbang.

Tabel 3.2 Solusi ekstrim optimasi pada skenario IV normal

Solusi	Biaya C_{ANN_TOT}	Emisi Karbon	Proporsi Catu Daya Listrik (%)			Tipe	
	(USD)	(kgCO ₂)	PVBESS	WT	DG	PV	WT
L	81.248.439,76	50.682,39	80	20	0	(5)	(4)
C	45.070.628,08	214.932,59	79	6	15	(5)	(3)
R	26.779.712,28	498.696,48	60	1	39	(5)	(1)

2. Optimasi pada skenario IV minimal

Hasil dari optimasi MOGA untuk skenario kondisi minimal adalah 70 titik optimal Pareto front dengan jumlah iterasi sebanyak 150 generasi. Gambar 3.3 adalah grafik dari best of Pareto front yang berisi solusi optimal pada akhir iterasi.



Gambar 3.3 Grafik best of pareto front skenario IV minimal

Pada Tabel 3.3 merepresentasikan hasil solusi ekstrim dari best Pareto front. Solusi L (left) memiliki biaya terendah dan emisi tertinggi, dan solusi R (right) memiliki biaya tertinggi dan emisi terendah. Sebagai tambahan disertakan solusi C (center) yang merupakan solusi dengan keadaan seimbang.

Tabel 3.3 Solusi ekstrim optimasi pada skenario IV minimal

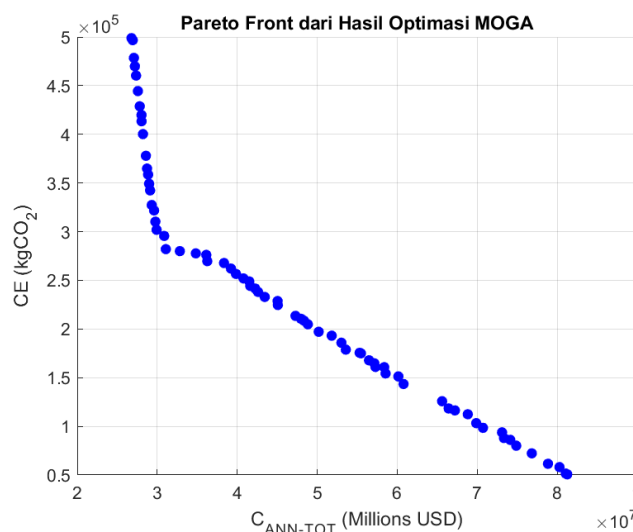
Solusi	Biaya C_{ANN_TOT}	Emisi Karbon	Proporsi Catu Daya Listrik (%)			Tipe	
	(USD)	(kgCO ₂)	PVBESS	WT	DG	PV	WT
L	105.728.755,93	46.072,39	70	30	0	(5)	(4)
C	49.562.919,53	198.210,33	79	7	14	(3)	(3)
R	26.843.561,99	498.966,53	60	1	39	(3)	(1)

3.3 Validasi model

Proses validasi dilakukan untuk memastikan apakah desain dan model yang telah dibuat sudah sesuai dengan tujuan yang diharapkan. Salah satu cara untuk melakukan validasi adalah dengan membandingkan antara luaran hasil optimasi MOGA dengan hasil validasi melalui konsep atau metode matematis dengan bantuan software tertentu. Apabila hasil yang dikeluarkan sama atau berada di tingkat kesalahan (error) yang diperbolehkan maka dapat dikatakan desain dan model sudah valid. Pada penelitian ini, validasi akan dilakukan dengan menggunakan bantuan software MATLAB dengan pendekatan Metric Pareto-Front.

Model optimasi MOGA pada MATLAB tidak menghasilkan solusi tunggal, melainkan sekumpulan titik optimal. Proses validasi ini akan menggunakan data hasil optimasi MOGA skenario hari terang (normal). Kemudian model hasil optimasi dimasukkan ke dalam script dan fungsi Metric Pareto-Front.

Hasil validasi dengan pendekatan Metric Pareto-Front dapat dilihat pada Gambar 3.4. Nilai Spread Metric Pareto Front (Δ) yang dihasilkan sebesar 0.9554. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi penyebaran solusi yang dihasilkan oleh optimasi MOGA adalah baik karena nilainya mendekati angka 1. Nilai Hypervolume Indicator (HV) yang dihasilkan mencapai 31753366961237.9531 atau $41,75 \times 10^{12}$. Berdasarkan nilai HV yang diperoleh dapat diketahui bahwa solusi Pareto yang dihasilkan dari model hasil optimasi MOGA adalah baik. Semakin besar nilai HV, semakin baik solusi Pareto yang diperoleh.



Gambar 3.4 Validasi model dengan Metric Pareto-Front

3.4 Analisis hasil desain sistem tenaga listrik hybrid

Berdasarkan proses optimasi MOGA yang telah dilakukan, menghasilkan nilai proporsi atau persentase beban listrik yang akan dipenuhi oleh masing-masing sistem dengan mempertimbangkan total biaya dan total emisi karbon sistem. Sehingga desain sistem tenaga listrik hybrid yang dirasa paling optimal untuk diterapkan pada sistem kelistrikan Adonara dapat dilihat pada Tabel 3.4 untuk kondisi insolasi matahari normal dan Tabel 3.5 untuk kondisi insolasi matahari minimal.

Tabel 3.4 Desain optimal sistem tenaga listrik hybrid kondisi Iv normal

Solusi	Biaya C_{ANN_TOT}	Emisi Karbon	Ukuran Kapasitas			DG
	(USD)	(kgCO ₂)	PV (Wp)	WT (kW)	BESS (kWh)	Jam
L	81.248.439,76	50.682,39	2.806 x 720	24 x 100	2.134 x 4,8	0
C	45.070.628,08	214.932,59	2.771 x 720	9 x 90	2.079 x 4,8	1.226
R	26.779.712,28	498.696,48	2.104 x 720	4 x 30	1.843 x 4,8	3.416

Tabel 3.5 Desain optimal sistem tenaga listrik hybrid kondisi Iv minimal

Solusi	Biaya C_{ANN_TOT}	Emisi Karbon	Ukuran Kapasitas			DG
	(USD)	(kgCO ₂)	PV (Wp)	WT (kW)	BESS (kWh)	Jam
L	105.728.755,93	46.072,39	3.130 x 720	33 x 100	2.347 x 4,8	438
C	49.562.919,53	198.210,33	3.532 x 720	9 x 90	3.104 x 4,8	1.489
R	26.843.561,99	498.966,53	2.683 x 720	4 x 30	1.989 x 4,8	3.416

Untuk solusi dengan mengutamakan tujuan NZE yakni bersih dari emisi karbon yaitu solusi L, listrik yang dialirkan pada sistem kelistrikan Adonara hanya dipasok oleh PLT EBT dengan proporsi 80% PV, dan 20% WT. Namun biaya yang dihasilkan lebih tinggi, dikarenakan pembelian komponen panel PV, BESS, dan WT yang lebih banyak untuk memenuhi kebutuhan listrik yang biasanya dipasok oleh DG. Kondisi sebaliknya terjadi pada solusi R, dimana mengutamakan tujuan minimisasi biaya. Biaya operasi lebih murah namun emisi karbon yang dihasilkan lebih banyak dikarenakan penggunaan diesel generator berbahan bakar diesel yang belum menggunakan pembangkit listrik ramah lingkungan dan memiliki faktor kali koefisien CO₂ emisi terbesar jika dibanding dengan PV, BESS, dan WT.

Pada kondisi insolasi matahari minimal, biaya yang dikeluarkan lebih besar dibandingkan dengan kondisi insolasi matahari normal, hal itu dikarenakan lebih rendahnya paparan sinar matahari yang bisa ditangkap maka dibutuhkan panel PV dengan jumlah yang lebih banyak agar dapat mencukupi kebutuhan beban listrik. Hal ini terlihat apabila kita bandingkan kebutuhan jumlah panel surya pada kedua kondisi paparan matahari. Dengan nilai proporsi dan tipe panel surya yang digunakan sama namun jumlah panel yang dibutuhkan berbeda, yaitu 2.806 panel PV pada kondisi kondisi insolasi matahari normal dan pada insolasi matahari minimal dibutuhkan 400 panel tambahan.

Pada Tabel 3.6 menampilkan biaya energi atau operasional tahunan dan tingkat emisi kondisi sistem tenaga listrik apabila tidak menggunakan sistem tenaga surya dan angin, yaitu dengan kapasitas maksimal DG dapat memasok listrik.

Tabel 3.6 Desain sistem tenaga listrik tanpa PLTS dan PLTB

Sistem	Proporsi	F1 C_{ANN_TOT} (USD)	F2 CE (kgCO ₂)
DG	100 %	17.956.608,89	1.155.271,10

Biaya yang dikeluarkan lebih murah jika dibandingkan dengan penggunaan sistem tenaga listrik hybrid, hal ini dikarenakan biaya yang dikeluarkan untuk investasi pengadaan panel PV, BESS, dan WT cukup besar. Terlebih jika menggunakan sistem WT, dimana harga investasi awal untuk instalasi PLTB sangat besar jika dibandingkan dengan PLTS berkisar USD 2.019/kW. Sehingga implementasi sistem tenaga listrik hybrid Diesel-PV-WT-BESS akan lebih terasa manfaat ekonomisnya jika dilihat dalam jangka panjang.

3.5 Analisis kebutuhan lahan

Sistem tenaga listrik hybrid Adonara dirancang untuk mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan dengan memanfaatkan WT dan PV. Dengan luas lahan yang terbatas, maka perlu diperhitungkan total luas area yang dibutuhkan untuk membangun WT dan PV di area tersebut. Pulau Adonara memiliki luas total sekitar 519,64 km² atau 519.640.000 m². Masih banyaknya lahan yang belum dimanfaatkan secara optimal, memiliki potensi besar untuk dijadikan area instalasi PLTS dan PLTB. Dengan kondisi demikian, pembangunan sistem tenaga listrik hybrid harus tetap memperhatikan aspek pemanfaatan lahan sehingga tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan.

Setiap turbin angin membutuhkan ruang dengan jarak 5 hingga 10 kali dimensi sudu untuk menghindari turbulensi dan memastikan efisiensi operasional yang tinggi. Dalam perhitungan ini diambil nilai jarak 10D x 10D antar WT.

Selain WT, sistem tenaga listrik hybrid juga dirancang memiliki panel PV dengan kapasitas total yang bervariasi. Berdasarkan data sheet modul PV Trinasolar 720Wp diperoleh data dimensi 1 modul PV berkisar 2,384 x 1,303 m dengan ketebalan 33 mm. sehingga luas yang dibutuhkan untuk 1 panel PV sekitar 3,106 m². Pada instalasi PV juga dibutuhkan ruang tambahan untuk pemeliharaan dan operasional, pada umumnya ditambahkan sekitar 20-30% dari total luas yang dihitung untuk modul PV. Dalam desain ini akan ditambahkan 25% sebagai faktor ruang tambahan.

Berdasarkan analisis di atas, diperoleh data kebutuhan luas lahan untuk masing-masing skenario, seperti terlihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Kebutuhan lahan instalasi PV dan WT

Proporsi (%)		Area PV (m ²)	Area WT (m ²)	Total Area (m ²)	Rasio terhadap Area Pulau
PV	WT				
90	10	9.721,78	1.058.400	1.068.121,78	0.0021%
80	20	8.715,44	396.900	405.615,44	0.0008%
70	30	6.535,02	176.400	182.935,02	0.0004%

Berdasarkan Tabel 3.7 diperoleh data kebutuhan luas lahan untuk berbagai skenario pembangunan sistem tenaga listrik hybrid di pulau Adonara. Data tersebut menunjukkan bahwa luas area yang dibutuhkan untuk WT dan PV dalam meter persegi, serta total luas area dan persentasenya terhadap total luas pulau yang berkisar 519,64 km². Pada skenario yang menggunakan WT dengan jumlah proporsi catu daya listrik mencapai 20-30% cenderung membutuhkan luas lahan yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh banyaknya jumlah unit WT yang harus dibangun pada skenario tersebut yang berdampak langsung terhadap peningkatan luas lahan untuk instalasi.

Pemilihan skenario yang tepat harus mempertimbangkan efisinesi penggunaan lahan dan dampak lingkungan untuk meminimalkan gangguan terhadap ekosistem lokal.

4. Kesimpulan

Pada penelitian Optimisasi Desain Sistem Tenaga Listrik Hybrid menggunakan Multi-Objective Genetic Algorithm: Studi Kasus Pulau Adonara Nusa Tenggara Timur, telah diperoleh data hasil penelitian terhadap potensi implementasi sistem tenaga listrik hybrid untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di pulau Adonara. Berdasarkan hasil optimasi, beberapa kesimpulan utama yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Metode Multi-Objective Genetic Algorithm mampu menjadi metode penyelesaian untuk studi kasus optimasi desain sistem tenaga listrik hybrid Adonara Nusa Tenggara Timur.
2. Pada studi kasus optimasi desain sistem tenaga listrik hybrid Adonara Nusa Tenggara Timur, parameter MOGA yang memberikan solusi paling optimal adalah $P_c = 0,9$ dan $N_{pop} = 100$.
3. Hasil optimasi dengan menggunakan model MOGA diperoleh nilai proporsi pembagian beban listrik di masing-masing sistem sumber catu daya dan ukuran panel PV, WT, serta BESS yang dibutuhkan.
4. Nilai proporsi hasil dari proses optimasi pemenuhan beban listrik BTS pada kondisi insolasi matahari normal adalah sebagai berikut:
 - Solusi L dengan total emisi terendah, beban listrik sistem Adonara hanya dipasok oleh sistem PVBESS dan WT dengan proporsi 80% dan 20%. Total biaya energi sebesar 81.248.439,76 USD dan emisi karbon yang dihasilkan 50.682,39 kgCO₂.
 - Solusi C dengan titik solusi pada median dari Pareto front (keadaan seimbang), nilai proporsinya adalah 79% dari sistem PV dan BESS, 6% dari WT, dan 15% dari DG. Total biaya energi sebesar 45.070.628,08 USD dan emisi karbon yang dihasilkan 214.932,59 kgCO₂.
 - Solusi R dengan total biaya terendah, nilai proporsinya adalah 60% dari sistem PV dan BESS, 1% dari WT, dan 39% dari DG. Total biaya energi sebesar 26.779.712,28 USD dan emisi karbon yang dihasilkan 498.696,48 kgCO₂.

5. Ucapan Terima Kasih

Selama proses penyusunan tesis ini, penulis banyak mendapatkan dukungan dari berbagai pihak. Dengan ini penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat: Dr. Ir. Zainal Arifin, M.B.A. dan Dr. Ignatius Rendroyoko, M.Eng.Sc.IPU, selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan petunjuk, saran-saran serta bimbingannya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan. PT PLN (Persero) Unit Induk Wilayah (UIW) Nusa Tenggara Timur Unit Pelaksana Pembangunan (UPK) Flores yang telah mengizinkan untuk melakukan penelitian dan pengambilan data pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ali, M. (2018). *Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik*.
- Aliyu Ibrahim, K., Philibus Musa, G., Ibrahim, K., Gyuk, P., & Aliyu, S. (2019). The Effect of Solar Irradiation on Solar Cells. *Science World Journal*, 14(1), 2019. www.scienceworldjournal.org
- Al-Shamma'a, A. A., Alturki, F. A., & Farh, H. M. H. (2020). Techno-economic assessment for energy transition from diesel-based to hybrid energy system-based off-grids in Saudi Arabia. *Energy Transitions*, 4(1), 31–43. <https://doi.org/10.1007/s41825-020-00021-2>

- Amer, A., Massoud, A., & Shaban, K. (2024). Optimization of hybrid renewable-diesel power plants considering operational cost, battery degradation, and emissions. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27021>
- Aprilianto, R. A., & Ariefianto, R. M. (2021). Peluang Dan Tantangan Menuju Net Zero Emission (NZE) Menggunakan Variable Renewable Energy (VRE) Pada Sistem Ketenagalistrikan Di Indonesia. *Jurnal Paradigma: Jurnal Multidisipliner Mahasiswa Pascasarjana Indonesia*, 2(2), 1–13. <https://www.researchgate.net/publication/357448042>
- Asmae Berrada, & Rachid El Mrabet. (2021). *Hybrid Energy System Models*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03501-7>
- Bing Maps. (2024). *Adonara - Bing Maps*.
- Chang, K.-H. (2015). Multiobjective Optimization and Advanced Topics. In *Design Theory and Methods Using CAD/CAE* (pp. 325–406). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-398512-5.00005-0>
- Chatzigeorgiou, N. G., Theocharides, S., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2024). A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 86). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111192>
- Dady, M., Banowati, L., & Atmaja, W. (2023). *Analisis Variasi Arah Putar dan Jarak Pattern Farm Turbin Angin terhadap Performance Wind Turbine Type H-Darrieus* (Vol. 2, Issue 1).
- Ferrari, L., Bianchini, A., Galli, G., Ferrara, G., & Carnevale, E. A. (2018). Influence of actual component characteristics on the optimal energy mix of a photovoltaic-wind-diesel hybrid system for a remote off-grid application. *Journal of Cleaner Production*, 178, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.032>
- Gao, Y., Shi, L., & Yao, P. (2000). *Study on Multi-Objective Genetic Algorithm*.
- Ghofrani, M., & Hosseini, N. N. (2016). Optimizing Hybrid Renewable Energy Systems: A Review. In *Sustainable Energy - Technological Issues, Applications and Case Studies*. InTech. <https://doi.org/10.5772/65971>
- Global Solar Atlas. (2024). *GSA Report Pulau Adonara*.
- Gualtieri, G. (2019). A comprehensive review on wind resource extrapolation models applied in wind energy. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 102, pp. 215–233). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.015>
- Hamanah, W. M., Abido, M. A., & Alhems, L. M. (2020). Optimum Sizing of Hybrid PV, Wind, Battery and Diesel System Using Lightning Search Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(3), 1871–1883. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04292-w>
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. In *Results in Engineering* (Vol. 20). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>
- Hemeida, A. M., Omer, A. S., Bahaa-Eldin, A. M., Alkhalaf, S., Ahmed, M., Senjyu, T., & El-Saady, G. (2022). Multi-objective multi-verse optimization of renewable energy sources-based micro-grid system: Real case. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.028>
- Huang, G., Gan, J., Huang, Y., & Ebrahimian, H. (2024). Optimization of off-grid renewable energy systems using a hybrid version of golden search algorithm. *Heliyon*, 10(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30990>

- IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. www.iea.org/terms
- IESR. (2021). *Indonesia Energy Transition Outlook 2022. Tracking Progress of Energy Transition in Indonesia : Aiming for Net-Zero Emissions by 2050*. www.iesr.or.id
- Indonesia Research Institute for Decarbonization. (2022). Mengenal Net-Zero Emission. *Indonesia Research Institute for Decarbonization*. <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>,
- IRENA. (2022). *Indonesia Energy Transition Outlook*. www.irena.org
- IRENA. (2024). *Renewable Power Generation Costs In 2023*. www.irena.org
- Ismail, M. S., Moghavvemi, M., & Mahlia, T. M. I. (2013). Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate. *Energy Conversion and Management*, 69, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.005>
- Kabeyi, B., & Olanrewaju, A. (2020). Performance Analysis of Diesel Engine Power Plants for Grid Electricity Supply. *SAIIE31 Proceedings*. <https://www.researchgate.net/publication/348575084>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Cogeneration potential of an operating diesel engine power plant. *Energy Reports*, 8, 744–754. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.447>
- KESDM. (2023). *Laporan Kinerja Kementerian ESDM Tahun 2022*. 1–415.
- Kharrich, M., Kamel, S., Abdel-Akher, M., Eid, A., Zawbaa, H. M., & Kim, J. (2022). Optimization based on movable damped wave algorithm for design of photovoltaic/ wind/ diesel/ biomass/ battery hybrid energy systems. *Energy Reports*, 8, 11478–11491. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.278>
- Kim, D. K., Yoneoka, S., Banatwala, A. Z., & Kim, Y.-T. (2018). *Handbook on Battery Energy Storage System*. Asian Development Bank. <https://doi.org/10.22617/TCS189791-2>
- Konak, A., Coit, D. W., & Smith, A. E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(9), 992–1007. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.018>
- Magga, R., & Arifin, Y. (2016). *Komparasi Modul Surya Monocrystalline, Polycrystalline Dan Paralel Poly-Monocrystalline Pada Photovoltaic Thermal*. <https://www.researchgate.net/publication/342504466>
- Mahmoud, F. S., Diab, A. A. Z., Ali, Z. M., El-Sayed, A. H. M., Alquthami, T., Ahmed, M., & Ramadan, H. A. (2022). Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms. *Energy Reports*, 8, 4935–4956. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.197>
- Mandelli, S., Barbieri, J., Mereu, R., & Colombo, E. (2016). Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1621–1646. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.338>
- Marqusee, J., Becker, W., & Ericson, S. (2021). Resilience and economics of microgrids with PV, battery storage, and networked diesel generators. *Advances in Applied Energy*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100049>
- Martín-Chivelet, N. (2016). Photovoltaic potential and land-use estimation methodology. *Energy*, 94, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.108>
- Mishra, A. K., Mishra, A. K., Wwww, W. :, Ashis, E., Mishra, K., Yogomaya Mohapatra, E., & Anil, E. (2013). Multi-Objective Genetic Algorithm: A Comprhensive Survey. In *Certified Journal* (Vol. 9001, Issue 2). <https://www.researchgate.net/publication/331590182>

- Mohammed, Y. S., Adetokun, B. B., Oghorada, O., & Oshiga, O. (2022). Techno-economic optimization of standalone hybrid power systems in context of intelligent computational multi-objective algorithms. *Energy Reports*, 8, 11661–11674. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.010>
- Nematzadeh, H., García-Nieto, J., Hurtado, S., Aldana-Montes, J. F., & Navas-Delgado, I. (2024). Model-agnostic local explanation: Multi-objective genetic algorithm explainer. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 139, 109628. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109628>
- Nouri, S. M., Alemi-Rostami, M., & Kahe, G. (2023). Multi-objective optimization of two-stage AC–DC power supply for reliability and efficiency using NSGA-II and meta-heuristic honey bee algorithms. *Energy Reports*, 10, 3174–3185. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.080>
- Pamuk, N. (2024). Techno-economic feasibility analysis of grid configuration sizing for hybrid renewable energy system in Turkey using different optimization techniques. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102474>
- Park, M. H., Hur, J. J., & Lee, W. J. (2023). Prediction of diesel generator performance and emissions using minimal sensor data and analysis of advanced machine learning techniques. *Journal of Ocean Engineering and Science*. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2023.10.004>
- Parlikar, A., Tepe, B., Möller, M., Hesse, H., & Jossen, A. (2024). Quantifying the carbon footprint of energy storage applications with an energy system simulation framework — Energy System Network. *Energy Conversion and Management*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118208>
- Pelser, T., Weinand, J. M., Kuckertz, P., McKenna, R., Linssen, J., & Stolten, D. (2024). Reviewing accuracy & reproducibility of large-scale wind resource assessments. In *Advances in Applied Energy* (Vol. 13). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100158>
- Prum, M., Goh, H. H., Zhang, D., Dai, W., Kurniawan, T. A., & Goh, K. C. (2024). Optimizing hybrid energy systems for remote communities in Asia's least developed countries. *Heliyon*, 10(8), e29369. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29369>
- PT. PLN. (2020). *Konversi PLTD 225 MW di 200 Lokasi, Program Konversi PLTD Menuju EBT 2 Gigawatt*.
- PT. PLN. (2023a). *Rubrik Transformasi, Materi CoC Nasional 11 Desember 2023*.
- PT. PLN. (2023b). *Statistik PLN 2022 Final*. www.pln.co.id
- Raihan. (2017). *Metodologi Penelitian*. Universitas Islam Jakarta.
- Rajput, R. K. (2021). *A textbook of power plant engineering* (5th ed.). Laxmi Publications (P) Ltd. .
- Rezaei, M., Saboohi, Y., Wang, G. G., & Fathi, A. (2024). Multi-objective optimization of Hybrid Energy Systems based on Life Cycle Exergy and Economic criteria. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.03.009>
- Rodriguez-Gallegos, C. D., Gandhi, O., Yang, D., Alvarez-Alvarado, M. S., Zhang, W., Reindl, T., & Panda, S. K. (2018). A Siting and Sizing Optimization Approach for PV-Battery-Diesel Hybrid Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(3), 2637–2645. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2787680>
- Rongjie, W. (2020). Multi-objective configuration optimization method for a diesel-based hybrid energy system. *Energy Reports*, 6, 2146–2152. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.08.004>
- Sari, A., Majdi, A., Opulencia, M. J. C., Timoshin, A., Huy, D. T. N., Trung, N. D., Alsaikhan, F., Hammid, A. T., & Akhmedov, A. (2022). New optimized configuration for a hybrid PV/diesel/battery system based on coyote optimization algorithm: A case study for Hotan county. *Energy Reports*, 8, 15480–15492. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.059>

- Šimić, Z., Knežević, G., Topić, D., & Pelin, D. (2021). Battery energy storage technologies overview. In *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems* (Vol. 12, Issue 1, pp. 53–65). J.J. Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology. <https://doi.org/10.32985/IJECES.12.1.6>
- Singh, S., Chauhan, P., & Singh, N. J. (2020). Capacity optimization of grid connected solar/fuel cell energy system using hybrid ABC-PSO algorithm. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(16), 10070–10088. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.018>
- Sofyan, M. F., Muthahhari, A. A., Evindra, A., Herawan, M. R. F., Perdana, Y. S., & Sastrowijoyo, F. (2022). LCOE vs PV Penetration in Indonesia De-dieselization Program. *ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICPERE56870.2022.10037562>
- Syahza, A. (2021). *Metodologi Penelitian* (2nd ed.). UR Press.
- Tabak, A., Özkaymak, M., Güneşer, M. T., Hüseyin, K., & Erkol, O. (2017). Optimization and Evaluation of Hybrid PV/WT/BM System in Different Initial Costs and LPSP Conditions. In *IJACSA International Journal of Advanced Computer Science and Applications* (Vol. 8, Issue 11). www.ijacsa.thesai.org
- UIW NTT. (2024). *Data permintaan UPK (PLTD Waiwerang dan Terong)*.
- United Nations. (2015). *COP Paris Climate Agreement*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2022). *Carbon Emissions for Different Fuel Types*.
- Usman, R., Sigalo, M. B., Page, I., & Barivuresigalo, M. (2017). Analysis and Simulation of Electrical Load in a Hospital Using Hybrid (Diesel/Solar) System as a Back Up Analysis and Simulation of Electrical Load in a Hospital Using Hybrid (Diesel/Solar) System as a Back Up 1*. *Quest Journals Journal of Electronics and Communication Engineering Research*, 3(9), 2321–5941. www.questjournals.org
- Vinod, V. C., & H. S, A. (2022). Nature inspired meta heuristic algorithms for optimization problems. *Computing*, 104(2), 251–269. <https://doi.org/10.1007/s00607-021-00955-5>
- Wagner, H.-J. (2017). Introduction to wind energy systems. *LNES, EPJ Web of Conferences*, 148(00011).
- Wong, W. K., & Ming, C. I. (2019, June 1). A Review on Metaheuristic Algorithms: Recent Trends, Benchmarking and Applications. *2019 7th International Conference on Smart Computing and Communications, ICSCC 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICSCC.2019.8843624>
- Yin, H. (2024). Multi-objective optimization analysis of construction management site layout based on improved genetic algorithm. *Systems and Soft Computing*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2024.200113>