

KAJIAN DEDIESELISASI PULO PANJANG – DAMPAK EKONOMI, TEKNIK, DAN LINGKUNGAN

Ahmad Taufik Yunanto^{1*)}, Sriyono¹ dan Sumardi²

¹ PT. PLN Research Institute, Bidang Transmisi dan Distribusi, Jl. Duren Tiga Raya, Jakarta 12430

² Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, Semarang 50275

^{*)E-mail: Ahmad.yunanto@pln.co.id}

Abstrak

Pemerintah Indonesia berkomitmen menurunkan emisi melalui target *Net Zero Emission* (NZE) 2060. Dalam sektor ketenagalistrikan, komitmen ini diterjemahkan melalui Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2060 dan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2025–2034 yang menekankan dedieselisasi dan peningkatan bauran energi terbarukan. Salah satu tantangan adalah sistem kelistrikan pulau berbasis diesel yang terpisah dari jaringan utama, seperti sistem Pulo Panjang di Banten. Penelitian ini mengkaji bagaimana transformasi sistem Pulo Panjang dari konfigurasi eksisting menuju sistem hibrida dan sistem *full renewable energy* (full RE) mempengaruhi kinerja teknik, ekonomi, dan lingkungan. Pendekatan yang digunakan berupa kajian dan simulasi untuk membandingkan parameter *Levelized Cost of Energy* (LCOE), biaya bahan bakar, indikator keandalan, serta intensitas emisi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa topologi Full RE memberikan performa ekonomi terbaik dengan penurunan LCOE sebesar 4% dan 84% penghematan biaya bahan bakar dibandingkan sistem eksisting, meskipun tingkat keandalannya sedikit lebih rendah dari sistem hibrida dengan unmet load dibawah 1% dari total produksi energi. Performa lingkungan topologi full RE menghasilkan intensitas emisi CO₂ terendah dengan penurunan emisi sebesar 82.19%. Temuan ini mengonfirmasi bahwa dedieselisasi Pulo Panjang menuju sistem Full RE merupakan langkah strategis dan terukur untuk mendukung target NZE serta dapat direplikasi pada sistem kelistrikan kepulauan lainnya di Indonesia.

Kata kunci: Dedieselisasi, Transisi energi terbarukan, Techno economic-environmental analysis, Net-zero emisi

Abstract

The Government of Indonesia is committed to reducing emissions through the NZE 2060 target. In the power sector, this commitment is implemented through the National Electricity General Plan (RUKN) 2060 and the Electricity Supply Business Plan (RUPTL) 2025–2034, which emphasize diesel phase-out and a higher share of renewable energy. This study focuses on Pulo Panjang in Banten, an island system based on diesel generation and isolated from the main grid. It evaluates the transition from the existing system to hybrid and full RE configurations and their technical, economic, and environmental performance. Simulations compare Levelized Cost of Energy (LCOE), fuel cost, reliability, and emission intensity. The full RE topology delivers the best economic outcome, with a 4% reduction in LCOE and an 84% fuel cost saving relative to the existing system, while unmet load stays below 1% of total energy production. Environmentally, full RE yields the lowest CO₂ emission intensity, lowering total emissions by 82.19%. These results show diesel phase-out in Pulo Panjang toward full RE as a strategic and measurable step to support the NZE target and as a replicable model for other island power systems in Indonesia.

Keywords: Dedieselization, Renewable energy transition, Techno-economic-environmental analysis, Net-zero emissions

1. Pendahuluan

Perubahan iklim global semakin hari semakin terasa nyata dampaknya dalam kehidupan kita sehari-hari. Salah satu indikator yang dapat kita amati adalah laju kenaikan level air laut global. Dalam penelitian [1] diketahui bahwa laju kenaikan level permukaan air laut naik dari sebelumnya 2.1 mm/tahun pada tahun 1993, menjadi 4.55 mm/tahun pada tahun 2023. Kondisi ini disebabkan oleh peningkatan emisi

gas rumah kaca yang mengakibatkan peningkatan suhu planet global. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia pada tahun 2019 telah menginventarisasikan emisi gas rumah kaca (GRK) di sektor energi, dalam laporan tersebut telah dipetakan bahwa penyumbang GRK tertinggi pada tahun 2018 adalah produsen energi, yaitu sebesar 46.35%. Dimana dalam bauran tersebut 94.64% berasal dari industri produsen energi pembangkit Listrik [2].

Sebagai upaya memitigasi dari laju perubahan iklim global, negara-negara anggota Perserikatan Bangsa-bangsa (PBB) berkomitmen untuk bekerjasama mewujudkan 17 misi tujuan pembangunan yang berkelanjutan [3]. Tujuan pembangunan berkelanjutan menghasilkan komitmen NDC, yang disepakati dalam Paris Agreement [4] dan diperkuat melalui komitmen lebih lanjut dalam G20 Summit 2022 di Nusa Dua Bali [5]. Sebagai salah satu anggota negara G20, Indonesia menyusun roadmap Net Zero Emission (NZE) 2060 dalam dokumen Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) 2060 [6] dan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025–2034 [7], yang menjadi pedoman bagi sektor energi untuk bertransisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Produsen energi sebagai penyumbang GRK terbesar di Indonesia ditargetkan untuk menurunkan 358 juta ton CO₂e atau 12.5% dari total target nasional pada tahun 2030 dengan Upaya sendiri, dan 446 juta ton CO₂e atau 15.5% dengan dukungan internasional. Menanggapi target tersebut, Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai penyedia utama listrik di Indonesia telah merubah strategi penyediaan listrik, dari yang dulunya berbasis fosil menjadi berbasis energi baru dan terbarukan [7]. Salah satu strategi pengembangan infrastruktur penyediaan tenaga listrik yang dilakukan adalah melalui program dedieselisasi. Program dedieselisasi disini bermaksud mengurangi ketergantungan suatu sistem terhadap pembangkit berbahan bakar diesel dan menggantikannya dengan sumber energi lain yang lebih ramah lingkungan. Penelitian terkait hybrid microgrid telah banyak dilakukan di berbagai belahan dunia [8][9][10][11] terbukti dapat menurunkan kebergantungan suatu isolated sistem terhadap bahan bakar diesel, serta menurunkan emisi GRK. Penelitian [8] menggunakan *sizing photovoltaic* (PV) berdasarkan kebutuhan beban siang hari dengan variasi penetrasi energi terbarukan sebesar 40%, 60%, dan 100%. *Battery Energy Storage System* (BESS) digunakan untuk *peak shaving* beban malam antara pukul 18:00 hingga 23:00. Beban sistem dimodelkan tetap selama 25 tahun durasi simulasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan BESS efektif untuk menurunkan konsumsi bahan bakar, emisi karbon, dan *levelized cost of energy* (LCOE).

Penelitian [9] membandingkan beberapa topologi pembangkit energi terbarukan hibrida yang terhubung ke *main-grid*. Hasilnya menunjukkan bahwa topologi *grid-connected* menghasilkan LCOE terendah. Namun, biaya investasi integrasi ke *main-grid* tidak dijelaskan. Pemodelan dilakukan menggunakan data sintetis, bukan data historis. Penentuan kapasitas pembangkit dilakukan menggunakan *optimizer* dari perangkat lunak HOMER Pro.

Pendekatan penggunaan data perangkat elektronik rumah tangga digunakan dalam penelitian [10] untuk

memodelkan beban sistem. Penentuan kapasitas pembangkit dilakukan menggunakan optimasi HOMER Pro. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan PV dan BESS pada topologi *stand-alone* dapat mengurangi emisi karbon, LCOE, dan *net present cost* (NPC). Untuk sistem yang terhubung ke *main-grid*, penambahan BESS tidak ekonomis, tetapi penambahan PV tetap mengurangi pembelian energi dari grid dan emisi karbon.

Penelitian di Turki [11] menganalisis komposisi pembangkit energi terbarukan hibrida, PLTD, dan *main-grid* pada 21 provinsi. Penentuan kapasitas pembangkit dilakukan menggunakan fitur *optimizer* HOMER Pro. Penelitian ini menyimpulkan bahwa topologi *stand-alone* menghasilkan emisi karbon lebih rendah dibandingkan topologi *grid-tied*. Nilai LCOE dan NPC topologi *grid-tied* lebih rendah, tetapi biaya investasi integrasi grid tidak dijelaskan.

Kecamatan Pulo Panjang adalah sebuah pulau yang terpisah oleh laut sejauh 4 km dari lepas Pantai Provinsi Banten [12]. Selama ini mengandalkan suplai listrik dari 5 unit DG dengan total daya mampu sebesar 758 kW. Kondisi ini jelas bertentangan dengan trend global dan regulasi nasional yang telah mengalami perubahan ke arah energi baru dan terbarukan.

Menindaklanjuti kondisi tersebut, PLN dalam roadmap RUPTL menjadwalkan sistem Pulo Panjang untuk menjalani program dedieselisasi tahap pertama, yaitu dengan mengintegrasikan PV dan BESS ke dalam sistem PLTD Pulo Panjang. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada metodologi penentuan kapasitas optimal (*sizing*) untuk sistem dedieselisasi Pulo Panjang, serta melakukan evaluasi kinerja operasi dari sisi ekonomi, teknik dan emisi karbon setelah terjadinya perubahan bauran energi listrik.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang tidak dilengkapi validasi model, penelitian ini melakukan data validasi, yaitu membandingkan kemiripan performa hasil simulasi dengan data primer sistem eksisting. Validasi ini penting untuk menjaga integritas penelitian dan keakuratan model sistem yang telah dimodifikasi.

Penelitian-penelitian sebelumnya umumnya menentukan kapasitas pembangkit menggunakan *optimizer* HOMER, atau metode perhitungan berbasis asumsi beban harian maksimum, rata-rata, dan minimum. Dalam penelitian ini, digunakan data historis konsumsi energi tahunan dari sistem Pulo Panjang sebagai dasar perhitungan kapasitas PV dan BESS. Hasil perhitungan kemudian dimodelkan menggunakan PVSyst untuk memetakan rugi daya sistem PV dan BESS secara lebih akurat. Nilai *sizing* tersebut selanjutnya dimasukkan ke HOMER Pro menggunakan metode *search space*. Berbeda dengan metode *optimizer*, metode *search-space* memungkinkan pemodelan simulasi *multi-year*, yang dapat memasukkan asumsi pertumbuhan

beban tahunan, degradasi produksi PV tahunan, dan kenaikan biaya O&M. Berbagai skenario pemeliharaan mesin PLTD juga dimodelkan secara rinci berdasarkan prosedur operasi perusahaan dari perusahaan. Parameter batasan data ekonomi, teknik, dan emisi karbon diadopsi dari dokumen RUPTL.

Dalam penelitian ini dimodelkan tiga arsitektur sistem kelistrikan, yaitu:

1. Sistem arsitektur eksisting,
2. Sistem arsitektur hibrida, dan
3. Sistem arsitektur full Full RE.

Ketiga topologi tersebut kemudian dibandingkan untuk menentukan topologi yang paling sejalan dengan arah transisi energi nasional yang tercantum dalam RUPTL, ditinjau dari aspek performa teknik, kelayakan ekonomi, dan reduksi emisi karbon.

Sejalan dengan judul “Kajian Dedieselisasi Pulo Panjang – Dampak Ekonomi, Teknik, dan Lingkungan”, tujuan penelitian ini secara khusus adalah untuk:

1. Melakukan sizing PV dan BESS sebagai pengganti suplai PLTD
2. Melakukan sizing PV dan BESS untuk skenario operasi hibrida bersama PLTD, serta
3. Menganalisis dampak teknik, ekonomi, dan lingkungan dari setiap arsitektur sistem, sehingga dapat diperoleh opsi sistem tenaga listrik yang paling optimal dan mendukung program dedieselisasi di Pulo Panjang.

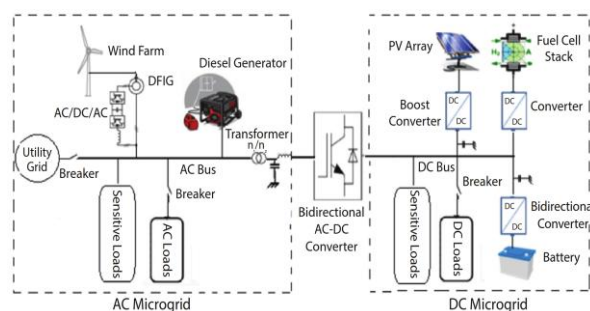
Secara umum metode baru yang ditawarkan dalam penelitian ini adalah dengan menjaga integritas model melalui validasi data dan menggunakan *constraints* yang sama dengan RUPTL agar hasilnya dapat dibandingkan langsung dengan target RUPTL. Secara khusus belum ada penelitian yang mengangkat studi kasus dedieselisasi Pulo Panjang, dengan mengutilisasikan RUPTL 2025-2034 sebagai data *constraints*.

Dengan tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar teknis dan ekonomi yang terukur bagi implementasi dedieselisasi serta mendukung upaya pencapaian target energi bersih nasional.

2. Dasar Teori

2.1. Teknologi Microgrid Hibrida

Microgrid Hibrida adalah suatu sistem yang menggabungkan sumber tegangan AC dengan sumber tegangan DC menggunakan *bidirectional AC-DC converter* yang terhubung dalam *point of common coupling* (PCC) [13]. Dalam konsep microgrid hibrida sumber energi bisa berasal dari energi terbarukan dan energi fosil, seperti ditunjukkan pada gambar 1. Konfigurasi ini memungkinkan untuk mengkombinasikan keunggulan dari masing-masing karakteristik dari AC dan DC microgrid.



Gambar 1. Hybrid Microgrid schematic diagram [13]

Konsep microgrid hibrida salah satunya diterapkan dalam penelitian [8] dilatar belakangi dari operasi DG pada sistem microgrid yang tidak efisien dikarenakan pembebanan yang tidak optimal. Temuan dari penelitian ini adalah integrasi PV dan BESS ke dalam microgrid dapat membatasi operasi DG sehingga dapat meningkatkan optimalisasi operasi dari sistem. Dalam jangka panjang konfigurasi hybrid diproyeksikan dapat menurunkan NPC, konsumsi bahan bakar, dan emisi yang dihasilkan oleh sistem.

Penelitian [9] mengimplementasikan microgrid hibrida di daerah dengan rasio elektrifikasi rendah. Biaya bahan bakar yang tinggi dan emisi karbon yang dibangkitkan juga menjadi latar belakang dilakukannya desentralisasi microgrid hibrida untuk mengatasi permasalahan tersebut. Dalam penelitian ini menyimpulkan bahwa microgrid hibrida menjadi solusi bagi *rural area* dengan akses yang sulit dari *main-grid*, dengan mengoptimalkan *energy harvesting* dari potensi sumber energi terbarukan di masing-masing daerah tersebut.

Pendekatan lain dilakukan pada penelitian [11] yang berangkat dari sifat intermitensi dari pembangkit energi terbarukan. Sebagai solusi integrasi antara *renewable energy* dengan BESS, alternatif perubahan topologi menjadi *grid-tied* menjadi aspek yang perlu dipertimbangkan. Penelitian ini menekankan pentingnya analisis komprehensif dengan menggunakan perangkat lunak optimasi perencanaan, untuk mengoptimalkan performa teknik, ekonomi, dan lingkungan dari sistem yang kita rancang.

Microgrid hibrida memang menjanjikan gambaran energi masa depan yang ramah lingkungan dan menjanjikan penghematan biaya jangka panjang. Akan tetapi seperti ditulis dalam penelitian [10], biaya investasi untuk pembangunan pembangkit energi terbarukan masih sangat tinggi jika dibandingkan dengan konfigurasi *grid-tied*. Perlu adanya dorongan kebijakan regulasi yang dapat memacu percepatan investasi pembangkit energi terbarukan di Indonesia.

2.2. Sizing PV dan BESS

Dalam desain sistem microgrid hibrida penentuan kapasitas PV dan BESS adalah aspek yang sangat krusial untuk memastikan kebutuhan energi dapat disuplai dengan efisien dengan biaya investasi yang optimal. Beberapa aspek *derating* dan *losses* dari topologi sistem perlu dipertimbangkan dalam perencanaan kapasitas PV dan BESS.

Besaran persentase *battery inverter losses*, *PV inverter losses*, dan *cable losses* dapat mengacu pada data teknis dari komponen yang digunakan. Dalam konteks sistem panel surya, *tilt angle* merujuk pada kemiringan panel surya terhadap permukaan horizontal. Azimuth menggambarkan arah horizontal kemana PV array menghadap. *Tilt angle* dan azimuth sangat memengaruhi jumlah iradiasi matahari yang diterima oleh PV array. *Output* harian dari array biasanya lebih rendah dari output maksimum yang mungkin tercapai jika array tidak diorientasikan dengan optimal. Adapun besar dari *losses* akibat *tilt angle* dan azimuth ini dapat mengacu ke beberapa referensi tertulis [14], maupun menggunakan simulasi menggunakan perangkat lunak.

Daya keluaran dari PV modul akan turun ketika beroperasi di atas suhu referensi 25° Celcius, dan daya keluarannya akan naik ketika beroperasi dibawah suhu referensi. Ketika PV modul terkena panas matahari, rata-rata suhu PV cell akan lebih tinggi dari udara lingkungan sekitar, dikarenakan lapisan kaca PV modul memperangkap panas di dalamnya. Selain itu konstruksi dari PV mounting juga turut mempengaruhi sirkulasi panas yang terperangkap didalam panel. Kebutuhan kapasitas PV dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$P_{array\ STC} = \frac{E_{sys\ req}}{f_{total} \times PSH_{tilt}} \quad (1)$$

Dimana PSH_{tilt} atau *peak sun hours* adalah jumlah iradiasi matahari yang diterima dalam satu meter persegi selama satu jam yaitu sekitar 1,000 W/m². f_{total} adalah total *derating* sistem, dan $E_{sys\ req}$ adalah rata-rata energi yang dibutuhkan oleh sistem dalam periode waktu tertentu, dihitung menggunakan persamaan (2).

$$E_{sys\ req} = f_{energy} \times \frac{12}{n} \times \sum_1^n E_x \quad (2)$$

Dimana f_{energy} adalah fraksi energi, yaitu porsi energi yang ingin dipenuhi oleh PV. n adalah jumlah periode bulan data yang dimiliki, dan E_x adalah jumlah energi listrik yang digunakan pada bulan tersebut.

Dalam penelitian ini digunakan *sizing* BESS sebagai *backup*. Penggunaan BESS sebagai *backup* adalah, BESS beroperasi ketika terjadi ketidaksesuaian antara suplai energi listrik dengan kebutuhan energi pada beban, bertujuan untuk menjaga kehandalan suplai energi listrik kepada beban [14]. Skenario tersebut dapat terjadi antara

lain ketika terjadi intermitensi suplai PV dikarenakan berbagai macam factor, ataupun terjadinya *main-grid outage* pada sistem PV yang terhubung dengan *main-grid*. Pada sistem *off-grid*, apabila ingin pemenuhan energi sepenuhnya dibackup oleh baterai, *sizing* BESS sebagai dilakukan dengan mengidentifikasi kebutuhan energi yang diperlukan oleh sistem (E_b), dikalikan rencana sistem beroperasi secara otonomi oleh suplai BESS (N_d), dibagi dengan kemampuan *discharge* dari BESS (DoD), seperti ditunjukkan pada persamaan (3) [15].

$$C_b(Wh) = \frac{E_b \times N_d}{DoD} \quad (3)$$

Panduan lain [14] mempertimbangkan aspek *derating* sistem dan 10% *safety margin* dalam penentuan kapasitas BESS, sehingga apabila digabungkan dengan persamaan (3) maka dihasilkan persamaan (4).

$$C_b(Wh) = \frac{E_b \times N_d}{DoD \times f_{total}} \times 1.1 \quad (4)$$

Apabila sistem beroperasi sepenuhnya secara otonomi, maka penentuan kapasitas baterai dapat mengacu pada kebutuhan energi sistem ketika tidak ada suplai dari pembangkit energi terbarukan. Apabila sistem didesain untuk beroperasi secara hibrida dengan sumber energi lain, maka energi yang dibutuhkan dapat berupa pemenuhan kebutuhan ketika terjadi intermitensi sumber energi terbarukan.

Kapasitas inverter baterai harus dapat mengakomodir secara terus-menerus *excess power* maksimum yang digunakan untuk pengisian daya dan beban maksimum yang di suplai oleh BESS [14]. *Safety margin* sebesar 10% perlu diperhitungkan untukantisipasi *in-rush current* dari beban. Tegangan operasi DC dari inverter baterai ini dijadikan acuan tegangan maksimum ketika mengatur konfigurasi rangkaian sel baterai dalam BESS. Mengacu pada penelitian [16] pengaturan rangkaian baterai mengacu pada persamaan (5) dan (6).

$$N_s = floor\left(\frac{V_{dc,min}}{V_{bat,min}\delta}\right) \quad (5)$$

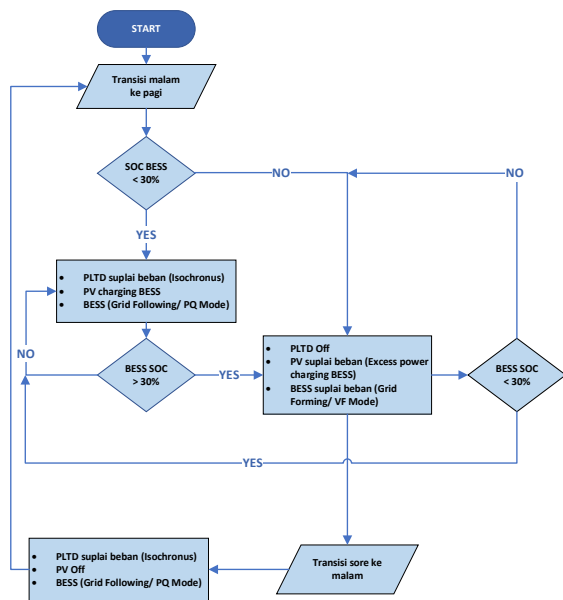
$$N_p = ceil\left(\frac{C_b}{C_{bat}N_s}\right) \quad (6)$$

Dimana δ adalah *voltage margin* yang dalam penelitian ini diasumsikan bernilai 1.1 [16]. $V_{dc,min}$ adalah tegangan operasional DC dari inverter baterai yang digunakan. $V_{dc,min}$ adalah tegangan DC dari inverter baterai yang digunakan, dan C_{bat} adalah kapasitas energi per sel baterai.

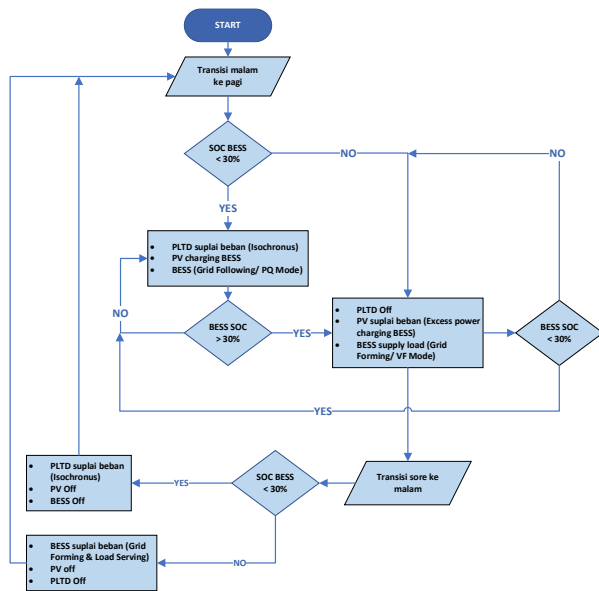
3. Metodologi

3.1. Control Concept

Dalam penelitian ini didesain 2 topologi modifikasi sistem yaitu hibrida dan full RE. Pola operasi hibrida dapat dilihat pada gambar 2, yaitu ketika siang hari PV beroperasi, beban disuplai oleh PV, BESS beroperasi sebagai grid forming, dan PLTD standby.



Gambar 2. Kontrol konsep topologi hibrida



Gambar 3. Kontrol konsep topologi full RE

Pada malam hari PLTD mensuplai kebutuhan energi beban. Sedangkan kontrol konsep topologi full RE, gambar 3, pola operasi siang hari sama dengan topologi hibrida. Perbedaannya adalah ketika malam hari BESS yang mensuplai kebutuhan energi beban. Dari kedua topologi ini memiliki kesamaan batas bawah SOC BESS, yaitu 30%.

Ketika SOC BESS dibawah 30% maka BESS berhenti discharge, dan pemenuhan energi ke beban digantikan oleh PLTD ataupun PV.

3.2. Kelistrikan Pulo Panjang

Kebutuhan listrik di Pulo Panjang selama ini disuplai oleh 5 unit DG dengan total daya mampu 758kW, detail dapat dilihat pada tabel 1. PLTD tersebut digunakan untuk mensuplai 870 pelanggan dengan beban puncak tercatat sebesar 176 kW selama tahun 2025., dengan profil beban dapat dilihat pada gambar 4. Jenis bahan bakar yang digunakan pada mesin PLTD adalah campuran antara B40 dengan HSD dengan kandungan energi minimum 44 MJ/kg [17]. Sampai dengan September 2025 rata-rata harga CIF bahan bakar mesin Pulo Panjang adalah Rp 12,833.13/Liter. Pemenuhan kebutuhan listrik dengan PLTD mempunyai BPP rata-rata yang tinggi, yaitu Rp 6,087.29/kWh.

Tabel 1. Detail mesin DG Pulo Panjang

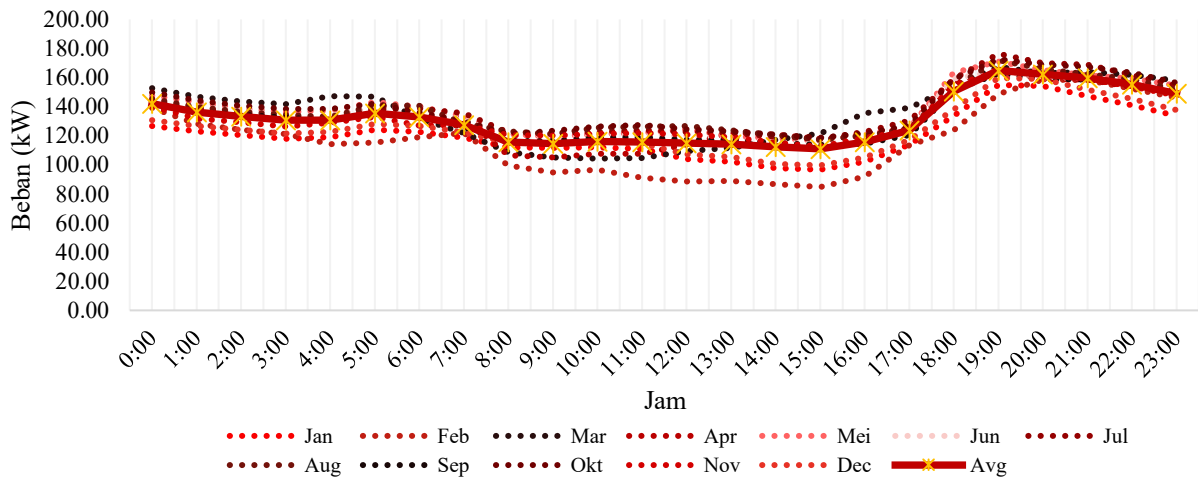
Merk Mesin	Daya Mampu (kW)	SFC (Ltr/kWh)
SDEC #1	160	0.307
CUMMINS #3	86	0.317
PERKINS #4	192	0.286
FG WILSON #5	192	0.286
PERKINS #6	128	0.285

3.3. Potensi Energi Matahari

Berdasarkan data *global horizontal irradiance* (GHI) Pulo Panjang yang diperoleh dari laman website European Union [18] pada kemiringan PV modul 15° dan azimuth 0°, didapatkan besar iradiasi dan suhu rata-rata seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data iradiasi matahari Pulo Panjang

Iradiasi Matahari Bulanan (kWh/m ² /mo)	Iradiasi Matahari Harian (kWh/m ² /day)	Temperatur (C°)
156.83	5.06	28.3
119.61	4.27	27
160.73	5.18	27.6
163.19	5.44	28.4
154.7	4.99	28.7
146.67	4.89	28.1
154.36	4.98	27.8
176.08	5.68	27.7
189.88	6.33	28.2
199.48	6.43	29
169.86	5.66	28.5
182	5.87	27.7
165.14	5.40	28.06



Gambar 4. Kurva beban Pulo Panjang

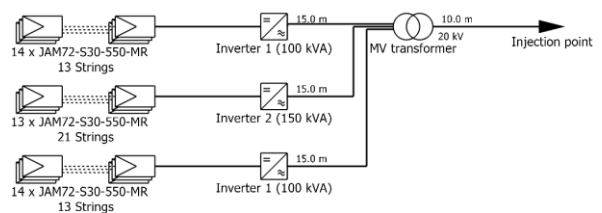
4. Perancangan Sistem

4.1. Perancangan Topologi Hibrida

Seperti ditunjukkan pada gambar 2, topologi ini dimaksudkan untuk mengurangi penggunaan PLTD dengan penggunaan PV pada siang hari. Dari perhitungan kebutuhan energi tahunan selama siang hari didapatkan nilai 514,048.12 kWh dengan PSH_{tilt} total selama 1,973.39 jam. Perangkat lunak PVsyst digunakan untuk memodelkan *derating* sistem, yaitu didapatkan nilai 76%. Menggunakan persamaan (1) didapatkan kebutuhan daya PV sebesar 330.49 kWp. Selanjutnya kebutuhan kapasitas PV tersebut diatur konfigurasi menggunakan perangkat lunak PVsyst menghasilkan 3 sub-array dengan komposisi sub-array 1 dan 2 identik tersusun dari 14 modul PV 550 Wp disusun seri dan 13 string. Sub-array 3 tersusun dari 14 modul PV 550 Wp disusun seri dan 13 string, total kapasitas 3 sub-array ini adalah 350 kWp seperti ditunjukkan pada gambar 5.

Sub-array 1 dan 2 didukung oleh PV inverter berkapasitas 100 kVA. Sedangkan untuk sub-array 3 dilengkapi dengan inverter berkapasitas 150 kVA. Kedua inverter ini menghasilkan tegangan keluaran 400 V.

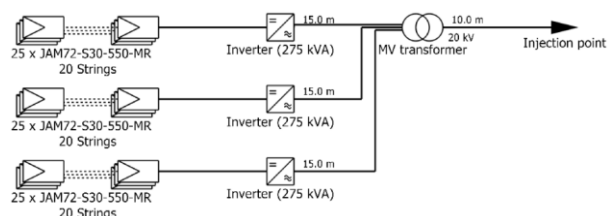
Kebutuhan energi baterai akan didasarkan pada besar intermitensi harian maksimum sistem Pulo Panjang selama satu tahun periode simulasi, yaitu sebesar 1,090.65 kWh. Menggunakan persamaan (4) didapatkan nilai kebutuhan kapasitas BESS adalah sebesar 1,831.56 kWh. Baterai yang digunakan adalah tipe Lithium-Ion model Cell Li LFP berkapasitas 100 Ah dengan tegangan 3.2 Volt. Pemilihan battery LFP atau LiFePO₄ dikarenakan sudah banyak penelitian yang menggarisbawahi keunggulan dari tipe baterai ini, yaitu antara lain *energy density* tinggi, kestabilan thermal baik, *discharge voltage* stabil, siklus hidup yang panjang antara 2,400 sampai 8,000 siklus, laju degradasi dibawah 0.1% per siklus pada C₁ hingga C₁₀, menunjukkan sifatnya yang tangguh dalam operasi daya tinggi dan jangka panjang [19] [20][21] [22].



Gambar 5. PV array topologi hibrida

Analisis data penelitian menunjukkan besar *excess power* maksimum di sistem Pulo Panjang ketika disimulasikan dengan 350 kWp PV Panel adalah sebesar 207.11 kW. Setelah disesuaikan dengan ketersediaan spesifikasi inverter di Industri, diputuskan untuk menggunakan baterai *bidirectional converter* berkapasitas 250 kW dengan tegangan operasi baterai 500-850 Volt. Menggunakan asumsi tegangan BESS 640 Volt, dengan perhitungan persamaan (5) dan (6), didapatkan konfigurasi BESS terdiri dari 181 sel seri dan 46 paralel.

4.2. Perancangan Topologi Full RE



Gambar 6. PV array topologi full RE

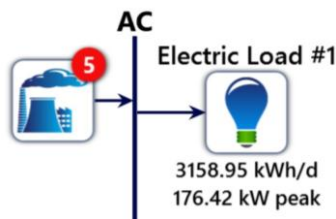
Topologi full RE bertujuan untuk menjadikan PV dan BESS sebagai suplai utama, sedangkan PLTD hanya menjadi suplai cadangan. Kebutuhan energi untuk *sizing* PV didasarkan pada kebutuhan tahunan beban siang dan malam, yaitu sebesar 1,156,307.27kWh. Nilai PSH_{tilt} dan *derating* sistem sama dengan topologi hibrida. Menggunakan persamaan (1) didapatkan kebutuhan daya PV sebesar 813.65 kWp. Selanjutnya kebutuhan kapasitas

PV tersebut diatur konfigurasi menggunakan software PVSyst menghasilkan 3 sub-array identik tersusun dari 25 modul PV 550 Wp disusun seri dan 20 string, total kapasitas sub-array terpasang adalah 825 kWp, seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Masing-masing sub-array dilengkapi dengan PV inverter berkapasitas 275 kVA.

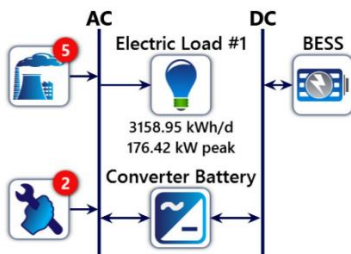
Kebutuhan kapasitas BESS didasarkan pada kebutuhan beban maksimum sistem Pulo Panjang ketika malam hari, yaitu sebesar 1,847.94 kWh. Dengan menggunakan persamaan (4) didapatkan kebutuhan BESS berkapasitas 3,243.52 kWh dengan susunan 181 sel seri dan 80 sel paralel. Analisis data penelitian menunjukkan besar *excess power* maksimum di sistem Pulo Panjang ketika disimulasikan dengan 825 kWp PV panel adalah sebesar 577.61 kW, sehingga dipilih baterai *bidirectional converter* dengan total kapasitas 600 kW.

4.3. Pemodelan Sistem dan Data Validasi

Topologi eksisting (*base case*) dari sistem Pulo Panjang harus dimodelkan kemudian dibandingkan hasil simulasinya dengan data primer. Adapun data yang divalidasi adalah LCOE, mewakili kebutuhan biaya untuk menghasilkan energi dan *specific fuel consumption* (SFC), mewakili laju konsumsi bahan bakar dari mesin PLTD.



Gambar 7. Model topologi eksisting



Gambar 8. Model topologi Hibrida dan Full RE

Adapun hasil simulasi *base case* memiliki tingkat kesamaan antara LCOE simulasi dengan data primer sebesar 99%, yaitu berturut-turut \$0.380 dan \$0.378. Demikian juga dengan SFC, memiliki tingkat kemiripan data 99% antara hasil simulasi dan data primer. Setelah model *base case* dipastikan valid, simulasi dikembangkan dengan memodelkan topologi hibrida dan full RE seperti ditunjukkan pada gambar 8.

Adapun penentuan kapasitas BESS, konverter baterai, dan kapasitas PV didasarkan pada perhitungan pada *chapter* 4.1 dan 4.2. Pada topologi hibrida jumlah DG diubah menjadi 3 unit, yaitu CUMMINS #3, PERKINS #4, dan PERKINS #6. Sedangkan untuk topologi full RE, backup DG terdiri dari CUMMINS #3 dan PERKINS #4.

5. Hasil dan Pembahasan

Sizing kapasitas komponen telah dilakukan pada *chapter* sebelumnya menghasilkan komposisi komponen masing-masing topologi seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Selanjutnya untuk menentukan rekomendasi yang paling *feasible* untuk diterapkan pada Pulo Panjang, digunakan analisis perbandingan performa ekonomi, teknik, dan lingkungan dari ketiga topologi tersebut, selama periode simulasi 10 tahun dari 2025 sampai dengan 2034.

Tabel 3. Perbandingan komposisi masing-masing topologi

Topologi Sistem	Kapasitas Komponen				
	DG (kW)	PV (kWp)	PV Inverter (kW)	BESS (kWh)	BESS Inverter (kW)
Base Case	758	-	-	-	-
Hibrida	384	350	350	1865	250
Full RE	278	814	825	3244	600

5.1. Analisis Performa Ekonomi

Dalam analisis performa ekonomi, satuan mata uang yang digunakan adalah US Dolar (US\$), dengan beberapa *data constraints* seperti ditunjukkan pada tabel 4. Dalam komponen biaya investasi, kebutuhan biaya untuk akuisisi lahan PLTS diabaikan, diasumsikan lahan yang digunakan adalah lahan hibah pemerintah ataupun aset eksisting milik perusahaan.

Tabel 4. Economic data constraints

Keterangan	Nilai	Referensi
Nilai tukar IDR terhadap US\$	16,100	[7]
Laju kenaikan beban	3.1%/tahun	[7]
Laju inflasi	3.5%/tahun	[7]
Discount rate	9.24%	[23]
Laju degradasi PV	2.07%/tahun	[24]

Dengan menggunakan data inputan berupa perolehan aset akuntansi dari akses eksisting, referensi harga dari kontrak pekerjaan PV dan BESS di berbagai wilayah kerja PLN, serta tambahan referensi harga dari *marketplace*, diperoleh hasil simulasi performa ekonomi sebagai berikut, ditampilkan pada tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan performa ekonomi

Cost Type	Unit	Base Case	Hibrida	Full RE
LCOE	US\$/kWh	0.380	0.395	0.365
NPC	US\$	3,746,568	3,894,785	3,595,988
CAPEX	US\$	177,965	1,297,606	2,259,403
Fuel Cost	US\$	2,247,502	1,348,306	367,574

Peningkatan sistem dari *base case* menjadi hibrida meningkatkan CAPEX sebesar 629% dan apabila menjadi full RE meningkatkan CAPEX sebesar 1170%. Dengan investasi tersebut nilai LCOE topologi hibrida 4% lebih tinggi dari *base case*, untuk topologi full RE dapat menurunkan LCOE sebesar 4%. Akan tetapi dari perubahan topologi tersebut konsumsi bahan bakar dapat ditekan sebesar 40% pada topologi hibrida, dan turun lebih signifikan sebesar 84%, untuk topologi full RE. Selama 10 tahun proyek berlangsung nilai NPC topologi hibrida 4% lebih mahal dari *base case*, dan untuk topologi full RE menghasilkan efisiensi 4% dibanding topologi eksisting. Kajian kelayakan investasi perubahan topologi sistem Pulo Panjang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Analisis investasi

Cost Type	Unit	Hibrida	Full RE
Present Worth	US\$	-148,217	150,580
ROI	%	1.4%	4.2%
Simple Payback	Years	8.50	6.97

Perubahan topologi dari eksisting menjadi hibrida menghasilkan kenaikan NPC sebesar US\$148,217 namun masih memiliki indeks *Return on Investment* (ROI) positif sebesar 1.4%. Sehingga investasi ini dapat mencapai *break-event point* (BEP) dalam 8.5 tahun. Sedangkan investasi dari *base case* menjadi full RE menghasilkan penghematan biaya sebesar US\$150,580, dan persentase ROI 4.2%. Investasi Full RE dapat mencapai BEP lebih singkat, yaitu dalam 6.97 tahun.

5.2 Analisis Performa Teknik

Performa kehandalan di representasikan dengan *unmet electrical load*, *capacity shortage* dan *reserve margin*, seperti ditampilkan pada tabel 7.

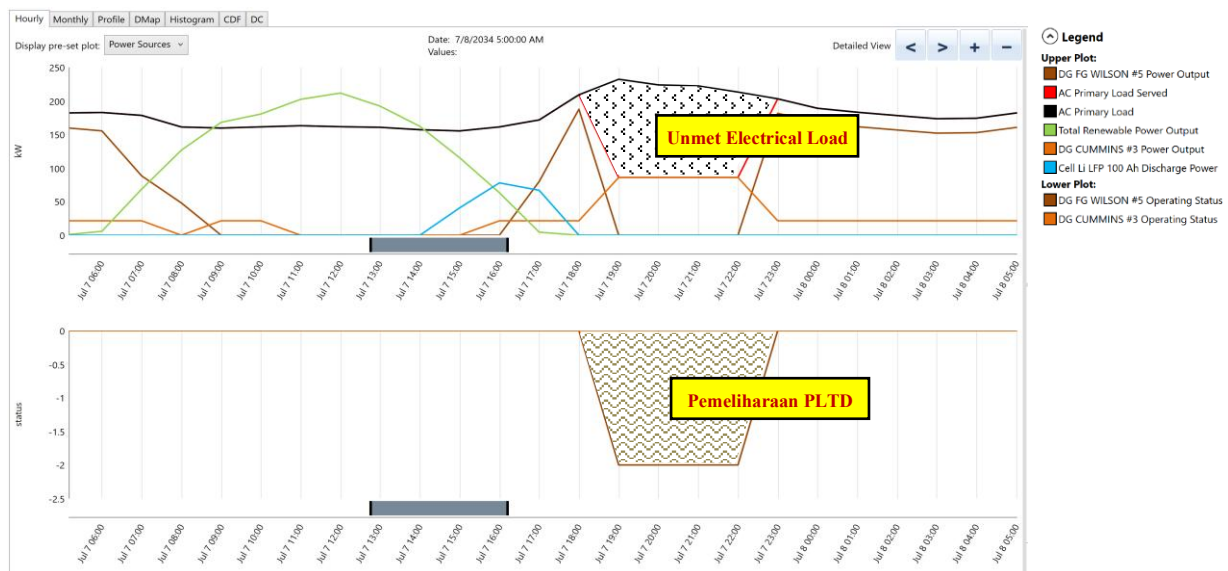
Tabel 7. Perbandingan kehandalan

Topologi	Energy Served (kWh)	Excess Power (kWh)	Unmet Electrical Load (kWh)	Capacity shortage (kWh)
Base Case	13,279,069	0	0	0
Hibrida	13,276,464	0	2,605	55,449
Full RE	13,261,343	270,181	17,726	71,570

Terlihat topologi *base case* memiliki performa kehandalan paling baik dengan tidak ada *unmet electrical load* dan *capacity shortage*. Kondisi ini dikarenakan sistem disuplai oleh 5 unit DG dengan total kapasitas jauh melebihi kebutuhan beban sistem. Sehingga walaupun ketika terjadi pemeliharaan salah satu mesin, masih terdapat cukup mesin cadangan yang dapat beroperasi untuk memenuhi kebutuhan energi sistem.

Topologi hibrida dan full RE memiliki kehandalan yang baik, ditandai dengan persentase *unmet electrical load* dan *capacity shortage* yang sangat kecil, yaitu dibawah 1% dari total kebutuhan energi tahunan. Topologi hibrida menunjukkan performa kehandalan yang sedikit lebih baik dibandingkan topologi full RE. *Unmet electrical load* dan *capacity shortage* terjadi ketika pada siang hari produksi energi PV tidak maksimal, sehingga pengisian daya BESS tidak dapat maksimal. Bersamaan dengan itu pada malam hari terdapat jadwal pemeliharaan mesin DG, fenomena ini dapat diamati pada gambar 9.

Selanjutnya tabel 8 menunjukkan persen *reserve margin* dari masing-masing topologi sistem. Sesuai dengan standard RUPTL, sistem *isolated* diharuskan memiliki *reserve margin* minimal sebesar 35% dari beban puncak tahunan. Adapun seluruh topologi sistem diproyeksikan mampu beroperasi sesuai dengan ketentuan RUPTL tersebut selama 10 tahun simulasi.

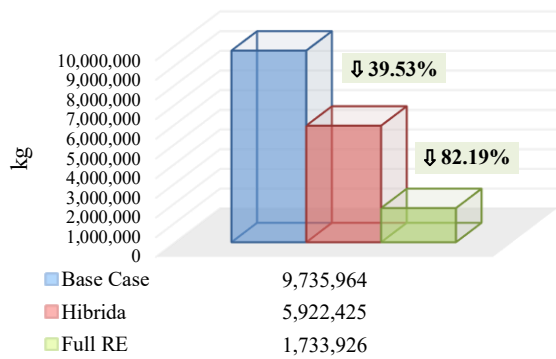


Gambar 9. Dampak shading PV dan pemeliharaan DG

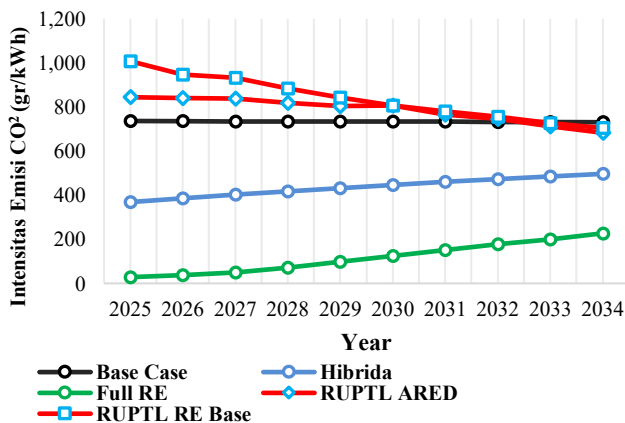
Tabel 8. Perbandingan reserve margin

Years	Peak Load (kW)	Base Case		Hibrida		Full RE	
		Reserve Margin (kW)	Reserve Margin (%)	Reserve Margin (kW)	Reserve Margin (%)	Reserve Margin (kW)	Reserve Margin (%)
2025	176	582	330%	474	269%	702	398%
2026	182	576	317%	372	204%	702	383%
2027	188	570	304%	218	117%	702	368%
2028	193	565	292%	213	110%	702	354%
2029	199	559	280%	258	129%	702	340%
2030	206	552	269%	200	98%	702	327%
2031	212	546	258%	194	92%	702	314%
2032	218	540	247%	188	86%	702	302%
2033	225	533	237%	181	80%	702	290%
2034	232	526	226%	174	75%	702	278%

5.3. Analisis Performa Lingkungan



Gambar 10. Perbandingan total produksi CO₂



Gambar 11. Perbandingan intensitas emisi CO₂

Dampak lingkungan dianalisis berdasarkan matriks total produksi CO₂ dan intensitas produksi CO₂ per kWh. RUPTL telah mengatur *roadmap* intensitas produksi CO₂ per kWh energi yang dibangkitkan. Topologi hibrida mampu menurunkan emisi CO₂ sebesar 39.53% dibandingkan dengan base case. Topologi dengan penurunan emisi karbon paling besar adalah full RE, yaitu sebesar 82.19%, ditunjukkan pada

gambar 10. Dari segi intensitas emisi CO₂/kWh topologi hibrida dan full RE diproyeksikan mampu beroperasi sesuai dengan regulasi RUPTL, seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Sedangkan apabila tetap mengandalkan suplai energi dari DG, maka pada tahun 2033 intensitas emisi CO₂/kWh dari sistem Pulo Panjang diproyeksikan melebihi target RUPTL.

6. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan sizing PV dan BESS pada dua topologi sistem kelistrikan Pulo Panjang, yaitu sistem hibrida dan sistem Full RE, serta menganalisis dampaknya terhadap performa teknik, ekonomi, dan lingkungan dibandingkan dengan topologi eksisting.

Berdasarkan serangkaian perhitungan dan simulasi, diperoleh bahwa:

1. Topologi Hibrida membutuhkan kapasitas 330.49 kWp PV dan 1,831.56 kWh BESS. Konfigurasi PV disusun menjadi total 350 kWp melalui tiga sub-array, sedangkan BESS tersusun dari 181 sel seri × 46 paralel, dengan inverter baterai berkapasitas 250 kW.
2. Topologi Full RE membutuhkan kapasitas 813.65 kWp PV, yang kemudian direalisasikan menjadi 825 kWp melalui konfigurasi tiga sub-array. Kebutuhan BESS adalah 3,243.52 kWh (181 sel seri × 80 paralel), didukung oleh *bidirectional converter* berkapasitas 600 kW.
3. Dari sisi ekonomi, meskipun peningkatan CAPEX cukup besar, topologi Full RE memberikan hasil paling optimal dengan penurunan LCOE sebesar 4%, penghematan bahan bakar hingga 84%, NPC 4% lebih rendah dari base case, ROI tertinggi 4.2%, serta waktu pengembalian modal tercepat yaitu 6.97 tahun. Sistem hibrida tetap layak, namun memberikan keuntungan ekonomi yang lebih kecil dibandingkan Full RE.
4. Dari sisi teknik, base case menunjukkan keandalan tertinggi karena kapasitas PLTD yang sangat besar, namun topologi hibrida dan Full RE tetap menunjukkan performa keandalan yang baik dengan *unmet electrical load* dan *capacity shortage* di bawah 1%. Topologi hibrida sedikit lebih unggul dibandingkan Full RE, tetapi keduanya tetap memenuhi standar *reserve margin* minimal 35% sesuai RUPTL dan layak dioperasikan sebagai sistem kelistrikan pulau terpencil.
5. Dari sisi lingkungan, topologi hibrida berhasil menurunkan emisi CO₂ sebesar 39.53%, sedangkan Full RE memberikan penurunan terbesar hingga 82.19%. Kedua topologi telah memenuhi standar intensitas emisi CO₂/kWh RUPTL, sedangkan *base case* diproyeksikan melampaui batas regulasi pada tahun 2033. Dengan demikian, Full RE merupakan opsi paling ramah lingkungan dan paling mendukung arah transisi energi nasional.

Berdasarkan evaluasi ekonomi, teknik, dan lingkungan, topologi Full RE direkomendasikan sebagai pilihan utama untuk dedieselisasi Pulo Panjang, disertai penguatan kapasitas BESS atau strategi operasi yang lebih adaptif agar keandalannya semakin mendekati performa sistem hibrida. Jika diperlukan transisi bertahap, implementasi topologi hibrida dapat menjadi langkah antara sebelum menuju Full RE sepenuhnya.

Referensi

- [1]. B. D. Hamlington, A. Bellas-Manley, J. K. Willis, S. Fournier, N. Vinogradova, R. S. Nerem, C. G. Picuch, P. R. Thompson, and R. Kopp, "The rate of global sea level rise doubled during the past three decades," *Communications Earth & Environment*, vol. 5, no. 1, Art. no. 601, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5>
- [2]. Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral, *Inventarisasi Emisi GRK Sektor Energi*, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, Indonesia, 2019.
- [3]. United Nations General Assembly, "Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development," A/RES/70/1, 25 Sept. 2015. [Online]. Available: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1
- [4]. United Nations, "Paris Agreement," *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 12 Dec. 2015. [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- [5]. G20, "G20 Bali Leaders' Declaration," Bali, Indonesia, 15-16 Nov. 2022. [Online]. Available: <https://www.g20.org/en/g20-bali-leaders-declaration/>
- [6]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN), Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 85.K/TL.01/MEM.L/2025*, Jakarta, 2025.
- [7]. PT Perusahaan Listrik Negara (Persero), *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025–2034, Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 188.K/TL.03/MEM.L/2025*, Jakarta, Mei 2025. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/b967d-ruptl-pln-2025-2034-pub-.pdf
- [8]. N. Rangel, H. Li, and P. Aristidou, "An optimisation tool for minimising fuel consumption, costs and emissions from Diesel-PV-Battery hybrid microgrids," *Applied Energy*, vol. 335, p. 120748, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120748>
- [9]. S. Hasan, A. I. Meem, M. S. Islam, S. S. Proma, and S. K. Mitra, "Comparative techno-economic analyses and optimization of standalone and grid-tied renewable energy systems for South Asia and Sub-Saharan Africa," *Results in Engineering*, vol. 21, Art. no. 101964, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101964>
- [10]. S. Beheshti, "Evaluating Hybrid Renewable Energy Solutions for Residential Power in Iceland: A Comparative Study of Diesel and Grid-Connected Systems," M.S. thesis, Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering, and Computer Science, University of Iceland, Reykjavik, Iceland, Aug. 2024.
- [11]. O. Ayan and B. E. Turkey, "Techno-economic comparative analysis of grid-connected and islanded hybrid renewable energy systems in 7 climate regions, Turkey," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 48797-48816, May 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3276776>
- [12]. Badan Pusat Statistik Kabupaten Serang, *Kecamatan Pulo Panjang Dalam Angka 2024*, BPS-Statistics Serang Regency, Serang, Indonesia, 2024. [Online]. Available: <https://serangkab.bps.go.id>
- [13]. M. Kathires, A. Mahaboob Subahani, and G. R. Kanagachidambaresan, *Integration of Renewable Energy Sources with Smart Grid*, Scrivener Publishing, 2021.
- [14]. Pacific Power Association (PPA) and Sustainable Energy Industry Association of the Pacific Islands (SEI-API), *Grid Connected PV Systems with Battery Energy Storage Systems Design Guidelines*, 2020. [Online]. Available: <https://www.ppa.org.fj/>
- [15]. A. Schopf da Silveira, F. C. Lucchese, A. D. R. Abaide, B. K. Hammerschmitt, and L. N. F. da Silva, "Optimal sizing of a PV-BESS grid-connected microgrid in southern region of Brazil," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 83756-83769, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997593>
- [16]. W. C. S. Amorim, A. F. Cupertino, H. A. Pereira, and V. F. Mendes, "On sizing of battery energy storage systems for PV plants power smoothing," *Electric Power Systems Research*, vol. 229, Art. no. 110114, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110114>
- [17]. Pertamina Patra Niaga, *Spesifikasi B40*, 2025. [Online]. Available: <https://pertaminapatraniaga.com/file/files/2025/06/spesifikasi-b40.pdf>
- [18]. European Commission, "JRC PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System," [Online]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [19]. G. Garttan, S. Alahakoon, K. Emami, and S. G. Jayasinghe, "Battery energy storage systems: Energy market review, challenges, and opportunities in frequency control ancillary services," *Energies*, vol. 18, no. 14, pp. 4174, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en18154174>
- [20]. Asian Development Bank, *Handbook on Battery Energy Storage System*, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://www.adb.org/publications/handbook-battery-energy-storage-system>
- [21]. V. Vega-Garita, A. Hanif, N. Narayan, L. Ramirez-Elizondo, and P. Bauer, "Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module," *Journal of Power Sources*, vol. 438, Art. no. 227011, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227011>
- [22]. M. Sangsoda, A. Prasertnoi, and J. Kluabwang, "A comprehensive review of battery energy storage systems for grid stability and renewable integration: A focus on lithium-ion's grid batteries in Thailand," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 1124-1139, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.05.004>

- [23]. Y. Yunanto, M. E. Susetyo, D. Ellis, A. D. Pranadi, B. Mudiantoro, N. Verma, S. A. Murtopo, M. S. Holle, M. Istiqomah, V. Reno, and G. Handaru, Modul Pelatihan HOMER Pro untuk PLN, Mentari, Jakarta, Indonesia, 2024.
- [24]. N. Adita and E. A. Setiawan, "Analysis of performance and economic value of thin film and monocrystalline photovoltaic systems in the tropical area of Jakarta," *Int. J. Electr. Comput. Biomed. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 33–43, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.62146/ijecbe.v1i1.19>