

Analisis Tekno Ekonomi Rencana Penyediaan Fasilitas Blackstart: Studi Kasus PTLGU Cilegon

David Firdaus¹, Musa Partahi Marbun²

¹Magister Teknik Elektro, Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, firdausdavid7@gmail.com

²Magister Teknik Elektro, Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, musa@itpln.ac.id

Abstrak

Keandalan sistim kelistrikan Jawa Madura Bali (JAMALI) harus selalu dijaga untuk meminimalisir terjadinya gangguan. Jika terjadi gangguan bahkan hingga blackout, maka sistem harus mampu recovery dengan cepat. Berdasarkan RUPTL 2025-2031, salah satu mitigasi gangguan blackout yaitu strategi kebijakan Program Anti Blackout dimana PLTGU Cilegon menjadi salah satu pembangkit blakstart. Kendala saat ini, PLTGU Cilegon tidak memiliki fasilitas blackstart mandiri karena sejak commisioning tidak dirancang sebagai pembangkit blackstart oleh pabrika sehingga apabila terjadi gangguan blackout dan PLTGU Cilegon mengalami hilang tegangan, maka masih membutuhkan tegangan dari jaringan luar pembangkit. Penelitian ini bertujuan merancang dan membandingkan opsi teknologi sistem blackstart untuk suplai kelistrikan pemakaian sendiri PLTGU Cilegon selama terjadi blackout, menganalisis karakteristik daya keluaran, serta mengevaluasi aspek keekonomian melalui pendekatan Net Present Cost (NPC), Levelized Cost of Electricity (LCOE), dan Payback Period (PP) menggunakan perangkat lunak HOMER. Data potensi radiasi surya, profil beban, dan spesifikasi teknis komponen pembangkit dikumpulkan dan digunakan sebagai input simulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi sistem hibrid PLTS-BESS mampu menyediakan listrik selama 1 jam dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan sistem PLTD. Sistem optimal terdiri dari PLTS 1490 kW, 7500 unit baterai dan inverter 6500 kW, dengan kontribusi energi terbarukan 100% dari total produksi energi tahunan. Implementasi sistem ini dapat menghasilkan nilai NPC paling rendah sebesar Rp 98,5 miliar serta LCOE sebesar 4.357 Rp/kWh, lebih efisien dibanding sistem PLTD murni (8.891 Rp/kWh). Penelitian ini merekomendasikan konfigurasi kombinasi PLTS-BESS sebagai solusi transisi energi yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk sistem blackstart pembangkit, serta menunjukkan potensi pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil dan peningkatan kualitas di pembangkit.

Kata kunci: *Blackout, Blackstart, PLTS-BESS, LCOE, NPC.*

Abstract

The reliability of the Java-Madura-Bali (JAMALI) electricity system must always be maintained to minimize the occurrence of disturbances. If a disturbance occurs, even up to a blackout, the system must be able to recover quickly. Based on the 2025-2031 RUPTL (Electricity Supply Business Plan), one of the mitigation strategies for blackout disturbances is the Anti-Blackout Program policy, in which the Cilegon Combined Cycle Power Plant (PLTGU) is designated as one of the blackstart generating units. The current constraint is that the Cilegon PLTGU does not have an independent blackstart facility, as it was not designed by the manufacturer as a blackstart plant since its commissioning. Consequently, if a blackout disturbance occurs and the Cilegon PLTGU experiences a voltage loss, it still requires voltage supply from the external network. This study aims to design and compare blackstart system technology options for supplying the auxiliary electricity needs of the Cilegon PLTGU during a blackout, to analyze the output power characteristics, and to evaluate the economic aspects through Net Present Cost (NPC), Levelized Cost of Electricity (LCOE), and Payback Period (PP) approaches using HOMER software. Data

on solar radiation potential, load profiles, and technical specifications of the generating components were collected and used as simulation inputs. The simulation results show that a hybrid PLTS-BESS (Solar PV-Battery Energy Storage System) configuration is able to supply electricity for 1 hour at a lower cost compared to a PLTD (diesel power plant) system. The optimal system consists of a 1,490 kW PV system, 7,500 battery units, and a 6,500 kW inverter, with a 100% renewable energy contribution to total annual energy production. Implementation of this system can produce the lowest NPC value of IDR 98.5 billion and an LCOE of IDR 4,357/kWh, which is more efficient than a pure PLTD system (IDR 8,891/kWh). This study recommends the PLTS-BESS combination configuration as an economical and environmentally friendly energy transition solution for power plant blackstart systems, and demonstrates the potential to reduce dependence on fossil fuels and improve quality at the power plant.

Keywords: *Blackout, Blackstart, PLTS-BESS, LCOE, NPC.*

Corresponding Author:

David Firdaus

Institut Teknologi PLN, firdausdavid7@gmail.com

PENDAHULUAN

Keandalan sistim kelistrikan Jawa Madura Bali (JAMALI) harus selalu ditingkatkan untuk meminimalisir potensi terjadinya gangguan. Jika terjadi gangguan bahkan hingga blackout, maka sistem harus mampu recovery dengan cepat. Salah satu kejadian terbesar gangguan partial blackout kelistrikan JAMALI yang terjadi pada tanggal 4 Agustus 2019. Berdasarkan investigasi kejadian, pemicu partial blackout tersebut disebabkan oleh gangguan pada saluran transmisi di Jawa Tengah yang menyebabkan transfer daya listrik antara Jawa sisi barat dan sisi timur terpisah akibat ketidakmampuan sistim untuk mempertahankan kestabilan frequency. Pembangkit listrik yang berada di sisi barat tidak mampu memikul daya yang berlebih sehingga banyak pembangkit mengalami trip dari pemicu under frequency. Dampak kejadian tersebut, gangguan pemadaman listrik terjadi pada seluruh wilayah Banten, DKI Jakarta dan sebagian Jawa Barat yang berlangsung selama lebih dari 6 jam. Akibat gangguan blackout tersebut, PLN harus menanggung biaya kerugian kepada pelanggan yang terdampak sebagai kompensasi dimana PLN sudah membayar sebesar Rp 840 Miliar ke Pelanggan atas kompensasi 'Blackout' (Kompas, 2019).

Kompensasi tersebut diatur dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM) RI Nomor 27 Tahun 2017 tentang tingkat mutu pelayanan dan biaya yang terkait dengan penyaluran tenaga listrik oleh PLN (Menteri ESDM RI, 2017). Berangkat dari kejadian tersebut, PLN terus melakukan evaluasi serta mitigasi risiko gangguan berulang melalui program defense scheme anti blackout yang satu programnya dengan melakukan pengujian simulasi line charging pada pembangkit yang berpotensi sebagai blackstart untuk menghidupkan pembangkit berkapasitas besar ketika nantinya terjadi blackout. PLTGU Cilegon pernah disimulasikan untuk melakukan line charging ke PLTU Suralaya hingga sinkron kembali ke jaringan. Atas keberhasilan ini, PLTGU Cilegon didekasikan sebagai pembangkit yang memiliki kemampuan sebagai blackstart.

Berdasarkan RUPTL 2025-2031 yang dikeluarkan Kementrian ESDM tahun 2025 (RUPTL, 2025), salah satu penanggulangan permasalahan ketenagalistrikan jangka

pendek yaitu adanya strategi kebijakan Program Anti Blackout dimana PLTGU Cilegon termasuk didalamnya. Pada aktualnya, kendala yang ada saat ini bahwa PLTGU Cilegon tidak memiliki fasilitas blackstart mandiri karena sejak commissioning tidak dirancang sebagai blackstart secara pabrikan sehingga apabila gangguan blackout kembali terjadi dan PLTGU Cilegon mengalami hilang tegangan, masih membutuhkan tegangan dari jaringan luar.

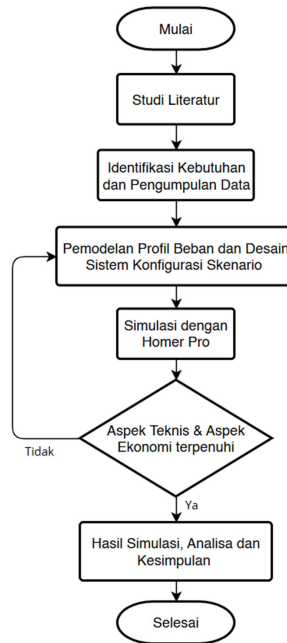
Penambahan fasilitas blackstart di PLTGU Cilegon dipandang perlu dilakukan untuk mempercepat recovery pasca gangguan Blackout agar kontinuitas pasokan energi listrik tetap terjaga khususnya untuk area wilayah Jakarta Banten. Selama ini, teknologi blackstart biasanya menggunakan diesel generator karena kecepatannya dan fleksibel digunakan sebagai backup power suplai. Namun dengan seiring perkembangan jaman, banyak teknologi yang mampu menggantikan peran diesel generator sebagai blackstart yaitu Battery Energy Storage System (BESS)(Tang et al., 2020). Teknologi BESS juga dinilai sebagai upaya implementasi untuk mendorong program global net zero emission. Walaupun di Indonesia teknologi ini belum banyak diimplementasikan, banyak riset penelitian yang mengkaji perihal kelayakan BESS untuk digunakan sebagai program peran energi baru terbarukan khususnya daerah yang terisolasi (Mutiah & Sudiarto, 2025). Oleh karena itu, untuk mendukung hal yang serupa, perlu dilakukan penelitian atau studi perencanaan desain fasilitas blackstart di PLTGU Cilegon yang paling layak melalui pendekatan perbandingan atas beberapa opsi teknologi, tidak terbatas menggunakan pembangkit bermesin fosil atau diesel generator, namun juga berpotensi dapat menggunakan opsi alternatif teknologi penyimpanan energi baterai atau Battery Energi Storage System (BESS) dan teknologi energi terbarukan pembangkit listrik tenaga solar (PLTS).

METODE

Penelitian ini bersifat kuantitatif dan menerapkan desain eksperimental serta deskriptif. Desain eksperimental digunakan untuk mengukur pengaruh penerapan sistem Hibrid terhadap efisiensi energi, biaya operasional, dan penggunaan optimasi lahan yang tersedia khusus untuk PLTS. Sedangkan Desain deskriptif digunakan untuk menggambarkan situasi terkini terkait sistem kelistrikan pemakaian sendiri di PLTGU Cilegon yang akan dijadikan dasar perbandingan dalam penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan, mengoptimalkan dan menilai sistem kelistrikan di PLTGU Cilegon yang saat ini hanya bergantung pada suplai luar jaringan apabila terjadi hilang tegangan. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menciptakan dan membandingkan desain pembangkit energi fosil dan energi terbarukan yang optimal serta dapat diterapkan di pembangkit lainnya yang serupa kondisinya.

Klasifikasi masing – masing skenario dalam pemodelan blackstart adalah langkah awal yang sangat penting dalam penelitian ini karena tiap skema menghadirkan tantangan dan peluang yang berbeda. Pertama, teknologi energi fosil PLTD yang pada umumnya sudah dikenal sebagai pembangkit yang biasa digunakan untuk emergency backup seperti genset yang akan terhubung dengan jaringan listrik utama sebagai suplai. Microgrid terisolasi dengan sumber PLTD biasanya ditemukan di daerah yang sulit dijangkau oleh infrastruktur jaringan listrik besar, seperti pulau-pulau kecil atau wilayah pegunungan yang terpencil. Selanjutnya, teknologi penyimpanan baterai yang dalam beberapa tahun terakhir ini sangat berpotensi untuk dikembangkan dan diterapkan. Terakhir, teknologi solar PV PLTS akan melengkapi dalam kajian ini sebagai penetrasi energi terbarukan yang dapat diimplementasikan dalam lingkungan pembangkit dimana umumnya digunakan pada daerah yang isolasi dari jaringan listrik.



Gambar 1. Alur Proses Penelitian

Tahap awal penelitian ini yaitu mengumpulkan data kondisi kelistrikan PLTGU Cilegon, informasi mengenai potensi energi terbarukan, seperti data radiasi matahari yang diperoleh dari NASA yang terkoneksi dengan HOMER, serta komponen pembangkit listrik yang diasumsikan menggunakan harga market. Tahap selanjutnya dari semua data tersebut akan dilakukan pembuatan simulasi dengan menggunakan aplikasi HOMER. Simulasi ini bertujuan untuk mengembangkan skenario dasar (base scenario) yang mengintegrasikan PLTS dan baterai ke dalam sistem kelistrikan PLTGU Cilegon yang ada saat ini serta untuk memastikan bahwa desain pembangkit yang diusulkan akan berfungsi secara optimal.

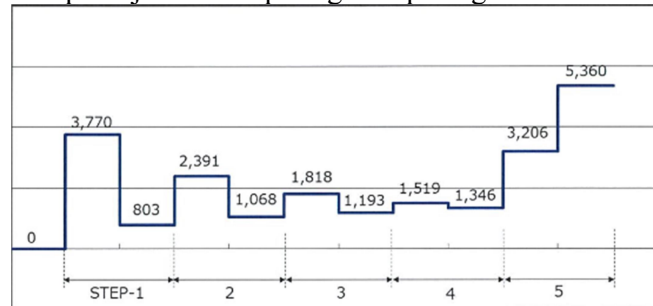
Metode analisis data pada penggunaan metode gabungan kuantitatif dan kualitatif dengan tetap menitikberatkan pendekatan teknik kuantitatif sebagai metode analisis data utama (Judijanto et al., 2024). Teknik analisis kuantitatif diterapkan pada data yang bersifat terukur atau dapat dinyatakan dalam bentuk angka. Data jenis ini biasanya diolah menggunakan metode statistik dan perangkat komputasi karena erat kaitannya dengan statistik, hasil analisis dari teknik ini bersifat objektif, logis, dan bebas dari bias.

Sementara itu, teknik analisis kualitatif juga digunakan dalam penelitian, dengan pendekatan yang lebih menekankan pada uraian atau deskripsi. Fokus utama teknik ini bukan pada angka, melainkan pada penjelasan mendalam mengenai alasan, latar belakang, serta faktor-faktor yang melandasi suatu topik (Tampubolon, 2023). Bersamaan dengan pendekatan penelitian kualitatif, maksud pendekatan teknik ini adalah untuk memahami secara lebih dalam suatu fenomena. Teknik ini sangat sesuai untuk menganalisis data dalam bentuk narasi atau menjawab persoalan yang berkaitan dengan fenomena sosial, perilaku manusia, dan berbagai hal yang tidak dapat dikuantifikasi secara numerik. Dari teknik analisis data kualitatif dan kuantitatif, bisa di dapatkan juga analisa finansial yang akan dilakukan dalam penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Beban dan Pemodelan Desain Sistem

Pemodelan desain sistem dalam penelitian menggunakan aplikasi Homer Pro dimana beberapa parameter seperti pembebanan, komponen dan faktor perhitungan ekonomi harus dimasukkan sehingga software bisa menentukan sistem kelistrikan yang paling optimal untuk memenuhi kebutuhan suplai daya blackstart PLTGU Cilegon. Kebutuhan tersebut dapat dijelaskan seperti grafik pada gambar 2 berikut:



Gambar 2. Total Kebutuhan Beban untuk Blackstart 1 unit Gas Turbine

Kalkulasi kebutuhan beban harus mampu setidaknya menanggung 1 kali pengujian dalam sebulan selama 1 tahun mengacu pada aturan Grid Code (ESDM, 2020). Pemodelan Beban pada aplikasi HOMER dilakukan dengan memasukan nilai data pembebanan pemakaian sendiri atau Auxiliary Power selama proses start-up 1 unit Gas Turbine dengan proyeksi 25 tahun kedepan sesuai masa manfaat PLTGU (PT PLN, 2016). Beban yang diinput merupakan beban selama proses start-up Gas Turbine setelah semua blok Auxiliary Power mengalami hilang tegangan dengan durasi start-up selama 1 jam sesuai dengan SOP pengoperasian start up Gas Turbine PLTGU Cilegon (Industry, 2004). Simulasi start-up Gas Turbine dilaksanakan secara rutin interval bulanan dengan mengacu standar pada Permen ESDM Tahun 2020 tentang Grid Code

Pemodelan Solar PV

Pemodelan Solar PV dilakukan dengan memasukan parameter seperti table berikut

Tabel 1. Data Properti pada Solar PV

Deskripsi	Parameter
PV Panel	
Jenis	Generic Flat Plate PV
Rated Capacity	580 Wp
Biaya Investasi	Rp 2,493,750.00
Biaya Penggantian	Rp 2,493,750.00
Biaya O&M	Rp 24,937.50
Masa Manfaat	25 Tahun

Dari tabel terlihat data properties solar PV yang dipakai dalam simulasi menggunakan model Generic Flat Plate karena disesuaikan dengan data pasaran yang lebih umum. Mengacu beban puncak sebesar 5572,3 kW yang diperoleh dari pemodelan beban, Dimana Energi yang harus dihasilkan setiap hari 5360kWh dengan estimasi Peak Sun Hour di Indonesia selama 4,5 jam dan Performance Ratio sebesar 80%, maka

$$P_{PV} = \frac{5360}{4.5 \times 0.80} = 1489 \text{ kWp}$$

atau dibulatkan menjadi 1490 kWp

Pemodelan Inverter

Pemodelan Inverter pada aplikasi HOMER termasuk kedalam kategori konverter dengan memasukan beberapa properti parameter. Tampilan Input data simulasi konverter dapat dilihat pada table 2:

Tabel 2. Data Properti pada Inverter

Deskripsi	Parameter
Inverter	
Jenis	Sistem Converter
Rated Capacity	6500 kW
Biaya Investasi	Rp 1.575.000.00 (per kW)
Biaya Penggantian	Rp 1.575.000.00 (per kW)
Biaya O&M	Rp 157.500.50
Masa Manfaat	15 Tahun
Efficiency	95%

Dari tabel, terlihat data properties inverter yang dipakai menggunakan model Generic system converter tanpa mempertimbangkan merk tertentu. Pada pemodelan nilai sizing capacity didasarkan terhadap beban puncak sebesar 5572,3 kW yang apabila diberikan deserve margin sebesar 20% dari maksimum pembebanan, maka diperoleh kapasitas inverter sebesar 6432kW atau roundup sebesar 6500kW agar semua beban bisa terlayani saat beban puncak. Pada pemodelan cost memberikan informasi statistik mengenai inverter dengan kapasitas 1 kW dan 25 kW. Untuk Opsi Capital sebesar Rp 1.575.000,00 dan Rp 55.250.000,00 nilai yang dipakai untuk input parameter dalam pemodelan ini dibatasi hanya dari harga material saja tanpa menghitung harga dari peralatan pendukungnya.

Pemodelan BESS

Pemodelan Baterai dilakukan pada aplikasi HOMER dengan memasukan beberapa parameter. Tampilan Input data simulasi BESS dapat dilihat pada tabel 3:

Tabel 3. Data Properti pada BESS

Deskripsi	Parameter
BESS	
Jenis	Generic Lithium Battery
Rated Voltage	600V
Biaya Investasi	Rp 6.842.125,44
Biaya Penggantian	Rp 6.842.125,44
Biaya O&M	Rp 68,421,25

Dari data properties baterai yang dipakai menggunakan model Generic Lithium system baterai yang beroperasi pada tegangan 600V dengan kapasitas 1 kWh. Pada pemodelan cost memberikan informasi statistik mengenai kapasitas baterai sebesar 1 kWh dengan harga/capital sebesar Rp 6.842.125,44 nilai yang dipakai untuk input parameter dalam pemodelan ini dibatasi hanya dari harga material saja tanpa menghitung harga dari peralatan pendukungnya.

Pemodelan Diesel Generator

Pemodelan Diesel Generator dilakukan pada aplikasi HOMER dengan memasukan beberapa parameter pada ikon Generator dimana tampilan input data simulasi Generator dapat dilihat pada Tabel 4:

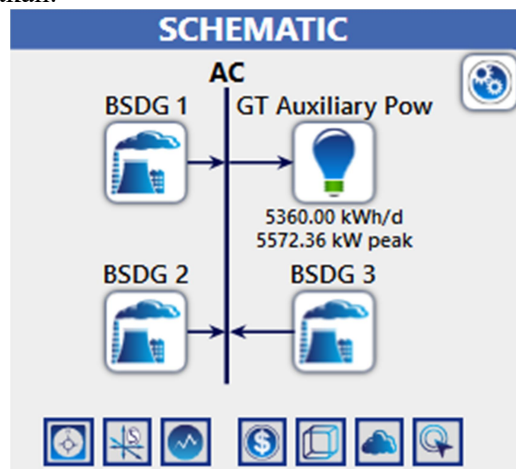
Tabel 4. Data Properti pada Diesel Generator

Deskripsi	Parameter
Diesel Generator	
Jenis	Generic
Rated Voltage	3 x 2000kW
Biaya Investasi	Rp 14.597.000.000,00
Biaya Penggantian	Rp 0
Biaya O&M	Rp 2.800.000,00
Masa manfaat	25 Tahun

Dari Tabel 4 terlihat data properties generator yang dipakai menggunakan model yang paling mendekati dengan kapasitas yang ada dipasaran yaitu Generic Generator. Pada pemodelan cost memberikan informasi statistik mengenai Rate Capacity, Mengacu beban puncak sebesar 5500 kW yang diperoleh dari pemodelan beban, maka Rate Capacity pada pemodelan di input menggunakan variasi daya dan harga komponen dipasaran. Untuk biaya capital di input mengacu data penawaran harga survey pasar yang pernah masuk pada PLTGU Cilegon. Sedangkan opsi replacement atau biaya penggantian komponen Diesel Generator pada akhir masa pakai komponen di input dengan harga komponen generator karena di asumsikan akan adanya biaya penggantian komponen. Pada opsi sizing pemodelan daya diinput maksimal daya 2000 kW x 3 unit sesuai generator pasaran yang paling besar pada aplikasi HOMER saat ini.

Konfigurasi Diesel Generator sebagai Blackstart

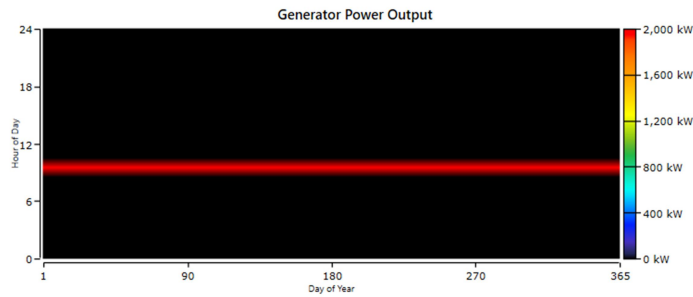
Hasil simulasi HOMER menunjukkan saat sumber suplai Blackstart menggunakan konfigurasi Diesel Generator sebesar 3 x 2000kW atau 6000kW yang memiliki beberapa parameter yang didapatkan.



Gambar 3. Sistem Suplai Blackstart oleh Diesel Generator 3 x 2000kW

Konfigurasi Diesel Generator dengan PLTS dan BESS (Hybrid) dipenelitian ini digunakan untuk menentukan konfigurasi yang paling optimal dan sebagai perbandingan antar semua konfigurasi yang direncanakan ditunjukkan pada Gambar 4:

System Architecture: BSDG 3 (2,000 kW)				Total NPC: Rp222,345,100,000.00			
BSDG 1 (2,000 kW) HOMER Cycle Charging				Levelized COE: Rp8,931.53			
BSDG 2 (2,000 kW)				Operating Cost: Rp14,032,200,000.00			
Cost SummaryCash FlowCompare EconomicsElectricalFuel SummaryBSDG 1BSDG 2BSDG 3Emissions							
Quantity		Value	Units	Quantity		Value	Units
Hours of Operation		365	hrs/yr	Electrical Production		730,000	kWh/yr
Number of Starts		365	starts/yr	Mean Electrical Output		2,000	kW
Operational Life		82.2	yr	Minimum Electrical Output		2,000	kW
Capacity Factor		4.17	%	Maximum Electrical Output		2,000	kW
Fixed Generation Cost		3,872,289	Rp/hr				
Marginal Generation Cost		5,005	Rp/kWh				
				Fuel Consumption		189,060	L
				Specific Fuel Consumption		0.259	L/kWh
				Fuel Energy Input		1,851,739	kWh/yr
				Mean Electrical Efficiency		39.4	%



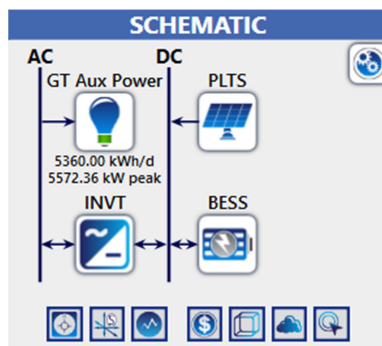
Gambar 4. Aspek Kinerja Teknis Hasil Simulasi Pada Konfigurasi Diesel Generator

Total biaya Net Present Cost mencakup semua biaya yang dikeluarkan selama proyek berlangsung, terdiri dari biaya komponen, biaya pengganti, biaya pemeliharaan, biaya bahan bakar, serta biaya suku bunga. Dari data tersebut terlihat bahwa sistem Diesel Generator mempunyai nilai NPC sebesar Rp 222,3 M.

Nilai LCOE (Levelized Cost of Electricity) yang merupakan biaya per kWh yang dihasilkan oleh sistem pembangkit listrik, dengan mempertimbangkan seluruh biaya selama masa pakai sistem. Dari data diatas terlihat bahwa sistem 3 buah Diesel Generator mempunyai nilai LCOE sebesar Rp 8931,53 Rp/kWh. Sedangkan untuk biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) juga dapat dilihat bahwa sistem Diesel Generator mempunyai nilai O&M sebesar Rp 14,03M/tahun.

Konfigurasi PV-BESS sebagai Blackstart

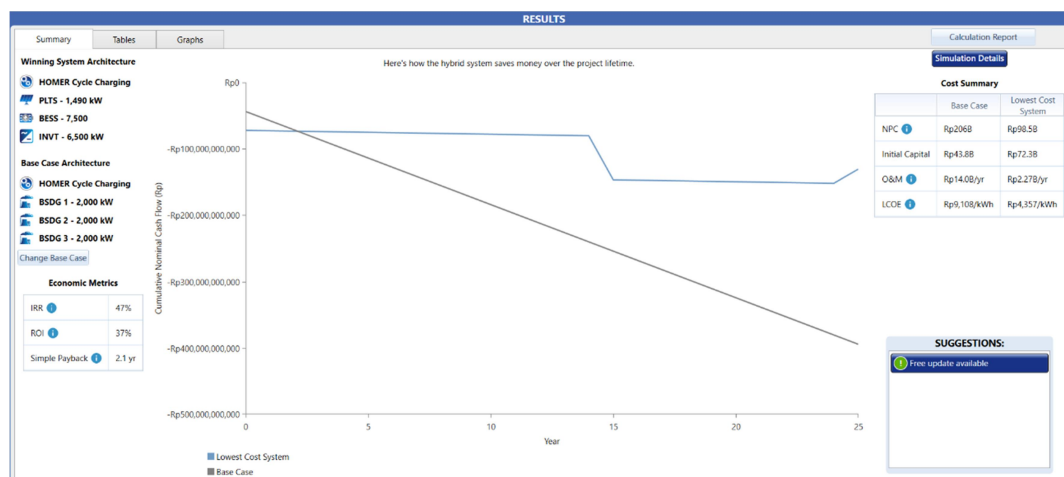
Kombinasi PLTS (PV) dengan Baterai (BESS) pada penelitian ini merupakan sistem yang mengandalkan kombinasi antara PV dan Baterai sebagai sumber utama Blackstart. Hasil simulasi HOMER menunjukkan bahwa konfigurasi sistem PLTS dengan BESS mampu memberikan suplai daya untuk Blackstart. Gambar 5 menunjukkan sistem kombinasi PLTS dan BESS.



Gambar 5. Sistem Suplai Blackstart oleh PV-BESS

Berdasarkan data total produksi energi listrik yang dihasilkan selama setahun dari sistem pembangkit listrik tenaga kombinasi PLTS - BESS sebagai penyedia energi listrik bagi sistem Blackstart sebesar 2.219.167 kWh/tahun dengan persentase total produksi energi listrik dalam setahun sistem PLTS 100%. Energi terbarukan dari PV dapat dimanfaatkan pada sistem ini dan mengurangi jumlah pemakaian energi fosil (BBM) jika menggunakan diesel generator seperti skenario sebelumnya.

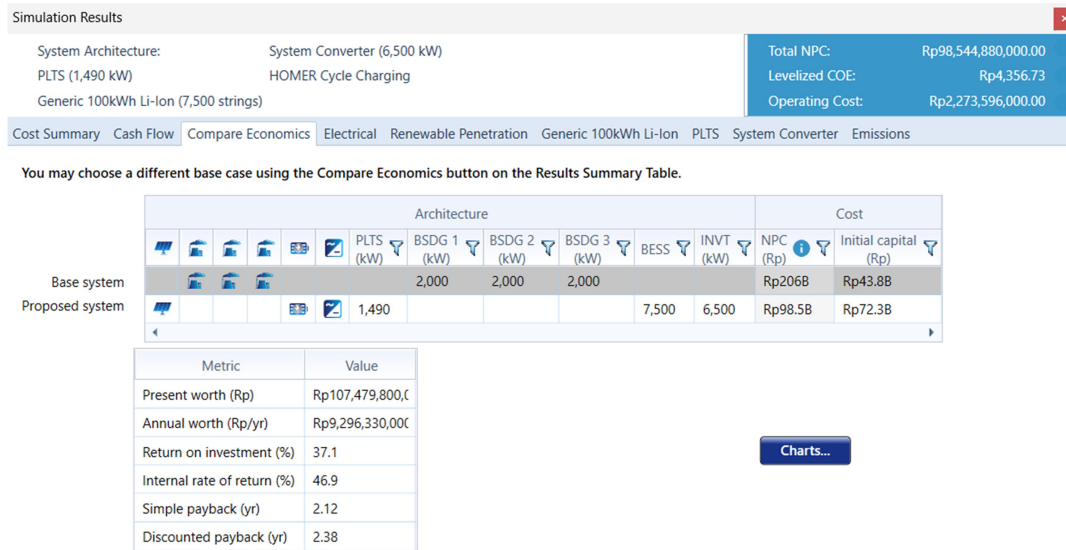
Meskipun biaya investasi awal untuk sistem ini lebih tinggi, tapi potensi penghematan jangka panjang bernilai besar mengingat berkurangnya biaya bahan bakar dan rendahnya biaya operasional tahunan. Skenario ini menekankan pentingnya perencanaan investasi yang lebih besar di awal untuk mencapai manfaat jangka panjang, terutama dari perspektif keberlanjutan energi dan pengurangan emisi. Hasil simulasi HOMER menunjukkan bahwa konfigurasi sistem pembangkit listrik tenaga Hibrid (PLTH) paling optimal adalah konfigurasi penyedia blackstart menggunakan PV-BESS. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil Perbandingan Blackstart Diesel vs PV-BESS

Persentase total produksi energi listrik dalam setahun pada sistem PV, BESS dan Diesel Generator adalah 100% menggunakan Renewable yaitu PV dan BESS dengan spesifikasi PV 1490 kW, Inverter 6500 kW dan BESS 7500 string. Data kinerja operasional konfigurasi bisa dilihat pada gambar 6.

Hasil konfigurasi sistem yang paling optimal ditentukan oleh 2 kategori, yaitu kategori matrik ekonomi dan ringkasan biaya. Dalam kategori ringkasan biaya terlihat nilai NPC (Net Present Cost) yang merupakan biaya keseluruhan sistem selama jangka waktu tertentu yang mencakup semua biaya yang dikeluarkan selama proyek berlangsung, terdiri dari biaya komponen, biaya pengganti, biaya pemeliharaan, biaya bahan bakar, serta biaya suku bunga. Dari data tersebut terlihat bahwa sistem PV-BESS mempunyai nilai NPC sebesar Rp 98,5 M dimana nilai ini adalah NPC yang paling rendah dari semua konfigurasi. Nilai initial capital (CAPEX) atau modal awal untuk nilai PV-BESS sebesar Rp 72,3 M. Untuk biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) juga dapat dilihat bahwa sistem PV-BESS mempunyai nilai O&M sebesar 2,27M Rp/tahun. Parameter lain yang dapat dilihat adalah nilai LCOE (Levelized Cost of Electricity) yang merupakan biaya per kWh yang dihasilkan oleh sistem pembangkit listrik, dengan mempertimbangkan seluruh biaya selama masa pakai sistem. Dari data dapat dilihat bahwa sistem PV-BESS mempunyai nilai LCOE sebesar 4.357 Rp/kWh. Cost summary sistem pembangkit bisa dilihat pada gambar 7 berikut.



Gambar 7. Hasil Simulasi Aspek Teknis Konfigurasi Terbaik

Selain itu, data yang didapatkan dari simulasi sistem kombinasi PV-BESS adalah nilai IRR (Internal Rate of Return) yang merupakan tingkat pengembalian yang menetapkan nilai sekarang bersih dari semua arus kas (baik positif maupun negatif) dari investasi sama dengan nol. IRR menunjukkan tingkat pengembalian investasi yang dicapai ketika sebuah proyek mencapai titik impas. Nilai IRR yang didapatkan dalam sistem bernilai positif, hal ini menunjukkan bahwa proyek tersebut diharapkan dapat menghasilkan nilai keuntungan. investasi memiliki IRR sebesar 46.9%, artinya investasi tersebut diharapkan menghasilkan pengembalian sebesar 46.9% per tahun.

Nilai lain yang dapat dilihat adalah nilai Return on Investment (ROI) yang merupakan metrik yang berfungsi untuk mengukur persentase keuntungan dari investasi berdasarkan laba keseluruhan dan biaya yang dikeluarkan. ROI menunjukkan seberapa banyak keuntungan yang didapatkan dibandingkan dengan modal yang digunakan. Semakin tinggi angka ROI, semakin menguntungkan investasi tersebut. Nilai ROI yang didapatkan dalam sistem bernilai positif sebesar 37%, hal ini menunjukkan bahwa proyek tersebut dapat menghasilkan nilai keuntungan.

Selanjutnya parameter lain yang dapat dilihat adalah simple payback yang merupakan waktu yang dibutuhkan agar keuntungan kumulatif dari investasi sama dengan biaya awal. Nilai Payback Periode yang didapat sebesar 2,12 tahun, menunjukan bahwa sistem HOMER memperhitungkan konfigurasi sistem PV-BESS sudah bisa mendapatkan keuntungan kumulatif saat sistem beroperasi selama 2,12 tahun.

Perbandingan Aspek Skenario

Tabel 5. Perbandingan Aspek Nilai Sistem

Aspek	Diesel Generator	PV-BESS	Optimasi Hybrid (PV-BESS)
NPC	Rp 222,3 Milyar	Rp 99,7 Milyar	Rp 98,5 Milyar
LCOE	8.931 Rp/kWh	4.411 Rp/kWh	4.357 Rp/kWh
O&M	Rp 14 Milyar	Rp 2,38 Milyar	Rp 2,27 Milyar
CAPEX	Rp 43,7 Milyar	Rp 72,3 Milyar	Rp 72,3 Milyar

Konfigurasi sistem PV-BESS mempunyai nilai NPC sebesar Rp 98,5 M. Berdasarkan data terlihat bahwa nilai NPC dari sistem PLTH lebih baik dibandingkan

sistem yang lain, hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTH menjadi sistem konfigurasi yang lebih optimal jika dilihat dari faktor biaya keseluruhan sistem selama jangka waktu proyek berjalan, karena mempunyai nilai NPC yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem yang lain. Konfigurasi sistem PLTH mempunyai nilai biaya untuk operasi dan pemeliharaan (O&M) sebesar Rp 2,27 M. Berdasarkan data terlihat bahwa nilai biaya O&M PLTH lebih baik dibandingkan sistem yang lain, hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTH menjadi sistem konfigurasi yang lebih optimal jika dilihat dari faktor efisiensi biaya operasi dan pemeliharaan keseluruhan sistem selama jangka waktu proyek berjalan, karena mempunyai nilai O&M yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem yang lain.

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa nilai LCOE dari sistem Hybrid (PV-BESS) mempunyai nilai sebesar 4.357 RP/kWh. Berdasarkan data terlihat bahwa nilai LCOE lebih baik dibandingkan sistem yang lain, hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTH menjadi sistem konfigurasi yang lebih optimal jika dilihat dari faktor biaya harga jual kWh, karena mempunyai nilai LCOE yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem yang lain.

Berdasarkan data total produksi energi listrik yang dihasilkan selama setahun dari sistem pembangkit listrik tenaga hybrid sebagai penyedia energi untuk kebutuhan Blackstart sebesar 2.040.281 kWh/tahun. Produksi energi listrik dari sistem PV-BESS merupakan hasil persentase produksi listrik dari energi terbarukan yang lebih besar dibandingkan hasil produksi listrik dari energi fosil (diesel), dimana panel surya dan BESS dapat mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan dalam sistem dan mengurangi konsumsi bahan bakar minyak (BBM) pada generator diesel.

SIMPULAN

Berdasarkan pada perancangan, pengujian dan analisa yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut. Pertama, pada penelitian ini telah berhasil membuat simulasi pemodelan sistem konfigurasi pembangkit PV-BESS dengan menggunakan aplikasi HOMER. Sistem PLTH yang mampu menjadi solusi dalam memenuhi kebutuhan listrik blackstart PLTGU Cilegon dengan konfigurasi yang terdiri dari PV 1490 kW, Inverter 6500 kW dan BESS 7500 string. Persentase operasi pembangkit sebesar 100% dari energi terbarukan (PV dan BESS).

Kedua, Emisi gas buang yang dihasilkan pada sistem hibrid tidak ada karena tidak menggunakan energi fosil sehingga tingkat bauran energi terbarukan sebesar 100%.

Ketiga, sistem pembangkit hibrid terbaik memberikan nilai NPC, LCOE, dan O&M yang paling efisien dibanding sistem pembangkit yang lain, masing-masing sebesar 38,8B RP, 1.943 RP/kWh, dan 2,02B RP. Hasil ini dapat dijadikan acuan atau referensi dalam upaya menyediakan dan mengalirkan listrik ke pulau-pulau terluar Indonesia dengan sistem hibrid.

Perlu dilakukan pengukuran terhadap potensi energi lain seperti energi angin secara lebih lanjut untuk proyeksi kebutuhan beban di atas 25 tahun. Penelitian ini memiliki keterbatasan yaitu belum memasukkan biaya transmisi sedangkan disisi lain lokasi sumber energi terbarukan dengan lokasi power demand ada di lokasi yang berbeda dan cukup jauh sehingga untuk penelitian selanjutnya agar menghitung dan mempertimbangkan parameter tersebut.

Sistem hibrid meningkatkan kompleksitas dari pengoperasian sistem, perlu dilakukan analisis power system lebih lanjut mengenai operasional untuk sistem kelistrikan PLTGU Cilegon sehingga bisa menjadi studi lanjutan yang dapat menyempurnakan studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Farret, F. A., & Simões, M. G. (2006). Integration of Alternative Sources of Energy. In *Integration of Alternative Sources of Energy*. <https://doi.org/10.1002/0471755621>
- Hassan, M., Zamzami, & Safitri, N. (2023). Analisa Sistem Kerja Black Start Pada Generator Emergency 1.008 KW di PT. Sewatama Sumbagut 2 Peaker Power Plant 250 MW. *Tektro*, 7(1), 1–6.
- Judijanto, L., Wulandari, D., Rahmawati, F. A., Mukhlis, I. R., Purba, A. E., Nopiah, R., & Fanani, A. F. (2024). *Dan Kualitatif*.
- Kloprogge, P., Van der Sluijs, J. P., & Petersen, A. C. (2011). A method for the analysis of assumptions in model-based environmental assessments. *Environmental Modelling and Software*, 26(3), 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.06.009>
- Menteri ESDM RI. (2017). *Permen ESDM RI No 27 Tahun 2017*. 151(2), 10–17.
- Mutiah, F., & Sudiarto, B. (2025). *Pengaruh Penggunaan PV-BESS terhadap Emisi Karbon dan Biaya Energi The Impact of PV-BESS Usage on Carbon Emissions and Energy Costs*. 7, 66–75.
- PT PLN (Persero). (2025). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2025-2034. *PT. Perusahaan Listrik Negara*, 2019–2028.
- Raja Harahap, & Sadrakh Siahaan. (2023). Studi Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Hybrid (Panel Surya Dan Diesel Generator) Pada Kapal Nelayan Di Pelabuhan Perikanan Samudera (Pps) Belawan. *Buletin Utama Teknik*, 18(3).
- Shin, H., & Hur, J. (2020). Optimal energy storage sizing with battery augmentation for renewable-plus-storage power plants. *IEEE Access*, 8, 187730–187743. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031197>
- Susanto, I., Sunanda, W., & Kurniawan, R. (2020). Analisis Pembangkit Tenaga Diesel Di Pulau Celagen. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Pada Masyarakat*, 122–126.
- Taabodi, M. H., Niknam, T., Sharifhosseini, S. M., Asadi Aghajari, H., & Shojaeiyan, S. (2025). Electrochemical storage systems for renewable energy integration: A comprehensive review of battery technologies and grid-scale applications. *Journal of Power Sources*, 641(March), 236832. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236832>
- Tampubolon, M. (2023). Metode Penelitian Metode Penelitian. In *Metode Penelitian Kualitatif* (Vol. 3, Number 17). [http://repository.unpas.ac.id/30547/5/BAB III.pdf](http://repository.unpas.ac.id/30547/5/BAB%20III.pdf)
- Tang, M., Lin, C., Shen, C., Huang, J., Gan, W., Wang, L., Tong, W., & Zhao, C. (2020). Feasibility Analysis of Energy Storage System as Black-start Power Sources for Power Grid. *Proceedings of the 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2020*, 1203–1207. <https://doi.org/10.1109/ICIEA48937.2020.9248296>
- Wu, Y. K., & Tang, K. T. (2019). Frequency support by BESS – Review and analysis. *Energy Procedia*, 156(September 2018), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.126>