

ANALISA KEEKONOMIAN DAN OPTIMALISASI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK HYBRID TENAGA DIESEL, TENAGA SURYA DAN TENAGA HYDROGEN PADA PULAU SEBESI PROPINSI LAMPUNG

Heru Rianto, Tri Wahyu Adi
Institut Teknologi PLN Jakarta, Indonesia
Email: herurianto@gmail.com, Aditriwahyu1@gmail.com

ABSTRAK

kata kunci:

PLTD, Hybrid
Renewable Energy
System (HRES), PLTS,
PLTH2, Battery
Energy Storage System
(BESS), LCOE, emisi
Gas Rumah Kaca
(GRK), dedieselisasi.

Pulau Sebesi di Provinsi Lampung saat ini masih mengandalkan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) untuk kebutuhan energinya, dengan beban rata-rata sebesar 100 kW dan biaya pokok produksi (BPP) listrik mencapai Rp 5.539/kWh. Tingginya BPP serta target pemerintah untuk mencapai Net Zero Emission pada tahun 2060 mendorong perlunya konversi ke sistem pembangkit energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keekonomian dan optimasi biaya dari sistem Hybrid Renewable Energy System (HRES) di Pulau Sebesi yang menggabungkan PLTD dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Hidrogen (PLTH2), serta Battery Energy Storage System (BESS). Tiga skema simulasi dilakukan: Skema 1 (Hybrid PLTD dan PLTS), Skema 2 (Hybrid PLTD dan PLTH2 150 kW), dan Skema 3 (Hybrid PLTD, PLTH2 150 kW, dan PLTS 300 kW). Simulasi dilakukan menggunakan aplikasi Homer untuk menghitung Levelized Cost of Energy (LCOE), biaya operasional, serta emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua skema layak diimplementasikan, namun Skema 3 paling optimal dengan LCOE terendah sebesar \$0.247/kWh, pengurangan emisi CO₂ hingga 99,1%, serta Return on Investment (ROI) tertinggi sebesar 101,4%. Skema ini terbukti paling efisien dan menguntungkan dari segi ekonomi dan lingkungan. Penelitian ini memberikan referensi penting bagi PT PLN (Persero) dalam pengembangan pembangkit energi baru terbarukan di wilayah Terdepan, Terluar, dan Tertinggal (3T) untuk mendukung program dedieselisasi serta pemerataan akses listrik di seluruh Indonesia. pemeliharaan PLTP maupun PLTU. Selain itu import daya dari Sumbagsel perlu dilakukan filter pemilihan renewable energi untuk mengurangi dampak emisi yang berlebih dalam menjaga keandalan sistem..

keywords:

PLTD, Hybrid
Renewable Energy
System (HRES), PLTS,
PLTH2, Battery
Energy Storage System
(BESS), LCOE,
Greenhouse Gas
(GHG) emissions,
dedieselisasi..

Sebesi Island in Lampung Province currently relies on a Diesel Power Plant (PLTD) to meet its energy needs, with an average load of 100 kW and a basic production cost (BPP) of electricity reaching IDR 5,539/kWh. The high BPP, along with the government's target to achieve Net Zero Emissions by 2060, necessitates the conversion to a renewable energy power system. This study aims to analyze the economic feasibility and cost optimization of a Hybrid Renewable Energy System (HRES) on Sebesi Island, combining PLTD with Solar Power Plants (PLTS), Hydrogen Power Plants (PLTH2), and a Battery Energy Storage System (BESS). Three simulation scenarios were conducted: Scenario 1 (Hybrid PLTD and PLTS), Scenario 2 (Hybrid PLTD and PLTH2 150 kW), and Scenario 3 (Hybrid PLTD, PLTH2 150 kW, and PLTS 300 kW). The simulations were conducted using Homer software to calculate the Levelized Cost of Energy

(LCOE), operational costs, and Greenhouse Gas (GHG) emissions. The results show that all scenarios are feasible for implementation, but Scenario 3 is the most optimal, with the lowest LCOE of \$0.247/kWh, a reduction in CO₂ emissions by 99.1%, and the highest Return on Investment (ROI) of 101.4%. This scenario is proven to be the most efficient and economically advantageous while being environmentally friendly. This study provides valuable references for PT PLN (Persero) in developing renewable energy power plants in the Frontier, Outermost, and Disadvantaged regions (3T) to support the dedieselisasi program and the equitable distribution of electricity access across Indonesia...

*Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi [CC BY-SA](#).
This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.*

PENDAHULUAN

Bangsa Indonesia merupakan negara kepulauan karena memiliki banyak pulau yang tersebar dari Sabang hingga Marauke (Zamheri et al., 2021), kondisi geografis tersebut membuat bangsa Indonesia mempunyai kendala kurang meratanya pembangunan pada pulau-pulau tersebut sehingga pemerintah mencanangkan program Pembangunan dari daerah pinggirannya yang dalam hal ini wilayah yang terdepan, terluar dan tertinggal atau 3T (Tomo & Brunner, 2022). Dalam pelaksanaannya salah satu yang menjadi komitmen pemerintah dalam melakukan pemerataan pembangunan adalah pada sektor ketenagalistrikan (Agustina, 2024). Listrik kini telah menjadi salah satu kebutuhan dasar bagi masyarakat. Pertumbuhan ekonomi di berbagai pulau perlu disertai dengan penyediaan pasokan listrik yang memadai (Islam et al., 2020). Oleh karena itu, PT PLN (Persero) bersama pemerintah terus mempercepat pembangunan dan pemerataan akses listrik di seluruh wilayah Terdepan, Terpencil, dan Tertinggal (3T) (Amoussou et al., 2023).

Propinsi Lampung berada paling Selatan pada pulau Sumatera memiliki beberapa pulau yang berada diwilayahnya, baik itu pulau berpenghuni maupun tidak berpenghuni (Chamdareno & Hilal, 2018). Dengan luas wilayah sebesar 33.575,41 km² dibagi menjadi 229 kecamatan yang tersebar di 2.654 desa dan kelurahan (Akbar et al., 2019). Berdasarkan data terbaru dari tahun 2022, jumlah penduduk di Provinsi Lampung mencapai sekitar 9,18 juta jiwa, dengan kepadatan penduduk rata-rata 273,31 jiwa per km² (Susilo et al., 2014). Laju pertumbuhan penduduk di wilayah ini tercatat sebesar 1,1% pada tahun 2021 (Kunaifi, 2015). Di sektor pertanian, Lampung memiliki peran penting sebagai salah satu lumbung padi di Indonesia. Pada tahun 2022, produksi padi di provinsi ini mencapai 2,69 juta ton dari luas panen sebesar 518.256 hektar (Kananda, 2017). Data ini mengindikasikan bahwa sektor pertanian masih menjadi pilar utama perekonomian di Provinsi Lampung (Fathurrachman et al., 2022).

Pulau Sebesi merupakan pulau yang menjadi bagian dari Provinsi Lampung, terletak di perairan Selat Sunda, tepatnya di bagian selatan wilayah perairan Lampung (Putra et al., 2020). Secara geografis, Pulau Sebesi berada di selatan Pulau Sebuku, di timur Pulau Serdang dan Pulau Legundi, serta di timur laut gugusan Kepulauan Krakatau (Rachmawati et al., 2022). Pulau Sebesi saat ini memiliki penduduk sekitar 2,911 jiwa dengan luas wilayah sebesar 2.620 ha dengan wilayah administrasi masuk pada kecamatan Rajabasa, kabupaten Lampung Selatan propinsi Lampung. Pulau Sebesi terdiri atas satu desa yang meliputi empat dusun utama yaitu Dusun Bangunan, Dusun Segenom, Dusun Inpres, dan Dusun Regahan Lada, serta beberapa dusun kecil yang dikelola oleh masing-masing dusun tersebut. Pulau ini memiliki jarak terdekat dengan Gugusan Krakatau dan menyaksikan langsung dahsyatnya letusan Krakatau pada tahun 1883. Dikenal dengan tanahnya yang subur sejak dulu, Pulau Sebesi kini tidak hanya menjadi pusat perkebunan yang produktif, tetapi juga sedang dikembangkan sebagai destinasi wisata unggulan di Lampung Selatan.

Pada penelitian sebelumnya yang relevan terkait dengan pengembangan sistem kelistrikan di Pulau Sebesi dilakukan oleh Herlina pada tahun 2009 dimana pada penelitian tersebut bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar PLTD dan memperpanjang waktu penyediaan listrik menjadi 24 jam, penelitian ini juga bertujuan menerapkan sistem pembangkit listrik hibrida yang menggabungkan energi terbarukan dengan pembangkit listrik konvensional. Tujuan dari penelitian ini meliputi perancangan model sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) berdasarkan potensi alam di Pulau Sebesi, melakukan simulasi dan optimasi model PLTH, serta menganalisis kontribusi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dalam menghasilkan energi sehingga didapat sistem operasi pembangkit yang optimal di pulau Sebesi. Penelitian ini sudah lama dilakukan sehingga perlu dilakukan pembaruan lagi sesuai dengan data pembangkit saat ini yang sudah beroperasi 24 jam, dan sesuai dengan sumber data energi tenaga surya yang sudah diperbarui. Penelitian tersebut juga belum mensimulasikan sistem pembangkit hybrid dengan tambahan teknologi pembangkit listrik tenaga hydrogen.

Penelitian yang relevan juga dilakukan oleh Dicky Hiwardi pada tahun 2023 dimana tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang model dari beberapa skema pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) antara PLTD dan PLTS yang optimal secara teknis dan ekonomis, menguji efisiensi dari sistem pembangkit serta mengukur peningkatan persentase energi terbarukan di Pulau Sipora di Kepulauan Mentawai dengan simulasi aplikasi Homer, dalam penelitian ini juga digunakan Battery Energy Storage System (BESS) untuk menutupi kekurangan energi yang dihasilkan PLTS selama kondisi cuaca tidak mendukung. Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini meliputi bagaimana mengoptimalkan sistem Hybrid Renewable Energy System (HRES) antara PLTD dan PLTS, dampaknya terhadap penurunan LCOE, serta seberapa besar persentase bauran energi terbarukan yang dapat diterapkan di Pulau Sipora Kepulauan Mentawai sehingga didapat model Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) antara PLTD dan PLTS yang optimal secara teknis dan ekonomis.

Mengembangkan dari penelitian sebelumnya maka pada penelitian ini akan dilakukan analisa keekonomian dan optimasi biaya pembangkitan untuk sistem Hybrid Renewable Energy System pada Sistem Pembangkitan Pulau Sebesi Lampung dari PLTD eksisting dengan pembangkit EBT tenaga Surya dan tenaga Hydrogen serta tambahan Battery Energy Storage System (BESS) sehingga diperoleh nilai keekonomian dari sistem HRES tersebut yang paling optimal.

Kondisi kelistrikan pulau sebesi saat ini masih menggunakan pembangkit listrik tenaga Diesel (PLTD) yang beroperasi selama 24 jam, dengan beban rata-rata sebesar 100 kW maka PLTD Pulau. Pembangkit listrik tenaga diesel ini dibangkitkan dengan rata-rata biaya pokok produksi (BPP) sebesar Rp 5.539/ kWh. Mahalnya BPP dalam memproduksi listrik dipulau ini maka pulau Sebesi menjadi salah satu PLTD yang masuk program dedieselisasi, program ini akan mengkonversi pembangkit tenaga diesel dengan pembangkit berbasis energi baru terbarukan (EBT) guna untuk mengurangi biaya operasi dan mencapai target Net Zero Emission pada tahun 2060 dengan cara menekan emisi gas rumah kaca (GRK).

Berdasarkan latar belakang permasalahan dipulau sebesi dan dengan melihat sumber daya alam dan posisi geografisnya maka dalam penelitian ini akan dilakukan studi keekonomian yang paling optimal dalam pengembangan pembangkit tenaga listrik Hybrid tenaga diesel, tenaga surya dan tenaga hydrogen sehingga akan dihasilkan bagaimana kombinasi besaran kapasitas daya berdasarkan besaran investasi, energi yang dihasilkan dan energi terbarukan apa yang paling optimal. Batasan masalah pada kajian ini hanya mengulas biaya keekonomian untuk pembangkit yang beroperasi hybrid dengan simulasi aplikasi Homer.

Rumusan Masalah

Konversi pembangkit tenaga listrik diesel menjadi pembangkit hybrid tenaga surya dengan pembangkit listrik tenaga hydrogen pada skala kecil memerlukan kajian besaran kapasitas masing-masing mesin pembangkit tersebut agar dicapai nilai keekonomian yang terbaik, dengan demikian maka masalah yang dirumuskan dalam penelitian ini adalah

- a. Bagaimana kelayakan ekonomi dari sistem pembangkit hybrid di Pulau Sebesi antara PLTD dengan Pembangkit EBT (PLTS dan PLTH₂) agar dapat optimal?
- b. Apakah pengembangan sistem pembangkit hybrid bisa mengurangi Levelized Cost of Energy (LCOE) sistem pembangkitan?
- c. Bagaimana perbandingan ekonomi dari setiap skema kapasitas Pembangkit Hybrid?
- d. Apakah pengoperasian Pembangkit Hybrid bisa mengurangi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)?

Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah data-data yang akan disimulasikan maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk :

- a. Menghitung kelayakan ekonomi dari beberapa skema pembangkit hybrid yang akan disimulasikan dengan aplikasi Homer.
- b. Menghitung LCOE dari masing-masing skema pembangkit Hybrid PLTD, PLTS dan PLTH₂.
- c. Menganalisa perbandingan ekonomi yang paling optimal.
- d. Menghitung dan menganalisa emisi GRK dari masing-masing skema pembangkit hybrid.

Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini diharapkan akan mendapat manfaat terkait pentingnya menghitung nilai keekonomian sistem pembangkit EBT yaitu untuk :

1. Dapat mengoptimalkan biaya investasi yang paling murah dengan biaya produksi yang paling efisien tanpa harus mengurangi keandalan dari sistem pembangkit tersebut.
2. Penelitian ini dapat dijadikan referensi oleh PT PLN (Persero) pengembangan pembangkit EBT untuk program dedieselisasi dalam rangka mendukung program pemerintah dalam meningkatkan perekonomian khususnya di daerah 3T.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini akan mensimulasikan beberapa skemapembangkit tenaga hybrid, yaitu dengan 3 (tiga) sumber pembangkit listrik yaitu pembangkit listrik tenaga diesel, pembangkit listrik tenaga surya, pembangkit listrik tenaga hydrogen dan pemasangan BESS (Battery Energy Storage System). Berdasarkan data yang sudah diperoleh dari sistem pembangkit tenaga diesel eksisting, perkembangan beban, data radiasi matahari dan data-data teknis yang sudah ada pada aplikasi Homer digunakan untuk menghitung nilai keekonomian dan optimasi biaya operasi yang agar didapat besaran kapasitas dari pembangkit listrik hybrid yang paling efisien.

Desain Penelitian menggunakan Aplikasi Homer untuk mendapatkan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTD-PTTS-PLTH₂) dan kapasitas BESS yang paling optimal dengan skema simulasi :

1. Simulasi Pembangkit Hybrid PLTD, PLTS dan PLTH₂ dengan sistem Homer Optimizer, dimana kapasitas PLTS dan BESS akan dihitung untuk mendapatkan Winning system atau Lowest cost system
2. Simulasi Pembangkit Hybrid PLTD, PLTS dan PLTH₂ dengan kapasitas PLTS, PLTH₂ dan BESS menggunakan kapasitas yang sudah ditentukan
 - a. PLTS 150 kW, PLTH₂ 100 kW
 - b. PLTS 300 kW dan PLTH₂ 100 kW

Dengan data-data yang sudah dikumpulkan maka desain penelitian akan dilaksanakan dengan tahapan sebagai berikut :

1. Studi Literatur

- a. Bertujuan mengumpulkan teori pendukung dan informasi terkait desain sistem hybrid yang melibatkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Hidrogen (PLTH₂), dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), serta meninjau kekurangan dari metode yang diterapkan pada penelitian sebelumnya.
- b. Meneliti desain dan pengoperasian sistem hybrid yang menggabungkan PLTS, PLTH₂, dan PLTD, termasuk tinjauan terhadap hasil-hasil studi sebelumnya mengenai sistem energi terbarukan dan energi cadangan.
- c. Menganalisis kelemahan setiap sistem hybrid termasuk efisiensi energi, biaya operasional, penyimpanan hidrogen, serta kendala teknis pada integrasi PLTS, PLTH₂, dan PLTD.
- d. Menyusun tinjauan literatur yang mengidentifikasi peluang peningkatan efisiensi dan biaya sistem hybrid ini.

2. Pengumpulan Data

- a. Bertujuan mengumpulkan data teknis dan lingkungan yang diperlukan untuk simulasi dan optimasi desain sistem hybrid PLTS- PLTH₂-PLTD.
- b. Data Kapasitas Unit PLTD Sebesi dengan mengumpulkan informasi tentang kapasitas, konsumsi bahan bakar, efisiensi, dan umur operasi PLTD di lokasi.
- c. Beban puncak untuk mendapatkan data beban puncak listrik yang dilayani oleh PLTD, PLTS, dan PLTH₂ baik untuk kondisi saat ini maupun prediksi ke depan.
- d. Data Rencana PLTS dan Komponennya: Mengumpulkan data teknis mengenai kapasitas dan spesifikasi rencana pemasangan PLTS, termasuk jenis panel surya, inverter, dan sistem penyimpanan energi (baterai).
- e. Data Rencana PLTH₂ dan Komponennya: Mengumpulkan data teknis mengenai kapasitas dan spesifikasi rencana pemasangan PLTH₂
- f. Data Biaya Komponen dan Operasional dengan mengumpulkan informasi mengenai biaya investasi awal, biaya operasional, serta biaya pemeliharaan dari masing-masing komponen (PLTS, PLTH₂, dan PLTD).

3. Analisis dan Eksperimen

- a. Menggunakan aplikasi Homer untuk melakukan simulasi dan optimasi sistem hybrid PLTS- PLTH₂-PLTD yang paling efisien dan optimal.
- b. Simulasi dengan Aplikasi Homer dengan memasukkan semua data yang telah dikumpulkan (kapasitas PLTS, PLTH₂, PLTD, beban listrik, dan radiasi matahari) ke dalam aplikasi Homer.
- c. Merancang beberapa skemayang menggabungkan PLTS sebagai sumber utama energi terbarukan, PLTH₂ untuk base load sistem, serta PLTD sebagai sumber energi cadangan.
- d. Eksperimen dengan berbagai Konfigurasi dengan menguji beberapa konfigurasi yang melibatkan kombinasi berbeda dari kapasitas PLTS, PLTH₂, dan PLTD. Misalnya, variasi kapasitas penyimpanan hidrogen dan output PLTD saat beban puncak. Mengoptimalkan hasil simulasi berdasarkan efisiensi energi, reliabilitas pasokan listrik, serta biaya.
- e. Mengevaluasi kinerja masing-masing konfigurasi berdasarkan indikator seperti efisiensi energi, penghematan bahan bakar diesel, kontribusi energi terbarukan, serta biaya operasional jangka panjang. Membandingkan hasil antara konfigurasi yang hanya menggunakan PLTS-PLTD dengan konfigurasi yang menambahkan PLTH₂ sebagai alternatif untuk menggantikan 100% PLTD yang ada sebagai sumber cadangan energi.

4. Kesimpulan

- a. Bertujuan untuk Menarik kesimpulan dari hasil simulasi untuk menentukan desain sistem hybrid PLTS- PLTH₂-PLTD yang paling efisien, efektif, dan ekonomis.

- b. Menyusun laporan akhir yang mencakup hasil simulasi dan optimasi, seperti konfigurasi sistem hybrid PLTS- PLTH₂-PLTD yang optimal.
- c. Persentase kontribusi energi terbarukan yang dihasilkan oleh PLTS dan PLTH₂ terhadap kebutuhan listrik total.
- d. Potensi penghematan bahan bakar diesel, pengurangan emisi karbon, dan penghematan biaya operasional. Biaya investasi, biaya siklus hidup (lifecycle cost), dan analisis payback period untuk konfigurasi sistem hybrid yang dipilih.
- e. Memberikan rekomendasi untuk penerapan lebih lanjut, termasuk peluang peningkatan efisiensi melalui penggunaan teknologi hidrogen dan energi terbarukan.

Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini melibatkan observasi dan sumber data primer dari PLN UID Lampung, serta data sekunder dari berbagai sumber. Berikut adalah rincian data yang dikumpulkan :

1. Data Pembangkitan:
 - a. Informasi terkait pengoperasian pembangkit, jumlah unit, daya terpasang, daya mampu, dan beban puncak.
 - b. Data produksi listrik dari unit pembangkit dalam kWh, konsumsi bahan bakar (BBM) dan oli, specific fuel consumption (SFC), serta capacity factor (CF).
 - c. Detail pembelian dan ongkos pengiriman BBM dan oli untuk tahun 2022.
 - d. Data Operasional PLTD Pulau Sebesi berupa laporan harian pemantauan beban operasi PLTD, yang mencakup beban per jam selama tahun 2023.
 - e. Data Biaya Pokok Penyediaan (BPP) untuk pembangkitan listrik pada tahun 2023.
2. Data Potensi Energi Surya, Data ini diperoleh dari aplikasi Homer, yang terintegrasi dengan Global Solar Atlas. Data ini mencakup potensi energi surya yang dinyatakan dalam Global Horizontal Irradiation (GHI) dengan satuan kWh/m²/hari atau kWh/m²/tahun.
3. Data Pendukung Energi Terbarukan, Mengacu pada laporan International Renewable Energy Agency (IRENA), khususnya laporan terkait renewable power generation costs tahun 2021. Data ini memuat informasi biaya penerapan dan operasional energi terbarukan secara global, termasuk PLTS.
4. Data Energi dari Aplikasi Homer:
 - a. Data Teknis: Aplikasi Homer menyediakan data teknis terkait potensi energi, efisiensi sistem, kapasitas pembangkitan, serta kebutuhan energi berdasarkan berbagai skemahybrid yang diujicobakan.
 - b. Simulasi dan Optimasi: Homer melakukan simulasi skemahybrid yang menggabungkan berbagai sumber energi, seperti PLTS, PLTH₂ dan PLTD, serta menyediakan perhitungan efisiensi, penghematan energi, dan biaya berdasarkan data lokal yang telah dimasukkan.
 - c. Analisis Ekonomi: Homer juga memberikan analisis terkait biaya investasi, biaya siklus hidup (lifecycle cost), penghematan bahan bakar, dan proyeksi payback period untuk berbagai konfigurasi sistem hybrid.

Metode Analisis Data

Proses analisis dilakukan menggunakan software Homer, yang berfungsi sebagai alat untuk merancang sistem pembangkit energi terbarukan. Dalam penelitian ini, analisis meliputi evaluasi ekonomi teknis serta optimasi dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) yang menggabungkan PLTD, photovoltaic (PV), dan Pembangkit Tenaga Hidrogen (PLTH₂). Tujuannya adalah untuk menghasilkan sistem hybrid yang lebih efisien dan ekonomis dengan memanfaatkan energi surya, penyimpanan hidrogen, dan cadangan dari PLTD.

Pada analisis ekonomi, dilakukan perbandingan biaya antara skemabase case dan sistem hybrid yang memiliki lowest cost. Sistem pembangkit dengan lowest cost adalah sistem yang memiliki nilai net present cost (NPC), Operation & Maintenance (O&M) cost, serta Levelized Cost of Energy (LCOE) paling rendah. Homer akan menganalisis dan menentukan sistem mana yang paling ekonomis jika dibandingkan dengan skemabase case.

Selanjutnya, dilakukan analisis optimasi untuk mencari konfigurasi sistem yang paling efektif. Fokus utama optimasi ini adalah memaksimalkan penggunaan energi terbarukan dari PLTS serta penyimpanan hidrogen untuk bahan bakar PLTH₂. Battery Energy Storage System (BESS) digunakan untuk menyimpan kelebihan energi surya selama siang hari, sementara cadangan daya akan dipikul oleh PLTH₂ saat radiasi matahari berkurang. Dengan menggunakan kedua sistem ini, operasi PLTD dapat dikurangi secara signifikan, sehingga konsumsi bahan bakar fosil (BBM) bisa ditekan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem Ketenagalistrikan Eksisting

Sistem ketenagalistrikan pada Pulau Sebesi beroperasi independet karena tidak terinterkoneksi dengan sistem besar di sistem Sumatera, dengan suplay utamanya dari pembangkit listrik tenaga diesel yang melistriki 1 desa dan 4 dusun utama serta beberapa dusun kecil yang berada dibawah naungan dusun utama. Empat dusun utama tersebut adalah Dusun Bangunan, Dusun Inpres, Dusun Segenom, dan Dusun Regahan Lada.

Pendistribusian tenaga listrik dari PLTD ke pelanggan melalui trafo step up 400 kVA kemudian disalurkan ke penyulang 20 kV yang diberi nama Penyulang Krakatau, penyulang ini memiliki 3 Trafo Distribusi yang menurunkan tegangan 20 kV ke 380 Volt (Fasa-fasa) untuk disalurkan ke pelanggan dan digunakan sesuai dengan keperluannya.

Konsumsi listrik pelanggan bervariasi setiap jamnya, pada tengah malam hingga pagi hari, beban listrik berada pada kisaran 91 kW hingga 100 kW, dengan puncak beban di hari ini tercatat pada pukul 05:00 sebesar 100 kW. Setelah itu, beban listrik mulai meningkat signifikan mulai pukul 06:00, mencapai 120 kW, yang menandakan dimulainya aktivitas harian. Puncak penggunaan listrik terjadi pada sore hingga malam hari, dengan beban tertinggi tercatat pada pukul 18:00 sebesar 134 kW.

Sesuai data perusahaan tahun 2023 di PLTD Sebesi terdiri dari 3 unit mesin diesel memiliki total daya mampu sebesar 300 kW, dengan setiap unit memiliki kapasitas 100 kW. Secara keseluruhan, produksi listrik bruto mencapai 822.35 MWh, dengan rincian 357.42 MWh dari Unit 1, 176.70 MWh dari Unit 2, dan 288.23 MWh dari Unit 3. Rata-rata faktor kapasitas untuk ketiga unit tersebut adalah 0.31%, di mana Unit 1 memiliki faktor kapasitas tertinggi sebesar 0.40%, diikuti oleh Unit 3 dengan 0.33%, dan Unit 2 dengan 0.20%. Dari sisi operasional, ketiga unit tersebut mencatatkan total jam kerja sebanyak 5,920 jam, di mana Unit 1 beroperasi paling lama, yakni 2,880 jam, sedangkan Unit 2 dan Unit 3 beroperasi selama 1,440 dan 1,600 jam.

PLTD Unit 1		PLTD Unit 2		PLTD Unit 3	
Daya Mampu	0.10 MW	Daya Mampu	0.10 MW	Daya Mampu	0.10 MW
Gross Electricity Production	357.42 MWh	Gross Electricity Production	176.70 MWh	Gross Electricity Production	288.23 MWh
Capacity Factor Unit Pembangkit	0.40 %	Capacity Factor Unit Pembangkit	0.20 %	Capacity Factor Unit Pembangkit	0.33 %
Jam Kerja Pembangkit (Service Hour)	2,880.00 Jam	Jam Kerja Pembangkit (Service Hour)	1,440.00 Jam	Jam Kerja Pembangkit (Service Hour)	1,600.00 Jam
Efisiensi Termal Pembangkit	0.00 %	Efisiensi Termal Pembangkit	0.00 %	Efisiensi Termal Pembangkit	0.00 %
Load Factor Unit Pembangkit	0.00 %	Load Factor Unit Pembangkit	0.00 %	Load Factor Unit Pembangkit	0.00 %
Net Electricity Production	357.42 MWh	Net Electricity Production	176.70 MWh	Net Electricity Production	288.23 MWh
Skema Penurunan Emisi GRK	Belum Ada	Skema Penurunan Emisi GRK	Belum Ada	Skema Penurunan Emisi GRK	Belum Ada
Status Proper	Belum Ada Data	Status Proper	Belum Ada Data	Status Proper	Belum Ada Data

Gambar 1. Data Pengusahaan PLTD Sebesi

Biaya operasi PLTD Pulau Sebesi dipengaruhi oleh pemakaian biaya bahan bakar dan biaya pelumas serta biaya Overhaul mesin jika sudah masuk jam jatuh tempo untuk pemeliharaan. Untuk Net Produksi Listrik dan Pemakaian BBM untuk tiga unit pembangkit. Unit 1 mencatat total produksi listrik terbesar dengan 357,420 MWh, diikuti oleh Unit 3 sebesar 288,230 MWh, dan Unit 2 dengan 176,700 MWh. Unit 1 konsisten menghasilkan listrik dengan puncak produksi di bulan Maret, sedangkan Unit 2 mengalami beberapa bulan tanpa produksi, seperti pada Maret dan April. Unit 3 juga menunjukkan variasi produksi, dengan puncak produksi di bulan Januari. Secara total, ketiga unit menghasilkan 822,350 MWh selama tahun 2023. Pada Tabel 4.3 berisi data Biaya Pelumas (Liter) untuk tiga unit (UNIT 1, UNIT 2, dan UNIT 3) di Pulau Sebesi.

Tabel 1. Net Produktion perbulan PLTD Sebesi Tahun 2023

No	Bulan	UNIT1	UNIT2	UNIT3
1	Jan	29,775	5,473	27,874
2	Feb	29,209		23,836
3	Mar	34,451		29,915
4	Apr	35,115		33,089
5	Mei	37,397		28,287
6	Jun	27,375	16,716	25,785
7	Jul	34,453	5,510	26,459
8	Ags	32,044	39,309	4,602
9	Sep	17,841	34,077	17,117
10	Okt	28,849	20,827	25,267
11	Nop	19,742	27,377	22,506
12	Des	31,169	27,411	23,493
	Total	357,420	176,700	288,230

Sumber: Data Olahan (2024)

Tabel 2. Pemakaian BBM PLTD Sebesi tahun 2023

No	Bulan	UNIT 1	UNIT 2	UNIT 3	TOTAL
----	-------	--------	--------	--------	-------

1	Jan	9,722	1,793	9,748	21,262
2	Feb	9,534		9,565	19,099
3	Mar	11,282		11,374	22,655
4	Apr	11,500		11,515	23,015
5	Mei	12,237	11,886		24,123
6	Jun	39,066	4,763	3,420	22,148
7	Jul	11,080	1,148	9,982	22,210
8	Ags	10,395	10,575	1,459	22,429
9	Sep	5,767	10,077	5,459	21,303
10	Okt	9,805	4,957	7,892	21,834
11	Nop	6,033	7,100	3,583	21,716
12	Des	6,216	652	7,174	21,911
	Total	113,716	46,934	103,056	263,706

Sumber: Data Olahan (2024)

Tabel 3. Pemakaian Minyak Lumas PLTD Sebesi Tahun 2023

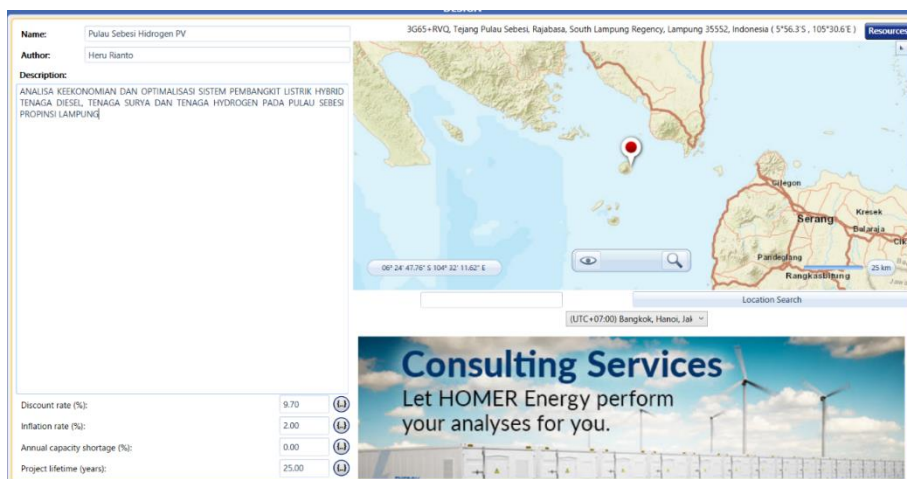
No	Bulan	UNIT 1	UNIT 2	UNIT 3	TOTAL
1	Jan	24	4	69	97
2	Feb	45	45		90
3	Mar	45	45		90
4	Apr	45	45		113
5	Mei	45	61		112
6	Jun	44	44	23	111
7	Jul	28	9	23	114
8	Ags	28	8	45	135
9	Sep				
10	Okt	45	46	23	114
11	Nop				
12	Des	46	46	24	116
	Total	405	516	141	1,061

Sumber: Data Olahan (2024)

Biaya Pokok produksi untuk PLTD Sebesi sesuai dengan laporan keuangan tahun 2023 di PT PLN (Persero) adalah sebesar Rp 5.539,- per kWh.

Pemodelan Sistem Homer

Dalam menjalankan simulasi menggunakan aplikasi Homer, ada beberapa tahapan pengisian data yang harus dilakukan, mulai dari memberi nama, mendeskripsikan, menentukan lokasi proyek, menentukan tingkat diskonto, tingkat inflasi, kekurangan kapasitas tahunan dan masa proyek.

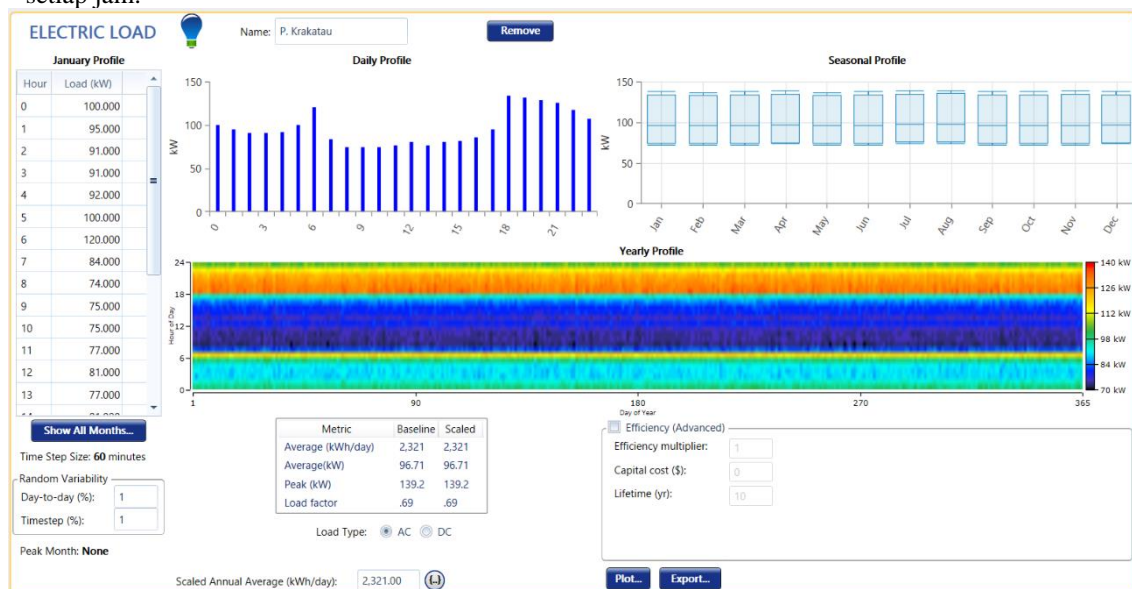


Gambar 2. Tampilan Awal pada Homer

Kemudian tahap selanjutnya mulai melakukan design untuk membuat model sistem pembangkitan sesuai dengan yang diinginkan mulai dari pemilihan mesin pembangkit, pengisian beban dan memasukan peralatan pendukung pada sistem tersebut.

Pada Gambar 4.1. untuk proses menginput pembebanan pada homer dapat dilakukan dengan mengisi profil beban yang dalam penelitian ini diisi dari profil beban penyulang Krakatau dengan memperhatikan hal sebagai berikut :

- Profil Musiman yang mengilustrasikan bagaimana beban berubah sepanjang tahun, dari Januari hingga Desember.
- Profil Tahunan menunjukkan variasi beban dari hari ke hari selama setahun penuh. Setiap garis vertikal mewakili satu hari dalam setahun, dan spektrum warna dari biru hingga merah menunjukkan tingkat beban yang berbeda (biru untuk beban rendah, merah untuk beban tinggi).
- Metrik dari rata-rata (kWh/hari) atau konsumsi energi harian rata-rata
- Permintaan daya rata-rata selama setahun (kW)
- Faktor beban sistem beroperasi
- Ukuran Timestep (ukuran timestep 60 menit) yang berarti beban diambil sampelnya dan dirata-ratakan setiap jam.



Gambar 3. Electrc Load pada Homer

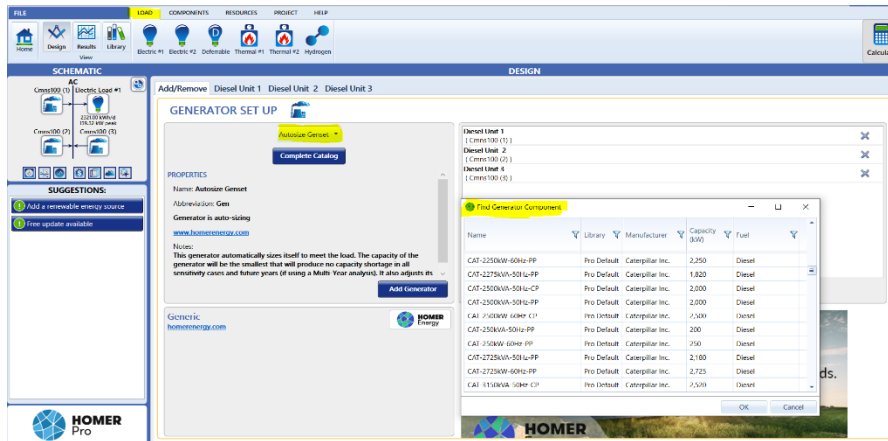
Gambar tersebut menampilkan profil beban listrik di Penyulang Krakatau dengan rincian beban rata-rata harian sebesar 2.321 kWh/hari, baik pada baseline maupun skala yang sama. Beban rata-rata harian adalah 96,71 kW, sementara beban puncaknya mencapai 139,2 kW. Faktor beban berada pada angka 0,69, menunjukkan penggunaan listrik yang cukup stabil sepanjang hari dan tahun.

Pemodelan Sistem PLTD

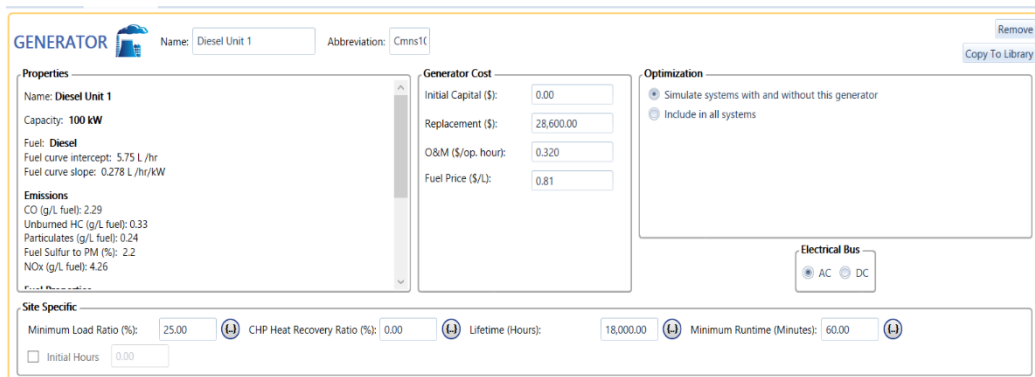
Pemodelan untuk sistem Pembangkit tenaga listrik tenaga diesel dengan memilih pada menu "Component" lalu memilih genset pada menu "Generator". Pada aplikasi ini sudah tersedia berbagai merk dan tipe dari genset, untuk pemilihannya tersedia pilihan dengan opsi sebagai berikut :

- Autosize Genset yaitu deskripsi Homer mencari kapasitas paling optimal secara otomatis yang dapat memenuhi kebutuhan sistem.
- Generic Fixed Capacity untuk medel yang sudah ada kapasitas gensetnya, kapasitas yang tersedia mulai dari 10 kW sampai dengan 1 MW.
- Generic Genset (size your own) untuk digunakan ketika kita memiliki kandidat generator dengan beberapa kandidat kapasitas yang dapat kita tentukan sekaligus dengan cost curve yang harus kita isi untuk menentukan biayanya. Ada 3 referensi kapasitas yaitu small (50 kW), medium (100 kW) dan large (2.000 kW).

Terlihat pada Gambar dibawah terdapat menu untuk pemilihan unit mesin , pada penelitian ini penulis memilih mesin diesel yang sesuai dengan data di PLTD Pulau sebesi yaitu mesin "Deutz BF6M1013EC 100kW" lalu melengkapi data-data generator propertise, generator cost, optimization dan site spesifik sesuai pada gambar 46 dibawah ini.



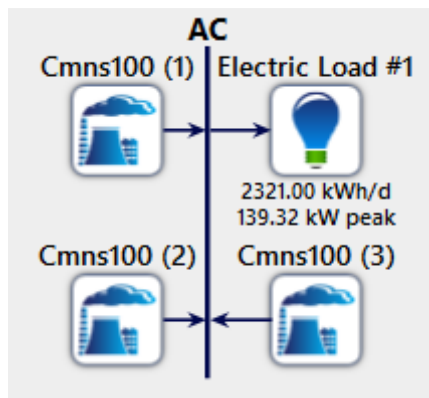
Gambar 4. Pemilihan unit mesin diesel pada Homer



Gambar 5. Pengisian data Generator pada Homer

Pada Gambar 5 terlihat yang harus menjadi perhatian dalam mengisi data-data pada generator adalah sebagai berikut :

1. Properti Generator:	Nama, Kapasitas generator dan Jenis bahan bakar yang digunakan adalah diesel
2. Biaya Generator	Initial Capital : Modal awal yang diperlukan Replacement : Biaya penggantian generator O&M (\$/op. hour) : Biaya Operasi & Pemeliharaan Fuel Price (\$/L): Harga bahan bakar
3. Optimisasi	Mensimulasikan sistem dengan dan tanpa generator Menyertakan generator ini di semua sistem.
4. Electrical Bus	Pemilihan sistem AC atau DC,
5. Specific Site Conditions	Minimum Load Ratio, Lifetime (Hours), Minimum Runtime (Minutes)

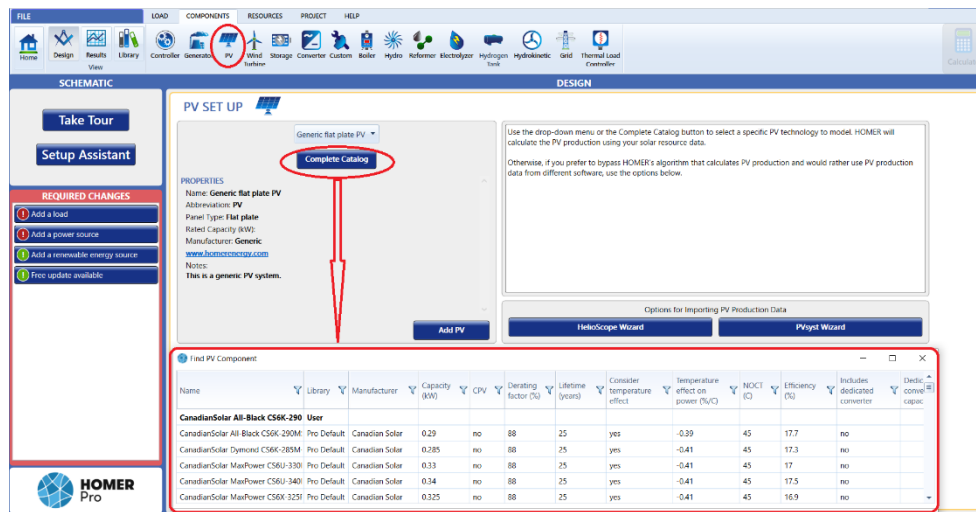


Gambar 6. Sistem PLTD Pulau Sebesi pada Homer

Setelah memasukkan semua data generator dan data load maka akan ditampilkan sistem PLTD Pulau Sebesi sebesi seperti pada gambar 6.

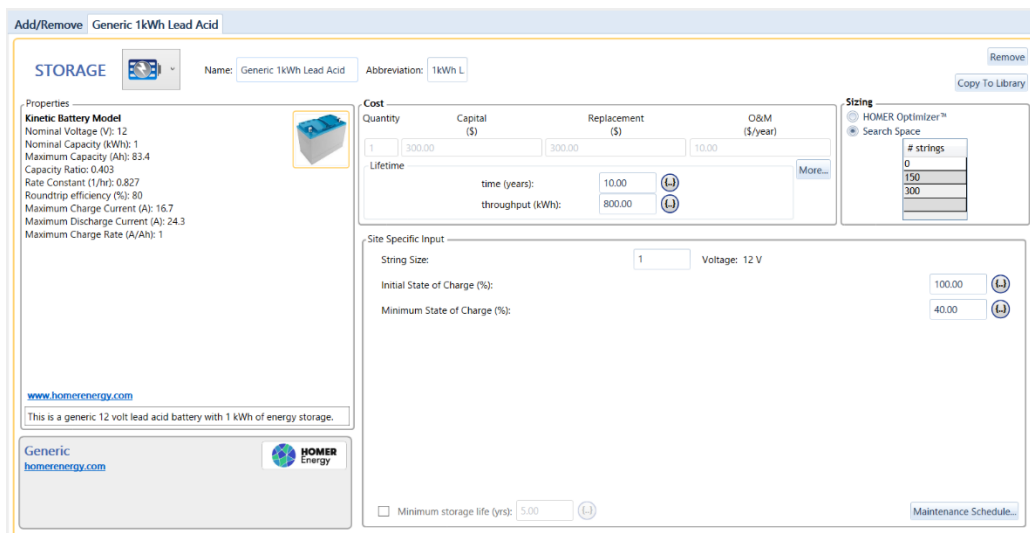
Pemodelan Sistem PLTS
Pemodelan PV

Pemodelan PLTS pada Homer juga sudah tersedia pada menu “Component” kemudian dapat dipilih jenis PV yang akan digunakan untuk simulasi. Pada Gambar 4.6 terlihat beberapa jenis PV dari berbagai merk dan model .



Gambar 7. Pemilihan model PV pada Homer

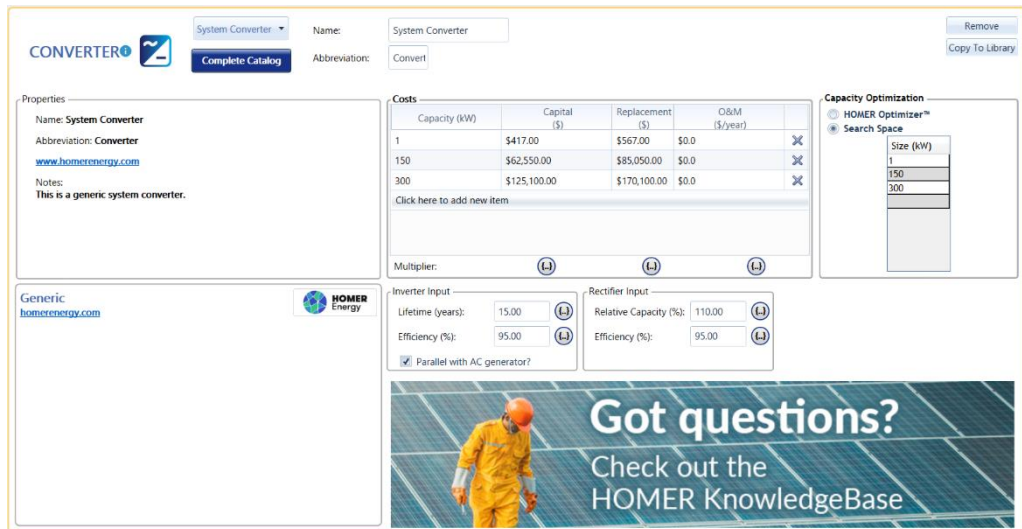
Pada penelitian ini PV yang dipilih adalah “Generic flat plate PV” sesuai pada gambar 4.7 yang merupakan sistem fotovoltaik (PV) generik dengan kapasitas terpasang untuk panel surya ini adalah 1 kW, dengan jenis panel Flat Plate. Sistem ini menggunakan konfigurasi biaya dengan modal awal (capital) sebesar \$2.500 perKwnya dan biaya penggantian yang sama (\$2.500 /kW). Biaya operasi dan pemeliharaan (O&M) ditetapkan sebesar \$10 per tahun. Umur sistem PV ini diperkirakan selama 25 tahun. Faktor derating (penurunan kinerja) untuk sistem ini adalah 80%, yang berarti sistem diperkirakan hanya beroperasi pada 80% dari kapasitas maksimumnya karena faktor-faktor seperti suhu, degradasi modul, atau efisiensi konversi.



Gambar 8. pada Homer

Pemodelan Converter

Dalam melakukan pemodelan converter harus dipastikan untuk memilih kapasitas inverter yang tepat untuk memaksimalkan efisiensi sistem. Kapasitas inverter (dinyatakan dalam kW atau kVA) harus cukup untuk menangani beban puncak dan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Kapasitas ini harus dipilih sesuai dengan output daya maksimum dari array PV dan beban sistem. Pada simulai Homer untuk memilih Converter bisa diklik pada menu Component lalu pilih Converter.



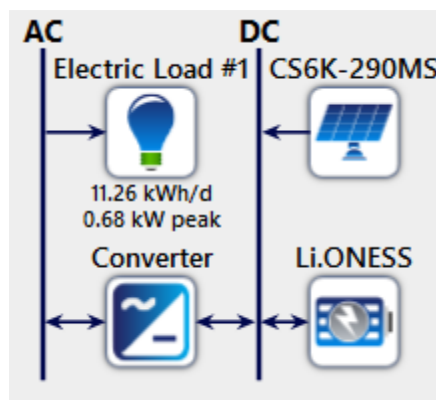
Gambar 9. Converter pada Homer

Pemodelan BESS

Pemodelan BESS (Battery Energy Storage System) digunakan untuk sistem penyimpanan energi berbasis baterai dalam suatu sistem energi. Berikut adalah komponen utama dalam pemodelan BESS:

- Kapasitas Penyimpanan (kWh)
- Daya Maksimum (kW)
- Depth of Discharge (DoD): Persentase dari kapasitas baterai yang dapat digunakan sebelum perlu diisi ulang.
- State of Charge (SoC): Tingkat pengisian baterai pada saat tertentu, dinyatakan sebagai persentase dari kapasitas penuh.
- Round-trip Efficiency: Efisiensi dari seluruh siklus pengisian dan pengosongan baterai.
- Lifetime (Cycles atau Years): Jumlah siklus pengisian dan pengosongan yang dapat dilakukan sebelum baterai mulai mengalami degradasi signifikan.
- Biaya Sistem BESS: Pemodelan juga harus memperhitungkan biaya awal (capital cost), biaya penggantian baterai, serta biaya operasi dan pemeliharaan (O&M).

Pada penelitian ini baterai yang digunakan adalah Litium Ion dengan tegangan 6 V percellnya dan kemampuannya 167 Ah. Beban rata-rata harian di Pulau Sebesi sebesar 14.529 kWh sehingga untuk dapat menjaga waktu otonom selama 2 hari diperlukan kapasitas baterai 40 kW, untuk simulasi ini penelitian membuat skema untuk BESS 40 kW dan 80 kW.



Gambar 10. Pemodelan PLTS pada Homer

Terlihat pemodelan untuk PLTS pada Homer dimana Panel PV dan BESS terhubung ke busbar DC kemudian di konversikan ke AC untuk selanjutnya disalurkan ke beban.

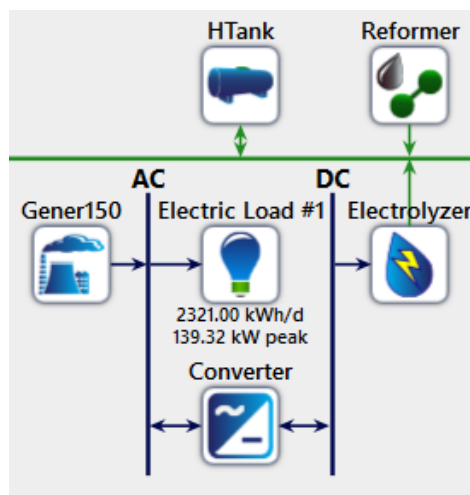
Pemodelan Sistem PLTH₂

Pemodelan Sistem PLTH₂ (Pembangkit Listrik Tenaga Hidrogen) di HOMER melibatkan perancangan sistem pembangkit listrik berbasis hidrogen yang dapat menggabungkan beberapa komponen seperti produksi hidrogen, penyimpanan, penggunaan hidrogen untuk pembangkit energi, serta sumber energi terbarukan untuk produksi hidrogen. HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)

memungkinkan simulasi sistem tenaga hibrid yang mencakup komponen hidrogen untuk mengoptimalkan efisiensi, biaya, dan kinerja sistem.

Pada penelitian ini pembangkit tenaga listrik hidrogen yang disimulasikan adalah jenis Genset yang bahan bakarnya menggunakan Hydrogen sebagai pengganti dari bahan bakar jenis solar. Dalam aplikasi homer diperlukan komponen-komponen pendukung pada sistem PLTH₂ antara lain Elektroliser sebagai alat untuk menghasilkan Hydrogen dan penyimpanan Hidrogen (Hydrogen Storage), Reformer dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen dari bahan bakar seperti gas alam, Converter untuk mengkonversi daya DC dari sistem energi terbarukan menjadi daya AC untuk beban atau untuk digunakan oleh elektroliser, hydrogen tank untuk menyimpan Hydrogen.

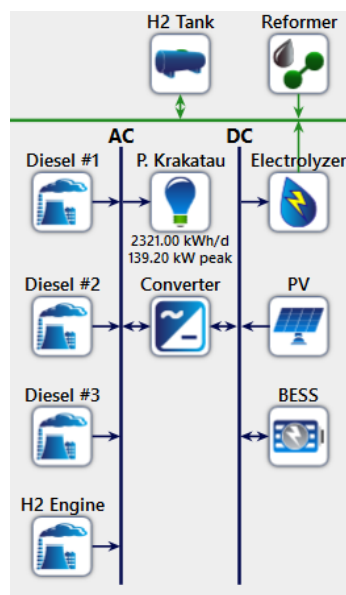
Pada penelitian ini untuk pembangkit listrik tenaga Hydrogen yang akan dibangun adalah jenis Hydrogen Engine, dimana Hydrogen akan dijadikan bahan bakar untuk menggantikan Bahan bakar minyak atau gas dari energi non terbarukan. Pembangkit listrik hydrogen Engine ini pada dasarnya adalah mesin diesel yang disempurnakan desainnya sehingga dapat menggunakan bahan bakar Hydrogen yang di bakar langsung untuk menggerakkan piston pada mesin tersebut, Sumber Hydrogen yang akan digunakan di Pulau Sebesi berasal dari penghasil hydrogen di Suralaya, sehingga di Pulau sebesi hanya dibangun storage Hydrogen saja.



Gambar 11. Pemodelan PLTH₂ pada Homer

Pemodelan Sistem Hybrid

Pembangkit listrik tenaga listrik hybrid pada Homer dapat disimulasikan dengan menggabungkan pemodelan PLTD, PLTS dan PLTH₂. Sesuai dengan data yang sudah dikumpulkan pada penelitian ini mulai dari beban, data pembangkit dan data-data energi terbarukan maka pada gambar 4.11 didapat model untuk pembangkit sistem hybrid sebagai berikut :



Gambar 12. Pemodelan Pembangkit Sistem Hybrid pada Homer

Untuk mesin-mesin PLTD eksisting (Diesel#1, Diesel#2, dan Diesel #3) terkoneksi pada busbar AC untuk disalurkan ke beban Penyulang Krakatau, Pembangkit Hydrogen Engine (H2 Engine) juga di koneksikan ke busbar AC sedangkan PLTS dan BESS dikoneksikan ke busbar DC yang kemudian akan di konversikan ke AC oleh Converter.

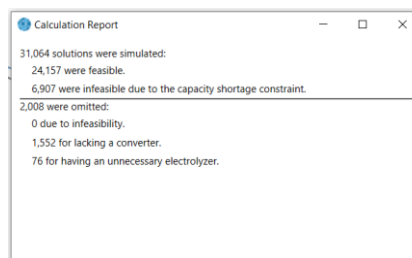
Simulasi Pemodelan Homer

Pada penelitian ini akan menghitung kelayakan ekonomi dari beberapa skema pembangkit hybrid yang akan disimulasikan dengan aplikasi Homer:

1. Skema 1 Sistem Hybrid PLTD dan PLTS Sizing Optimize
2. Skema 2 Sistem Hybrid PLTD dan PLTH₂ 150 kW
3. Skelma 3 Sistem Hybrid PLTD, PLTH₂ (150kW) dan PLTS (300kW)

Pemodelan Skema 1 Sistem Hybrid PLTD dan PLTS Sizing Optimize

Pemodelan Homer dengan Skema 1 yaitu PLTD (3x100 kW) dan PLTS dimana Solar Panel, BESS dan Inverter disetting pada sizing optimizer untuk mendapatkan berapa kapasitas yang paling optimal dalam nilai keekonomiannya.



Gambar 13. Hasil Kalkulasi simulasi Hybrid PLTD dan PLTS

Pada simulasi skema 1 didapat 31.064 simulasi feasible dan 6.907 yang tidak feasible, dimana dari hasil simulasi ini didapat kapasitas PLTS yang paling optimal pada kapasitas 291 kW dan Converter pada 95.9 kW serta penggunaan BESS sebanyak 28 strings (143 kW). Untuk kajian kelayakannya antara base sistem dibanding dengan proposed sistem terlihat.

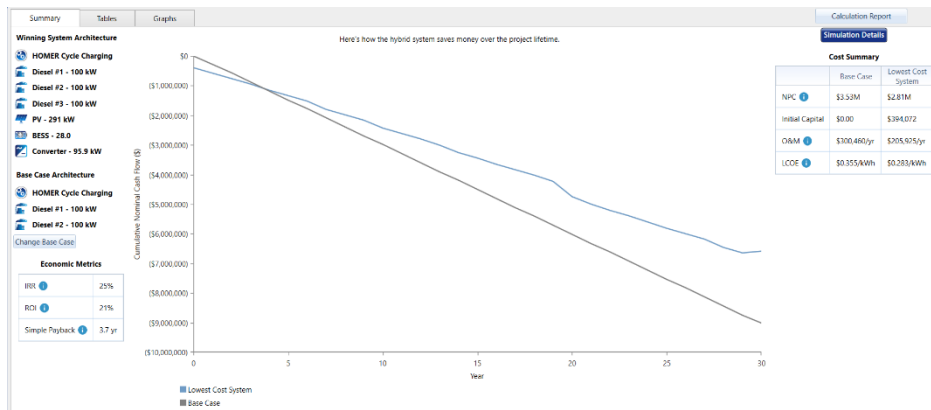
Simulation Results	
System Architecture:	Diesel 2 (100 kW) System Converter (95.9 kW)
CanadianSolar All-Black CS6K-290MS	Diesel 3 (100 kW) HOMER Cycle Charging
Diesel 1 (100 kW)	Li.ONESS 51.2V (28.0 strings)
Total NPC:	\$2,814,564.00
Levelized COE:	\$0.2831
Operating Cost:	\$205,924.90

You may choose a different base case using the Compare Economics button on the Results Summary Table.		
	Architecture	Cost
	PV (kW) Diesel #1 (kW) Diesel #2 (kW) Diesel #3 (kW) BESS Converter (kW)	NPC (\$) Initial capital (\$)
Base system	100 100 100	\$3.53M \$0.00
Proposed system	291 100 100 100 28 95.9	\$2.81M \$394,072

Metric	Value
Present worth (\$)	\$717,113
Annual worth (\$/yr)	\$61,009
Return on investment (%)	20.5
Internal rate of return (%)	25.5
Simple payback (yr)	3.72
Discounted payback (yr)	4.47

Gambar 14. Perbandingan ekonomi antara baseline PLTD dengan Hybrid PLTD PLTS

Simulasi sistem energi menunjukkan nilai sekarang sebesar \$717,113 dengan pendapatan tahunan \$61,009. Pengembalian investasi (ROI) mencapai 20.5% dan tingkat pengembalian internal (IRR) 25.5%, menunjukkan sistem ini memberikan pengembalian tinggi. Waktu pengembalian sederhana adalah 3.72 tahun, sementara waktu pengembalian diskonto 4.47 tahun, menunjukkan investasi dapat kembali dalam waktu singkat. Secara keseluruhan, sistem ini efisien dan berpotensi memberikan pengembalian yang cepat.



Gambar 15. Hasil simulasi PLTD PLTS Homer

Untuk hasil perhitungan LCOE untuk base case dimana sistem masing menggunakan full PLTD membutuhkan biaya per kWh sebesar \$0.355 /kWh dan dengan system Hybrid PLTD PLTS biaya per kWh dapat diturunkan menjadi \$0.283 per kWh, sehingga ada penurunan sebesar \$0.072 per kWh atau sebesar Rp1.080 per kWh.

Pemodelan Skema 2 Sistem Hybrid PLTD dan PLTH2

Pemodelan Hybrid skema kedua adalah antara PLTD dan PLTH2, dimana pada sistem pulau sebesi akan disimulasikan dengan membangun Hydrogen Engine untuk menambah Pembangkit EBT dan juga bisa dipakai pembangkit baseload sebagai pengganti mesin diesel. Kapasitas pembangkit Hydrogn engine pada penelitian ini sebsar 150kW mendekati angka pada beban maksimal dari penyulang krakatau sesuai Tabel Data Langgam Beban PLTD Sebesi sebesar 134 kW.

GENERATOR Name: H2 Engine 150kW SD150 Abbreviation: H2 Engi

Properties

Name: H2 Engine 150kW SD150

Capacity: 150.00 kW

Fuel: Stored Hydrogen

Fuel curve intercept: 0 kg /hr

Fuel curve slope: 0.0746 kg /hr/kW

Emissions

CO (g/kg fuel): 0

Unburned HC (g/kg fuel): 0

Particulates (g/kg fuel): 0

Fuel Sulfur to PM (%): 0

NOx (g/kg fuel): 0

Generator Cost

Initial Capital (\$): 78,600.00

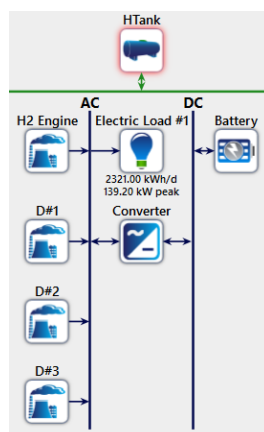
Replacement (\$): 78,600.00

O&M (\$/op. hour): 2,000

Fuel Price (\$/kg): 2.3

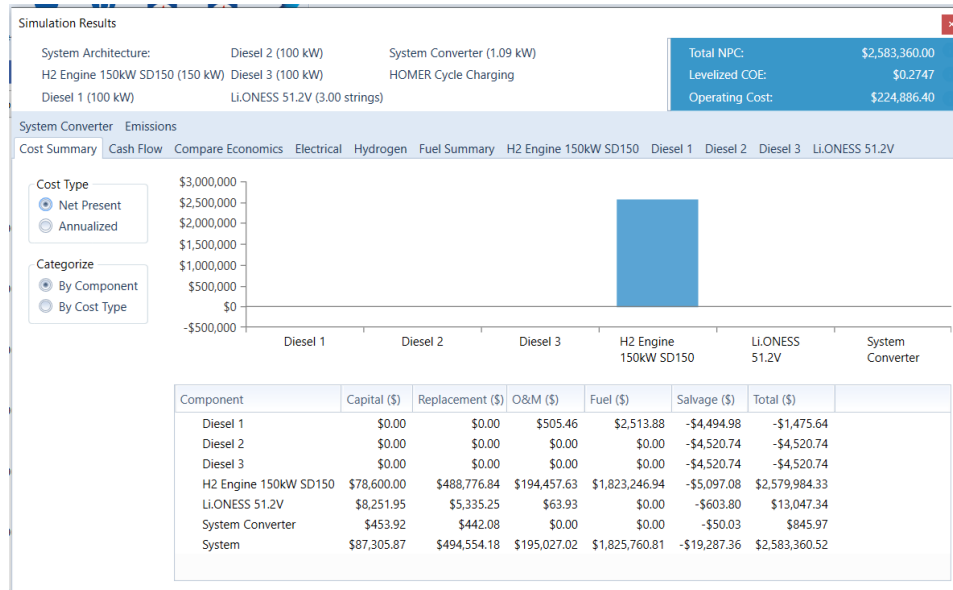
Gambar 16. Hydrogen Engine 150 KW pada Homer

Pada simulasi ini input data untuk harga generator mesin dengan bahan bakar hydrogen sebesar \$78.600 dan dilakukan penggantian selama 15.000 jam operasi. Biaya Operasi dan Maintenance perjamnya sebesar \$ 2,00 dengan harga bahan bakar Hydrogen \$2,30 per kg ditambah ongkot angkut \$0,33 per kg . Untuk data simulasi tank hydrogen sebesar \$9.900 dan penambahan baterai untuk pemakaian sendiri dalam pengelolaan bahan bakar Hydrogen.



Gambar 17. Pemodelan Pembangkit Hybrid PLTD dan PLTH₂ pada Homer

Pemodelan Hybrid PLTD dan PLTH₂ terlihat pada gambar ... dimana Hydrogen Engine dan mesin diesel konvensional 3x100 kW masuk pada busbar AC, untuk tegangan DC perlu adanya baterai untuk pemakaian sendiri pengelolaan sistem bahan bakar hydrogen. Dengan beban penyulang Krakatau didapat hasil dari simulasi pada gambar dibawah ini :



Gambar 18. Hasil Simulasi Homer sstem pembangkit Hybrid PLTD-PLTH₂

Dari simulasi tiga mesin diesel (Diesel 1, Diesel 2, dan Diesel 3) masing-masing dengan kapasitas 100 kW, sebuah mesin H2 berkapasitas 150 kW, dan sebuah tangki hidrogen dengan kapasitas 250 kg. Total biaya sekarang bersih (Net Present Cost - NPC) dari keseluruhan sistem adalah \$2,366,710 dengan biaya energi yang diratakan (Levelized Cost of Energy - LCOE) sebesar \$0.2747 per kWh dan biaya operasional tahunan mencapai \$224,886.40.

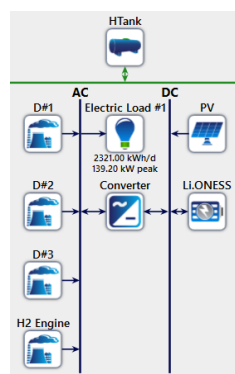
Hasil simulasi menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan dari sistem hybrid PLTH₂ dengan Total Net Present Cost (NPC) sebesar \$2.58 juta, lebih rendah daripada sistem PLTD eksisting yang mencapai \$3.34 juta. Meskipun biaya modal awal dari sistem yang diusulkan sebesar \$87,306 karena investasi awal akan tetapi penghematan jangka panjang jelas terlihat. Levelized Cost of Energy (COE) untuk sistem Hybrid adalah \$0.2747 per kWh lebih murah dari PLTD eksisting \$355 per kWh, yang menunjukkan biaya energi yang lebih ekonomis dalam jangka panjang.

Pemodelan Skema 3 Sistem Hybrid PLTD, PLTH₂ (150kW) dan PLTS (300kW)

Pemodelan yang ketiga adalah penggabungan dari skema ke 1 dan skema ke 2 dimana PLTD, PLTS dan PLTH₂ akan disimulasikan dalam satu sistem hybrid. Dengan menggunakan data PLTS pada skema 1 dan PLTH₂ pada skema 2 sebagai berikut :

- PV dengan kapasitas daya 291 kW
- BESS sebanyak 28 strings (143 kW)
- Hydrogen Engine 150 kW
- Hydrogen tank 250 kg

maka dibuat simulasi sistem pembangkit hybrid seperti pada gambar .. dibawah ini :



Gambar 19. Pemodelan Pembangkit Hybrid PLTD PLTH2 dan PLTS

Pemodelan pada sistem hybrid menemukan 3.138 solusi dimana 2.886 solusi memungkinkan dan 252 tidak memungkinkan.

Hasil simulasi ini menggambarkan bagaimana sistem energi yang terdiri dari panel surya, mesin diesel, mesin hidrogen, baterai, dan konverter dapat memberikan solusi energi yang efisien. Total Net Present Cost (NPC) untuk sistem ini adalah \$2,325,326.70 dan Levelized Cost of Energy (LCOE) berada pada \$0.2473 per kWh, menunjukkan bahwa sistem ini mampu menyediakan energi dengan biaya yang cukup ekonomis dalam jangka panjang.

Evaluasi Hasil Simulasi

Analisa Kelayakan LCOE

Berdasarkan hasil simulasi Skema 1 Sistem Hybrid PLTD dan PLTS Sizing Optimize, Skema 2 Sistem Hybrid PLTD PLTH₂ dan Skema 3 Sistem Hybrid PLTD, PLTH₂ PLTS dapat dilihat pada tabel ... berikut :

Tabel 4. Perbandingan LCOE setiap skema penelitian

NO	CASE	HYBRID	BPP PLN 2023	LCOE PLTD (Homer)	LCOE (Homer)
1	Skema 1	PLTD _ PLTS	\$0.369	\$0.355	\$0.283
2	Skema 2	PLTD - PLTH ₂	\$0.369	\$0.355	\$0.274
3	Skema 3	PLTD - PLTS -PLTH ₂	\$0.369	\$0.355	\$0.247

Sumber: Data Olahan (2024)

BPP PLN 2023 ini adalah realisasi biaya pokok penyediaan energi listrik aktual untuk tahun 2023 di Pulau Sebesi yang selama ini beroperasi penuh menggunakan PLTD, Perbandingan BPP PLN 2023 dan LCOE PLTD (Homer) adalah $(\$0.369 - \$0.355) = \$0.014$ per kWh atau sekitar 3,8%. Penggabungan antara PLTD dan PLTS berhasil menurunkan biaya energi sebesar 22.8% dibandingkan BPP PLN 2023 (\$0.369) dan 20.3% dibandingkan LCOE PLTD saja (\$0.355). Ini menunjukkan bahwa PLTS memberikan kontribusi efisiensi yang signifikan ketika digunakan bersama dengan PLTD.

Penggunaan PLTD bersama PLTH₂ menghasilkan biaya yang lebih rendah lagi. Ada penurunan sekitar 25.7% dari BPP PLN 2023 dan 22.8% dibandingkan dengan LCOE PLTD. Ini menunjukkan bahwa PLTH₂ memberikan kontribusi lebih besar dalam mengurangi biaya dibandingkan PLTS ketika dibandingkan secara langsung. Kombinasi dari PLTD, PLTS, dan PLTH₂ menghasilkan biaya energi terendah. LCOE pada skema ini 33.1% lebih rendah dibandingkan BPP PLN 2023 dan 30.4% lebih rendah dibandingkan LCOE PLTD.

Kombinasi ketiga sumber energi (PLTD, PLTS, dan PLTH₂) memberikan penghematan terbesar. Ini menunjukkan bahwa pemanfaatan lebih dari satu sumber energi terbarukan tidak hanya menurunkan biaya tetapi juga memberikan efisiensi maksimal dalam penyediaan listrik. LCOE di setiap skema selalu lebih rendah dari BPP PLN 2023, menunjukkan bahwa opsi hybrid apapun akan lebih efisien dibandingkan biaya penyediaan listrik saat ini.

Analisa Kelayakan Ekomomi

Berdasarkan hasil simulasi skema 1, skema 2 dan skema 3 dapat terlihat pada Tabel dibawah ini :

Tabel 5. Hasil simulasi nilai keekonomian Homer

NO	CASE	HYBRID	DR	CAPITAL	REPLACE	O&M	FUEL	LCOE
1	Skema 1	PLTD - PLTS	9.70%	\$394,072	\$299,510	\$194,561	\$1,953,523	0.2831
2	Skema 2	PLTD - PLTH ₂	9.70%	\$81,075	\$488,777	\$195,777	\$1,827,089	0.2738
3	Skema 3	PLTD - PLTS -PLTH ₂	9.70%	\$475,632	\$456,782	\$160,565	\$1,297,065	0.2473

HYBRID	Hibrida	Jenis kombinasi sistem energi (misalnya PLTD, PLTS, PLTH2, dll.) yang digunakan dalam skenario tersebut.
DR	Discount Rate (Tingkat Diskonto)	Persentase tingkat diskonto yang digunakan dalam perhitungan biaya. Tingkat diskonto ini mempengaruhi perhitungan biaya total yang digunakan dalam investasi jangka panjang.
CAPITAL	Modal	Biaya modal atau biaya investasi awal yang diperlukan untuk membangun sistem energi hibrida. Ini mencakup biaya instalasi dan pembelian peralatan.
REPLACE	Penggantian	Biaya penggantian komponen sistem selama masa pakai proyek. Beberapa komponen mungkin perlu diganti selama siklus hidup proyek, dan ini dihitung dalam biaya total.
O&M	Operation & Maintenance (Operasi dan Pemeliharaan)	Biaya operasional dan pemeliharaan sistem hibrida selama masa pakainya. Termasuk biaya perawatan rutin dan perbaikan.
FUEL	Bahan Bakar	Biaya bahan bakar yang digunakan dalam sistem hibrida, khususnya untuk pembangkit listrik tenaga diesel atau lainnya yang membutuhkan bahan bakar.
LCOE	Levelized Cost of Energy (Biaya Energi yang Dihitung)	Biaya total produksi energi per kWh sepanjang umur proyek. Ini mencakup semua biaya di atas (modal, penggantian, O&M, dan bahan bakar) yang dirata-ratakan untuk menunjukkan biaya energi yang efektif per unit.

Sumber: Data Olahan (2024)

Analisa kelayakan ekonomi dari hasil simulasi dapat dilihat pada tabel ... dibawah ini :

Indikator	Skema 1	Skema 2	Skema 3
Total NPC (Net Present Cost)	\$2,814,564.00	\$2,574,195.00	\$2,325,326.00
Levelized COE	\$0.2831/kWh	\$0.2738/kWh	\$0.2473/kWh
Operating Cost	\$205,924.90	\$224,622.00	\$166,651.40
Present Worth (\$)	\$713,988	\$763,147	\$938,749
Annual Worth (\$/yr)	\$60,743	\$68,757	\$84,578
Return on Investment (%)	20.3	95.1	101.4
Internal Rate of Return (%)	25.5	101.1	105.5
Simple Payback (yr)	3.72	0.79	0.90
Discounted Payback (yr)	4.47	0.85	0.96

Sumber: Data Olahan (2024)

Net Present Cost (NPC) pada skema 3 memiliki NPC terendah (\$2,325,326.00), menunjukkan bahwa skema ini adalah yang paling ekonomis dalam jangka panjang sedangkan untuk Skema 2 memiliki NPC yang lebih rendah (\$2,574,195.00) dibandingkan Skema 1 (\$2,814,564.00), tetapi tetap lebih tinggi daripada Skema 3. Levelized Cost of Energy (COE) yang dihasilkan dari Skema 3 memiliki Levelized COE terendah (\$0.2473/kWh), menjadikannya skema paling efisien dalam hal biaya energi sedangkan LCOE Skema 2 (\$0.2738/kWh) lebih rendah dari pada Skema 1 (\$0.2831/kWh), menunjukkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan Skema 1.

Return on Investment (ROI) dan Internal Rate of Return (IRR) pada Skema 3 memiliki ROI tertinggi (101.4%) dan IRR tertinggi (105.5%), menunjukkan potensi pengembalian investasi terbaik sedangkan untuk Skema 2 memiliki ROI 95.1% dan IRR 101.1%, yang juga menunjukkan hasil investasi yang sangat baik dibandingkan Skema 1 (ROI 20.3% dan IRR 25.5%). Simple Payback dan Discounted Payback Period pada Skema 2 memiliki periode pengembalian investasi tercepat, yaitu 0.79 tahun (Simple Payback) dan 0.85 tahun (Discounted Payback). Untuk Skema 3 juga memiliki periode pengembalian yang cepat, yaitu 0.90 tahun (Simple Payback) dan 0.96 tahun (Discounted Payback), masih lebih baik dibandingkan Skema 1 (3.72 dan 4.47 tahun).

Skema 3 adalah yang paling unggul secara keseluruhan, karena memiliki Total NPC, Levelized COE, dan biaya operasional yang paling rendah, serta ROI dan IRR yang tertinggi. Meskipun Simple Payback dan Discounted Payback sedikit lebih lama daripada Skema 2, investasi ini tetap sangat cepat kembali. Skema 2 adalah pilihan kedua yang terbaik, dengan periode pengembalian investasi tercepat dan IRR yang sangat tinggi, tetapi memiliki biaya operasional yang lebih tinggi daripada Skema 3. Skema 1 adalah yang paling tidak efisien dalam hal biaya dan pengembalian investasi, dengan NPC dan COE tertinggi serta ROI dan IRR yang terendah.

Evaluasi Biaya Operasi

Operating Cost pada Skema 3 memiliki biaya operasional terendah (\$166,651.40), yang berarti lebih hemat dibandingkan dengan Skema 1 dan 2. Skema 1 memiliki biaya operasional lebih rendah (\$205,924.90) dibandingkan Skema 2 (\$224,622.00). Sistem Hybrid PLTD -PLTS pada skema 1 dapat dipilih jika menginginkan sistem yang lebih murah dan efisien.

Evaluasi Emisi

Perhitungan emisi gas carbon dioxide pada pembangkit tenaga diesel eksisting sesuai pemakaian bahan bakar minyak PLTD Sebesi tahun 2023 sebesar 263.706 liter maka dapat dihitung dengan menggunakan faktor emisi standar. Menurut U.S. Environmental Protection Agency (EPA), setiap liter bahan bakar diesel menghasilkan sekitar 2,68 kg CO₂ ketika dibakar, maka emisi gas carbon dioxide yang dihasilkan PLTD Sebesi pada tahun 2023 adalah 263,706 liter × 2.68 kg CO₂/liter = 706,732 kgCO₂.

Dari hasil penelitian pada simulasi setiap skema didapat data untuk emisi masing-masing skema pada tabel 4.7 dibawah ini :

Tabel 6. Analisa Homer untuk Emisi gas Carbon Dioxide skema 1, skema 2 dan skema 3

Polutan	Skema 1 (kg/yr)	Skema 2 (kg/yr)	Skema 3 (kg/yr)
Carbon Dioxide (CO ₂)	541,927	1,477	6,182

Sumber: Data Olahan (2024)

Dengan mengetahui konsumsi bahan bakar dari masing-masing skema kita dapat menghitung emisi gas buangnya dengan menggunakan rumus Menghitung emisi CO₂ (karbon dioksida) dari mesin diesel :

$$E_{CO_2} = FC \times EF_{CO_2}$$

- E(CO₂): Emisi CO₂ (ton atau kg)
- FC: Konsumsi bahan bakar (liter atau ton)
- EF(CO₂): Faktor emisi CO₂ (biasanya dalam gram atau kg CO₂ per liter bahan bakar)
- Diesel: Sekitar 2,68 kg CO₂ per liter diesel yang dibakar

Tabel 7. Perhitungan Emisi gas Carbon Dioxide skema 1, skema 2 dan skema 3 menurut U.S. Environmental Protection Agency (EPA)

NO	SKEMA	JENIS POLUTAN	FUEL COMP	FAKTOR EMISI CO ₂	EMISI CO ₂	% PENURUNAN THP EKSISTING
1	Eksisting	ECO ₂	263,706	2.68	706,732 kg CO ₂	0.0%
2	Skema 1	ECO ₂	205,182	2.68	549,888 kg CO ₂	22.2%
3	Skema 2	ECO ₂	559	2.68	1,498 kg CO ₂	99.8%
4	Skema 3	ECO ₂	2,341	2.68	6,274 kg CO ₂	99.1%

Sumber: Data Olahan (2024)

Berdasarkan hasil penelitian untuk skema 1 berhasil menurunkan konsumsi bahan bakar menjadi 205.182 liter, sehingga emisi CO₂ berkurang 22,2% dibandingkan dengan skema eksisting. Ini menunjukkan bahwa Skema 1 lebih efisien dalam hal penggunaan bahan bakar dan berdampak positif pada pengurangan emisi gas rumah kaca. Selanjutnya, Skema 2 menunjukkan hasil yang sangat signifikan dengan hanya menggunakan 559 liter bahan bakar, emisi CO₂ turun drastis menjadi hanya 1.498 kg atau mengalami penurunan emisi sebesar 99,8%. Ini menunjukkan bahwa hampir seluruh kebutuhan energi pada Skema 2 terpenuhi oleh sumber-sumber energi terbarukan, sehingga hampir tidak ada emisi CO₂ yang dihasilkan. Demikian pula untuk Skema 3 juga menunjukkan penurunan emisi yang sangat besar. Dengan penggunaan bahan bakar solar sebesar 2.341 liter, emisi CO₂ turun menjadi 6.274 kg, dengan penurunan sebesar 99,1%. Meskipun sedikit lebih tinggi dibandingkan Skema 2, Skema 3 tetap memberikan hasil yang sangat signifikan dalam mengurangi emisi CO₂.

KESIMPULAN

Kelayakan ekonomi dari sistem pembangkit hybrid pada Skema 1, Skema 2, dan Skema 3 semuanya menunjukkan bahwa ketiganya layak untuk diimplementasikan. Namun, hasil yang paling optimal terdapat pada Skema 3, yaitu sistem pembangkit hybrid PLTD, PLTS, dan PLTH₂. Skema 3 unggul dengan NPC terendah, LCOE terendah, biaya operasional terendah, serta Present Worth tertinggi, menjadikannya pilihan yang paling efisien dan menguntungkan dari segi ekonomi. Pengembangan sistem pembangkit hybrid pada Skema 1, Skema 2, dan Skema 3 berhasil menurunkan LCOE dari sistem pembangkit diesel yang ada (\$0.369/kWh). Pada Skema 1, LCOE turun sebesar 23,3% menjadi \$0.283/kWh, sementara pada Skema 2, penurunan mencapai 25,7% menjadi \$0.274/kWh. Penurunan terbesar terjadi pada Skema 3, di mana LCOE

berkurang hingga 33,1%, menjadi \$0.247/kWh. Perbandingan ekonomi dari setiap skema hasil penelitian menunjukkan bahwa Skema 3 adalah yang paling unggul dibandingkan Skema 1 dan Skema 2. Skema 3 memiliki biaya operasional paling rendah, disertai dengan ROI tertinggi sebesar 101,4% dan IRR tertinggi sebesar 105,5%. Hal ini menjadikan skema 3 sebagai pilihan terbaik dari segi finansial, karena memiliki potensi pengembalian investasi yang paling tinggi, sehingga paling menguntungkan secara ekonomi. Pengoperasian sistem pembangkit hybrid menunjukkan penurunan emisi CO₂ yang signifikan dibandingkan skema eksisting. Skema 1 menawarkan pengurangan moderat sebesar 22,2%, sedangkan Skema 2 dan Skema 3 memberikan hasil yang jauh lebih signifikan, masing-masing menurunkan emisi hingga 99,8% dan 99,1%. Dengan demikian, Skema 2 dan Skema 3 merupakan pilihan terbaik untuk mengurangi emisi karbon dan meningkatkan efisiensi energi, menjadikannya solusi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan skema eksisting.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, J. M. (2024). Optimasi Sistem Monitoring Cuaca Mandiri Energi sebagai Penunjang Pembelajaran SMA Kelas X Terkait Energi Terbarukan.
- Akbar, A. W., Hiron, N., & Nadrotan, N. (2019). Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Dengan Sumber Energi Terbarukan (Homer) Di Daerah Pesisir Pantai Pangandaran. *Journal of Energy and Electrical Engineering*, 1(1).
- Amoussou, I., Tanyi, E., Fatma, L., Agajie, T. F., Boulkaibet, I., Khezami, N., Ali, A., & Khan, B. (2023). The optimal design of a hybrid solar PV/Wind/Hydrogen/Lithium battery for the replacement of a heavy fuel oil thermal power plant. *Sustainability*, 15(15), 11510.
- Chamdareno, P. G., & Hilal, H. (2018). Analisa Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid PLTD-PLTS di Pulau Tunda Serang Banten. *RESISTOR (ElektRONIKA KENDALI TelekomunikaSI Tenaga LiSTrik KOmputer)*, 1(1), 35–42.
- Fathurrachman, M. G., Busaeri, N., & Hiron, N. (2022). Analisis integrasi pembangkit listrik hybrid di wilayah daerah Pantai Tasikmalaya Selatan menggunakan aplikasi homer. *Journal of Energy and Electrical Engineering*, 3(2).
- Islam, M. M., Hasanuzzaman, M., Pandey, A. K., & Rahim, N. A. (2020). Modern energy conversion technologies. In *Energy for sustainable Development* (pp. 19–39). Elsevier.
- Kananda, K. (2017). A Studi Awal Potensi Energi Surya Wilayah Lampung. *Journal of Science and Applicative Technology*, 1(2), 75–81.
- Kunaifi, K. (2015). Program homer untuk studi kelayakan pembangkit listrik hibrida di propinsi riau. *Seminar Nasional Informatika (SEMNASIF)*, 1(2).
- Putra, R. R. E., Afriani, S., Miefthawati, N. P., & Jelita, M. (2020). Analisis Teknis-Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Solar PV/Biogas off Grid System. *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi Dan Industri*, 18(1), 17–23.
- Rachmawati, E., Mursid, S. P., & Pudim, A. (2022). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Photovoltaic-Fuel Cell. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 13(01), 409–414.
- Susilo, G. H., Hermawan, H., & Winardi, B. (2014). PEMODELAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK HIBRIDA DIESEL DAN ENERGI TERBARUKAN DI PULAU ENGGANO, BENGKULU UTARA MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK HOMER. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 3(2), 237–244.
- Tomo, B. D., & Brunner, I. M. I. (2022). Pengaruh biodiesel terhadap penurunan emisi gas rumah kaca dengan aplikasi APPLE-GATRIK (studi kasus PLTD Talaga Sulawesi Tenggara). *Jurnal Serambi Engineering*, 7(3).
- Zamheri, A., Arifin, F., Kusumanto, R. D., Bow, Y., & Astanto, I. (2021). PENERAPAN TEKNOLOGI ANGIN (TEACHING KIT) TURBIN HORIZONTAL DI SMK 2 PGRI PALEMBANG. *SNAPTEKMAS*, 3(1).
- CFI Team. (n.d.). Levelized Cost of Energy (LCOE). Corporate Finance Institute. Retrieved from <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe>
- Weifang Huayu Power Technology CO., LTD. (n.d.). Disesuaikan dengan metode Gas sintesis Gas sintesis Super 6b 20kw bersih Gas Alam Engine Pembangkit Daya untuk Generator & Bus & Truk. Made-in-China. Retrieved from <https://id.made-in-china.com>
- Sulaeman, M. (2024). *Analisis Finansial Penambahan Suplai Kelistrikan PLTD Weda dengan Daya 5 MW untuk Mendapatkan Biaya Pokok Penyediaan yang Optimal* (Master's thesis). Institut Teknologi PLN, Jakarta.
- Herlina. (2009). Analisis dampak lingkungan dan biaya pembangkitan listrik pembangkit listrik tenaga hibrida di Pulau Sebesi Lampung Selatan (Tesis, Universitas Indonesia). Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Elektro, Depok.

- Wijaya, T.C., Facta, M., & Yuningtyastuti. (2014). "Optimasi Potensi Energi Terbarukan untuk Sistem Pembangkit Listrik Hibrid di Desa Margajaya Bengkulu Utara Menggunakan Perangkat Lunak HOMER." *Transient*, Vol. 3, No. 3, pp. 394-XXX.
- Wirawan, B., Bengen, D.G., Yulianto, I., Susanto, H.A., Mahi, A.K., & Ahmad, M. (2002). *Profil Sumberdaya Pulau Sebesi, Kecamatan Rajabasa Kabupaten Lampung Selatan*. Penerbitan Khusus Proyek Pesisir, Coastal Resources Center - University of Rhode Island, Narraganset, Rhode Island. 49 pages.
- Arota, A. S., Kolibu, H. S., & Lumi, B. M. (2013). Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Hibrida (Energi Angin dan Matahari) Menggunakan Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER). *Jurnal MIPA Unsrat Online*, 2(2), 145-150. Retrieved from <http://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jmuo>.