



Analisis Integrasi Sistem Hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Diesel untuk Sistem Kelistrikan Pulau Terpencil: Studi Kasus di Pulau Enggano Menggunakan Simulasi HOMER

Wahyudi Putra

PLN Institute of Technology

wahyudi.putra@pln.co.id

Abstract: *The limited energy supply in remote areas such as Enggano Island, Bengkulu, remains a serious challenge in achieving equitable and sustainable national energy development. The region's electricity system still relies entirely on Diesel Power Plants (PLTD), which are known for their high fuel consumption, operational costs, and significant carbon emissions. This study investigates the potential for developing a hybrid power generation system combining PLTD and Solar Power Plants (PLTS) as a solution to support the clean energy transition. The analysis was conducted using HOMER Pro software to simulate various system configurations based on the existing PLTD technical data, local solar radiation potential from the NASA database, and projected load demands over the next 25 years. Several hybrid system scenarios were designed by integrating 1.5 MWp of PLTS, battery storage, an inverter, and PLTD as a backup. The simulation results indicate that this integration can reduce fuel consumption by more than 30% annually, lower CO₂ emissions by approximately 1,500 tons per year, and produce a Levelized Cost of Energy (LCOE) of IDR 3,200/kWh, which is lower than a standalone PLTD system. The simulation also shows that the renewable energy penetration exceeds 33%, while system efficiency and power supply reliability are maintained throughout the year. The study concludes that the PLTS–PLTD hybrid system is not only technically and economically feasible, but also represents a strategic step in supporting energy sector decarbonization in underdeveloped regions.*

Keywords: Renewable energy, Diesel Power Plant, Solar PV, hybrid system, HOMER Pro, Enggano, energy efficiency

Abstrak: *Keterbatasan pasokan energi di daerah terpencil seperti Pulau Enggano, Bengkulu, masih menjadi tantangan serius dalam upaya pemerataan dan kemandirian energi nasional. Sistem kelistrikan di wilayah ini masih bergantung sepenuhnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), yang memiliki kelemahan berupa tingginya konsumsi bahan bakar, biaya operasional, serta kontribusi terhadap emisi karbon. Penelitian ini mengkaji potensi pengembangan sistem pembangkit listrik hybrid antara PLTD dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai solusi transisi energi bersih dan berkelanjutan. Studi dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro untuk mensimulasikan berbagai konfigurasi sistem berdasarkan data teknis PLTD eksisting, potensi radiasi matahari lokal dari database NASA, serta proyeksi kebutuhan beban selama 25 tahun ke depan. Beberapa skenario sistem hybrid dirancang dengan mengintegrasikan PLTS kapasitas 1,5 MWp, baterai penyimpanan, inverter, dan PLTD sebagai cadangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi ini mampu mengurangi konsumsi bahan bakar lebih dari 30% per tahun, menurunkan emisi CO₂ hingga ±1.500*

ton/tahun, serta menghasilkan Levelized Cost of Energy (LCOE) sebesar Rp3.200/kWh, lebih rendah dari sistem PLTD-only. Simulasi juga menunjukkan bahwa penetrasi energi terbarukan mencapai lebih dari 33%, dengan efisiensi sistem dan keandalan suplai daya yang terjaga sepanjang tahun. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem hybrid PLTS–PLTD bukan hanya layak secara teknis dan ekonomis, tetapi juga menjadi langkah strategis dalam mendukung dekarbonisasi sektor energi di daerah tertinggal.

Kata kunci: Energi terbarukan, PLTD, PLTS, sistem hybrid, HOMER Pro, Enggano, efisiensi energi.

PENDAHULUAN

Penyediaan energi listrik yang andal dan berkelanjutan merupakan faktor kunci dalam mendukung pembangunan ekonomi dan sosial, khususnya di wilayah terpencil dan pulau-pulau kecil di Indonesia. Hingga saat ini, sebagian besar sistem kelistrikan di wilayah tersebut masih mengandalkan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sebagai sumber utama pasokan listrik. Meskipun PLTD memiliki keunggulan dari sisi fleksibilitas dan kemudahan operasional, ketergantungan terhadap bahan bakar minyak (BBM) menyebabkan biaya operasional yang tinggi, ketidakstabilan pasokan energi, serta dampak lingkungan berupa emisi gas rumah kaca.

Pulau Enggano sebagai salah satu wilayah terluar Indonesia merupakan contoh nyata sistem kelistrikan terisolasi yang masih bergantung pada PLTD. Letak geografis yang terpencil menyebabkan distribusi BBM ke pulau ini menghadapi kendala logistik yang signifikan, sehingga berdampak pada tingginya biaya pokok penyediaan (BPP) listrik. Kondisi tersebut tidak hanya membebani penyelenggara sistem ketenagalistrikan, tetapi juga berpotensi menghambat pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat setempat. Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi energi surya yang besar dan relatif merata sepanjang tahun, termasuk di wilayah kepulauan. Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi terbarukan menjadi alternatif strategis untuk mengurangi konsumsi BBM, menekan biaya operasional, serta meningkatkan keberlanjutan sistem kelistrikan. Integrasi PLTS ke dalam sistem PLTD dalam bentuk sistem hibrida memungkinkan pemanfaatan energi terbarukan tanpa mengurangi keandalan pasokan listrik, yang sangat penting bagi sistem isolated grid. Namun demikian, penerapan sistem hibrida PLTD–PLTS memerlukan kajian yang komprehensif, khususnya dari sisi teknis dan ekonomi. Perencanaan yang tidak optimal berpotensi menimbulkan biaya investasi yang tinggi atau kinerja sistem yang tidak efisien. Oleh karena itu, diperlukan alat analisis yang mampu mengevaluasi berbagai konfigurasi sistem secara menyeluruh. Perangkat lunak HOMER (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) banyak digunakan dalam perencanaan sistem energi hibrida karena kemampuannya dalam melakukan simulasi, optimasi, serta analisis kelayakan ekonomi berdasarkan parameter seperti Net Present Cost (NPC) dan Levelized Cost of Energy (LCOE). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan teknno-ekonomi integrasi PLTS pada sistem PLTD Pulau Enggano menggunakan perangkat lunak HOMER. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi pengelola sistem ketenagalistrikan, khususnya dalam pengambilan keputusan investasi dan pengembangan sistem energi yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan di wilayah terpencil Indonesia.

KAJIAN TEORI

1. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama generator untuk menghasilkan energi listrik. PLTD banyak digunakan pada sistem kelistrikan terisolasi (isolated grid) dan wilayah terpencil karena kemudahan instalasi, fleksibilitas operasi, serta kemampuan merespons perubahan beban dengan cepat. Namun demikian, PLTD memiliki beberapa keterbatasan utama, antara lain tingginya biaya operasional akibat konsumsi bahan bakar minyak (BBM), ketergantungan pada rantai pasok logistik, serta emisi gas buang yang berdampak pada lingkungan. Kinerja PLTD sangat dipengaruhi oleh specific fuel consumption (SFC) dan tingkat pembebanan. Operasi PLTD pada beban parsial umumnya menyebabkan efisiensi menurun dan konsumsi BBM meningkat, sehingga berdampak langsung pada tingginya biaya pokok penyediaan (BPP) listrik.

Secara ekonomi, sistem PLTD murni pada wilayah terpencil cenderung memiliki Net Present Cost (NPC) dan Levelized Cost of Energy (LCOE) yang tinggi, terutama ketika harga BBM dan biaya transportasi mengalami kenaikan.

2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit yang memanfaatkan energi radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik. PLTS memiliki keunggulan berupa sumber energi yang melimpah, ramah lingkungan, serta biaya operasi dan pemeliharaan yang relatif rendah.

Indonesia sebagai negara tropis memiliki potensi energi surya yang besar dan relatif merata sepanjang tahun, termasuk di wilayah kepulauan. Pemanfaatan PLTS menjadi salah satu strategi utama dalam mendukung transisi energi dan pengurangan emisi karbon. Meskipun demikian, keluaran daya PLTS bersifat intermiten dan bergantung pada kondisi cuaca serta waktu penyinaran matahari, sehingga tidak dapat sepenuhnya berdiri sendiri untuk memenuhi kebutuhan listrik secara kontinu.

Oleh karena itu, integrasi PLTS dengan pembangkit konvensional atau sistem penyimpanan energi diperlukan untuk menjaga keandalan pasokan listrik, khususnya pada sistem isolated grid.

3. Sistem Hybrid PLTD–PLTS

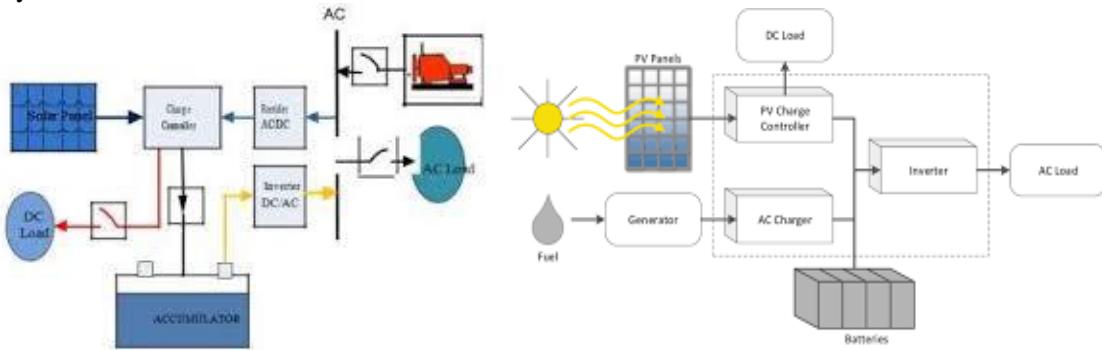
Sistem hybrid PLTD–PLTS merupakan sistem pembangkit listrik yang mengombinasikan PLTD sebagai sumber energi konvensional dengan PLTS sebagai sumber energi terbarukan. Pada sistem ini, PLTS berperan untuk menyuplai energi listrik pada siang hari dan mengurangi beban operasi PLTD, sementara PLTD berfungsi sebagai penopang keandalan sistem ketika produksi PLTS tidak mencukupi.

Keunggulan utama sistem hybrid PLTD–PLTS adalah:

1. Penurunan konsumsi BBM dan biaya operasional.
2. Penurunan nilai NPC dan LCOE sistem.
3. Peningkatan pemanfaatan energi terbarukan.

4. Pengurangan emisi gas rumah kaca.
5. Peningkatan keberlanjutan sistem kelistrikan.

Pada beberapa konfigurasi, sistem hybrid juga dilengkapi dengan baterai sebagai sistem penyimpanan energi untuk meningkatkan fleksibilitas operasi dan efisiensi pemanfaatan energi surya.



Gambar 1. Skema Sistem Hybrid PLTD–PLTS

4. Sistem Penyimpanan Energi (Baterai)

Baterai pada sistem hybrid berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS ketika terjadi surplus produksi. Energi yang tersimpan dapat digunakan kembali saat produksi PLTS menurun atau pada saat beban meningkat. Keberadaan baterai dapat mengurangi frekuensi start-stop PLTD dan meningkatkan efisiensi operasi sistem secara keseluruhan.

Dari sisi ekonomi, penambahan baterai meningkatkan biaya investasi awal, namun dapat memberikan manfaat jangka panjang berupa penurunan konsumsi BBM, pengurangan biaya operasi, serta peningkatan umur mesin diesel. Oleh karena itu, diperlukan analisis teknno-ekonomi untuk menentukan kapasitas baterai yang optimal.

5. Analisis Tekno-Ekonomi Sistem Pembangkit

Analisis teknno-ekonomi merupakan pendekatan yang mengombinasikan aspek teknis dan ekonomi untuk mengevaluasi kelayakan suatu sistem pembangkit listrik. Dalam kajian sistem hybrid PLTD–PLTS, analisis ini digunakan untuk membandingkan berbagai konfigurasi sistem berdasarkan kinerja teknis dan indikator ekonomi.

Parameter ekonomi utama yang digunakan dalam analisis ini meliputi:

- a. Net Present Cost (NPC), yaitu total biaya sistem selama umur proyek yang dinyatakan dalam nilai saat ini.
- b. Levelized Cost of Energy (LCOE), yaitu biaya rata-rata produksi energi listrik per satuan kWh.
- c. Internal Rate of Return (IRR), yaitu tingkat pengembalian investasi proyek.
- d. Net Present Value (NPV), yaitu selisih antara nilai sekarang manfaat dan biaya investasi.

Parameter-parameter tersebut menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi sistem yang paling optimal dan layak secara finansial.

6. Perangkat Lunak HOMER

HOMER (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi, optimasi, dan analisis sensitivitas sistem energi hibrida. HOMER mampu mengevaluasi berbagai kombinasi sumber energi, sistem penyimpanan, serta strategi operasi berdasarkan kriteria teknis dan ekonomi.

HOMER melakukan simulasi berdasarkan data beban, sumber energi, dan parameter biaya untuk menentukan konfigurasi dengan nilai NPC terendah. Selain itu, HOMER juga menyediakan analisis kinerja sistem seperti produksi energi, konsumsi bahan bakar, serta kontribusi energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan teknno-ekonomi dengan metode deskriptif–kuantitatif. Pendekatan ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) eksisting. Analisis dilakukan melalui simulasi dan optimasi sistem pembangkit listrik hibrida menggunakan perangkat lunak HOMER Pro (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources). Pendekatan teknno-ekonomi dipilih karena mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai kinerja sistem dari sisi teknis, biaya investasi, biaya operasional, serta manfaat ekonomi jangka panjang.

2. Lokasi dan Objek Penelitian

Lokasi penelitian adalah PLTD Pulau Enggano, Provinsi Bengkulu, yang merupakan sistem kelistrikan terisolasi (isolated grid) dan hingga saat ini masih bergantung pada pembangkit diesel sebagai sumber utama pasokan listrik. Objek penelitian meliputi sistem pembangkitan listrik eksisting (PLTD) dan skenario pengembangan sistem hybrid PLTD–PLTS–baterai.

3. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data teknis dan data ekonomi, yang diperoleh dari hasil pengamatan lapangan, dokumen teknis, serta sumber resmi terkait operasional sistem kelistrikan.

3.1 Data Teknis

Data teknis yang digunakan meliputi:

- a. Data beban listrik Pulau Enggano (profil beban harian dan tahunan).
- b. Spesifikasi PLTD, meliputi kapasitas terpasang, efisiensi, serta konsumsi bahan

bakar.

- c. Data potensi energi surya, berupa intensitas radiasi matahari lokasi penelitian.
- d. Spesifikasi PLTS, meliputi kapasitas modul, inverter, dan efisiensi sistem.
- e. Spesifikasi baterai, meliputi kapasitas penyimpanan dan karakteristik operasional.

3.2 Data Ekonomi

Data ekonomi yang digunakan dalam simulasi meliputi:

- a. Biaya investasi awal (capital cost) setiap komponen sistem.
- b. Biaya operasi dan pemeliharaan (operation and maintenance cost).
- c. Harga bahan bakar minyak (BBM) sebesar Rp10.370/liter.
- d. Umur proyek selama 25 tahun.
- e. Parameter ekonomi lainnya yang relevan dalam analisis kelayakan.

4. Skenario dan Konfigurasi Sistem

Dalam penelitian ini disimulasikan beberapa skenario sistem pembangkit listrik, yaitu:

- a. Sistem PLTD eksisting (diesel-only) sebagai kondisi dasar (baseline).
- b. Sistem hybrid PLTD–PLTS.
- c. Sistem hybrid PLTD–PLTS–baterai.

Setiap skenario dianalisis untuk mengetahui kinerja teknis dan ekonomi sistem, dengan tujuan memperoleh konfigurasi optimal berdasarkan nilai biaya terendah dan kinerja sistem terbaik.

5. Prosedur Simulasi Menggunakan HOMER

Simulasi dan optimasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Memasukkan data beban listrik dan sumber energi.
- b. Menentukan parameter teknis dan ekonomi setiap komponen sistem.
- c. Menyusun skenario konfigurasi sistem pembangkit.

- d. Melakukan simulasi dan optimasi untuk memperoleh konfigurasi dengan Net Present Cost (NPC) terendah.
- e. Menganalisis hasil simulasi berupa produksi energi, konsumsi bahan bakar, serta kontribusi energi terbarukan.
- f. HOMER menggunakan metode optimasi berbasis perhitungan ekonomi untuk menentukan konfigurasi sistem yang paling layak secara keseluruhan.

6. Parameter Analisis Tekno-Ekonomi

Parameter utama yang digunakan dalam evaluasi kelayakan sistem meliputi:

- a. Net Present Cost (NPC), yaitu total biaya sistem selama umur proyek dalam nilai saat ini.
- b. Levelized Cost of Energy (LCOE), yaitu biaya rata-rata produksi energi listrik per kWh.
- c. Internal Rate of Return (IRR), sebagai indikator tingkat pengembalian investasi.
- d. Net Present Value (NPV), sebagai indikator kelayakan finansial proyek.
- e. Konsumsi bahan bakar dan penurunannya, sebagai indikator efisiensi operasional.
- f. Renewable fraction, sebagai indikator kontribusi energi terbarukan dalam sistem.

7. Teknik Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis secara komparatif antara sistem PLTD eksisting dan sistem hybrid. Analisis difokuskan pada perbandingan kinerja ekonomi dan teknis untuk menilai manfaat integrasi PLTS terhadap efisiensi biaya, pengurangan konsumsi BBM, serta peningkatan keberlanjutan sistem kelistrikan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Simulasi Sistem PLTD Eksisting

Hasil simulasi sistem PLTD eksisting (diesel-only) pada sistem kelistrikan Pulau Enggano menunjukkan bahwa ketergantungan penuh terhadap pembangkit diesel menghasilkan biaya sistem yang relatif tinggi. Berdasarkan hasil simulasi HOMER, sistem PLTD eksisting memiliki **Net Present Cost (NPC)** sebesar **Rp347 miliar** dengan **Levelized Cost of Energy (LCOE)** sebesar **Rp3.935/kWh** selama umur proyek 25 tahun.

Tingginya nilai NPC dan LCOE tersebut terutama dipengaruhi oleh besarnya konsumsi bahan bakar minyak (BBM) yang mencapai **2.092.690 liter per tahun**. Kondisi geografis Pulau Enggano yang terisolasi menyebabkan biaya distribusi BBM menjadi mahal dan tidak stabil, sehingga berdampak langsung pada peningkatan biaya operasional sistem kelistrikan. Selain itu, operasi PLTD pada variasi beban harian menyebabkan efisiensi mesin diesel tidak optimal, yang semakin meningkatkan konsumsi BBM.

Dari sisi keberlanjutan, sistem PLTD murni juga menghasilkan emisi karbon yang tinggi, sehingga kurang sejalan dengan upaya transisi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca di sektor ketenagalistrikan.

2. Hasil Simulasi Sistem Hybrid PLTD–PLTS–Baterai

Hasil simulasi HOMER terhadap beberapa konfigurasi sistem hybrid menunjukkan bahwa integrasi PLTS dan baterai ke dalam sistem PLTD memberikan peningkatan kinerja ekonomi dan teknis yang signifikan. Konfigurasi optimal yang diperoleh terdiri atas **PLTS berkapasitas 2.316 kW, PLTD 1.000 kW, baterai sebanyak 1.116 unit, dan inverter 1.250 kW**.

Konfigurasi tersebut menghasilkan **NPC sebesar Rp259 miliar**, yang berarti terjadi penurunan biaya sistem sebesar **Rp88 miliar** dibandingkan sistem PLTD eksisting. Selain itu, nilai **LCOE menurun menjadi Rp2.936/kWh**, atau sekitar **25% lebih rendah** dibandingkan sistem diesel-only. Penurunan ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS mampu meningkatkan efisiensi biaya produksi energi listrik secara signifikan pada sistem kelistrikan terisolasi.

Dari sisi operasional, konsumsi BBM pada sistem hybrid menurun menjadi **1.317.423 liter per tahun**, atau terjadi penghematan sekitar **775.267 liter per tahun** ($\pm 37\%$). Penurunan konsumsi BBM ini berdampak langsung pada pengurangan biaya operasional dan peningkatan keandalan pasokan energi, terutama pada periode siang hari ketika produksi energi surya optimal.

3. Analisis Kelayakan Ekonomi

Analisis kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa sistem hybrid PLTD–PLTS–baterai tidak hanya mampu menurunkan biaya energi, tetapi juga layak secara finansial. Hasil simulasi menunjukkan nilai **Internal Rate of Return (IRR)** sebesar **28,1%**, yang berada di atas tingkat pengembalian minimum yang umumnya disyaratkan dalam investasi infrastruktur energi. Selain itu, nilai **Net Present Value (NPV)** tahunan tercatat sebesar \pm **Rp6,8 miliar**, yang mengindikasikan bahwa manfaat ekonomi yang diperoleh lebih besar dibandingkan biaya investasi yang dikeluarkan.

Periode pengembalian investasi juga tergolong singkat, dengan **simple payback period sekitar 3,56 tahun** dan **discounted payback period sekitar 3,98 tahun**. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS pada sistem PLTD Pulau Enggano merupakan investasi yang menarik dari perspektif ekonomi dan manajemen aset kelistrikan.

4. Kontribusi Energi Terbarukan dan Keberlanjutan Sistem

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem hybrid menghasilkan **renewable fraction sebesar 33,7%**, yang berarti lebih dari sepertiga kebutuhan energi listrik tahunan dapat dipenuhi oleh sumber energi terbarukan. Produksi energi tahunan dari PLTS mencapai **3.669.876 kWh** atau sekitar **44,8%** dari total energi yang dihasilkan sistem, sementara sisanya dipenuhi oleh PLTD.

Peningkatan kontribusi energi terbarukan ini berimplikasi pada penurunan emisi gas rumah kaca serta peningkatan keberlanjutan sistem kelistrikan. Selain itu, penggunaan baterai memungkinkan pemanfaatan energi surya secara lebih optimal dan mengurangi frekuensi operasi PLTD pada beban rendah, yang berpotensi memperpanjang umur mesin diesel dan menurunkan biaya pemeliharaan jangka panjang.

5. Pembahasan dalam Perspektif Ekonomi dan Manajemen Energi

Dari perspektif ekonomi dan manajemen energi, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS pada sistem PLTD merupakan strategi yang efektif untuk menekan biaya pokok penyediaan listrik di wilayah terpencil. Penurunan NPC dan LCOE mencerminkan peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya serta optimalisasi struktur biaya sistem kelistrikan.

Hasil ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa sistem hybrid diesel–surya mampu memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan pada sistem isolated grid dengan biaya BBM yang tinggi. Dengan demikian, penerapan sistem hybrid PLTD–PLTS di Pulau Enggano tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga relevan sebagai model pengembangan sistem kelistrikan berkelanjutan bagi wilayah terpencil lainnya di Indonesia.

KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil analisis teknno-ekonomi menggunakan perangkat lunak HOMER pada sistem kelistrikan PLTD Pulau Enggano, dapat disimpulkan bahwa integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ke dalam sistem PLTD eksisting terbukti **layak secara teknis dan ekonomis**. Sistem hybrid PLTD–PLTS–baterai mampu memberikan peningkatan kinerja sistem yang signifikan dibandingkan sistem PLTD murni.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan sistem hybrid menghasilkan **penurunan Net Present Cost (NPC) sebesar Rp88 miliar** dan **penurunan Levelized Cost of Energy (LCOE) sekitar 25%**, dari Rp3.935/kWh menjadi Rp2.936/kWh. Selain itu, konsumsi bahan bakar minyak (BBM) dapat dikurangi sekitar **37%**, yang berdampak langsung pada penurunan biaya operasional dan peningkatan efisiensi pengelolaan sistem kelistrikan di wilayah terisolasi.
3. Dari sisi kelayakan finansial, sistem hybrid menunjukkan **Internal Rate of Return (IRR) sebesar 28,1%**, nilai **Net Present Value (NPV) positif**, serta periode pengembalian investasi yang relatif singkat, yaitu kurang dari empat tahun. Hal ini menegaskan bahwa investasi integrasi PLTS pada sistem PLTD Pulau Enggano

- memiliki daya tarik ekonomi yang kuat dan layak dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan investasi infrastruktur energi.
4. Selain manfaat ekonomi, sistem hybrid juga meningkatkan **kontribusi energi terbarukan hingga 33,7%**, yang berimplikasi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan peningkatan keberlanjutan sistem kelistrikan. Dengan demikian, integrasi PLTS pada sistem PLTD tidak hanya memberikan efisiensi biaya, tetapi juga mendukung agenda transisi energi dan pengembangan sistem ketenagalistrikan berkelanjutan di wilayah terpencil.
 5. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem hybrid PLTD–PLTS–baterai dapat dijadikan **model pengembangan sistem kelistrikan yang efisien, ekonomis, dan berkelanjutan** untuk wilayah terisolasi lainnya di Indonesia, khususnya daerah 3T yang masih bergantung pada pembangkit diesel.

KETERBATASAN PENELITIAN

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menafsirkan hasil kajian.

1. Analisis dilakukan berdasarkan **data beban listrik dan parameter operasional pada periode tertentu**, sehingga hasil simulasi merepresentasikan kondisi sistem kelistrikan Pulau Enggano pada saat data tersebut dikumpulkan. Perubahan pola konsumsi listrik di masa mendatang berpotensi memengaruhi kinerja dan kelayakan ekonomi sistem hybrid.
2. Simulasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak **HOMER** dengan sejumlah **asumsi teknis dan ekonomi**, seperti harga bahan bakar minyak, biaya investasi, dan umur proyek. Fluktuasi harga BBM, perubahan kebijakan energi, serta perkembangan teknologi energi terbarukan dapat memengaruhi nilai indikator ekonomi seperti NPC dan LCOE.
3. Penelitian ini memfokuskan analisis pada **konfigurasi teknis dan kelayakan ekonomi**, sehingga aspek lain seperti dampak sosial, kesiapan sumber daya manusia, serta tantangan implementasi operasional di lapangan belum dibahas secara mendalam. Faktor-faktor tersebut dapat memengaruhi keberhasilan penerapan sistem hybrid dalam skala nyata.
4. Kajian ini belum memasukkan **analisis sensitivitas yang komprehensif** terhadap seluruh variabel kunci, seperti variasi tingkat penetrasi PLTS, kapasitas baterai, dan perubahan kebijakan subsidi energi. Analisis sensitivitas yang lebih luas berpotensi memberikan gambaran risiko dan ketahanan ekonomi sistem yang lebih mendalam.

SARAN

1. Bagi Pengelola Sistem Ketenagalistrikan
Pengelola sistem kelistrikan di wilayah terpencil disarankan untuk mempertimbangkan penerapan sistem hybrid PLTD–PLTS sebagai alternatif strategis dalam menurunkan biaya operasional dan konsumsi bahan bakar minyak. Implementasi dapat dilakukan secara bertahap dengan penyesuaian kapasitas PLTS dan sistem penyimpanan energi agar tetap menjaga keandalan pasokan listrik.
2. Bagi Pengambil Kebijakan

Pemerintah dan pemangku kepentingan terkait disarankan untuk memberikan dukungan kebijakan yang mendorong pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan terisolasi, khususnya di wilayah 3T. Dukungan tersebut dapat berupa insentif investasi, kemudahan pembiayaan, serta regulasi yang memberikan kepastian dalam pengembangan sistem hybrid PLTD-PLTS.

3. Bagi Manajemen Energi dan Perencanaan Investasi

Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi dalam perencanaan investasi infrastruktur energi, terutama dalam evaluasi kelayakan ekonomi jangka panjang. Parameter seperti NPC, LCOE, dan IRR dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam memilih konfigurasi sistem pembangkit yang paling efisien dan berkelanjutan.

4. Bagi Penelitian Selanjutnya

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas kajian dengan melakukan analisis sensitivitas terhadap perubahan harga bahan bakar, biaya teknologi energi terbarukan, serta variasi kapasitas baterai. Selain itu, kajian lanjutan dapat memasukkan aspek sosial, lingkungan, dan kesiapan operasional untuk memperoleh gambaran implementasi sistem hybrid yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. (2023). Statistik Energi Indonesia. BPS RI.
- Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*. Springer.
- Diaf, S., Notton, G., Belhamel, M., Haddadi, M., & Louche, A. (2007). Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. *Applied Energy*, 85(10), 968–987.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Homer Energy. (2023). HOMER Pro User Manual. HOMER Energy LLC.
- IRENA. (2022). *Renewable Power Generation Costs in 2021*. International Renewable Energy Agency.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN). KESDM RI.
- Lau, K. Y., Yousof, M. F. M., Arshad, S. N. M., Anwari, M., & Yatim, A. H. M. (2010). Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions. *Energy*, 35(8), 3245–3255.

- Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2017). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, 556–565.
- Nema, P., Nema, R. K., & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2096–2103.
- Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., & Poggi, P. (2005). Modelling of a photovoltaic power supply system. *Solar Energy*, 79(3), 286–297.
- PLN (Persero). (2022). Statistik PLN 2021. PT PLN (Persero).
- PLN (Persero). (2023). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030. PT PLN (Persero).
- Rai, G. D. (2013). Non-Conventional Energy Sources (5th ed.). Khanna Publishers.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). (2022). Renewables 2022 Global Status Report. REN21 Secretariat.
- Sen, R., & Bhattacharyya, S. C. (2014). Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. *Renewable Energy*, 62, 388–398.
- Sinha, S., & Chandel, S. S. (2014). Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic–wind based hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 755–769.
- World Bank. (2021). Mini Grids for Half a Billion People: Market Outlook and Handbook for Decision Makers. World Bank Group.