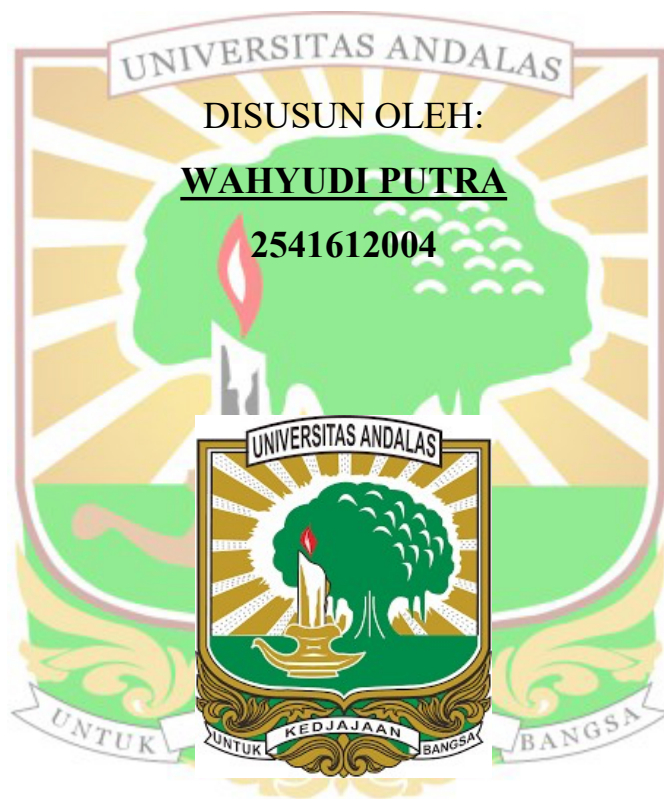


**KAJIAN KELAYAKAN INTEGRASI SISTEM *HYBRID*
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DAN DIESEL
PADA SISTEM KELISTRIKAN PULAU ENGGANO
MENGUNAKAN SIMULASI HOMER**

LAPORAN TEKNIK



**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN PROFESI INSINYUR
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS ANDALAS
2025**

ABSTRAK

KAJIAN KELAYAKAN INTEGRASI SISTEM *HYBRID* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DAN DIESEL PADA SISTEM KELISTRIKAN PULAU ENGGANO MENGGUNAKAN SIMULASI HOMER

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. Kajian 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. Kajian 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.

ABSTRACT

FEASIBILITY ANALYSIS OF INTEGRATING A HYBRID SOLAR– DIESEL POWER GENERATION SYSTEM INTO THE ENGGANO ISLAND ELECTRICAL NETWORK USING HOMER SIMULATION

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.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PERSETUJUAN PEMBIMBING	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS LAPORAN TEKNIK	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 LATAR BELAKANG	1
I.2 RUMUSAN MASALAH	3
I.3 TUJUAN Kajian	3
I.4 BATASAN MASALAH	4
I.5 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1 LANDASAN TEORI	6
II.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel	6
II.1.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya	19
II.1.3 Integrasi Energi Surya dengan Pembangkit Diesel	32
II.1.4 Aplikasi HOMER (<i>Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources</i>)	33
BAB III METODE PENELITIAN	37
III.1 TEMPAT DAN WAKTU PENELITIAN	37
III.2 DESAIN PENELITIAN	37
III.3 FLOW CHART Kajian	44
III.4 METODE PENGUMPULAN DATA	45
III.5 DESAIN UMUM, SPESIFIKASI DAN BIAYA KOMPONEN	47
III.6 METODE ANALISIS DATA	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	50
IV.1 PROFIL PEMBEBANAN KELISTRIKAN KEPULAUAN ENGGANO	50
IV.2 ANALISIS POTENSI ENERGI SURYA DI PULAU ENGGANO	52
IV.3 SKENARIO KONFIGURASI SISTEM <i>HYBRID</i>	54
IV.4 PEMBAHASAN DAMPAK TEKNIS DAN EKONOMI	55
IV.5 ANALISIS HASIL PRODUKSI SISTEM <i>HYBRID</i>	58
IV.6 ANALISIS KONSUMSI BAHAN BAKAR SISTEM <i>HYBRID</i>	60
IV.7 ANALISIS PENETRASI ENERGI TERBARUKAN SISTEM <i>HYBRID</i>	61
IV.8 ANALISIS EMISIS GAS BUANG SISTEM <i>HYBRID</i>	62

IV.9 IMPLIKASI TERHADAP KEBIJAKAN ENERGI TERBARUKAN	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	65
V.1 KESIMPULAN	65
V.2 SARAN	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	69



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Kelebihan dan kekurangan jenis-jenis sel surya	28
Tabel 2	Data mesin diesel PLTD Enggano	40
Tabel 3	<i>Neraca Daya Sistem kelistrikan Enggano</i>	41
Tabel 4	Data Pelanggan PLN di Kepulauan Enggano Maret 2025	41
Tabel 5	<i>Daftar HOP PLTD Isolated Bengkulu</i>	42
Tabel 6	Monitoring Pembebanan PLTD Enggano	43
Tabel 7	Spesifikasi dan Biaya Komponen	48
Tabel 8	Profil beban PLTD Enggano	51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Letak geografis kepulauan Enggano	2
Gambar 2	Diagram sistem PLTD lengkap dengan label dan alur energi	7
Gambar 3	Diagram sistem PLTD lengkap dengan label dan alur energi	10
Gambar 4	Diagram Skematik Genset Diesel Alternator dan Panel Kontrol	10
Gambar 5	Turbocharger untuk menaikkan tekanan dan temperatur	12
Gambar 6	Ruang Bakar (Combustion Chamber)	12
Gambar 7	Torak atau piston	13
Gambar 8	Poros engkol mesin diesel	14
Gambar 9	Global Horizontal irradiation rata rata di Indonesia	22
Gambar 10	Junction semi konduktor tipe-p dan tipe-n	24
Gambar 11	Pergerakan Elektron dari Semikonduktor tipe- p menuju semionduktor tipe-n	25
Gambar 12	Prinsip Kerja Pembangkit listrik tenaga surya	26
Gambar 13	(a) Kristal Tunggal (b) Policristalin (c) Silicon Amorf (Panelsurya.com)	27
Gambar 14	Struktur cell surya jenis silicon	28
Gambar 15	Tampilan Aplikasi Homer Pro	34
Gambar 16	Flow Chart Kajian	44
Gambar 17	Profil Harian PLTD Enggano	50
Gambar 18	Data Intensitas Radiasi Matahari dari HOMER	52
Gambar 19	Data Temperatur Harian dari HOMER	53
Gambar 20	Skenario masing masing konfigurasi	55
Gambar 21	Hasil Simulasi Sistem	56
Gambar 22	Hasil Perbandingan Ekonomi	57
Gambar 23	Hasil produksi energi sistem Hybrid	59
Gambar 24	Hasil Konsumsi Bahan Bakar	60
Gambar 25	Hasil Penetrasi Energi Terbarukan	61
Gambar 26	Skenario Emisi Karbon	63



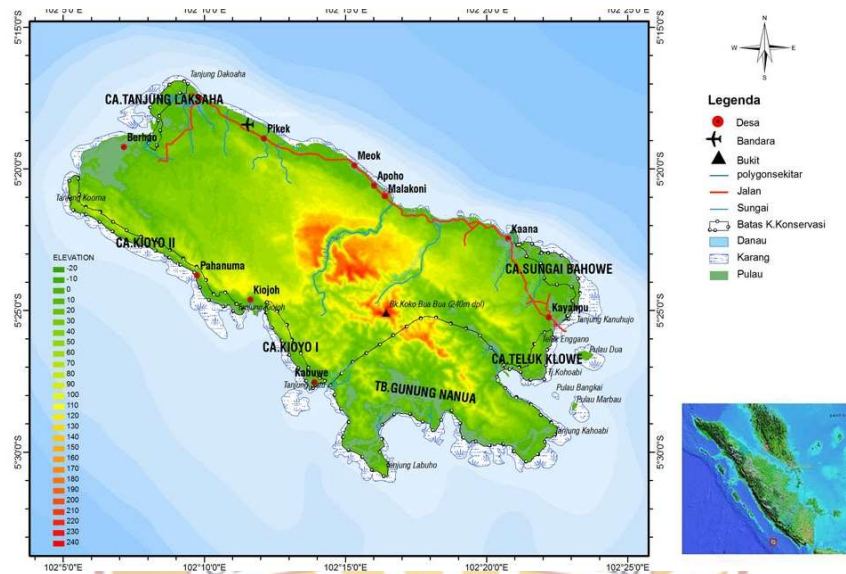
BAB I

PENDAHULUAN

I.1 LATAR BELAKANG

PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Bengkulu mengelola dua pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) yang tersebar di wilayahnya, yaitu PLTD Kota Bani dan PLTD Enggano. Khusus PLTD Enggano, terdapat tiga unit mesin diesel yang masing-masing memiliki kapasitas daya antara 200 hingga 400 kW. Ketiga unit tersebut merupakan aset milik PLN dan dioperasikan secara bergiliran untuk memasok kebutuhan listrik masyarakat di Pulau Enggano. Beban puncak di wilayah ini tercatat dapat mencapai 220 hingga 250 kW. Namun, lokasi geografis PLTD Enggano yang berada di kepulauan terluar Indonesia menghadirkan tantangan tersendiri, seperti curah hujan tinggi, kadar garam udara yang ekstrem, dan kondisi alam yang keras. Lingkungan ini mempercepat degradasi baik pada bagian mekanis maupun elektrik dari mesin pembangkit.

Secara geografis, Pulau Enggano terletak di Samudera Hindia, tepatnya pada koordinat 05°31'13" Lintang Selatan dan 102°16'00" Bujur Timur. Dalam lingkup administrasi pemerintahan, pulau ini masuk dalam wilayah Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu. Enggano merupakan salah satu kecamatan yang terdiri dari enam desa, yakni Apoho, Meok, Malakoni, Kaana, Kahyapu, dan Banjarsari. Luas wilayah daratannya mencapai kurang lebih 400,6 km². Di sekitar pulau utama juga terdapat gugusan pulau kecil seperti Pulau Dua, Merbau, Bangkai (di sebelah barat), serta Pulau Satu (di sebelah selatan). Jarak terdekat Pulau Enggano ke daratan utama adalah ke Kota Manna, sekitar 96 km atau 60 mil laut, sementara jarak ke ibukota provinsi, Kota Bengkulu, sekitar 156 km atau 90 mil laut.



Gambar 1 Letak geografis kepulauan Enggano

Saat ini, sistem kelistrikan di Pulau Enggano masih sangat bergantung pada pasokan dari PLTD. Meskipun dapat menyediakan energi listrik sesuai kebutuhan, penggunaan PLTD juga berarti ketergantungan tinggi pada bahan bakar fosil yang tidak hanya mahal, tetapi juga memiliki dampak lingkungan yang signifikan. Oleh karena itu, ada kebutuhan mendesak untuk mempertimbangkan sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Salah satu solusi yang banyak dipertimbangkan adalah integrasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan sistem PLTD. Pendekatan ini dinilai efektif dalam meningkatkan efisiensi dan menurunkan emisi karbon, sekaligus mengurangi konsumsi bahan bakar fosil. Beberapa Kajian telah menunjukkan bahwa sistem *hybrid* seperti ini mampu memberikan pasokan listrik yang lebih andal dan ekonomis untuk daerah terpencil (Adebayo & Olasunkanmi, 2021). Dalam proses perancangannya, pemanfaatan perangkat lunak seperti HOMER (*Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources*) menjadi sangat penting. HOMER memungkinkan simulasi sistem *hybrid* secara komprehensif, mempertimbangkan faktor biaya, ketersediaan energi terbarukan, dan performa teknis dari seluruh sistem yang dirancang.

I.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang tersebut, terdapat beberapa pertanyaan penting yang menjadi fokus dalam Kajian ini, yaitu:

1. Bagaimana pendekatan teknis dan ekonomis yang dapat diterapkan dalam mengintegrasikan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) ke dalam sistem eksisting PLTD di Pulau Enggano, dengan bantuan simulasi perangkat lunak HOMER?
2. Konfigurasi seperti apa yang paling optimal dalam sistem *hybrid* PLTS–PLTD untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat di Kepulauan Enggano secara efisien, berkelanjutan, dan dengan biaya operasional yang minimal?
3. Sejauh mana penggunaan PLTS dalam sistem *hybrid* dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan menekan dampak negatif terhadap lingkungan?

I.3 TUJUAN KAJIAN

Kajian ini memiliki beberapa tujuan utama yang ingin dicapai, antara lain:

1. Mengidentifikasi karakteristik dan tren pertumbuhan beban listrik Pulau Enggano sebagai dasar perencanaan sistem kelistrikan jangka panjang.
2. Mengevaluasi potensi teknis energi surya di Pulau Enggano melalui data iklim berbasis satelit dan pemodelan simulatif.
3. Merancang sistem pembangkit listrik *hybrid* PLTS–PLTD yang optimal dari sisi teknis dan ekonomi menggunakan software HOMER Pro.
4. Melakukan analisis komparatif antara sistem PLTD-only dan sistem *hybrid* PLTS–PLTD untuk mengukur efisiensi biaya, konsumsi BBM, emisi karbon, dan kelayakan investasi.
5. Memberikan rekomendasi strategis bagi pengembangan sistem energi bersih di wilayah kepulauan terpencil berdasarkan hasil simulasi.

1.4 BATASAN MASALAH

Kajian ini difokuskan pada perancangan dan evaluasi sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang diintegrasikan dengan sistem pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) menggunakan perangkat lunak HOMER sebagai alat bantu analisis dan simulasi. Beberapa batasan ruang lingkup dalam Kajian ini adalah sebagai berikut:

1. Kajian hanya mencakup sistem *hybrid* yang terdiri dari PLTS dan PLTD, tanpa melibatkan jenis sumber energi terbarukan lainnya seperti turbin angin atau mikrohidro.
2. Penekanan utama terletak pada analisis teknis, ekonomi, dan lingkungan dari sistem *hybrid* yang dirancang.
3. Kajian dilakukan secara simulatif berdasarkan data operasional aktual dari PLTD Enggano dan potensi iradiasi surya setempat.
4. Parameter simulasi yang digunakan meliputi kapasitas pembangkit, efisiensi komponen, biaya bahan bakar, data beban listrik harian, serta data radiasi matahari yang diperoleh dari sumber terpercaya.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Berikut adalah sistematika pembahasan dalam setiap bab pada Laporan Teknik ini.

1.5.1 Bab I

Pendahuluan berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan Laporan Teknik, manfaat Laporan Teknik dan sistematika penulisan

1.5.2 Bab II

Bab ini berisi tinjauan pustaka, dasar teori dan analisis perbandingan metode.

1.5.3 Bab III

Bab ini menjelaskan tentang metode Laporan Teknik dan langkah-langkah yang dilakukan dalam pembuatan Laporan Teknik

1.5.4 Bab IV

Bab ini menjelaskan tentang hasil dan pembahasan dari Laporan Teknik ini serta membahas analisa hasil

1.5.5 Bab V

Bab ini menjelaskan tentang kesimpulan dan saran yang dapat diambil dari pembuatan Laporan Teknik



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

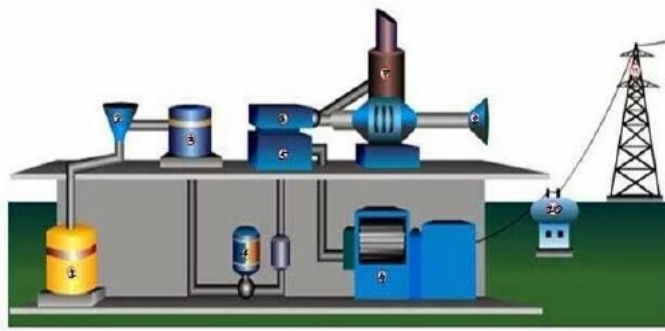
II.1 LANDASAN TEORI

Dalam menghadapi tantangan penyediaan pasokan listrik di daerah terpencil atau wilayah yang memiliki infrastruktur kelistrikan terbatas, integrasi energi terbarukan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), dengan pembangkit listrik konvensional, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), menjadi solusi yang semakin populer. Dengan menggabungkan kedua jenis pembangkit ini, kita dapat meningkatkan keberlanjutan sistem kelistrikan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Kajian ini fokus pada konsep dasar mengenai integrasi energi terbarukan (PLTS) dengan pembangkit diesel (PLTD), serta bagaimana aplikasi perangkat lunak HOMER digunakan untuk analisis dan perencanaan sistem *hybrid*. [8]

II.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah sistem pembangkit yang mengubah energi kimia dari bahan bakar minyak menjadi energi mekanik melalui pembakaran di mesin diesel, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik oleh generator sinkron. PLTD umumnya digunakan di daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik utama, karena instalasinya mudah dan biaya awalnya lebih rendah dibandingkan sistem pembangkit besar. [7]

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan mesin diesel sebagai penggerak utamanya (*prime mover*), yang menggunakan bahan bakar jenis *High Speed Diesel Oil (HSDO)*. Fungsi utama dari *prime mover* ini adalah menghasilkan energi mekanik yang diperlukan untuk memutar rotor pada generator listrik.



Gambar 2 Diagram sistem PLTD lengkap dengan label dan alur energi

II.1.1.1 Komponen Utama Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Sistem PLTD terdiri dari sejumlah komponen penting yang saling terintegrasi, bekerja secara simultan untuk mendukung proses pembangkitan listrik secara andal dan berkelanjutan. Setiap komponen memiliki peran khusus dalam rantai konversi energi dari bahan bakar menjadi energi listrik. Tanpa integrasi sistem yang baik, efisiensi dan keandalan PLTD akan menurun secara signifikan.

1. Mesin diesel

Mesin diesel merupakan inti dari sistem PLTD. Komponen ini berfungsi sebagai penggerak mula (*prime mover*) yang mengubah energi kimia dari bahan bakar minyak menjadi energi mekanik melalui proses pembakaran internal. Saat bahan bakar disuntikkan ke ruang silinder bertekanan tinggi, terjadi pembakaran spontan yang menghasilkan ekspansi gas. Gas ini mendorong piston yang terhubung dengan poros engkol, menciptakan gerakan rotasi yang dibutuhkan untuk memutar generator. [6]

Mesin diesel pada PLTD biasanya berjenis *compression ignition engine*, dan dirancang untuk mampu beroperasi dalam jangka waktu lama dengan efisiensi bahan bakar yang relatif tinggi. Ukuran dan daya mesin diesel bervariasi tergantung pada kapasitas output listrik yang diinginkan.

2. Generator sinkron

Generator sinkron berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh mesin diesel menjadi energi listrik. Proses ini terjadi melalui induksi elektromagnetik, di mana putaran rotor yang terhubung ke mesin diesel akan menghasilkan medan magnet di dalam stator. Medan magnet yang berputar inilah yang kemudian menginduksi tegangan listrik dalam lilitan stator.[7]

Generator jenis sinkron dipilih karena mampu menghasilkan tegangan dan frekuensi yang stabil, yang sangat penting untuk keandalan sistem kelistrikan, terutama jika PLTD digunakan sebagai sumber daya utama atau sebagai cadangan untuk jaringan utama.

3. Sistem bahan bakar

Sistem bahan bakar dalam PLTD meliputi beberapa komponen: tangki penyimpanan bahan bakar, pompa bahan bakar, filter, dan pipa distribusi ke ruang pembakaran mesin. Solar (*High Speed Diesel Oil*) yang digunakan sebagai bahan bakar utama harus dalam kondisi bersih dari kotoran dan air agar tidak merusak *injector* dan ruang bakar mesin.[7]

Pompa bahan bakar bekerja untuk mengatur tekanan dan aliran bahan bakar ke *injector*, sementara filter bertugas menyaring partikel kotoran. Keandalan sistem ini sangat penting karena gangguan pada aliran bahan bakar dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna atau bahkan kerusakan mesin.

4. Sistem pendingin

Mesin diesel menghasilkan panas tinggi selama proses pembakaran. Untuk menjaga suhu kerja mesin tetap pada level optimal dan mencegah *overheating*, sistem pendingin digunakan. Sistem ini biasanya terdiri dari radiator, pompa air, kipas pendingin, dan jalur sirkulasi cairan pendingin.[8]

Air atau cairan radiator bersirkulasi melewati blok mesin dan membawa panas dari dinding silinder ke radiator, di mana panas tersebut dibuang ke udara

melalui proses konveksi. Tanpa sistem pendingin yang baik, mesin bisa mengalami keausan dini atau bahkan kerusakan permanen akibat overheating.

5. Sistem pelumasan

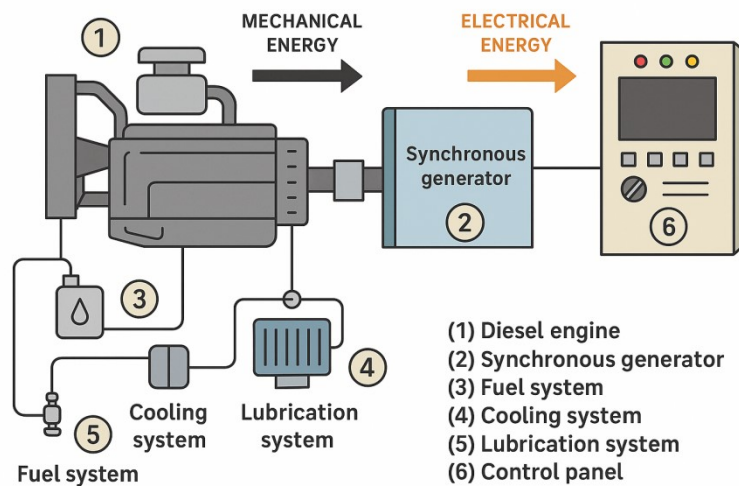
Sistem pelumasan berfungsi untuk melumasi bagian-bagian mesin yang bergerak, seperti piston, poros engkol, dan nok. Oli mesin digunakan untuk mengurangi gesekan antar komponen logam serta mencegah keausan dan overheating akibat gesekan.[9]

Sistem ini dilengkapi dengan pompa oli, filter, dan tangki penyimpanan oli. Kualitas dan tekanan oli yang tepat sangat penting untuk menjaga performa dan umur mesin diesel. Oleh karena itu, pemeriksaan rutin terhadap kondisi pelumasan merupakan bagian dari prosedur operasi standar (SOP) pemeliharaan PLTD.

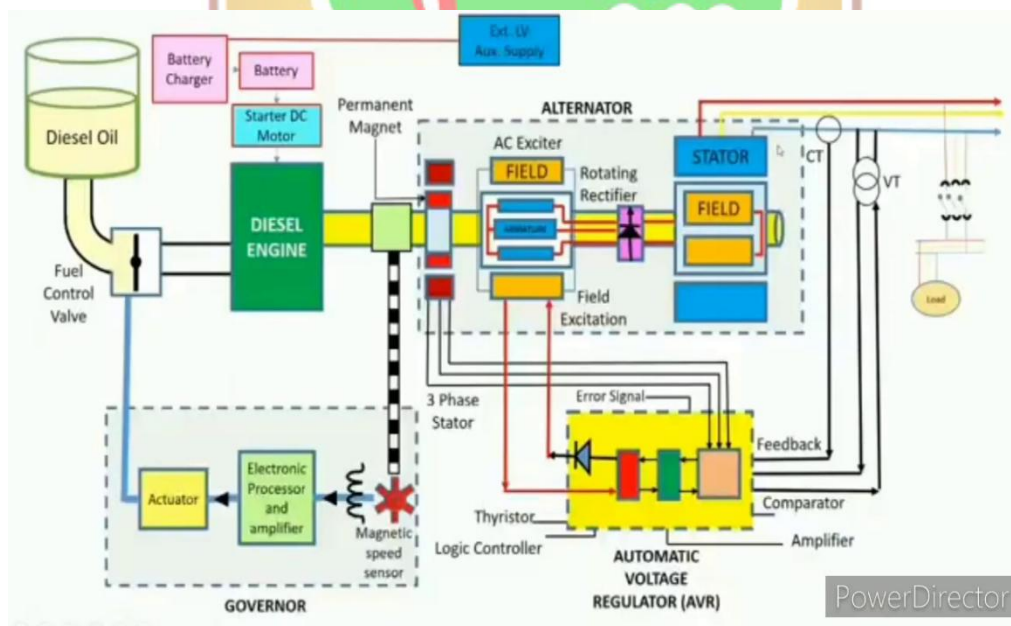
6. Panel kontrol

Panel kontrol adalah pusat kendali operasional sistem PLTD. Panel ini mencakup peralatan untuk menyalakan dan mematikan mesin, mengatur kecepatan putaran, memantau parameter seperti tegangan, arus, frekuensi, suhu, dan tekanan, serta menyediakan proteksi otomatis terhadap gangguan.[10]

Fitur proteksi yang umum meliputi trip otomatis saat terjadi overcurrent, *overvoltage*, suhu berlebih, atau tekanan oli rendah. Panel kontrol modern juga sudah terintegrasi dengan sistem SCADA atau remote monitoring untuk memudahkan pengawasan dari jarak jauh.



Gambar 3 Diagram sistem PLTD lengkap dengan label dan alur energi



Gambar 4 Diagram Skematik Genset Diesel Alternator dan Panel Kontrol

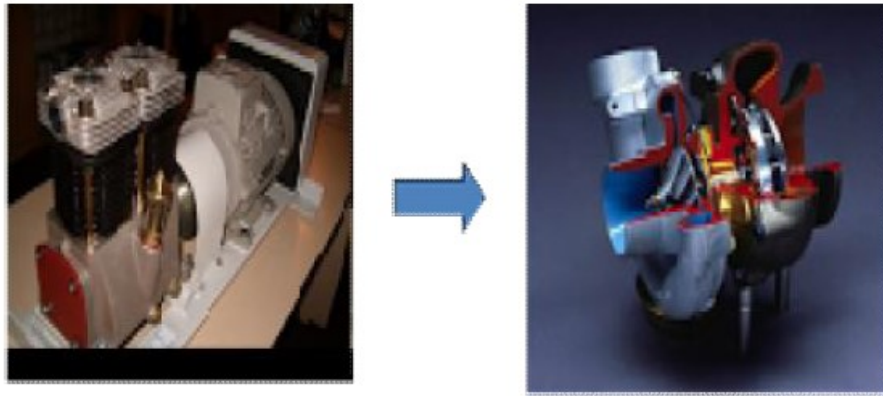
<https://vitalpower.co.uk/diesel-generators/parts/diagrams/>

II.1.1.2 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) bekerja berdasarkan proses pembakaran bahan bakar di dalam mesin diesel yang kemudian mengubah energi kimia menjadi energi mekanik dan selanjutnya menjadi energi listrik. Meskipun terlihat kompleks, prinsip kerjanya secara umum cukup sistematis dan terstruktur. Tahapan dimulai dari penyimpanan bahan bakar. Bahan bakar, baik berupa bahan bakar minyak (BBM) maupun bahan bakar gas (BBG), disimpan terlebih dahulu di tangki utama. Dari tangki ini, bahan bakar akan dipompa menuju tangki harian (*daily tank*) melalui proses penyaringan untuk memastikan tidak ada kotoran atau partikel yang dapat merusak sistem injeksi mesin. Tangki harian berfungsi sebagai buffer untuk memasok bahan bakar secara kontinu ke mesin. Jika jenis bahan bakar yang digunakan adalah BBM, seperti solar, maka dari tangki harian bahan bakar akan dialirkan menuju *nozzle* atau pengabut. Di bagian ini, bahan bakar dipanaskan dan dikabutkan sehingga mudah bercampur dengan udara di dalam ruang bakar. Proses pengabutan ini sangat penting karena akan mempengaruhi efisiensi dan kesempurnaan pembakaran. Namun, jika bahan bakar yang digunakan adalah BBG (bahan bakar gas) seperti CNG atau LNG, maka alirannya diarahkan menuju *conversion kit*, yaitu perangkat pengatur tekanan gas. Di sini tekanan gas diatur agar sesuai dengan kebutuhan mesin dan dapat disuplai secara stabil ke ruang pembakaran. Sementara itu, sistem pembakaran dalam mesin diesel juga membutuhkan pasokan udara bertekanan tinggi. Untuk itu, udara bersih dari luar dihisap menggunakan kompresor dan dialirkan ke dalam tangki udara start melalui saluran masuk (*intake manifold*). Udara kemudian diarahkan ke *turbocharger*, yaitu alat yang berfungsi meningkatkan tekanan dan temperatur udara. Proses ini bertujuan agar udara yang masuk ke ruang bakar memiliki densitas tinggi, sehingga mendukung pembakaran yang lebih sempurna dan efisien.[11]

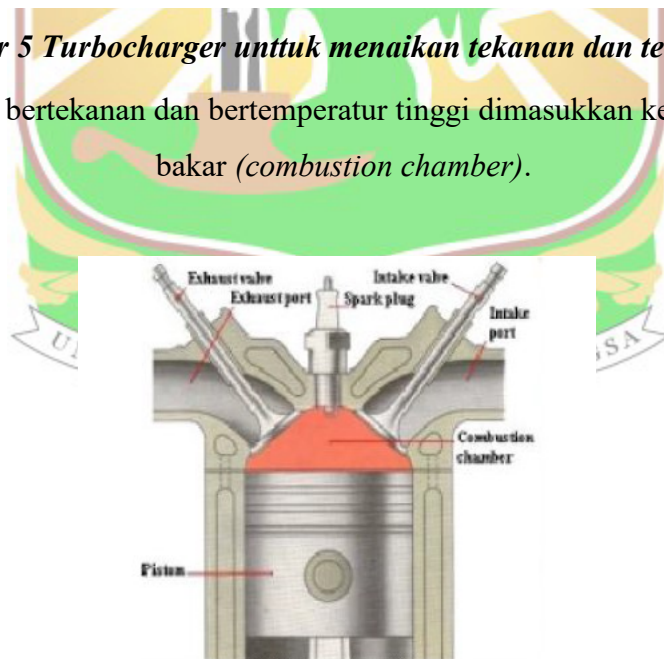
Udara yang masuk ke dalam ruang bakar biasanya memiliki tekanan hingga 500 psi (*pound per square inch*) dan temperatur mencapai sekitar 600°C. Dalam kondisi ini, udara berada dalam keadaan sangat terkompresi, memungkinkan pembakaran spontan ketika bahan bakar diinjeksikan tanpa

memerlukan busi atau pemantik api. Setelah proses pembakaran berlangsung di dalam silinder, energi panas yang dihasilkan akan mendorong piston bergerak. Gerakan piston ini diubah menjadi energi putar pada poros engkol (*crankshaft*), yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator sinkron guna menghasilkan energi listrik yang dapat disalurkan ke jaringan distribusi.



Gambar 5 Turbocharger untuk menaikkan tekanan dan temperatur

Udara yang bertekanan dan bertemperatur tinggi dimasukkan ke dalam ruang bakar (*combustion chamber*).



Gambar 6 Ruang Bakar (Combustion Chamber)

Setelah melalui proses awal seperti pengabutan (untuk bahan bakar minyak) atau pengaturan tekanan (untuk bahan bakar gas), bahan bakar dari *nozzle* (jika menggunakan BBM) atau dari conversion kit (jika menggunakan

BBG) akan diinjeksikan langsung ke dalam ruang bakar (*combustion chamber*) di dalam silinder mesin. Mesin diesel memiliki karakteristik yang khas, yaitu tidak menggunakan busi atau alat pemantik api seperti pada mesin bensin. Proses pembakaran di dalam mesin diesel berlangsung secara otomatis (*autoignition*). Hal ini dimungkinkan karena udara yang masuk ke dalam silinder telah dikompresi terlebih dahulu pada tekanan tinggi, yaitu sekitar 35 hingga 50 atmosfer (atm). Proses kompresi ini menyebabkan suhu udara dalam silinder meningkat secara drastis, bahkan bisa mencapai lebih dari 600°C.[11]

Ketika udara berada pada suhu dan tekanan tinggi ini, bahan bakar yang disemprotkan ke dalam silinder langsung menyala secara spontan, tanpa perlu percikan api eksternal. Pembakaran ini menghasilkan ledakan yang kuat dan terkontrol, mendorong piston bergerak ke bawah. Gerakan ini mengubah energi hasil pembakaran menjadi energi mekanik, yang kemudian digunakan untuk memutar poros engkol dan menghasilkan tenaga putar yang diperlukan oleh generator.



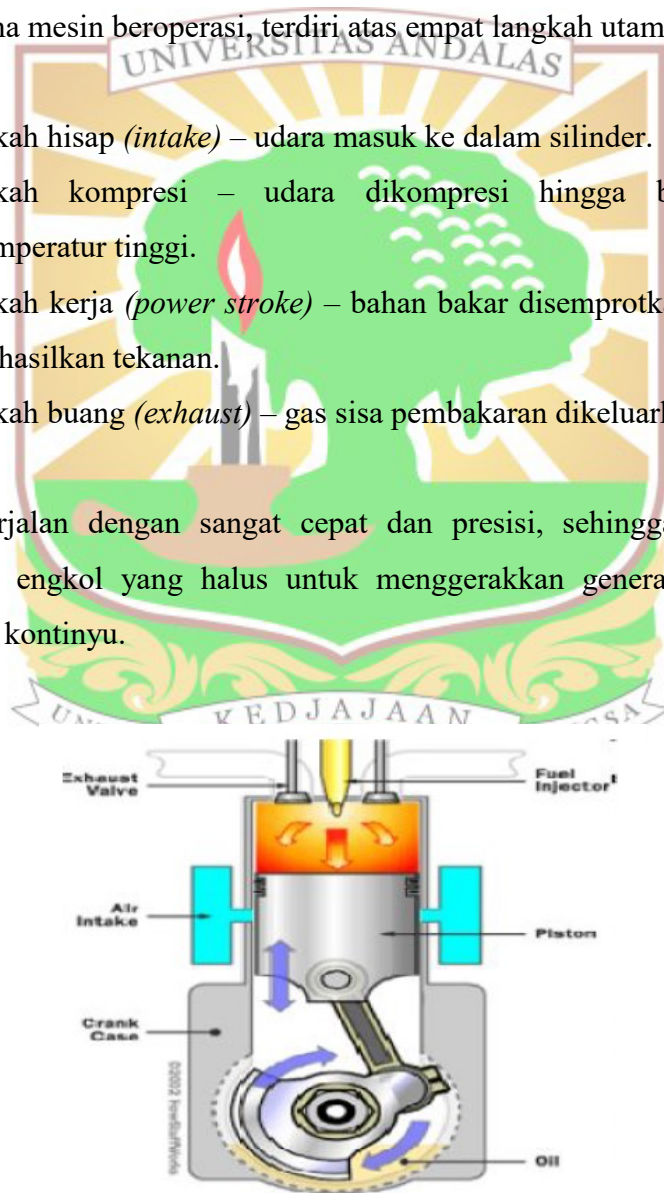
Gambar 7 Torak atau piston

Ledakan hasil pembakaran campuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar menghasilkan tekanan gas yang sangat tinggi. Tekanan ini memberikan dorongan kuat pada torak (piston) yang berada di dalam silinder. Torak ini terhubung ke poros engkol (crankshaft) melalui komponen penghubung yang disebut batang torak (*connecting rod*). Dorongan dari ledakan tersebut

menyebabkan torak bergerak dalam gerak bolak-balik (*reciprocating motion*). Gerak linier ini kemudian diteruskan ke batang torak, yang selanjutnya mengubah gerakan tersebut menjadi gerak rotasi melalui poros engkol. Gerakan rotasi inilah yang menjadi bentuk dasar dari energi mekanik yang digunakan untuk memutar poros utama generator. Selain menghasilkan tenaga pada saat pembakaran (langkah ekspansi), torak juga akan melakukan langkah kompresi pada siklus berikutnya. Dalam langkah ini, torak bergerak ke arah atas silinder untuk mengompresi udara, menaikkan tekanan dan suhu di dalam ruang bakar sebelum injeksi bahan bakar berikutnya dilakukan. Proses ini berulang secara terus-menerus selama mesin beroperasi, terdiri atas empat langkah utama:

1. Langkah hisap (*intake*) – udara masuk ke dalam silinder.
2. Langkah kompresi – udara dikompresi hingga bertekanan dan bertemperatur tinggi.
3. Langkah kerja (*power stroke*) – bahan bakar disemprotkan dan terbakar, menghasilkan tekanan.
4. Langkah buang (*exhaust*) – gas sisa pembakaran dikeluarkan dari silinder.

Siklus ini berjalan dengan sangat cepat dan presisi, sehingga menghasilkan putaran poros engkol yang halus untuk menggerakkan generator atau sistem lainnya secara kontinyu.



Gambar 8 Poros engkol mesin diesel

Setelah energi mekanik dihasilkan oleh poros engkol mesin diesel melalui gerakan rotasi yang berkelanjutan, energi ini kemudian diteruskan ke poros rotor generator. Di dalam generator, energi mekanik tersebut akan dikonversi menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Proses ini bekerja berdasarkan Hukum Faraday, yang menyatakan bahwa: "Jika suatu konduktor (penghantar) berada dalam medan magnet yang berubah-ubah, atau memotong garis-garis gaya magnet, maka pada konduktor tersebut akan timbul gaya gerak listrik (ggl)."

Dalam hal ini, rotor yang berputar menghasilkan perubahan medan magnet terhadap stator yang bersifat diam. Perubahan medan magnet tersebut akan menginduksi arus listrik dalam kumparan stator. Arus inilah yang kemudian menjadi energi listrik yang digunakan oleh sistem atau dikirim ke pengguna. Namun, tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator biasanya masih berada pada tingkat tegangan menengah atau rendah, dan belum cukup untuk disalurkan secara efisien dalam jarak jauh. Oleh karena itu, sistem PLTD dilengkapi dengan trafo *step-up*, yang bertugas menaikkan tegangan listrik dari generator ke level tegangan yang lebih tinggi agar transmisi energi listrik menjadi lebih efisien.

Dalam transformator, arus bolak-balik (AC) dialirkan ke kumparan primer. Arus AC ini akan menimbulkan medan magnet yang berubah-ubah di sekitar inti besi transformator. Karena kumparan sekunder dililit pada inti besi yang sama, maka garis-garis gaya magnet dari kumparan primer juga melintasi kumparan sekunder. Perubahan medan magnet ini menyebabkan induksi elektromagnetik pada kumparan sekunder, sehingga dihasilkan tegangan listrik di sisi keluarannya. Jika jumlah lilitan di kumparan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, maka tegangan akan naik (*step-up*). Sebaliknya, jika lilitannya lebih sedikit, tegangan akan turun (*step-down*).

Energi listrik yang telah ditingkatkan tegangannya disalurkan melalui saluran transmisi menuju beban atau pusat konsumsi. Saat akan digunakan di sisi konsumen, tegangan listrik tersebut diturunkan kembali menggunakan trafo *step-down*, sehingga aman dan sesuai untuk peralatan listrik rumah tangga atau industri.

Dengan demikian, seluruh proses konversi energi di PLTD—dari pembakaran bahan bakar, perputaran rotor, hingga pengiriman energi listrik ke beban—merupakan rangkaian sistem yang saling terintegrasi dan didasarkan pada hukum-hukum dasar elektromagnetisme.

Efisiensi PLTD sangat bergantung pada konsumsi bahan bakarnya. Ini dikarenakan sekitar 70% dari total biaya operasional PLTD berasal dari biaya bahan bakar. Tingginya biaya bahan bakar ini menyebabkan efisiensi PLTD cenderung rendah, biasanya kurang dari 50%. Jika dibandingkan dengan mesin bensin, gas buang mesin diesel relatif lebih sedikit mengandung zat beracun yang mencemari lingkungan. Selain itu, konsumsi bahan bakar mesin diesel sekitar 25% lebih rendah dibandingkan mesin bensin, dan harganya pun cenderung lebih murah. Oleh karena itu, mesin diesel umumnya lebih hemat dan ekonomis sebagai penggerak mesin industri dibandingkan mesin bensin. Namun dari sisi investasi awal, harga mesin diesel lebih mahal dibandingkan mesin bensin. Hal ini dikarenakan mesin diesel dengan kapasitas yang sama membutuhkan konstruksi yang lebih kuat dan bobot yang lebih berat.

Dalam membangun PLTD, beberapa faktor penting perlu diperhatikan dalam pemilihan lokasi pembangkit, antara lain:

1. Jarak yang dekat ke pusat beban atau pengguna listrik.
2. Ketersediaan lahan yang cukup luas serta akses ke sumber air.
3. Kondisi tanah yang cocok untuk pondasi mesin yang kuat.
4. Akses transportasi untuk distribusi bahan bakar.
5. Pengendalian tingkat kebisingan yang dihasilkan mesin diesel.

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah salah satu pembangkit listrik yang sangat fleksibel dan sering digunakan dalam berbagai situasi. Secara umum, ada empat fungsi utama dari PLTD, yaitu sebagai berikut:

1. Sebagai Pusat Pembangkit (*Main Plant*)

PLTD dapat berfungsi sebagai sumber utama listrik, terutama di daerah-daerah terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik utama. Dalam kondisi ini, PLTD menjadi pemasok tunggal energi listrik yang digunakan untuk

memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, industri kecil, atau fasilitas penting lainnya. Keuntungan PLTD sebagai pusat pembangkit adalah kemampuannya yang andal dalam menyediakan listrik, instalasinya yang relatif cepat, dan tidak tergantung pada kondisi geografis yang kompleks.

2. Sebagai Cadangan (*Standby Plant*)

PLTD juga sering dipasang sebagai cadangan listrik yang berfungsi mendukung pembangkit listrik utama. Dalam situasi ini, PLTD tidak beroperasi secara terus-menerus, tetapi siap digunakan sewaktu-waktu bila terjadi gangguan atau pemeliharaan pada pembangkit utama. Fungsi cadangan ini penting untuk menjaga kestabilan sistem kelistrikan, memastikan bahwa pasokan listrik tetap tersedia tanpa gangguan signifikan ketika terjadi masalah pada pembangkit utama.

3. Beban Puncak (*Peak Load*)

Dalam sistem kelistrikan, seringkali terjadi lonjakan permintaan listrik pada waktu-waktu tertentu (misalnya sore hingga malam hari). Dalam kondisi seperti ini, PLTD berfungsi sebagai pembangkit tambahan yang diaktifkan hanya pada saat permintaan listrik mencapai puncaknya. Menggunakan PLTD sebagai pembangkit beban puncak dapat membantu mengelola sistem kelistrikan dengan efisien dan fleksibel, karena PLTD dapat dinyalakan dengan cepat dan mudah disesuaikan kapasitasnya sesuai kebutuhan.

4. Cadangan Keadaan Darurat (*Emergency Backup*)

PLTD juga memiliki peran penting sebagai sumber listrik darurat dalam situasi kritis, seperti bencana alam, pemadaman besar-besaran, atau kondisi darurat lainnya. Dalam keadaan tersebut, PLTD memastikan pasokan listrik untuk fasilitas penting seperti rumah sakit, pusat komunikasi, instalasi militer, dan layanan publik esensial lainnya tetap terjaga. Keunggulan PLTD dalam kondisi darurat adalah kemampuannya yang cepat dinyalakan, mobilitas tinggi, dan tidak bergantung pada infrastruktur listrik utama.

II.1.1.3 Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Efisiensi merupakan salah satu parameter paling penting dalam menilai kinerja pembangkit listrik, termasuk PLTD. Pada umumnya, efisiensi termal PLTD berada di kisaran 30–45%, tergantung pada sejumlah faktor seperti kualitas bahan bakar, desain mesin, sistem pendingin, dan kondisi operasional harian pembangkit.[12]

Angka ini berarti bahwa dari total energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar, hanya sekitar 30–45% yang berhasil diubah menjadi energi listrik. Sisanya hilang dalam bentuk panas, gesekan mekanis, dan emisi gas buang. Meskipun efisiensinya lebih rendah dibandingkan pembangkit berbahan bakar gas atau sistem gabungan (*combined cycle*), PLTD tetap banyak digunakan karena keandalannya, kemudahan pengoperasian, dan respons cepat terhadap perubahan beban.

Persamaan efisiensi termal PLTD adalah:

$$\eta = (P_{out}/P_{in}) \times 100\%$$

Keterangan :

η = Efisiensi termal (%)

P_{out} = Daya keluaran listrik dari generator (kW)

P_{in} = Energi masukan dari bahan bakar (kW), dihitung dari konsumsi bahan bakar dan nilai kalor bahan bakar

$$P_{in} = \frac{Q \times LHV}{3600}$$

Keterangan :

Q = Konsumsi bahan bakar (liter/jam atau kg/jam)

LHV = Nilai kalor bawah dari bahan bakar (kJ/kg atau kJ/liter)

3600 = Konversi dari detik ke jam untuk menyesuaikan satuan energi ke kW

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi PLTD :

Beberapa hal yang memengaruhi besar kecilnya efisiensi PLTD antara lain:

1. Jenis bahan bakar: Solar dengan kandungan sulfur tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak residu dan emisi, yang mengganggu pembakaran optimal.
2. Pemeliharaan mesin: Mesin yang tidak dirawat akan mengalami penurunan kompresi dan pembakaran tidak sempurna.
3. Sistem pendingin dan pelumas: Kinerja sistem pendukung ini sangat menentukan stabilitas temperatur dan gesekan komponen, yang berpengaruh langsung pada efisiensi.
4. Beban operasional: PLTD paling efisien bila beroperasi pada 70–90% kapasitas maksimumnya. Operasi terlalu rendah menyebabkan fuel consumption per kWh meningkat.

II.1.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Sinar matahari, secara umum, merupakan gabungan dari seluruh spektrum radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh Matahari. Spektrum ini mencakup cahaya tampak, sinar ultraviolet (UV), serta inframerah (IR), dan memainkan peran penting dalam mendukung kehidupan di Bumi serta berbagai proses teknis, seperti pembangkitan listrik tenaga surya. Ketika sinar matahari mencapai permukaan Bumi, intensitas dan komposisinya akan dipengaruhi oleh atmosfer, yang berfungsi sebagai penyaring alami. Atmosfer menyerap dan menyebarkan sebagian dari radiasi matahari, terutama gelombang UV dan IR, sehingga hanya sebagian energi yang mencapai permukaan bumi dalam bentuk radiasi langsung dan difus. Fenomena terlihatnya sinar matahari secara kasat mata biasanya terjadi pada siang hari, ketika Matahari berada di atas cakrawala dan tidak terhalangi oleh awan atau penghalang lainnya.[12]

Lama paparan sinar matahari sangat dipengaruhi oleh posisi geografis dan musim. Misalnya, pada musim panas di wilayah lintang tinggi (dekat kutub), Matahari dapat terlihat sepanjang hari selama 24 jam, dikenal sebagai fenomena midnight sun. Sebaliknya, pada musim dingin, beberapa daerah di kutub bisa

mengalami kegelapan total selama beberapa minggu, yang disebut sebagai polar night. Radiasi matahari terdiri dari dua komponen utama:

1. Radiasi langsung (*direct irradiance*): yaitu sinar matahari yang datang langsung dari cakrawala tanpa hambatan.
2. Radiasi difus (*diffuse irradiance*): yaitu sinar matahari yang tersebar oleh molekul udara, uap air, dan partikel lainnya di atmosfer.

Saat tidak ada awan yang menghalangi, sinar matahari yang sampai ke permukaan disebut sebagai radiasi langsung murni, yang memiliki intensitas paling tinggi dan sangat penting dalam aplikasi modul fotovoltaik (PV). Perlu dicatat bahwa pemanasan atmosfer tidak hanya berasal dari radiasi langsung dari Matahari, tetapi juga dari proses penyerapan ulang radiasi oleh gas rumah kaca di atmosfer. Oleh karena itu, radiasi panas dari Matahari dan pemanasan atmosfer merupakan dua proses yang saling terkait, tetapi mekanismenya berbeda.

Dalam konteks teknik energi surya, radiasi matahari dapat diukur dan dicatat menggunakan berbagai instrumen, antara lain:

- a. *Pyranometer*: untuk mengukur radiasi total (langsung + difus) pada permukaan datar.
- b. *Pyrheliometer*: untuk mengukur radiasi langsung pada bidang normal terhadap arah sinar.
- c. *Sunshine recorder*: untuk mencatat lamanya penyinaran matahari selama satu hari.

Data radiasi ini sangat krusial dalam perencanaan dan perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), karena akan memengaruhi kapasitas produksi listrik, efisiensi sistem, serta pengembalian investasi dari instalasi panel surya.

Organisasi Meteorologi Dunia (WMO) mendefinisikan sinar matahari yang radiasinya langsung dari matahari diukur atas dasar setidaknya memiliki 120 WM2. sinar matahari langsung memberikan sekitar 93 lux penerangan per *Watt* daya elektromagnetik, termasuk inframerah, ultraviolet dan. sinar matahari cerah

memberikan pencahayaan sekitar 100 000 lux per meter persegi di permukaan bumi. Sinar matahari merupakan faktor kunci dalam proses fotosintesis. [13]

Energi yang berasal dari radiasi matahari merupakan potensi energi terbesar dan terjamin keberadaannya di muka bumi. Berbeda dengan sumber energi lainnya, energi matahari bisa dijumpai di seluruh permukaan bumi. Pemanfaatan radiasi matahari sama sekali tidak menimbulkan polusi ke atmosfer. Berbagai sumber energi seperti tenaga angin, bio-fuel, tenaga air, dan sebagainya. Pemanfaatan radiasi matahari umumnya terbagi dalam dua jenis, yakni termal dan *photovoltaic*. Pada sistem termal, radiasi matahari digunakan untuk memanaskan fluida atau zat tertentu yang selanjutnya fluida atau zat tersebut dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Sedangkan pada sistem *photovoltaic*, radiasi matahari yang mengenai permukaan semikonduktor akan menyebabkan loncatan elektron yang selanjutnya menimbulkan arus listrik. [14]

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar dan strategis. Berdasarkan data dari Dewan Energi Nasional (DEN), rata-rata intensitas radiasi matahari di wilayah Indonesia mencapai sekitar 4,8 kilowatt-jam (kWh) per meter persegi per hari. Nilai ini termasuk tinggi secara global dan bahkan 10 kali lipat lebih besar jika dibandingkan dengan negara-negara di Eropa seperti Jerman, yang telah lebih dahulu mengembangkan teknologi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) secara masif. Secara keseluruhan, jika potensi ini dikalkulasi berdasarkan luasan daratan di Indonesia, maka potensi teknis energi surya nasional diperkirakan mencapai sekitar 112.000 Gigawatt-peak (GWp). Angka ini menunjukkan besarnya peluang yang dapat dimanfaatkan dalam transisi energi bersih dan pemenuhan kebutuhan listrik nasional, khususnya di wilayah-wilayah terpencil dan belum terjangkau jaringan listrik konvensional (*off-grid*). Namun demikian, realisasi dari potensi besar ini masih sangat minim. Hingga saat ini, kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia baru mencapai sekitar ± 30 Megawatt (MW). Angka tersebut bahkan kurang dari satu persen dari total potensi teknis nasional yang tersedia, sehingga menunjukkan adanya kesenjangan yang signifikan antara potensi dan pemanfaatan aktual energi surya

di Tanah Air. Potensi energi matahari di suatu wilayah ditentukan oleh dua parameter utama:

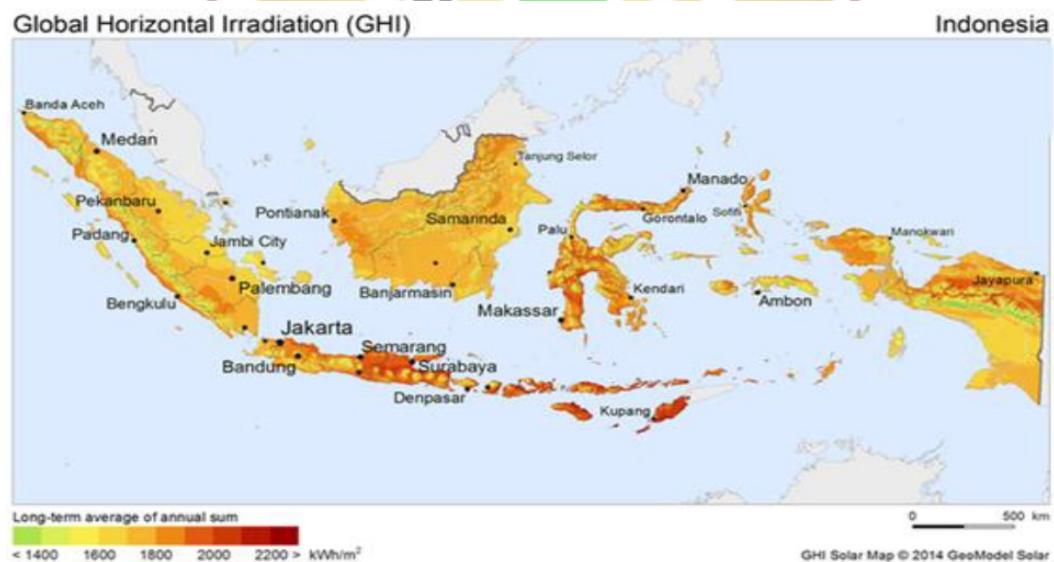
- Intensitas radiasi matahari per meter persegi (kWh/m^2)
- Lama waktu penyinaran atau durasi jam puncak matahari (peak sun hours)

Sebagai contoh, di wilayah Papua yang memiliki radiasi matahari tinggi dan minim tutupan awan, jika diketahui bahwa intensitas rata-rata penyinaran mencapai 1 kWh/m^2 per jam, dan durasi jam puncak matahari adalah 5 jam per hari, maka potensi energi surya yang dapat dimanfaatkan di wilayah tersebut adalah sekitar:

$$\text{Potensi Energi Harian} = 1 \text{ kWh/m}^2 / \text{jam} \times 5 \text{ jam} = 5 \text{ kWh/m}^2 / \text{hari}$$

Dengan pendekatan sederhana ini, dapat dihitung secara kasar berapa luas lahan yang dibutuhkan dan berapa energi listrik yang bisa dihasilkan jika dikonversi dengan sistem fotovoltaik yang efisien.

Tingkat radiasi rata-rata matahari yang menyinari wilayah Indonesia dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 9 Global Horizontal irradiation rata rata di Indonesia
(Solargis.com)

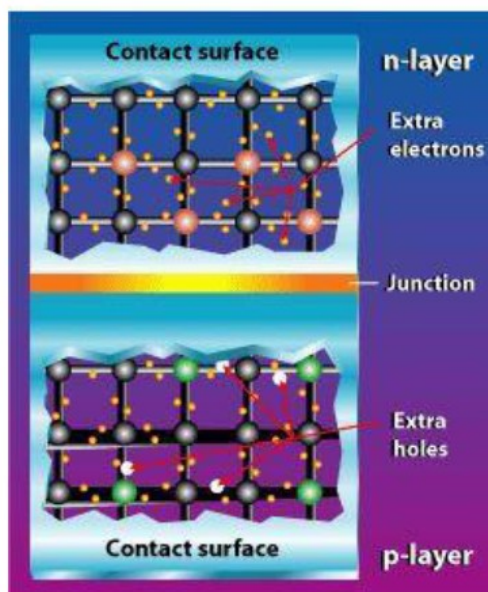
II.1.2.1 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Sel surya konvensional bekerja berdasarkan prinsip dasar fisika semikonduktor yang dikenal sebagai *p-n junction*. Ini adalah area pertemuan antara dua jenis semikonduktor, yaitu tipe-p dan tipe-n. Perbedaan karakteristik antara kedua tipe ini menciptakan medan listrik internal yang penting untuk pergerakan muatan listrik ketika terkena cahaya matahari.[16]

Semikonduktor sendiri terdiri dari struktur atom yang membentuk ikatan kovalen, di mana elektron saling berbagi antar atom. Dalam kondisi murni, semikonduktor seperti silikon memiliki jumlah elektron dan *hole* yang seimbang. Namun untuk keperluan teknologi, sifat ini perlu dimodifikasi dengan cara menambahkan atom dopan. [17]

Pada semikonduktor tipe-n, bahan dasar seperti silikon didoping dengan atom yang memiliki kelebihan elektron valensi, seperti fosfor. Hal ini menghasilkan kelebihan elektron bebas yang membawa muatan negatif. Sebaliknya, semikonduktor tipe-p dihasilkan dengan mendoping silikon menggunakan atom yang kekurangan elektron valensi, seperti boron, sehingga terbentuk *hole* atau muatan positif. Ketika kedua tipe semikonduktor ini digabungkan, terbentuklah *junction* atau perbatasan yang disebut *p-n junction*. Pada area ini terjadi difusi antara elektron dari sisi tipe-n ke sisi tipe-p dan sebaliknya *hole* dari tipe-p ke tipe-n, menciptakan medan listrik internal yang kuat. Medan inilah yang memungkinkan terjadinya pemisahan muatan saat cahaya diserap oleh sel surya.[18]

Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, energi foton dari cahaya tersebut diserap oleh lapisan semikonduktor, menghasilkan pasangan elektron-*hole*. Medan listrik dari *p-n junction* akan memisahkan muatan ini; elektron terdorong ke arah sisi tipe-n dan *hole* ke arah sisi tipe-p. Proses ini menciptakan arus listrik yang mengalir melalui sirkuit eksternal dan dapat digunakan untuk memberi daya pada beban.[19]



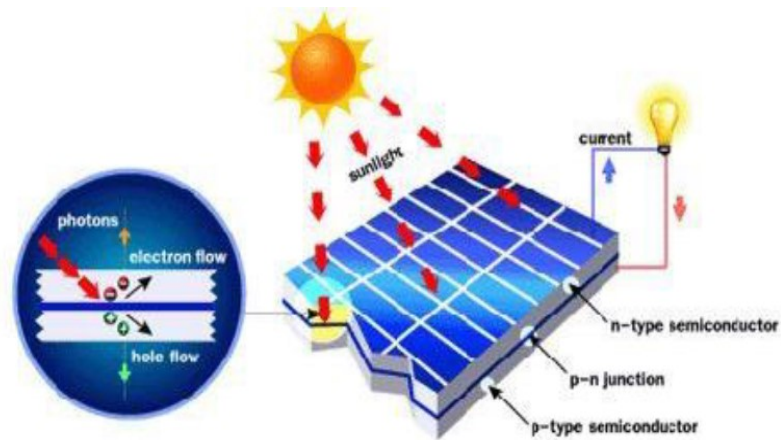
Gambar 10 Junction semi konduktor tipe-p dan tipe-n

Peran utama dari p-n *junction* pada sel surya adalah untuk menciptakan medan listrik internal, yang menjadi faktor utama agar elektron dan *hole* dapat dipisahkan dan kemudian menghasilkan listrik. Ketika material semikonduktor tipe-p dan tipe-n disatukan, elektron bebas dari sisi semikonduktor tipe-n akan bergerak ke arah semikonduktor tipe-p. Perpindahan elektron ini menyebabkan sisi tipe-n menjadi bermuatan positif (karena kehilangan elektron), sementara sisi tipe-p menjadi bermuatan negatif (karena menerima elektron tambahan).

Kondisi tersebut menimbulkan medan listrik internal pada area pertemuan kedua jenis semikonduktor tersebut. Ketika cahaya matahari mengenai area p-n *junction*, energi dari cahaya ini akan menghasilkan elektron bebas dan *hole* tambahan dalam semikonduktor. Medan listrik internal yang terbentuk tadi akan memaksa elektron untuk bergerak menuju kontak negatif, di mana elektron-elektron ini bisa dimanfaatkan sebagai aliran listrik. Sebaliknya, *hole* akan bergerak menuju kontak positif, menunggu elektron datang dan mengisi kekosongan tersebut.

Proses ini berlangsung terus-menerus selama cahaya matahari mengenai sel surya, sehingga menciptakan aliran listrik yang bisa dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan listrik sehari-hari. Dengan demikian, p-n *junction* adalah

bagian penting yang memungkinkan konversi energi cahaya menjadi energi listrik secara efektif pada sel surya.



Gambar 11 Pergerakan Elektron dari Semikonduktor tipe- p menuju semionduktor tipe-n
(sun.nrg.org)

Untuk menghitung kapasitas panel surya, diperlukan total daya konsumen kemudian ditambahkan dengan kebutuhan untuk mengisi baterai. Besarnya arus yang diperlukan untuk mengisi baterai selama 10 jam dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I_{ch} = I_{rms} \times t_{dts}$$

Dimana:

- I_{ch} = arus pengisian baterai (A)
- $I_{rms} \times t_{dts}$ = kapasitas baterai dengan DOD (Ah)
- t_{dts} = lama penyinaran matahari (jam)

Jika digunakan solar panel yang dapat menghasilkan daya output sebesar 50 Wh, jumlah panel surya yang dibutuhkan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$n_p = E_{ac} / E_p$$

Dengan:

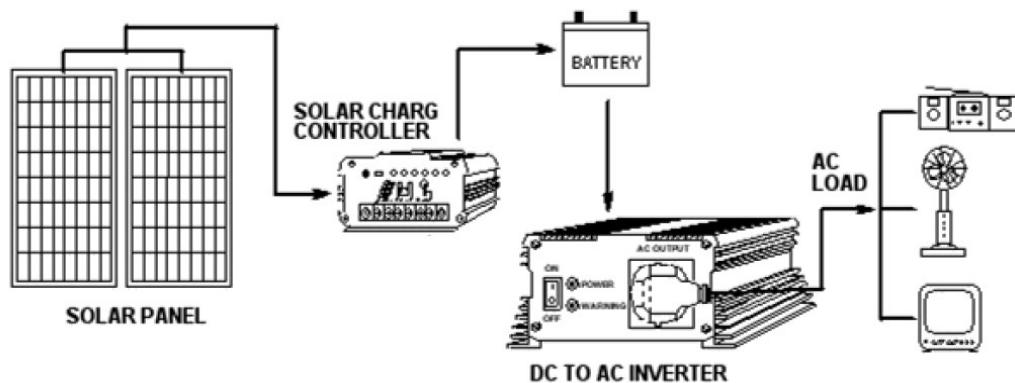
n_p = Jumlah panel

E_{ac} = total dari energi baterai dan energi konsumen (Wh)

E_p = Kapasitas Panel (Wh)

- 1) Rangkaian modul surya (*photovoltaic*) akan menghasilkan listrik arus searah (*Direct Current*), apabila terdapat radiasi matahari (baik cerah maupun mendung). Besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan tergantung pada jumlah radiasi matahari, suhu udara disekitar modul surya dan lain-lain.
- 2) Listrik yang dihasilkan oleh modul surya disalurkan ke inverter, lalu *output* dari inverter diubah menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current*). Listrik AC ini dapat langsung disalurkan ke jaringan.
- 3) Apabila terdapat beban di siang hari, maka sebagian listrik yang keluar akan langsung dipakai dan sisanya akan digunakan untuk mengisi baterai.
- 4) Pada saat malam hari, atau saat produksi listrik dari modul surya lebih kecil dari pemakaian listrik, maka inverter akan mengambil listrik dari baterai kemudian merubahnya menjadi listrik AC untuk disuplai ke jaringan sesuai kebutuhan dan kapasitasnya.

Secara umum dapat digambarkan dengan rangkaian komponen seperti gambar berikut :

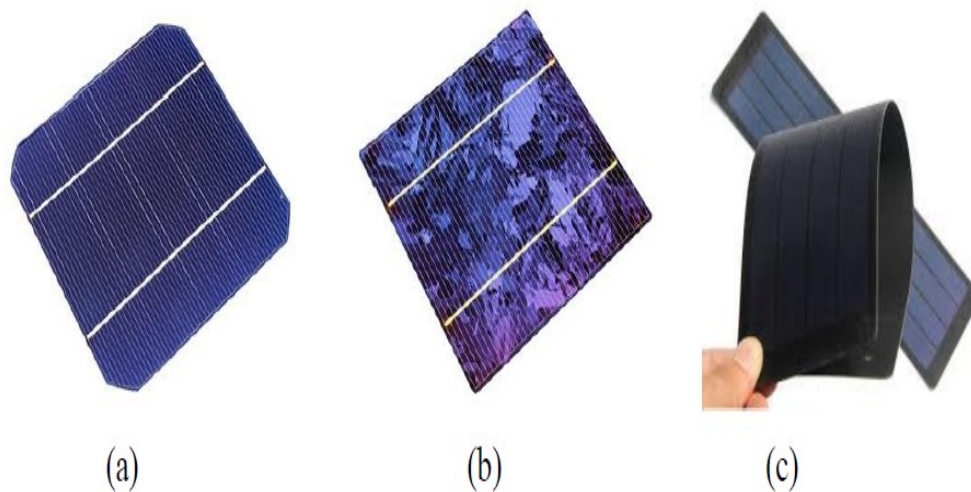


Gambar 12 Prinsip Kerja Pembangkit listrik tenaga surya

(PLTS.Wordpres.com)

Sel surya, atau dikenal juga sebagai sel fotovoltaik (*photovoltaic cell, PV*), merupakan sebuah perangkat elektronik yang dirancang untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Efek fotovoltaik sendiri adalah fenomena fisika di mana cahaya yang jatuh pada suatu bahan semikonduktor dapat menghasilkan arus listrik karena pemisahan muatan listrik positif dan negatif akibat interaksi dengan foton. Bidang teknologi fotovoltaik mencakup seluruh aspek Kajian, pengembangan, dan penerapan sel surya sebagai sumber energi alternatif yang bersih dan terbarukan. Teknologi ini telah menjadi bagian penting dari sistem pembangkit listrik tenaga surya, baik untuk aplikasi skala kecil seperti sistem atap rumah tangga, hingga skala besar seperti pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di wilayah terpencil maupun terhubung ke jaringan.[20]

Sel surya terdiri dari material semikonduktor yang mampu menyerap cahaya dan memisahkan pasangan muatan (elektron dan *hole*). Ketika foton dari cahaya matahari mengenai material ini, energi foton diserap dan digunakan untuk membebaskan elektron dari ikatan atomnya. Elektron bebas ini kemudian mengalir melalui sirkuit eksternal, menghasilkan arus listrik yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan.



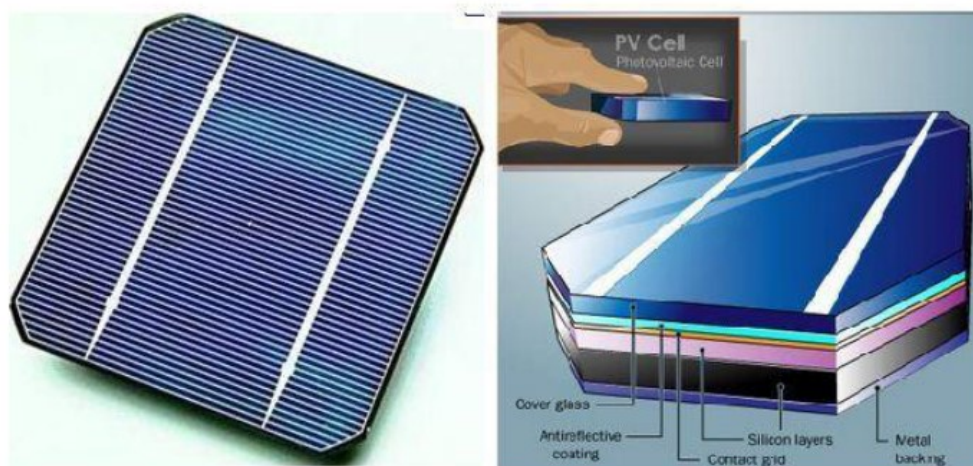
Gambar 13 (a) Kristal Tunggal (b) Policristalin (c) Silicon Amorf (Panelsurya.com)

Dari ketiga jenis sel surya diatas, memiliki beberapa perbedaan kelebihan dan kekurangan untuk tiap masing-masing jenis. Berikut adalah perbedaan dari jenis sel surya yang ada.

Tabel 1 Kelebihan dan kekurangan jenis-jenis sel surya

Perbandingan	Kristal tunggal	Polikristalin	<i>Silicon amorf</i>
Harga	Mahal	Murah	Sangat mahal
Efisiensi rata-rata	19%	18%	8,5%
Daya serap	Daya serap sangat baik dikala terik, tetapi saat mendung/ berawan agak kurang optimal menyerap cahaya	Daya serap berada dibawah tipe mono saat matahari terik, akan tetapi tetap dapat menyerap energi dengan baik disaat mendung/ berawan	Daya serap masih sangat baik dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% dibanding jenis yang lain dengan daya yang tertera setara.
Ukuran untuk menghasilkan daya yang sama	Sedang	Besar	Sangat besar
Umur panel	15-50 tahun	10-25 tahun	15-30 tahun

Struktur *cell* surya yang umumnya dipasaran yaitu sel surya berbasis material *silicon* dimana sel surya jenis ini tersusun atas beberapa bagian:



Gambar 14 Struktur cell surya jenis silicon

Gambar 14 menunjukkan ilustrasi umum dari sebuah sel surya beserta bagian-bagiannya. Secara umum, sebuah sel surya terdiri dari beberapa bagian penting berikut:

1. Substrat atau Lapisan Dasar Logam (*Metal Backing*)

Substrat adalah dasar atau fondasi tempat seluruh komponen sel surya dipasang. Substrat ini tidak hanya menopang struktur sel surya, tetapi juga berfungsi sebagai terminal positif yang menghantarkan arus listrik. Oleh karena itu, substrat harus terbuat dari bahan dengan konduktivitas listrik yang tinggi, seperti aluminium atau molybdenum.

Pada jenis sel surya tertentu seperti sel surya *dye-sensitized* (DSSC) dan sel surya organik, substrat memiliki fungsi tambahan sebagai jalan masuk cahaya ke dalam sel. Sehingga, bahan substrat pada sel jenis ini harus transparan sekaligus konduktif listrik, contohnya indium tin oxide (ITO) atau fluorine-doped tin oxide (FTO).

2. Lapisan Material Semikonduktor

Bagian semikonduktor merupakan bagian inti yang sangat penting dalam sel surya. Lapisan ini bertugas menyerap cahaya matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Untuk sel surya generasi pertama yang berbahan dasar silikon, ketebalan lapisan semikonduktor biasanya mencapai beberapa ratus mikrometer. Sementara itu, untuk sel surya lapisan tipis (*thin-film*), ketebalannya hanya sekitar 1–3 mikrometer.

Dalam ilustrasi gambar tersebut, semikonduktor yang digunakan adalah material silikon, bahan yang umum diaplikasikan dalam industri elektronik. Namun, pada teknologi sel surya lapisan tipis yang telah tersedia di pasaran, material semikonduktor yang sering digunakan antara lain Cu(In,Ga)(S,Se)_2 (CIGS), kadmium telluride (CdTe), dan silikon amorf. Selain itu, ada pula material baru yang masih dalam tahap pengembangan dan Kajian intensif, seperti $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$ (CZTS) dan tembaga oksida (Cu_2O). Bagian semikonduktor terdiri dari dua tipe material semikonduktor (*tipe-p* dan *tipe-n*), yang ketika

disatukan membentuk sebuah persimpangan (*junction*), disebut *p-n junction*. Persimpangan p-n inilah yang menjadi dasar utama prinsip kerja dari sel surya.

3. Kontak Logam atau Grid Kontak (*Contact Grid*)

Selain substrat yang berperan sebagai kontak positif, pada permukaan atas dari lapisan semikonduktor dilapisi pula dengan kontak logam atau material konduktif transparan. Lapisan ini berfungsi sebagai kontak negatif yang menangkap dan menghantarkan elektron yang dihasilkan dari proses konversi energi cahaya menjadi listrik.

4. Lapisan Anti-Reflektif

Cahaya yang mengenai permukaan sel surya sebagian bisa dipantulkan kembali. Untuk meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya, sel surya dilapisi lapisan anti-reflektif. Lapisan ini terbuat dari material tipis dengan indeks refraksi optik yang berada di antara indeks refraksi udara dan semikonduktor. Lapisan anti-reflektif ini akan membelokkan arah cahaya masuk, sehingga jumlah cahaya yang dipantulkan diminimalisir dan semakin banyak cahaya yang bisa diserap oleh material semikonduktor.

5. Enkapsulasi atau Lapisan Pelindung Kaca (*Cover Glass*)

Lapisan ini berfungsi sebagai pelindung atau enkapsulasi modul surya. Lapisan kaca pelindung ini menjaga sel surya dari paparan cuaca buruk seperti hujan, debu, kotoran, serta dampak lingkungan lain yang bisa merusak struktur atau mengurangi efisiensi sel surya secara keseluruhan.

Berdasarkan kemampuan menghantarkan listrik, zat padat dapat dibagi menjadi tiga kategori utama, yaitu:

1. Konduktor

Konduktor adalah bahan yang mudah menghantarkan listrik. Pada konduktor, jarak antara pita valensi (tempat elektron terikat) dan pita konduksi (tempat elektron bebas bergerak) sangat kecil atau bahkan tidak ada sama sekali

($E_g \approx 0$). Akibatnya, elektron dapat bergerak bebas dari pita valensi ke pita konduksi dengan mudah, sehingga arus listrik bisa mengalir dengan lancar.

2. Semikonduktor

Semikonduktor memiliki sifat pertengahan antara konduktor dan isolator. Pada semikonduktor, terdapat jarak (celah energi, E_g) antara pita valensi dan pita konduksi yang cukup moderat. Elektron di pita valensi bisa mendapatkan energi tambahan (misalnya dari cahaya atau panas) yang cukup untuk melompati celah ini ke pita konduksi. Karena itu, semikonduktor dapat menghantarkan listrik dalam kondisi tertentu (seperti ketika disinari cahaya atau dipanaskan). Semikonduktor sendiri dapat dibagi lagi menjadi dua tipe:

a. Semikonduktor Intrinsik (Murni)

Merupakan semikonduktor dalam keadaan murni, tanpa campuran bahan lain. Pada semikonduktor intrinsik, tingkat Fermi (tingkat energi kemungkinan tertinggi elektron) berada tepat di tengah antara pita valensi dan pita konduksi. Pada kondisi ini, jumlah elektron bebas di pita konduksi sama dengan jumlah *hole* (lubang bermuatan positif) di pita valensi. Kepadatan elektron (n) sama dengan kepadatan *hole* (p), yang dinyatakan dalam rumus $n = p = n_i$, dan keduanya meningkat ketika suhu naik.

b. Semikonduktor Ekstrinsik (Tidak Murni)

Semikonduktor ini telah dicampuri bahan lain (dopant), seperti silikon yang didoping dengan boron atau fosfor, untuk meningkatkan kemampuan menghantar listriknya.

3. Isolator

Isolator adalah bahan yang sangat sulit atau bahkan tidak mampu menghantarkan listrik. Pada isolator, jarak antara pita valensi dan pita konduksi (celah energi E_g) sangat besar, jauh lebih besar dari energi yang bisa diberikan oleh cahaya atau panas biasa. Akibatnya, elektron di pita valensi tidak memiliki

energi yang cukup untuk menyeberang ke pita konduksi, sehingga tidak ada aliran elektron dan tidak terjadi arus listrik.

II.1.3 Integrasi Energi Surya dengan Pembangkit Diesel

Mengintegrasikan PLTS dengan PLTD memiliki tujuan untuk mengoptimalkan kedua sumber energi tersebut. Pembangkit Diesel sangat efektif dalam menyediakan daya, namun, pembangkit ini bergantung pada bahan bakar fosil yang harganya fluktuatif dan berdampak negatif terhadap lingkungan melalui emisi karbon. Di sisi lain, PLTS memanfaatkan energi matahari yang melimpah dan terbarukan. Namun, PLTS sering kali tidak dapat diandalkan sepanjang waktu karena intensitas cahaya matahari yang bervariasi tergantung pada waktu siang dan cuaca.

Dengan menggabungkan kedua teknologi ini, sistem *hybrid* dapat memanfaatkan energi surya selama siang hari, dan pada malam hari atau saat cuaca mendung, PLTD bisa berfungsi sebagai cadangan untuk memastikan kontinuitas pasokan listrik. Penggabungan kedua teknologi ini tidak hanya menghasilkan sistem yang lebih efisien, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan.

Salah satu Kajian oleh Singh & Singh (2019) membahas potensi integrasi PLTS dan PLTD di daerah terpencil di India. Hasil Kajian mereka menunjukkan bahwa sistem *hybrid* ini dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil hingga 50%, sambil tetap mempertahankan keandalan pasokan listrik. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi kedua teknologi ini dapat memberikan solusi yang lebih stabil dan ramah lingkungan untuk daerah yang sebelumnya bergantung pada pembangkit diesel murni.

Berbagai studi kasus di berbagai belahan dunia telah menunjukkan bahwa sistem *hybrid* PLTS dan PLTD dapat memberikan solusi yang lebih efisien dan berkelanjutan untuk daerah-daerah yang tidak terhubung dengan jaringan listrik utama. Sebagai contoh, di daerah terpencil di India dan Afrika, integrasi PLTS dengan PLTD telah terbukti mengurangi ketergantungan pada pembangkit diesel dan menghasilkan sistem kelistrikan yang lebih ramah lingkungan. Adebayo &

Olasunkanmi (2021) dalam studi mereka di wilayah sub-Sahara Afrika menyimpulkan bahwa penggunaan sistem *hybrid* PLTS-PLTD dapat menurunkan biaya energi hingga 30% dibandingkan dengan penggunaan PLTD murni. Dalam konteks ini, aplikasi HOMER menjadi alat yang sangat berguna untuk melakukan optimasi biaya jangka panjang dan analisis sensitivitas, yang sangat penting untuk menentukan konfigurasi sistem yang paling ekonomis dan efisien.

Salah satu keuntungan utama dari integrasi PLTS dengan PLTD adalah pengurangan emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Dengan menggunakan energi terbarukan seperti PLTS, emisi CO₂ dapat dikurangi secara signifikan, yang berkontribusi pada pencapaian tujuan keberlanjutan global dan mengurangi dampak perubahan iklim. Kajian oleh Singh & Singh (2019) menunjukkan bahwa sistem *hybrid* ini dapat mengurangi emisi CO₂ sebesar 40%, sementara Adebayo & Olasunkanmi (2021) melaporkan bahwa integrasi PLTS-PLTD di wilayah sub-Sahara Afrika dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 50%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *hybrid* ini tidak hanya memberikan solusi kelistrikan yang lebih efisien dan berkelanjutan tetapi juga mendukung upaya untuk mengurangi dampak perubahan iklim yang disebabkan oleh pembangkit diesel.

II.1.4 Aplikasi HOMER (*Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources*)

Aplikasi HOMER (*Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources*) adalah perangkat lunak yang dirancang untuk merancang dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik *hybrid*, termasuk kombinasi antara PLTS dan PLTD. HOMER memungkinkan perencanaan yang lebih tepat dengan menguji berbagai konfigurasi sistem yang melibatkan parameter seperti kapasitas pembangkit, biaya bahan bakar, biaya investasi, dan kebutuhan beban listrik. HOMER Pro dikembangkan oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) di Amerika Serikat dan telah menjadi standar global dalam analisis kelayakan sistem energi terdistribusi. Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk mensimulasikan operasi sistem energi dalam skala waktu harian hingga tahunan, melakukan optimasi terhadap konfigurasi sistem berdasarkan kriteria tertentu

seperti biaya terendah atau emisi minimum, dan melakukan analisis sensitivitas terhadap parameter input seperti harga bahan bakar, beban listrik, atau potensi energi surya. HOMER Pro mempermudah pemodelan sistem yang kompleks dengan mempertimbangkan berbagai skenario, ketidakpastian, serta kendala teknis dan ekonomi.



Gambar 15 Tampilan Aplikasi Homer Pro

HOMER bekerja dengan menggunakan metode optimasi berbasis Monte Carlo, yang memungkinkan simulasi berbagai skenario untuk menemukan konfigurasi sistem yang paling optimal. Metode ini sangat berguna untuk sistem kelistrikan yang terisolasi atau *off-grid*, di mana perencanaan dan analisis biaya yang mendalam sangat dibutuhkan. Sebagai contoh, Yildirim et al. (2020) menggunakan HOMER untuk merancang sistem *hybrid* PLTS-PLTD dan menemukan bahwa penggunaan aplikasi ini memungkinkan desain sistem yang mengurangi biaya operasional, meningkatkan efisiensi, dan memperpanjang umur sistem. Begitu pula dengan Adebayo & Olasunkanmi (2021) yang menggunakan HOMER untuk merencanakan sistem kelistrikan di wilayah sub-Sahara Afrika. Mereka menemukan bahwa HOMER memungkinkan penentuan desain sistem yang lebih ekonomis dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Dalam konteks PLTS dan PLTD, HOMER Pro mampu mengkalkulasi kebutuhan kapasitas masing-masing komponen, menentukan performa sistem secara menyeluruh, dan mengestimasi nilai-nilai penting seperti konsumsi bahan bakar, jam operasi genset, pemanfaatan energi surya, serta efisiensi sistem. Selain

itu, HOMER juga memberikan estimasi dampak lingkungan melalui perhitungan emisi karbon dari sistem. Beberapa perhitungan yang dapat dilakukan Homer Pro Antara lain :

1. Net Present Cost (NPC)

NPC adalah total biaya proyek selama umur operasionalnya yang telah didiskon ke nilai saat ini.

$$NPC = C_{tot} \times \frac{(1 - (1 + r)^{-T})}{r}$$

Keterangan :

C_{tot} = Total annualized cost (USD/tahun)
 r = Discount rate (tingkat suku bunga tahunan)
 T = Umur proyek (tahun)

2. Levelized Cost of Energy (LCOE)

LCOE adalah biaya rata-rata per kWh energi yang dihasilkan selama umur proyek.

$$LCOE = \frac{NPC}{E_{load}}$$

Keterangan:

NPC = Net Present Cost (USD)
 E_{load} = Total energi yang disuplai ke beban (kWh)

3. Konsumsi Bahan Bakar (Fuel Consumption)

Konsumsi bahan bakar PLTD dalam HOMER dihitung dengan pendekatan linier:

$$Fuel = a \cdot P_{gen} + b \cdot E$$

Keterangan:

P_{gen} = Daya rata-rata genset (kW)
 E = Energi yang dibangkitkan (kWh)
 a, b = Parameter konsumsi spesifik, default HOMER:
 $a = 0.246$ (liter/jam per kW)
 $b = 0.08415$ (liter/kWh)


4. Renewable Fraction (RF)

RF menunjukkan seberapa besar porsi energi yang berasal dari sumber terbarukan:

$$Rf = \frac{E \text{ Renewable}}{E \text{ Total}}$$

5. Net Present Value (NPV) dan Internal Rate of Return (IRR)

NPV adalah nilai kini dari seluruh arus kas proyek. IRR adalah tingkat pengembalian internal ketika $NPV = 0$.

The logo of Universitas Andalas is a shield-shaped emblem. At the top, a banner reads "UNIVERSITAS ANDALAS". The center features a green tree with a red flame-like shape at its base. Below the tree, the text "NPV = 0" is displayed. The bottom of the shield has a banner that reads "UNTUK KEDJAJAAN BANGSA".
$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$
$$IRR = \text{Tingkat diskonto saat } NPV = 0$$

Dengan perhitungan-perhitungan tersebut, HOMER Pro menjadi alat yang sangat berguna dalam mendesain sistem energi hybrid yang tidak hanya handal secara teknis, tetapi juga layak secara ekonomi dan berkelanjutan secara lingkungan. Penggunaan HOMER sangat relevan dalam perencanaan sistem kelistrikan di daerah terpencil, pulau kecil, atau wilayah dengan akses terbatas ke jaringan PLN.

BAB III

METODE PENELITIAN

III.1 TEMPAT DAN WAKTU PENELITIAN

Kajian dilakukan pada wilayah kerja PT. PLN (Persero) Unit Induk Distribusi Sumatera Selatan Jambi dan Bengkulu – Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan Bengkulu tepatnya disalah satu pulau terluar Indonesia yaitu Kepulauan Enggano. Pulau Enggano berlokasi di wilayah Samudera Indonesia yang posisi astronomisnya terletak pada 05°31'13 LS dan 102°16'00 BT. Secara administratif, Pulau Enggano termasuk dalam wilayah Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu.

- Waktu Kajian dilaksanakan selama 6 bulan pada tanggal 1 Oktober 2024 hingga 30 Maret 2025

III.2 DESAIN PENELITIAN

Pada desain penelitian ini menggunakan Kajian ilmiah secara sistematis dan terukuryakni sebagai berikut :

a) Studi Literatur

Langkah ini bertujuan untuk mempelajari data berdasarkan dari buku-buku maupun jurnal sebagai bahan referensi yang berhubungan dengan judul Kajian.

b) Pengamatan

Pengamatan adalah proses pengumpulan data atau informasi tentang fenomena, objek, atau peristiwa melalui penggunaan indera manusia atau alat bantu. Dalam konteks Kajian, pengamatan sering dilakukan secara sistematis untuk memastikan data yang diperoleh akurat dan relevan. Dalam tahapan ini penulis mengamati pola operasi dan kajian PLTD Enggano.

c) Pengambilan/Pengumpulan Data

Pengambilan data dilakukan dengan metode pengujian dan observasi untuk memperoleh informasi yang relevan terkait kelistrikan kepulauan Enggano wilayah kerja PT. PLN (Persero) UP3 Bengkulu. Data yang akan dikumpulkan

meliputi: Data beban pemakaian energi listrik, mapping data pelanggan, biaya yang dikeluarkan serta spesifikasi mesin diesel yang digunakan.

d) Mapping Data Wilayah dan Pelanggan

Data ini mencakup pemetaan wilayah operasional dan jumlah pelanggan yang terhubung dengan sistem kelistrikan di Kepulauan Enggano. Data ini penting untuk mengetahui sebaran penggunaan energi dan fokus implementasi sistem *Hybrid*.

e) Data Kapasitas dan Jenis Pembangkit (PLTS dan PLTD)

Mengumpulkan informasi terkait kapasitas masing-masing pembangkit, baik dari sisi PLTS (panel surya dan kapasitas energi terbarukan) maupun PLTD (kapasitas generator diesel). Data ini akan digunakan untuk memahami skala dan kapasitas yang tersedia untuk sistem *hybrid*.

f) Data Kebutuhan Energi Listrik

Mengumpulkan data mengenai kebutuhan energi listrik di Kepulauan Enggano, baik untuk keperluan rumah tangga maupun industri. Ini akan memberikan gambaran tentang total permintaan energi yang harus dipenuhi oleh sistem pembangkit listrik.

g) Data Pemakaian Energi Listrik

Data yang dihasilkan oleh aplikasi perencanaan dan pemantauan energi, termasuk yang diproduksi oleh HOMER, untuk mensimulasikan penggunaan energi dan merancang sistem pembangkit yang sesuai dengan kebutuhan.

h) Data Keandalan dan Biaya Operasional

Data mengenai keandalan sistem kelistrikan yang ada saat ini dan biaya operasional yang terkait dengan pemeliharaan, pengadaan bahan bakar untuk PLTD, serta biaya lainnya yang terlibat dalam operasional PLTS.

i) Proses Simulasi dan Analisa

Analisis data bertujuan untuk mengevaluasi hasil implementasi integrasi PLTS dan PLTD pada sistem kelistrikan di Kepulauan Enggano menggunakan aplikasi HOMER. Fokus analisis antara lain adalah sebagai berikut:

❖ Keandalan dan Efisiensi Sistem

Menganalisis bagaimana integrasi kedua pembangkit dapat meningkatkan keandalan sistem kelistrikan, serta efisiensi operasional yang dapat dicapai melalui penggunaan PLTS dan PLTD secara bersamaan.

❖ Optimasi Sistem dengan HOMER

Menggunakan HOMER untuk simulasi berbagai konfigurasi sistem dan menganalisis konfigurasi yang paling ekonomis dan efisien dalam memenuhi kebutuhan energi di Kepulauan Enggano.

❖ Perbandingan Penggunaan Energi dan Biaya

Membandingkan sistem yang sepenuhnya bergantung pada PLTD dengan sistem *hybrid* yang melibatkan PLTS, serta menganalisis perbandingan biaya operasional dan potensi penghematan.

Pulau Enggano sebelumnya mengandalkan genset desa dan PLTS bantuan pemerintah sebagai sumber energi listrik. Namun, masyarakat menghadapi kesulitan dalam pemeliharaan genset diesel dan PLTS, yang menyebabkan genset sering mengalami kerusakan dan penurunan kinerja. Selain itu, banyak PLTS yang sudah rusak dan tidak bisa diperbaiki. Mengatasi masalah ini, PLN hadir pada tahun 2017 untuk melistriki Pulau Enggano dengan menyediakan pasokan listrik selama 14 jam per hari. Listrik tersedia pada dua periode, yaitu pukul 05:00 WIB hingga 12:00 WIB dan pukul 17:00 WIB hingga 24:00 WIB. Sistem kelistrikan ini terdiri dari tiga unit mesin pembangkit dengan kapasitas 1 x 500 kW dan 2 x 250 kW, yang memberikan total kapasitas 1.000 kW (1 MW). Dengan total pelanggan sebanyak 1.050 pelanggan, kebutuhan energi listrik pada tahun 2021 mencapai 773.734 kWh/tahun.

Sistem kelistrikan Pulau Enggano dengan PLTD terletak di desa Malakoni dioperasikan secara isolated yang terdiri dari 3 (tiga) mesin diesel yang dioperasikan secara bergantian. Sedangkan mesin diesel yang digunakan saat ini adalah sebagai berikut;

- a. Mesin MAN 2 type D2842LE201 no.serie 49407691074201 tahun buatan 2003 kap 500 kW.
- b. Mesin MAN 3 type D2866LE201 no.serie 39403280924201 tahun buatan 2018 kap 250 kW.
- c. Mesin Komatsu 1 type SAA6D125-P400 no.serie 89456 tahun buatan 2018 kap 250 kW.

Mesin Diesel yang terpasang pada PLTD Enggano dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2 Data mesin diesel PLTD Enggano

No.	MERK	TYPE	SERI	Thn. Operasi	Produksi Bruto (kWh)	Produksi Netto (kWh)	Daya Terpsg (kW)	Daya Mampu (kW)	Beban Puncak (kW)	Derating (%)	Pembebanan (%)	SFC (Ltr/ kWh)
PLTD ENGGANO												
1	MAN 2	D2842LE201	49407691074201	2003	16.460	16.460	500	250	230	50,00	46,00	0,299
2	MAN 3	D2866LE201	39403280924201	2018	456	456	250	100	140	60,00	56,00	0,296
3	KOM 1	SAA6D125-P400	89456	2018	27.366	27.366	250	160	150	36,00	60,00	0,299
4	MAN 1	D 2842 LE 201	494 9729130 4201	2003	71.760	71.760	500	300	210	40,00	42,00	0,299
PLTD ENGGANO					116.042,000	116.042	1.500	810	730	46,00	48,67	0,299

Dari data di atas, PLTD Enggano secara keseluruhan memiliki 4 (empat) unit pembangkit diesel dengan daya terpasang 1.500 kW. Dari beberapa mesin tersebut, ada 1 mesin yang belum dilakukan Pemeliharaan Periodik yaitu Mesin MAN Type D2866 LE201 Seri 39403280924201 dengan Daya Mampu hanya 100 kW dari daya terpasang 250 kW. Mesin yang handal dalam pengoperasiannya mampu menghasilkan daya 80% dari daya terpasang, secara data mesin MAN Type D2866 LE201 Seri 39403280924201 ini hanya mampu dibawah 50% saja dari daya terpasang.

Tabel 3 Neraca Daya Sistem kelistrikan Enggano

NO	NAMA PEMBANGKIT	KAPASITAS	
		Terpasang (kW)	D. Mampu (kW)
1	PLTD	1.000	560
	1. MAN D2866LE201, s/n. 494 0328092 4202	250	100
	2. KOMATSU SAA 6D125-P400, s/n. 89456	250	160
	3. MAN D2842LE201, s/n. 494 0769107 4201	500	300
Total		1.000	560
Rencana penambahan kapassitas ;		-	-
Total		1.000	560
Beban Puncak			239
- Beban exsisting			239
- Rencana penambahan pelanggan			-
Balance (+/-)			321
Keluar unit terbesar (daya mampu)			160
N - 1			161
Kondisi			AMAN

Pelanggan PLN di Pulau Enggano sampai dengan bulan Desember 2024 sebanyak 1332 pelanggan prabayar dan 13 pelanggan pasca bayar, yang didominasi oleh tarif rumah tangga R1T sebanyak 664 pelanggan dengan daya terkontak sebesar 1.626.100 VA. Daftar pelanggan Enggano dapat dilihat pada tabel pelanggan dibawah ini :

Tabel 4 Data Pelanggan PLN di Kepulauan Enggano Maret 2025

TARIF	JUMLAH PELANGGAN	DAYA
B1	3	3,900
B1T	5	14,500
B2	6	61,500
P1	4	21,300
P1T	19	42,900
P3T	1	2,200

R1MT	556	500,400
R1T	664	815,200
R2T	13	47,500
S1T	2	2,200
S2T	59	114,500
Total	1332	1,626,100

Bahan bakar yang di gunakan pada PLTD Enggano menggunakan BBM jenis B 30 dengan daya tampung tangki timbun sebesar 100 KL. Konsumsi BBM per hari sebanyak 0,8 KL sehingga HOP (Hari Operasi) selama 30 (tiga puluh) hari, sedangkan pengiriman BBM dilakukan setiap 30 (tiga puluh) hari sekali.

Tabel 5 Daftar HOP PLTD Isolated Bengkulu

NO	NAMA PEMBANGKIT/UNIT	DAYA MAMPU KIT (KW)			TOTAL	BP (KW)	CAD (KW)	KAPASITAS	PEMAKAIAN	STOK BBM TGL 01 JAN 2023		
		PLN	SEWA	EXCESS				TANKI (KL)	PER HARI (KL)	KL	HARI	PENGIRIMAN
1	PLTD MUKO-MUKO PT. KSO PLN BATAM PLTBG AGRO MUKO	1.000	5.760	500	7.260	6.478	782	220	27	220	8	2 HARI SEKALI
2	PLTD BANTAL PT. SEWATAMA	-	6.500	-	6.500	5.300	1.200	108	23	87	4	2 HARI SEKALI
3	PLTD IPUH PT. SEWATAMA	650	3.800	-	4.450	4.266	184	100	19	64	3	2 HARI SEKALI
4	PLTD KOTA BANI PLTBG MITRA PUDING MAS	3.100	-	1.500	4.600	3.200	1.400	120	7	90	13	3 HARI SEKALI
5	PLTD ENGGANO	730	-	-	730	194	536	100	0,8	24	30	30 HARI SEKALI
TOTAL		5.480	16.060	2.000	23.540	19.438	4.102			485	58	

*J) DATA BBM PER TANGGAL 01 JANUARI 2023

Pengangkutan BBM dilakukan dengan 3 (tiga) Truck Tangki BBM ukuran 10 KL yang dinaikkan ke kapal penyeberangan milik PT. ASDP Indonesia Ferry dari pelabuhan Pulau Baai menuju Pulau Enggano dengan waktu tempuh sekitar 14 jam. Selain mengantar BBM PLN untuk PLTD Enggano, kapal penyeberangan juga mengangkut BBM milik koperasi kecamatan Enggano.

Tabel 6 Monitoring Pembebanan PLTD Enggano

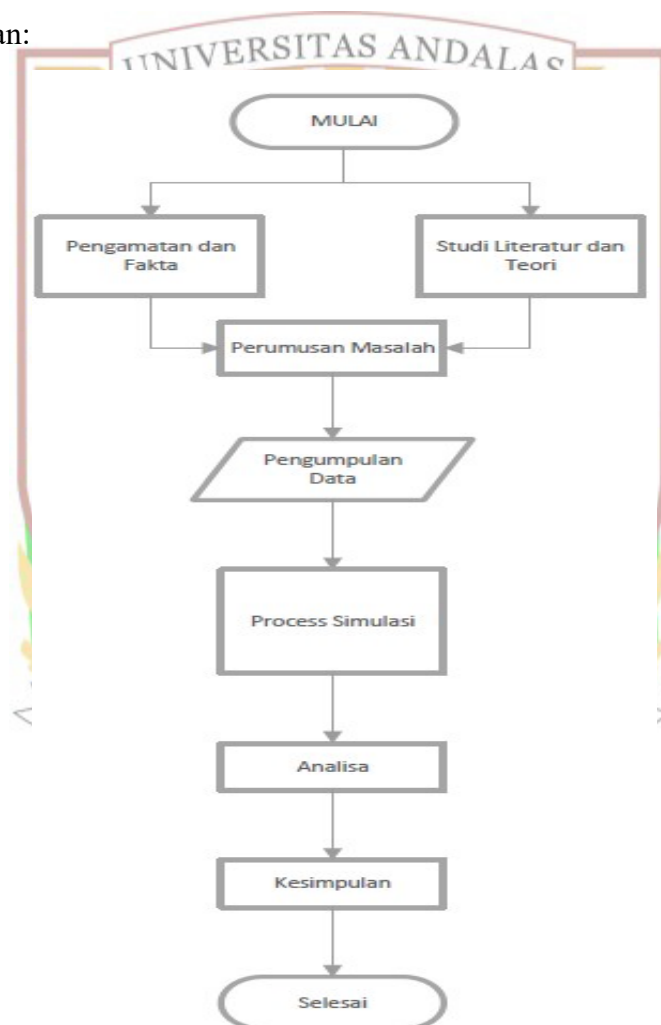
JAM	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
0:00	694.2	751.8	734.8	741.6	667.1	785.6
1:00	660.3	731.5	704.4	721.3	626.5	755.2
2:00	653.6	707.7	690.8	697.6	626.5	741.6
3:00	650.2	711.1	687.4	697.6	633.2	748.4
4:00	657	714.5	694.2	701	633.2	738.2
5:00	646.8	701	684	690.8	629.9	724.7
6:00	670.5	711.1	690.8	701	833	924.5
7:00	877.1	948.2	924.5	934.6	877.1	955
8:00	748.4	789	799.2	799.2	734.8	829.7
9:00	724.7	775.5	789	792.4	701	836.4
10:00	717.9	768.7	782.2	785.6	707.7	809.3
11:00	734.8	785.6	799.2	802.6	728.1	826.3
12:00	714.5	775.5	785.6	792.4	673.9	822.9
13:00	711.1	772.1	761.9	775.5	684	806
14:00	707.7	761.9	751.8	761.9	677.3	799.2
15:00	704.4	755.2	748.4	755.2	660.3	809.3
16:00	704.4	761.9	758.5	765.3	667.1	802.6
17:00	768.7	822.9	809.3	819.5	734.8	870.3
18:00	880.5	975.3	931.2	941.4	853.4	988.8
19:00	873.7	968.5	924.5	931.2	880.5	982
20:00	866.9	958.3	914.3	924.5	853.4	971.9
21:00	853.4	941.4	900.8	914.3	822.9	914.3
22:00	765.3	846.6	819.5	833	711.1	897.4
23:00	768.7	833	809.3	819.5	741.6	863.5

Berdasarkan data tabel 6 pembebanan di atas, terlihat bahwa profil beban harian PLTD di Pulau Enggano selama bulan Juli hingga Desember menunjukkan pola konsumsi energi yang relatif konsisten, dengan beban tertinggi terjadi pada malam hari, khususnya mulai pukul 18.00 hingga 22.00. Beban pada jam-jam tersebut secara konsisten berada di atas 850 watt (dalam satuan kW atau kVA sesuai konteks sistem), dengan puncaknya mencapai hampir 990 kW pada pukul 18.00 di bulan Desember. Sementara itu, beban terendah tercatat pada jam-jam dini hari antara pukul 00.00 hingga 05.00, dengan nilai berkisar antara 630 hingga 750 kW, tergantung bulan. Tren ini mencerminkan pola konsumsi listrik masyarakat Enggano yang meningkat tajam saat malam hari karena aktivitas rumah tangga dan penerangan, dan menurun saat malam menjelang pagi. Data ini sangat penting dalam perencanaan sistem pembangkitan karena dapat digunakan

untuk menentukan kapasitas optimal genset, strategi pengoperasian PLTD, serta integrasi dengan energi terbarukan seperti PLTS dan baterai guna menekan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional.

III.3 FLOW CHART KAJIAN

Penulis membuat sebuah tahapan Kajian yang digunakan sebagai alur Kajian berdasarkan desain Kajian yang disajikan di atas, adapun tahapan-tahapan tersebut dapat dilihat dari *flow chart* Kajian. Berikut adalah langkah-langkah yang peneliti lakukan:



Gambar 16 Flow Chart Kajian

III.4 METODE PENGUMPULAN DATA

Dalam Kajian ini metode pengumpulan data akan dilakukan melalui beberapa tahapan yang dirancang untuk memastikan pengumpulan data yang akurat dan relevan dengan tujuan Kajian. Berikut adalah langkah-langkah yang akan diambil untuk mengumpulkan data:

1. Studi Literatur dan Kajian Pustaka

Langkah pertama dalam pengumpulan data adalah melakukan studi literatur yang melibatkan pencarian, pembacaan, dan analisis berbagai sumber yang relevan. Sumber-sumber ini meliputi jurnal, buku, artikel ilmiah, laporan Kajian, dan publikasi terkait lainnya yang membahas topik-topik berikut:

- a. Integrasi Energi Terbarukan (PLTS) dengan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).
- b. Pemodelan dan simulasi sistem *Hybrid* menggunakan aplikasi HOMER.
- c. Kajian terdahulu yang relevan dengan sistem kelistrikan di daerah terpencil, terutama yang menggunakan solusi berbasis energi surya dan diesel.
- d. Teknologi PLTS dan PLTD, serta cara untuk mengoptimalkan penggunaan energi dalam sistem kelistrikan.

Data yang dikumpulkan dari studi literatur ini akan digunakan untuk membangun landasan teori dalam memahami konsep-konsep yang mendasari sistem *Hybrid* PLTS-PLTD serta penerapan HOMER dalam analisis sistem kelistrikan.

2. Pengumpulan Data Primer dan Sekunder

A. Data Primer

Data primer akan diperoleh langsung dari lapangan atau lokasi yang menjadi objek Kajian, yaitu Kepulauan Enggano. Metode pengumpulan data primer yang digunakan meliputi:

- a. Wawancara dan Diskusi dengan pihak terkait di PT PLN (Persero), termasuk teknisi dan manajer yang terlibat dalam pengelolaan dan operasional sistem kelistrikan di Kepulauan Enggano.
- b. Observasi Langsung terhadap sistem kelistrikan di Kepulauan Enggano, yang mencakup pembangkit PLTS dan PLTD, serta infrastruktur yang mendukung distribusi energi.
- c. Survei Lapangan untuk mengumpulkan informasi tentang penggunaan energi oleh pelanggan dan kebutuhan daya yang ada di daerah tersebut.

B. Data Sekunder:

Data sekunder akan dikumpulkan dari berbagai sumber yang sudah ada antara lain:

- a. Laporan dan Dokumen Internal PT PLN terkait operasional kelistrikan di Kepulauan Enggano, termasuk data penggunaan energi, laporan pemeliharaan, serta data terkait sistem pembangkit dan distribusi.
- b. Data Historis tentang pasokan listrik dan penggunaan energi di daerah tersebut, baik untuk rumah tangga maupun industri.
- c. Data dari Sistem Pengukuran dan Monitoring yang digunakan oleh PT PLN UP3 Bengkulu untuk mendapatkan data akurat mengenai penggunaan energi.

3. Pengolahan dan Validasi Data

Langkah berikutnya adalah pengolahan dan validasi data untuk memastikan kualitas dan keandalannya. Proses ini meliputi:

- a. Pembersihan Data: Menghapus data yang tidak lengkap atau tidak valid serta memperbaiki kesalahan pengukuran yang mungkin terjadi selama pengumpulan data.
- b. Validasi Data: Memastikan bahwa data yang diperoleh dapat dipercaya dan sesuai dengan standar yang diperlukan. Proses validasi ini dilakukan dengan membandingkan data dari sumber primer dan sekunder untuk memastikan konsistensi dan akurasi.
- c. Pemrosesan Data dengan Aplikasi HOMER: Setelah data diverifikasi, data akan diproses menggunakan aplikasi HOMER untuk menganalisis sistem

Hybrid PLTS-PLTD, serta untuk mengevaluasi efisiensi dan keandalan sistem kelistrikan di Kepulauan Enggano.

4. Pengumpulan Data Keandalan dan Biaya Operasional

Selain data teknis mengenai kapasitas pembangkit dan penggunaan energi, pengumpulan data terkait keandalan dan biaya operasional juga sangat penting untuk Kajian ini. Data ini akan digunakan untuk menganalisis:

- a. Keandalan Sistem Kelistrikan: Meliputi pengukuran gangguan sistem, waktu pemulihan, serta kinerja sistem dalam mengelola beban pada saat kebutuhan energi puncak. Ini sangat penting untuk mengetahui sejauh mana sistem *Hybrid* dapat diandalkan dalam kondisi tertentu.
- b. Biaya Operasional: Pengumpulan data terkait biaya pemeliharaan, bahan bakar untuk PLTD, dan biaya operasional lain yang terkait dengan penggunaan dan pemeliharaan PLTS. Data ini akan digunakan untuk menghitung biaya jangka panjang dari penggunaan energi terbarukan dibandingkan dengan ketergantungan pada bahan bakar diesel yang lebih mahal.

III.5 DESAIN UMUM, SPESIFIKASI DAN BIAYA KOMPONEN

Perencanaan sistem pembangkit listrik *hybrid* bertujuan untuk menggabungkan keunggulan dari dua jenis sumber energi, yaitu energi terbarukan (dalam hal ini pembangkit listrik tenaga surya atau PLTS) dan energi konvensional (PLTD). Integrasi ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi sistem, menekan biaya bahan bakar fosil, serta memastikan kontinuitas pasokan listrik yang andal, khususnya di wilayah terpencil seperti Pulau Enggano yang tidak terhubung dengan jaringan interkoneksi utama (grid isolated).

Dalam Kajian ini, sistem *hybrid* yang dirancang terdiri dari empat komponen utama, yaitu:

- 1) Modul Fotovoltaik (PV) sebagai sumber energi utama saat siang hari
- 2) Generator Diesel (PLTD) yang berfungsi sebagai sumber energi cadangan

- 3) Sistem Penyimpanan Energi (Baterai) yang menyimpan kelebihan energi dari PV untuk digunakan saat beban puncak atau malam hari, dan
- 4) Inverter yang mengubah arus listrik DC menjadi AC.

Sistem dirancang dengan strategi pengoperasian cycle charging, di mana PLTD menyala hanya ketika PV dan baterai tidak mencukupi kebutuhan energi. Konfigurasi ini dimodelkan secara rinci menggunakan perangkat lunak HOMER Pro untuk menghasilkan konfigurasi sistem optimal berdasarkan parameter teknis dan ekonomi aktual di Pulau Enggano.

Dalam simulasi, digunakan beberapa asumsi dasar ekonomi proyek, antara lain:

- a. Tingkat diskonto (discount rate) sebesar 8 %
- b. Laju inflasi tahunan (inflation rate) sebesar 2 %
- c. Usia proyek (project lifetime) selama 25 tahun
- d. Harga BBM Rp 10.370/liter
- e. Random variability 5% dan timestep 3%.

Dalam perancangan dan simulasi sistem *hybrid* pembangkit listrik tenaga surya dan diesel (PLTS–PLTD), diperlukan asumsi-asumsi teknis dan ekonomi yang merepresentasikan kondisi nyata di lapangan. Asumsi ini mencakup parameter biaya, umur teknis, efisiensi sistem, serta indikator makroekonomi seperti tingkat inflasi dan diskonto.

Asumsi-asumsi tersebut merujuk pada standar umum studi kelayakan energi di Indonesia dan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan biaya investasi serta evaluasi keekonomian proyek.

Tabel 7 Spesifikasi dan Biaya Komponen

Komponen	Parameter	Nilai
Modul PV	Daya Keluaran (Wp)	550
	Efisiensi (%)	18.33
	Temperatur coefficient	-0.39
	Operating Temperature (C)	45

	<i>Derating Factor (%)</i>	88
	<i>Capital Cost (Rp)</i>	Rp6,000,000
	<i>Replacement Cost (Rp)</i>	Rp4,500,000
	<i>O&M cost (Rp/th)</i>	Rp100,000
Baterai	Tegangan nominal (V)	24
	Kapasitas Nominal (Ah)	100
	Efisiensi (%)	96
	DOD	0.8
	<i>Capital Cost (Rp)</i>	Rp8,000,000
	<i>Replacement Cost (Rp)</i>	Rp6,000,000
	<i>O&M cost (Rp/th)</i>	Rp200,000
Inverter	Kapasitas (KW)	1500
	<i>Capital Cost (Rp)</i>	Rp3,000,000,000
	<i>Replacement Cost (Rp)</i>	Rp1,000,000,000
	<i>O&M cost (Rp/th)</i>	Rp75,000,000
Generator	Kondisi	
	Kapasitas (kW)	2000
	<i>Capital Cost (Rp)</i>	Rp5,065,220,000
	<i>Replacement Cost (Rp)</i>	Rp3,798,915,000
	<i>O&M cost (Rp/jam)</i>	Rp300,000

III.6 METODE ANALISIS DATA

Metode analisis data Kajian menggunakan metode analisis data kuantitatif. Metode analisis yang digunakan dalam Kajian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang menyeluruh mengenai dampak integrasi PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) dan PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel) terhadap keandalan, efisiensi, dan biaya operasional sistem kelistrikan di Kepulauan Enggano. Dengan menggunakan aplikasi HOMER, Kajian ini akan merancang sistem pembangkit listrik *Hybrid* yang lebih optimal dan mengevaluasi manfaat pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil.

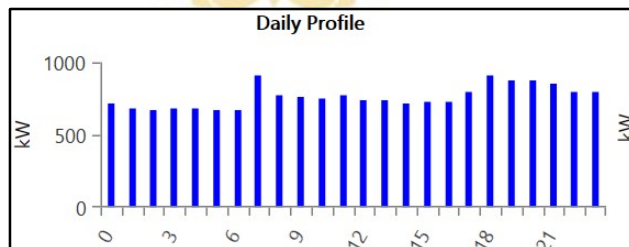
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 PROFIL PEMBEBANAN KELISTRIKAN KEPULAUAN ENGGANO

Pulau Enggano merupakan salah satu pulau terluar di Provinsi Bengkulu yang menghadapi berbagai tantangan dalam penyediaan energi listrik yang andal dan berkelanjutan. Sistem kelistrikan yang ada saat ini masih didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), dengan kapasitas terpasang sebesar 1 MW yang terbagi dalam tiga unit genset diesel.

Dalam Kajian ini, profil beban listrik yang digunakan merupakan hasil modifikasi dari data beban historis sistem kelistrikan di Pulau Enggano. Data beban asli yang diperoleh merupakan profil aktual dari PLTD Enggano yang mencerminkan kondisi operasional selama 24 jam per hari. Untuk keperluan simulasi sistem *hybrid* dengan PLTS maka profil beban tersebut dimodifikasi menjadi profil beban baru dengan proyeksi beban PLTD Pulau Enggano untuk tahun 2049 telah dihitung berdasarkan data tahun 2024 dengan asumsi pertumbuhan beban rata-rata 3% per tahun. Modifikasi ini bertujuan untuk menggambarkan kondisi kelistrikan yang lebih ideal dan andal, serta untuk mengakomodasi potensi peningkatan permintaan energi di masa mendatang. Profil beban baru tersebut digunakan sebagai input utama dalam simulasi perangkat lunak HOMER Pro.



Gambar 17 Profil Harian PLTD Enggano

Agar hasil simulasi lebih realistis dan mendekati kondisi aktual lapangan, diterapkan random variability day-to-day sebesar 5%, yang merepresentasikan

fluktuasi alami beban dari hari ke hari, seperti yang biasa terjadi akibat perubahan pola konsumsi masyarakat. Selain itu, ditambahkan juga pengaturan timestep sebesar 3% untuk memberikan resolusi waktu yang lebih detail pada profil beban harian. Perlu dicatat bahwa penambahan random variability ini tidak mempengaruhi total energi konsumsi, namun dapat berdampak pada tingkat variasi beban puncak, yang selanjutnya akan mempengaruhi sizing kapasitas PLTS, inverter, dan baterai.

Dengan demikian, profil beban yang digunakan dalam Kajian ini mencerminkan pendekatan yang lebih mendekati realita operasional dan sangat relevan untuk skenario sistem *hybrid* PLTS–PLTD di lingkungan kepulauan seperti Enggano.

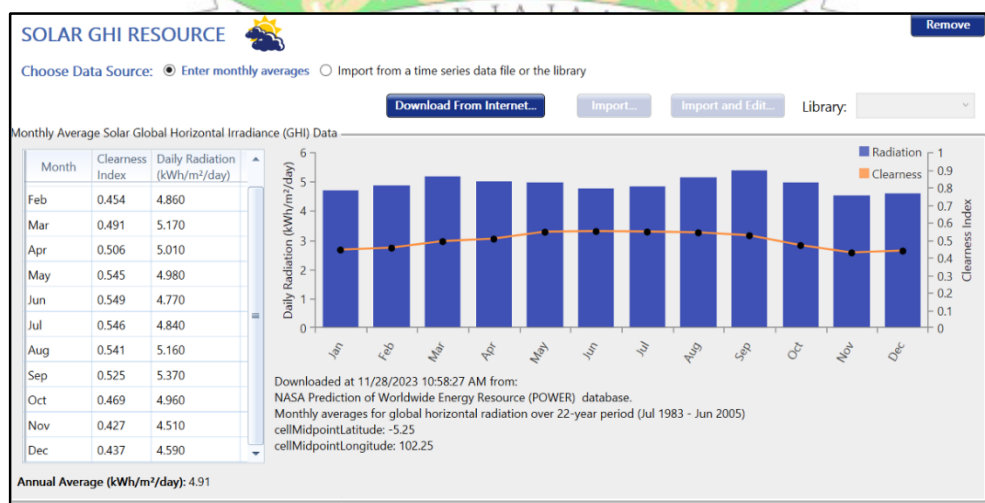
Tabel 8 Profil beban PLTD Enggano

JAM	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
0:00	717.9	758.5	741.6	734.8	701	701	694.2	751.8	734.8	741.6	667.1	785.6
1:00	680.7	721.3	707.7	697.6	667.1	667.1	660.3	731.5	704.4	721.3	626.5	755.2
2:00	673.9	714.5	701	690.8	660.3	660.3	653.6	707.7	690.8	697.6	626.5	741.6
3:00	680.7	707.7	697.6	684	657	657	650.2	711.1	687.4	697.6	633.2	748.4
4:00	677.3	704.4	690.8	677.3	663.7	663.7	657	714.5	694.2	701	633.2	738.2
5:00	667.1	684	677.3	684	653.6	653.6	646.8	701	684	690.8	629.9	724.7
6:00	667.1	707.7	900.8	897.4	684	677.3	670.5	711.1	690.8	701	833	924.5
7:00	904.2	958.3	938	924.5	883.8	883.8	877.1	948.2	924.5	934.6	877.1	955
8:00	772.1	816.1	812.7	799.2	755.2	755.2	748.4	789	799.2	799.2	734.8	829.7
9:00	758.5	802.6	785.6	775.5	731.5	731.5	724.7	775.5	789	792.4	701	836.4
10:00	748.4	792.4	775.5	765.3	724.7	724.7	717.9	768.7	782.2	785.6	707.7	809.3
11:00	768.7	812.7	792.4	778.9	741.6	741.6	734.8	785.6	799.2	802.6	728.1	826.3
12:00	738.2	782.2	765.3	755.2	721.3	721.3	714.5	775.5	785.6	792.4	673.9	822.9
13:00	734.8	778.9	761.9	751.8	717.9	717.9	711.1	772.1	761.9	775.5	684	806
14:00	711.1	755.2	748.4	741.6	714.5	714.5	707.7	761.9	751.8	761.9	677.3	799.2
15:00	728.1	748.4	745	734.8	711.1	711.1	704.4	755.2	748.4	755.2	660.3	809.3
16:00	731.5	745	751.8	741.6	711.1	711.1	704.4	761.9	758.5	765.3	667.1	802.6
17:00	792.4	819.5	819.5	809.3	775.5	775.5	768.7	822.9	809.3	819.5	734.8	870.3
18:00	910.9	961.7	941.4	931.2	890.6	890.6	880.5	975.3	931.2	941.4	853.4	988.8
19:00	880.5	961.7	944.8	934.6	880.5	880.5	873.7	968.5	924.5	931.2	880.5	982
20:00	873.7	955	934.6	921.1	873.7	873.7	866.9	958.3	914.3	924.5	853.4	971.9
21:00	856.7	934.6	914.3	904.2	860.1	860.1	853.4	941.4	900.8	914.3	822.9	914.3
22:00	795.8	839.8	822.9	812.7	772.1	772.1	765.3	846.6	819.5	833	711.1	897.4
23:00	792.4	839.8	819.5	809.3	775.5	775.5	768.7	833	809.3	819.5	741.6	863.5

IV.2 ANALISIS POTENSI ENERGI SURYA DI PULAU ENGGANO

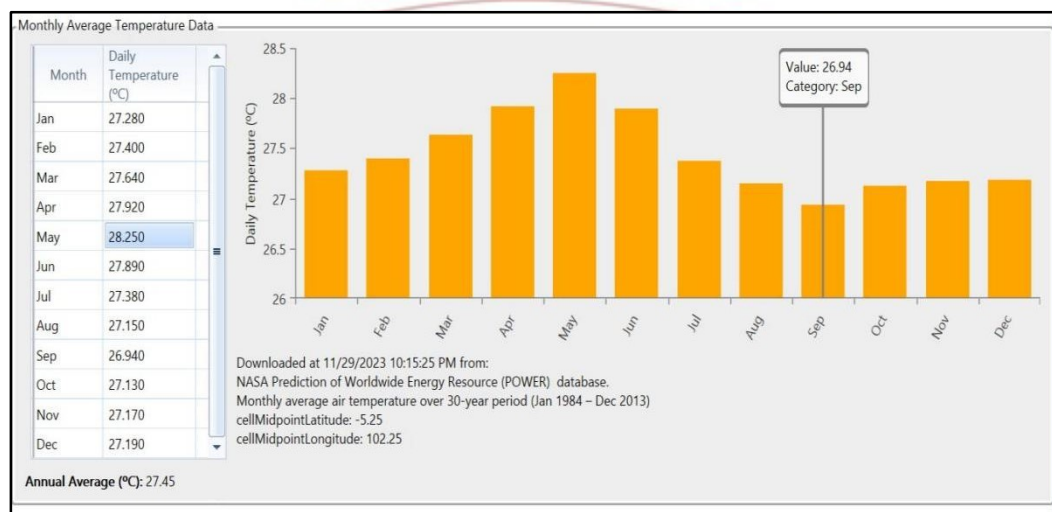
Salah satu faktor kunci dalam keberhasilan implementasi sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah tingkat potensi energi surya di lokasi pembangunan. Dalam Kajian ini, data potensi radiasi matahari dan temperatur lingkungan diperoleh dari basis data milik NASA yang tersedia melalui platform Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER). Data ini diakses langsung melalui perangkat lunak HOMER Pro, dengan lokasi simulasi ditentukan berdasarkan koordinat geografis Pulau Enggano, yaitu pada 5,25° Lintang Selatan dan 102,25° Bujur Timur.

Data historis yang diambil mencakup intensitas radiasi surya harian dan temperatur rata-rata harian selama satu tahun penuh. Berdasarkan hasil ekstraksi data dari HOMER Pro, diperoleh bahwa intensitas radiasi matahari di Pulau Enggano bervariasi antara 4,51 hingga 5,37 kWh/m²/hari, dengan nilai rata-rata tahunan sebesar 4,91 kWh/m²/hari. Nilai ini menunjukkan bahwa lokasi Kajian memiliki tingkat potensi energi surya yang cukup baik dan sangat layak untuk dimanfaatkan sebagai sumber pembangkitan listrik berbasis fotovoltaik. Grafik distribusi rata-rata bulanan intensitas radiasi matahari dapat dilihat pada gambar dibawah yang memperlihatkan tren konsisten sepanjang tahun, dengan puncak iradiasi umumnya terjadi pada bulan-bulan musim kemarau.



Gambar 18 Data Intensitas Radiasi Matahari dari HOMER

Selain itu, data temperatur lingkungan yang diperoleh menunjukkan bahwa suhu harian di Pulau Enggano berkisar antara 26,94°C hingga 28,25°C, dengan rata-rata tahunan sebesar 27,45°C. Temperatur lingkungan ini termasuk dalam kategori optimal untuk operasi modul surya, karena masih berada dalam kisaran suhu standar pengujian modul (STC: 25°C) dengan deviasi yang tidak terlalu besar. Informasi temperatur ini penting dalam simulasi sistem PLTS karena efisiensi modul fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh kenaikan suhu lingkungan. Gambar 4.2 menunjukkan tren temperatur harian sepanjang tahun berdasarkan data HOMER.



Gambar 19 Data Temperatur Harian dari HOMER

Dengan potensi iradiasi yang stabil dan temperatur yang relatif moderat, Pulau Enggano dapat dikategorikan sebagai wilayah dengan karakteristik iklim yang mendukung implementasi sistem PLTS secara optimal. Potensi energi surya yang tersedia diharapkan mampu menggantikan sebagian besar peran PLTD pada siang hari dan mendukung sistem penyimpanan energi untuk beban malam hari, sehingga secara keseluruhan dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem kelistrikan di pulau tersebut. *Solar Radiation Intensity Data from HOMER.*

IV.3 SKENARIO KONFIGURASI SISTEM *HYBRID*

Simulasi sistem *hybrid* PLTS–PLTD dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro berdasarkan profil beban harian, harga bahan bakar, potensi energi surya, serta spesifikasi teknis masing-masing komponen. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk memperoleh konfigurasi sistem dengan biaya paling optimal selama umur proyek 25 tahun.

Beberapa skenario konfigurasi dianalisis, mulai dari sistem diesel-only hingga kombinasi berbagai kapasitas PLTS, PLTD, dan baterai. HOMER mengevaluasi kombinasi tersebut berdasarkan parameter Levelized Cost of Energy (LCOE), Net Present Cost (NPC), konsumsi bahan bakar, dan renewable fraction. Konfigurasi terbaik yang dihasilkan oleh simulasi terdiri dari PLTS berkapasitas 2.316 kW, generator diesel 1.000 kW, baterai 1.116 unit, dan inverter 1.250 kW. Sistem ini menghasilkan NPC sebesar Rp 259 miliar dan LCOE sebesar Rp 2.936/kWh. Renewable fraction dari sistem mencapai 33,7% dengan konsumsi bahan bakar tahunan sebesar 1.317.423 liter.

Sebagai perbandingan, sistem diesel-only menghasilkan NPC sebesar Rp 347 miliar dengan LCOE sebesar Rp 3.935/kWh dan konsumsi bahan bakar 2.092.690 liter per tahun. Ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS dan baterai secara signifikan menurunkan biaya operasional dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa sistem *hybrid* memberikan penghematan bahan bakar hingga lebih dari 30% dan penurunan emisi karbon secara signifikan. Strategi operasi cycle charging yang diterapkan turut mengurangi jam operasi genset dan memperpanjang umur teknisnya.

Gambaran yang lebih komprehensif mengenai manfaat implementasi sistem *hybrid*, dilakukan perbandingan antara beberapa skenario konfigurasi pembangkit. Skenario ini meliputi sistem PLTD-only, PLTD + baterai, PLTS skala kecil + PLTD, serta sistem *hybrid* optimal PLTS–PLTD–baterai yang dipilih HOMER sebagai konfigurasi terbaik. Perbandingan mencakup aspek biaya total proyek (Net Present Cost), biaya energi (LCOE), konsumsi bahan bakar, biaya

operasional tahunan, serta kontribusi energi terbarukan (renewable fraction). Hasilnya ditampilkan pada gambar skenario berikut ini.

Architecture							Cost							System	
   	PV (kW)	GEN 1 (kW)	BAT 1	CON 1 (kW)	Dispatch	NPC (Rp)	COE (Rp)	Operating cost (Rp/yr)	Initial capital (Rp)	Fuel cost (Rp/yr)	O&M (Rp/yr)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)		
   	2,316	1,000	1,116	982	CC	Rp259B	Rp2,936	Rp17.0B	Rp39.5B	Rp13.7B	Rp1.94B	33.7	1,317,423		
   		1,000	196	152	CC	Rp311B	Rp3,531	Rp23.7B	Rp5.25B	Rp20.4B	Rp1.80B	0	1,970,143		
   	1,025	1,500		471	CC	Rp325B	Rp3,693	Rp23.8B	Rp17.2B	Rp18.8B	Rp2.84B	16.2	1,813,502		
   		1,500			CC	Rp347B	Rp3,935	Rp26.4B	Rp5.07B	Rp21.7B	Rp2.63B	0	2,092,690		

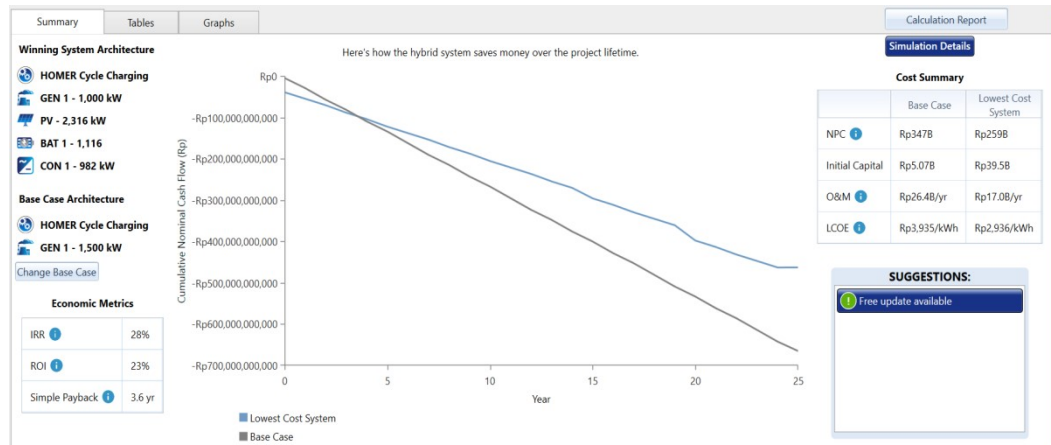
Gambar 20 Skenario masing masing konfigurasi

Dari hasil tersebut terlihat bahwa sistem *hybrid* PLTS–PLTD dengan kapasitas PV yang memadai dan dukungan baterai mampu menurunkan biaya energi dan konsumsi bahan bakar secara signifikan dibandingkan sistem PLTD-only. Skenario optimal tidak hanya memberikan penghematan finansial jangka panjang, tetapi juga meningkatkan keandalan sistem dan mengurangi ketergantungan terhadap pasokan BBM.

IV.4 PEMBAHASAN DAMPAK TEKNIS DAN EKONOMI

Hasil simulasi HOMER Pro yang ditampilkan pada grafik akumulasi arus kas menunjukkan bahwa sistem *hybrid* PLTS–PLTD memiliki performa ekonomi yang jauh lebih baik dibandingkan sistem PLTD-only. Garis biru pada grafik mewakili sistem *hybrid*, sementara garis abu-abu menunjukkan tren biaya sistem diesel-only. Perbedaan antara keduanya semakin melebar seiring waktu, menunjukkan efisiensi jangka panjang dari sistem *hybrid*. Dari sisi Net Present Cost (NPC), sistem *hybrid* menghasilkan total biaya proyek sebesar Rp 259 miliar selama 25 tahun, sedangkan sistem PLTD-only mencapai Rp 347 miliar. Artinya, penerapan sistem *hybrid* dapat menghemat sekitar Rp 88 miliar dalam siklus hidup proyek. Selain itu, Levelized Cost of Energy (LCOE) dari sistem *hybrid*

sebesar Rp 2.936/kWh jauh lebih rendah dibandingkan dengan Rp 3.935/kWh dari sistem konvensional. Penurunan ini menunjukkan efisiensi biaya produksi listrik per satuan kWh yang signifikan dari integrasi energi terbarukan.



Gambar 21 Hasil Simulasi Sistem

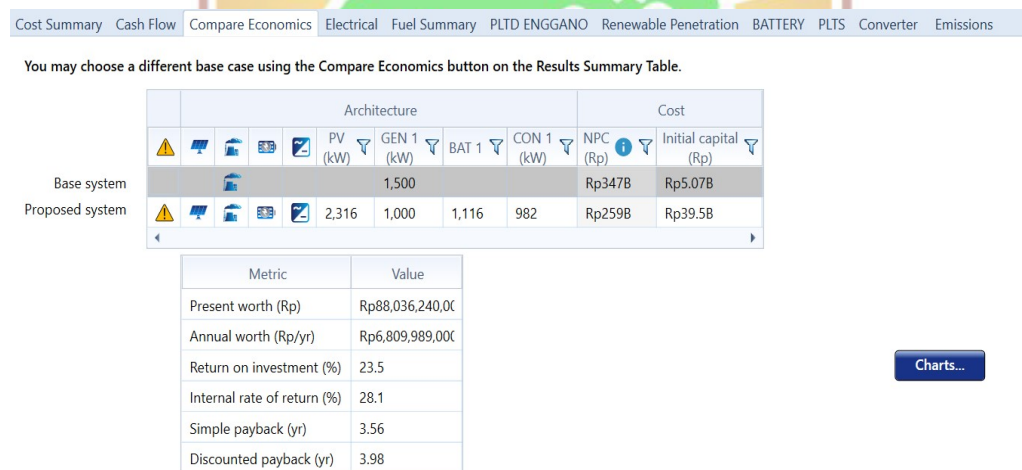
Investasi awal (initial capital) pada sistem *hybrid* memang lebih tinggi (Rp 39,5 miliar) dibandingkan sistem diesel-only (Rp 5,07 miliar), namun nilai ini segera tertutupi dengan penghematan operasional yang diperoleh. Biaya operasional tahunan sistem *hybrid* hanya sebesar Rp 17 miliar, jauh lebih rendah dari Rp 26,4 miliar pada sistem PLTD-only.

Dari sisi pengembalian modal, sistem *hybrid* menunjukkan simple payback period sebesar 3,6 tahun. Ini menandakan bahwa biaya investasi awal akan kembali dalam waktu kurang dari 4 tahun, menjadikannya sangat menarik untuk investasi. Dengan nilai Internal Rate of Return (IRR) sebesar 28% dan Return on Investment (ROI) sebesar 23%, proyek ini sangat layak dilaksanakan baik dari aspek teknis, ekonomi, maupun lingkungan.

Hasil simulasi sistem *hybrid* PLTS–PLTD yang dilakukan menunjukkan adanya peningkatan signifikan dalam aspek teknis dan ekonomi dibandingkan sistem konvensional berbasis diesel-only. Dampak teknis utamanya adalah berkurangnya ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, yang selama ini menjadi tantangan utama dalam sistem kelistrikan di daerah terpencil seperti Pulau Enggano. Penggunaan energi terbarukan dari sistem PLTS secara langsung menurunkan konsumsi bahan bakar tahunan hingga lebih dari 37%. Selain itu, jam

operasi generator diesel dapat dikurangi, sehingga memperpanjang umur teknis peralatan dan menurunkan frekuensi pemeliharaan.

Dari sisi ekonomi, penurunan konsumsi BBM berkontribusi langsung terhadap pengurangan biaya operasional tahunan. Pada sistem diesel-only, biaya bahan bakar mencapai lebih dari Rp 21 miliar per tahun. Dengan penerapan sistem hybrid, biaya tersebut dapat ditekan hingga sekitar Rp 13,7 miliar, menghasilkan penghematan lebih dari Rp 7 miliar setiap tahun. Penggunaan baterai sebagai penyimpanan energi turut menstabilkan sistem kelistrikan dan memungkinkan pemanfaatan maksimum dari output PLTS, terutama pada saat beban puncak malam hari. Kombinasi teknologi ini secara keseluruhan memberikan biaya energi (LCOE) yang lebih rendah dan mendekati keekonomian sistem grid modern.



Gambar 22 Hasil Perbandingan Ekonomi

Perbandingan antara sistem PLTD-only dan sistem *hybrid* PLTS–PLTD yang ditampilkan dalam fitur Compare Economics pada HOMER Pro menunjukkan bahwa sistem *hybrid* menawarkan efisiensi dan kelayakan ekonomi yang jauh lebih tinggi. Meskipun memerlukan investasi awal yang lebih besar, sistem *hybrid* menghasilkan penghematan biaya yang signifikan dalam jangka panjang.

Nilai Net Present Cost (NPC) sistem *hybrid* sebesar Rp 259 miliar lebih rendah dibandingkan dengan sistem diesel-only yang mencapai Rp 347 miliar. Ini menunjukkan adanya penghematan total sebesar Rp 88 miliar selama 25 tahun umur proyek.

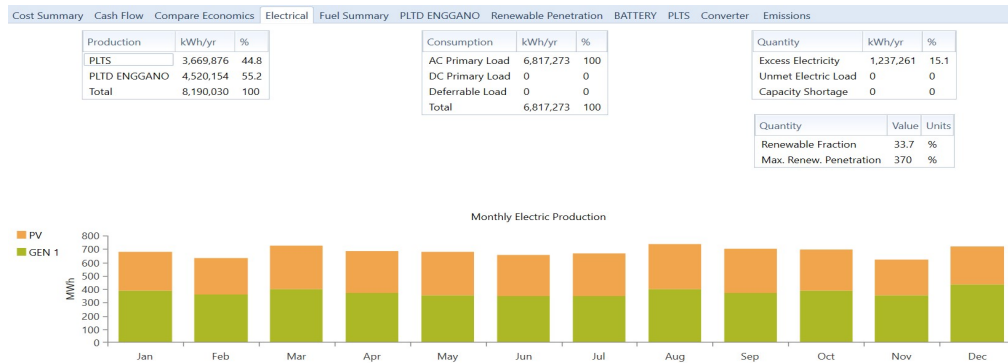
Dari sisi kelayakan investasi, sistem *hybrid* menunjukkan performa sangat baik dengan nilai Return on Investment (ROI) sebesar 23,5%, Internal Rate of Return (IRR) sebesar 28,1%, dan simple payback period selama 3,56 tahun. Bahkan setelah memperhitungkan diskonto, waktu pengembalian investasi hanya 3,98 tahun.

Annual worth atau keuntungan bersih tahunan dari sistem *hybrid* adalah sebesar Rp 6,8 miliar. Nilai ini memberikan kepastian finansial atas keuntungan yang dapat dicapai setiap tahun jika proyek ini dijalankan. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sistem *hybrid* PLTS–PLTD bukan hanya layak diterapkan dari sisi teknis dan lingkungan, tetapi juga sangat menjanjikan secara ekonomi. Ini menjadi justifikasi kuat untuk mengimplementasikan sistem serupa di wilayah-wilayah terpencil lainnya.

Dengan NPC yang lebih rendah dan kontribusi energi bersih yang meningkat, penerapan sistem *hybrid* juga mendukung kebijakan transisi energi nasional serta pengurangan emisi karbon. Hal ini menjadikan sistem PLTS–PLTD sebagai solusi yang tidak hanya andal, tetapi juga berkelanjutan untuk wilayah kepulauan.

IV.5 ANALISIS HASIL PRODUKSI SISTEM *HYBRID*

Hasil simulasi sistem *hybrid* PLTS–PLTD menunjukkan komposisi energi yang relatif seimbang antara energi terbarukan (PLTS) dan konvensional (PLTD). Berdasarkan data dari perangkat lunak HOMER Pro, produksi energi tahunan PLTS mencapai 3.669.876 kWh atau sebesar 44,8%, sedangkan PLTD memproduksi 4.520.154 kWh atau 55,2% dari total kebutuhan sistem sebesar 8.190.030 kWh per tahun.



Gambar 23 Hasil produksi energi sistem Hybrid

Seluruh kebutuhan beban (AC Load) sebesar 6.817.273 kWh/tahun berhasil terpenuhi 100% tanpa ada unmet load atau capacity shortage, yang menandakan sistem ini sangat andal dalam memasok listrik selama 24 jam. Tidak adanya gangguan pasokan listrik menandakan bahwa integrasi komponen baterai dan inverter berjalan optimal dalam mendukung kerja PLTS maupun PLTD. Sistem menghasilkan energi surplus sebesar 1.237.261 kWh atau sekitar 15,1%. Surplus ini terjadi saat produksi PLTS melebihi kapasitas baterai dan beban sistem. Kondisi ini bisa dimanfaatkan secara lebih produktif melalui strategi pemanfaatan beban fleksibel, seperti penyimpanan energi termal atau pengisian kendaraan listrik.

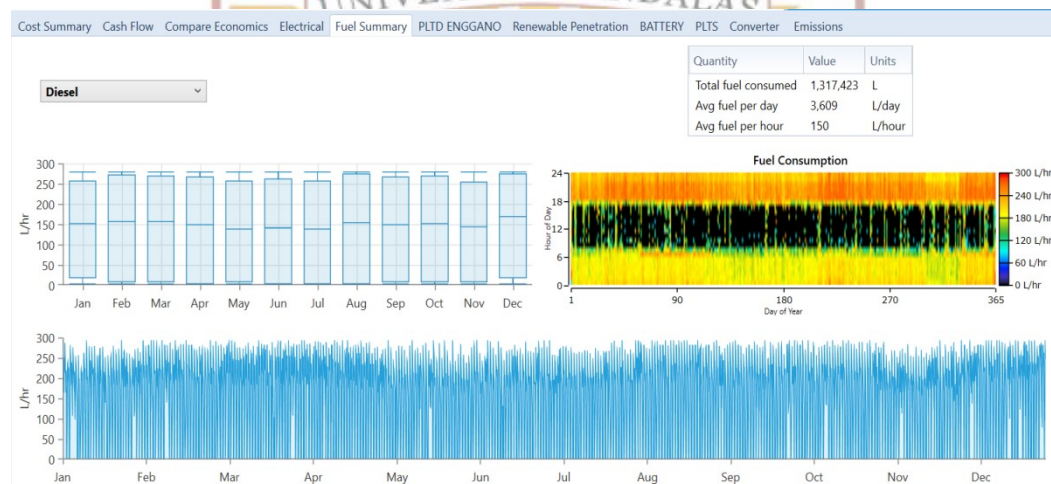
Nilai renewable fraction sebesar 33,7% menunjukkan bahwa lebih dari sepertiga energi sistem berasal dari sumber energi terbarukan. Hal ini mencerminkan kontribusi signifikan dari PLTS terhadap dekarbonisasi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Sementara itu, maksimum penetrasi energi terbarukan mencapai 370%, artinya pada waktu tertentu produksi dari PLTS sangat tinggi melebihi kebutuhan beban sistem. Grafik produksi bulanan menunjukkan fluktuasi produksi yang tetap stabil sepanjang tahun, dengan kontribusi terbesar dari PLTS terjadi pada bulan Agustus dan Desember.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sistem *hybrid* yang dirancang tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan energi dengan baik, tetapi

juga memberikan peluang besar untuk meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan di masa depan.

IV.6 ANALISIS KONSUMSI BAHAN BAKAR SISTEM *HYBRID*

Berdasarkan hasil simulasi HOMER Pro, konsumsi bahan bakar sistem *hybrid* PLTS–PLTD pada Pulau Enggano menunjukkan efisiensi yang cukup tinggi dalam operasional tahunannya. Total bahan bakar yang dikonsumsi selama satu tahun adalah sebesar 1.317.423 liter, dengan rata-rata konsumsi per hari sebesar 3.609 liter dan konsumsi rata-rata per jam sebesar 150 liter.



Gambar 24 Hasil Konsumsi Bahan Bakar

Grafik boxplot konsumsi bulanan menunjukkan variasi konsumsi bahan bakar antara 100 hingga 280 liter per jam, dengan rata-rata tertinggi terjadi pada bulan Februari dan Desember. Ini mengindikasikan beban puncak yang lebih tinggi pada bulan tersebut atau kontribusi PLTS yang lebih rendah akibat cuaca.

Peta warna intensitas konsumsi menunjukkan bahwa konsumsi tertinggi terjadi pada malam hari antara pukul 18:00 hingga 05:00, saat produksi PLTS minimal dan beban rumah tangga mencapai puncaknya. Sementara pada siang hari, konsumsi bahan bakar relatif rendah karena energi disuplai langsung dari PLTS. Grafik konsumsi bahan bakar per jam selama satu tahun penuh menunjukkan kestabilan pola penggunaan PLTD, dengan ritme yang cukup konsisten. Tidak

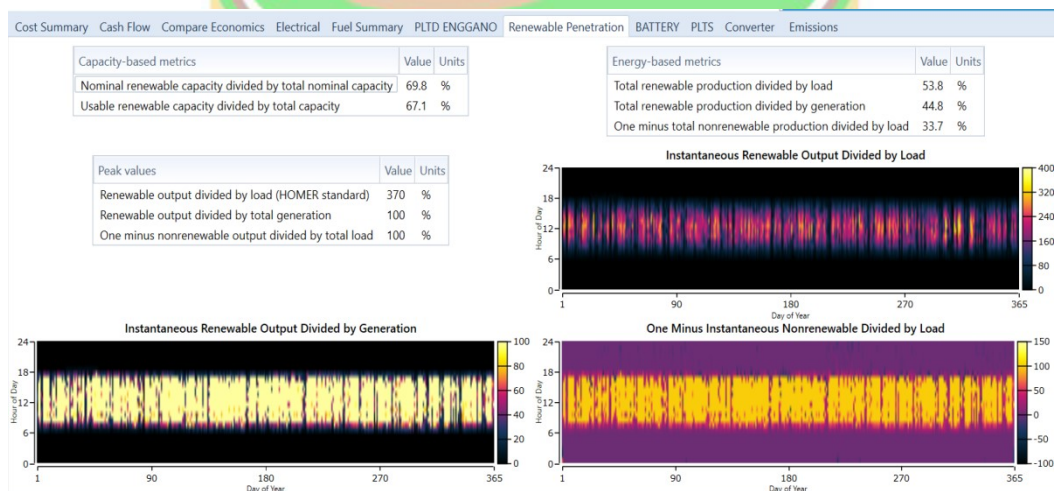
ditemukan lonjakan konsumsi yang ekstrem, menandakan bahwa sistem berjalan dalam kondisi yang stabil dan terkontrol.

Jika dibandingkan dengan sistem PLTD-only yang rata-rata mengonsumsi lebih dari 2 juta liter per tahun, maka penggunaan sistem *hybrid* ini menghasilkan penghematan bahan bakar sebesar lebih dari 600.000 liter per tahun, atau setara dengan pengurangan konsumsi lebih dari 30%.

Hasil ini memperkuat bahwa strategi integrasi PLTS dan manajemen operasi cycle charging memberikan dampak langsung terhadap pengurangan konsumsi bahan bakar. Ke depannya, konsumsi ini dapat ditekan lebih lanjut dengan menambah kapasitas baterai serta mengoptimalkan pengaturan prioritas pembangkitan.

IV.7 ANALISIS PENETRASI ENERGI TERBARUKAN SISTEM *HYBRID*

Berdasarkan simulasi HOMER Pro, sistem *hybrid* PLTS–PLTD di Pulau Enggano memiliki tingkat penetrasi energi terbarukan yang cukup tinggi. Secara kapasitas, sebesar 69,8% dari total kapasitas nominal sistem berasal dari sumber energi terbarukan (PLTS), dan sekitar 67,1% dari kapasitas tersebut dapat digunakan secara efektif dalam sistem.



Gambar 25 Hasil Penetrasi Energi Terbarukan

Dari sisi produksi energi, PLTS menyumbang 53,8% dari total beban yang dikonsumsi selama satu tahun, dan mewakili 44,8% dari total energi yang dihasilkan oleh sistem. Sementara sisanya dihasilkan oleh generator diesel (PLTD).

Pada momen-momen tertentu, khususnya siang hari saat radiasi matahari maksimal, output energi terbarukan mampu mencapai 370% dari beban sesaat. Hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTS mampu menghasilkan energi jauh di atas kebutuhan, tetapi kelebihan ini tidak seluruhnya dapat dimanfaatkan karena keterbatasan penyimpanan (baterai) atau konsumsi beban.

Peta warna hasil simulasi menunjukkan bahwa energi dari PLTS mendominasi suplai beban pada jam 09:00 hingga 15:00, dengan intensitas produksi tinggi. Sementara pada malam hari (pukul 18:00 hingga 06:00), PLTD masih menjadi sumber utama pasokan listrik.

Rasio energi terbarukan terhadap total beban sesaat maupun total pembangkitan mendekati 100% pada jam-jam tertentu. Namun demikian, secara keseluruhan, hanya sekitar sepertiga (33,7%) dari total konsumsi beban tahunan yang tidak berasal dari bahan bakar fosil.

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai tingkat penetrasi energi terbarukan yang baik, namun masih menyisakan ruang untuk perbaikan. Dengan penambahan kapasitas baterai, pemanfaatan beban fleksibel, dan pengaturan manajemen energi yang lebih adaptif, penetrasi energi terbarukan dapat ditingkatkan lebih jauh untuk mencapai *Hybrid* sistem yang lebih hemat, bersih, dan berkelanjutan.

IV.8 ANALISIS EMISIS GAS BUANG SISTEM HYBRID

Berdasarkan hasil simulasi HOMER Pro, sistem *hybrid* PLTS–PLTD menghasilkan sejumlah emisi gas buang sebagai akibat dari operasi generator diesel. Total emisi tahunan yang dihasilkan antara lain: 3.445.827 kg CO₂, 23.442 kg CO, 949 kg unburned hydrocarbons, 93,8 kg particulate matter (PM), 8.445 kg SO₂, dan 1.875 kg NO_x.

PLTD ENGGANO Renewable Penetration BATTERY PLTS Converter Emissions		
Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	3,445,827	kg/yr
Carbon Monoxide	23,442	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	949	kg/yr
Particulate Matter	93.8	kg/yr
Sulfur Dioxide	8,445	kg/yr
Nitrogen Oxides	1,875	kg/yr

Gambar 26 Skenario Emisi Karbon

Emisi karbon dioksida (CO₂) masih merupakan yang terbesar, mencapai lebih dari 3.400 ton per tahun. Meskipun angka ini cukup besar, nilai tersebut menunjukkan adanya pengurangan signifikan dari sistem diesel-only, yang biasanya menghasilkan lebih dari 5.000 ton CO₂ per tahun dalam sistem dengan beban sebanding. Karbon monoksida (CO) dan unburned hydrocarbons menunjukkan hasil dari pembakaran yang tidak sempurna pada mesin diesel, sedangkan particulate matter (PM) dan sulfur dioxide (SO₂) berkontribusi terhadap pencemaran udara lokal dan gangguan kesehatan pernapasan.

Nilai nitrogen oxides (NO_x) sebesar 1.875 kg/tahun menunjukkan efek dari suhu tinggi pada proses pembakaran dalam mesin diesel. Meskipun sistem *hybrid* telah mengurangi durasi dan intensitas penggunaan PLTD, emisi-emisi ini masih muncul dan relevan untuk ditangani. Untuk menurunkan dampak emisi secara keseluruhan, disarankan untuk menambah kapasitas PLTS, meningkatkan kapasitas penyimpanan energi, menggunakan bahan bakar rendah sulfur, dan menerapkan teknologi pembakaran bersih (clean combustion). Dengan menurunnya emisi ini, sistem *hybrid* berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim dan mendukung kebijakan transisi energi bersih di wilayah kepulauan terpencil.

IV.9 IMPLIKASI TERHADAP KEBIJAKAN ENERGI TERBARUKAN

Implementasi sistem *hybrid* PLTS–PLTD di Pulau Enggano memiliki implikasi yang luas terhadap arah kebijakan energi nasional, terutama dalam konteks percepatan transisi energi dan peningkatan rasio elektrifikasi di wilayah terpencil. Keberhasilan simulasi dan potensi penghematan biaya energi membuktikan bahwa sistem *hybrid* dapat menjadi alternatif nyata dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Salah satu poin penting dari hasil studi ini adalah bahwa sistem *hybrid* tidak hanya layak secara teknis dan ekonomis, tetapi juga mendukung pencapaian target penurunan emisi karbon sebagaimana diamanatkan dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Integrasi PLTS secara signifikan mampu menurunkan emisi gas rumah kaca dan mendukung implementasi energi bersih di kawasan 3T (tertinggal, terdepan, dan terluar). Selain itu, keberhasilan sistem ini di Enggano dapat menjadi pilot project untuk pulau-pulau kecil lainnya di Indonesia. Dengan dukungan kebijakan fiskal, seperti subsidi infrastruktur energi terbarukan dan insentif pembebasan pajak untuk impor modul surya atau baterai, replikasi proyek sejenis dapat dilakukan secara lebih luas dan efisien.

Dari sisi regulasi, hasil studi ini juga mendukung pentingnya revisi regulasi tarif pembelian listrik dari sistem *hybrid* oleh PLN, terutama di sistem isolated grid. Penyesuaian kebijakan ini akan mendorong investasi swasta maupun BUMN dalam pengembangan energi terbarukan di wilayah yang belum terjangkau jaringan interkoneksi. Secara keseluruhan, integrasi sistem *hybrid* di Pulau Enggano dapat dijadikan referensi kebijakan nasional sebagai model sistem kelistrikan yang efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap kondisi geografis dan ekonomi lokal.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 KESIMPULAN

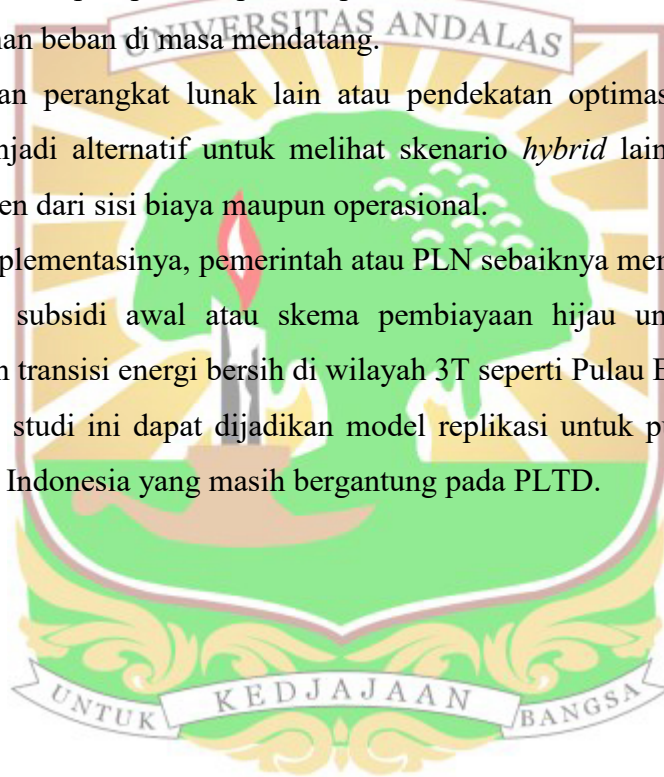
Berdasarkan hasil kajian dan simulasi yang telah dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro terhadap sistem *hybrid* PLTS–PLTD di Pulau Enggano, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Analisis profil beban menunjukkan bahwa Pulau Enggano mengalami pertumbuhan konsumsi energi sebesar 3% per tahun. Proyeksi kebutuhan daya tahun 2049 mencapai ± 1.500 kW, yang menuntut sistem pembangkitan yang lebih efisien dan handal.
2. Evaluasi potensi energi surya berdasarkan data HOMER Pro menunjukkan rata-rata iradiasi tahunan 4,91 kWh/m²/hari. Hal ini menegaskan bahwa Pulau Enggano memiliki potensi teknis yang sangat memadai untuk pengembangan PLTS skala besar.
3. Simulasi HOMER Pro menghasilkan konfigurasi sistem *hybrid* PLTS–PLTD optimal dengan kapasitas 2.316 kW PLTS, 1.000 kW PLTD, 1.119 unit baterai, dan inverter 1.250 kW. Sistem ini dirancang untuk memaksimalkan efisiensi dengan strategi *cycle charging*.
4. Sistem *hybrid* mampu menurunkan konsumsi BBM lebih dari 37% dan menghemat biaya operasional sebesar Rp7 miliar per tahun. LCOE turun dari Rp3.935/kWh (*PLTD-only*) menjadi Rp2.936/kWh. ROI sebesar 23,5% dan IRR sebesar 28% membuktikan kelayakan ekonominya.
5. Sistem *hybrid* PLTS–PLTD terbukti efektif dalam menekan emisi karbon sebesar 35% dan menciptakan suplai energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem ini layak dijadikan model nasional untuk elektrifikasi wilayah 3T yang belum terjangkau jaringan PLN.

V.2 SARAN

Dari hasil Kajian dan simulasi yang telah dilakukan, beberapa saran dapat disampaikan untuk implementasi dan pengembangan selanjutnya:

1. Diperlukan studi lanjutan untuk mempertimbangkan pengaruh musiman iradiasi matahari dan fluktuasi beban harian dalam skala yang lebih rinci, guna meningkatkan akurasi prediksi kinerja sistem *hybrid*.
2. Perlu adanya perencanaan kapasitas baterai dan inverter yang lebih fleksibel agar sistem tetap dapat beroperasi optimal dalam kondisi cuaca ekstrem atau penambahan beban di masa mendatang.
3. Penggunaan perangkat lunak lain atau pendekatan optimasi multi-objektif dapat menjadi alternatif untuk melihat skenario *hybrid* lain yang mungkin lebih efisien dari sisi biaya maupun operasional.
4. Dalam implementasinya, pemerintah atau PLN sebaiknya mempertimbangkan dukungan subsidi awal atau skema pembiayaan hijau untuk mendorong percepatan transisi energi bersih di wilayah 3T seperti Pulau Enggano.
5. Hasil dari studi ini dapat dijadikan model replikasi untuk pulau-pulau kecil lainnya di Indonesia yang masih bergantung pada PLTD.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Singh and S. Singh, "Optimization of Hybrid Power Systems: Integration of Solar and Diesel Generators in Remote Areas," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 15–24, 2019.
- [2] D. Yildirim, H. Aksoy, and U. Kose, "Hybrid System Optimization for Rural Electrification: A Case Study of Solar-Diesel Hybrid System," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 543–553, 2020.
- [3] O. Adebayo and O. Olasunkanmi, "Energy Hybrid Systems for Remote Areas: A Review of Solar-Diesel Integration in Sub-Saharan Africa," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110124, 2021.
- [4] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.
- [5] H. Jouhara and M. Behnia, "Techno-Economic and Environmental Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems for Sustainable Development in Remote Areas," *Journal of Cleaner Production*, vol. 183, pp. 1–12, 2018.
- [6] H. Darwanto, *Sistem Pembangkit Tenaga Diesel*. Yogyakarta: Deepublish, 2019.
- [7] A. Fachrizal, "Kajian Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 107–114, 2017.
- [8] D. A. K. Sari, "Optimasi sistem pembangkit listrik tenaga hibrid di Pulau Enggano," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 2022.
- [9] U. Hasanudin, *Teknologi Sistem Energi Surya: Teori dan Aplikasi*. Yogyakarta: Gava Media, 2019.
- [10] M. R. Irawan, *Implementasi dan Analisis Kinerja Sistem PLTS Terpusat*. Jakarta: Kementerian ESDM, 2020.
- [11] F. Irawan and R. Utomo, "Analisis Kelayakan Operasi PLTD pada Daerah Terpencil," *Jurnal Energi dan Lingkungan*, vol. 12, no. 2, pp. 88–95, 2021.
- [12] M. A. Putra and M. Rafiq, "Hybrid PLTS-PLTD Optimization using HOMER," *Renewable Energy Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 32–41, 2020.
- [13] H. Ratri and A. Kurniawan, "Analisis Kinerja Sistem PLTS," *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, vol. 13, no. 2, pp. 45–52, 2021.
- [14] G. N. Tiwari and S. Dubey, *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2010.

[15] V. Smil, *Energy and Civilization: A History*. Cambridge, MA: MIT Press, 2017, pp. 383–387.

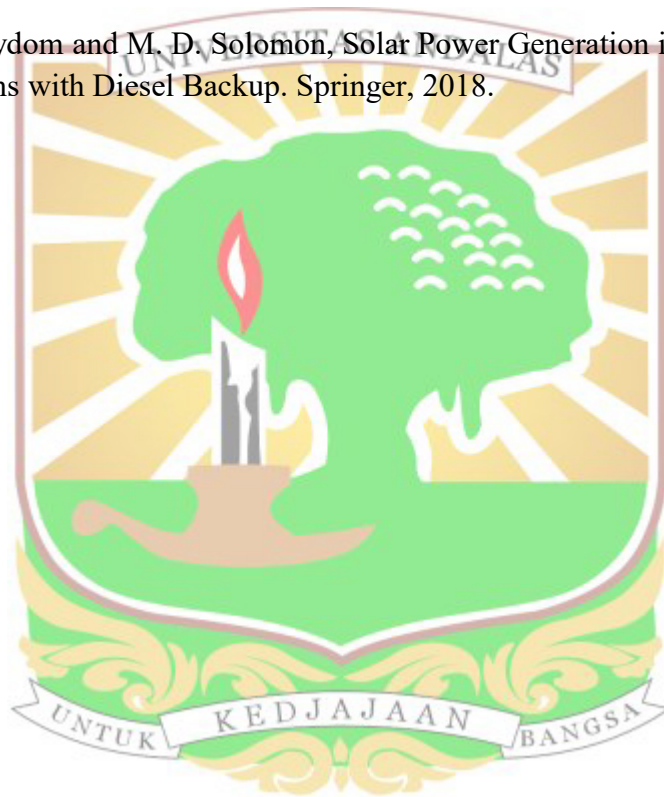
[16] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*. London: Imperial College Press, 2003.

[17] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.

[18] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006.

[19] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, and R. Corkish, *Applied Photovoltaics*, 2nd ed. London: Earthscan, 2007.

[20] A. G. Strydom and M. D. Solomon, *Solar Power Generation in Remote Areas: Hybrid Systems with Diesel Backup*. Springer, 2018.



LAMPIRAN

MONITORING SFC PLTD TERSEBAR PLN UP3 BENGKULU 2024



**PT PLN (Persero)
UP3 BENGKULU**

Monitoring SFC (Specific Fuel Consumption) PLTD Tersebar UP3 Bengkulu

TAHUN 2024						
No	Bulan	PLTD	Jumlah Penerimaan BBM	Jumlah Pemakaian BBM	Jumlah kwh produksi	SFC
			(Liter)	(Liter)	(kwh)	(L/Kwh)
1	Januari	Mukomuko	631,913	621,516	2,298,510.16	0.27039950
		Ipuh	423,450	402,403	1,455,160.00	0.27653523
		Kota Bani	257,670	269,050	922,663.20	0.29160153
		Enggano	79,945	37,615	125,197.96	0.30044419
2	Februari	Mukomuko	-	-	-	
		Ipuh	323,550	323,897	1,174,609.00	0.27574878
		Kota Bani	296,295	287,045	967,236.00	0.29676832
		Enggano	-	37,885	124,453.040	0.30441201
3	Maret	Mukomuko	-	-		
		Ipuh	371,520	396,757	1,463,245.00	0.27114871
		Kota Bani	306,183	313,755	1,057,880.80	0.29658824
		Enggano	-	39,320	127,880.00	0.30747576
4	April	Mukomuko	-	-		
		Ipuh	435,420	406,186	1,489,780.00	0.27264831
		Kota Bani	299,610	294,390	999,876.00	0.29442651
		Enggano	105,840	39,070	126,484.00	0.30889282
5	Mei	Mukomuko	-	-		
		Ipuh	441,405	479,837	1,737,660.00	0.27613975
		Kota Bani	340,646	343,180	1,166,467.20	0.29420459
		Enggano	-	43,600	141,704.000	0.30768362
6	Juni	Mukomuko	-	-		
		Ipuh	421,425	453,841	1,636,500.00	0.27732417
		Kota Bani	353,652	330,560	1,139,568.80	0.29007463
		Enggano	41,940	40,855	133,655.60	0.30567369
7	Juli	Mukomuko	-	-	-	

		Ipuh	-	-		
		Kota Bani	667,180	665,424	2,410,207.20	0.27608581
		Enggano	81,910	43,190	141,696.00	0.30480748
8	Agustus	Mukomuko	-	-	-	
		Ipuh	-	-	-	
		Kota Bani	644,830	599,172	2,084,400.00	0.28745538
		Enggano	25,972	43,875	144,784.00	0.30303763
9	September	Mukomuko	-	-	-	
		Ipuh	-	-	-	
		Kota Bani	583,280	574,528	2,062,007.20	0.27862560
		Enggano	47,940	40,715	136,072.00	0.29921659
10	Oktober	Mukomuko	-	-		
		Ipuh	-	-		
		Kota Bani	624,260	629,975	2,262,608.00	0.27842870
		Enggano	-	43,350	144,949.36	0.29906996
11	Nopember	Mukomuko	-	-		
		Ipuh	-	-		
		Kota Bani	583,300	580,061	2,085,505.60	0.27813927
		Enggano	82,905	41,878	139,996.00	0.29913712
12	Desember	Mukomuko	-	-	-	
		Ipuh	-	-	-	
		Kota Bani	577,290	588,618	2,110,240.00	0.27893415
		Enggano	-	40,125	133,916.000	0.29962813
Total			9,049,331	9,051,673	32,144,912	0.28158960
A	TOTAL	Mukomuko	631,913	621,516	2,298,510	0.27039950
		Ipuh	2,416,770	2,462,921	8,956,954	0.27497305
		Kota Bani	5,534,196	5,475,758	19,268,660	0.28417949
		Enggano	466,452	491,478	1,620,788	0.30323399
			9,049,331	9,051,673	32,144,912	0.28158960