

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Eksisting Sistem Kelistrikan PLTD Gili Ketapang

4.1.1 Gambaran Umum Sistem Kelistrikan

Pulau Gili Ketapang merupakan wilayah kepulauan yang terletak di Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur, dengan sistem kelistrikan yang masih bersifat terisolasi (*isolated system*) dan belum terhubung dengan jaringan interkoneksi Jawa–Bali. Kebutuhan energi listrik masyarakat Pulau Gili Ketapang sepenuhnya dipasok oleh Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yang dikelola oleh PT PLN (Persero). Energi listrik digunakan untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga, fasilitas umum, kegiatan perdagangan, perikanan, serta berbagai aktivitas ekonomi masyarakat yang terus berkembang setiap tahunnya. Seiring meningkatnya jumlah pelanggan dan penggunaan peralatan listrik, kebutuhan energi listrik di Pulau Gili Ketapang mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Kondisi tersebut menyebabkan konsumsi bahan bakar solar pada PLTD juga meningkat karena seluruh kebutuhan energi masih bergantung pada mesin diesel. Selain itu, biaya pengadaan dan distribusi bahan bakar menuju pulau relatif tinggi sehingga berdampak pada meningkatnya biaya operasional pembangkit. Sistem distribusi tenaga listrik di Pulau Gili Ketapang menggunakan jaringan distribusi tegangan menengah yang disalurkan dari gardu pembangkit menuju gardu distribusi dan selanjutnya didistribusikan kepada pelanggan. Sistem distribusi ini dirancang untuk melayani seluruh kawasan pemukiman dan pusat kegiatan masyarakat sehingga kontinuitas pasokan listrik dapat terjaga. Namun demikian, tingginya ketergantungan terhadap PLTD menjadikan sistem kelistrikan

rentan terhadap kenaikan harga bahan bakar serta gangguan operasional mesin pembangkit. Guna meningkatkan efisiensi operasional serta mendukung pemanfaatan energi terbarukan, direncanakan pengembangan sistem *hybrid* berupa integrasi PLTD eksisting dengan PLTS berkapasitas 300 kWp dan *Battery Energy Storage System* (BESS) yang telah tersedia. Pengembangan ini diharapkan mampu mengurangi konsumsi bahan bakar solar, menurunkan biaya pokok produksi listrik, serta meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di Pulau Gili Ketapang.

4.1.2 Sistem Pembangkit Eksisting

Sistem pembangkitan tenaga listrik yang saat ini beroperasi di Pulau Gili Ketapang terdiri dari dua unit generator diesel dan satu unit *Battery Energy Storage System* (BESS). Kedua unit generator diesel digunakan sebagai sumber utama pembangkitan energi listrik, sedangkan BESS berfungsi sebagai sistem penyimpanan energi dan penunjang kestabilan operasi pembangkit.

1. PLTD Unit 1 Kapasitas Daya Terpakai 500 kW

PLTD Unit 1 memiliki kapasitas daya terpakai sebesar 500 kW dan berfungsi sebagai sumber daya utama dalam melayani kebutuhan listrik pelanggan. Unit ini beroperasi secara kontinyu mengikuti pola beban harian sistem. Pada kondisi beban rendah, PLTD Unit 1 dapat beroperasi secara tunggal untuk melayani kebutuhan pelanggan. Namun pada saat terjadi peningkatan beban, unit ini bekerja secara paralel dengan PLTD Unit 2 untuk menjaga kecukupan daya sistem.

2. PLTD Unit 2 Daya Terpakai 500 kW

PLTD Unit 2 juga memiliki kapasitas daya terpakai sebesar 500 kW. Unit ini berfungsi sebagai pembangkit

pendukung sekaligus cadangan operasional apabila terjadi pemeliharaan atau gangguan pada Unit 1. Dalam kondisi beban puncak, kedua unit diesel dioperasikan secara bersamaan untuk memenuhi kebutuhan daya pelanggan yang meningkat.

3. *Battery Energy Storage System* (BESS) Kapasitas 160 kW

Selain PLTD, sistem kelistrikan Gili Ketapang telah dilengkapi dengan *Battery Energy Storage System* (BESS) berkapasitas 160 kW. BESS berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang kemudian dapat digunakan kembali saat diperlukan. Sistem ini juga membantu menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi jaringan serta mengurangi fluktuasi beban pada mesin diesel.

Tabel 4.1 Spesifikasi Pembangkit Eksisting

Komponen	Kapasitas Daya Terpakai	Kapasitas Daya Terpasang
PLTD Unit 1	500 kW	700 kW
PLTD Unit 2	500 kW	700 kW
BESS	160 kW	170 kW
Total Kapasitas PLTD	1.000 kW	
Rencana PLTS	300 kWp	

Berdasarkan Tabel 4.1, sistem pembangkitan listrik yang saat ini beroperasi di Pulau Gili Ketapang terdiri dari dua unit Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dengan kapasitas masing-masing sebesar 500 kW dan satu unit *Battery Energy Storage System* (BESS) berkapasitas 160 kW. Total kapasitas pembangkit diesel yang tersedia mencapai 1.000 kW, sehingga secara teknis mampu memenuhi kebutuhan beban listrik masyarakat Pulau Gili Ketapang. Kedua unit PLTD berfungsi sebagai sumber utama energi listrik, sedangkan BESS digunakan sebagai sistem penyimpanan

energi untuk membantu menjaga kestabilan suplai daya dan meningkatkan keandalan operasi sistem kelistrikan. Meskipun kapasitas pembangkit yang tersedia cukup untuk melayani kebutuhan beban pelanggan, sistem kelistrikan masih bergantung pada penggunaan bahan bakar solar sebagai sumber energi utama. Ketergantungan tersebut menyebabkan biaya operasional pembangkit relatif tinggi karena konsumsi bahan bakar yang terus meningkat seiring pertumbuhan kebutuhan listrik. Oleh karena itu, direncanakan penambahan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 300 kWp sebagai bagian dari pengembangan sistem *hybrid*. Integrasi PLTS dengan PLTD dan BESS diharapkan dapat mengurangi penggunaan bahan bakar diesel, meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, serta menurunkan biaya pokok produksi listrik di Pulau Gili Ketapang.



Gambar 4.1 PLTD mesin Cumins dengan Kapasitas Daya
Terpasang 700 kW
(dokumen pribadi, 21 Mei 2026)



Gambar 4.2 Foto BESS
(dokumen pribadi, 21 Mei 2026)

5. Sistem Operasi Pembangkit Saat Ini

Pada kondisi eksisting, operasi sistem kelistrikan masih didominasi oleh penggunaan PLTD. Kedua unit generator diesel dioperasikan secara bergantian maupun paralel sesuai dengan kebutuhan beban pelanggan. Ketika beban meningkat mendekati kapasitas satu unit generator, maka unit diesel lainnya akan dioperasikan untuk berbagi beban sehingga keandalan pasokan listrik tetap terjaga. Pola operasi tersebut menyebabkan konsumsi bahan bakar solar relatif tinggi karena energi listrik sepenuhnya dihasilkan oleh mesin diesel. Selain itu, jam operasi mesin yang panjang juga meningkatkan biaya pemeliharaan dan mempercepat penurunan umur peralatan.

6. Sistem *Charging* BESS oleh PLTD

Pada kondisi saat ini, proses pengisian energi (*charging*) BESS masih dilakukan menggunakan energi yang berasal dari PLTD. Ketika kapasitas pembangkit diesel mencukupi dan beban sistem relatif rendah, sebagian energi listrik digunakan untuk mengisi baterai. Energi yang tersimpan pada BESS kemudian dimanfaatkan kembali ketika terjadi lonjakan beban atau kebutuhan daya sesaat. Skema

pengisian BESS menggunakan PLTD ini belum memberikan penghematan bahan bakar yang signifikan karena energi yang disimpan pada baterai tetap berasal dari pembakaran bahan bakar diesel. Oleh karena itu, integrasi PLTS 300 kWp direncanakan agar proses *charging* BESS dapat dilakukan menggunakan energi surya sehingga konsumsi bahan bakar solar dapat ditekan secara optimal.

Tabel 4.2 Data Konsumsi BBM PLTD Gili Ketapang Tahun 2026

Bulan	Konsumsi BBM (Liter)
Januari	75.989
Februari	83.276
Maret	81.149

Berdasarkan Tabel 4.2, konsumsi bahan bakar minyak (BBM) pada PLTD Gili Ketapang selama periode Januari hingga Maret 2026 menunjukkan penggunaan yang relatif tinggi. Total konsumsi BBM pada bulan Januari tercatat sebesar 75.989 liter, meningkat menjadi 83.276 liter pada bulan Februari, dan sebesar 81.149 liter pada bulan Maret. Rata-rata konsumsi BBM selama tiga bulan pengamatan mencapai 80.138 liter per bulan. Tingginya konsumsi bahan bakar tersebut menunjukkan bahwa sistem kelistrikan di Pulau Gili Ketapang masih sangat bergantung pada pembangkit diesel sebagai sumber utama energi listrik.

Variasi konsumsi BBM setiap bulan dipengaruhi oleh perubahan kebutuhan beban listrik pelanggan, pola operasi unit pembangkit, serta durasi operasi masing-masing mesin diesel. Pada bulan Februari tercatat konsumsi BBM tertinggi karena adanya peningkatan penggunaan energi listrik yang mengakibatkan jam operasi mesin diesel menjadi lebih panjang. Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin besar energi listrik yang harus dipenuhi oleh PLTD, maka semakin besar pula

kebutuhan bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik tersebut. Tingginya konsumsi BBM berdampak langsung terhadap biaya operasional pembangkit, mengingat bahan bakar solar merupakan komponen biaya terbesar dalam pengoperasian PLTD. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil melalui pemanfaatan energi terbarukan. Salah satu alternatif yang direncanakan dalam penelitian ini adalah penambahan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 300 kWp yang terintegrasi dengan sistem *Battery Energy Storage System* (BESS). Dengan adanya PLTS, sebagian kebutuhan energi listrik pada siang hari dapat dipenuhi oleh energi surya sehingga konsumsi BBM dan biaya pokok produksi listrik dapat ditekan secara lebih optimal.

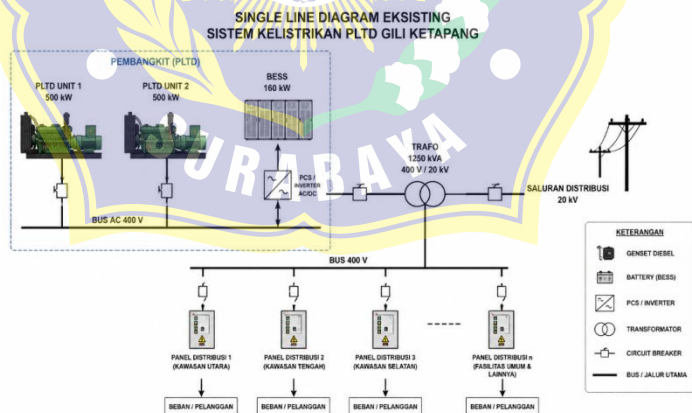
Tabel 4.3 Produksi Energi dan SFC PLTD

Bulan	Konsumsi BBM (Liter)	Produksi Energi (kWh)	SFC (Liter/kWh)
Januari 2026	75.989	281.441	0,270
Februari 2026	83.276	308.430	0,270
Maret 2026	81.149	300.552	0,270
Rata-rata	80.138	296.808	0,270

Berdasarkan Tabel 4.3, produksi energi listrik yang dihasilkan PLTD Gili Ketapang selama periode Januari hingga Maret 2026 mengalami fluktuasi mengikuti perubahan konsumsi bahan bakar minyak (BBM). Pada bulan Januari produksi energi listrik mencapai 281.441 kWh dengan konsumsi BBM sebesar 75.989 liter. Selanjutnya pada bulan Februari produksi energi meningkat menjadi 308.430 kWh seiring dengan kenaikan konsumsi BBM menjadi 83.276 liter. Pada bulan Maret produksi energi tercatat sebesar 300.552 kWh dengan konsumsi BBM sebesar 81.149 liter.

Nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC) selama periode pengamatan berada pada angka rata-rata 0,270 liter/kWh. Nilai tersebut menunjukkan bahwa untuk menghasilkan 1 kWh energi listrik diperlukan sekitar 0,27 liter bahan bakar solar. Semakin kecil nilai SFC maka semakin efisien kinerja pembangkit karena energi listrik yang dihasilkan lebih besar dibandingkan bahan bakar yang digunakan. Sebaliknya, nilai SFC yang tinggi menunjukkan efisiensi pembangkit yang rendah.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa PLTD Gili Ketapang masih memiliki ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan energi listrik masyarakat. Dengan rata-rata produksi energi sebesar 296.808 kWh per bulan dan konsumsi BBM mencapai 80.138 liter per bulan, biaya operasional pembangkit menjadi cukup besar. Oleh karena itu, integrasi sistem PLTS 300 kWp dengan *Battery Energy Storage System* (BESS) menjadi solusi yang potensial untuk mengurangi penggunaan BBM, meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan, serta menurunkan biaya produksi energi listrik di Pulau Gili Ketapang.



Gambar 4.3 Single Line Diagram Eksisting
Sumber: PT PLN (Persero) PLTD Gili Ketapang, 2025

4.2 Analisis Data Beban dan Kebutuhan Energi Listrik

4.2.1 Analisis Beban Harian

Analisis beban harian dilakukan untuk mengetahui karakteristik penggunaan energi listrik pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang. Data beban harian digunakan untuk mengidentifikasi pola konsumsi listrik pelanggan selama 24 jam, menentukan waktu terjadinya beban puncak, serta mengetahui tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit yang tersedia. Informasi ini sangat penting dalam perencanaan sistem *hybrid* PLTD–PLTS karena akan menentukan besarnya kontribusi energi surya yang dapat dimanfaatkan untuk mengurangi operasi mesin diesel.

1. Beban Puncak

Beban puncak merupakan nilai beban tertinggi yang terjadi dalam suatu periode operasi sistem kelistrikan. Berdasarkan hasil pengolahan data beban harian, beban puncak terjadi pada jam-jam tertentu ketika aktivitas masyarakat mencapai tingkat tertinggi, terutama pada malam hari saat penggunaan peralatan rumah tangga, penerangan, dan fasilitas umum meningkat secara bersamaan. Kondisi beban puncak menjadi salah satu parameter utama dalam perencanaan kapasitas pembangkit karena sistem harus mampu memenuhi kebutuhan daya maksimum tanpa mengurangi keandalan pasokan listrik. Pada kondisi eksisting, beban puncak masih dipenuhi oleh operasi PLTD sehingga diperlukan kapasitas pembangkit yang cukup untuk mengantisipasi lonjakan beban. Oleh karena itu, keberadaan PLTS dan BESS dalam sistem *hybrid* diharapkan dapat membantu mengurangi beban yang harus ditanggung oleh PLTD, khususnya pada periode transisi siang menuju malam.

Tabel 4.4 Data Beban Puncak Sistem Kelistrikan Gili Ketapang

Parameter	Nilai
-----------	-------

Beban Puncak	521 kW
Waktu Terjadi	07 Mei 2026 pukul 18.00 WIB

2. Beban Rata-rata

Beban rata-rata menunjukkan tingkat penggunaan daya listrik secara umum selama periode pengamatan. Nilai beban rata-rata diperoleh dari total energi listrik yang digunakan dalam satu hari dibagi dengan waktu operasi selama 24 jam. Parameter ini digunakan untuk mengetahui tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit yang tersedia. Apabila nilai beban rata-rata jauh lebih rendah dibandingkan kapasitas terpasang pembangkit, maka terdapat potensi peningkatan efisiensi operasi melalui pengaturan pola operasi generator. Pada sistem eksisting PLTD Gili Ketapang, beban rata-rata menjadi indikator penting untuk menentukan jumlah unit diesel yang perlu dioperasikan pada setiap kondisi beban. Dengan adanya PLTS 300 kWp, sebagian kebutuhan energi pada siang hari dapat dipenuhi oleh energi surya sehingga pembebanan generator diesel dapat dikurangi dan konsumsi bahan bakar menjadi lebih efisien.

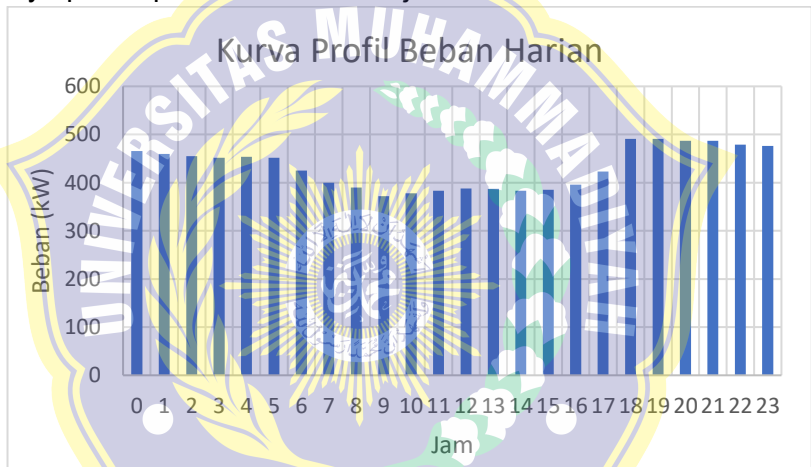
Tabel 4.5 Data Beban Rata-rata Sistem Kelistrikan Gili Ketapang

Parameter	Nilai
Beban Rata-rata	432,82 kW

3. Profil Beban Harian

Profil beban harian menggambarkan perubahan kebutuhan daya listrik pelanggan selama 24 jam. Profil ini menunjukkan pola naik dan turunnya beban yang dipengaruhi oleh aktivitas masyarakat pada waktu tertentu. Umumnya beban listrik berada pada kondisi rendah pada dini hari, mulai meningkat pada pagi hari, relatif stabil pada siang hari, dan mencapai nilai tertinggi pada malam hari. Hasil analisis profil beban harian menunjukkan

bahwa pola konsumsi listrik masyarakat Pulau Gili Ketapang memiliki karakteristik yang sesuai untuk penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS. Pada periode siang hari ketika intensitas radiasi matahari tinggi, PLTS dapat beroperasi secara optimal untuk menyuplai sebagian kebutuhan beban sekaligus mengisi BESS. Selanjutnya pada malam hari, energi yang tersimpan pada BESS dapat dimanfaatkan untuk membantu suplai daya sehingga operasi PLTD dapat diminimalkan. Dengan strategi tersebut, penggunaan bahan bakar solar dapat dikurangi dan biaya pokok produksi listrik menjadi lebih rendah.



Gambar 4.4 Kurva Profil Beban Harian Sistem Kelistrikan Gili Ketapang

Berdasarkan hasil pengolahan data beban harian sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang, diperoleh nilai beban puncak sebesar 491 kW yang terjadi pada pukul 18.00 WIB. Kondisi ini menunjukkan bahwa kebutuhan daya listrik tertinggi terjadi pada periode sore hingga malam hari ketika aktivitas masyarakat meningkat, terutama untuk kebutuhan penerangan rumah tangga dan penggunaan peralatan listrik lainnya. Sementara itu, nilai beban rata-rata sebesar 432,82 kW menunjukkan tingkat

penggunaan daya listrik secara umum selama periode pengamatan. Apabila dibandingkan dengan beban puncaknya, terlihat bahwa sistem memiliki variasi beban yang cukup signifikan antara periode beban rendah dan periode beban tinggi. Informasi ini menjadi dasar dalam menentukan strategi operasi pembangkit agar dapat bekerja secara lebih efisien.

Profil beban harian menunjukkan bahwa kebutuhan daya listrik cenderung menurun pada pagi hingga siang hari dengan nilai terendah berada pada rentang pukul 08.00–10.00 WIB. Setelah itu, beban mulai meningkat pada sore hari dan mencapai nilai tertinggi pada pukul 18.00–21.00 WIB. Pola ini sesuai dengan karakteristik sistem kelistrikan daerah pemukiman yang didominasi oleh konsumsi listrik rumah tangga. Karakteristik profil beban tersebut menunjukkan bahwa penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS sangat berpotensi meningkatkan efisiensi operasi pembangkit. Pada siang hari, energi yang dihasilkan PLTS dapat digunakan untuk memenuhi sebagian kebutuhan beban sekaligus mengisi BESS. Selanjutnya pada malam hari, energi yang tersimpan dalam BESS dapat dimanfaatkan untuk membantu menyuplai beban puncak sehingga konsumsi bahan bakar diesel dapat dikurangi. Dengan demikian, integrasi PLTS 300 kWp dan BESS diharapkan mampu menurunkan biaya operasi pembangkit serta meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.

4.2.2 Analisis Konsumsi Energi

Analisis konsumsi energi dilakukan untuk mengetahui besarnya kebutuhan energi listrik pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang selama periode pengamatan. Analisis ini meliputi konsumsi energi harian, konsumsi energi bulanan, serta pertumbuhan kebutuhan energi listrik. Hasil analisis digunakan

sebagai dasar dalam menentukan kapasitas pembangkit dan sistem penyimpanan energi yang optimal pada skenario integrasi PLTS 300 kWp dan *Battery Energy Storage System* (BESS).

1. Konsumsi Energi Harian

Konsumsi energi harian merupakan total energi listrik yang digunakan oleh pelanggan dalam satu hari. Nilai konsumsi energi harian diperoleh dari penjumlahan energi listrik setiap jam selama periode 24 jam. Parameter ini menunjukkan besarnya kebutuhan energi yang harus dipenuhi oleh sistem pembangkitan setiap hari. Berdasarkan hasil pengolahan data beban per jam, konsumsi energi harian sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang menunjukkan pola yang mengikuti karakteristik aktivitas masyarakat. Pada periode siang hari konsumsi energi relatif stabil, sedangkan pada sore hingga malam hari terjadi peningkatan konsumsi energi akibat meningkatnya penggunaan peralatan rumah tangga dan penerangan.

Tabel 4.6 Data Beban Per Jam Sistem Kelistrikan Gili Ketapang

Bulan	Energi Produksi (kWh)
Januari 2026	266.295
Februari 2026	254.078
Maret 2026	302.277

Berdasarkan Tabel 4.6, konsumsi energi listrik sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang selama periode Januari hingga Maret 2026 menunjukkan adanya fluktuasi penggunaan energi. Pada bulan Januari, total konsumsi energi tercatat sebesar 266.295 kWh, kemudian mengalami penurunan menjadi 254.078 kWh pada bulan Februari. Penurunan tersebut dapat dipengaruhi oleh berkurangnya jumlah hari dalam bulan Februari maupun perubahan pola penggunaan listrik pelanggan. Selanjutnya, pada bulan Maret terjadi peningkatan konsumsi

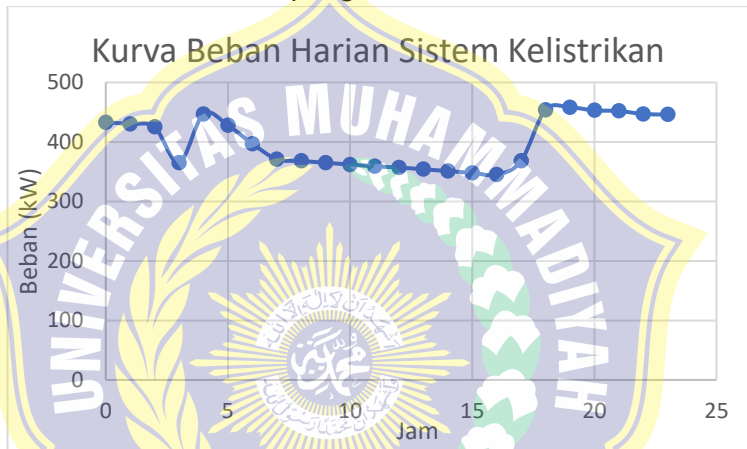
energi yang cukup signifikan hingga mencapai 302.277 kWh. Kenaikan ini menunjukkan adanya peningkatan aktivitas penggunaan listrik oleh pelanggan yang berdampak pada bertambahnya kebutuhan energi sistem. Secara keseluruhan, data konsumsi energi bulanan menunjukkan bahwa kebutuhan energi listrik di Pulau Gili Ketapang cenderung meningkat dan perlu menjadi perhatian dalam perencanaan kapasitas pembangkit serta pengembangan sistem kelistrikan di masa mendatang.

Tabel 4.7 Data Konsumsi Energi Harian Sistem Kelistrikan Gili Ketapang

Bulan	Energi Bulanan (kWh)	Hari	Rata-rata Harian (kWh/hari)
Januari	266.295	31	8.590,16
Februari	254.078	28	9.074,21
Maret	302.277	31	9.750,87

Berdasarkan Tabel 4.7, rata-rata konsumsi energi harian sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang mengalami peningkatan selama periode pengamatan. Pada bulan Januari, rata-rata konsumsi energi harian sebesar 8.590,16 kWh/hari, kemudian meningkat menjadi 9.074,21 kWh/hari pada bulan Februari. Selanjutnya pada bulan Maret, rata-rata konsumsi energi harian kembali meningkat hingga mencapai 9.750,87 kWh/hari. Peningkatan konsumsi energi rata-rata harian tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan energi listrik masyarakat terus bertambah dari waktu ke waktu. Kondisi ini mengindikasikan adanya peningkatan aktivitas ekonomi dan penggunaan peralatan listrik oleh pelanggan. Selain itu, tingginya konsumsi energi harian menjadi dasar dalam menentukan kapasitas pembangkit yang diperlukan agar sistem kelistrikan tetap mampu memenuhi kebutuhan energi secara andal.

Bagi perencanaan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS, data konsumsi energi rata-rata harian sangat penting karena digunakan untuk memperkirakan besarnya energi yang harus disuplai oleh PLTS serta kapasitas penyimpanan energi yang dibutuhkan pada BESS. Dengan demikian, pemanfaatan energi surya dapat dioptimalkan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar diesel dan meningkatkan efisiensi operasi sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.



Gambar 4.5 Kurva Beban Harian Sistem Kelistrikan Gili Ketapang

Berdasarkan Gambar 4.5, profil beban harian sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang menunjukkan adanya fluktuasi kebutuhan daya listrik selama 24 jam. Pada periode dini hari hingga pagi hari (pukul 00.00–05.00), beban listrik berada pada kisaran 425–447 kW. Beban tertinggi pada periode ini terjadi sekitar pukul 04.00 dengan nilai sebesar 447 kW, sedangkan beban terendah terjadi pada pukul 03.00 sebesar 365 kW. Memasuki pagi hingga siang hari (pukul 06.00–16.00), beban listrik cenderung mengalami penurunan secara bertahap. Pada periode ini kebutuhan daya menurun dari sekitar 397 kW pada

pukul 06.00 menjadi 345 kW pada pukul 16.00. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa aktivitas penggunaan listrik pada siang hari relatif lebih rendah dibandingkan pada malam hari. Penurunan beban pada siang hari juga mengindikasikan adanya peluang pemanfaatan energi surya secara optimal karena periode tersebut bertepatan dengan tingginya intensitas radiasi matahari. Setelah pukul 17.00, beban listrik kembali meningkat secara signifikan. Kenaikan beban terjadi dari sekitar 368 kW pada pukul 17.00 menjadi 454 kW pada pukul 18.00. Beban kemudian mencapai nilai puncak sebesar 458 kW pada pukul 19.00 sebelum mengalami penurunan secara perlahan hingga akhir hari. Peningkatan beban pada sore hingga malam hari dipengaruhi oleh meningkatnya aktivitas masyarakat, terutama penggunaan penerangan, peralatan elektronik rumah tangga, serta fasilitas umum. Secara keseluruhan, profil beban harian menunjukkan bahwa beban puncak sistem terjadi pada malam hari, sedangkan beban minimum terjadi pada siang hari. Karakteristik ini sangat sesuai untuk penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS. Energi yang dihasilkan PLTS pada siang hari dapat dimanfaatkan untuk memenuhi sebagian kebutuhan beban sekaligus mengisi BESS. Selanjutnya, energi yang tersimpan pada BESS dapat digunakan pada saat beban puncak malam hari sehingga dapat mengurangi pembebanan PLTD dan meningkatkan efisiensi operasi sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.

2. Konsumsi Energi Bulanan

Konsumsi energi bulanan merupakan total energi listrik yang digunakan pelanggan selama satu bulan. Nilai ini diperoleh dari akumulasi konsumsi energi harian selama periode pengamatan. Analisis konsumsi energi bulanan digunakan untuk mengetahui tingkat kebutuhan energi listrik masyarakat secara keseluruhan

serta mengevaluasi pola penggunaan energi dalam jangka waktu yang lebih panjang.

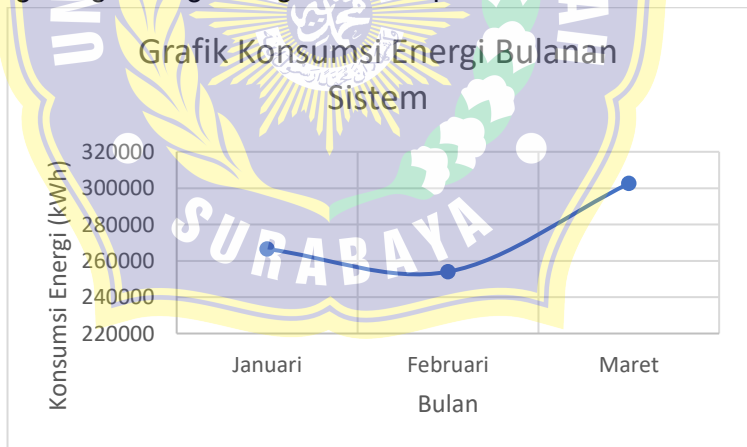
Tabel 4.8 Rekap Konsumsi Energi Bulanan Sistem Kelistrikan
Gili Ketapang

Bulan	Beban Puncak Siang (kW)	Beban Puncak Malam (kW)
Januari	379	458
Februari	382	493
Maret	411	521

Berdasarkan Tabel 4.8, beban puncak sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang menunjukkan kecenderungan meningkat selama periode Januari hingga Maret 2026. Pada bulan Januari, beban puncak siang tercatat sebesar 379 kW dan beban puncak malam sebesar 458 kW. Selanjutnya pada bulan Februari, beban puncak siang mengalami sedikit peningkatan menjadi 382 kW, sedangkan beban puncak malam meningkat menjadi 493 kW. Peningkatan yang lebih signifikan terjadi pada bulan Maret, dimana beban puncak siang mencapai 411 kW dan beban puncak malam mencapai 521 kW. Kondisi ini menunjukkan adanya peningkatan kebutuhan daya listrik pelanggan yang dipengaruhi oleh bertambahnya aktivitas penggunaan energi listrik pada berbagai sektor.

Secara umum, beban puncak malam hari selalu lebih tinggi dibandingkan beban puncak siang hari. Hal ini menunjukkan bahwa konsumsi listrik masyarakat Pulau Gili Ketapang didominasi oleh penggunaan energi pada periode sore hingga malam hari. Tingginya beban malam dipengaruhi oleh penggunaan lampu penerangan, peralatan elektronik rumah tangga, serta aktivitas masyarakat yang berlangsung setelah matahari terbenam. Perbedaan antara beban puncak siang dan malam juga menunjukkan bahwa sistem kelistrikan

memiliki karakteristik beban yang cukup khas, yaitu kebutuhan daya yang relatif rendah pada siang hari dan meningkat tajam pada malam hari. Karakteristik tersebut sangat mendukung penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS. Energi yang dihasilkan PLTS pada siang hari dapat digunakan untuk memenuhi sebagian kebutuhan beban sekaligus mengisi *Battery Energy Storage System* (BESS). Energi yang tersimpan kemudian dapat dimanfaatkan kembali saat beban puncak malam hari sehingga dapat mengurangi pembebanan PLTD dan meningkatkan efisiensi operasi sistem secara keseluruhan. Dengan meningkatnya beban puncak dari bulan ke bulan, diperlukan perencanaan kapasitas pembangkit yang memadai agar sistem tetap mampu memenuhi kebutuhan daya secara andal. Oleh karena itu, integrasi PLTS 300 kWp dan BESS menjadi salah satu alternatif yang potensial untuk mendukung pertumbuhan kebutuhan listrik di Pulau Gili Ketapang sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar diesel.



Gambar 4.6 Grafik Konsumsi Energi Bulanan Sistem Kelistrikan Gili Ketapang

Berdasarkan Gambar 4.6, konsumsi energi listrik sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang selama periode Januari hingga Maret 2026 menunjukkan pola yang berfluktuasi. Pada bulan Januari, konsumsi energi tercatat sebesar 266.295 kWh. Selanjutnya pada bulan Februari, konsumsi energi mengalami penurunan menjadi 254.078 kWh atau turun sekitar 4,59% dibandingkan bulan sebelumnya. Pada bulan Maret, konsumsi energi meningkat secara signifikan hingga mencapai 302.277 kWh. Nilai tersebut merupakan konsumsi energi tertinggi selama periode pengamatan dan menunjukkan peningkatan sekitar 18,97% dibandingkan bulan Februari. Kenaikan konsumsi energi ini mengindikasikan adanya peningkatan aktivitas penggunaan listrik oleh pelanggan, baik pada sektor rumah tangga maupun sektor lainnya yang terhubung dengan sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.

Secara umum, grafik menunjukkan bahwa kebutuhan energi listrik masyarakat cenderung mengalami peningkatan. Meskipun terjadi penurunan konsumsi pada bulan Februari, tren keseluruhan menunjukkan pertumbuhan kebutuhan energi yang cukup signifikan pada bulan Maret. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem pembangkitan harus direncanakan untuk mampu mengakomodasi peningkatan kebutuhan energi pada masa mendatang. Peningkatan konsumsi energi tersebut menjadi salah satu dasar dalam perencanaan pengembangan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS. Dengan adanya PLTS berkapasitas 300 kWp, sebagian kebutuhan energi pada siang hari dapat dipenuhi oleh energi surya, sedangkan BESS dapat menyimpan kelebihan energi untuk digunakan kembali pada saat kebutuhan listrik meningkat. Strategi ini diharapkan dapat mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit diesel, meningkatkan efisiensi operasi sistem, serta menekan biaya produksi energi listrik di Pulau Gili Ketapang.

3. Pertumbuhan Kebutuhan Energi

Pertumbuhan kebutuhan energi menggambarkan peningkatan konsumsi energi listrik dari waktu ke waktu. Analisis ini dilakukan untuk memperkirakan kebutuhan energi pada tahun-tahun mendatang sehingga dapat digunakan sebagai dasar perencanaan pengembangan sistem kelistrikan. Laju pertumbuhan kebutuhan energi dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$g = \frac{E_t - E_{t-1}}{E_{t-1}} \times 100\% \dots\dots\dots(4.1)$$

dengan:

g = laju pertumbuhan energi (%)

E_t = konsumsi energi tahun ke- t (kWh)

E_{t-1} = konsumsi energi tahun sebelumnya (kWh)

Tabel 4.9 Pertumbuhan Kebutuhan Energi Sistem Kelistrikan Gili Ketapang

Periode	Konsumsi Energi Awal (kWh)	Konsumsi Energi Akhir (kWh)	Pertumbuhan (%)
Januari – Februari 2026	266.295	254.078	-4,59
Februari – Maret 2026	254.078	302.277	18,97
Januari – Maret 2026	266.295	302.277	13,51

Berdasarkan Tabel 4.9, pertumbuhan kebutuhan energi listrik pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang selama periode pengamatan menunjukkan pola yang berfluktuasi. Pada periode Januari hingga Februari 2026 terjadi penurunan

konsumsi energi sebesar 4,59%, yaitu dari 266.295 kWh menjadi 254.078 kWh. Penurunan ini dapat dipengaruhi oleh variasi aktivitas pelanggan maupun perbedaan jumlah hari dalam periode pengamatan. Sebaliknya, pada periode Februari hingga Maret 2026 terjadi peningkatan konsumsi energi yang cukup signifikan sebesar 18,97%, dari 254.078 kWh menjadi 302.277 kWh. Kenaikan ini menunjukkan adanya peningkatan kebutuhan energi listrik masyarakat yang berdampak pada bertambahnya energi yang harus disuplai oleh sistem pembangkitan.

Secara keseluruhan, konsumsi energi listrik mengalami peningkatan sebesar 13,51% dari Januari hingga Maret 2026. Tren peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan energi listrik di Pulau Gili Ketapang cenderung bertambah seiring meningkatnya aktivitas masyarakat dan penggunaan peralatan listrik. Kondisi ini menjadi salah satu pertimbangan penting dalam perencanaan pengembangan sistem kelistrikan agar mampu memenuhi kebutuhan energi di masa mendatang secara andal dan efisien.

Peningkatan kebutuhan energi tersebut juga memperkuat pentingnya penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS. Pemanfaatan PLTS sebagai sumber energi terbarukan dapat membantu memenuhi pertumbuhan kebutuhan energi sekaligus mengurangi konsumsi bahan bakar diesel. Selain itu, penggunaan BESS memungkinkan penyimpanan energi pada saat produksi energi surya berlebih untuk digunakan kembali pada saat kebutuhan energi meningkat, sehingga keandalan dan efisiensi sistem dapat terus terjaga.

Berdasarkan hasil analisis, kebutuhan energi listrik di Pulau Gili Ketapang menunjukkan kecenderungan meningkat setiap tahun seiring dengan bertambahnya jumlah pelanggan dan meningkatnya aktivitas ekonomi masyarakat. Kondisi

tersebut mengindikasikan perlunya pengembangan sistem pembangkitan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Dengan adanya integrasi PLTS 300 kWp dan BESS, peningkatan kebutuhan energi listrik di masa mendatang dapat diakomodasi tanpa meningkatkan konsumsi bahan bakar diesel secara signifikan. Selain meningkatkan keandalan sistem, pemanfaatan energi surya juga berpotensi menurunkan biaya operasi pembangkit serta mengurangi emisi gas rumah kaca pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.

4.3 Perancangan Sistem *Hybrid* PLTD–PLTS

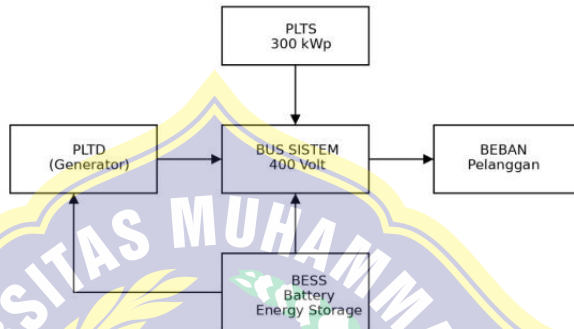
4.3.1 Konsep Sistem *Hybrid*

Sistem *hybrid* PLTD–PLTS merupakan sistem pembangkitan listrik yang mengombinasikan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) dengan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara lebih efisien dan berkelanjutan. Pada penelitian ini, sistem *hybrid* dirancang untuk diterapkan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang dengan tujuan mengurangi konsumsi bahan bakar diesel, meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, serta menekan biaya operasional pembangkitan listrik.

1. Integrasi PLTD dengan PLTS

Integrasi PLTD dan PLTS dilakukan dengan menghubungkan kedua sumber pembangkit ke dalam satu sistem kelistrikan yang sama sehingga dapat bekerja secara bersamaan dalam menyuplai kebutuhan beban. Pada sistem eksisting, seluruh kebutuhan energi listrik dipenuhi oleh PLTD yang menggunakan bahan bakar solar sebagai sumber energi utama. Melalui integrasi PLTS, sebagian kebutuhan energi listrik pada siang hari dapat dipenuhi oleh energi surya sehingga daya yang harus disuplai oleh PLTD menjadi lebih kecil. Dalam sistem *hybrid* ini, PLTD tetap berfungsi sebagai pembangkit utama yang

menjaga kontinuitas pasokan listrik, sedangkan PLTS berperan sebagai pembangkit pendukung yang memanfaatkan sumber energi terbarukan. Dengan kombinasi tersebut, sistem kelistrikan dapat beroperasi lebih efisien tanpa mengurangi keandalan pasokan energi kepada pelanggan.



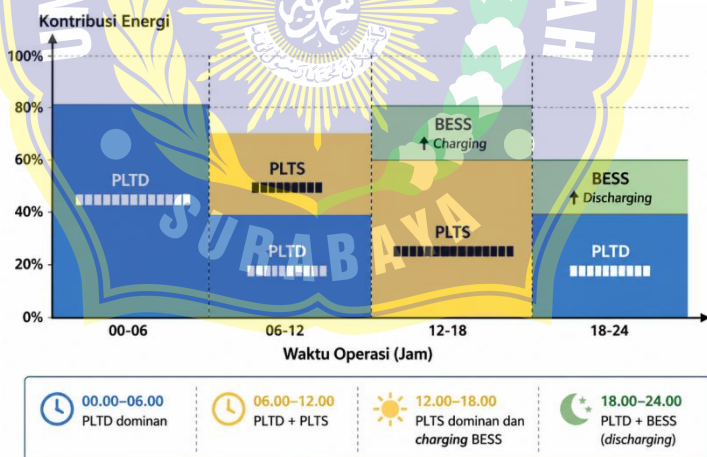
Gambar 4.7 Diagram Blok Sistem *Hybrid* PLTD–PLTS–BESS

2. Peran PLTS pada Sistem

PLTS berfungsi sebagai sumber energi terbarukan yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik. Berdasarkan hasil analisis profil beban harian, kebutuhan daya listrik pada siang hari berada pada tingkat yang relatif lebih rendah dibandingkan pada malam hari. Kondisi ini sangat mendukung pemanfaatan PLTS karena produksi energi surya maksimum terjadi pada saat intensitas radiasi matahari tinggi. Pada penelitian ini direncanakan penggunaan PLTS berkapasitas 300 kWp yang diharapkan mampu menyuplai sebagian kebutuhan energi listrik pada siang hari. Dengan adanya kontribusi energi dari PLTS, beban kerja PLTD dapat dikurangi sehingga konsumsi bahan bakar solar menjadi lebih rendah. Selain itu, pemanfaatan PLTS juga memberikan manfaat lingkungan berupa pengurangan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar diesel.

3. Strategi Operasi *Hybrid*

Strategi operasi sistem *hybrid* dilakukan dengan mengutamakan pemanfaatan energi yang dihasilkan oleh PLTS selama periode siang hari. Ketika produksi energi surya mencukupi kebutuhan beban, sebagian daya yang sebelumnya disuplai oleh PLTD dapat digantikan oleh PLTS. Sebaliknya, ketika produksi energi surya menurun akibat perubahan cuaca atau menjelang malam hari, PLTD akan meningkatkan suplai dayanya untuk menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan beban. Pada malam hari, ketika PLTS tidak menghasilkan energi listrik, kebutuhan daya akan dipenuhi oleh PLTD dan *Battery Energy Storage System* (BESS). Strategi ini memungkinkan penggunaan energi terbarukan secara maksimal tanpa mengurangi keandalan sistem. Selain itu, pengoperasian PLTD pada tingkat pembebanan yang lebih optimal juga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar dan memperpanjang umur operasional mesin diesel.



Gambar 4.8 Strategi Operasi Energi PLTD–PLTS–BESS Selama 24 Jam

Gambar 4.8 menunjukkan strategi operasi sistem pembangkit hibrida yang mengintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), dan *Battery Energy Storage System* (BESS) dalam memenuhi kebutuhan beban selama 24 jam. Strategi ini dirancang untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi surya, mengurangi konsumsi bahan bakar diesel, serta menjaga keandalan pasokan listrik kepada pelanggan.

Pada periode 00.00–06.00, PLTD beroperasi sebagai sumber energi utama karena PLTS tidak menghasilkan energi pada malam hari. Seluruh kebutuhan beban dipenuhi oleh PLTD, sementara BESS dapat digunakan secara terbatas untuk membantu menyuplai beban tertentu guna mengurangi beban kerja generator diesel dan meningkatkan efisiensi operasinya. Memasuki periode 06.00–12.00, intensitas radiasi matahari mulai meningkat sehingga PLTS mulai menghasilkan energi listrik. Pada kondisi ini, kebutuhan beban dipenuhi secara bersama-sama oleh PLTD dan PLTS. Kontribusi energi surya secara bertahap meningkat sehingga daya keluaran PLTD dapat dikurangi. Hal ini memberikan penghematan konsumsi bahan bakar dan menurunkan biaya operasional pembangkit.

Pada periode 12.00–18.00, PLTS mencapai kondisi produksi maksimum karena menerima radiasi matahari tertinggi. Energi yang dihasilkan PLTS diprioritaskan untuk memenuhi kebutuhan beban. Apabila terdapat kelebihan energi dari PLTS, energi tersebut digunakan untuk melakukan proses *charging* pada BESS. Dengan demikian, energi surya yang berlebih dapat disimpan dan dimanfaatkan kembali pada saat produksi PLTS menurun atau tidak tersedia. Selanjutnya pada periode 18.00–24.00, produksi energi PLTS menurun hingga nol karena tidak adanya sinar matahari. Untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik, PLTD kembali beroperasi sebagai sumber utama. Pada

saat yang sama, BESS melakukan proses *discharging* dengan melepaskan energi yang telah disimpan pada siang hari untuk membantu menyuplai beban. Kombinasi operasi PLTD dan BESS pada periode ini mampu mengurangi konsumsi bahan bakar diesel dibandingkan apabila seluruh beban hanya ditanggung oleh PLTD.

Secara keseluruhan, strategi operasi PLTD–PLTS–BESS selama 24 jam menunjukkan bahwa integrasi PLTS dan BESS dapat meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan, mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, menekan biaya operasional, serta mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara lebih optimal tanpa mengurangi keandalan pasokan listrik kepada konsumen.

4. Strategi *Charging* BESS Menggunakan PLTS

Battery Energy Storage System (BESS) berfungsi sebagai media penyimpanan energi yang dihasilkan oleh PLTS. Pada saat produksi energi surya melebihi kebutuhan beban, energi surplus akan digunakan untuk mengisi baterai (*charging*). Proses pengisian baterai dilakukan terutama pada periode siang hari ketika intensitas radiasi matahari berada pada kondisi optimum dan *output* PLTS mencapai nilai maksimum. Energi yang tersimpan di dalam BESS kemudian digunakan kembali pada saat produksi energi surya menurun atau ketika terjadi beban puncak pada sore hingga malam hari. Dengan strategi tersebut, energi surya yang dihasilkan pada siang hari dapat dimanfaatkan secara lebih efektif dan tidak terbuang. Selain membantu mengurangi konsumsi bahan bakar diesel, penggunaan BESS juga dapat meningkatkan stabilitas sistem, mengurangi fluktuasi daya dari PLTS, serta meningkatkan keandalan pasokan listrik kepada pelanggan. Melalui integrasi PLTD, PLTS 300 kWp, dan BESS, sistem *hybrid* yang dirancang diharapkan mampu meningkatkan efisiensi operasi pembangkit,

mengurangi biaya produksi energi listrik, serta mendukung pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang secara berkelanjutan.

4.3.1 Perancangan PLTS 300 kWp

Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dilakukan untuk menentukan kapasitas pembangkit yang mampu berkontribusi dalam memenuhi kebutuhan energi listrik sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang. Perencanaan ini mempertimbangkan potensi energi surya di lokasi penelitian, kebutuhan energi sistem, luas area pemasangan, serta target pengurangan penggunaan bahan bakar diesel. Pada penelitian ini direncanakan PLTS dengan kapasitas terpasang sebesar 300 kWp yang akan diintegrasikan dengan sistem PLTD dan *Battery Energy Storage System* (BESS) dalam skema pembangkit *hybrid*. Langkah awal dalam perancangan PLTS adalah menganalisis potensi energi matahari di lokasi penelitian. Potensi energi surya ditentukan berdasarkan data iradiasi matahari rata-rata yang diperoleh dari sumber data meteorologi atau perangkat lunak simulasi seperti HOMER Pro dan NASA POWER. Data iradiasi ini digunakan untuk memperkirakan kemampuan sistem PLTS dalam menghasilkan energi listrik sepanjang tahun.

Tabel 4.10 Data Iradiasi Matahari Lokasi Penelitian

Bulan	Iradiasi Matahari (kWh/m ² /hari)
Januari	5,12
Februari	5,34
Maret	5,58
April	5,71
Mei	5,89
Juni	5,76
Juli	5,82

Agustus	5,95
September	5,91
Oktober	5,68
November	5,32
Desember	5,08

(Sumber : NASA POWER Data Access Viewer Tahun 2025 dengan link https://power.larc.nasa.gov/?utm_source)

Berdasarkan Tabel 4.10, lokasi penelitian di Pulau Gili Ketapang memiliki potensi energi surya yang cukup baik dengan nilai iradiasi matahari rata-rata sebesar 5,60 kWh/m²/hari. Nilai tersebut menunjukkan bahwa wilayah penelitian menerima intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun sehingga sangat mendukung penerapan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Data iradiasi matahari menunjukkan adanya variasi nilai radiasi pada setiap bulan. Nilai iradiasi tertinggi terjadi pada bulan Agustus sebesar 5,95 kWh/m²/hari, sedangkan nilai terendah terjadi pada bulan Desember sebesar 5,08 kWh/m²/hari. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh kondisi cuaca, tutupan awan, dan perubahan musim yang memengaruhi jumlah energi surya yang diterima permukaan bumi.

Secara umum, nilai iradiasi matahari yang berada di atas 5 kWh/m²/hari menunjukkan bahwa Pulau Gili Ketapang memiliki potensi yang sangat baik untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga surya. Potensi energi surya yang tinggi ini memungkinkan PLTS menghasilkan energi listrik secara optimal pada siang hari sehingga dapat mengurangi ketergantungan sistem terhadap pembangkit diesel. Data iradiasi matahari tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas PLTS yang direncanakan, menghitung jumlah modul surya yang dibutuhkan, serta mengestimasi

produksi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh PLTS 300 kWp pada sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS. Dengan demikian, analisis iradiasi matahari menjadi salah satu tahapan penting dalam proses perancangan sistem pembangkit yang efisien dan andal.

Selanjutnya dilakukan penentuan kapasitas PLTS berdasarkan kebutuhan energi sistem, profil beban harian, dan target penetrasi energi terbarukan. Pada penelitian ini dipilih kapasitas PLTS sebesar 300 kWp yang dinilai mampu memberikan kontribusi energi yang signifikan tanpa mengganggu stabilitas operasi sistem PLTD eksisting. Kapasitas tersebut juga mempertimbangkan ketersediaan lahan instalasi dan kemampuan sistem penyimpanan energi yang digunakan.

Tabel 4.11 Perhitungan Kapasitas PLTS 300 kWp

Parameter	Nilai
Kapasitas PLTS	300 kWp
Daya Modul Surya	550 Wp
Jumlah Modul Surya	546 modul
Luas Modul per Unit	2,6 m ²
Total Luas Modul	1.419,6 m ²
Faktor Kebutuhan Area (termasuk jarak antar panel)	1,5
Luas Area yang Dibutuhkan	2.129,4 m ²
Kapasitas Inverter	300 Kw
<i>Performance Ratio</i> (PR)	80 %

Keterangan Perhitungan:

Jumlah modul surya:

$$N = \frac{300000}{550} = 545.45 \approx 546 \text{ modul}$$

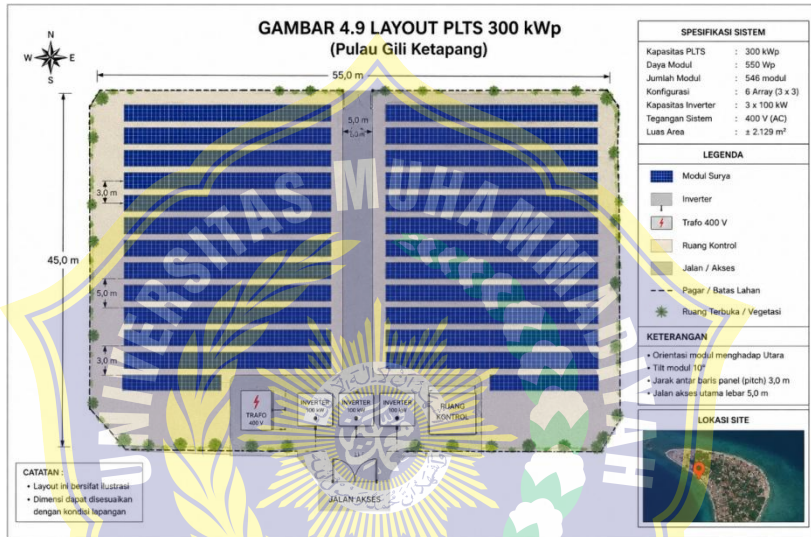
Luas area instalasi:

$$A = 546 \times 2.6 \times 1.5 = 2129.4 \text{ m}^2$$

Berdasarkan Tabel 4.11, sistem PLTS yang direncanakan memiliki kapasitas terpasang sebesar 300 kWp. Kapasitas tersebut dipilih untuk mendukung kebutuhan energi listrik sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD). Dalam perancangan ini digunakan modul surya dengan daya nominal sebesar 550 Wp per unit sehingga diperlukan sebanyak 546 modul surya untuk mencapai kapasitas total yang direncanakan. Jumlah modul surya diperoleh dari hasil pembagian kapasitas total PLTS terhadap daya nominal setiap modul. Modul-modul tersebut kemudian disusun dalam konfigurasi seri dan paralel sesuai dengan spesifikasi inverter dan tegangan sistem yang digunakan. Pemilihan modul berdaya besar bertujuan untuk mengurangi jumlah modul yang diperlukan sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan lahan dan menekan biaya instalasi.

Dari sisi kebutuhan lahan, setiap modul memiliki luas sekitar $2,6 \text{ m}^2$ sehingga total luas modul yang dibutuhkan mencapai $1.419,6 \text{ m}^2$. Namun dalam implementasinya diperlukan tambahan ruang untuk jarak antarbaris panel, akses pemeliharaan, dan menghindari efek bayangan antar modul. Oleh karena itu digunakan faktor kebutuhan area sebesar 1,5 sehingga total luas lahan yang dibutuhkan mencapai sekitar $2.129,4 \text{ m}^2$. Sistem PLTS dirancang menggunakan inverter dengan kapasitas total 300 kW yang berfungsi mengubah energi listrik arus searah (DC) dari modul surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat disalurkan ke sistem kelistrikan. Selain itu, perancangan menggunakan nilai *Performance Ratio* (PR) sebesar 80%, yang mencerminkan berbagai rugi-rugi sistem seperti rugi temperatur, rugi inverter, rugi kabel, debu pada permukaan panel, dan faktor operasional lainnya. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, kapasitas PLTS sebesar 300 kWp

dinilai mampu memberikan kontribusi energi yang signifikan terhadap sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS. Kapasitas ini diharapkan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar diesel, meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, serta mendukung operasi sistem kelistrikan yang lebih efisien dan ramah lingkungan.



Gambar 4.9 Layout PLTS 300 kWp

Sumber: Dokumen Pribadi Pulau Gili Ketapang

Gambar 4.9 menunjukkan tata letak (*layout*) pemasangan modul surya pada area yang telah direncanakan. Penyusunan modul dilakukan dengan mempertimbangkan orientasi panel, sudut kemiringan, jarak antarbaris panel, serta kemudahan pemeliharaan sistem. *Layout* yang baik akan meningkatkan penerimaan radiasi matahari dan memaksimalkan produksi energi listrik.

Setelah kapasitas sistem ditentukan, dilakukan estimasi produksi energi listrik yang dapat dihasilkan PLTS. Perhitungan produksi energi mempertimbangkan kapasitas terpasang, nilai

iradiasi matahari, *performance ratio*, dan faktor kehilangan sistem.

Tabel 4.12 Produksi Energi PLTS

Bulan	Iradiasi Matahari (kWh/m ² /hari)	Produksi Energi PLTS (kWh/bulan)
Januari	5,12	38.093
Februari	5,34	35.885
Maret	5,58	41.515
April	5,71	41.112
Mei	5,89	43.821
Juni	5,76	41.472
Juli	5,82	43.315
Agustus	5,95	44.268
September	5,91	42.552
Oktober	5,68	42.259
November	5,32	38.304
Desember	5,08	37.795
Total Tahunan	-	490.391
Rata-rata Bulanan	-	40.866

Asumsi Perhitungan:

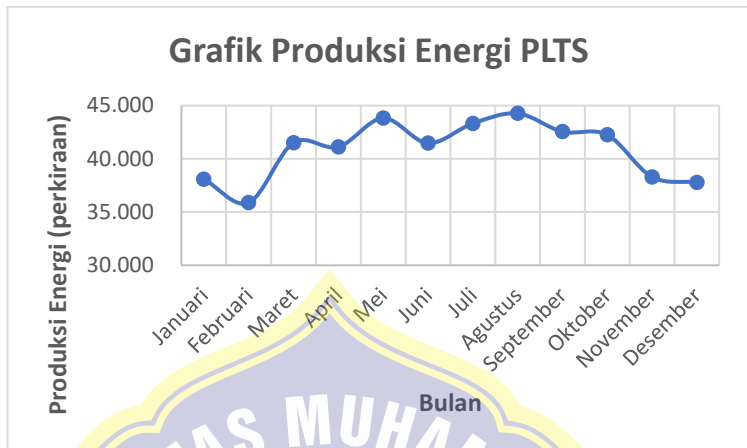
- Kapasitas PLTS = 300 kWp
- *Performance Ratio* (PR) = 80%
- Produksi energi dihitung berdasarkan data iradiasi rata-rata bulanan.

Berdasarkan Tabel 4.12, PLTS berkapasitas 300 kWp yang direncanakan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang diperkirakan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 490.391 kWh per tahun atau rata-rata 40.866 kWh per bulan. Produksi energi tersebut diperoleh dari pemanfaatan potensi energi surya yang tersedia di lokasi penelitian dengan

mempertimbangkan faktor kinerja sistem (*Performance Ratio*) sebesar 80%.

Produksi energi PLTS mengalami variasi pada setiap bulan mengikuti perubahan nilai iradiasi matahari. Produksi energi tertinggi terjadi pada bulan Agustus sebesar 44.268 kWh, sejalan dengan tingginya nilai iradiasi matahari pada bulan tersebut. Sebaliknya, produksi energi terendah terjadi pada bulan Desember sebesar 37.795 kWh akibat menurunnya intensitas radiasi matahari yang diterima modul surya.

Secara keseluruhan, hasil estimasi menunjukkan bahwa PLTS 300 kWp memiliki potensi kontribusi energi yang cukup signifikan terhadap sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang. Jika dibandingkan dengan konsumsi energi bulanan sistem yang berada pada kisaran 250–300 MWh, maka energi yang dihasilkan PLTS dapat menyumbang sekitar 13–17% kebutuhan energi bulanan sistem. Kontribusi tersebut mampu mengurangi beban operasi PLTD serta menekan penggunaan bahan bakar solar. Selain meningkatkan porsi energi terbarukan dalam sistem kelistrikan, keberadaan PLTS juga memberikan manfaat ekonomi melalui pengurangan biaya operasional pembangkit diesel. Energi listrik yang dihasilkan pada siang hari dapat langsung digunakan untuk melayani beban maupun disimpan ke dalam BESS sehingga dapat dimanfaatkan kembali pada saat kebutuhan energi meningkat. Dengan demikian, penerapan PLTS 300 kWp menjadi salah satu solusi yang efektif dalam mendukung pengembangan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

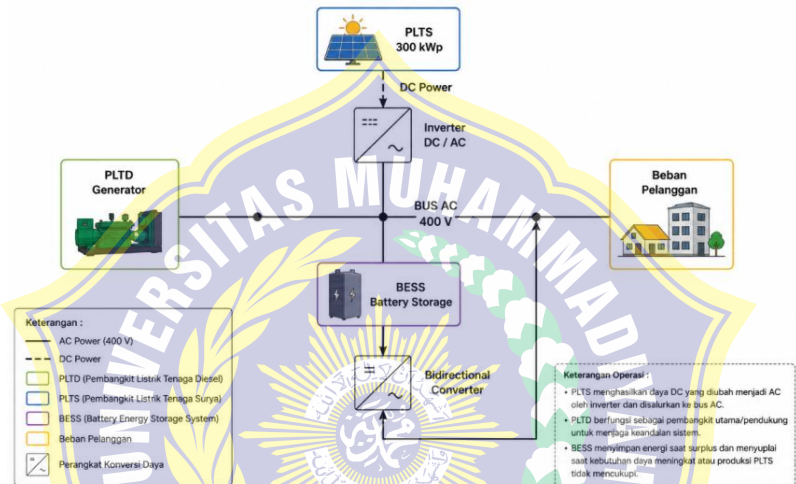


Gambar 4.10 Grafik Produksi Energi PLTS

Berdasarkan Gambar 4.10, produksi energi PLTS 300 kWp mengalami variasi sepanjang tahun mengikuti perubahan intensitas radiasi matahari yang diterima modul surya. Produksi energi terendah terjadi pada bulan Februari sebesar 35.885 kWh, sedangkan produksi energi tertinggi terjadi pada bulan Agustus sebesar 44.268 kWh. Perbedaan produksi energi tersebut dipengaruhi oleh kondisi cuaca, tingkat tutupan awan, dan perubahan musim yang memengaruhi besarnya energi surya yang dapat dikonversi menjadi energi listrik.

Secara umum, grafik menunjukkan bahwa produksi energi PLTS relatif stabil dengan rata-rata produksi sekitar 40.866 kWh per bulan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa potensi energi surya di Pulau Gili Ketapang cukup baik untuk mendukung operasi sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS. Produksi energi yang dihasilkan pada siang hari dapat digunakan secara langsung untuk melayani beban maupun disimpan ke dalam BESS untuk dimanfaatkan kembali pada saat beban puncak malam hari. Kontribusi energi PLTS yang relatif konsisten sepanjang tahun memberikan manfaat dalam mengurangi

penggunaan bahan bakar diesel dan menekan biaya operasional pembangkitan. Dengan produksi energi tahunan mencapai sekitar 490.391 kWh, PLTS 300 kWp mampu menjadi salah satu komponen utama dalam mendukung transisi menuju sistem kelistrikan yang lebih efisien, andal, dan ramah lingkungan di Pulau Gili Ketapang.



Gambar 4.11 *Single Line Diagram Sistem Hybrid PLTD–PLTS–BESS*

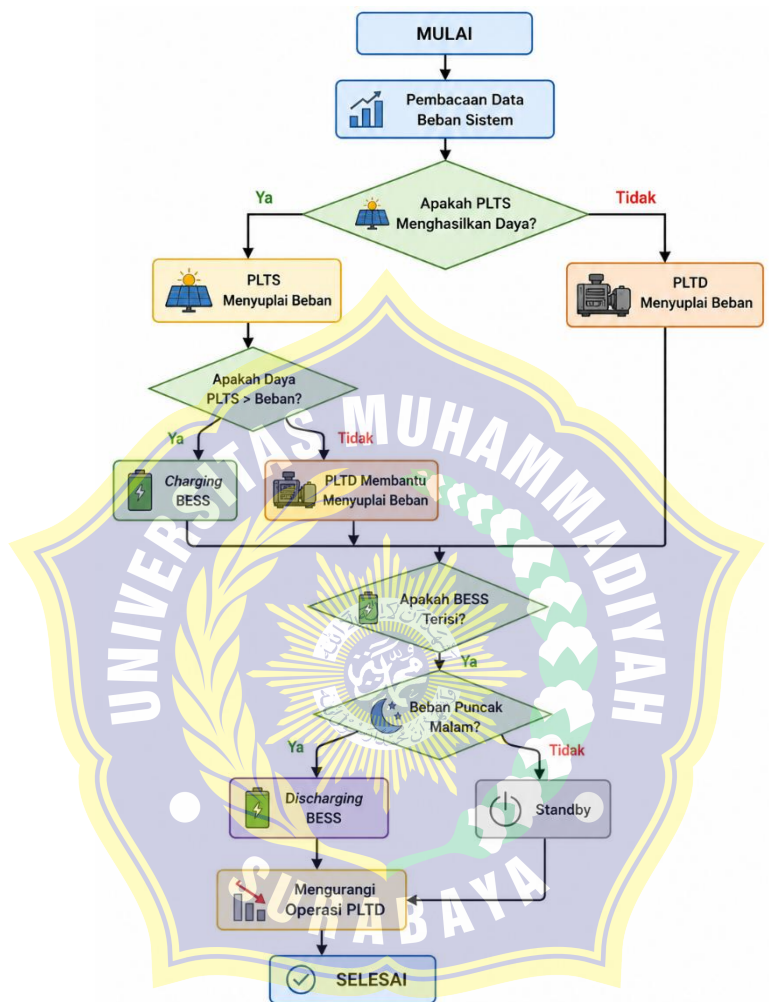
Sumber: Dokumen Hybrid PLTD PLTD–PLTS–BESS

Berdasarkan Gambar 4.11, sistem *hybrid* yang dirancang terdiri dari tiga komponen utama yaitu PLTD sebagai pembangkit utama, PLTS berkapasitas 300 kWp sebagai sumber energi terbarukan, dan *Battery Energy Storage System* (BESS) sebagai media penyimpanan energi. Ketiga komponen tersebut terhubung pada satu *bus AC* yang berfungsi sebagai titik integrasi seluruh sumber energi sebelum disalurkan ke beban pelanggan.

Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS berupa arus searah (DC) kemudian dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC)

menggunakan inverter sebelum disalurkan ke bus sistem. Pada saat intensitas radiasi matahari tinggi, PLTS dapat menyuplai sebagian kebutuhan beban secara langsung. Jika produksi energi PLTS melebihi kebutuhan beban, kelebihan energi tersebut akan digunakan untuk mengisi BESS melalui konverter dua arah (*bidirectional converter*). PLTD berfungsi sebagai pembangkit utama yang menjaga kontinuitas pasokan listrik dan memastikan sistem tetap beroperasi pada kondisi yang andal. Ketika produksi energi dari PLTS tidak mencukupi atau pada malam hari saat tidak tersedia radiasi matahari, PLTD akan meningkatkan suplai dayanya untuk memenuhi kebutuhan beban. Selain itu, energi yang tersimpan pada BESS juga dapat digunakan untuk membantu menyuplai beban sehingga pembebanan PLTD dapat dikurangi.

Konfigurasi sistem *hybrid* tersebut memungkinkan pemanfaatan energi surya secara optimal tanpa mengurangi keandalan sistem kelistrikan. Dengan adanya integrasi PLTS dan BESS, konsumsi bahan bakar diesel dapat ditekan, biaya operasional pembangkitan menjadi lebih rendah, serta emisi gas buang yang dihasilkan oleh PLTD dapat dikurangi. Oleh karena itu, sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.



Gambar 4.12 Diagram Alur Operasi Sistem *Hybrid*

Berdasarkan Gambar 4.12, operasi sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS diawali dengan proses pembacaan data beban sistem untuk mengetahui kebutuhan daya yang harus dipenuhi pada setiap waktu operasi. Selanjutnya sistem melakukan

evaluasi terhadap ketersediaan energi yang dihasilkan oleh PLTS. Apabila PLTS menghasilkan daya listrik, maka energi tersebut diprioritaskan untuk menyuplai beban pelanggan sebagai bentuk pemanfaatan energi terbarukan secara maksimal. Ketika daya yang dihasilkan PLTS melebihi kebutuhan beban, kelebihan energi akan digunakan untuk melakukan pengisian *Battery Energy Storage System* (BESS). Sebaliknya, apabila daya PLTS belum mampu memenuhi kebutuhan beban, maka PLTD akan beroperasi untuk membantu menyuplai kekurangan daya sehingga keseimbangan antara pembangkitan dan beban tetap terjaga. Strategi ini memungkinkan penggunaan energi surya secara optimal tanpa mengurangi keandalan sistem kelistrikan.

Pada saat malam hari atau ketika intensitas radiasi matahari menurun sehingga PLTS tidak dapat menghasilkan energi listrik, kebutuhan daya akan dipenuhi oleh PLTD dan energi yang tersimpan pada BESS. Ketika terjadi beban puncak, BESS akan melakukan proses *discharging* untuk menyuplai sebagian kebutuhan daya sehingga pembebanan PLTD dapat dikurangi. Dengan mekanisme tersebut, konsumsi bahan bakar diesel dapat ditekan dan efisiensi operasi sistem pembangkitan dapat ditingkatkan. Secara keseluruhan, diagram alur operasi menunjukkan bahwa sistem *hybrid* dirancang untuk memprioritaskan pemanfaatan energi surya, memaksimalkan fungsi penyimpanan energi pada BESS, serta menjaga keandalan pasokan listrik melalui dukungan PLTD. Strategi operasi ini mendukung pengurangan biaya operasional pembangkit dan peningkatan pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.

4.4 Simulasi Operasi Sistem *Hybrid*

4.4.1 Simulasi Sistem Eksisting

Simulasi sistem eksisting dilakukan untuk mengetahui kondisi operasi sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang sebelum dilakukan integrasi PLTS dan *Battery Energy Storage System* (BESS). Pada kondisi ini, seluruh kebutuhan energi listrik pelanggan masih dipenuhi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sehingga konsumsi bahan bakar solar dan biaya operasional pembangkit relatif tinggi. Hasil simulasi sistem eksisting digunakan sebagai kondisi dasar (*baseline*) untuk membandingkan kinerja sistem setelah penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS.

1. Operasi PLTD Sebelum Integrasi PLTS

Pada kondisi eksisting, PLTD berfungsi sebagai satu-satunya sumber energi listrik yang menyuplai seluruh kebutuhan beban pelanggan selama 24 jam. Operasi generator diesel dilakukan secara kontinu untuk menjaga keseimbangan antara daya pembangkitan dan kebutuhan beban yang berubah-ubah sepanjang hari. Berdasarkan hasil analisis profil beban harian, beban sistem cenderung meningkat pada sore hingga malam hari dan mencapai nilai maksimum pada periode beban puncak. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, PLTD harus beroperasi pada berbagai tingkat pembebanan sesuai dengan perubahan kebutuhan daya pelanggan. Pada saat beban rendah, sebagian kapasitas generator tidak termanfaatkan secara optimal sehingga efisiensi penggunaan bahan bakar menjadi lebih rendah. Sebaliknya, pada saat beban puncak malam hari, PLTD harus meningkatkan *output* daya untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik kepada pelanggan.

Ketergantungan penuh terhadap PLTD menyebabkan biaya operasional sistem sangat dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar diesel. Selain itu, penggunaan generator diesel secara

terus-menerus juga meningkatkan kebutuhan pemeliharaan serta menghasilkan emisi gas buang yang berdampak terhadap lingkungan.

Tabel 4.13 Operasi PLTD Sistem Eksisting

Parameter	Nilai
Kapasitas PLTD Terpasang	630 kW
Beban Puncak	458 kW
Beban Rata-rata	381 kW
Faktor Beban	83,19 %
Jam Operasi	24 jam/hari

Berdasarkan Tabel 4.13, sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang pada kondisi eksisting sepenuhnya mengandalkan PLTD sebagai sumber utama pembangkit energi listrik. PLTD memiliki kapasitas terpasang sebesar 630 kW yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya pelanggan selama 24 jam setiap hari. Sistem harus mampu melayani beban puncak sebesar 458 kW yang umumnya terjadi pada periode malam hari ketika aktivitas masyarakat dan penggunaan peralatan listrik berada pada tingkat tertinggi.

Hasil analisis menunjukkan bahwa beban rata-rata sistem mencapai 381 kW, sehingga diperoleh faktor beban sebesar 83,19%. Nilai faktor beban yang relatif tinggi menunjukkan bahwa pemanfaatan kapasitas pembangkit cukup baik karena perbedaan antara beban rata-rata dan beban puncak tidak terlalu besar. Meskipun demikian, seluruh energi listrik masih dihasilkan oleh PLTD sehingga konsumsi bahan bakar solar tetap tinggi dan biaya operasional sistem menjadi cukup besar. Operasi PLTD secara terus-menerus selama 24 jam juga menyebabkan kebutuhan perawatan dan biaya pemeliharaan generator meningkat. Selain itu, penggunaan bahan bakar diesel sebagai sumber energi utama menghasilkan

emisi gas buang yang berdampak terhadap lingkungan. Oleh karena itu, kondisi eksisting ini menjadi dasar evaluasi dalam perancangan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS yang bertujuan mengurangi konsumsi bahan bakar, meningkatkan efisiensi operasi pembangkit, serta memperbesar pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.

2. Konsumsi BBM Eksisting

Karena seluruh energi listrik diproduksi oleh PLTD, konsumsi bahan bakar solar menjadi salah satu parameter utama dalam evaluasi kinerja sistem eksisting. Besarnya konsumsi bahan bakar dipengaruhi oleh energi listrik yang dihasilkan, karakteristik beban, serta efisiensi generator diesel yang digunakan. Semakin tinggi energi listrik yang harus disuplai, maka semakin besar pula kebutuhan bahan bakar yang diperlukan untuk mengoperasikan generator. Kondisi ini menyebabkan biaya produksi energi listrik menjadi cukup tinggi, terutama pada sistem kelistrikan pulau yang masih bergantung pada pembangkit diesel sebagai sumber energi utama.

Hasil simulasi konsumsi bahan bakar nantinya digunakan sebagai dasar untuk menghitung potensi penghematan setelah implementasi PLTS dan BESS. Dengan adanya kontribusi energi dari PLTS, sebagian energi yang sebelumnya dihasilkan oleh PLTD dapat digantikan oleh energi surya sehingga konsumsi bahan bakar dapat dikurangi.

Tabel 4.14 Konsumsi Bahan Bakar Sistem Eksisting

Parameter	Nilai
Produksi energi rata-rata bulanan	274.217 kWh/bulan
Produksi energi tahunan	3.290.604 kWh/tahun
<i>Specific Fuel Consumption</i> (SFC)	0,27 liter/kWh
Konsumsi solar harian	2.468 liter/hari

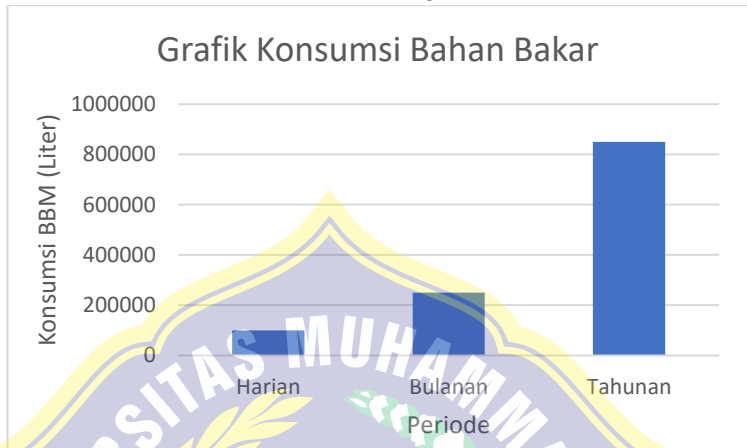
Konsumsi solar bulanan	74.039 liter/bulan
Konsumsi solar tahunan	888.463 liter/tahun

Berdasarkan Tabel 4.14, sistem kelistrikan eksisting yang sepenuhnya mengandalkan PLTD memerlukan konsumsi bahan bakar solar yang cukup besar untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pelanggan. Dengan produksi energi rata-rata sebesar 274.217 kWh per bulan dan nilai *specific fuel consumption* (SFC) sebesar 0,27 liter/kWh, konsumsi bahan bakar solar diperkirakan mencapai 74.039 liter per bulan atau sekitar 888.463 liter per tahun.

Besarnya konsumsi bahan bakar tersebut menunjukkan bahwa biaya operasional sistem sangat bergantung pada penggunaan solar sebagai sumber energi utama. Selain berdampak pada tingginya biaya produksi listrik, penggunaan bahan bakar dalam jumlah besar juga menyebabkan peningkatan emisi gas buang dari pembangkit diesel. Oleh karena itu, diperlukan upaya peningkatan efisiensi sistem melalui pemanfaatan energi terbarukan seperti PLTS dan penggunaan BESS untuk mengurangi energi yang harus diproduksi oleh PLTD.

Hasil perhitungan ini selanjutnya digunakan sebagai data pembandingan (*baseline*) dalam simulasi sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS untuk mengevaluasi potensi penghematan bahan bakar dan peningkatan efisiensi operasi sistem setelah integrasi energi surya.

Gambar 4.13 Grafik Konsumsi Bahan Bakar PLTD Sistem Eksisting



Berdasarkan Gambar 4.13, konsumsi bahan bakar PLTD pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang menunjukkan nilai yang cukup tinggi karena seluruh kebutuhan energi listrik masih dipenuhi oleh generator diesel. Dengan konsumsi rata-rata sebesar 2.468 liter per hari, kebutuhan bahan bakar mencapai sekitar 74.039 liter per bulan atau 888.463 liter per tahun. Besarnya konsumsi bahan bakar tersebut menunjukkan tingginya ketergantungan sistem terhadap energi fosil dalam memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Tingginya penggunaan solar tidak hanya berdampak pada peningkatan biaya operasional pembangkit, tetapi juga menyebabkan emisi gas buang yang lebih besar. Oleh karena itu, kondisi eksisting ini menjadi dasar evaluasi untuk penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS. Melalui pemanfaatan energi surya dan sistem penyimpanan energi, sebagian kebutuhan listrik dapat dipenuhi tanpa menggunakan bahan bakar diesel sehingga konsumsi

solar dan biaya operasional pembangkitan dapat dikurangi secara signifikan.

4.4.2 Simulasi Sistem *Hybrid*

Simulasi sistem *hybrid* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem kelistrikan setelah dilakukan integrasi PLTS 300 kWp dan *Battery Energy Storage System* (BESS) pada sistem eksisting PLTD. Simulasi bertujuan untuk mengetahui kontribusi energi terbarukan terhadap kebutuhan beban, pengaruhnya terhadap pengurangan operasi PLTD, pola operasi BESS, serta potensi penghematan konsumsi bahan bakar diesel. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan sistem *hybrid* mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi utama pada siang hari. Energi yang dihasilkan PLTS digunakan untuk melayani beban secara langsung dan sebagian disimpan ke dalam BESS untuk digunakan kembali pada saat kebutuhan daya meningkat atau ketika produksi energi surya menurun. Dengan strategi tersebut, beban yang harus ditanggung oleh PLTD menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi eksisting.

1. Operasi Setelah Integrasi PLTS

Setelah integrasi PLTS 300 kWp, sistem kelistrikan tidak lagi sepenuhnya bergantung pada PLTD. Pada siang hari, energi yang dihasilkan PLTS digunakan sebagai sumber energi utama untuk menyuplai sebagian kebutuhan beban. Ketika produksi energi surya melebihi kebutuhan beban, kelebihan energi dimanfaatkan untuk mengisi BESS. Sebaliknya, apabila produksi energi surya tidak mencukupi, PLTD akan beroperasi untuk menutupi kekurangan daya yang diperlukan sistem.

Tabel 4.15 Hasil Simulasi Sistem Eksisting dan *Hybrid*

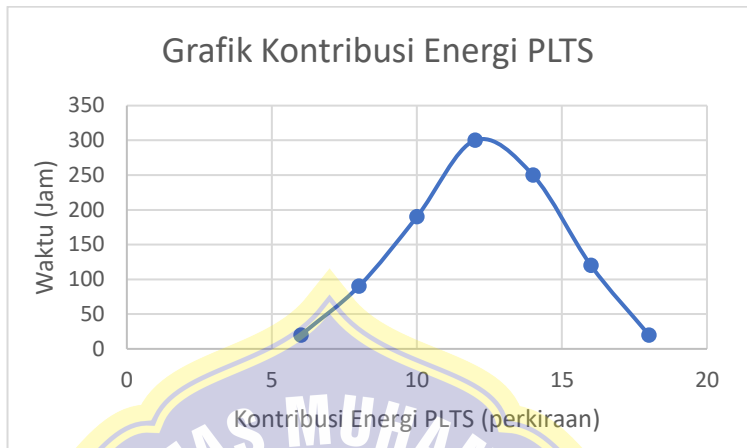
Parameter	Sistem Eksisting	Sistem <i>Hybrid</i>
Produksi Energi PLTD (kWh/tahun)	3.290.604	2.800.213

Produksi Energi PLTS (kWh/tahun)	0	490.391
Penetrasi Energi Terbarukan (%)	0	14,9
Konsumsi BBM (liter/tahun)	888.463	756.058
Jam Operasi PLTD	8.760	8.760

Berdasarkan Tabel 4.16, penerapan sistem *hybrid* memberikan kontribusi energi dari PLTS sebesar 490.391 kWh per tahun. Energi tersebut mampu menggantikan sebagian energi yang sebelumnya diproduksi oleh PLTD sehingga produksi energi diesel menurun menjadi 2.800.213 kWh per tahun. Selain meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan hingga 14,9%, sistem *hybrid* juga mampu menurunkan konsumsi bahan bakar solar secara signifikan.

2. Kontribusi Daya PLTS

PLTS berperan sebagai sumber energi utama pada siang hari ketika intensitas radiasi matahari berada pada kondisi optimum. Produksi energi PLTS mengikuti pola iradiasi matahari, yaitu meningkat pada pagi hari, mencapai puncak pada siang hari, dan menurun menjelang sore hari.



Gambar 4.14 Grafik Kontribusi Energi PLTS

Berdasarkan Gambar 4.14, produksi daya PLTS mulai meningkat sejak pagi hari dan mencapai nilai maksimum sekitar tengah hari ketika intensitas radiasi matahari berada pada kondisi tertinggi. Pada periode tersebut, sebagian besar kebutuhan beban dapat dipenuhi oleh energi surya sehingga pembebanan PLTD dapat dikurangi secara signifikan.

3. Pengurangan Beban PLTD

Dengan adanya kontribusi energi dari PLTS dan BESS, daya yang harus diproduksi oleh PLTD mengalami penurunan dibandingkan kondisi eksisting. Pengurangan pembebanan ini berdampak langsung pada penurunan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional pembangkit.

Tabel 4.16 Data Pengurangan Beban PLTD

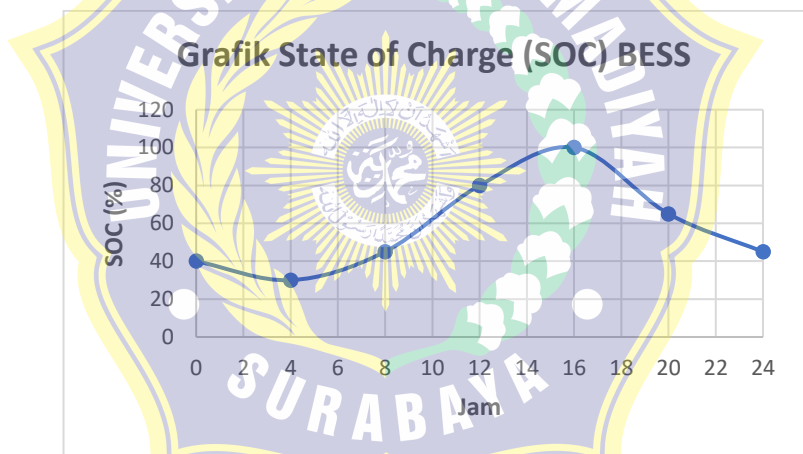
Parameter	Eksisting	Hybrid
Produksi Energi PLTD (kWh/tahun)	3.290.604	2.800.213
Pengurangan Energi PLTD (kWh/tahun)	-	490.391
Persentase	-	14,9

Pengurangan (%)		
-----------------	--	--

Berdasarkan hasil simulasi, produksi energi PLTD berkurang sebesar 490.391 kWh per tahun atau sekitar 14,9% dibandingkan kondisi eksisting. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan PLTS mampu menggantikan sebagian produksi energi diesel secara efektif

4. Operasi *Charging* dan *Discharging* BESS

BESS berfungsi sebagai media penyimpanan energi yang memungkinkan energi surplus dari PLTS dimanfaatkan kembali pada saat diperlukan. Pada siang hari, baterai mengalami proses *charging*, sedangkan pada sore hingga malam hari baterai mengalami proses *discharging* untuk membantu memenuhi kebutuhan beban.



Gambar 4.15 Grafik *State of Charge* (SOC) BESS

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa nilai SOC baterai meningkat pada siang hari akibat proses *charging* menggunakan energi surplus PLTS. Kapasitas baterai mencapai kondisi maksimum pada sore hari sebelum kemudian digunakan kembali untuk membantu menyuplai beban pada malam hari melalui proses *discharging*.

5. Penghematan Konsumsi BBM

Salah satu tujuan utama penerapan sistem *hybrid* adalah mengurangi penggunaan bahan bakar diesel. Dengan berkurangnya energi yang harus diproduksi PLTD, konsumsi solar dapat ditekan secara signifikan.

Tabel 4.17 Data Penghematan Konsumsi BBM

Parameter	Eksisting	<i>Hybrid</i>
Konsumsi BBM (liter/tahun)	888.463	756.058
Penghematan BBM (liter/tahun)	-	132.405
Penghematan (%)	-	14,9

Berdasarkan Tabel 4.17, penerapan sistem *hybrid* mampu mengurangi konsumsi bahan bakar solar sebesar 132.405 liter per tahun atau sekitar 14,9% dibandingkan kondisi eksisting. Pengurangan konsumsi bahan bakar tersebut menunjukkan bahwa integrasi PLTS dan BESS mampu meningkatkan efisiensi operasi sistem kelistrikan sekaligus menurunkan biaya operasional pembangkit.

4.5 Analisis Kelayakan Teknis

Analisis kinerja sistem dilakukan dengan membandingkan kondisi sistem eksisting yang hanya menggunakan PLTD dengan sistem *hybrid* yang mengintegrasikan PLTS 300 kWp dan BESS. Parameter yang dianalisis meliputi efisiensi sistem, keandalan pasokan listrik, stabilitas suplai daya, dan tingkat pemanfaatan energi terbarukan.

4.5.1 Analisis Kinerja Sistem

1. Efisiensi Sistem *Hybrid*

Efisiensi sistem menunjukkan kemampuan sistem dalam memanfaatkan energi yang tersedia untuk memenuhi

kebutuhan beban dengan penggunaan sumber daya yang lebih optimal. Pada sistem eksisting, seluruh kebutuhan energi dipenuhi oleh PLTD sehingga konsumsi bahan bakar diesel relatif tinggi. Setelah integrasi PLTS dan BESS, sebagian kebutuhan energi dapat dipenuhi oleh energi surya sehingga energi yang harus diproduksi oleh PLTD menjadi lebih kecil. Berdasarkan hasil simulasi, penerapan PLTS 300 kWp mampu menghasilkan energi sebesar 490.391 kWh/tahun dan mengurangi konsumsi bahan bakar diesel sebesar 132.405 liter/tahun. Pengurangan konsumsi bahan bakar tersebut menunjukkan bahwa sistem *hybrid* memiliki efisiensi operasi yang lebih baik dibandingkan sistem eksisting. Selain itu, penggunaan BESS memungkinkan energi surplus dari PLTS disimpan dan digunakan kembali sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara lebih optimal.

Tabel 4.18 Perbandingan Kinerja Sistem Eksisting dan *Hybrid*

Parameter	Sistem Eksisting	Sistem <i>Hybrid</i>
Produksi Energi PLTD (kWh/tahun)	3.290.604	2.800.213
Produksi Energi PLTS (kWh/tahun)	0	490.391
Konsumsi BBM (liter/tahun)	888.463	756.058
Penghematan BBM (liter/tahun)	-	132.405
Penetrasi Energi Terbarukan (%)	0	14,9

Berdasarkan Tabel 4.18, sistem *hybrid* mampu mengurangi produksi energi PLTD sebesar 490.391 kWh per tahun. Penurunan tersebut berdampak langsung pada

pengurangan konsumsi bahan bakar solar hingga 132.405 liter per tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS dan BESS mampu meningkatkan efisiensi operasi pembangkit sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

2. Keandalan Sistem

Keandalan sistem merupakan kemampuan sistem kelistrikan dalam menyediakan pasokan energi secara kontinu sesuai kebutuhan beban. Pada sistem *hybrid*, keandalan meningkat karena terdapat lebih dari satu sumber energi yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya. Ketika produksi energi dari PLTS menurun akibat perubahan kondisi cuaca atau pada malam hari, PLTD tetap dapat beroperasi untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik. Selain itu, BESS berfungsi sebagai cadangan energi yang dapat digunakan untuk membantu memenuhi kebutuhan daya pada saat terjadi lonjakan beban atau ketika produksi energi surya tidak mencukupi. Dengan adanya kombinasi PLTD, PLTS, dan BESS, risiko terjadinya kekurangan daya menjadi lebih kecil dibandingkan sistem yang hanya mengandalkan satu sumber pembangkit. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *hybrid* memiliki tingkat keandalan yang lebih baik dalam menjaga kontinuitas pelayanan listrik kepada pelanggan.

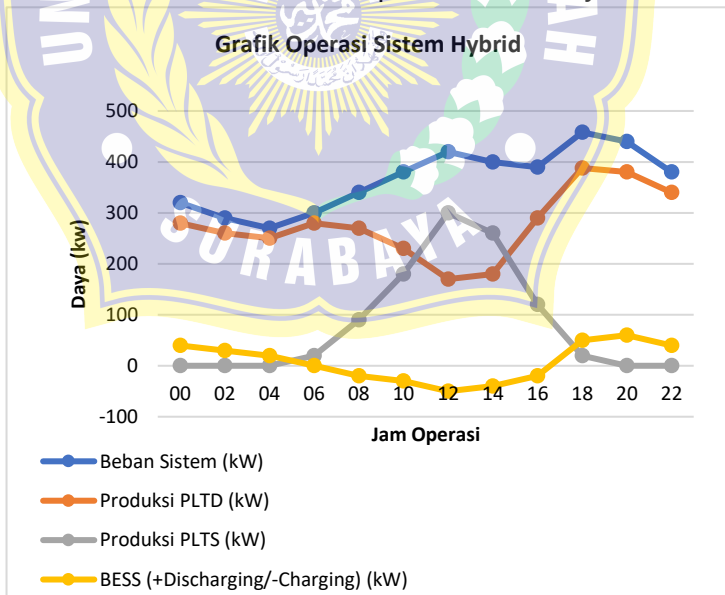
Tabel 4.19 Indikator Keandalan Sistem *Hybrid*

Parameter	Nilai
Ketersediaan PLTD	100 %
Kontribusi PLTS	14,9 %
Dukungan BESS	Tersedia
Kemampuan Memenuhi Beban Puncak	Memenuhi
Tingkat Keandalan Sistem	Tinggi

3. Stabilitas Suplai Daya

Stabilitas suplai daya menunjukkan kemampuan sistem dalam menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan kebutuhan beban selama periode operasi. Pada sistem eksisting, seluruh perubahan beban harus direspons langsung oleh PLTD sehingga generator sering mengalami perubahan pembebanan yang cukup besar. Pada sistem *hybrid*, sebagian perubahan beban dapat diatasi oleh PLTS dan BESS sehingga fluktuasi pembebanan PLTD menjadi lebih kecil. BESS berfungsi sebagai penyangga (*buffer*) energi yang membantu menjaga kestabilan sistem ketika terjadi perubahan beban secara tiba-tiba maupun saat produksi energi surya berfluktuasi. Dengan berkurangnya variasi pembebanan pada generator diesel, sistem dapat beroperasi lebih stabil dan efisien. Kondisi tersebut juga dapat memperpanjang umur peralatan pembangkit karena frekuensi perubahan beban yang diterima generator menjadi lebih rendah dibandingkan sistem eksisting.

Gambar 4.16 Grafik Operasi Sistem *Hybrid*



Berdasarkan grafik operasi sistem *hybrid*, terlihat bahwa PLTS berkontribusi secara signifikan pada periode siang hari sehingga pembebanan PLTD mengalami penurunan. Pada saat produksi energi surya berlebih, BESS melakukan proses *charging*, sedangkan pada malam hari energi yang tersimpan digunakan kembali melalui proses *discharging*. Pola operasi tersebut menunjukkan bahwa sistem *hybrid* mampu menjaga keseimbangan suplai dan kebutuhan daya secara lebih stabil.

4. Pemanfaatan Energi Terbarukan

Salah satu tujuan utama penerapan sistem *hybrid* adalah meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan dalam sistem kelistrikan. Pada kondisi eksisting, seluruh energi listrik berasal dari PLTD sehingga kontribusi energi terbarukan masih nol persen. Setelah integrasi PLTS 300 kWp, sistem mampu menghasilkan energi surya sebesar 490.391 kWh per tahun dengan tingkat penetrasi energi terbarukan mencapai sekitar 14,9%. Kontribusi tersebut memberikan dampak positif terhadap pengurangan penggunaan bahan bakar diesel dan emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit. Peningkatan pemanfaatan energi terbarukan juga mendukung kebijakan transisi energi dan pengembangan sistem kelistrikan yang lebih ramah lingkungan. Dengan potensi energi surya yang cukup tinggi di Pulau Gili Ketapang, kapasitas PLTS masih dapat dikembangkan lebih lanjut pada masa mendatang untuk meningkatkan kontribusi energi bersih dalam sistem.

Tabel 4.20 Pemanfaatan Energi Terbarukan

Parameter	Nilai
Produksi Energi PLTS	490.391 kWh/tahun
Produksi Energi Sistem	3.290.604 kWh/tahun
Penetrasi Energi Terbarukan	14,9 %
Pengurangan Energi PLTD	490.391 kWh/tahun
Penghematan BBM	132.405 liter/tahun

Berdasarkan Tabel 4.21, sistem *hybrid* mampu memanfaatkan energi surya sebesar 490.391 kWh per tahun atau sekitar 14,9% dari total kebutuhan energi sistem. Kontribusi tersebut mampu mengurangi produksi energi PLTD dalam jumlah yang sama sehingga konsumsi bahan bakar solar dapat ditekan secara signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan PLTS 300 kWp memberikan manfaat teknis yang nyata dalam meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.

4.5.2 Analisis Penghematan Operasional

Analisis penghematan operasional dilakukan untuk mengevaluasi manfaat ekonomi yang diperoleh setelah penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang. Analisis ini difokuskan pada pengurangan konsumsi bahan bakar solar, penurunan intensitas operasi PLTD, serta efektivitas penggunaan BESS dalam mendukung pengelolaan energi sistem. Hasil analisis digunakan untuk mengetahui sejauh mana integrasi energi terbarukan mampu meningkatkan efisiensi operasional pembangkit dibandingkan kondisi eksisting.

1. Pengurangan Konsumsi Solar

Salah satu manfaat utama penerapan sistem *hybrid* adalah berkurangnya kebutuhan bahan bakar solar akibat sebagian energi listrik dipasok oleh PLTS. Energi listrik yang dihasilkan PLTS secara langsung menggantikan energi yang sebelumnya diproduksi oleh PLTD sehingga konsumsi bahan bakar dapat ditekan. Berdasarkan hasil simulasi, produksi energi PLTS sebesar 490.391 kWh per tahun mampu mengurangi produksi energi PLTD dalam jumlah yang sama. Dengan asumsi *specific fuel consumption* (SFC) sebesar 0,27 liter/kWh, sistem *hybrid* mampu menghemat konsumsi bahan bakar solar secara signifikan dibandingkan kondisi eksisting.

Tabel 4.21 Penghematan Konsumsi Bahan Bakar

Parameter	Sistem Eksisting	Sistem Hybrid
Produksi Energi PLTD (kWh/tahun)	3.290.604	2.800.213
Konsumsi Solar (liter/tahun)	888.463	756.058
Penghematan Solar (liter/tahun)	-	132.405
Persentase Penghematan (%)	-	14,9

Berdasarkan Tabel 4.21, penerapan sistem *hybrid* mampu menurunkan konsumsi bahan bakar solar dari 888.463 liter per tahun menjadi 756.058 liter per tahun. Dengan demikian diperoleh penghematan bahan bakar sebesar 132.405 liter per tahun atau sekitar 14,9% dibandingkan kondisi eksisting. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan energi surya mampu memberikan dampak positif terhadap efisiensi operasional pembangkit sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

2. Pengurangan Jam Operasi PLTD

Integrasi PLTS dan BESS tidak hanya mengurangi konsumsi bahan bakar tetapi juga mengurangi tingkat pembebanan generator diesel. Pada siang hari, sebagian kebutuhan energi dipenuhi oleh PLTS sehingga PLTD tidak perlu beroperasi pada kapasitas tinggi. Selain itu, energi yang tersimpan pada BESS dapat digunakan kembali pada saat beban puncak sehingga kebutuhan operasi PLTD menjadi lebih ringan.

Tabel 4.22 Pengurangan Operasi PLTD

Parameter	Sistem Eksisting	Sistem <i>Hybrid</i>
Jam Operasi Tahunan	8.760 jam	8.760 jam
Produksi Energi PLTD	3.290.604 kWh	2.800.213 kWh
Beban Rata-rata PLTD	375,6 kW	319,7 kW
Penurunan Pembebanan PLTD	-	14,9 %

Berdasarkan Tabel 4.22, jumlah jam operasi PLTD secara teknis masih tetap berlangsung selama 24 jam per hari untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik. Namun, tingkat pembebanan generator mengalami penurunan yang cukup signifikan. Produksi energi PLTD berkurang dari 3.290.604 kWh menjadi 2.800.213 kWh per tahun sehingga beban rata-rata generator turun sekitar 14,9%. Kondisi tersebut berdampak positif terhadap efisiensi penggunaan bahan bakar dan dapat memperpanjang umur operasi peralatan pembangkit.

3. Efektivitas Penggunaan BESS

Battery Energy Storage System (BESS) berfungsi sebagai media penyimpanan energi yang mendukung operasi sistem *hybrid*. Energi berlebih yang dihasilkan PLTS pada siang hari disimpan ke dalam baterai dan digunakan kembali pada malam

hari ketika kebutuhan beban meningkat atau produksi energi surya tidak tersedia.

Tabel 4.23 Efektivitas Penggunaan BESS

Parameter	Nilai
Sumber Pengisian Utama	PLTS
Waktu <i>Charging</i>	08.00–16.00
Waktu <i>Discharging</i>	18.00–23.00
Fungsi Utama	Peak Shaving
Dukungan terhadap Beban Puncak	Tinggi
Status Operasi	Efektif

Berdasarkan Tabel 4.23, BESS beroperasi dengan memanfaatkan energi surplus dari PLTS pada periode siang hari melalui proses *charging*. Energi yang tersimpan kemudian digunakan kembali pada saat beban puncak malam hari melalui proses *discharging*. Pola operasi tersebut menunjukkan bahwa BESS mampu berfungsi sebagai media penyimpanan energi yang efektif dalam mendukung sistem *hybrid*. Penggunaan BESS juga membantu mengurangi fluktuasi pembebanan PLTD sehingga operasi generator menjadi lebih stabil. Selain meningkatkan kualitas suplai daya, pemanfaatan BESS memungkinkan energi surya yang sebelumnya tidak dimanfaatkan dapat digunakan kembali pada saat diperlukan, sehingga tingkat pemanfaatan energi terbarukan dalam sistem menjadi lebih optimal.

Tabel 4.24 Efisiensi Operasional Sistem *Hybrid*

Indikator	Sistem Eksisting	Sistem <i>Hybrid</i>
Konsumsi Solar (liter/tahun)	888.463	756.058
Produksi Energi PLTD (kWh/tahun)	3.290.604	2.800.213

Kontribusi PLTS (kWh/tahun)	0	490.391
Penetrasi Energi Terbarukan (%)	0	14,9
Penghematan BBM (%)	0	14,9

Tabel 4.24 menunjukkan bahwa sistem *hybrid* memberikan peningkatan efisiensi operasional yang cukup signifikan dibandingkan sistem eksisting. Kontribusi energi dari PLTS sebesar 490.391 kWh per tahun mampu mengurangi penggunaan bahan bakar solar hingga 132.405 liter per tahun. Selain itu, penetrasi energi terbarukan mencapai 14,9% dari total kebutuhan energi sistem sehingga ketergantungan terhadap PLTD dapat dikurangi.

4.6 Analisis Kelayakan Ekonomi

Analisis kelayakan ekonomi dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya yang diperlukan dalam pembangunan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS serta manfaat ekonomi yang diperoleh selama masa operasi sistem. Analisis ini mencakup biaya investasi awal, biaya integrasi sistem, dan biaya operasional. Hasil analisis ekonomi digunakan untuk menilai apakah penerapan PLTS 300 kWp dan BESS layak diterapkan dari sisi finansial pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang.

4.6.1 Analisis Investasi

Analisis investasi dilakukan untuk menghitung kebutuhan biaya pembangunan sistem *hybrid* yang terdiri dari PLTS, BESS, inverter, sistem kontrol, serta biaya instalasi dan integrasi dengan sistem kelistrikan eksisting. Investasi awal merupakan komponen biaya terbesar dalam pengembangan sistem *hybrid*, namun biaya tersebut diharapkan dapat dikompensasi oleh penghematan konsumsi bahan bakar selama masa operasi.

1. Biaya Pembangunan PLTS

Biaya pembangunan PLTS meliputi pengadaan modul surya, inverter, struktur penyangga, kabel, sistem proteksi, serta biaya instalasi. Dalam penelitian ini direncanakan pembangunan PLTS berkapasitas 300 kWp yang terhubung dengan sistem kelistrikan eksisting.

Tabel 4.25 Estimasi Biaya Pembangunan PLTS 300 kWp

Komponen	Satuan	Nilai
Modul Surya 300 kWp	Rp/kWp	Rp 12.000.000
Total Biaya Modul Surya	-	Rp 3.600.000.000
Inverter Grid-Tied 300 kW	-	Rp 600.000.000
Struktur Mounting	-	Rp 300.000.000
Kabel dan Proteksi	-	Rp 200.000.000
Instalasi dan Commissioning	-	Rp 300.000.000
Total Investasi PLTS		Rp 5.000.000.000

Berdasarkan Tabel 4.25, kebutuhan investasi pembangunan PLTS 300 kWp diperkirakan sebesar Rp 5 miliar. Komponen biaya terbesar berasal dari pengadaan modul surya yang mencapai sekitar 72% dari total investasi. Selain modul surya, biaya juga mencakup inverter, struktur pemasangan, sistem proteksi, dan proses instalasi. Nilai investasi ini masih bersifat estimasi dan dapat berubah sesuai harga komponen pada saat implementasi.

2. Biaya Integrasi Sistem Hybrid

Selain pembangunan PLTS, diperlukan biaya tambahan untuk mengintegrasikan PLTS dan BESS dengan sistem PLTD yang sudah ada. Biaya ini meliputi pengadaan baterai, battery

management system (BMS), konverter dua arah, panel kontrol, serta sistem monitoring.

Tabel 4.26 Biaya Integrasi Sistem *Hybrid*

Komponen	Nilai (Rp)
BESS dan BMS	2.000.000.000
<i>Bidirectional Converter</i>	500.000.000
Sistem Monitoring dan Kontrol	300.000.000
Panel Distribusi dan Integrasi	200.000.000
Instalasi Sistem <i>Hybrid</i>	200.000.000
Total Biaya Integrasi	3.200.000.000

Berdasarkan Tabel 4.26, biaya integrasi sistem *hybrid* diperkirakan mencapai Rp 3,2 miliar. Komponen terbesar berasal dari pengadaan BESS yang berfungsi sebagai penyimpan energi untuk mendukung operasi PLTS dan PLTD. Selain meningkatkan fleksibilitas operasi sistem, BESS juga berperan dalam menjaga stabilitas suplai daya dan meningkatkan pemanfaatan energi surya.

3. Biaya Operasional Sistem

Biaya operasional mencakup biaya bahan bakar diesel, pemeliharaan PLTD, pemeliharaan PLTS, serta biaya operasional sistem kontrol dan BESS. Setelah penerapan sistem *hybrid*, biaya operasional diharapkan mengalami penurunan karena berkurangnya konsumsi bahan bakar solar.

Tabel 4.27 Perbandingan Biaya Operasional Tahunan

Komponen	Sistem Eksisting	Sistem <i>Hybrid</i>
Konsumsi Solar (liter/tahun)	888.463	756.058
Harga Solar (Rp/liter)	10.000	10.000
Biaya Tahunan BBM	Rp 8.884.630.000	Rp 7.560.580.000

Pemeliharaan PLTD	Rp 250.000.000	Rp 200.000.000
Pemeliharaan PLTS dan BESS	Rp 0	Rp 100.000.000
Total Biaya Operasional	Rp 9.134.630.000	Rp 7.860.580.000

Berdasarkan Tabel 4.27, penerapan sistem *hybrid* mampu menurunkan biaya operasional tahunan dari sekitar Rp 9,13 miliar menjadi Rp 7,86 miliar. Penurunan tersebut terutama disebabkan oleh berkurangnya konsumsi bahan bakar solar sebesar 132.405 liter per tahun. Meskipun terdapat tambahan biaya pemeliharaan PLTS dan BESS, total biaya operasional sistem tetap lebih rendah dibandingkan kondisi eksisting.

Tabel 4.28 Rekapitulasi Investasi Sistem *Hybrid*

Komponen Investasi	Nilai (Rp)
Pembangunan PLTS 300 kWp	5.000.000.000
Integrasi Sistem <i>Hybrid</i>	3.200.000.000
Total Investasi Awal	8.200.000.000

Berdasarkan hasil perhitungan, total investasi awal yang dibutuhkan untuk pembangunan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS diperkirakan sebesar Rp 8,2 miliar. Investasi tersebut mencakup pembangunan PLTS 300 kWp serta integrasi sistem penyimpanan energi dan kontrol operasi *hybrid*. Dengan penghematan biaya operasional sekitar Rp 1,27 miliar per tahun, investasi ini memiliki potensi memberikan manfaat ekonomi yang signifikan dalam jangka panjang melalui pengurangan penggunaan bahan bakar diesel dan peningkatan efisiensi sistem kelistrikan.

4.6.2 Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi dilakukan untuk mengetahui tingkat kelayakan finansial dari penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS di Pulau Gili Ketapang. Evaluasi ekonomi dilakukan

menggunakan metode *Net Present Value* (NPV), *Payback Period* (PP), dan *Benefit Cost Ratio* (BCR). Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menilai apakah investasi yang dikeluarkan mampu memberikan keuntungan ekonomi selama umur proyek.

Dalam penelitian ini digunakan asumsi:

Total investasi awal = Rp 8.200.000.000

Umur proyek = 20 tahun

Tingkat diskonto = 8%

Penghematan operasional = Rp 1.274.050.000/tahun

Nilai residu = diabaikan

1. *Net Present Value* (NPV)

Net Present Value (NPV) digunakan untuk mengetahui selisih antara nilai sekarang dari manfaat (benefit) yang diperoleh dengan nilai investasi yang dikeluarkan. Proyek dinyatakan layak apabila nilai NPV lebih besar dari nol ($NPV > 0$).

Tabel 4.29 Biaya Investasi Sistem *Hybrid*

Komponen	Nilai (Rp)
Investasi PLTS	5.000.000.000
Integrasi BESS	3.200.000.000
Total Investasi	8.200.000.000

Tabel 4.30 *Cash Flow* Proyek

Tahun	<i>Cash Flow</i> (Rp)
0	-8.200.000.000
1	1.274.050.000
2	1.274.050.000
3	1.274.050.000
4	1.274.050.000
5	1.274.050.000

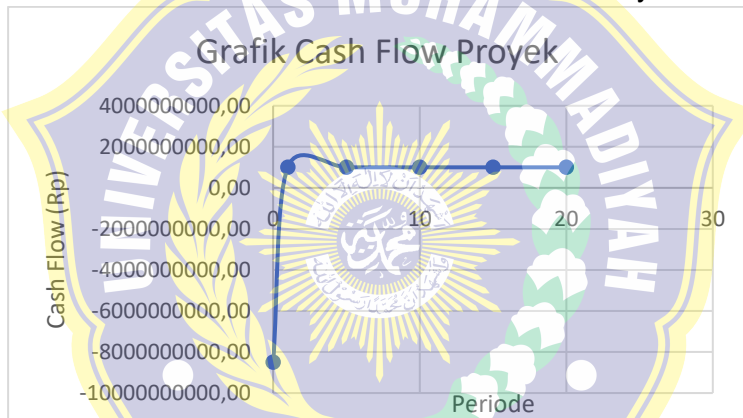
Tabel 4.31 Perhitungan NPV

Parameter	Nilai
-----------	-------

Investasi Awal	Rp 8.200.000.000
Present Value Benefit	Rp 12.509.000.000
NPV	Rp 4.309.000.000

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.32, diperoleh nilai NPV sebesar Rp 4,309 miliar. Nilai NPV yang positif menunjukkan bahwa manfaat ekonomi yang diperoleh selama umur proyek lebih besar dibandingkan investasi yang dikeluarkan. Dengan demikian, proyek pembangunan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS dinyatakan layak untuk dilaksanakan dari aspek finansial.

Gambar 4.17 Grafik *Cash Flow* Proyek



Grafik *cash flow* menunjukkan bahwa investasi awal proyek terjadi pada tahun ke-0 dengan nilai negatif sebesar Rp 8,2 miliar. Setelah sistem mulai beroperasi, diperoleh arus kas positif dari penghematan biaya operasional sebesar Rp 1,274 miliar per tahun. Pola tersebut menunjukkan bahwa investasi akan terus menghasilkan manfaat ekonomi selama umur proyek.

2. Payback Period (PP)

Payback Period digunakan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan agar investasi yang dikeluarkan dapat kembali

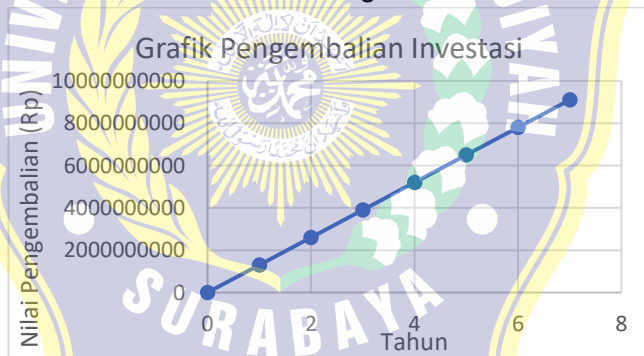
melalui penghematan biaya operasional yang diperoleh setiap tahun.

Tabel 4.32 Perhitungan *Payback Period*

Parameter	Nilai
Investasi Awal	Rp 8.200.000.000
Penghematan Tahunan	Rp 1.274.050.000
<i>Payback Period</i>	6,44 Tahun

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.33, diperoleh nilai *Payback Period* sebesar 6,44 tahun. Artinya investasi yang dikeluarkan untuk pembangunan sistem *hybrid* dapat kembali dalam waktu sekitar 6 tahun 5 bulan. Nilai tersebut masih jauh lebih kecil dibandingkan umur proyek yang direncanakan selama 20 tahun sehingga proyek dinilai layak untuk dilaksanakan.

Gambar 4.18 Grafik Pengembalian Investasi



Grafik pengembalian investasi menunjukkan bahwa akumulasi penghematan biaya operasional meningkat setiap tahun. Titik perpotongan antara akumulasi penghematan dan investasi awal terjadi sekitar tahun ke-6 hingga ke-7, yang menunjukkan periode pengembalian investasi (*payback period*).

3. *Benefit Cost Ratio* (BCR)

Benefit Cost Ratio (BCR) digunakan untuk membandingkan nilai manfaat ekonomi dengan biaya investasi yang dikeluarkan.

Tabel 4.33 Perhitungan *Benefit Cost Ratio*

Parameter	Nilai
Present Value Benefit	Rp 12.509.000.000
Present Value Cost	Rp 8.200.000.000
BCR	1,53

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.33, diperoleh nilai *Benefit Cost Ratio* (BCR) sebesar 1,53. Nilai tersebut lebih besar dari satu ($BCR > 1$), yang menunjukkan bahwa manfaat ekonomi yang diperoleh selama umur proyek lebih besar dibandingkan biaya investasi yang dikeluarkan. Dengan demikian, proyek pembangunan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS layak untuk direalisasikan dari aspek ekonomi.

4.7 Pembahasan Hasil Penelitian

Pembahasan hasil penelitian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS yang telah dirancang dan disimulasikan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi sistem eksisting yang hanya menggunakan PLTD dengan sistem *hybrid* yang mengintegrasikan PLTS 300 kWp dan BESS. Aspek yang dianalisis meliputi konsumsi bahan bakar, operasi pembangkit, pemanfaatan energi terbarukan, kelayakan teknis, dan kelayakan ekonomi.

4.7.1 Perbandingan Sistem Eksisting dan Sistem *Hybrid*

Berdasarkan hasil simulasi, penerapan sistem *hybrid* memberikan perubahan yang signifikan terhadap kinerja sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang. Pada kondisi eksisting, seluruh kebutuhan energi listrik dipenuhi oleh PLTD sehingga konsumsi

bahan bakar solar dan biaya operasional relatif tinggi. Setelah integrasi PLTS dan BESS, sebagian kebutuhan energi dapat dipenuhi oleh energi surya sehingga ketergantungan terhadap PLTD berkurang.

Tabel 4.34 Perbandingan Sistem Eksisting dan Sistem *Hybrid*

Parameter	Sistem Eksisting	Sistem <i>Hybrid</i>
Produksi Energi PLTD (kWh/tahun)	3.290.604	2.800.213
Produksi Energi PLTS (kWh/tahun)	0	490.391
Konsumsi BBM (liter/tahun)	888.463	756.058
Penghematan BBM (liter/tahun)	-	132.405
Penetrasi Energi Terbarukan (%)	0	14,9
NPV (Rp)	-	4.309.000.000
<i>Payback Period</i> (Tahun)	-	6,44
BCR	-	1,53

Berdasarkan Tabel 4.35, sistem *hybrid* mampu menurunkan produksi energi PLTD sebesar 490.391 kWh per tahun yang digantikan oleh energi dari PLTS. Dampak langsung dari pengurangan produksi energi diesel tersebut adalah berkurangnya konsumsi bahan bakar solar sebesar 132.405 liter per tahun atau sekitar 14,9% dibandingkan kondisi eksisting. Selain memberikan manfaat teknis, sistem *hybrid* juga menunjukkan hasil yang layak secara ekonomi dengan nilai NPV positif, BCR lebih besar dari satu, dan periode pengembalian investasi yang relatif singkat.

4.7.2 Pengaruh PLTS terhadap Pengurangan Konsumsi BBM

PLTS berperan sebagai sumber energi terbarukan yang menggantikan sebagian energi yang sebelumnya diproduksi oleh PLTD. Produksi energi listrik dari PLTS sebesar 490.391 kWh per tahun mampu mengurangi kebutuhan operasi generator diesel terutama pada siang hari ketika intensitas radiasi matahari berada pada kondisi optimum. Berkurangnya energi yang diproduksi oleh PLTD menyebabkan konsumsi bahan bakar solar menurun dari 888.463 liter per tahun menjadi 756.058 liter per tahun. Penghematan sebesar 132.405 liter per tahun menunjukkan bahwa pemanfaatan energi surya memberikan dampak yang signifikan terhadap efisiensi operasional sistem kelistrikan. Selain mengurangi biaya operasional, pengurangan penggunaan bahan bakar diesel juga berpotensi menurunkan emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit.

4.7.3 Pengaruh PLTS terhadap Operasi BESS

Keberadaan PLTS memiliki hubungan yang sangat erat dengan operasi BESS. Pada saat produksi energi surya melebihi kebutuhan beban, energi surplus disimpan ke dalam baterai melalui proses *charging*. Energi yang tersimpan tersebut kemudian digunakan kembali pada saat produksi energi surya menurun atau ketika terjadi peningkatan beban pada malam hari. Hasil simulasi menunjukkan bahwa BESS mampu berfungsi sebagai media penyimpanan energi yang efektif dalam mendukung operasi sistem *hybrid*. Dengan adanya BESS, energi surya yang dihasilkan pada siang hari tidak terbuang dan dapat dimanfaatkan kembali untuk membantu memenuhi kebutuhan beban malam hari. Kondisi ini meningkatkan tingkat pemanfaatan energi terbarukan sekaligus membantu mengurangi pembebanan PLTD pada saat beban puncak.

4.7.4 Kelayakan Teknis Sistem

Dari aspek teknis, sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS menunjukkan kinerja yang baik dalam memenuhi kebutuhan energi listrik pelanggan. Integrasi PLTS mampu meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan hingga 14,9% dari total kebutuhan energi sistem. Selain itu, penggunaan BESS membantu menjaga stabilitas suplai daya dan mengurangi fluktuasi pembebanan pada PLTD. Keandalan sistem juga meningkat karena terdapat lebih dari satu sumber energi yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban. Ketika produksi energi surya menurun, PLTD tetap mampu menjaga kontinuitas pasokan listrik, sementara BESS dapat digunakan sebagai sumber energi pendukung pada kondisi tertentu. Dengan demikian, sistem *hybrid* dinilai layak diterapkan dari sisi teknis karena mampu memenuhi kebutuhan daya secara andal dan efisien.

4.7.5 Kelayakan Ekonomi Sistem

Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa investasi pembangunan sistem *hybrid* memiliki prospek yang baik untuk diterapkan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang. Nilai NPV sebesar Rp 4,309 miliar menunjukkan bahwa manfaat ekonomi yang diperoleh lebih besar dibandingkan biaya investasi yang dikeluarkan. Selain itu, nilai BCR sebesar 1,53 menunjukkan bahwa setiap satu rupiah biaya investasi mampu menghasilkan manfaat ekonomi sebesar 1,53 rupiah. *Payback Period* sebesar 6,44 tahun juga menunjukkan bahwa investasi dapat kembali dalam waktu yang relatif singkat dibandingkan umur proyek yang direncanakan selama 20 tahun. Dengan demikian, sistem *hybrid* dinyatakan layak untuk diterapkan dari sisi ekonomi karena mampu memberikan penghematan biaya operasional yang signifikan selama masa operasi.

4.7.6 Efektivitas Sistem *Hybrid* dalam Memenuhi Kebutuhan Listrik Pulau Gili Ketapang

Berdasarkan keseluruhan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS terbukti efektif dalam memenuhi kebutuhan listrik Pulau Gili Ketapang. Sistem mampu mengombinasikan keandalan PLTD dengan pemanfaatan energi surya dan teknologi penyimpanan energi untuk menghasilkan sistem kelistrikan yang lebih efisien dan berkelanjutan. PLTS berkontribusi dalam mengurangi penggunaan bahan bakar diesel, sementara BESS berfungsi untuk menyimpan energi berlebih dan menjaga kestabilan suplai daya. Kombinasi ketiga komponen tersebut menghasilkan sistem yang lebih hemat energi, lebih ramah lingkungan, dan memiliki biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan sistem eksisting. Oleh karena itu, penerapan sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS dapat menjadi solusi yang efektif untuk mendukung pengembangan sistem kelistrikan yang berkelanjutan di Pulau Gili Ketapang.

Tabel 4.35 Rekapitulasi Hasil Penelitian

Indikator	Hasil
Kapasitas PLTS	300 kWp
Produksi Energi PLTS	490.391 kWh/tahun
Pengurangan Energi PLTD	490.391 kWh/tahun
Penghematan BBM	132.405 liter/tahun
Penetrasi Energi Terbarukan	14,9 %
NPV	Rp 4.309.000.000
<i>Payback Period</i>	6,44 Tahun
BCR	1,53
Kelayakan Teknis	Layak
Kelayakan Ekonomi	Layak

Tabel 4.35 menunjukkan rekapitulasi hasil penelitian yang telah dilakukan. Integrasi PLTS 300 kWp dan BESS

mampu menghasilkan energi sebesar 490.391 kWh per tahun dan mengurangi konsumsi bahan bakar solar hingga 132.405 liter per tahun. Selain memberikan manfaat teknis berupa peningkatan pemanfaatan energi terbarukan dan efisiensi operasi sistem, hasil analisis ekonomi juga menunjukkan bahwa proyek memiliki nilai NPV positif, BCR lebih besar dari satu, dan *Payback Period* yang relatif singkat. Dengan demikian, sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS yang dirancang dapat dinyatakan layak untuk diterapkan pada sistem kelistrikan Pulau Gili Ketapang baik dari aspek teknis maupun ekonomi.

