

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Penelitian yang Relevan

Penelitian mengenai optimisasi operasi pembangkit pada sistem kelistrikan terisolasi telah banyak dikembangkan, terutama pada sistem yang mengintegrasikan pembangkit konvensional dengan energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi. Beberapa penelitian sebelumnya menjadi dasar penting dalam penyusunan tesis ini karena memiliki keterkaitan dengan penggunaan metode optimisasi, sistem pembangkit hibrida, serta strategi penjadwalan operasi pembangkit.

Tabel 2. 1 Sintesis Penelitian yang Relevan

No	Peneliti / Tahun	Fokus Penelitian	Metode	Kelebihan / Kontribusi Penelitian Terdahulu	Keterbatasan / Research Gap	Perbedaan dan Novelty Tesis
1	1. Aya Amer 2. Ahmed Massoud 3. Khaled Shaba (2024) [15]	<i>“Optimization of hybrid renewable-diesel power plants considering operational cost, battery degradation, and emissions”</i>	MILP (Mixed-Integer Linear Programming) /EMS (Energy Management System)	Mengoptimalkan biaya operasi, degradasi baterai, dan emisi secara simultan	Studi diterapkan pada microgrid umum , belum secara spesifik pada sistem isolated milik PLN dan belum menitikberatkan DED PLTD–PLTS–BESS	Tesis menerapkan DED–MILP 24 jam pada sistem nyata isolated Labuhan Aji , dengan fokus pada kombinasi dispatch PLTD, pemanfaatan PLTS, operasi BESS, biaya operasi, emisi, dan RES
2	1. Fatma Ahmed 2. Rasyid Al-Abri 3. Hassan Yousef 4. Ahmed M. Massoud (2024) [19]	<i>“An Optimal Energy Dispatch Management System for Hybrid Power Plants: PV-Grid-Battery-Diesel Generator-Pumped Hydro Storage”</i>	MILP (Mixed-Integer Linear Programming) dan SDDP (Stochastic Dual Dynamic Programming)	Menghasilkan dispatch multi-sumber dengan biaya dan emisi minimum	Sistem bersifat grid-connected dan menggunakan pumped hydro; karakteristiknya berbeda dengan isolated diesel-based system	Tesis secara khusus menangani sistem tanpa koneksi grid , dengan PLTD sebagai pembangkit dispatchable utama serta PLTS dan BESS sebagai sumber pendukung

No	Peneliti / Tahun	Fokus Penelitian	Metode	Kelebihan / Kontribusi Penelitian Terdahulu	Keterbatasan / Research Gap	Perbedaan dan Novelty Tesis
3	1. Lucky Andika Novario 2. Kevin Marojahan Nabor, 3. Nanang Hariyanto 4. Adi Fitriatmojo 5. Yanuardhi Ariaf Budiono (2024) [20]	“Desain Optimal untuk Pembangkit Hibrida PLTS, Baterai, Hydrogen Fuel Cells dan PLTD pada Pulau Baranglombo dan Laelae”	<i>Optimal sizing & optimal design</i>	Menentukan kapasitas optimal sistem hybrid dan meningkatkan keandalan serta efisiensi	Fokus pada sizing/desain kapasitas , bukan penjadwalan operasi pembangkit secara dinamis	Tesis tidak berfokus pada sizing, tetapi pada optimalisasi operasi/dispatch setiap periode waktu selama 24 jam menggunakan DED–MILP
4	1. Agung Wicaksono 2. Rony Seto Wibowo 3. I Made Yulistya Negara [21]	"Optimasi Perencanaan Operasi Pembangkit Listrik Berbasis <i>Mixed-Integer Linear Programming</i> (MILP) pada Sistem <i>Isolated Selayar</i> "	MILP (<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>)	Membuktikan MILP dapat menekan biaya operasi sistem isolated	Integrasi PLTS dan BESS belum dimodelkan secara komprehensif; belum menggunakan konsep DED PLTD–PLTS–BESS secara terintegrasi	Tesis mengembangkan dispatch terintegrasi PLTD–PLTS–BESS dengan constraint PLTD, ramp rate, SOC, charging/discharging BESS, power balance, serta evaluasi RES dan emisi
5	Zainal Arifin, Habudin Hassan, Desti Alkano [22]	“ <i>Optimal Sizing and Performance Assessment of a Hybrid Diesel and Photovoltaic with Battery Storage Limited by a Take-or-Pay Contract of Power Purchase Agreement in Nusa Penida Island, Indonesia</i> ”	<i>Optimal sizing & performance assessment</i>	Menentukan kapasitas PLTS dan BESS optimal dalam batas take-or-pay PPA	Lebih berorientasi pada kapasitas investasi dan performance assessment , bukan dispatch harian	Tesis berfokus pada operational optimization , menentukan berapa daya PLTD, PLTS, charge/discharge BESS pada setiap jam agar operasi sistem minimum biaya
6	1. Woan-HoPark 2. Hamza Abunima 3. Mark B. Glick 4. Yun-Su Kim (2021) [23]	“ <i>Energy Curtailment Scheduling MILP Formulation for an Islanded Microgrid with High Penetration of Renewable Energy</i> ”	MILP (<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>)	Mengoptimalkan curtailment, mengurangi stress ESS dan meningkatkan kestabilan sistem	Fokus utama pada renewable curtailment , bukan economic dispatch PLTD dan minimisasi biaya-emisi secara komprehensif	Tesis menjadikan biaya operasi sistem sebagai fungsi objektif utama , dengan integrasi constraint PLTD–PLTS–BESS serta mengukur dampaknya terhadap emisi dan bauran energi hijau

No	Peneliti / Tahun	Fokus Penelitian	Metode	Kelebihan / Kontribusi Penelitian Terdahulu	Keterbatasan / Research Gap	Perbedaan dan Novelty Tesis
7	1. Karthik Nagarajan 2. Arul Rajagopalan 3. S. Angalaeswari 4. L. Natrayan 5. Wubishet DM (2022) [24]	“ <i>Combined Economic Emission Dispatch of Microgrid with the Incorporation of Renewable Energy Sources Using Improved Mayfly Optimization Algorithm</i> ”	CEED (<i>Combined Economic and Emission Dispatch</i>)	Menunjukkan trade-off biaya dan emisi dapat dioptimalkan secara simultan	Belum secara spesifik memasukkan DED 24 jam dan model PLTD–PLTS–BESS dengan constraint operasi detail	Tesis menggunakan DED berbasis MILP sehingga hubungan antarperiode, terutama ramp rate PLTD dan SOC BESS, dapat diperhitungkan secara eksplisit
8	1. Rae-Kyun Kim 2. Mark B. Glick 3. Keith R. Olson 4. Yun-Su Kim (2021) [25]	“ <i>MILP-PSO Combined Optimization Algorithm for an Islanded Microgrid Scheduling with Detailed Battery ESS Efficiency Model and Policy Considerations</i> ”	MILP (<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>) dan PSO (<i>Particle Swarm Optimization</i>)	Memodelkan efisiensi BESS secara lebih detail dan menjaga constraint SOC	Fokus pada pengembangan algoritma MILP–PSO dan model ESS, bukan penerapan DED pada sistem kelistrikan PLN Indonesia	Tesis menawarkan implementasi langsung pada kasus operasional sistem isolated Labuhan Aji , menggunakan MILP yang lebih transparan, deterministik, dan mudah direplikasi untuk kebutuhan perencanaan operasi PLN
9	1. Chizindu Atanley Esobinenwu (2023) [26]	“ <i>Optimization of Hybrid Solar PV and Diesel Generator System for an Efficient Electricity Supply</i> ”	optimisasi simulasi HOMER	Membuktikan PV–diesel dapat menurunkan biaya energi dan emisi secara signifikan	HOMER terutama digunakan untuk evaluasi konfigurasi/sizing dan keekonomian; belum membentuk dispatch DED berbasis constraint per jam secara eksplisit	Tesis menggunakan model matematis DED–MILP , sehingga keputusan daya setiap unit PLTD serta charge/discharge BESS dapat dikendalikan secara eksplisit setiap jam
10	1. Heru Rianto 2. Tri Wahyu Adi (2024) [27]	“Analisis Tekno-Ekonomi Sistem PLTD–PLTS–BESS pada Sistem Kelistrikan Terisolasi”	HOMER & LCOE (<i>Levelized Cost of Electricity</i>)	Menunjukkan PLTD–PLTS–BESS layak secara teknis-ekonomis serta menurunkan BPP dan emisi	Belum menghasilkan strategi operasi harian pembangkit yang optimal	Tesis melengkapi gap tersebut dengan menentukan jadwal operasi optimal 24 jam menggunakan DED–MILP dan membandingkan PLTD, PLTD–PLTS, dan PLTD–PLTS–BESS

Tabel 2.1 menyajikan sintesis beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan kajian Optimisasi Sistem Suplai Pembangkit pada PT PLN (Persero) Labuhan Aji, Nusa Tenggara Barat. Dari sepuluh penelitian terdahulu terlihat bahwa penelitian mengenai sistem pembangkitan hibrida telah berkembang dalam beberapa arah, yaitu *optimal sizing*, analisis tekno-ekonomi, *energy management system*, *economic emission dispatch*, *renewable curtailment*, serta penjadwalan *microgrid* berbasis MILP. Berbagai penelitian tersebut telah membuktikan bahwa integrasi energi terbarukan dan penyimpanan energi mampu mengurangi biaya operasi maupun emisi karbon.

Namun, masih terdapat celah penelitian karena sebagian besar studi berfokus pada perancangan kapasitas sistem, sistem *grid-connected*, *microgrid* generik, penggunaan HOMER, atau pengembangan metode optimisasi, dan belum secara spesifik memformulasikan Dynamic Economic Dispatch PLTD–PLTS–BESS pada sistem kelistrikan terisolasi PLN dengan karakteristik operasi aktual selama 24 jam.

Dengan demikian, *novelty* tesis ini bukan semata-mata penggunaan MILP, karena MILP telah banyak digunakan pada penelitian sebelumnya. Kebaruan justru terletak pada integrasi objek, formulasi, dan konteks implementasinya, yaitu:

1. Penerapan DED–MILP secara terintegrasi pada PLTD–PLTS–BESS di sistem isolated Labuhan Aji, bukan sekadar *microgrid* generik atau *grid-connected*.
2. Optimisasi operasi dinamis selama 24 jam, sehingga keputusan pembangkitan mempertimbangkan keterkaitan antar waktu.
3. Pemodelan *constraint* teknis secara terintegrasi: *power balance*, *minimum–maximum output* PLTD, status ON/OFF, *ramp rate*, batas PLTS, SOC BESS, efisiensi *charge/discharge*, serta batas daya BESS.
4. Perbandingan tiga skenario operasi yang konsisten, yaitu PLTD tunggal, PLTD–PLTS, serta PLTD–PLTS–BESS.
5. Evaluasi tidak hanya berdasarkan biaya, tetapi juga produksi PLTD, emisi CO₂, energi hijau, dan *Renewable Energy Share* (RES).
6. Hasil optimisasi menghasilkan jadwal *dispatch* setiap jam yang operasional, sehingga lebih dekat dengan kebutuhan pengambilan keputusan operasi pembangkitan PLN dibanding penelitian yang hanya menghasilkan kapasitas optimal atau nilai LCOE.

Tabel 2. 2 Matriks Systematic Literature Review (SLR) dimensi penelitian

Penelitian	Sistem Isolated	PLTD	PLTS/PV	BESS	DED 24 Jam	MILP	Economic Dispatch	Emisi	RES	Optimal Sizing	Dispatch Operasional
Amer et al. (2024)	△	✓	✓	✓	△	✓	✓	✓	–	–	✓
Ahmed et al. (2024)	–	✓	✓	✓	△	✓	✓	✓	–	–	✓
Novario et al. (2024)	✓	✓	✓	✓	–	–	–	✓	–	✓	–
Wicaksono et al.	✓	✓	△	△	△	✓	✓	–	–	–	✓
Arifin et al.	✓	✓	✓	✓	–	–	–	△	–	✓	–
Park et al. (2021)	✓	△	✓	✓	△	✓	△	–	–	–	✓
Nagarajan et al. (2022)	✓	✓	✓	△	△	–	✓	✓	–	–	✓
Kim et al. (2021)	✓	△	✓	✓	△	✓	✓	–	–	–	✓
Esobinenwu (2023)	✓	✓	✓	–	–	–	△	✓	–	✓	–
Rianto & Adi (2024)	✓	✓	✓	✓	–	–	–	✓	–	✓	–
Tesis	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓

Keterangan:

✓ = dibahas secara utama

△ = dibahas sebagian/tidak menjadi fokus utama

– = tidak menjadi fokus penelitian

Berdasarkan tabel 2.2 matriks SLR diatas, dapat dilihat bahwa penelitian terdahulu umumnya terbagi menjadi tiga kelompok. Pertama, penelitian yang berfokus pada optimal sizing dan kajian tekno-ekonomi, seperti Novario et al., Arifin et al., Esobinenwu, serta Rianto dan Adi. Kelompok ini mampu menunjukkan kelayakan konfigurasi sistem hybrid, tetapi belum menghasilkan strategi *dispatch* harian yang eksplisit.

Kedua, terdapat penelitian yang menggunakan MILP untuk optimisasi operasi microgrid, seperti Amer et al., Ahmed et al., Park et al., Wicaksono et al., serta Kim et al. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa MILP efektif untuk

menyelesaikan permasalahan penjadwalan dan pengelolaan energi, tetapi objek sistem, konfigurasi pembangkit, dan fokus optimisasinya belum sepenuhnya sesuai dengan karakteristik sistem kelistrikan Labuhan Aji.

Ketiga, penelitian seperti Nagarajan et al. telah mengintegrasikan aspek *economic* dan *emission dispatch*, tetapi belum secara spesifik mengembangkan *Dynamic Economic Dispatch* berbasis MILP untuk konfigurasi PLTD–PLTS–BESS pada sistem *isolated*.

Posisi tesis ini berada pada irisan beberapa aspek yang sebelumnya masih terpisah, yaitu sistem kelistrikan *isolated*, PLTD–PLTS–BESS, *Dynamic Economic Dispatch* 24 jam, MILP, *constraint* teknis PLTD dan BESS, biaya operasi, emisi CO₂, serta *Renewable Energy Share*.

Penelitian yang paling mendekati tesis saya adalah Wicaksono et al. dari sisi sistem *isolated* dan penggunaan MILP, Amer et al. dari sisi integrasi *renewable–diesel–battery* dan optimisasi biaya-emisi, serta Kim et al. dari sisi *scheduling islanded microgrid* dengan BESS. Perbedaannya, penelitian saya mengintegrasikan PLTD–PLTS–BESS dalam formulasi *Dynamic Economic Dispatch* 24 jam berbasis MILP pada kasus spesifik sistem *isolated* Labuhan Aji, serta mengevaluasi biaya operasi, emisi CO₂, dan *Renewable Energy Share*

Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan dan penerapan model *Dynamic Economic Dispatch* berbasis *Mixed Integer Linear Programming* pada sistem pembangkitan hibrida PLTD–PLTS–BESS di sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji. Model mengintegrasikan karakteristik operasional PLTD, *ramp rate*, ketersediaan PLTS, serta dinamika SOC dan *charge–discharge* BESS dalam horizon operasi 24 jam. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang sebagian besar berorientasi pada optimal sizing, analisis tekno-ekonomi, HOMER, atau *microgrid* generik, penelitian ini menghasilkan jadwal *dispatch* optimal per jam serta mengevaluasi secara simultan dampaknya terhadap biaya operasi, produksi PLTD, emisi CO₂, energi hijau, dan *Renewable Energy Share* melalui perbandingan tiga simulasi skenario integrasi PLTD–PLTS–BESS pada sistem kelistrikan terisolasi.

1.2 Landasan Teori

Landasan teori dalam penelitian ini digunakan untuk menjelaskan konsep-konsep utama yang menjadi dasar dalam penyusunan model optimisasi. Pembahasan meliputi sistem kelistrikan terisolasi, PLTD, PLTS, BESS, sistem hibrida PLTD–PLTS–BESS, *Economic Dispatch*, *Dynamic Economic Dispatch*, penjadwalan pembangkit, *ramp rate*, biaya operasional pembangkit, MILP, emisi karbon, dan bauran energi hijau.

1.2.1 Sistem Kelistrikan Terisolasi

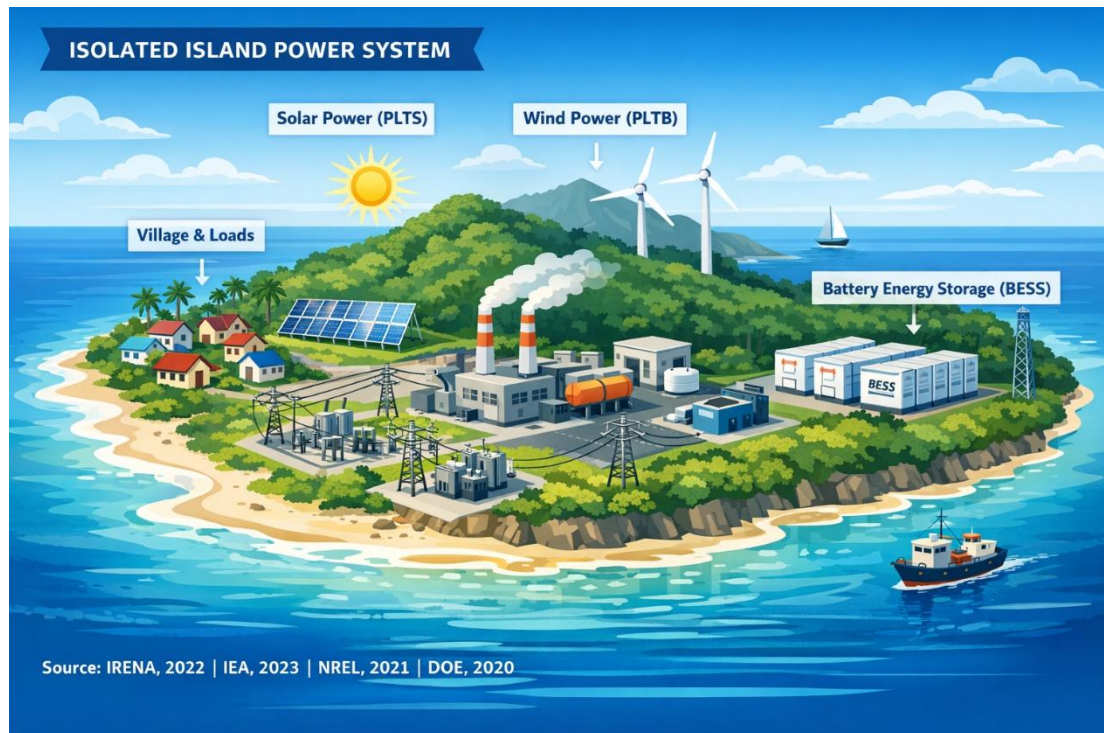
Sistem kelistrikan terisolasi merupakan sistem tenaga listrik yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan interkoneksi yang lebih besar. Pada sistem ini, seluruh kebutuhan beban harus dipenuhi oleh pembangkit lokal yang tersedia di wilayah tersebut. Kondisi ini menyebabkan keandalan pasokan listrik sangat bergantung pada kapasitas pembangkit, cadangan daya, serta pola pengoperasian unit pembangkit [1], [2].

Sistem kelistrikan terisolasi umumnya dijumpai pada wilayah kepulauan, daerah terpencil, atau lokasi yang belum memiliki akses terhadap jaringan transmisi utama. Karakteristik utama sistem ini adalah kapasitas pembangkitan yang terbatas, variasi beban yang relatif sensitif terhadap perubahan konsumsi, serta kebutuhan pengelolaan operasi yang lebih hati-hati agar keseimbangan antara pembangkitan dan beban tetap terjaga.

Dibandingkan dengan sistem interkoneksi, sistem terisolasi memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi terhadap gangguan operasi. Apabila salah satu unit pembangkit mengalami gangguan, dampaknya dapat langsung memengaruhi kontinuitas pasokan listrik. Oleh sebab itu, sistem kelistrikan terisolasi memerlukan strategi operasi pembangkit yang tepat, khususnya ketika terdapat perubahan beban harian atau integrasi sumber energi terbarukan yang bersifat intermiten.

Dalam konteks penelitian ini, sistem kelistrikan Labuhan Aji termasuk dalam kategori sistem kelistrikan terisolasi karena pasokan listriknya dipenuhi oleh pembangkit lokal. Integrasi PLTS dan BESS pada sistem tersebut memerlukan

pengaturan operasi yang optimal agar keandalan sistem tetap terjaga dan ketergantungan terhadap PLTD dapat dikurangi.



Gambar 2. 1 Sistem Kelistrikan Isolasi di Pulau

Sistem ini menggambarkan bagaimana sumber energi terbarukan dan konvensional bekerja bersama untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat pulau.

- PLTS (*Solar PV*): menghasilkan listrik dari energi matahari, biasanya menjadi sumber utama di siang hari.
- PLTB (*Wind Turbine*): memanfaatkan angin untuk menambah pasokan energi, terutama di daerah pesisir.
- PLTD (*Diesel Generator*): berfungsi sebagai cadangan atau sumber utama saat energi terbarukan tidak mencukupi.
- BESS (*Battery Energy Storage System*): menyimpan surplus energi dari PLTS/PLTB dan melepaskannya kembali saat beban meningkat atau sumber terbarukan menurun.

- *Substation & Jaringan Distribusi*: menghubungkan semua sumber energi ke beban (rumah, fasilitas publik, industri kecil).

1.2.2 *Economic Dispatch (ED)* dan *Dynamic Economic Dispatch (DED)*

1.2.2.1 *Economic Dispatch (ED)*

Economic Dispatch (ED) merupakan metode optimisasi operasi pembangkit yang digunakan untuk menentukan besarnya daya keluaran dari setiap unit pembangkit agar total biaya operasi sistem menjadi minimum. Dalam penerapannya, ED tetap harus memenuhi kebutuhan beban dan memperhatikan batasan teknis masing-masing pembangkit, seperti kapasitas minimum dan maksimum daya keluaran [28], [29].

Pada sistem pembangkitan konvensional, ED biasanya dilakukan setelah status operasi unit pembangkit ditentukan. Dengan demikian, ED berfungsi mengatur pembagian beban di antara unit pembangkit yang sedang beroperasi agar sistem dapat bekerja secara ekonomis.

Faktor-faktor yang perlu diperhatikan dalam ED meliputi karakteristik biaya produksi, kapasitas pembangkit, batasan teknis, dan kemampuan perubahan daya atau *ramp rate*. Semakin tepat pembagian daya antarunit pembangkit, semakin efisien biaya operasi yang dapat dicapai.

Namun, ED konvensional umumnya bersifat statis karena hanya mempertimbangkan kondisi pada satu waktu tertentu. Pendekatan ini belum cukup untuk menggambarkan dinamika sistem kelistrikan yang mengalami perubahan beban dan perubahan keluaran pembangkit dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih dinamis, yaitu *Dynamic Economic Dispatch (DED)*.

1.2.2.2 *Dynamic Economic Dispatch (DED)*

Dynamic Economic Dispatch (DED) merupakan pengembangan dari *Economic Dispatch* yang mempertimbangkan perubahan kondisi sistem dalam beberapa interval waktu. Berbeda dengan ED statis, DED memperhitungkan hubungan

antar waktu, seperti perubahan beban, batas ramp rate pembangkit, status operasi unit, serta kondisi sistem penyimpanan energi.

DED sangat relevan diterapkan pada sistem pembangkit hibrida karena sistem tersebut memiliki karakteristik operasi yang berubah sepanjang waktu. Beban listrik dapat berubah setiap jam, keluaran PLTS dipengaruhi oleh iradiasi matahari, sedangkan BESS mengalami perubahan kondisi energi berdasarkan proses charge dan discharge. Oleh karena itu, DED dapat memberikan hasil penjadwalan pembangkit yang lebih realistis dibandingkan ED konvensional.

Dalam penelitian ini, DED digunakan untuk menentukan strategi operasi harian sistem PLTD–PLTS–BESS pada horizon waktu 24 jam. Pendekatan ini memungkinkan model mempertimbangkan biaya operasi, batas teknis PLTD, pemanfaatan PLTS, serta dinamika SoC BESS secara terpadu.

1.2.2.3 DED Strategi Operasi Sistem PLTD-PLTS-BESS

Adapun hal-hal yang perlu diperhatikan dalam DED Strategi Operasi Sistem PLTD-PLTS-BESS meliputi:

a. Penjadwalan Pembangkit

Penjadwalan pembangkit merupakan proses penentuan unit pembangkit yang harus beroperasi serta besarnya daya yang harus dihasilkan dalam periode waktu tertentu. Tujuan utama penjadwalan pembangkit adalah memastikan kebutuhan beban terpenuhi dengan biaya operasi yang minimum, tanpa mengabaikan keandalan sistem dan batas teknis pembangkit [30].

Pada sistem kelistrikan terisolasi, penjadwalan pembangkit menjadi lebih penting karena jumlah unit pembangkit terbatas dan cadangan daya relatif kecil. Kesalahan dalam penjadwalan dapat menyebabkan pembangkit beroperasi tidak efisien, konsumsi bahan bakar meningkat, atau bahkan berisiko mengganggu kontinuitas pasokan listrik.

Dalam sistem PLTD–PLTS–BESS, penjadwalan pembangkit tidak hanya menentukan operasi PLTD, tetapi juga mengatur pemanfaatan PLTS dan BESS. Oleh karena itu, penjadwalan harus mampu menentukan kapan PLTD dinyalakan atau dimatikan, seberapa besar daya PLTS yang digunakan, serta kapan BESS harus melakukan pengisian atau pengosongan energi.

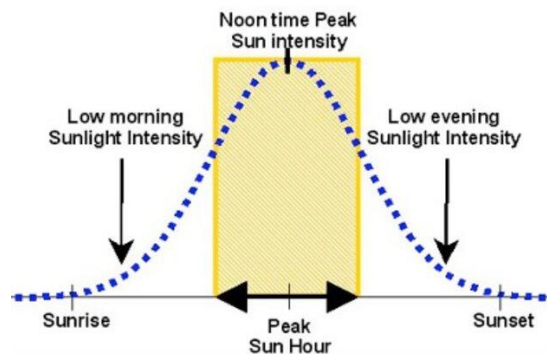
b. Ramp Rate Pembangkit dan Keandalan Sistem

Ramp rate adalah kemampuan pembangkit untuk menaikkan atau menurunkan daya keluarannya dalam suatu interval waktu tertentu [31]. Parameter ini penting dalam operasi sistem tenaga listrik karena pembangkit tidak dapat mengubah daya secara tiba-tiba tanpa batas. Setiap unit pembangkit memiliki kemampuan ramping yang berbeda sesuai karakteristik teknis mesin.

Ramp rate menggambarkan kecepatan perubahan daya keluaran pembangkit, baik peningkatan maupun penurunan, dari satu tingkat ke tingkat lainnya. Parameter ini sangat penting karena menentukan kemampuan pembangkit untuk menyesuaikan output daya terhadap fluktuasi permintaan listrik secara cepat, sehingga dapat menghindari pemborosan energi system [4], [32].

Kemampuan *ramping up* (peningkatan daya) menunjukkan seberapa cepat pembangkit dapat menaikkan produksi listrik untuk mengimbangi lonjakan permintaan, misalnya pada beban puncak harian. Sebaliknya, *ramping down* (penurunan daya) menunjukkan kemampuan pembangkit menurunkan output dengan cepat saat permintaan menurun, sehingga membantu menjaga keseimbangan jaringan dan mencegah masalah seperti *overload* atau fluktuasi tegangan.

Pada sistem kelistrikan terisolasi, *ramp rate* berpengaruh langsung terhadap keandalan sistem. Ketika beban meningkat secara cepat, pembangkit harus mampu menaikkan daya keluarannya agar kebutuhan beban tetap terpenuhi. Sebaliknya, ketika beban turun atau produksi PLTS meningkat, pembangkit perlu menurunkan daya secara terkontrol agar tidak terjadi kelebihan pembangkitan.



Gambar 2. 2 *Profil Output Daya PV Terhadap Iradiasi Terhadap Waktu*

Operator sistem tenaga listrik harus memperhitungkan *ramp rate* dalam perencanaan dan alokasi daya agar keseimbangan antara produksi dan konsumsi tetap terjaga. Sebagai contoh, PLTD memiliki *ramp rate* yang relatif cepat karena proses pembakaran diesel berlangsung singkat, sedangkan PLTS bergantung pada intensitas iradiasi matahari sehingga *ramp rate*-nya ditentukan oleh perubahan kondisi cuaca.

Dalam konteks sistem PLTD–PLTS–BESS, batasan *ramp rate* PLTD perlu dimasukkan ke dalam model optimisasi. Hal ini bertujuan agar hasil penjadwalan yang diperoleh tidak hanya ekonomis, tetapi juga realistis secara teknis dan dapat diterapkan dalam operasi sistem kelistrikan Labuhan Aji.

c. Biaya Operasional Pembangkit

Biaya operasional pembangkit merupakan komponen biaya yang timbul dari proses pengoperasian unit pembangkit. Pada PLTD, biaya operasi terutama dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar minyak, biaya start-up, serta karakteristik efisiensi mesin. Semakin besar energi listrik yang dihasilkan PLTD, semakin besar pula konsumsi bahan bakar yang diperlukan.

Dalam sistem kelistrikan terisolasi, biaya operasional PLTD sering kali lebih tinggi dibandingkan sistem interkoneksi karena adanya biaya tambahan untuk pengangkutan bahan bakar ke lokasi pembangkit. Pada wilayah kepulauan, distribusi bahan bakar dapat menjadi salah satu faktor utama yang meningkatkan biaya penyediaan listrik.

Secara umum, biaya operasional ini dapat dibedakan menjadi biaya sebelum pembangkitan energi dan biaya selama proses pembangkitan energi listrik.

- Biaya Sebelum Menghasilkan Energi Listrik (*Pre-Generation Cost*)

Pre-Generation Cost adalah biaya yang timbul ketika pembangkit dinyalakan tetapi belum menghasilkan energi listrik. Biaya ini mencakup biaya *start-up*, yaitu pengeluaran untuk menghidupkan mesin dari kondisi mati (*cold start*) hingga siap beroperasi. Komponen *start-up* meliputi konsumsi bahan bakar untuk pemanasan awal, energi listrik internal untuk sistem kontrol dan pompa, serta tenaga kerja yang diperlukan dalam proses *start-up*. Selain itu, terdapat biaya *no-load*, yaitu biaya yang tetap muncul saat mesin berputar tanpa menghasilkan daya, seperti bahan bakar yang terbakar untuk menjaga putaran mesin, pelumasan, dan pendinginan [30].

- Biaya Setelah Menghasilkan Energi Listrik (*Post-Generation Cost*)

Post-Generation Cost adalah total biaya yang dikeluarkan untuk mengoperasikan pembangkit selama periode tertentu agar dapat menghasilkan energi listrik. Dalam konteks Indonesia, biaya ini sering dikaitkan dengan Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik [33], [34]. Komponen biaya mencakup *fuel cost* (biaya bahan bakar), operasi dan pemeliharaan (O&M) seperti tenaga kerja, pelumasan, penggantian suku cadang, dan inspeksi rutin, serta biaya emisi (jika diterapkan). Pada beberapa kebijakan internasional, terdapat tambahan biaya emisi CO₂, namun di Indonesia hal ini belum diterapkan secara langsung. Jika *Post-Generation Cost* dibagi dengan energi listrik yang dihasilkan, maka diperoleh BPP, yang merupakan indikator ekonomi untuk menunjukkan rata-rata biaya pembangkitan listrik.

Integrasi PLTS dan BESS berpotensi menurunkan biaya operasi karena sebagian kebutuhan beban dapat dipenuhi oleh energi surya dan energi yang disimpan dalam baterai. Dengan pengaturan dispatch yang tepat, operasi PLTD dapat dikurangi, terutama pada jam-jam ketika produksi PLTS tinggi atau ketika BESS mampu menyuplai energi ke system [35].

1.2.3 Mixed Integer Linear Programming (MILP)

Mixed Integer Linear Programming (MILP) merupakan metode optimisasi matematis yang melibatkan variabel kontinu dan variabel bilangan bulat atau biner dalam satu model. Metode ini digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi yang memiliki fungsi objektif dan kendala berbentuk linear.

Dalam sistem tenaga listrik, MILP banyak digunakan untuk pemodelan penjadwalan pembangkit karena mampu merepresentasikan keputusan operasi yang bersifat kontinu dan diskrit secara bersamaan. Variabel kontinu dapat berupa daya keluaran pembangkit, daya charge dan discharge BESS, serta nilai SoC. Sementara itu, variabel biner dapat digunakan untuk menyatakan status operasi PLTD, seperti kondisi on/off atau start-up unit pembangkit.

Keunggulan MILP terletak pada kemampuannya memodelkan sistem pembangkitan secara terstruktur dan menghasilkan solusi yang optimal berdasarkan fungsi objektif yang ditetapkan. Dalam penelitian ini, MILP digunakan untuk merumuskan model Dynamic Economic Dispatch pada sistem PLTD–PLTS–BESS. Pendekatan ini dipilih karena mampu mempertimbangkan batas daya pembangkit, status operasi PLTD, ramp rate, serta dinamika BESS dalam satu kerangka optimisasi.

1.2.4 Sistem Hibrida PLTD-PLTS-BESS

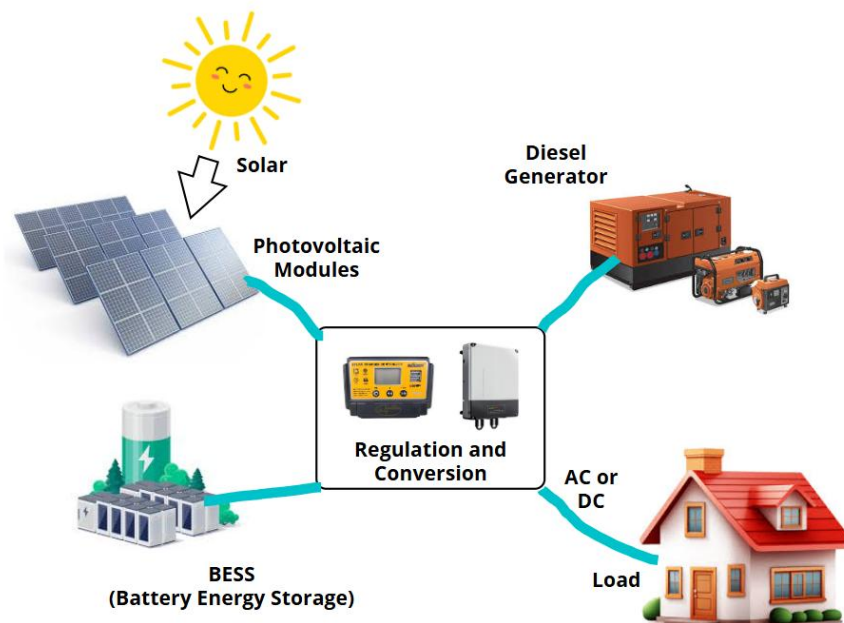
Sistem hibrida PLTD–PLTS–BESS merupakan konfigurasi pembangkitan yang menggabungkan pembangkit diesel, pembangkit tenaga surya, dan sistem penyimpanan energi. Dalam sistem ini, PLTD berperan sebagai pembangkit yang menjaga keandalan pasokan listrik, PLTS berfungsi sebagai sumber energi terbarukan, sedangkan BESS berperan sebagai penyeimbang antara pembangkitan dan kebutuhan beban.

Keunggulan sistem hibrida terletak pada kemampuannya memadukan keandalan pembangkit konvensional dengan efisiensi energi terbarukan. Pada siang hari, PLTS dapat menyuplai sebagian kebutuhan beban dan mengurangi produksi PLTD. Ketika produksi PLTS melebihi kebutuhan, energi dapat disimpan dalam BESS.

Selanjutnya, BESS dapat melepaskan energi tersebut pada saat beban meningkat atau ketika produksi PLTS menurun.

Namun, pengoperasian sistem hibrida memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan sistem berbasis PLTD saja. Hal ini disebabkan adanya perbedaan karakteristik operasi antara PLTD, PLTS, dan BESS. PLTD memiliki batas daya minimum, daya maksimum, *ramp rate*, serta status operasi *on/off*. PLTS memiliki keluaran daya yang bergantung pada iradiasi matahari, sedangkan BESS memiliki batas kapasitas, efisiensi, dan kondisi SoC yang harus dijaga.

Oleh karena itu, sistem hibrida PLTD–PLTS–BESS memerlukan strategi optimisasi yang mampu menentukan alokasi daya setiap komponen secara tepat. Strategi tersebut harus dapat memenuhi kebutuhan beban, menekan biaya operasi, mengurangi emisi karbon, serta meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan [13].

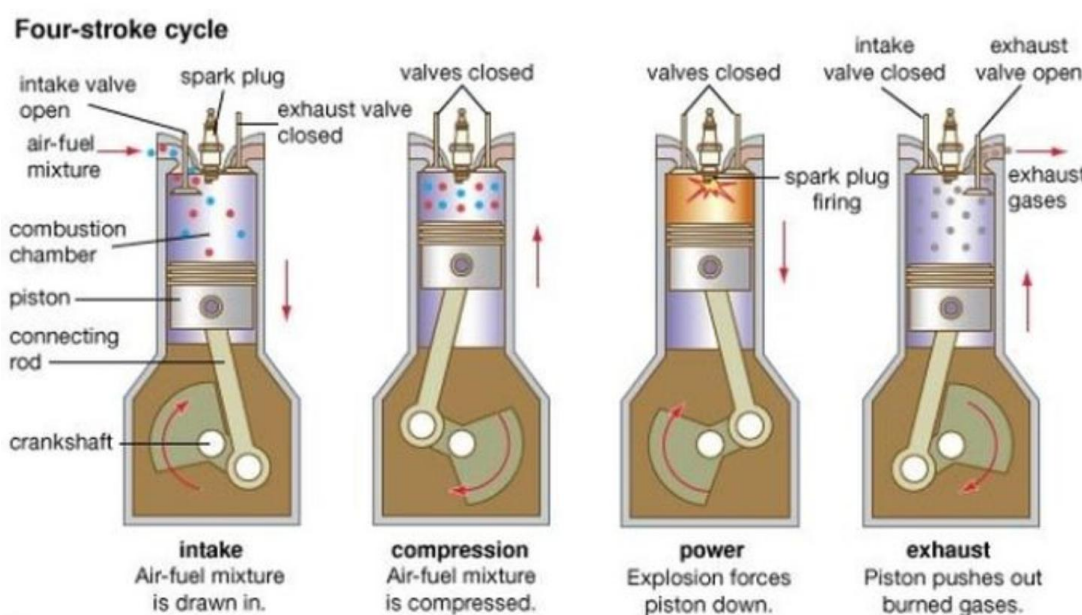


Gambar 2. 3 Sistem Kelistrikan Hibrid PLTD-PLTS-BESS

1.2.4.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama untuk menghasilkan energi

mekanis. Energi mekanis tersebut kemudian digunakan untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Pada sistem kelistrikan terisolasi, PLTD banyak digunakan karena memiliki keunggulan berupa kemampuan start-up yang cepat, pengoperasian yang fleksibel, serta kemampuan mengikuti perubahan beban secara relatif baik [36].



Gambar 2. 4 Proses *Reciprocating* Mesin Diesel [37]

Prinsip kerja PLTD didasarkan pada proses pembakaran bahan bakar diesel di dalam ruang bakar mesin. Bahan bakar diinjeksikan ke ruang bakar dan terbakar akibat udara bertekanan tinggi yang dihasilkan dari proses kompresi. Proses pembakaran tersebut menghasilkan tekanan gas yang mendorong piston. Gerakan piston kemudian diteruskan ke poros engkol sehingga menghasilkan putaran mekanis yang digunakan untuk menggerakkan generator.

Meskipun PLTD memiliki keunggulan dari sisi fleksibilitas dan keandalan, pengoperasiannya sebagai sumber utama pasokan listrik memiliki beberapa kelemahan. Kelemahan utama PLTD adalah tingginya biaya operasi akibat konsumsi bahan bakar minyak. Pada wilayah kepulauan, biaya tersebut dapat meningkat karena bahan bakar harus didistribusikan melalui jalur laut. Selain itu, PLTD juga

menghasilkan emisi karbon dan polutan udara yang cukup besar sehingga kurang mendukung sistem ketenagalistrikan yang berkelanjutan [4], [5].

Oleh karena itu, pengurangan jam operasi PLTD menjadi salah satu tujuan penting dalam pengembangan sistem pembangkit hibrida. Integrasi PLTS dan BESS diharapkan dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar diesel tanpa mengabaikan keandalan pasokan listrik.

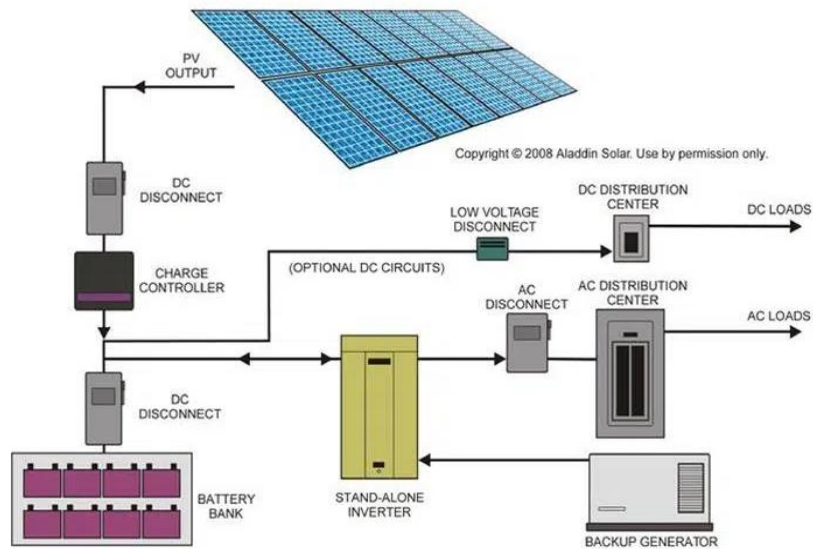
1.2.4.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik melalui modul fotovoltaik. PLTS memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia, terutama di wilayah dengan intensitas penyinaran matahari yang tinggi, termasuk Nusa Tenggara Barat.

Keunggulan PLTS terletak pada biaya operasi yang relatif rendah serta tidak menghasilkan emisi pada saat proses pembangkitan listrik berlangsung. Hal ini menjadikan PLTS sebagai salah satu alternatif pembangkit yang sesuai untuk mengurangi penggunaan pembangkit berbahan bakar fosil [6].

Namun, keluaran daya PLTS sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, kondisi cuaca, dan waktu operasi. Pada siang hari, produksi listrik dari PLTS dapat meningkat secara signifikan, sedangkan pada pagi, sore, malam hari, atau saat cuaca berawan, keluaran dayanya menurun. Karakteristik tersebut menyebabkan PLTS bersifat intermiten dan tidak sepenuhnya dapat dikendalikan oleh operator [7], [8].

Dalam sistem kelistrikan terisolasi, sifat intermiten PLTS perlu dikelola dengan baik agar tidak mengganggu keseimbangan daya. Oleh karena itu, integrasi PLTS umumnya memerlukan dukungan pembangkit konvensional atau sistem penyimpanan energi seperti BESS. Dengan pengaturan yang tepat, PLTS dapat berperan dalam mengurangi beban operasi PLTD pada siang hari dan meningkatkan kontribusi energi terbarukan dalam sistem.



Gambar 2. 5 Konfigurasi Sistem PLTS

a. Prinsip Kerja PLTS

Prinsip kerja PLTS didasarkan pada efek fotovoltaiik, yaitu proses perubahan energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Modul surya terdiri dari sel fotovoltaiik berbahan semikonduktor, umumnya silikon. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel, energi foton diserap oleh material semikonduktor dan memicu pergerakan elektron sehingga terbentuk arus listrik.

Arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya berupa arus searah atau *direct current* (DC). Agar dapat digunakan pada sistem kelistrikan yang umumnya menggunakan arus bolak-balik atau *alternating current* (AC), arus DC tersebut dikonversi menggunakan inverter. Energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan langsung untuk melayani beban, disimpan dalam baterai, atau disalurkan ke jaringan apabila sistem terhubung dengan jaringan listrik.

b. Jenis Sistem PLTS

Berdasarkan pola pengoperasiannya, sistem PLTS dapat dibedakan menjadi beberapa jenis.

Pertama, PLTS *on-grid*, yaitu sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan listrik utama. Sistem ini memungkinkan energi dari PLTS digunakan bersama dengan pasokan dari jaringan listrik.

Kedua, PLTS *off-grid*, yaitu sistem PLTS yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan utama. Sistem ini umumnya digunakan pada daerah terpencil dan memerlukan baterai sebagai media penyimpanan energi agar pasokan listrik tetap tersedia ketika produksi PLTS menurun.

Ketiga, PLTS *hybrid*, yaitu sistem yang menggabungkan PLTS dengan sumber energi lain, seperti PLTD dan BESS. Sistem hybrid dinilai sesuai untuk sistem kelistrikan terisolasi karena mampu memadukan keunggulan energi surya, keandalan PLTD, dan fleksibilitas BESS. Dalam penelitian ini, konsep PLTS hybrid menjadi bagian penting dalam pengembangan sistem pembangkitan PLTD–PLTS–BESS di Labuhan Aji.

Pemilihan jenis PLTS bergantung pada ketersediaan jaringan listrik, kondisi geografis, kebutuhan energi, serta tujuan penggunaan. Dengan perkembangan teknologi dan penurunan harga panel surya, PLTS semakin populer. Selain itu, kebijakan pengurangan ketergantungan pada energi fosil mendorong masyarakat untuk beralih ke energi ramah lingkungan. Indonesia, dengan potensi energi surya yang melimpah, memiliki peluang besar untuk mendukung kebijakan nasional terkait efisiensi, diversifikasi, dan pemerataan energi [38].

1.2.4.3 Battery Energy Storage System (BESS)

Battery Energy Storage System (BESS) merupakan sistem penyimpanan energi listrik berbasis baterai yang berfungsi menyimpan energi ketika terjadi kelebihan pembangkitan dan menyalurkannya kembali ketika kebutuhan beban meningkat atau produksi energi terbarukan menurun. Dalam sistem tenaga listrik modern, BESS memiliki peran penting dalam mendukung integrasi energi terbarukan, terutama karena PLTS memiliki keluaran daya yang tidak selalu stabil [9].

Pada sistem kelistrikan terisolasi, BESS dapat meningkatkan fleksibilitas operasi sistem. Energi yang dihasilkan PLTS pada saat produksi tinggi dapat disimpan di dalam baterai, kemudian digunakan kembali pada saat beban meningkat atau ketika produksi PLTS berkurang. Dengan demikian, BESS dapat membantu mengurangi jam operasi PLTD, menekan konsumsi bahan bakar, serta meningkatkan penetrasi energi terbarukan [10], [11]..

Pengoperasian BESS perlu memperhatikan parameter teknis, khususnya *State of Charge* (SoC), efisiensi pengisian dan pengosongan, batas daya charge dan discharge, serta batas minimum dan maksimum kapasitas baterai. Pengaturan parameter tersebut penting agar baterai dapat beroperasi secara aman, efisien, dan tidak mengalami degradasi yang berlebihan.

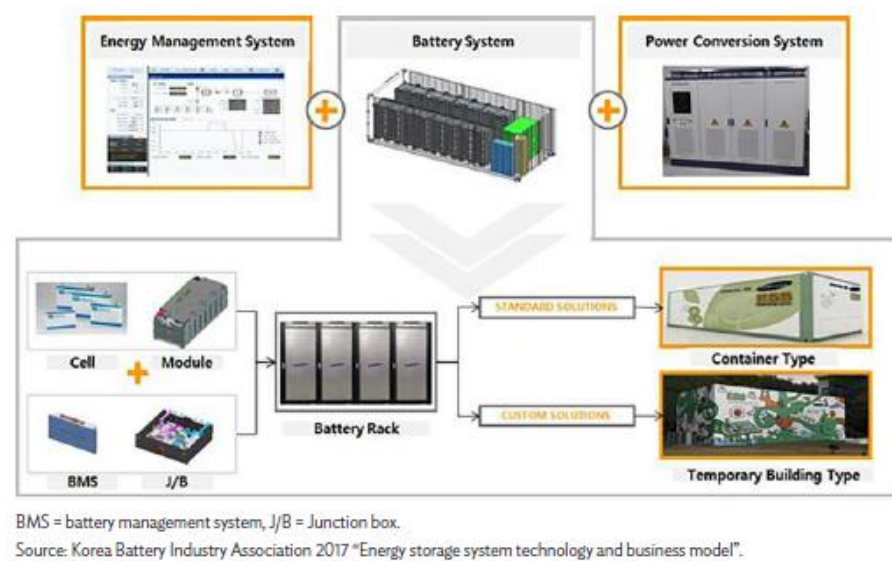
a. Komponen utama BESS meliputi:

BESS terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terpadu. Komponen pertama adalah *battery cells and modules*, yaitu bagian utama yang berfungsi menyimpan energi listrik. Teknologi baterai yang banyak digunakan adalah lithium-ion karena memiliki densitas energi tinggi, efisiensi yang baik, dan respons yang cepat [39].

Komponen kedua adalah *Power Conversion System* (PCS). PCS berfungsi mengubah arus searah dari baterai menjadi arus bolak-balik, atau sebaliknya, sesuai kebutuhan sistem. PCS juga berperan dalam mengatur proses *charge* dan *discharge* baterai, baik pada mode *grid-following* maupun *grid-forming* [40].

Komponen ketiga adalah *Battery Management System* (BMS). BMS berfungsi memantau kondisi baterai, seperti tegangan, arus, suhu, dan *State of Charge*. Selain itu, BMS juga berperan sebagai sistem proteksi untuk mencegah kondisi *overcharge*, *overdischarge*, serta gangguan termal yang dapat membahayakan baterai [41].

Komponen berikutnya adalah *Thermal Management System*, yaitu sistem yang menjaga suhu baterai agar tetap berada pada rentang operasi yang aman. Pengendalian suhu sangat penting karena baterai, khususnya lithium-ion, sensitif terhadap suhu ekstrem yang dapat mempercepat degradasi dan menurunkan umur pakai baterai [42].



Gambar 2. 6 Komponen Utama BESS [43]

Dalam sistem kelistrikan terisolasi, BESS berperan penting untuk meningkatkan fleksibilitas operasi, mengurangi ketergantungan pada PLTD, memperbesar pemanfaatan energi surya, serta meredam fluktuasi daya akibat sifat intermiten PLTS.

b. Jenis Teknologi Baterai dalam BESS

Beberapa teknologi baterai dapat digunakan dalam sistem BESS, antara lain *lithium-ion*, *lead-acid*, *sodium-sulfur*, *flow battery*, dan *nickel-cadmium*. Setiap teknologi memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda.

Baterai *lithium-ion*, khususnya tipe NMC dan LFP, banyak digunakan karena memiliki efisiensi tinggi, densitas energi besar, dan respons operasi yang cepat. Namun, jenis baterai tertentu tetap memerlukan pengendalian termal yang baik untuk mencegah risiko gangguan keselamatan.

Baterai *lead-acid* memiliki keunggulan dari sisi biaya awal yang relatif rendah, tetapi memiliki keterbatasan pada umur pakai, bobot, dan efisiensi. *Sodium-sulfur* memiliki densitas energi tinggi, namun memerlukan suhu operasi yang tinggi. Sementara itu, *flow battery* memiliki siklus operasi yang panjang dan cocok untuk

penyimpanan energi berdurasi lama, meskipun biaya awalnya relatif tinggi dan efisiensinya lebih rendah dibandingkan lithium-ion [40], [44], [45].

Pemilihan teknologi baterai perlu disesuaikan dengan kebutuhan sistem, karakteristik beban, kapasitas energi yang diperlukan, serta tujuan operasi sistem pembangkit hibrida.

	Energy density (kW/kg)	Round Trip Efficiency (%)	Life Span (years)	Eco-friendliness
Li-Ion 	1st (150–250)	1st 95	1st (10–15)	Eco-friendliness
NaS 	2nd (125–150)	2nd (75–85)	3rd (10–15)	X
Flow 	2nd (60–80)	2nd (70–75)	3rd (20–25)	X
Ni-Cd 	4th (40–60)	4th (60–80)	4th (5–10)	X
Lead Acid 	5th (30–50)	5th (60–70)	5th (3–6)	X

Li-Ion = lithium-ion, Na-S = sodium-sulfur, Ni-Cd = nickel-cadmium.
Source: Korea Battery Industry Association 2017 "Energy storage system technology and business model".

Gambar 2. 7 Perbedaan Karakteristik Jenis Teknologi Baterai [43]

c. Parameter Penting BESS

Beberapa parameter penting dalam pengoperasian BESS meliputi *Round Trip Efficiency* (RTE), *Cycle Life*, *State of Charge* (SoC), dan *Depth of Discharge* (DoD). RTE menunjukkan efisiensi total dari proses pengisian hingga pengosongan baterai. Pada baterai lithium-ion, nilai RTE umumnya berada pada kisaran yang relatif tinggi sehingga sesuai untuk aplikasi sistem tenaga listrik [46].

Cycle Life menunjukkan jumlah siklus pengisian dan pengosongan yang dapat dilakukan baterai sebelum kapasitasnya menurun sampai batas tertentu. Semakin baik pengelolaan siklus operasi baterai, semakin panjang umur pakai baterai tersebut.

State of Charge (SoC) menggambarkan tingkat energi yang tersimpan di dalam baterai pada waktu tertentu. Sementara itu, *Depth of Discharge* (DoD) menunjukkan seberapa besar energi baterai digunakan dari kapasitas totalnya. Pengoperasian dengan DoD yang terlalu tinggi secara terus-menerus dapat mempercepat penurunan umur baterai. Oleh karena itu, batas minimum dan maksimum SoC perlu dimasukkan dalam model optimisasi agar operasi BESS tetap aman dan berkelanjutan.

d. Fungsi dan Aplikasi BESS

BESS memiliki beberapa fungsi strategis dalam sistem tenaga listrik. Pertama, BESS dapat membantu menjaga stabilitas sistem melalui pengaturan daya secara cepat, termasuk dalam mendukung kestabilan frekuensi dan tegangan. Fungsi ini sangat penting pada sistem kelistrikan terisolasi yang memiliki cadangan daya terbatas [10].

Kedua, BESS mendukung integrasi energi terbarukan dengan meredam fluktuasi keluaran daya PLTS. Ketika produksi PLTS lebih tinggi dari kebutuhan beban, energi dapat disimpan ke dalam baterai. Sebaliknya, ketika produksi PLTS menurun, BESS dapat melepaskan energi untuk membantu memenuhi kebutuhan beban.

Ketiga, BESS dapat digunakan untuk *peak shaving* dan *load shifting*. Pada kondisi beban rendah atau saat produksi PLTS tinggi, baterai dapat diisi. Energi tersebut kemudian digunakan pada saat beban puncak sehingga beban kerja PLTD dapat dikurangi [47].

Keempat, BESS juga dapat berfungsi sebagai sumber daya cadangan. Dengan dukungan sistem konversi daya yang sesuai, BESS dapat membantu pemulihan sistem atau mendukung pasokan listrik pada kondisi tertentu ketika pembangkit utama mengalami keterbatasan.

1.2.5 Persamaan Optimisasi DED-MILP pada Simulasi Skenario Integrasi PLTD–PLTS–BESS di Sistem Kelistrikan Terisolasi

Persamaan yang digunakan dalam simulasi *Dynamic Economic Dispatch* (DED) berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dengan menambahkan

variabel biner untuk status ON/OFF PLTD, *ramp rate*, dan batas minimum output dapat dijelaskan sebagai berikut.

1.2.5.1 Fungsi Objektif

$$\text{Min } Z = \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} C_i \cdot P_{i,t} + C^{PLTS} \cdot P_t^{PLTS} + C^{BESS} \cdot (P_t^{BESS, ch} + P_t^{BESS, dis}) \right) \quad (2.1)$$

Keterangan:

Z : total biaya operasi sistem (Rp)

C_i : biaya operasi PLTD i (Rp/kWh)

$P_{i,t}$: daya output PLTD i pada jam t (kW)

C^{PLTS} : biaya operasi PLTS ($\approx$ Rp 0/kWh)

P_t^{PLTS} : daya output PLTS pada jam t (kW)

C^{BESS} : biaya operasi BESS ($\approx$ Rp 0/kWh)

$P_t^{BESS, ch}$: daya *charge* BESS pada jam t (kW)

$P_t^{BESS, dis}$: daya *discharge* BESS pada jam t (kW)

Fungsi objektif pada Persamaan (2.1) dirumuskan untuk meminimalkan total biaya operasi sistem pembangkitan selama horizon waktu 24 jam. Komponen biaya yang dipertimbangkan meliputi biaya operasi PLTD, biaya operasi PLTS, serta biaya operasi atau degradasi BESS akibat proses charging dan discharging. Formulasi ini sejalan dengan konsep *Dynamic Economic Dispatch* (DED), yaitu penjadwalan daya keluaran pembangkit pada setiap periode waktu untuk memperoleh biaya operasi minimum dengan tetap memenuhi kendala teknis sistem. Pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) digunakan karena mampu mengakomodasi variabel kontinu berupa daya keluaran pembangkit serta variabel biner untuk status operasi unit pembangkit. Formulasi fungsi objektif minimisasi biaya pada sistem pembangkitan

dan *microgrid hybrid PV–diesel–battery* telah banyak digunakan dalam penelitian *optimasi dispatch* berbasis MILP [48], [49], [50].

1.2.5.2 Fungsi Kendala

a. Keseimbangan Beban

$$\sum_{i \in I} P_{i,t} + P_t^{PLTS} + P_t^{BESS,dis} - P_t^{BESS,ch} = D_t \forall t \quad (2.2)$$

Keterangan:

D_t : beban listrik pada jam t (kW)

$P_{i,t}$: daya output PLTD i pada jam t (kW)

P_t^{PLTS} : daya output PLTS pada jam t (kW)

$P_t^{BESS,dis}$: daya *discharge* BESS pada jam t (kW)

$P_t^{BESS,ch}$: daya *charge* BESS pada jam t (kW)

$\forall t$: persamaan atau kendala tersebut berlaku pada setiap jam t dalam horizon waktu 1–24

Kendala keseimbangan beban pada Persamaan (2.2) digunakan untuk memastikan bahwa total daya yang disuplai oleh PLTD, PLTS, dan BESS selalu sama dengan kebutuhan beban pada setiap periode waktu. Daya *discharge* BESS berperan sebagai tambahan suplai ke sistem, sedangkan daya *charge* BESS diperlakukan sebagai beban tambahan karena menyerap daya dari sistem. Formulasi keseimbangan daya seperti ini umum digunakan dalam optimasi *dispatch* sistem *hybrid PV–diesel–battery* dan *energy management system* berbasis BESS, karena operasi sistem harus menjaga keseimbangan antara total pembangkitan, penyimpanan energi, dan kebutuhan beban pada setiap interval waktu [49], [51], [52].

b. Batasan PLTD

$$P_i^{min} \cdot u_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_i^{max} \cdot u_{i,t} \forall i, t \quad (2.3)$$

Keterangan :

P_i^{min} : batas minimum daya PLTD i (kW)

$u_{i,t}$: variabel biner ON/OFF PLTD i

P_i^{max} : batas maksimum daya PLTD i (kW)

$\forall t$: persamaan atau kendala tersebut berlaku pada setiap unit i (PLTD 1, 2, 3)

Batasan operasi PLTD pada Persamaan (2.3) digunakan untuk memastikan bahwa setiap unit PLTD hanya dapat menghasilkan daya apabila unit berada dalam kondisi menyala atau ON. Variabel biner $u_{i,t}$ bernilai 1 ketika PLTD beroperasi dan bernilai 0 ketika PLTD tidak beroperasi. Ketika $u_{i,t} = 1$, daya keluaran PLTD dibatasi oleh kapasitas minimum P_i^{min} dan kapasitas maksimum P_i^{max} . Sebaliknya, Ketika $u_{i,t} = 0$, daya keluaran PLTD menjadi nol. Formulasi ini merupakan bentuk umum dalam *unit commitment* berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), karena menggabungkan variabel kontinu berupa daya keluaran pembangkit dan variabel biner berupa status operasi pembangkit [53], [54], [50].

c. Ramp Rate PLTD

$$|P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq RR_i \cdot P_i^{max} \forall i, t \quad (2.4)$$

Keterangan:

$P_{i,t}$: daya output PLTD i pada jam t (kW)

RR_i : *ramp rate* PLTD i (% dari kapasitas maksimum)

P_i^{max} : batas maksimum daya PLTD i (kW)

$\forall t$: persamaan atau kendala tersebut berlaku pada setiap unit i (PLTD 1, 2, 3)

Kendala *ramp rate* PLTD pada Persamaan (2.4) digunakan untuk membatasi perubahan daya keluaran pembangkit antarperiode waktu. Kendala ini diperlukan karena secara teknis unit pembangkit tidak dapat menaikkan atau menurunkan daya secara tak terbatas dalam waktu singkat. Dalam *Dynamic Economic Dispatch* (DED), *ramp rate* menjadi salah satu kendala utama yang membedakan DED dari *economic dispatch* statis, karena DED mempertimbangkan keterkaitan operasi pembangkit dari satu periode ke periode berikutnya. Formulasi kendala *ramp rate* seperti ini umum digunakan dalam DED dan *unit commitment* berbasis MILP untuk memastikan perubahan output pembangkit tetap berada dalam batas kemampuan teknis unit [55], [48], [54], [53], [50].

d. PLTS

$$0 \leq P_t^{PLTS} \leq P^{PLTS,max} \forall t \quad (2.5)$$

Keterangan:

P_t^{PLTS} : daya output PLTS pada jam t (kW)

$P^{PLTS,max}$: kapasitas maksimum PLTS (kW)

$\forall t$: persamaan atau kendala tersebut berlaku pada setiap jam t dalam horizon waktu 1–24

Kendala output PLTS pada Persamaan (2.5) digunakan untuk memastikan bahwa daya keluaran PLTS pada setiap periode waktu tidak bernilai negatif dan tidak melebihi kapasitas maksimum atau daya tersedia dari sistem PLTS. Dalam model optimisasi sistem hybrid PLTD–PLTS–BESS, PLTS dimodelkan sebagai sumber energi terbarukan yang output-nya dibatasi oleh kapasitas terpasang dan ketersediaan iradiasi matahari pada setiap waktu. Formulasi batas daya PLTS seperti ini umum

digunakan dalam optimasi operasi *microgrid PV–diesel–battery*, khususnya untuk menentukan daya PV yang dapat dimanfaatkan dalam memenuhi beban sistem dan meminimalkan biaya operasi pembangkit konvensional [49], [56], [57].

e. BESS Dynamics

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \eta_{ch} \cdot P_t^{BESS,ch} - \frac{1}{\eta_{dis}} \cdot P_t^{BESS,dis} \quad (2.6)$$

$$SOC^{min} \leq SOC_t \leq SOC^{max} \quad (2.7)$$

$$0 \leq P_t^{BESS,ch} \leq P^{BESS,ch,max}, 0 \leq P_t^{BESS,dis} \leq P^{BESS,dis,max} \quad (2.8)$$

Keterangan:

SOC_t : *state of charge* BESS pada jam t (kWh)

η_{ch} : efisiensi *charge*

η_{dis} : efisiensi *discharge*

$P_t^{BESS,ch}$: daya *charge* BESS pada jam t (kW)

$P_t^{BESS,dis}$: daya *discharge* BESS pada jam t (kW)

SOC^{min} : batas SOC minimum (%)

SOC^{max} : batas SOC maksimum (%)

$P^{BESS,ch,max}$: batas daya *charge* maksimum (kW)

$P^{BESS,dis,max}$: batas daya *discharge* maksimum (kW)

Persamaan (2.6) merepresentasikan dinamika *state of charge* (SOC) BESS, yaitu perubahan energi tersimpan pada baterai akibat proses *charging* dan *discharging*. Energi baterai meningkat ketika BESS melakukan *charging* dengan mempertimbangkan efisiensi *charge* η_{ch} , dan menurun ketika BESS melakukan *discharging* dengan mempertimbangkan efisiensi *discharge* η_{dis} . Persamaan (3.7) digunakan untuk menjaga SOC tetap berada dalam batas minimum dan maksimum

agar baterai beroperasi pada rentang yang aman. Selanjutnya, Persamaan (3.8) membatasi daya *charging* dan *discharging* BESS sesuai kapasitas maksimum baterai atau inverter. Formulasi kendala SOC, batas SOC, serta batas daya *charge/discharge* seperti ini umum digunakan dalam optimasi operasi *microgrid* dan *energy management system* berbasis BESS, termasuk model berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) untuk horizon operasi harian 24 jam [51], [52], [58].

f. Emisi

Emisi pada sistem pembangkit listrik berbahan bakar fosil merupakan hasil dari proses pembakaran bahan bakar yang menghasilkan gas buang, termasuk karbon dioksida atau CO₂. Pada PLTD, emisi karbon dipengaruhi oleh besarnya daya yang dihasilkan, konsumsi bahan bakar spesifik, serta faktor emisi dari bahan bakar yang digunakan.

Perhitungan emisi karbon diperlukan untuk mengetahui dampak lingkungan dari pengoperasian pembangkit. Semakin tinggi produksi energi dari PLTD, semakin besar emisi karbon yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengurangan jam operasi PLTD melalui integrasi PLTS dan BESS dapat berkontribusi terhadap penurunan emisi sistem. Pengurangan emisi juga dapat dikaitkan dengan manfaat ekonomi melalui mekanisme kredit karbon pada proyek energi terbarukan [59].

Dalam penelitian ini, emisi karbon dihitung sebagai salah satu indikator kinerja sistem. Evaluasi emisi digunakan untuk membandingkan kondisi operasi pada setiap skenario, yaitu sistem PLTD, sistem PLTD–PLTS, dan sistem PLTD–PLTS–BESS. Dengan demikian, hasil optimisasi tidak hanya dinilai dari aspek biaya operasi, tetapi juga dari kontribusinya terhadap pengurangan emisi karbon [60], [61].

$$E_t = \sum_{i \in I} \alpha_i \cdot P_{i,t} \quad (2.9)$$

dengan:

$$\alpha_i = sfc_i \cdot EF \quad (2.10)$$

Keterangan:

E_t : emisi CO₂ pada jam t (kg CO₂)

α_i : emisi per kWh

$P_{i,t}$: daya output PLTD i pada jam t (kW)

sfc_i : *specific fuel consumption* PLTD i (liter/kWh)

EF : *emission factor* (kg CO₂/liter *fuel*)

Persamaan (2.9) dan (2.10) digunakan untuk menghitung emisi CO₂ yang dihasilkan oleh PLTD berdasarkan daya keluaran pembangkit dan koefisien emisi spesifik setiap unit. Koefisien emisi α_i : diperoleh dari perkalian antara *specific fuel consumption* sfc_i dalam satuan liter/kWh dan *emission factor* ((EF)) bahan bakar diesel dalam satuan kg CO₂/liter. Pendekatan ini sejalan dengan metode perhitungan emisi pembakaran stasioner, di mana emisi CO₂ dihitung berdasarkan jumlah bahan bakar yang dikonsumsi dan faktor emisi bahan bakar. Pada sistem *hybrid diesel-PV-battery*, konsumsi bahan bakar *diesel generator* menjadi faktor utama pembentuk emisi, sehingga pengurangan operasi PLTD melalui pemanfaatan PLTS dan BESS dapat menurunkan emisi CO₂ sistem [62], [63], [64].

g. Bauran Energi Hijau (*Renewable Energy Share*)

Bauran energi hijau atau *Renewable Energy Share* (RES) merupakan indikator yang menunjukkan persentase kontribusi energi listrik dari sumber energi terbarukan terhadap total energi yang digunakan dalam sistem tenaga listrik. Dalam penelitian ini, bauran energi hijau terutama berasal dari produksi PLTS dan energi yang dilepaskan oleh BESS.

Indikator ini digunakan untuk menilai tingkat pemanfaatan energi terbarukan dalam sistem kelistrikan. Semakin besar kontribusi PLTS dan BESS terhadap pemenuhan beban, semakin tinggi nilai bauran energi hijau yang diperoleh. Sebaliknya, apabila sebagian besar kebutuhan beban masih dipenuhi oleh PLTD, maka nilai bauran energi hijau akan relatif rendah [65].

Pada sistem kelistrikan terisolasi, peningkatan bauran energi hijau menjadi salah satu tujuan penting karena dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Selain itu, peningkatan pemanfaatan energi terbarukan juga mendukung penurunan biaya operasi dan pengurangan emisi karbon. Oleh karena itu, bauran energi hijau digunakan sebagai salah satu parameter evaluasi dalam optimisasi sistem pembangkitan PLTD–PLTS–BESS di Labuhan Aji [66], [67].

$$RES = \frac{\sum_t (P_t^{PLTS} + P_t^{BESS,dis})}{\sum_t D_t} \times 100\% \quad (2.11)$$

Keterangan:

RES : persentase bauran energi terbarukan (%)

P_t^{PLTS} : daya output PLTS pada jam t (kW)

$P_t^{BESS,dis}$: daya discharge BESS pada jam t (kW)

D_t : beban listrik pada jam t (kW)

Persamaan (2.11) digunakan untuk menghitung bauran energi hijau atau *renewable energy share*, yaitu persentase kontribusi energi terbarukan terhadap total energi listrik yang melayani beban selama periode simulasi. Konsep ini sejalan dengan indikator *renewable fraction*, yang didefinisikan sebagai fraksi energi yang dikirim ke beban dan berasal dari sumber energi terbarukan. Dalam sistem *hybrid* PLTD–PLTS–BESS, energi dari PLTS dihitung sebagai energi terbarukan, sedangkan energi *discharge* BESS dapat dihitung sebagai bagian dari energi hijau apabila energi yang tersimpan pada BESS berasal dari *surplus* energi PLTS. Oleh karena itu, semakin besar

kontribusi PLTS dan energi PLTS yang disimpan kemudian dilepaskan kembali oleh BESS, maka semakin tinggi nilai *renewable energy share system* [68], [69], [49], [70].