

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan yang masih memiliki banyak wilayah dengan sistem kelistrikan yang belum terhubung ke jaringan interkoneksi nasional. Pada wilayah tersebut, kebutuhan energi listrik dipenuhi melalui pembangkit lokal yang beroperasi secara mandiri atau dikenal sebagai sistem kelistrikan terisolasi. Karakteristik utama sistem ini meliputi kapasitas pembangkitan yang relatif terbatas, cadangan daya yang kecil, serta tingkat keandalan yang sangat dipengaruhi oleh strategi pengoperasian setiap unit pembangkit. Oleh karena itu, pengelolaan operasi pembangkit menjadi faktor penting dalam menjaga kontinuitas pasokan listrik kepada pelanggan [1], [2].

Salah satu sistem kelistrikan terisolasi yang masih beroperasi di Indonesia berada di Labuhan Aji, Pulau Moyo, Provinsi Nusa Tenggara Barat. Hingga saat ini, penyediaan energi listrik di wilayah tersebut masih didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Ketergantungan yang tinggi terhadap PLTD menyebabkan biaya pembangkitan listrik menjadi relatif besar karena dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar minyak serta proses distribusi bahan bakar yang harus dilakukan melalui jalur laut. Kondisi tersebut berdampak pada tingginya Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik yang umum terjadi pada sistem kelistrikan terisolasi di Indonesia [3].

Selain berdampak pada aspek ekonomi, penggunaan PLTD sebagai sumber pembangkitan utama juga menimbulkan konsekuensi terhadap lingkungan. Proses pembakaran bahan bakar diesel menghasilkan emisi gas rumah kaca dan berbagai polutan udara yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem kelistrikan yang masih didominasi oleh pembangkit diesel memiliki intensitas emisi yang lebih tinggi dibandingkan sistem

yang telah mengintegrasikan sumber energi terbarukan. Kondisi tersebut menjadi tantangan dalam mendukung pembangunan sektor ketenagalistrikan yang lebih efisien dan berkelanjutan [4], [5].

Perkembangan aktivitas masyarakat serta meningkatnya sektor pariwisata di Pulau Moyo turut mendorong pertumbuhan kebutuhan energi listrik di wilayah Labuhan Aji. Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan layanan kelistrikan menjadi 24 jam setiap hari sehingga pembangkit harus beroperasi dalam durasi yang lebih panjang. Konsekuensinya, konsumsi bahan bakar, biaya operasi, serta jam kerja PLTD juga meningkat. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya penerapan sistem pembangkitan yang lebih efisien, andal, dan mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [3].

Sebagai bagian dari upaya mewujudkan transisi energi, Pemerintah Indonesia telah menetapkan berbagai kebijakan untuk meningkatkan pemanfaatan energi baru terbarukan. Salah satu kebijakan tersebut adalah Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 yang mendorong percepatan pengembangan pembangkit energi terbarukan sekaligus mengurangi penggunaan pembangkit berbahan bakar diesel, termasuk pada sistem kelistrikan terisolasi. Sejalan dengan kebijakan tersebut, PT PLN (Persero) melaksanakan program dedieselisasi melalui pengembangan pembangkit energi terbarukan yang dipadukan dengan sistem penyimpanan energi [6]

Di antara berbagai sumber energi terbarukan, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan di Provinsi Nusa Tenggara Barat karena tingkat intensitas penyinaran matahari yang tinggi. PLTS menawarkan berbagai keunggulan, antara lain tidak menghasilkan emisi pada saat operasi serta memiliki biaya operasi yang relatif rendah. Namun demikian, keluaran daya PLTS sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari sehingga bersifat intermiten. Karakteristik tersebut menyebabkan produksi energi PLTS berfluktuasi dan memerlukan sistem pendukung agar keandalan pasokan listrik tetap terjaga, khususnya pada sistem kelistrikan terisolasi yang memiliki cadangan daya terbatas [7], [8].

Salah satu teknologi yang berperan penting dalam mendukung integrasi PLTS adalah *Battery Energy Storage System* (BESS). BESS berfungsi menyimpan energi listrik ketika produksi PLTS melebihi kebutuhan beban, kemudian menyalurkannya

kembali pada saat produksi energi surya menurun atau kebutuhan beban meningkat. Pada sistem kelistrikan terisolasi, pemanfaatan BESS mampu meningkatkan fleksibilitas operasi sistem, mengurangi waktu operasi PLTD, serta meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan. Agar dapat beroperasi secara optimal, pengelolaan BESS harus memperhatikan batasan teknis, khususnya kondisi *State of Charge* (SoC) dan aspek keselamatan sistem [9], [10], [11].

Integrasi PLTD, PLTS, dan BESS membentuk suatu sistem pembangkitan hibrida yang memiliki karakteristik operasi lebih kompleks dibandingkan sistem pembangkitan konvensional. Variasi beban harian, perubahan keluaran PLTS, serta pengaturan proses pengisian dan pengosongan baterai memerlukan strategi operasi yang mampu mengoptimalkan seluruh sumber daya pembangkitan secara terpadu. Dengan demikian, sistem tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan energi listrik, tetapi juga dapat menekan biaya operasi, mengurangi emisi karbon, dan meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan [12].

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas penerapan sistem pembangkitan hibrida berbasis energi terbarukan pada sistem kelistrikan terisolasi. Kajian tersebut umumnya menitikberatkan pada analisis tekno-ekonomi, penentuan kapasitas optimal pembangkit, evaluasi kelayakan sistem, atau simulasi mikrogrid secara umum. Namun, sebagian besar penelitian tersebut belum secara khusus membahas strategi operasi harian pembangkit secara dinamis, terutama pada sistem kelistrikan terisolasi milik PLN yang memiliki karakteristik operasi aktual, keterbatasan pasokan bahan bakar, variasi beban harian, serta kebutuhan keandalan yang tinggi.

Selain itu, penelitian terdahulu yang menggunakan pendekatan optimisasi umumnya belum sepenuhnya memodelkan interaksi operasional antara PLTD, PLTS, dan BESS dalam satu kerangka *Dynamic Economic Dispatch*. Padahal, pengoperasian sistem hibrida pada wilayah terisolasi dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis yang saling berkaitan, seperti batas daya minimum dan maksimum PLTD, status operasi unit diesel, ramp rate pembangkit, intermitensi keluaran PLTS, serta dinamika *State of Charge* pada BESS. Apabila aspek-aspek tersebut tidak dimodelkan secara terpadu, hasil optimisasi dapat kurang merepresentasikan kondisi operasi aktual di lapangan.

Salah satu metode optimisasi yang sesuai untuk menyelesaikan permasalahan tersebut adalah *Dynamic Economic Dispatch* (DED), yaitu metode penjadwalan pembangkitan yang mempertimbangkan perubahan kondisi operasi pada setiap interval waktu serta berbagai batasan teknis masing-masing unit pembangkit [13], [14]. Dalam sistem pembangkitan hibrida, proses optimisasi melibatkan variabel kontinu dan variabel biner secara bersamaan, seperti besarnya daya keluaran setiap pembangkit, status operasi PLTD, serta dinamika *State of Charge* pada BESS. Oleh karena itu, pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dipilih karena mampu merepresentasikan berbagai kendala operasional tersebut secara sistematis dan menghasilkan solusi optimisasi yang efisien [15], [16].

Research gap dalam penelitian ini terletak pada masih terbatasnya kajian yang mengembangkan model *Dynamic Economic Dispatch* berbasis *Mixed Integer Linear Programming* untuk optimisasi operasi harian sistem pembangkitan PLTD–PLTS–BESS pada sistem kelistrikan terisolasi PLN dengan menggunakan data operasional aktual. Kajian yang mengevaluasi biaya operasi, emisi karbon, dan produksi energi hijau secara simultan dalam satu model optimisasi juga masih terbatas, khususnya pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji, Pulau Moyo, Nusa Tenggara Barat.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan model *Dynamic Economic Dispatch* berbasis *Mixed Integer Linear Programming* untuk mengoptimalkan operasi sistem pembangkitan PLTD–PLTS–BESS pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji dengan horizon waktu harian selama 24 jam. Model yang dikembangkan diharapkan mampu menghasilkan strategi operasi pembangkit yang lebih optimal, sehingga biaya operasi dapat diminimalkan, emisi karbon dapat dikurangi, serta pemanfaatan energi terbarukan dapat ditingkatkan tanpa mengabaikan seluruh batasan teknis dan operasional system [17], [18].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, permasalahan utama dalam penelitian ini berkaitan dengan kebutuhan strategi operasi pembangkit yang optimal pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji. Sistem yang masih didominasi oleh PLTD memerlukan pendekatan optimisasi untuk menekan biaya operasi dan emisi karbon

serta meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan melalui skenario integrasi PLTS dan BESS.

Dengan demikian, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana penerapan *Dynamic Economic Dispatch* berbasis *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) dapat mengoptimalkan operasi pembangkitan dan menurunkan biaya operasi pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji?
2. Bagaimana penerapan optimisasi *dispatch* berbasis MILP pada skenario integrasi PLTD–PLTS–BESS dapat menurunkan emisi CO₂ dan meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini disusun berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan. Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan operasi pembangkitan pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji melalui penerapan *Dynamic Economic Dispatch* (DED) berbasis *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) pada beberapa skenario konfigurasi pembangkit.

Adapun tujuan khusus penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis penerapan *Dynamic Economic Dispatch* berbasis *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) dalam mengoptimalkan operasi pembangkitan dan menurunkan biaya operasi pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji.
2. Mengevaluasi pengaruh optimisasi *dispatch* berbasis MILP pada skenario integrasi PLTD–PLTS–BESS terhadap penurunan emisi CO₂ dan peningkatan pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dari sisi akademik maupun praktis, khususnya dalam pengembangan strategi operasi sistem pembangkit pada wilayah kelistrikan terisolasi. Manfaat tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Kontribusi Akademik

- a. Penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan model optimisasi berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) untuk sistem kelistrikan terisolasi, khususnya pada sistem pembangkitan hibrida PLTD–PLTS–BESS.
- b. Model yang dikembangkan dapat digunakan sebagai pendekatan matematis untuk mempertimbangkan berbagai parameter operasi, seperti biaya start-up PLTD, biaya operasi pembangkit, pemakaian bahan bakar minyak, keluaran daya PLTS, serta dinamika *State of Charge* pada BESS.
- c. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi penelitian lanjutan yang berkaitan dengan *Dynamic Economic Dispatch*, integrasi energi baru terbarukan, dan pengelolaan sistem kelistrikan terisolasi.
- d. Penelitian ini juga diharapkan dapat mendukung peningkatan literasi akademik di lingkungan Institut Teknologi PLN, khususnya pada bidang optimisasi sistem tenaga listrik dan pemanfaatan energi terbarukan.

2. Kontribusi Praktis

- a. Penelitian ini dapat memberikan rekomendasi strategi operasi pembangkit yang lebih efisien bagi PT PLN (Persero), khususnya dalam pengelolaan sistem kelistrikan terisolasi yang masih bergantung pada PLTD.
- b. Hasil optimisasi dapat menjadi masukan bagi operator pembangkit dalam merencanakan penjadwalan operasi harian dengan mempertimbangkan aspek biaya operasi, keandalan sistem, emisi karbon, dan pemanfaatan energi terbarukan.
- c. Penelitian ini dapat mendukung upaya pengurangan konsumsi bahan bakar minyak pada sistem kelistrikan terisolasi melalui integrasi PLTS dan BESS secara lebih optimal.
- d. Hasil penelitian juga dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam mendukung pencapaian target bauran energi baru terbarukan dan penurunan emisi di sektor ketenagalistrikan.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Agar pembahasan dalam penelitian ini lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada beberapa aspek berikut:

1. Objek penelitian adalah sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji yang berlokasi di Pulau Moyo, Provinsi Nusa Tenggara Barat.
2. Konfigurasi sistem pembangkit yang dianalisis terdiri dari tiga unit PLTD, PLTS berkapasitas 167 kWp, dan BESS berkapasitas 595 kWh. Kapasitas PLTS dan BESS mengacu pada Kajian Kelayakan Proyek program didieselsiasi PLTS Labuhan Aji yang telah disahkan.
3. Tiga unit PLTD yang digunakan dalam penelitian ini memiliki sistem kontrol DEEP SEA 8610 MKII sehingga dapat mendukung fungsi auto start dalam pengoperasian pembangkit.
4. Data teknis PLTD, PLTS, dan BESS yang digunakan dalam pemodelan didasarkan pada spesifikasi teknis umum serta data operasional dari PLN setempat.
5. Optimisasi yang dilakukan difokuskan pada penjadwalan operasi pembangkit yang paling ekonomis dengan tetap memperhatikan kebutuhan beban dan keandalan sistem kelistrikan Labuhan Aji.
6. Metode optimisasi yang digunakan adalah *Dynamic Economic Dispatch* (DED) berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP).
7. Kemampuan ramp rate PLTD diasumsikan sebesar 3% sesuai dengan pengaturan pabrik mesin, sedangkan parameter biaya operasi mengacu pada data bulan Januari 2025.
8. Horizon waktu optimisasi ditetapkan selama 24 jam untuk merepresentasikan operasi harian sistem pembangkitan.
9. Parameter utama yang dianalisis meliputi biaya operasi pembangkitan, emisi karbon, dan produksi energi hijau.
10. Penelitian ini tidak membahas aspek sosial, ekonomi masyarakat, maupun kebijakan pengembangan energi terbarukan secara luas di wilayah Labuhan Aji.
11. Analisis sistem distribusi tidak memperhitungkan susut jaringan atau *distribution losses*.

1.6 Kebaruan

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model *Dynamic Economic Dispatch* (DED) berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) untuk mengoptimalkan operasi sistem pembangkitan hibrida PLTD–PLTS–BESS pada sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji. Model ini disusun dengan menggunakan data operasional aktual PLN dan diterapkan pada horizon waktu harian selama 24 jam.

Berbeda dengan beberapa penelitian sebelumnya yang lebih banyak membahas optimasi kapasitas pembangkit, analisis keekonomian statis, atau studi mikrogrid secara umum, penelitian ini secara khusus menitikberatkan pada optimisasi operasi harian pembangkit. Pendekatan yang digunakan tidak hanya mempertimbangkan keluaran daya masing-masing pembangkit, tetapi juga memperhitungkan status operasi PLTD, karakteristik intermiten PLTS, serta dinamika *State of Charge* pada BESS secara terpadu.

Selain itu, penelitian ini mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan tiga aspek utama secara bersamaan, yaitu biaya operasi, emisi karbon, dan bauran energi terbarukan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan strategi *dispatch* harian yang lebih aplikatif, terukur, dan sesuai dengan kondisi nyata sistem kelistrikan terisolasi milik PLN.

Kebaruan lain dari penelitian ini adalah penerapan model optimisasi pada studi kasus spesifik sistem kelistrikan terisolasi Labuhan Aji di Pulau Moyo, Nusa Tenggara Barat. Kajian ini memberikan kontribusi yang lebih kontekstual karena menggunakan konfigurasi pembangkit, karakteristik beban, serta kondisi operasional yang sesuai dengan sistem aktual di lapangan.