

OPTIMASI PERENCANAAN OPERASI PEMBANGKIT LISTRIK BERBASIS MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING (MILP) PADA SISTEM ISOLATED SELAYAR

OPTIMIZATION OF POWER PLANT OPERATION PLANNING BASED ON MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING (MILP) ON AN ISOLATED LINEAR SYSTEM

Agung Wicaksono^{1*}, Rony Seto Wibowo², I Made Yulistya Negara³

^{1,2,3}Fakultas Teknik, Magister Inovasi Sistem dan Teknologi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember,
Surabaya, Indonesia

6047212043@student.its.ac.id^{1*}

ABSTRACT

This study explores the integration of fossil and renewable energy generators on Selayar Island, focusing on optimizing Diesel Power Plants (PLTD) and Solar Power Plants (PLTS). Using Mixed-Integer Linear Programming (MILP) for generator scheduling, simulations reveal that a 15% rotational backup constraint positively impacts operational costs and system reliability. The findings provide practical recommendations for operators to enhance efficiency, reduce costs, and improve overall system reliability in the context of hybrid energy systems.

Keywords: Renewable energy, System integration, PLTD, PLTS, MILP

ABSTRAK

Penelitian ini membahas integrasi pembangkit energi fosil dan terbarukan di Pulau Selayar, fokus pada optimalisasi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Menggunakan Metode *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) untuk penjadwalan pembangkit, simulasi menunjukkan bahwa pembatasan cadangan putar sebesar 15% berdampak positif pada biaya operasional dan keandalan sistem. Temuan ini memberikan rekomendasi praktis bagi operator untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi biaya operasional, dan meningkatkan keandalan sistem dalam konteks integrasi energi hibrid.

Kata Kunci: Energi terbarukan, Integrasi Sistem, PLTD, PLTS, MILP

PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia telah mengidentifikasi dan memprioritaskan pengembangan energi terbarukan melalui berbagai kebijakan dan program, seperti Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN), dan Program 35.000 MW. Dengan potensi yang melimpah dan komitmen untuk mengembangkan energi terbarukan, Indonesia memiliki kesempatan besar untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan. Indonesia memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi terbarukan. Matahari di Indonesia memiliki paparan sinar matahari tinggi sepanjang tahun, sehingga wilayah Indonesia sangat cocok untuk pengembangan panel surya sebagai sumber energi listrik terbarukan. Terutama

di wilayah timur Indonesia, potensi energi surya lebih tinggi. Selain itu, beberapa wilayah di Indonesia, seperti pesisir barat Sumatra, kepulauan Nusa Tenggara, dan Sulawesi Utara, memiliki potensi angin yang cukup besar.

Salah satu peluang yang dapat dioptimalkan untuk pengembangan pembangkit sumber energi terbarukan adalah dengan merancang dan mengatur kombinasi yang optimal antara dua atau lebih sumber energi (hibrid) yang berbeda dalam satu sistem pembangkit isolated. Sistem kelistrikan isolated, atau sistem kelistrikan terencil, adalah sistem kelistrikan yang berdiri sendiri atau tidak terhubung dengan sistem kelistrikan utama. Sistem ini biasanya digunakan di daerah-daerah yang sulit dijangkau atau jauh dari sistem kelistrikan utama, seperti

pulau-pulau terpencil, desa terpencil, atau lokasi-lokasi di pegunungan yang sulit diakses.

Salah satu sistem kelistrikan *isolated* yang sudah hibrid yaitu Selayar. Sistem kelistrikan Selayar saat ini menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber utama energi listrik. PLTS dengan sifat intermiten, yang berarti produksi energinya dapat bervariasi atau tidak terus-menerus stabil. Produksi energi dapat menurun atau bahkan berhenti sementara jika kondisi cuaca tidak mendukung. Fluktuasi produksi dapat terjadi dalam jangka pendek, tergantung pada faktor-faktor alam. Perubahan cuaca yang cepat atau tidak terduga dapat mempengaruhi produksi energi secara signifikan, sehingga menghasilkan ketidakpastian dalam pasokan energi bahkan mengganggu pola operasi dan keandalan sistem pada sistem kelistrikan Selayar.

Prinsip kerja PLTD didasarkan pada konversi energi termal (panas) menjadi energi mekanik dan akhirnya menjadi energi listrik. Bahan bakar diesel diinjeksikan ke dalam ruang bakar mesin dan terbakar dengan bantuan udara yang dikompresi (Nugraha, dkk. 2022). Ledakan pada ruang bakar tersebut menggerakkan torak/piston yang kemudian pada poros engkol dirubah menjadi energi mekanis. Tekanan gas hasil pembakaran bahan bakar dan udara akan mendorong torak yang dihubungkan dengan poros engkol menggunakan batang torak, sehingga torak dapat bergerak bolak-balik atau reciprocating. Poros engkol mesin diesel digunakan untuk menggerakkan poros rotor generator. Oleh generator energi mekanis ini dirubah menjadi energi listrik sehingga terjadi gaya gesek listrik (GGL). Gaya gerak listrik yang terbentuk di sini merupakan bentuk hukum Faraday yang terjadi di dunia nyata.

PLTD masih banyak dijumpai dan digunakan di daerah terpencil atau pulau-pulau yang sulit dijangkau oleh jaringan

listrik utama. Keunggulan utama PLTD adalah fleksibilitasnya dalam pemasangan dan pengoperasian. Mereka dapat dengan cepat didirikan di lokasi terpencil tanpa memerlukan infrastruktur jaringan listrik yang rumit (P. Woan-Ho, dkk. 2021). Selain itu, PLTD juga dapat beroperasi dengan bahan bakar diesel yang relatif mudah ditemukan dan diangkut. Oleh karena itu, dengan semakin berkembangnya teknologi energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan semakin terjangkaunya biaya peralatan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Upaya terus dilakukan untuk mengembangkan teknologi dan sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan, termasuk integrasi PLTD dengan sumber energi terbarukan untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi penyediaan energi listrik di masa depan.

Energi terbarukan non-hidro untuk pembangkitan listrik secara global terus meningkat, namun kapasitas energi terbarukan telah mengalami pertumbuhan pesat dalam dua dekade terakhir. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem pembangkit listrik yang menggunakan energi matahari sebagai sumber utama untuk menghasilkan energi listrik dengan proses konversi energi matahari menjadi energi listrik menggunakan sel *fotovoltaik* yang terdapat dalam panel surya (Goudarzi, A, dkk. 2021). Prinsip kerja PLTS: (1) panel surya terdiri dari sel fotovoltaik yang terbuat dari bahan; semikonduktor, biasanya silikon. Ketika sinar matahari jatuh pada panel surya, sel fotovoltaik menyerap cahaya tersebut; (2) Ketika cahaya matahari diserap oleh sel *fotovoltaik*, terjadi efek *fotovoltaik* di mana elektron dalam bahan semikonduktor terlepas dan menghasilkan arus listrik. Sel fotovoltaik diatur secara seri dan paralel dalam panel surya untuk menghasilkan tegangan dan arus yang diinginkan; (3) Arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh sel fotovoltaik kemudian dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter,

dilakukan karena listrik AC adalah bentuk listrik yang umum digunakan di rumah, gedung, dan jaringan listrik umum; (4) Listrik yang dihasilkan oleh PLTS dapat digunakan langsung untuk memenuhi kebutuhan listrik di tempat tersebut. Jika produksi listrik dari PLTS melebihi konsumsi, kelebihan listrik dapat disalurkan ke jaringan listrik umum melalui meteran dua arah. Ketika produksi listrik PLTS tidak mencukupi, listrik tambahan dapat diperoleh dari jaringan listrik umum (Yuliani N.S. 2019).

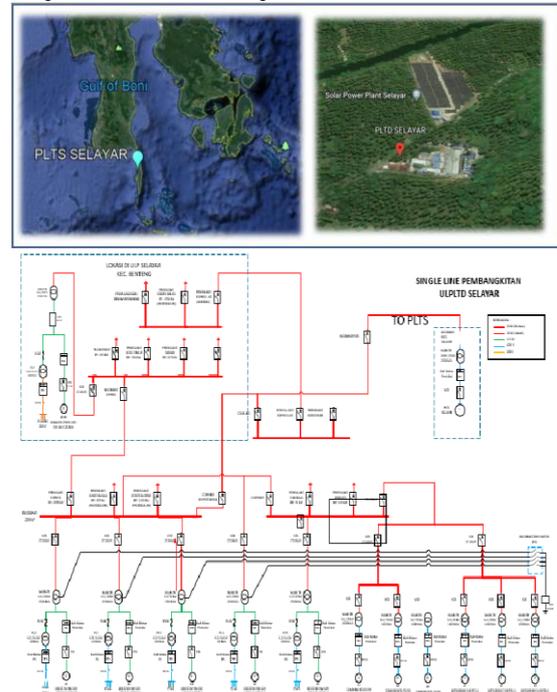
Dalam beberapa sistem PLTS yang lebih kompleks, elemen tambahan seperti baterai penyimpanan dapat digunakan untuk menyimpan kelebihan listrik yang dihasilkan oleh PLTS untuk digunakan saat cahaya matahari tidak tersedia, seperti pada malam hari atau saat cuaca buruk. Sistem PLTS dapat dibagi berdasarkan sistem kelistrikan, yaitu: (a) *PLTS-On Grid* (Terhubung dengan Jaringan Listrik Umum) dimana sistem ini terhubung langsung dengan jaringan listrik umum. Panel surya menghasilkan listrik yang dapat langsung digunakan oleh pengguna, dan jika ada kelebihan produksi, listrik tersebut dapat disalurkan ke jaringan listrik umum (Kobauashi, D, dkk. 2017) Jika produksi listrik dari PLTS tidak mencukupi, pengguna dapat mengambil tambahan listrik dari jaringan listrik umum.

Tujuan penelitian ini yaitu menyelesaikan permasalahan pola operasi PLTD atau disebut penjadwalan pembangkit setelah adanya PLTS pada sistem kelistrikan Selayar. Perencanaan Operasi Pembangkit Listrik Berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) diharapkan dapat memberikan pendekatan optimasi antara efisiensi pengoperasian PLTD dengan respon sistem sehingga faktor keandalan tetap dapat terpenuhi dengan baik.

METODE

Overview Sistem Kelistrikan Selayar

Tahapan pertama adalah melakukan studi literatur tentang lokasi, sistem kelistrikan dan ketersediaan pembangkit dan potensi fluktuasi beban yang dipengaruhi cuaca yang ada di Selayar Tujuan dari studi literatur ini adalah sebagai alat bantu dalam penelitian serta mendukung analisis secara teoritis (M. F. Anjos & A. J. Conejo. 2017).



Gambar 1. Konfigurasi Sistem Hibrid PLTD dan PLTS Sistem Kelistrikan Selayar

Konfigurasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Selayar

PLTS Selayar dibekali dengan baterai yang hanya berfungsi *smoothing* ketika terjadi intermitensi 4 kW/s dan melakukan *charging* ketika intermitensi naik sehingga fluktuasi beban PV langsung berdampak pada pola operasi dan respon PLTD.



Gambar 2. Sitemap PLTS Selayar Langgam Nilai Irradiance (IR)

Salah satu fungsi objektif yang dimasukkan yaitu kemampuan operasi PLTS Selayar dengan mempertimbangkan fluktuasi nilai *irradiance* (W. Zhaolong, D, dkk. 2017). Dengan memasukan fungsi ini sebagai informasi batasan operasi maka akan didapatkan nilai paling efektif sebagai cadangan putar atau *Spinning reserve* yang perlu disiapkan mesin PLTD. Informasi *irradiance* dapat dijadikan prognosa ataupun perencanaan cadangan putar mesin PLTD sehingga keandalan sistem tetap terjaga. Dengan menggunakan alat Pyranometer Portabel yang digunakan sebagai data pendukung informasi Irradiance dengan jarak 1 KM atau setara 10 menit dari lokasi PLTS. Alat tersebut sudah disesuaikan sudut kemiringannya dengan PV yang ada di PLTS Selayar.

Analisa Data

Analisa data menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Metode tersebut memberikan hasil *output* pola operasi sistem dengan mempertimbangkan nilai keandalan sistem dan efisiensi pembangkit PLTD yang beroperasi secara *isolated* di Selayar. Dalam *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), tujuannya adalah mencari solusi optimal untuk fungsi objektif (f) yang terdiri dari kombinasi variabel bilangan bulat dan kontinu (Lyzwa, W, dkk. 2015). Metode ini

mengoptimalkan nilai fungsi objektif dengan memperhatikan batasan persamaan (equality constraints) dan batasan ketidaksamaan (*inequality constraints*) yang linear. Dalam MILP, diberikan elemen-elemen berikut:

1. Vektor f : Vektor kolom yang berisi konstanta untuk setiap variabel dalam fungsi objektif.
2. Vektor lb dan ub : Vektor batasan bawah (*lower bounds*) dan batasan atas (*upper bounds*) yang mengatur rentang nilai yang diizinkan untuk setiap variabel.
3. Matriks A dan Aeq : Matriks yang menggambarkan hubungan linier antara variabel dalam batasan ketidaksamaan (A) dan batasan persamaan (Aeq).
4. Vektor b dan beq : Vektor kolom yang menyatakan nilai batasan di sebelah kanan dari matriks A dan Aeq .
5. Set indeks $intcon$: Himpunan indeks yang menunjukkan variabel mana yang harus memiliki nilai bilangan bulat.

Dengan metode MILP memungkinkan perhitungan kapasitas total dari seluruh sistem pasokan listrik dengan menggunakan indikator kehandalan sistem distribusi yang paling umum digunakan dalam mencari nilai vektor x yang memenuhi persamaan batasan dan mengoptimalkan nilai fungsi objektif f . Solusi optimal ini memberikan kombinasi nilai variabel yang memaksimalkan atau meminimumkan fungsi objektif, tergantung pada sifat permasalahan yang dihadapi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa skenario pengujian untuk didapatkan nilai optimasi yang sesuai dengan kondisi dan kebutuhan sistem kelistrikan Selayar. Berikut adalah skenario pengujian yang akan disajikan dalam penelitian ini:

Komposisi cadangan putar 15%

1. Skenario operasi tanpa PLTS Selayar
2. Skenario operasi dengan PLTS Selayar
3. Skenario operasi dengan tambahan 10% beban sistem

Skenario ini mempertimbangkan penambahan cadangan putar sebesar 15% dari kapasitas total pembangkit listrik. Peningkatan cadangan putar dapat memberikan ketangguhan dan keandalan lebih terhadap gangguan atau fluktuasi dalam sistem (Wouters, C, dkk. 2015). Penelitian ini mengevaluasi dampak komposisi cadangan putar tambahan terhadap biaya operasi dan keandalan pasokan listrik. Pengujian ini mensimulasikan kondisi operasional di mana Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Selayar dinonaktifkan. Analisis ini membantu dalam memahami kontribusi PLTS terhadap total produksi energi, pengurangan emisi, dan dampak ekonomi. Hasil dari skenario ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang peran PLTS dalam konteks perencanaan operasi pembangkit listrik.

Skenario ini memeriksa kondisi operasional dengan PLTS Selayar beroperasi sesuai kapasitasnya. Evaluasi difokuskan pada pengaruh PLTS terhadap biaya operasi, ketersediaan energi terbarukan, dan potensi pengurangan emisi gas rumah kaca, memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang kontribusi PLTS dalam mencapai tujuan keberlanjutan sistem energi. Pengujian ini mempertimbangkan peningkatan beban sistem sebesar 10% dari permintaan normal. Penambahan beban ini dapat mencerminkan situasi di mana kebutuhan energi meningkat secara tiba-tiba, seperti saat terjadi peristiwa besar atau lonjakan permintaan (H. Nabipour Afrouzi, D, dkk. 2010). Model MILP dievaluasi dalam mengelola perubahan ini dan memberikan solusi operasional yang optimal.

Komposisi cadangan putar 10%

1. Skenario operasi tanpa PLTS Selayar
2. Skenario operasi dengan PLTS Selayar
3. Skenario operasi dengan tambahan 10% beban sistem

Skenario ini mencakup peningkatan cadangan putar sebesar 10% dari kapasitas total pembangkit listrik. Cadangan putar

diperlukan untuk menghadapi ketidakpastian dalam pasokan dan permintaan energi. Dengan memperhatikan komposisi cadangan putar yang lebih tinggi, penelitian ini mengevaluasi keandalan dan respons sistem terhadap kondisi gangguan, seperti kegagalan pembangkit atau fluktuasi permintaan (Rosyid O.A. 2011). Pengujian ini mensimulasikan kondisi operasional di mana Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Selayar dinonaktifkan. Dalam skenario ini, dievaluasi kontribusi PLTS terhadap produksi energi total dan ketersediaan energi terbarukan. Dengan menghapus PLTS dari persamaan, penelitian ini dapat menyajikan gambaran lebih lengkap tentang ketergantungan sistem terhadap sumber energi tertentu dan implikasinya terhadap keberlanjutan.

Pengujian ini memeriksa kondisi operasional ketika PLTS di Selayar beroperasi sesuai kapasitasnya. Fokus utama adalah pada analisis kontribusi PLTS terhadap pemenuhan kebutuhan energi, pengurangan emisi, dan pengelolaan sistem secara efisien. Hasil dari skenario ini memberikan wawasan berharga tentang dampak positif PLTS pada sistem pembangkit listrik dan lingkungan (Singh, V, dkk. 2019) . Pengujian ini mempertimbangkan peningkatan beban sistem sebesar 10% dari permintaan normal. Skenario ini mencerminkan situasi di mana sistem harus menanggapi lonjakan permintaan energi secara mendadak. Penelitian mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengatasi peningkatan beban dan memberikan solusi operasional yang optimal dengan mempertimbangkan kendala dan batasan yang ada. Nilai yang akan menjadi indikator optimasi dan rekomendasi yaitu dari nilai (a) Biaya *Start-up*; (b) Biaya Operasional yang akan dihitung dari pemakaian BBM; (c) Jumlah status *Warning* (Slamet, S, dkk. 2014).

Penelitian ini dilakukan dengan simulasi berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) pada Program

MATLAB. Berikut adalah hasil pengujian dari masing masing skenario yang sudah dibuat:

Tabel 1. Hasil Pengujian

Skenario		Warnin g	Biaya Start- Up	Biaya Operasional	Total
15% Cadangan n putar	Tanpa PLTS	0	28.760.452,0	11.914.148.106,0	11.942.908.558,0
	Denga n PLTS	0	26.999.608,0	11.609.091.926,0	11.636.091.534,0
	Beban naik 10%	0	26.999.608,0	12.806.066.353,0	12.833.065.961,0
	Tanpa PLTS	0	41.379.834,0	11.665.657.845,0	11.707.037.679,0
10% Cadangan n putar	Tanpa PLTS	0	41.379.834,0	11.665.657.845,0	11.707.037.679,0
	Denga n PLTS	0	41.379.834,0	11.665.657.845,0	11.707.037.679,0
	Beban naik 10%	0	41.086.360,0	12.857.576.083,0	12.898.662.443,0
	Tanpa PLTS	0	41.379.834,0	11.665.657.845,0	11.707.037.679,0

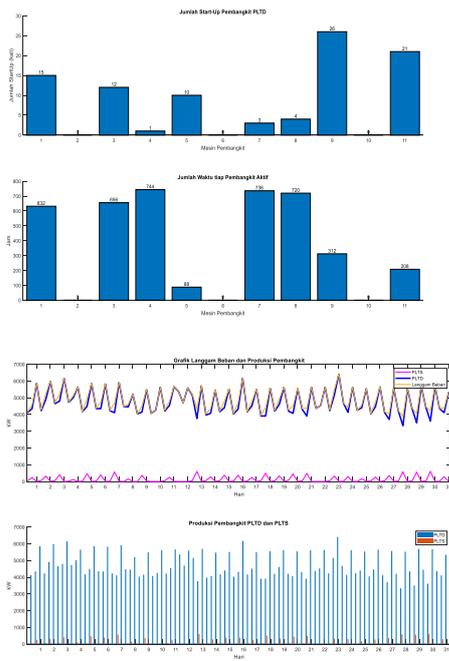
Hasil dari skenario penambahan cadangan putar sebesar 15% menunjukkan dampak positif terhadap keandalan sistem. Dengan peningkatan cadangan putar, sistem lebih tangguh terhadap kegagalan pembangkit atau fluktuasi permintaan. Analisis menunjukkan bahwa cadangan putar sebesar 15% menghasilkan pengurangan risiko pemadaman dan peningkatan ketersediaan energi (Sopian, K, dkk. 2008). Meskipun ada peningkatan biaya operasi terkait *start-up* dan penggunaan bahan bakar tambahan, manfaat dalam menjaga kestabilan sistem menjadi sangat signifikan. Ketika PLTS Selayar dinonaktifkan, penelitian menunjukkan penurunan signifikan dalam kontribusi energi terbarukan dan peningkatan ketergantungan pada sumber energi konvensional. Meskipun produksi energi tetap terjamin, skenario ini menyoroti pentingnya PLTS dalam mencapai tujuan keberlanjutan dan mengurangi emisi. Rekomendasi dari hasil ini adalah untuk terus mengoptimalkan kapasitas dan efisiensi PLTS serta mengeksplorasi peluang pengembangan teknologi terbarukan lainnya.

Hasil penelitian menunjukkan kontribusi yang signifikan terhadap produksi energi total. PLTS tidak hanya membantu dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil tetapi juga menghasilkan pengurangan emisi yang substansial. Rekomendasi yang muncul adalah untuk terus memperluas kapasitas PLTS, mempertimbangkan peningkatan efisiensi, dan menerapkan teknologi penyimpanan energi untuk

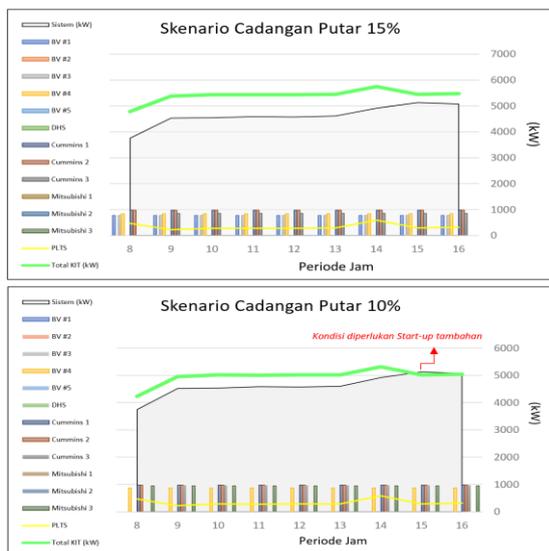
mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan. Dengan penambahan 10% beban sistem, penelitian menunjukkan bahwa model MILP mampu menanggapi lonjakan permintaan energi dengan efisien (Tutkun, N., & San, E. S. 2013). Meskipun terdapat peningkatan biaya operasi terkait bahan bakar dan operasi tambahan, sistem berhasil menjaga kestabilan dan keandalan pasokan listrik. Rekomendasi yang dapat diambil dari hasil ini adalah pentingnya fleksibilitas sistem dan kemampuan untuk merespons perubahan permintaan dengan cepat. Peningkatan kapasitas pembangkit atau penerapan strategi manajemen beban dapat menjadi solusi potensial.

Rekomendasi terbaik untuk mengoptimalkan perencanaan operasi pada sistem kelistrikan Selayar adalah dengan menyiapkan Cadangan Putar Sebesar 15%. Cadangan ini mencakup total 92 kali *start-up* dan total jam operasi mesin pembangkit PLTD sebanyak 4.096 jam, memberikan keseimbangan yang baik antara keandalan sistem, efisiensi operasional, dan dampak ekonomi. Penerapan cadangan putar sebesar 15% telah terbukti mengurangi risiko pemadaman, meningkatkan keandalan pasokan listrik, dan memberikan fleksibilitas yang dibutuhkan untuk merespons perubahan kondisi operasional. Meskipun ada biaya tambahan terkait *start-up* dan konsumsi bahan bakar, manfaat jangka panjangnya jelas memberikan dampak positif pada operasi sistem kelistrikan Selayar. Selain itu, penting untuk terus mengoptimalkan penggunaan sumber energi terbarukan, khususnya PLTS, dengan mempertimbangkan investasi dalam peningkatan kapasitas dan efisiensi, yang membantu mencapai tujuan keberlanjutan dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil. Penerapan rekomendasi ini diharapkan memberikan sistem kelistrikan Selayar keberlanjutan yang lebih baik, efisiensi operasional yang optimal, dan ketersediaan energi yang dapat diandalkan dalam menghadapi tantangan masa depan (Winasis, & Rosyadi, I. 2014).

Berdasarkan semua skenario yang dilakukan, maka dari hasil penelitian ini dapat dinyatakan bahwa rekomendasi terbaik untuk dapat melakukan optimasi perencanaan operasi pada sistem kelistrikan Selayar yaitu dengan menyiapkan Cadangan Putar Sebesar 15% dengan total 93 kali *Start-up* dan total jam operasi mesin pembangkit PLTD sebanyak 4096 Jam. Berikut adalah grafik dari hasil pengujian dengan skenario cadangan putar yang diberikan sebesar 15% pada sistem Kelistrikan Kepulauan Selayar:



Gambar 3. Hasil Skenario Cadangan Putar 15%



Gambar 4. Perbandingan Hasil Skenario Cadangan Putar 15% dengan 10%

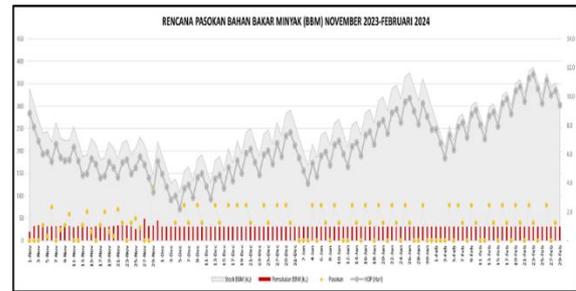
Perbandingan antara hasil skenario cadangan putar sebesar 15% dan 10% dalam konteks Optimasi Perencanaan Operasi Pembangkit Listrik di Sistem *Isolated* Selayar menunjukkan perbedaan yang dapat memengaruhi keandalan dan efisiensi operasional sistem. Dalam skenario cadangan putar sebesar 15%, hasil optimasi menunjukkan bahwa peningkatan cadangan putar memberikan tingkat keandalan yang lebih tinggi terhadap gangguan atau fluktuasi dalam pasokan listrik. Dengan meningkatkan cadangan putar menjadi 15%, sistem lebih siap menghadapi perubahan kondisi dan meminimalkan risiko pemadaman listrik. Meskipun terdapat biaya tambahan terkait *start-up* dan operasi tambahan, manfaat keberlanjutan dan keandalan sistem menjadi lebih signifikan.

Skenario cadangan putar sebesar 10% memberikan hasil yang mungkin lebih efisien dari segi biaya, namun dapat mengorbankan sebagian keandalan sistem. Keputusan untuk memilih antara cadangan putar 15% atau 10% harus mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi biaya dan tingkat keandalan yang diinginkan untuk memenuhi kebutuhan unik sistem kelistrikan Selayar. Pemilihan skenario tersebut telah dipertimbangkan dengan seksama berdasarkan karakteristik sistem, tingkat pembebanan, dan prioritas keandalan listrik. Perbandingan antara skenario cadangan putar 15% dan 10% memberikan landasan yang kuat untuk mengoptimalkan perencanaan operasi pembangkit listrik di Sistem *Isolated* Selayar.

Analisis hasil menunjukkan bahwa pada akhir bulan Februari 2024, *stock* BBM masih berada di atas batas minimum 7 hari. Hal ini memberikan jendela waktu yang cukup bagi pengelola sistem untuk merespons perubahan kondisi atau gangguan dalam pasokan BBM. Dengan demikian, keberlanjutan operasional terjamin dalam jangka pendek. Rekomendasi dapat mencakup

diversifikasi sumber BBM, seperti mempertimbangkan penyedia yang berbeda atau merencanakan stok strategis di fasilitas penyimpanan lokal. Hal ini dapat memberikan ketahanan terhadap potensi gangguan pasokan yang dapat terjadi akibat faktor eksternal. Meskipun hasil menunjukkan kondisi yang baik pada akhir Februari, penting untuk terus memonitor dan mengelola risiko pasokan BBM secara proaktif. Evaluasi rutin terhadap kondisi pasar, potensi gangguan logistik, dan faktor-faktor eksternal lainnya diperlukan untuk menjaga ketersediaan BBM dalam jangka panjang.

Strategi optimasi perencanaan operasional pembangkit listrik berbasis MILP di Sistem Isolated Selayar mencakup aspek kebutuhan Bahan Bakar Minyak (BBM). Rekomendasi terbaik dapat diformulasikan untuk menjaga kelancaran operasional dan ketersediaan BBM pada tingkat optimal. Rekomendasi terbaik dapat diformulasikan untuk menjaga kelancaran operasional dan ketersediaan BBM pada tingkat optimal: (a) Penerapan Strategi Optimal. Terus menerapkan strategi operasional yang dioptimalkan untuk penggunaan BBM agar tetap efisien dan ekonomis; (b) Diversifikasi Sumber BBM. Pertimbangkan diversifikasi penyedia BBM dan perencanaan stok strategis di fasilitas penyimpanan lokal untuk meningkatkan ketahanan terhadap risiko gangguan pasokan; dan (c) Pemantauan dan Pengelolaan Risiko. Implementasikan sistem pemantauan dan manajemen risiko yang efektif untuk merespons perubahan kondisi pasar dan memitigasi potensi gangguan pasokan BBM. Dengan memperhitungkan kebutuhan Bahan Bakar Minyak (BBM) pada optimasi yang dilakukan, maka dapat dilakukan perencanaan pasokan BBM sehingga operasional dapat berjalan lancar.



Gambar 5. Perencanaan Pasokan Bahan Bakar Minyak (BBM)

Perencanaan pasokan Bahan Bakar Minyak (BBM) sebagai komponen krusial dalam strategi operasional pembangkit listrik, terutama pada *Sistem Isolated Selayar*. Di lingkungan terisolasi seperti Selayar, di mana akses terbatas dan ketergantungan pada sumber energi lokal sangat diperlukan, perencanaan pasokan BBM harus dikelola dengan hati-hati untuk menjaga keberlanjutan operasional dan ketersediaan energi listrik. Aspek perencanaan pasokan BBM menjadi fokus penting untuk memastikan operasional yang lancar. Identifikasi kebutuhan BBM untuk operasional pembangkit listrik di Selayar, mencakup estimasi kebutuhan harian, mingguan, dan bulanan berdasarkan karakteristik beban listrik, kondisi cuaca, dan model operasional.

Hasil penelitian ini menggunakan model optimasi MILP untuk mengoptimalkan penggunaan BBM. Model ini mempertimbangkan variabel seperti *start-up* dan *shut-down* mesin pembangkit, penggunaan bahan bakar selama operasi, dan strategi operasional lainnya. Hasil penelitian ini juga menentukan jadwal pengiriman BBM berdasarkan hasil optimasi dan analisis kebutuhan, melibatkan perhitungan jumlah BBM yang dibutuhkan pada setiap titik waktu dan perencanaan pengiriman yang efisien. Pertimbangkan diversifikasi sumber BBM untuk meningkatkan keberlanjutan pasokan, dapat melibatkan kolaborasi dengan berbagai penyedia BBM atau penerapan strategi penyimpanan BBM lokal sebagai cadangan.

Implementasikan sistem pemantauan dan evaluasi berkelanjutan terhadap

kondisi pasokan BBM. Perubahan dalam permintaan energi, fluktuasi harga BBM, dan faktor eksternal lainnya harus dipantau secara rutin untuk merespons secara proaktif. Membangun sistem manajemen risiko yang efektif untuk mengidentifikasi dan mengelola potensi risiko yang dapat mempengaruhi pasokan BBM, yang mencakup pula analisis risiko, pengembangan strategi mitigasi, dan rencana darurat. Pertimbangkan pengoptimalan teknologi dengan memanfaatkan solusi penyimpanan energi atau teknologi terbarukan untuk mengurangi ketergantungan pada BBM. Penggunaan solusi ini dapat membantu mengurangi kebutuhan BBM dan meningkatkan keberlanjutan.

Hasil penelitian ini memastikan bahwa stok BBM selalu dijaga di atas tingkat minimum yang diperlukan untuk memastikan operasional yang berkelanjutan, terutama pada periode dengan permintaan energi yang tinggi atau potensi gangguan pasokan. Perencanaan pasokan BBM yang matang dan terintegrasi menjadi inti dari strategi operasional yang berhasil di Sistem Isolated Selayar. Penerapan rencana pasokan BBM yang optimal dapat membantu mengatasi tantangan lingkungan terbatas dan menjaga keberlanjutan operasional sistem pembangkit listrik.

SIMPULAN

Berbagai skenario dan analisis telah dilakukan untuk menggali potensi optimalisasi operasional sistem kelistrikan. Dengan mempertimbangkan komponen-komponen krusial seperti cadangan putar, penggunaan Bahan Bakar Minyak (BBM), dan integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), penelitian ini memberikan wawasan yang mendalam tentang bagaimana sistem energi dapat dioptimalkan untuk meningkatkan keandalan, efisiensi, dan keberlanjutan. Temuan ini menekankan pentingnya pengaturan cadangan putar yang optimal.

Dari semua skenario yang dilakukan, maka dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan rekomendasi terbaik untuk dapat melakukan optimasi perencanaan operasi pada sistem kelistrikan Selayar yaitu dengan menyiapkan Cadangan Putar Sebesar 15%, memberikan tingkat keandalan yang lebih tinggi, memastikan sistem dapat menanggapi gangguan atau fluktuasi dalam pasokan listrik dengan lebih efektif. Walaupun terdapat biaya tambahan terkait *start-up* dan operasi, manfaat dalam menjaga kestabilan dan ketersediaan energi menjadi sangat signifikan.

Analisis mengenai skenario operasi dengan dan tanpa PLTS Selayar memberikan pemahaman yang mendalam tentang kontribusi PLTS dalam menghasilkan energi terbarukan. Skenario dengan PLTS mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan memberikan kontribusi positif terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca. Rekomendasi untuk terus mengoptimalkan kapasitas dan efisiensi PLTS menjadi penting untuk mencapai tujuan keberlanjutan. Analisis kebutuhan BBM dan perencanaan pasokan menjadi fokus utama untuk menjaga kelancaran operasional pembangkit listrik. Optimasi penggunaan BBM, penjadwalan pengiriman yang efisien, dan pemantauan risiko pasokan merupakan langkah-langkah krusial dalam memastikan stok BBM selalu di atas tingkat minimum yang diperlukan.

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman tentang bagaimana menerapkan teknik optimasi berbasis MILP untuk meningkatkan operasional sistem kelistrikan di lingkungan terisolasi seperti Selayar. Rekomendasi terbaik termasuk penerapan cadangan putar sebesar 15% untuk menjaga keandalan sistem, pengembangan kapasitas dan efisiensi PLTS, serta manajemen yang cermat terhadap kebutuhan dan pasokan BBM. Penelitian ini mempertimbangkan konteks lokal dan dinamika lingkungan Selayar. Faktor-

faktor seperti partisipasi masyarakat, kebijakan pemerintah, dan potensi teknologi baru juga dapat mempengaruhi kesuksesan implementasi. Semakin rendah nilai cadangan putar yang dipersiapkan, maka akan menimbulkan jumlah *start-up* mesin pembangkit PLTD yang lebih banyak sehingga biaya tersebut akan lebih tinggi sedangkan untuk biaya pemakaian Bahan Bakar Minyak (BBM) untuk pengoperasiannya akan lebih sedikit. Dari hasil simulasi dengan mengasumsikan kondisi *Ramping-up* dan *Ramping-down* mesin pembangkit 3% dalam keadaan normal maka dengan skenario nilai cadangan putar 10% & 15% masih tidak muncul status warning. Hasil optimasi yang dilakukan, maka akan didapatkan keuntungan finansial dari biaya *start-up* dan juga Biaya Operasional sebesar Rp. 69.694.351 / Bulan.

Dalam penelitian ini masih perlu dilakukan kajian lebih lanjut pada variasi musim yang lebih ekstrim, dimana PLTS Selayar hanya bisa beroperasi dengan beban rendah dan tingkat intermitensi lebih aktif, dan sebagai program keberlanjutan dirasa perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait alternatif energi terbarukan yang berpotensi di Kepulauan Selayar sehingga pola operasi pada mesin pembangkit fosil dapat terus diminimalisir dan berkelanjutan untuk mengurangi polusi yang ditimbulkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Nugraha, Febri Candra; Subekti, Lukman “Optimasi Penjadwalan Pembangkit pada Microgrid Dengan Mempertimbangkan Respons Beban”, 2022
- P. Woan-Ho.; A. Bunima.; K. Yun-Su.; M. B. Glick, "Energy Curtailment Scheduling MILP Formulation for an Islanded Microgrid with High Penetration of Renewable Energy", MDPI, *Energies* 2021 vol. 14
- Goudarzi, A.; Li, Y.; Xiang, J. “Efficient energy management of renewable resources in microgrids. In *Renewable Energy Microgeneration Systems*”, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 285–321
- Yuliani N.S., “Analisis Kstabilan Transien Pada Sistem Hybrid PLTS-Baterai-PLTD Pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019
- Kobauashi, D.; Masuta, T. Ohtake.; H.”Coordinated operation scheduling method for BESS and thermal generators based on photovoltaic generation forecasts released every several hours”, In *Proceedings of the 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia)*, Auckland, New Zealand, 4–7 December 2017
- M. F. Anjos and A. J. Conejo, “Unit Commitment in Electric Energy Systems,” *Foundations and Trends in Electric Energy Systems*, vol. 1, no.4, pp. 220–310, 2017, doi: 10.1561/31000000014
- W. Zhaolong, D. Jianying, H. W. Q, J. Zhaoxia and Z. Jiehui, "Reserve Constrained Dynamic Economic Dispatch with Valve-point Effect: A Two-stage Mixed Integer Linear Programming Approach," *CSEE Journal Of Power and Energy System*, vol. 3, pp. 203-211, 2017
- Lyzwa, W.; Wierzbowski, M.; Olek, B. “MILP formulation for energy mix optimization”, *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2015, 11, 1166–11
- Wouters, C.; Fraga, E.S.; James, A.M. “An energy integrated, multi-microgrid, MILP (mixed-integer linear programming) approach for residential distributed energy system planning—a South Australian case-study”. *Energy* 2015, 85, 30–44
- H. Nabipour Afrouzi, D. Ali Mohammad and Mehranzamir K, "Optimization of PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System With HOMER", University Teknologi Malaysia (UTM), 2010

- Rosyid O.A. (2011). Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hibrida Untuk Listrik Pedesaan di Indonesia. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 1(1)
- Singh, V., Khan, M. A., & Bansal, S. (2019). Performance Analysis of Solar Inverter. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3531223>
- Slamet, S., Abd Ghani, R., & Kobayashi, F. (2014). Implementation of IncCond Algorithm to Optimize PI Boost Converter for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Arrays. *Jurnal Teknologi*, 71(5).
<https://doi.org/10.11113/jt.v71.3847>
- Sopian, K., Zaharim, A., Ali, Y., Nopiah, Z. M., Razak, J. Ab., & Muhammad, N. S. (2008). Optimal operational strategy for hybrid renewable energy system using genetic algorithms. *WSEAS Transactions on Mathematics*, 7(4), 130–140.
- Tutkun, N., & San, E. S. (2013). Optimal power scheduling of an off-grid renewable hybrid system used for heating and lighting in a typical residential house. *2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 352–355.
<https://doi.org/10.1109/EEEIC-2.2013.6737935>
- Winasis, & Rosyadi, I. (2014). Evaluasi Unjuk Kerja Sistem Photovoltaic 12 KWP Pada Pembangkit Listrik Hibrida Surya - Angin Pantai Baru Bantul. *Seminar Nasional Teknik (SENATEK) 2014*, 114–119.