

# Strategi Penambahan Pembangkit pada Sistem 150 kV melalui Pendekatan *Multi Criteria Decision Analysis* berbasis Estimasi LOLP

HASNA SATYA DINI, ZUL FIKRI, ADRI SENEN

Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: [zul2011038@itpln.ac.id](mailto:zul2011038@itpln.ac.id)

Received 3 September 2024 | Revised 30 September 2024 | Accepted 28 Oktober 2024

## ABSTRAK

*Keandalan sistem tenaga listrik sangat penting untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat modern. Pertumbuhan beban tanpa penambahan kapasitas pembangkit dapat menurunkan keandalan yang diukur melalui Loss of Load Probability (LOLP) dan Loss of Load Expectation (LOLE). Perhitungan LOLP menggunakan metode rekursif untuk jumlah unit pembangkit yang kecil karena akurasi yang tinggi, sementara metode Monte Carlo digunakan untuk sistem lebih besar karena efisiensi dan skalabilitasnya. Penelitian ini menganalisis dampak pertumbuhan beban terhadap keandalan sistem dan strategi ekspansi pembangkit. Metode Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) digunakan untuk menentukan pembangkit terbaik berdasarkan kriteria teknologi, keandalan, dan ekonomi. MCDA terbukti efektif karena fleksibel, mudah diterapkan, dan tidak memerlukan perangkat lunak khusus. Studi selama 10 tahun pada sistem 150 kV dengan kapasitas 450 MW dan beban puncak 328,36 MW menunjukkan bahwa penambahan pembangkit dan integrasi Battery Energy Storage System (BESS) berhasil menurunkan LOLP menjadi 0,000096 pada akhir evaluasi.*

**Kata kunci:** LOLE, LOLP, MCDA

## ABSTRACT

*The reliability of power systems is crucial to meet the energy demands of modern society. Load growth without additional generation capacity can reduce reliability, measured by Loss of Load Probability (LOLP) and Loss of Load Expectation (LOLE). LOLP is calculated using a recursive method for small generation units due to its high accuracy, while the Monte Carlo method is preferred for larger systems because of its efficiency and scalability. This study analyzes the impact of load growth on system reliability and strategies for generation expansion. The Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) method was employed to identify the optimal generation options based on technological, reliability, and economic criteria. MCDA proved effective due to its flexibility, ease of application, and independence from specialized software. A 10-year study on a 150 kV system with a capacity of 450 MW and a peak load of 328.36 MW demonstrated that adding generation and integrating a Battery Energy Storage System (BESS) successfully reduced LOLP to 0.000096 by the end of the evaluation.*

**Keywords:** LOLE, LOLP, MCDA

## 1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan utama masyarakat modern, sehingga keandalan sistem tenaga listrik menjadi sangat penting untuk mendukung layanan publik, industri, dan pertumbuhan ekonomi. Kapasitas daya terpasang, yang biasanya lebih besar dari beban puncak dirancang untuk menyediakan cadangan daya guna menjaga stabilitas sistem dan mengatasi lonjakan beban **(Abud, dkk, 2023) (Pawenary, dkk, 2024)**. Namun, tidak semua unit pembangkit selalu siap beroperasi karena gangguan, kerusakan, atau pemeliharaan rutin. Hal ini mempengaruhi keandalan sistem yang diukur dengan indikator seperti *Forced Outage Rate (FOR)*, *Loss of Load Probability (LOLP)*, dan *Loss of Load Expectation (LOLE)* **(Medjoudj, dkk, 2017) (Nathaniel, dkk, 2022) (Rusady & Mado, 2023) (Ilmi, 2022)**. Menurut RUPTL 2021-2030 dari PT PLN (Persero), *LOLP* harus di bawah 0,274% atau *LOLE* tidak melebihi 1 hari/tahun **(PT. PLN (Persero), 2021)**. Jika daya yang dihasilkan tidak mencukupi kebutuhan, pelepasan beban (*load shedding*) dapat terjadi yang menyebabkan penurunan keandalan dan dampak ekonomi yang signifikan **(Ghonima, dkk, 2020) (Slipac, dkk, 2019)**. Seiring peningkatan beban listrik, perencanaan ekspansi pembangkit dan pemilihan jenis pembangkit yang optimal menjadi penting untuk menjaga cadangan daya, keandalan sistem, serta efisiensi operasional.

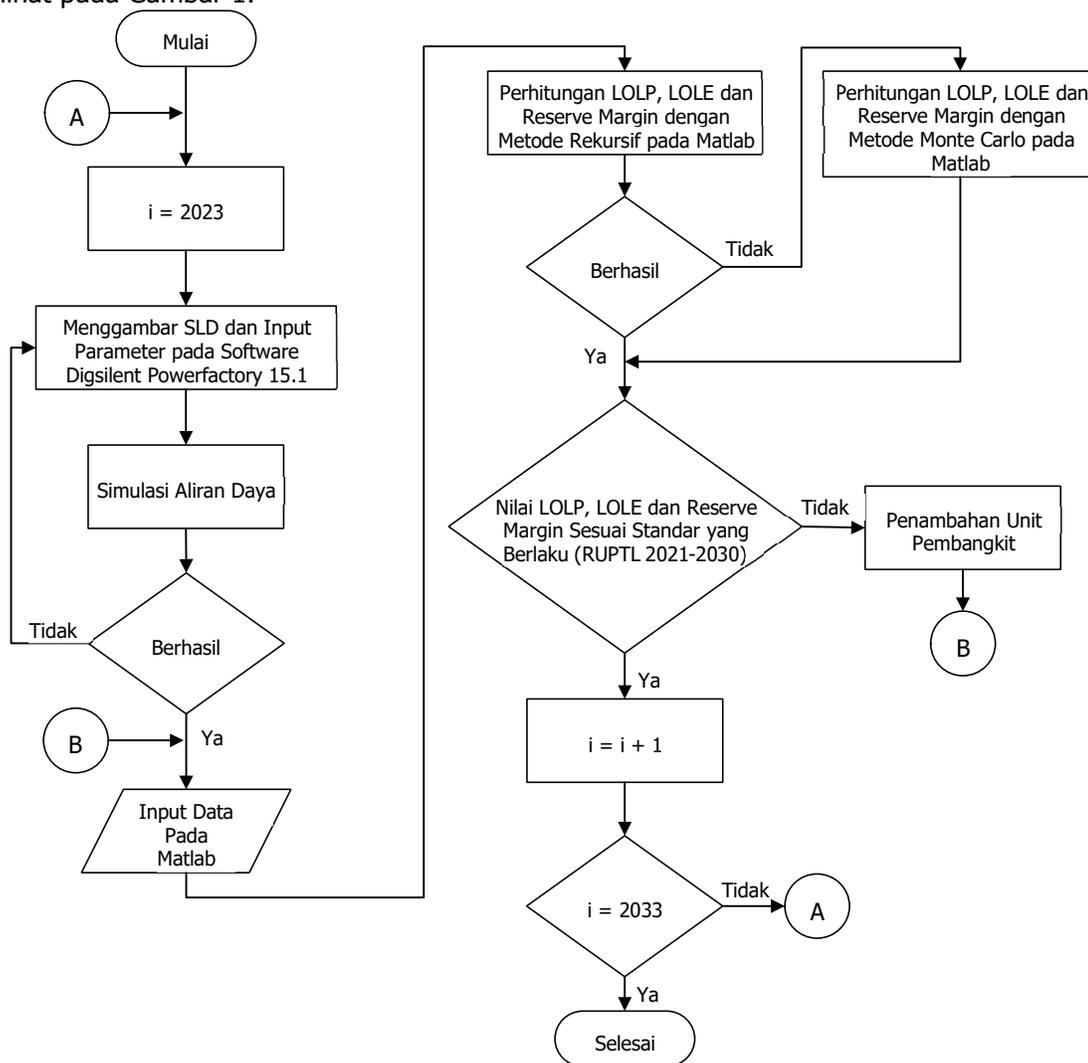
Perencanaan ekspansi pembangkit umumnya dilakukan dalam rentang waktu 10-20 tahun menggunakan metode seperti pendekatan *trend*, pendekatan ekonometri, dan pendekatan *end-use*. Namun, ketiga metode tersebut memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi, memerlukan data historis yang lengkap, serta melibatkan perhitungan rumit yang membutuhkan perangkat lunak khusus seperti *LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System)* dan *WASP-IV (Wien Automatic System Planning IV)* untuk menghasilkan proyeksi yang akurat **(Lutfi, 2019) (Rajagukguk, dkk, 2015)**. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penulis menggunakan metode *Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)* sebagai alternatif yang lebih efektif. *MCDA* memungkinkan pengambilan keputusan dengan mempertimbangkan berbagai kriteria teknis, ekonomi, dan operasional seperti efisiensi, biaya investasi, ketersediaan sumber daya, dan kapasitas. Metode ini lebih fleksibel, praktis, dan mampu memberikan solusi optimal dengan pendekatan yang lebih sederhana dibandingkan metode yang lain. **(Dipto, dkk, 2020)**.

Penelitian ini memodelkan sistem kelistrikan 150 kV sebagai studi kasus, yang terdiri dari 8 gardu induk dan 4 pembangkit dengan total kapasitas terpasang sebesar 450 MW dan beban puncak 328,36 MW. Dengan pertumbuhan beban yang diproyeksikan mencapai 12% per tahun. Tanpa adanya penambahan unit pembangkit baru, sistem ini berisiko mengalami kekurangan pasokan daya, yang pada akhirnya dapat menurunkan keandalan sistem secara keseluruhan. Untuk memitigasi risiko ini, dilakukan penelitian yang bertujuan untuk menganalisis dampak pertumbuhan beban terhadap keandalan sistem melalui perhitungan *LOLP* dan *LOLE*, serta merencanakan strategi penambahan pembangkit dan integrasi *Battery Energy Storage System (BESS)* menggunakan metode *MCDA* untuk menentukan pembangkit yang paling efisien berdasarkan kriteria teknologi, keandalan, ekonomi, kapasitas, serta mempertimbangkan *reserve margin* sistem **(Dipto, dkk, 2020)**.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deterministik dan analisis kuantitatif untuk menyimulasikan kondisi aktual sistem tenaga listrik. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Digsilent Power Factory 15.1, untuk analisis aliran daya guna memastikan sistem berjalan dengan baik dan sesuai standar yang berlaku. Keandalan sistem kemudian

dievaluasi melalui penghitungan nilai *LOLP*, *LOLE*, dan *reserve margin* menggunakan perangkat lunak Matlab. Perhitungan *LOLP* menggunakan dua metode yaitu metode rekursif yang lebih akurat karena menghitung semua probabilitas kombinasi, namun lebih rumit untuk sistem besar, dan metode Monte Carlo yang memanfaatkan sampel acak untuk memodelkan sistem yang lebih besar. Penambahan pembangkit dianalisis menggunakan metode *Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)* untuk menentukan jenis dan kapasitas optimal seperti terlihat pada Gambar 1.

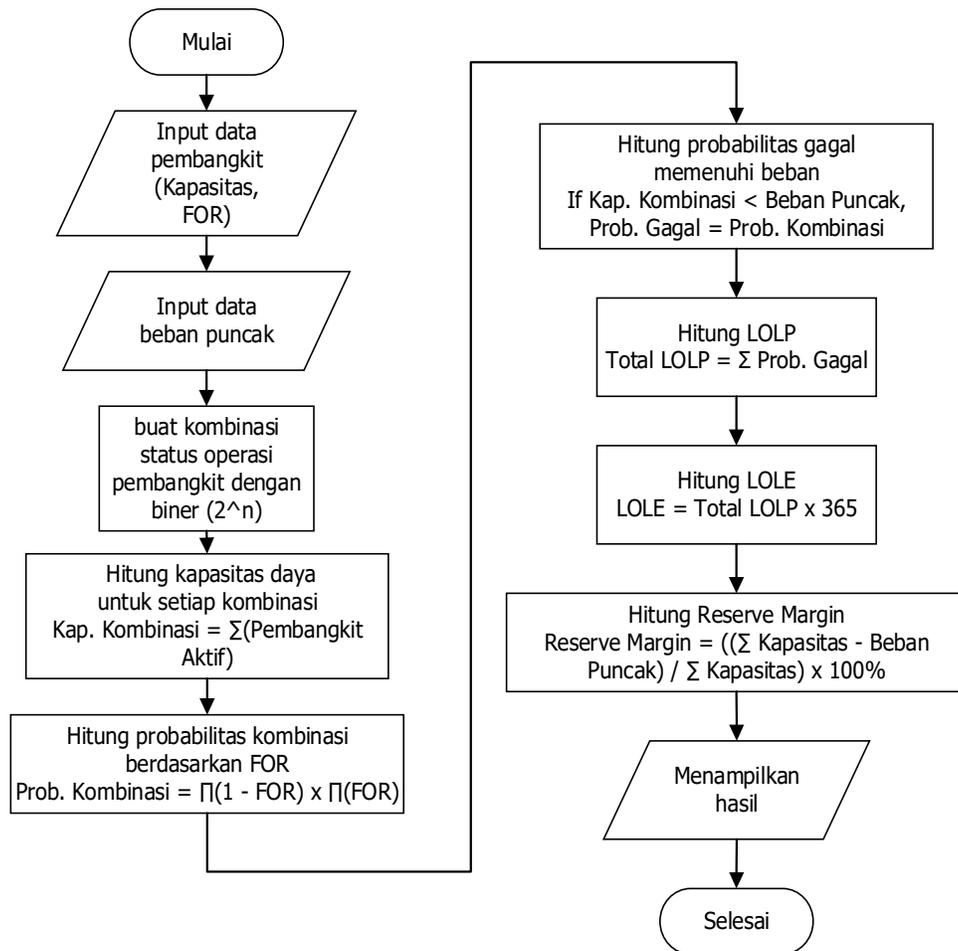


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

## 2.1 Perhitungan *LOLP*

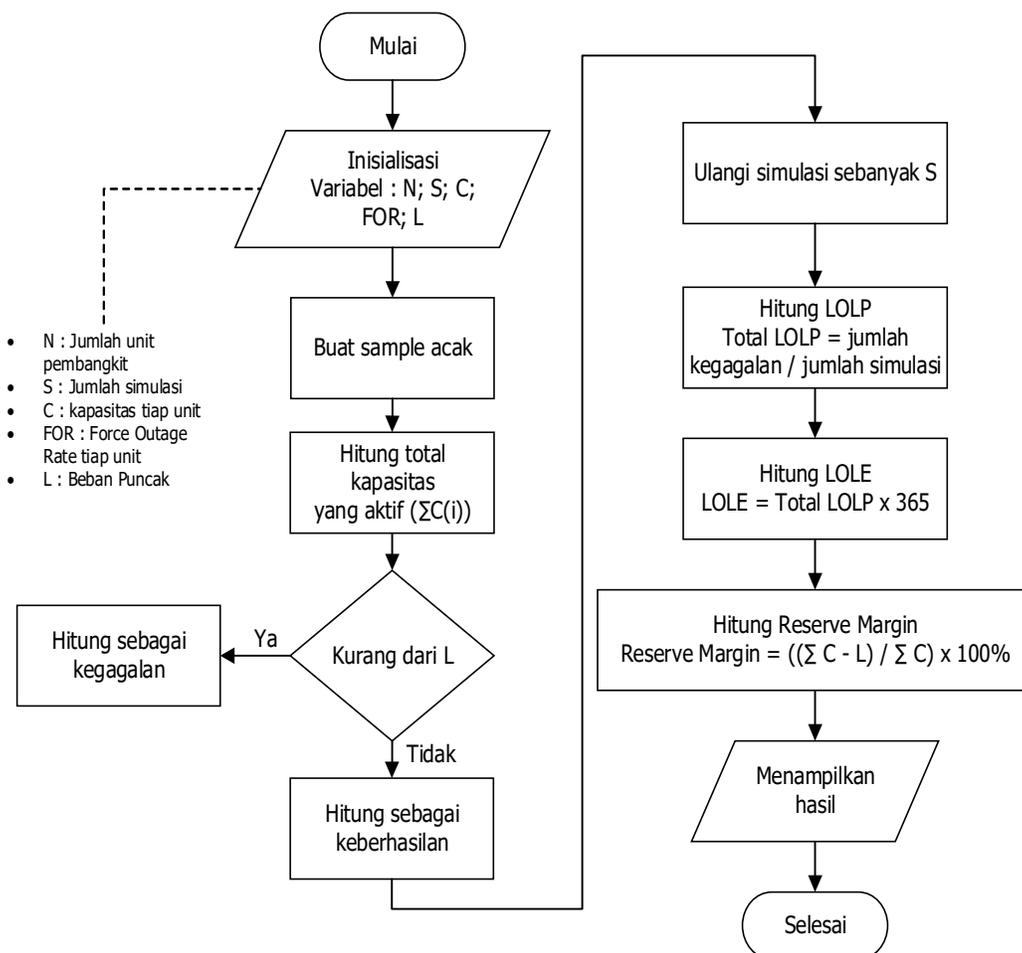
Dalam Perhitungan *LOLP* digunakan metode rekursif dan metode monte carlo. Prinsip dari metode rekursif yaitu menghitung semua kemungkinan kombinasi kegagalan unit pembangkit dan probabilitas masing-masing kombinasi. Metode rekursif lebih akurat karena menghitung semua kemungkinan secara eksplisit tetapi jika jumlah unit pembangkit semakin banyak maka kombinasinya akan meningkat secara eksponensial dan lebih kompleks dalam hal perhitungan pada akhirnya membutuhkan banyak memori dan waktu komputasi untuk jumlah unit yang besar, karena harus menghitung semua kemungkinan kombinasi. (Hanafi & Sukma, 2023). Perhitungan *LOLP* menggunakan metode rekursif memerlukan input data seperti data jumlah

unit dan kapasitas pembangkit, data *FOR* pembangkit, dan data beban puncak. Diagram alir perhitungan *LOLP* dengan metode rekursif ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2. Diagram Alir Perhitungan *LOLP* Dengan Metode Rekursif**

Metode monte carlo menggunakan pengambilan sampel acak untuk memperkirakan hasil, dan dalam perhitungan *LOLP*, monte carlo akan mensimulasikan sejumlah besar skenario kegagalan unit pembangkit dan menghitung berapa kali total kapasitas sistem kurang dari beban puncak (Abud, dkk, 2023). Karena menggunakan sampel acak maka keakuratan perhitungan akan sedikit lebih rendah dari metode rekursif tetapi lebih efisien dan cepat untuk jumlah unit yang sangat besar. Monte carlo membutuhkan banyak iterasi untuk mencapai hasil yang stabil, semakin besar iterasi maka hasilnya akan semakin akurat. Pada penelitian ini penulis menggunakan perhitungan *LOLP* dengan metode rekursif pada sistem dengan jumlah unit pembangkit kurang dari 20 unit dan menggunakan metode monte carlo pada sistem dengan jumlah unit pembangkit lebih dari 20 karena alasan yang sudah disebutkan di atas. Perhitungan *LOLP* menggunakan metode monte carlo memerlukan input data seperti data jumlah unit dan kapasitas tiap unit pembangkit, data *FOR* pembangkit, data beban puncak dan jumlah simulasi yang akan dilakukan. Diagram alir perhitungan *LOLP* dengan metode monte carlo ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Perhitungan LOLP Dengan Metode Monte Carlo

## 2.2 Metode Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)

Dalam penentuan pembangkit mana yang paling efisien untuk dibangun, digunakan metode teknik analisis keputusan multi kriteria atau MCDA (*Multi Criteria Decision Analysis*) untuk mendapatkan keputusan yang memiliki kemungkinan hasil yang lebih baik dibanding dengan alternatif keputusan yang lain yang tersedia. Tabel 1 menunjukkan empat kriteria dan bobotnya yang merujuk pada penelitian terdahulu oleh (Dipto, dkk, 2020).

Tabel 1. Bobot Tiap Kriteria Dalam Metode *Multi Criteria Decision Analysis*

<i>Technology (30%)</i>	<i>Safety and suistanability (30%)</i>	<i>Economy (30%)</i>	<i>Capacity (10%)</i>
<i>Efficiency coefficient (3%)</i>	<i>Availability (5%)</i>	<i>Capital Cost (13%)</i>	<i>Capacity (10%)</i>
<i>Waste Generation (19%)</i>	<i>RPR (25%)</i>	<i>O&amp;M cost (4%)</i>	
<i>Capacity Factor (8%)</i>		<i>Fuel Cost (13%)</i>	

Nilai pembobotan dari setiap kriteria di atas didapat menggunakan metode skala *AHP (Analytic Hierarchy Process)* dengan pembobotan indeks subkriteria global yaitu nilai *technology, safety and sustainability*, dan nilai *economy* memiliki bobot yang sama yaitu sebesar 30% ditambah bobot kapasitas sebesar 10% sebagai pendekatan bahwa nilai kapasitas memiliki pengaruh langsung terhadap nilai *LOLP* dan *reserve margin* sistem.

### 2.3 Penentuan Kapasitas *BESS (Battery Energy Storage System)*

Penggunaan *Battery Energy Storage System (BESS)* dapat berperan signifikan dalam meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik (**icksan, dkk, 2023**). *BESS* mampu menyimpan energi pada saat permintaan rendah dan memasoknya kembali ke jaringan saat beban puncak, sehingga meningkatkan kapasitas daya yang tersedia. Dengan demikian, *BESS* dapat mengurangi kebutuhan penambahan pembangkit baru, sekaligus menurunkan nilai *LOLP*. Untuk menghitung kapasitas *BESS* berdasarkan besar arus beban dapat digunakan Persamaan 1 (**Firmanto, 2021**).

$$Kapasitas\ BESS\ (Wh) = \frac{V\ Pen}{V\ Bus} \times I \times DOD \times t\ (jam) \times Vnom\ BESS \quad (1)$$

Keterangan,

- $V\ Pen$  : level tegangan penetrasi (Volt)
- $V\ Bus$  : level tegangan bus pada *BESS* (Volt)
- $I$  : besar arus beban atau arus pada gardu induk (A)
- $DOD$  : *Depth of Discharge* (%)
- $t$  : durasi operasi baterai (jam)
- $Vnom\ BESS$  : tegangan nominal baterai (Volt)

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut adalah sampel kondisi sistem kelistrikan 150 kV yang akan dianalisis dengan periode evaluasi selama 10 tahun yaitu dari tahun 2023 hingga tahun 2033.



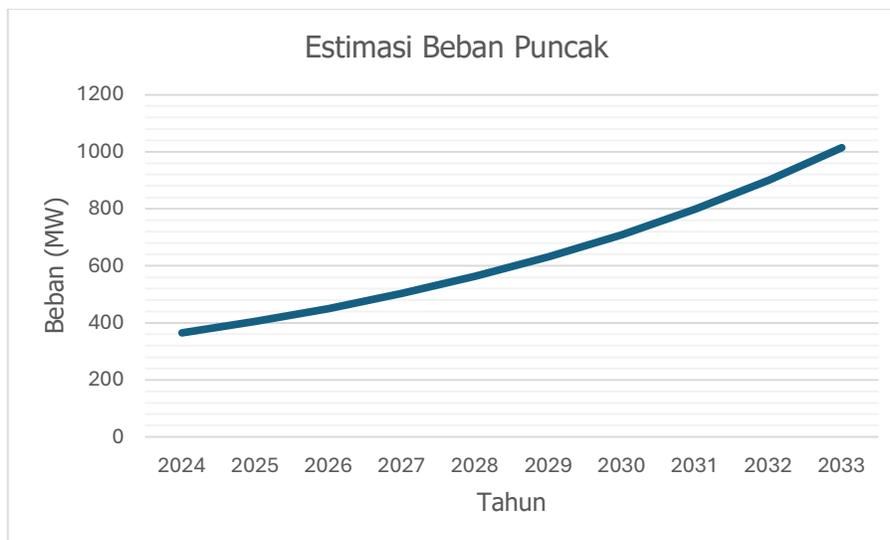
Gambar 4. Peta Sistem Kelistrikan 150 kV

Gambar 4 merupakan peta sistem kelistrikan *existing* beserta dengan potensi pembangkit yang ada. Dapat Dilihat bahwa sistem kelistrikan 150 kV terdiri dari 5 region, 8 gardu induk, dan 8 saluran transmisi. Pada sistem kelistrikan tersebut juga terdapat beberapa potensi pembangkit yang akan dibangun seiring bertambahnya besar beban setiap tahunnya. Potensi pembangkit yang ada yaitu 3 unit PLTP 50 MW pada region D, 3 unit PLTP 50 MW pada region E, 1 unit PLTP E sebesar 50 MW pada region E, 4 unit PLTU 50 MW pada region C dan PLTS sebesar 150 MW pada region B.

Pada tahun 2023 Sistem kelistrikan 150 kV mendapat suplai utama energi listrik dari empat unit pembangkit PLTU B dengan kapasitas 62,5 MVA/unit, empat unit PLTG A dengan kapasitas 31,25 MVA/unit, dua unit PLTU A dengan kapasitas 62,5 MVA/unit, serta satu unit PLTP E sebesar 62,5 MVA. Dengan beban puncak sebesar 328 MW, didapat nilai *LOLP* sebesar 0,003294 atau *LOLE* sebesar 1,20231 hari/tahun dengan *reserve margin* sebesar 27,03%.

### 3.1 Estimasi Beban Puncak

Dalam konteks analisis dan perencanaan peningkatan keandalan probabilitas pembangkit dibutuhkan data estimasi beban untuk membantu menentukan seberapa sering dan seberapa lama sistem mungkin gagal memenuhi permintaan, serta mengidentifikasi langkah-langkah yang diperlukan untuk meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan. Gambar 5 menyajikan estimasi pertumbuhan beban puncak pada sistem kelistrikan 150 kV dari tahun 2024 hingga 2033, dengan asumsi pertumbuhan beban sebesar 12% per tahun.



Gambar 5. Grafik Estimasi Beban Puncak

### 3.2 Penentuan Pembangkit Paling Ideal Berdasarkan Metode MCDA

Dalam menentukan jenis pembangkit yang akan ditambahkan ke sistem, digunakan metode *Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)* dengan mempertimbangkan berbagai parameter, yaitu *efficiency coefficient*, *waste generation*, *capacity factor*, *availability*, *reserve to production ratio*, *capital cost*, *operation and maintenance cost*, *fuel cost*, dan *capacity*. Setiap jenis pembangkit memiliki nilai parameter *MCDA* yang berbeda, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2 dan Tabel 3 (Dipto, dkk, 2020), mengutip data dari laporan *Electric Power Annual* oleh *Energy Information Administration (EIA)*, *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, *British Petroleum Statistical Review*, dan sumber lainnya. Sebagai contoh, PLTU memiliki nilai *availability* dan *capacity factor* yang tinggi sehingga andal untuk memenuhi beban dasar. Namun, pembangkit ini juga menghasilkan *waste generation* yang signifikan yang akan

memberikan dampak lingkungan besar, serta menggunakan bahan bakar yang tidak terbarukan. Di sisi lain, PLTP menunjukkan *availability* tertinggi di antara jenis pembangkit lainnya, tetapi dibarengi dengan biaya *operation and maintenance* yang relatif tinggi. Sementara itu, PLTS menjadi pilihan terakhir karena memiliki nilai yang kurang optimal pada hampir semua kriteria yang dipertimbangkan.

**Tabel 2. Nilai Kriteria *Technology* dan *Safety & Suistanability* Pembangkit**

Jenis pembangkit	<i>Technology</i>			<i>Safety and suistanability</i>	
	<i>efficiency coefficient</i>	<i>waste generation (gCO2eq / kWh)</i>	<i>capacity factor</i>	<i>availability</i>	<i>Reserve to production ratio</i>
PLTU	39	820	85	85	164
PLTA	80	24	50	50	infinity
PLTP 1	15	38	80	90	infinity
PLTP 2	15	38	80	90	infinity
PLTP E	15	38	80	90	infinity
PLTS	9	48	20	20	infinity

**Tabel 3. Nilai Kriteria *Cost* dan *Capacity* Pembangkit**

Jenis pembangkit	<i>Cost</i>			<i>Capacity</i>	
	<i>Capital cost (2024Rp, kW)</i>	<i>Fixed O&amp;M Cost (Rp)</i>	<i>Variable O&amp;M Cost (Rp)</i>	<i>Fuel Cost (Rp)</i>	<i>Capacity (MW)</i>
PLTU	64.668.639,00	78.573,00	74.764,00	22.222,00	200
PLTA	62.287.614,00	80.796,00	23.651,00	0,00	100
PLTP 1	48.826.886,00	264.452,00	19.206,00	0,00	150
PLTP 2	48.826.886,00	264.452,00	19.206,00	0,00	150
PLTP E	48.826.886,00	264.452,00	19.206,00	0,00	50
PLTS	125.321.282,00	165.084,00	0,00	0,00	150

Untuk memastikan perbandingan yang adil antara sepuluh parameter *MCD*A yang memiliki skala nilai dan satuan yang berbeda-beda, dilakukan proses normalisasi menggunakan Persamaan 2. Normalisasi ini bertujuan untuk menyetarakan semua parameter ke dalam satu skala yang sama sehingga dapat diolah dan dibandingkan secara objektif. Hasil normalisasi setiap parameter kemudian dikalikan dengan pembobotan pada Tabel 1 seperti ditunjukkan pada persamaan 3.

$$X_{norm} = \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \tag{2}$$

$$S_i = \sum_{j=1}^N X_{norm} \times \alpha_{ij} \tag{3}$$

Keterangan,

- $X$  : Nilai aktual  
 $X_{max}$  : Nilai terbesar parameter dalam dataset  
 $X_{min}$  : Nilai terkecil parameter dalam dataset  
 $X_{norm}$  : Nilai normalisasi  
 $S_i$  : Total skor terhitung  
 $N$  : Jumlah total parameter yang digunakan  
 $a_{ij}$  : Bobot parameter

Hasil dari perhitungan total skor terhitung ditunjukkan pada Tabel 4. Kemudian dilakukan perankingan dengan pembangkit yang memiliki total skor terhitung tertinggi berada pada peringkat pertama, sedangkan yang terendah di peringkat terakhir.

**Tabel 4. Hasil Keluaran dan Peringkat Akhir MCDA**

jenis pembangkit	<i>Efisiensi</i>	<i>Waste generation</i>	<i>Faktor Kapasitas</i>	<i>availability</i>	<i>RPR</i>	<i>Capital Cost</i>	<i>Fixed O&amp;M Cost</i>	<i>Variable O&amp;M Cost</i>	<i>Fuel Cost</i>	<i>Capacity</i>	<b>TOTAL</b>	<b>Peringkat</b>
<b>PLTU</b>	0,01	0,19	0,13	0,05	0,00	0,10	0,02	0,00	0,00	0,10	0,60	4
<b>PLTA</b>	0,03	0,00	0,06	0,02	0,25	0,11	0,02	0,01	0,13	0,03	0,67	3
<b>PLTP 1</b>	0,00	0,00	0,12	0,05	0,25	0,13	0,00	0,01	0,13	0,07	0,77	1
<b>PLTP 2</b>	0,00	0,00	0,12	0,05	0,25	0,13	0,00	0,01	0,13	0,07	0,77	1
<b>PLTP E</b>	0,00	0,00	0,12	0,05	0,25	0,13	0,00	0,01	0,13	0,00	0,70	2
<b>PLTS</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,25	0,00	0,01	0,02	0,13	0,07	0,48	5

Sehingga didapat untuk urutan pembangunan pembangkit yang paling efisien berdasarkan metode *multi-criteria decision analysis* adalah PLTP 1 dan PLTP 2, PLTP E, PLTA, PLTU dan terakhir PLTS. Kemudian untuk menentukan peringkat dari pembangkit yang memiliki skor MCDA yang sama seperti PLTP 1 dan PLTP 2 maka ditentukan berdasarkan kebutuhan beban yang paling besar pada gardu induk dari pembangkit untuk distribusi daya yang merata. Dan untuk penambahan kapasitas pembangkit juga memperhatikan besar *reserve margin* sistem yaitu sebesar 15% - 40% sesuai *benchmark* pada negara-negara lain yang bersumber dari (McKinsey & Company) dan tertuang pada (RUPTL 2021-2030).

### 3.4 Kondisi Sistem Tahun 2024 Hingga Tahun 2033

Berdasarkan nilai *LOLP* dan *LOLE* yang ditampilkan pada Tabel 5, diperlukan penambahan pembangkit mulai tahun 2024 untuk meningkatkan keandalan sistem sesuai dengan nilai *LOLP*, *LOLE*, dan *reserve margin* yang ditetapkan. Dengan mempertimbangkan hasil perhitungan *MCDA*, PLTP diprioritaskan untuk ditambahkan ke sistem karena memperoleh peringkat tertinggi dibandingkan jenis pembangkit lainnya.

Pada tahun 2024, dilakukan penambahan 3 unit PLTP dengan kapasitas masing-masing 50 MW. Penambahan ini berhasil menurunkan nilai *LOLP* dari 0,020403 menjadi 0,000008 yang menunjukkan peningkatan signifikan dalam keandalan sistem. Proses penambahan pembangkit dilanjutkan secara bertahap untuk menjaga stabilitas sistem seiring dengan peningkatan beban di tahun-tahun berikutnya.

**Tabel 5. LOLP, LOLE dan Reserve Margin Tahun 2024-2033**

Tahun	Kapasitas total (MW)	Beban Puncak (MW)	LOLP	LOLE (hari/tahun)	Reserve Margin (%)	Penambahan Pembangkit
2024	450	365,16	0,020403	7,44707	18,85	-
2024'	600	365,16	0,000008	0,00309	39,14	PLTP 2 (3 x 50 MW)
2025	600	405,22	0,000207	0,07556	32,46	-
2026	600	450,14	0,003529	1,28823	24,98	-
2026'	750	450,14	0,000002	0,00063	39,98	PLTP 1 (3 x 50 MW)
2027	750	503,77	0,000038	0,01391	32,83	-
2028	750	564,06	0,000634	0,23149	24,79	-
2029	750	631,89	0,014213	5,18772	15,78	-
2029'	800	631,89	0,001836	0,67028	21,01	PLTP E (1 x 50 MW)
2030	800	708,26	0,073953	26,9927	11,43	-
2030'	900	708,26	0,000982	0,35843	21,27	PLTA (5 x 20 MW)
2031	900	798,88	0,025933	9,46558	11,24	-
2031'	1100	798,88	0,000046	0,00168	27,37	PLTU (4 x 50 MW)
2032	1100	898,74	0,000752	0,27444	18,3	-
2033	1100	1014,27	0,122304	44,6383	7,79	-
2033'	1250	1014,27	0,045175	16,4888	18,86	PLTS (150 MW)

Tanda petik `) pada tahun merujuk kepada penambahan pembangkit untuk meningkatkan keandalan sistem yang mengacu pada nilai *LOLP*, *LOLE* dan *reserve margin* sistem.

Pada tahun 2033 setelah dilakukan penambahan semua potensi pembangkit yang ada, nilai *LOLP* menjadi 0,045175 atau *LOLE* sebesar 16,48877 hari/tahun dengan *reserve margin* sebesar 18,86%. Hal ini masih belum sesuai dengan target yang ingin dicapai sehingga dilakukan penambahan *BESS* untuk membantu dalam perbaikan keandalan sistem. Melalui persamaan (1), dengan tegangan penetrasi sebesar 150 kV, tegangan bus sebesar 20 kV, durasi operasi baterai selama 4 jam dan tegangan nominal baterai sebesar 480 volt, didapat kapasitas baterai (MWh) yang diperlukan ditampilkan pada Tabel 9.

**Tabel 6. Nilai Kapasitas *BESS* Tiap Gardu Induk**

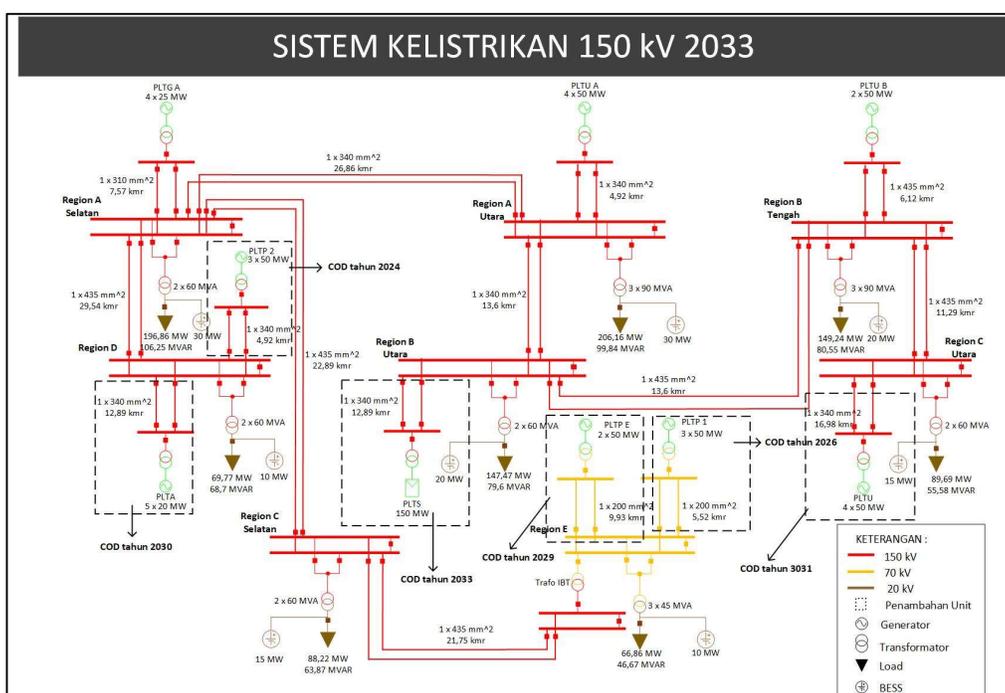
Nama Gardu Induk	Amper e	Kapasita s Arus (Ah)	Kapasitas Baterai (Wh)	Kapasitas Baterai (MWh)	Keluaran Baterai (MW)
Region A Utara	6612	247.950	119.016.000	119,016	29,754
Region A Selatan	6458	242.175	116.244.000	116,244	29,061
Region B Utara	4837	181.387,5	87.066.000	87,066	21,7665
Region B tengah	4896	183.600	88.128.000	88,128	22,032
Region C Utara	3046	114.225	54.828.000	54,828	13,707
Region C Selatan	3144	117.900	56.592.000	56,592	14,148
Region D	2353	88.237,5	42.354.000	42,354	10,5885
Region E	2522	94.575	45.396.000	45,396	11,349
<b>Total</b>					<b>152,406</b>

Dari tabel 6 di dapatkan total keluaran semua baterai sebesar 152,406 MW, sehingga dilakukan perhitungan ulang untuk nilai *LOLP* dan *LOLE* setelah penambahan *BESS* yang ditampilkan pada Tabel 7.

**Tabel 7. Hasil *LOLP*, *LOLE* dan *Reserve margin* Tahun 2033 Setelah Penambahan *BESS***

Total kapasitas	1400 MW
<i>LOLP</i>	0,000096
<i>LOLE</i>	0,0353 hari/tahun
<i>Reserve margin</i>	27,56 %

Hasil probabilitas kehilangan daya pada tahun terakhir rentang waktu evaluasi setelah dilakukan penambahan pembangkit dan *BESS* yaitu *LOLE* sebesar 0,0353 hari/tahun sehingga sesuai dengan target yang diinginkan yaitu maksima1 hari/tahun. Gambar 6 adalah *single line diagram* pada tahun 2033 atau sudah mencapai akhir dari rentang waktu evaluasi penelitian.



**Gambar 6. *Single Line Diagram* Tahun 2033**

Dari *load flow simulation* yang dilakukan pada perangkat lunak Digsilent Power Factory, didapat hasil simulasi aliran daya pada tahun 2033 yaitu total pembangkitan sebesar 1031,23 MW dan 411,08 MVAR. Total beban sebesar 1014,27 MW dan 581,07 MVAR yang mengacu pada beban puncak pada tahun tersebut. Total rugi-rugi daya sebesar 16,96 MW dan rugi daya serta kompensasi daya reaktif akibat *line charging* sebesar -18,65 MVAR. Tegangan pada setiap bus masih berada dalam batas ketentuan SPLN, yaitu variasi tegangan pelayanan sebagai akibat rugi tegangan adalah maksimal +5% dan minimal -10% pada sisi pelayanan.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)* merupakan solusi efektif untuk menentukan jenis pembangkit optimal dalam perencanaan ekspansi sistem tenaga listrik, tanpa memerlukan perangkat lunak khusus seperti *LEAP* atau *WASP-IV* yang

cenderung kompleks dan membutuhkan data historis yang lengkap. Dengan memprioritaskan pembangunan PLTP dan PLTA yang didapat dari metode *MCD*A serta dengan integrasi *Battery Energy Storage System (BESS)*, nilai *LOLP* berhasil diturunkan secara signifikan menjadi 0,000096 pada akhir periode evaluasi, memenuhi target yang ditetapkan, yaitu tidak lebih dari 0,00274 atau setara dengan *LOLE* 1 hari per tahun.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi PLN atas dukungannya dalam pendanaan penelitian ini.

### DAFTAR RUJUKAN

- Abud, T. P., Augusto, A. A., Fortes, M. Z., Maciel, R. S., & Borba, B. S. M. C. (2023). State of the Art Monte Carlo Method Applied to Power System Analysis with Distributed Generation. *Energies*, *16*(1), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en16010394>
- Dipto, A. S., Bari, M. A. Al, & Nabil, S. T. (2020). Sustainability Analysis of Different Types of Power Plants Using Multi-Criteria Decision Analysis Methods. *Journal of Engineering Advancements*, *01*(03), 94–100. <https://doi.org/10.38032/jea.2020.03.004>
- Firmanto, A. (2021). Analisa Penggunaan Batery Energy Storage System Sebagai Pengatur Frekuensi Di Gardu Induk.
- Ghonima, F., Ezzat, M., & Abdel-Salam, T. S. (2020). Economical and Technical Assessment of Hybrid Renewable Energy Systems for Optimal Performance Applied in Hurghada, Egypt. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, *9*(1), 151–161. <https://doi.org/10.35940/ijrte.a1302.059120>
- Hanafi, F. M., & Sukma, D. Y. (2023). Reliability Improvement of Tembilahan Steam Power Plant with Additional Generating Capacity. *JNTETI*. *12*(4), 249–256.
- Icksan, F. A., Dini, H. S., & Katmoyo, R. A. (2023). Impact of battery energy storage system penetration on UFLS scheme in NTT electrical system. *2023 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, (pp. 179–184). <https://doi.org/10.1109/ICT-PEP60152.2023.10351180>
- Ilmi, F. N. (2022). Analisis keandalan operasi sistem pembangkitan Sulawesi bagian selatan berdasarkan indeks probabilitas kehilangan beban.
- Lutfi, F. (2019). Study of power generation planning in South and Central Kalimantan system for Kalimantan master plan until 2050.
- Medjoudj, R., Bediaf, H., & Aissani, D. (2017). Power System Reliability: Mathematical Models and Applications. *System Reliability*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71926>

- Nathaniel, B. L., Yonantan, P., Rompon, S. Y., Tiku, P. T., J., M. L., & Robert, R. A. (2022). Analisa Indeks Keandalan Sistem Pembangkit Listrik Pulau Miangas. *Prosiding Seminar Nasional Produk Terapan Unggulan Vokasi Politeknik Negeri Manado*, 1(2), 24–33. <https://jurnal.polimdo.ac.id/index.php/semnas/article/view/498>
- Pawenary, A., Senen, G., Alvianingsih, H. S. Dini, & Wijanarko, R. F. (2024). The migration study of 2 x 400 MW steam power plant from a 500 kV bus to a 150 kV bus. *2024 IEEE 4th International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)*, Pulau Pinang, Malaysia, 220–225. <https://doi.org/10.1109/ICPEA60617.2024.10498227>
- PT. PLN (Persero). (2021). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030. In *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030*.
- Rajagukguk, A. S. F., Pakiding, M., & Rumbayan, M. (2015). Kajian Perencanaan Kebutuhan dan Pemenuhan Energi Listrik di Kota Manado. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 4(3), 1–11. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/elekdankom/article/view/7972>
- Rusady, R., & Ismit Mado. (2023). Reliability Analysis of PTMG System Operation PT. Pertamina EP. Bunyu Based on Load Loss Probability Index. *Journal of Emerging Supply Chain, Clean Energy, and Process Engineering*, 2(2), 109–124. <https://doi.org/10.57102/jescee.v2i2.67>
- Slipac, G., Zeljko, M., & Šljivac, D. (2019). Importance of reliability criterion in power system expansion planning. *Energies*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/en12091714>