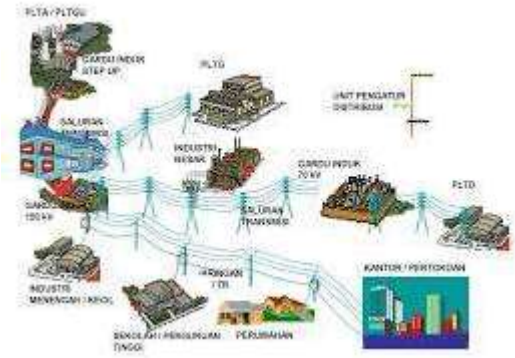
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan jaringan kompleks yang menghubungkan berbagai sumber daya energi listrik, seperti pembangkit listrik, transmisi, dan distribusi, untuk menyediakan listrik kepada pengguna akhir (MACHFUDIAH, 2019). Struktur utama dalam jaringan tenaga mencakup beberapa komponen kunci.



Gambar 2. 1 **Sistem Tenaga Listrik**
Sumber : *(GAs/s1600/energi%terbarukant.jpg)*

1. Pembangkit Listrik Tempat di mana energi listrik dihasilkan, baik dari sumber energi konvensional (seperti tenaga air, termal, dan nuklir) maupun dari sumber energi terbarukan (seperti energi surya dan angin).
2. Transmisi Jaringan transmisi menghubungkan pembangkit listrik dengan pusat-pusat distribusi listrik yang lebih besar. Transmisi dilakukan melalui jaringan tegangan tinggi (high voltage) untuk mengurangi kerugian energi selama perjalanan listrik jarak jauh.

3. Distribusi Jaringan distribusi merupakan bagian akhir dari sistem tenaga, yang mengirimkan listrik dari pusat distribusi menuju pengguna akhir seperti rumah, perkantoran, dan industri.
4. Transformator Komponen kunci dalam jaringan tenaga yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik, sesuai dengan kebutuhan transmisi atau distribusi.

Peralatan Proteksi dan Pengaman Penting dalam menjaga keandalan dan keamanan jaringan, termasuk perangkat proteksi tegangan, arus, dan perlindungan dari gangguan seperti lonjakan tegangan atau gangguan arus hubung singkat.

2.1.2 Analisis Kontingensi Dalam Sistem Tenaga Listrik

Kontingensi dalam konteks sistem tenaga listrik mengacu pada kemungkinan terjadinya gangguan yang berpotensi menimbulkan kegagalan pada komponen-komponen listrik dalam jaringan, seperti generator pembangkit, saluran transmisi, transformator, atau peralatan distribusi. Analisis kontingensi dilakukan untuk mengevaluasi dampak potensial dari kegagalan ini terhadap kehandalan, kestabilan, dan keamanan sistem tenaga listrik secara keseluruhan (Fiki, 2022)

2.1.3 Aliran Daya (Power Flow) Dalam Jaringan Tenaga Listrik.

Aliran daya (power flow atau load flow) merupakan salah satu analisis fundamental dalam sistem tenaga listrik yang bertujuan untuk menentukan kondisi operasi steady-state dari suatu sistem kelistrikan. Analisis ini digunakan untuk menghitung tegangan, arus, daya aktif (P), dan daya reaktif (Q) pada setiap bus dalam sistem, serta daya yang mengalir pada tiap saluran transmisi (Kiswantono, 2025). Tujuan utama dari analisis aliran daya adalah untuk menentukan tegangan, arus, dan daya

di setiap bus (simpul) dalam jaringan, dengan mempertimbangkan karakteristik beban dan konfigurasi fisik jaringan.

2.1.4 Persamaan Aliran Daya

Persamaan dasar aliran daya dinyatakan dalam bentuk set persamaan non-linear yang menghubungkan variabel tegangan kompleks (V) dari setiap simpul dengan arus (I) dan impedansi (Z) dari semua elemen dalam jaringan. Persamaan aliran daya dinyatakan sebagai berikut.

$$P_i = \sum_{j=1}^{N} V_i V_j \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \right)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{N} V_i V_j \left(G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} \right)$$

a) P_i dan Q_i adalah daya aktif dan reaktif di simpul i, satuannya adalah watt (W) dan volt-ampere reaktif (Var)

b) V_i dan V_j adalah tegangan kompleks di simpul i dan j,

c) G_{ij} dan B_{ij} adalah bagian real dan imajiner dari matriks admitansi antara simpul i dan j, satuannya adalah Siemens (S)

d) θ_{ij} adalah perbedaan sudut fase antara V_i dan V_j .

2.2 Metode Aliran Daya Distributed Slack Bus

Metode aliran daya Distributed Slack Bus adalah pendekatan yang digunakan dalam analisis aliran daya untuk mengatasi keterbatasan metode tradisional yang hanya mengandalkan satu bus slack. (Monice et al., 2023).

Dalam metode konvensional, perubahan daya aktif dan reaktif pada sistem ditanggung sepenuhnya oleh satu bus slack, yang sering kali menyebabkan hasil

perhitungan kurang akurat, terutama pada sistem besar dengan banyak generator. Metode Distributed Slack Bus mendistribusikan perubahan daya ini secara proporsional ke beberapa bus generator, memberikan representasi yang lebih realistis terhadap kondisi operasional sistem tenaga.

2.2.1 Prinsip Dasar Metode Distributed Slack Bus

Prinsip dasar metode ini adalah mendistribusikan perubahan daya aktif dan reaktif secara proporsional ke semua bus generator yang tersedia dalam sistem, bukan hanya pada satu bus slack. Pendekatan ini memungkinkan semua generator berbagi beban akibat perubahan daya, sesuai dengan parameter tertentu seperti kapasitas daya maksimum, nilai inertia, atau kontribusi daya masing-masing generator.

Dengan cara ini, metode Distributed Slack Bus mengurangi konsentrasi beban pada satu bus dan memberikan hasil perhitungan yang lebih akurat. Selain itu, metode ini mencerminkan pengaruh perubahan daya pada sistem secara lebih realistis, terutama dalam kondisi sistem yang kompleks atau memiliki banyak sumber energi terdistribusi.

2.2.2 Langkah-Langkah Dalam Metode Distributed Slack Bus

Langkah pertama dalam metode ini adalah melakukan inisialisasi sistem, yang mencakup pengumpulan data jaringan seperti matriks Y-bus, data beban, dan data generator. Selanjutnya, bus-bus generator yang akan digunakan untuk distribusi beban slack diidentifikasi. Setelah itu, dilakukan perhitungan awal aliran daya menggunakan metode tradisional seperti Newton-Raphson atau Gauss-Seidel. Langkah berikutnya adalah mendistribusikan perubahan daya pada bus generator

sesuai dengan bobot tertentu, misalnya berdasarkan kapasitas daya maksimum atau impedansi generator. Nilai daya pada bus generator diperbarui sesuai dengan hasil distribusi ini. Iterasi perhitungan aliran daya kemudian dilakukan hingga konvergensi tercapai. Setelah hasil konvergensi diperoleh, analisis dilakukan untuk mengevaluasi distribusi daya aktif dan reaktif serta dampaknya terhadap performa sistem.

2.2.3 Kelebihan Dan Kekurangan Metode Distributed Slack Bus

Metode Distributed Slack Bus memiliki beberapa kelebihan. Pertama, metode ini menghasilkan distribusi daya yang lebih realistis, terutama pada sistem besar dengan banyak generator. Hal ini mengurangi beban berlebih pada satu bus slack, sehingga mengurangi risiko kesalahan perhitungan atau ketidakstabilan sistem. Selain itu, metode ini sangat bermanfaat dalam simulasi gangguan atau kontingensi, karena memberikan gambaran yang lebih akurat tentang bagaimana sistem merespons perubahan. Bus ini menjaga nilai tegangan tetap dan berfungsi sebagai penyeimbang untuk keperluan pendidikan dan penelitian 12 drop dari bus lain. Bus ini susah untuk menghitung Lossesnya karena beban yang terus berfluktuasi, sehingga daya aktif dan reaktif yang disuplai tidak konstan (Maidodi Putra Hernanda, 2025).

Namun, metode ini juga memiliki kekurangan. Salah satu kekurangannya adalah kompleksitas perhitungan yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Selain itu, metode ini memerlukan parameter distribusi yang tepat, yang jika tidak ditentukan dengan baik dapat memengaruhi akurasi hasil. Pada

sistem besar, metode ini juga membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih tinggi.

2.2.4 Aplikasi Metode Distributed Slack Bus Dalam Analisis Aliran Daya

Metode Distributed Slack Bus memiliki berbagai aplikasi dalam analisis aliran daya. Salah satu aplikasi utamanya adalah dalam analisis kontingensi, di mana metode ini digunakan untuk mengevaluasi dampak gangguan seperti pemadaman atau kerusakan komponen pada sistem tenaga.

Metode ini juga sangat berguna dalam studi perencanaan sistem tenaga, seperti menentukan lokasi optimal pembangkitan daya tambahan atau mengoptimalkan pengoperasian jaringan (M Kasim, 2026). Selain itu, metode ini meningkatkan akurasi simulasi aliran daya dalam kondisi transien atau perubahan beban yang signifikan. Pada jaringan yang kompleks, seperti jaringan dengan banyak generator atau yang melibatkan sumber energi terbarukan, metode ini memberikan keandalan lebih tinggi dalam analisis aliran daya.

2.3 Model Jaringan 30 Bus IEEE Dalam Analisis Sistem Tenaga Listrik.

Model jaringan 30 Bus IEEE merupakan salah satu dari beberapa model standar yang digunakan secara luas dalam penelitian dan pengembangan dalam bidang analisis sistem tenaga listrik. Model ini dirancang untuk merepresentasikan jaringan tenaga yang cukup kompleks untuk tujuan pengujian dan evaluasi berbagai algoritma dan metode analisis.

2.3.1 Definisi Model Jaringan 30 Bus IEEE

Model ini terdiri dari 30 simpul (bus) yang saling terhubung melalui berbagai saluran transmisi dengan impedansi yang berbeda-beda Karakteristik utama dari model ini meliputi:

1. Keragaman Impedansi Saluran transmisi antar simpul memiliki impedansi yang bervariasi, mencakup resistansi (R) dan reaktansi (X) yang merepresentasikan sifat fisik dari kabel atau saluran transmisi dalam keadaan nyata.
2. Sifat Fase Setiap simpul dalam model ini dapat memiliki sifat fasa yang berbeda, yang mempengaruhi aliran daya dan kondisi operasional sistem.
3. Beberapa Pembangkit Model ini biasanya mencakup beberapa pembangkit listrik yang terhubung ke simpul tertentu, yang menyediakan daya aktif (P) dan reaktif (Q) ke jaringan.
4. Beban Listrik Representasi berbagai jenis beban listrik (seperti beban tetap, beban variabel, dan beban reaktif) yang mempengaruhi distribusi daya dan tegangan di seluruh jari (Noor, 2023).

2.3.2 Kegunaan Dalam Simulasi Sistem Tenaga

Model jaringan 30 Bus IEEE digunakan untuk berbagai tujuan dalam simulasi dan analisis sistem tenaga listrik, termasuk:

1. Pengujian Algoritma Model ini digunakan untuk menguji dan memvalidasi efektivitas berbagai algoritma dalam menangani aliran daya, analisis kestabilan, dan perencanaan operasional jaringan tenaga.

2. Evaluasi Kinerja Menggunakan model ini memungkinkan untuk evaluasi kinerja sistem tenaga dalam menghadapi kondisi operasional yang berbeda, seperti beban puncak, gangguan sistem, atau perubahan kondisi jaringan.
3. Perencanaan dan Pengembangan Model ini juga digunakan untuk perencanaan pengembangan infrastruktur jaringan tenaga baru atau perluasan kapasitas yang ada, dengan memperhitungkan interaksi kompleks antara berbagai elemen dalam jaringan.
4. Pelatihan dan Pendidikan Sebagai model standar yang terkenal, model 30 Bus IEEE digunakan dalam pendidikan dan pelatihan para ahli dan praktisi sistem tenaga listrik untuk memahami dasar-dasar analisis dan operasi jaringan (Laksono, n.d.).

2.4 Teknik Mitigasi Dalam Sistem Tenaga Listrik

2.4.1 Strategi Mitigasi Untuk Mengatasi Hasil Dari Analisis Kontingensi

Dalam menghadapi hasil analisis kontingensi, beberapa strategi mitigasi dapat diterapkan untuk menjaga kestabilan sistem tenaga, termasuk:

1. Redistribusi Beban: Aliran daya dapat disesuaikan dengan mengalihkan beban dari saluran atau pembangkit yang terganggu ke jalur lain, menjaga keseimbangan aliran daya dalam sistem(Sihombing, Handoko and Darjat, 2023).
2. Aktivasi Generator Cadangan: Ketika generator utama mengalami kegagalan, generator cadangan dapat diaktifkan untuk menjaga pasokan daya yang cukup dan mencegah terjadinya defisit energi di daerah yang terkena gangguan.

2.4.2 Dampak Mitigasi Pada Kestabilan Tegangan Dan Operasi Sistem

Implementasi strategi mitigasi berdampak positif pada kestabilan tegangan dan operasi keseluruhan sistem. Misalnya, redistribusi beban mengurangi tekanan pada bagian sistem yang terganggu, sehingga mengurangi risiko kelebihan beban. Aktivasi generator cadangan meningkatkan pasokan daya dan menjaga tegangan tetap stabil di bus-bus yang membutuhkan. Strategi mitigasi ini memastikan bahwa gangguan tidak menyebabkan efek berantai yang bisa mengakibatkan pemadaman skala besar.

2.4.3 Evaluasi Efektivitas Teknik Mitigasi

Efektivitas teknik mitigasi dievaluasi dengan menganalisis seberapa cepat dan stabil sistem dapat pulih setelah gangguan. Dalam konteks respons sistem terhadap kontingensi, teknik mitigasi yang efektif akan menghasilkan pemulihan cepat dan meminimalkan perubahan tegangan serta aliran daya. Studi evaluasi menunjukkan bahwa redistribusi beban dan penggunaan generator cadangan mampu meningkatkan keandalan sistem tenaga, terutama dalam mengatasi gangguan sementara dan mencegah gangguan merambat ke wilayah lain dalam jaringan.

2.5 Kajian Pustaka

Tabel 2. 1 Penelitiaan Terkait Terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Variabel Ukur	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian Ini
1	Rahmad Syafri Utama (2018)	Analisis kontingensi sistem tenaga 30 bus IEEE berbasis metode aliran	Kontingensi, overload, kapasitas saluran	Saluran 1-3, 3-4, dan 4-6 mengalami overload, sehingga	Penelitian tersebut menggunakan metode Fast Decoupled,

		daya Fast Decoupled		diperlukan penambahan batas kapasitas maksimum saluran.	sedangkan penelitian ini menggunakan metode Distributed Slack Bus untuk menganalisis aliran daya dan kontingensi N-1 pada saluran transmisi.
2	Ahmad Mursali Arifin (2019)	Analisis kontingensi sistem tenaga listrik pada jaringan 150 kV	Kontingensi, indeks performa, tegangan	Indeks performa tertinggi terjadi pada kontingensi saluran Jajar-Gondangrejo dan Pedan-Jajar.	Penelitian tersebut menggunakan jaringan 150 kV sebagai objek kajian, sedangkan penelitian ini menggunakan sistem standar IEEE 30 Bus.
3	Eko Riskiyanto (2019)	Analisis kontingensi pada sistem tenaga listrik Sulawesi Utara-Gorontalo	Kontingensi, indeks kinerja, beban	Kontingensi dianalisis pada kondisi beban rendah, menengah, dan puncak.	Penelitian tersebut menganalisis sistem tenaga nyata berdasarkan variasi beban, sedangkan penelitian ini menggunakan model IEEE 30 Bus dan fokus pada dampak kontingensi terhadap tegangan bus dan

					pembebanan saluran.
4	Yapnuarly n Axel (2023)	Analisis kontingensi sistem tenaga listrik pada sistem transmisi 150 kV di Kalimantan Timur	Kontingensi , overload, over voltage, under voltage	Ditemuka n gangguan berupa overload, over voltage, under voltage, dan under exciter.	Penelitian tersebut membahas sistem transmisi 150 kV dan beberapa jenis gangguan operasi, sedangkan penelitian ini dibatasi pada kontingensi N-1 saluran transmisi dan tidak membahas gangguan hubung singkat maupun kestabilan transien.
5	Paranrengi A. Anugrah (2021)	Studi kontingensi sistem interkoneksi Sulbagsel	Kontingensi , daya reaktif, kompensasi daya reaktif	Kompensa si daya reaktif pada kontingen si N-2 dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif untuk kontingen si N-1.	Penelitian tersebut menekankan kompensasi daya reaktif dan kontingensi N-2, sedangkan penelitian ini hanya membahas kontingensi N-1 saluran transmisi pada sistem IEEE 30 Bus.
6	Yulisman Yulisman, Fiki	Analisis kontingensi pada sistem	Kontingensi , tegangan,	Tegangan tertinggi terdapat	Penelitian tersebut dilakukan

	Rahman (2022)	pemakaian sendiri PLTU Ombilin	indeks kinerja	pada skenario 3 sebesar 618 kV dan tegangan terendah pada skenario 4 sebesar 613 kV.	pada sistem pemakaian sendiri PLTU, sedangkan penelitian ini menggunakan sistem IEEE 30 Bus sebagai sistem uji standar.
7	Febry Johan Palasworo, Anang Widiantoro (2018)	Analisis kontingensi saluran transmisi pada jaringan 150 kV Surabaya Selatan	Kontingensi, performance index, outage contingency	Kontingensi saluran Rungkut-Sukolilo memiliki PI average 0,12967 dan Sukolilo-Wonorejo memiliki PI average 0,00311.	Penelitian tersebut menggunakan jaringan transmisi 150 kV Surabaya Selatan, sedangkan penelitian ini menggunakan sistem IEEE 30 Bus dan metode Distributed Slack Bus.
8	Hartini An Nuur, Muhammad Aksan Akasan, Andarini Asri (2023)	Analisis kontingensi sistem tenaga listrik dengan metode Fast Decoupled untuk menghitung aliran daya di Gardu Induk Tello	Kontingensi, overload, performance index	Overload terjadi pada bus 5-6 dengan nilai PI 29464 dan saluran 1-6 dengan PI 0,0001.	Penelitian tersebut menggunakan metode Fast Decoupled dan objek Gardu Induk Tello, sedangkan penelitian ini menggunakan metode Distributed Slack Bus pada sistem IEEE 30 Bus.

9	Yusuf Muchamad (2024)	Analisis kontingensi sistem tenaga listrik IEEE 30 Bus	Kontingensi, over voltage, under voltage	Ditemukan gangguan over voltage dan under voltage, serta transformator dan generator dengan tingkat keparahan tinggi.	Penelitian tersebut sama-sama menggunakan IEEE 30 Bus, tetapi penelitian ini secara khusus menggunakan metode Distributed Slack Bus dan membatasi analisis pada kontingensi N-1 saluran transmisi dengan evaluasi tegangan minimum dan Performance Index.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi keandalan sistem tenaga 30 bus IEEE menggunakan metode aliran daya Distributed Slack Bus dalam menghadapi kondisi kontingensi, dengan beberapa perbedaan signifikan dibandingkan penelitian sebelumnya. Penelitian yang telah ada seperti yang dilakukan oleh Rahmad Syafri Utama (2018) dan Ahmad Mursali Arifin (2019) umumnya menggunakan metode aliran daya Fast Decoupled untuk analisis kontingensi pada sistem tenaga listrik dengan fokus pada jaringan 150 kV. Sebaliknya, penelitian ini fokus pada penerapan metode aliran daya Distributed Slack Bus pada jaringan 30 bus IEEE, yang menawarkan pendekatan iteratif yang

berbeda dalam menghitung distribusi tegangan dan arus pada setiap bus. Selain itu, penelitian sebelumnya oleh Eko Riskiyanto (2019) dan Yapnuarlyn Axel (2023) lebih menekankan pada indeks kinerja dan performa sistem tenaga pada kondisi beban yang berbeda. Dalam penelitian ini, selain menggunakan metode yang berbeda, juga dilakukan simulasi mendalam pada model jaringan 30 bus IEEE yang lebih kompleks untuk memahami pengaruh kondisi kontingensi terhadap kinerja sistem dan mengidentifikasi strategi mitigasi yang efektif. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang lebih luas dalam peningkatan keandalan dan respons sistem tenaga listrik dibandingkan penelitian sebelumnya.