

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

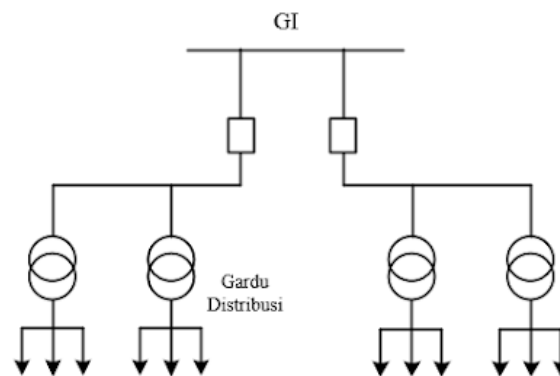
2.1 Sistem Jaringan Distribusi Radial

Jaringan distribusi radial adalah tipe jaringan yang paling sederhana dan paling umum digunakan di Indonesia. Sistem ini menghubungkan Gardu Induk langsung ke konsumen listrik dengan pola bercabang dari satu sumber utama, sehingga disebut sebagai jaringan distribusi radial. Struktur jaringan ini terdiri dari saluran utama (*trunk line*) dan saluran cabang (*lateral line*) (Saifi Sabiq, Ontoseno Penangsang, dan Rony Seto Wibowo, 2017).

Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah (Dr. Ramadoni Syahputra, 2021:130):

- a. Struktur jaringan ini cukup sederhana.
- b. Kualitas layanan listriknya cenderung kurang baik karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran cukup signifikan.
- c. Keberlangsungan pasokan listrik kurang dapat diandalkan karena hanya ada satu jalur antara sumber dan beban, sehingga jika terjadi gangguan pada saluran tersebut, wilayah di belakang titik gangguan akan mengalami pemadaman sampai masalah tersebut diperbaiki.

Sistem jaringan ini adalah model dasar yang paling sederhana dan paling umum diterapkan. Disebut radial karena saluran listrik ditarik memancar dari satu titik sumber utama dan kemudian dibagi ke beberapa titik beban yang dilayani, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Jaringan Distribusi Tipe Radial

Sumber: Reza Karnadi, Rudy Gianto, & Zainal Abidin (2018)

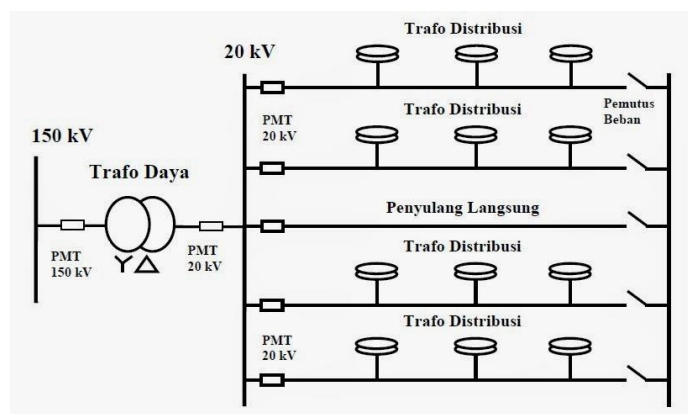
Untuk melokalisir gangguan pada bentuk radial ini berdasarkan spesifikasi diatas biasanya jaringan distribusi radial dilengkapi dengan peralatan pengaman, fungsinya untuk membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi.

2.2 *Express Feeder*

Selain bentuk-bentuk dasar dari jaringan distribusi yang telah ada seperti jaringan distribusi radial, *loop*, dan *grid* dikembangkan pula bentuk modifikasi dari jaringan distribusi lain, hal ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan dan kualitas sistem tenaga listrik. Salah satu jenis modifikasi yang banyak digunakan adalah jaringan distribusi model spindle. Jaringan spindle menggabungkan pola radial dan ring, biasanya terdiri dari maksimal enam penyulang yang sedang beroperasi dengan beban, serta satu penyulang yang berfungsi tanpa beban (*express feeder*).

Express feeder adalah penyulang cadangan yang dioperasikan tanpa beban dalam kondisi normal. Fungsinya adalah untuk menyediakan suplai alternatif saat terjadi gangguan pada salah penyulang utama "working feeder", selain itu, express feeder juga berperan dalam memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi normal yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Dalam keadaan normal memang "express feeder" ini sengaja dioperasikan tanpa beban (Yolnasdi, Fadhli Palaha, & Jefri Efendi, 2020).

Penerapan express feeder telah dibahas dalam beberapa penelitian sebelumnya. Misalnya, dalam studi yang dilakukan oleh Anugrah et al. (2020), pemasangan express feeder pada jaringan distribusi 20 kV di feeder sorek PT PLN (Persero) Rayon Pangkalan Kerinci berhasil mengurangi rugi-rugi daya hingga 1.407 kW, sehingga meningkatkan kualitas layanan penyaluran tenaga listrik pada feeder tersebut. Dengan adanya hal tersebut memberikan gambaran bahwa penerapan express feeder ini terbukti efektif dalam meningkatkan keandalan dan kualitas sistem distribusi listrik.

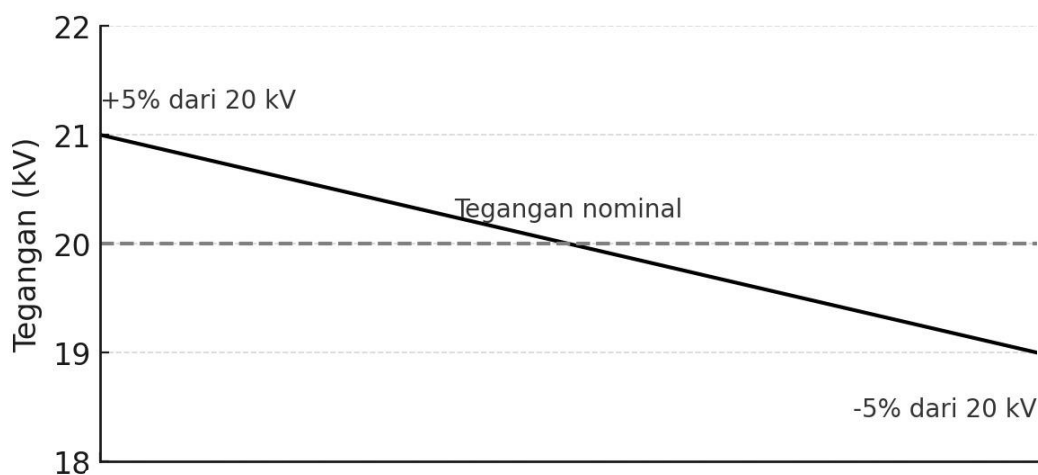


Gambar 2.2 Jaringan *Express Feeder*

Sumber: <https://tentanglistrikkita.blogspot.com/2014/05/sistem-tenaga-listrik-distribusi.html>

2.3 Jatuh Tegangan

Dalam proses penyaluran energi listrik dari sumber ke konsumen yang berjarak jauh, selalu terjadi beberapa jenis kerugian. Salah satu kerugian tersebut adalah penurunan tegangan atau rugi tegangan. Rugi tegangan merupakan selisih antara tegangan saat dikirim dan tegangan yang diterima, yang terjadi akibat adanya impedansi pada penghantar, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.3. Hal ini terjadi karena setiap saluran distribusi memiliki nilai hambatan, induktansi, dan kapasitansi. Pada saluran dengan panjang kurang dari 80 km, nilai kapasitansi sangat kecil sehingga bisa diabaikan. Namun, untuk saluran yang lebih panjang dan menggunakan tegangan tinggi (lebih dari 30 kV), pengaruh kapasitansi perlu diperhitungkan (Paulus Mangera & Damis Hardiantono, 2019).



Gambar 2.3 Toleransi Jatuh Tegangan

Sumber: <https://modalholong.wordpress.com/2012/12/21/tegangan-jatuh-drop-tegangan/>

Berdasarkan penjelasan diatas, persentase jatuh tegangan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\Delta V (\%) = \frac{\Delta V}{V} \times 100\% \quad (2.1)$$

dengan :

ΔV (%) = Rugi tegangan dalam % (V)

V = Tegangan kerja (V)

ΔV = Rugi tegangan (V)

$$\Delta V = V_s - V_r \quad (2.2)$$

dengan :

ΔV = *Drop* tegangan (V)

V_s = Tegangan kirim (V)

V_r = Tegangan terima (V)

Rumus yang digunakan untuk menghitung penurunan tegangan pada jaringan tiga fasa dengan tegangan menengah 20 kV adalah sebagai berikut:

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times L \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (2.3)$$

Dimana :

I = Arus beban (Ampere)

L = Panjang jaringan (km)

R = Resistansi rangkaian (Ohm)

θ = Sudut faktor daya beban

X = Reaktansi induktif rangkaian (Ohm)

Sedangkan rumus untuk menghitung *drop* tegangan pada jaringan tegangan menengah 20 kV 1 fasa, sebagai berikut:

$$\Delta V = I \times L \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (2.4)$$

Dimana :

I = Arus beban (Ampere)

L = Panjang jaringan (km)

R = Resistansi rangkaian (Ohm)

θ = Sudut faktor daya beban

X = Reaktansi induktif rangkaian (Ohm)

Berdasarkan SPLN 72: 1987 batas maksimum *drop* tegangan yang diijinkan adalah sebagai berikut:

- a. *Drop* tegangan pada jaringan tegangan menengah = 5%
- b. *Drop* tegangan pada trafo = 3%
- c. *Drop* tegangan pada jaringan tegangan rendah = 4%
- d. *Drop* tegangan pada saluran rumah = 1%

2.4 Aliran Daya

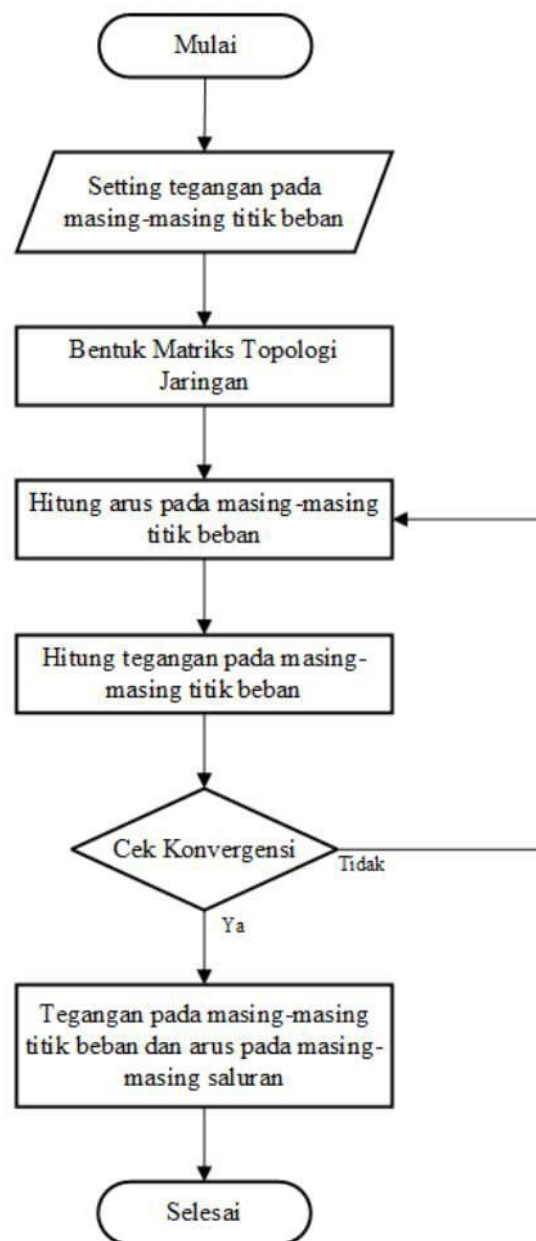
Studi aliran daya merupakan teknik penting dalam analisis sistem tenaga listrik. Studi ini merupakan penentuan untuk menentukan tegangan, arus, daya aktif, dan daya reaktif di berbagai titik jaringan listrik dalam kondisi operasi normal, baik yang sedang berlangsung maupun yang diproyeksikan di masa depan. Informasi ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem, menganalisis pembangkitan dan beban, serta merencanakan kondisi normal dan darurat (Ahmad Nizar, 2021). Tujuan dari analisis aliran daya meliputi beberapa hal, yaitu:

1. Menentukan besaran tegangan dan sudut fasa pada setiap bus dalam sistem.
2. Mengetahui nilai daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada masing-masing saluran dalam sistem.
3. Mengevaluasi kondisi peralatan untuk memastikan semuanya bekerja dalam batas yang diperbolehkan dalam penyaluran daya listrik.
4. Mendapatkan kondisi awal yang diperlukan dalam perencanaan sistem baru.
5. Menyediakan data awal yang menjadi dasar untuk studi lanjutan berikutnya.

Dalam implementasinya, berbagai metode dapat digunakan untuk menyelesaikan studi aliran daya. Pemilihan metode bergantung pada karakteristik jaringan listrik yang dianalisis, seperti struktur jaringan dan kompleksitas perhitungan. Salah satu metode yang sering digunakan, khususnya untuk jaringan distribusi radial adalah metode *Backward Forward Sweep* (BFS).

Metode *Backward Forward Sweep* merupakan salah satu metode untuk menghitung aliran daya. Metode ini diawali dengan identifikasi struktur jaringan, dilanjutkan dengan pencarian ujung-ujung pada setiap saluran melalui analisis hubungan antar bus dalam jaringan. Bus utama atau bus sumber kemudian ditemukan dengan melacak hubungan antar bus pada jaringan, sehingga urutan bus disusun mulai dari bus sumber hingga bus-bus ujung saluran (Sampeallo, Galla, & Rohi, 2021).

Backward sweep dimulai dari ujung terjauh jaringan. Pada tahap ini, arus beban di setiap titik beban dihitung. Arus beban ini diestimasikan berdasarkan asumsi atau hasil perhitungan tegangan dari iterasi sebelumnya. Karena arus beban diestimasikan, maka arus yang mengalir pada saluran juga dihitung berdasarkan asumsi atau hasil perhitungan tegangan dari iterasi sebelumnya yang dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Santoso, Sarjiya, & Hadi, 2017).



Gambar 2.4 *Flowchart Metode Backward Forward Sweep (BFS)*

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Selanjutnya untuk perhitungan arus beban dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Zakwansyah, Ira Devi Sara, & Rakhmad Syafutra Lubis, 2018):

$$I_{ldi} = \left[\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right] \quad (2.5)$$

Dimana :

I_{di} = Arus beban pada titik i

P_i = Daya aktif beban titik i

jQ_i = Daya reaktif beban titik i

V_i = Tegangan pada titik i

Proses ini akan menghasilkan nilai arus yang ada pada titik beban tertentu. Setelah mengetahui arus pada beban tersebut, selanjutnya mencari nilai arus yang mengalir pada setiap saluran distribusi, dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{i-1} = I_i + \sum_{l=i} I_l \quad (2.6)$$

Sehingga diperoleh arus mengalir pada setiap saluran distribusi, yang kemudian digunakan untuk perhitungan selanjutnya dalam langkah *forward sweep* untuk menghitung tegangan pada setiap titik beban.

Setelah menghitung nilai arus pada *backward sweep*, selanjutnya pada proses *forward sweep* dimulai dari titik sumber utama dengan memanfaatkan nilai tegangan, impedansi, dan arus pada setiap saluran yang sudah diketahui. Tegangan di setiap titik diperbaharui, dengan asumsi bahwa sumber lain untuk sementara diabaikan. Untuk menghitung tegangan pada titik i dapat dicari dengan persamaan berikut :

Sehingga tegangan pada setiap titik beban akan diperbaharui untuk memperhitungkan *drop* tegangan yang terjadi sepanjang saluran distribusi.

$$V_i = V_s - Z_i I_{li} \quad (2.7)$$

Dimana :

V_i = Tegangan pada titik i

V_s = Tegangan pada titik sumber

Z_i = Impedansi pada saluran i

I_{li} = Arus yang mengalir pada saluran i

Untuk memastikan hasil perhitungan tegangan pada setiap titik beban apakah sudah stabil setelah beberapa iterasi. Jika tegangan sudah stabil, maka proses iterasi bisa dihentikan. Proses konvergensi diperiksa dengan membandingkan perubahan tegangan antara dua iterasi berturut-turut menggunakan persamaan:

$$|V_i^k - V_i^{k-1}| \leq \epsilon \quad (2.8)$$

Dimana :

V_i^k = Tegangan di titik beban i pada iterasi ke- k

V_i^{k-1} = Tegangan di titik beban i pada iterasi sebelumnya

ϵ = Toleransi konvergensi (10^{-6} pu)

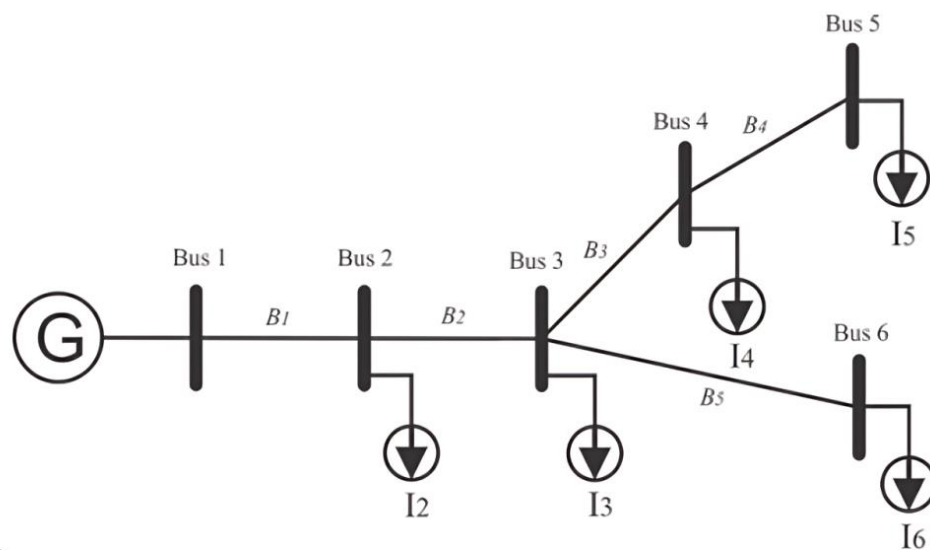
Jika nilai yang dihasilkan dari perhitungan menggunakan persamaan tersebut menghasilkan nilai yang besar dari toleransi ϵ , berarti sistem belum mencapai kondisi stabil sehingga iterasi harus dilanjutkan. Maka, perhitungan kembali ke tahap *backward sweep* untuk menghitung arus dan diteruskan ke *forward sweep* untuk memperbarui tegangan.

Jika perubahan tegangan sudah cukup kecil atau dalam batas toleransi, berarti nilai tegangan sudah tidak mengalami perubahan yang signifikan, sehingga iterasi dapat dihentikan. Maka sistem sudah mencapai kondisi konvergen.

Sebelum menerapkan metode *Forward Backward Sweep*, perlu dilakukan modifikasi pada perhitungan agar proses pembentukan persamaan dan iterasi

menjadi lebih mudah. Salah satu langkah yang dilakukan adalah dengan membentuk matriks BIBC (*Bus Injection to Branch Current*). Matriks BIBC ini menggambarkan hubungan antara arus dan saluran dalam sistem distribusi (Rizka Winda Novialifiah, Adi Soeprijanto, & Rony Seto Wibowo, 2014).

Contoh *single line diagram* yang digunakan untuk membentuk matriks dalam persamaan aliran daya dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 2.5 Contoh *Single Line Diagram*

Sumber: Rizka Winda Novialifiah, Adi Soeprijanto, & Rony Seto Wibowo (2014)

Dari Gambar 2.5 diatas persamaan untuk membentuk matriks BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) diperoleh dengan menerapkan hukum arus Kirchoff (*Kirchoff Current Law*). Hubungan antara arus cabang I dan bus atau saluran B dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_3 &= I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_4 &= I_5
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

$$B_5 = I_6$$

Setelah didapatkan persamaan diatas kemudian dibentuk matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Nilai 1 menunjukkan terdapat hubungan antara arus dan saluran dalam sistem distribusi, sedangkan nilai 0 menandakan tidak adanya hubungan tersebut. Matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut :

$$[B] = [BIBC][I] \quad (2.11)$$

Kemudian didapatkan persamaan untuk *drop* tegangan pada setiap bus adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \\ V_3 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \\ V_4 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \\ V_5 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \\ V_6 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_5 \cdot Z_{36} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dari persamaan diatas dapat dibentuk matrik BCBV (*Branch Current to Bus Voltage Matrix*) yang menyatakan bahwa ada hubungan antara tegangan bus dan arus saluran. Bentuk matrik BCBV (*Branch Current to Bus Voltage Matrix*) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Dan matrik BCBV (*Branch Current to Bus Voltage Matrix*) dapat di sederhanakan menjadi berikut:

$$[\Delta V] = [BCBV] \times [B] \quad (2.14)$$

Kemudian didapatkan persamaan untuk matrik ΔV . Persamaan yang didapat adalah sebagai berikut (Faraby et al., 2021):

$$[DLF] = [BCBV] \times [BIBC] \quad (2.15)$$

$$[\Delta V] = [DLF] \times [I_{injeksi}] \quad (2.16)$$

Pada persamaan 2.15 $[DLF]$ adalah matriks distribusi jatuh tegangan terhadap arus cabang yang diperoleh dari perkalian matriks $[BCBV]$ dan $[BIBC]$. Solusi aliran daya didapatkan dengan menggunakan proses iterasi, dapat ditulis sebagai berikut:

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF] \times [I^k] \quad (2.17)$$

Nilai tegangan tiap bus dapat dihitung setelah dilakukan pembentukan matrik ΔV dengan komponen matrik $BIBC$ dan $BCBV$, sehingga didapatkan nilai tegangan tiap bus dengan persamaan berikut:

$$[\Delta V^{k+1}] = [V^0] \times [\Delta V^{k+1}] \quad (2.18)$$

Dimana $[V^0]$ merupakan nilai inisiasi tegangan bus. Proses iterasi dilakukan hingga perbedaan arus injeksi antar iterasi kurang dari atau sama dengan toleransi yang ditentukan ε .

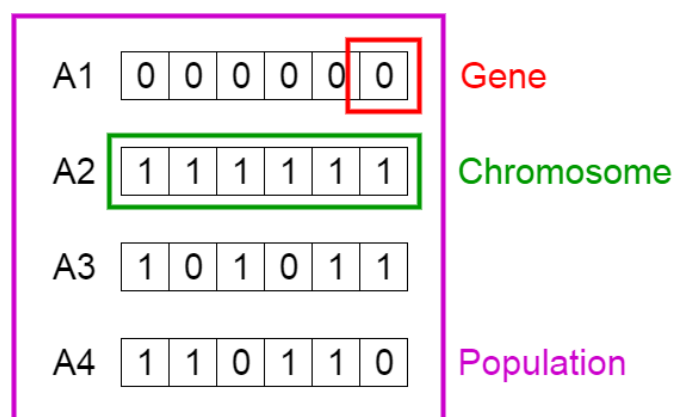
$$[I_i^{k+1} - I_i^k] \leq \varepsilon \quad (2.19)$$

2.5 Algoritma Genetika

Algoritma genetika adalah metode optimisasi berbasis prinsip evolusi biologi yang mencari solusi secara simultan pada banyak titik dalam *ruang* pencarian (Zulfahri, Abrar Tanjung, & Monice, 2020). Tujuannya adalah menentukan *fitness value* dari individu dalam suatu populasi melalui proses iteratif antar generasi. Setiap generasi menghasilkan keturunan yang lebih baik dari *parent* sebelumnya dan individu terbaik dipilih kembali sebagai *parent* untuk keturunan selanjutnya hingga diperoleh *fitness value* optimal. Adapun tahapan algoritma genetika, yaitu sebagai berikut (Gia Muhammad, 2018).

1. Inisialisasi Populasi

Proses diawali dengan inisialisasi sejumlah individu yang disebut populasi. Setiap individu mewakili sebuah solusi atau nilai fitness yang ingin dicari. Individu tersebut tersusun dari kumpulan gen, yang juga dikenal sebagai kromosom. Dalam algoritma genetika, kumpulan gen ini biasanya direpresentasikan dalam bentuk kode biner, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Gen Kromosom dan Populasi

Sumber: Gia Muhammad, 2018

2. *Fitness Function*

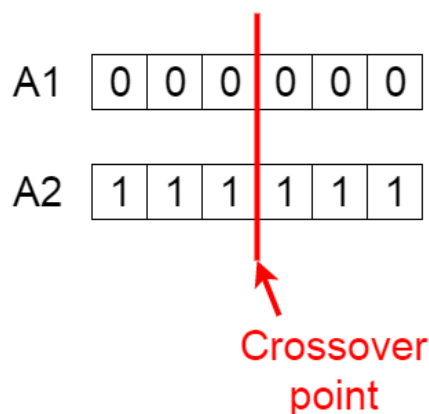
Fungsi fitness berperan dalam mengukur tingkat kecocokan nilai dari setiap individu. Fungsi ini menghasilkan skor atau nilai fitness yang digunakan untuk mengevaluasi setiap individu.

3. *Selection*

Pada tahap ini, individu dengan nilai *fitness* tertinggi dipilih untuk menjadi induk pada generasi selanjutnya. Salah satu teknik yang paling umum digunakan dalam proses ini adalah metode *roulette*.

4. *Crossover*

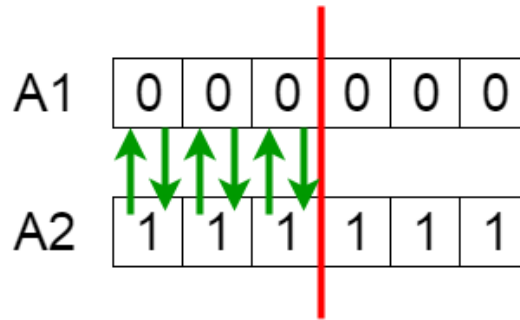
Tahap ini merupakan bagian terpenting dalam algoritma genetika, di mana setiap pasangan individu yang telah dipilih sebagai induk kemudian dikawinkan untuk menghasilkan individu baru. Proses persilangan dilakukan dengan menetapkan titik *crossover* secara acak pada kromosom. Contohnya dapat dilihat pada Gambar 2.7 dan 2.8.



Gambar 2.7 *Crossover Point*

Sumber: Gia Muhammad, 2018

Keturunan terbentuk dengan cara menukar gen antara kedua induk hingga mencapai titik *crossover* yang ditentukan.

Gambar 2.8 Penukaran Gen Antara *Parent*

Sumber: Gia Muhammad, 2018

Setelah proses pertukaran selesai, keturunan baru tersebut kemudian dimasukkan ke dalam populasi.

5. *Mutation*

Setelah keturunan baru dibuat, beberapa gen pada setiap individu dilakukan mutasi dengan *probability* tertentu, biasanya dengan probabilitas yang rendah. Mutasi dilakukan untuk mengendalikan keberagaman dalam populasi dan mencegah konvergensi yang terlalu dini yang dapat dilihat pada Gambar 2.9.

Before Mutation

A5

1	1	1	0	0	0
---	---	---	---	---	---

After Mutation

A5

1	1	0	1	1	0
---	---	---	---	---	---

Gambar 2.9 Sebelum dan Sesudah Mutasi

Sumber: Gia Muhammad, 2018

6. Elitisme

Karena proses seleksi bersifat acak, tidak ada kepastian bahwa individu dengan nilai *fitness* tertinggi selalu terpilih. Untuk memastikan individu unggul tersebut tetap bertahan sepanjang proses evolusi, salinan satu atau

beberapa individu terbaik dibuat. Proses ini dikenal dengan istilah elitisme (Hadha Alamajibuwono, Tedjo Sukmadi, & Susatyo Handoko, 2020).

7. Penggantian Populasi

Dalam algoritma genetika terdapat skema penggantian populasi yang disebut *generational replacement*, di mana seluruh individu dalam suatu generasi (misalnya N individu) digantikan secara bersamaan oleh N individu baru yang diperoleh melalui proses persilangan dan mutasi (Hadha Alamajibuwono, Tedjo Sukmadi, & Susatyo Handoko, 2020).

2.6 *Software Matlab (Matrix Laboratory)*

Matlab adalah bahasa pemrograman berperforma tinggi yang dirancang khusus untuk menyelesaikan masalah teknik. Matlab menggabungkan kemampuan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam satu platform yang sangat user-friendly, sehingga masalah dan solusinya dapat diungkapkan menggunakan notasi matematika yang umum dan mudah dipahami.

Matlab juga merupakan perangkat lunak yang menggunakan dasar matriks dalam pemanfaatannya. Matriks yang digunakan pada matlab terbilang sederhana sehingga dengan mudah dapat digunakan. Kegunaan matlab secara umum yaitu untuk (Atina, 2019):

- a) Matematika dan komputasi
- b) Pengembangan dan algoritma
- c) Permodelan, simulasi, dan pembuatan *prototype*
- d) Analisa data, eksplorasi, dan visualisasi
- e) Pembuatan aplikasi termasuk pembuatan GUI (*Graphical User Interface*)

Di lingkungan perguruan tinggi teknik, Matlab digunakan sebagai perangkat standar untuk pengenalan dan pengembangan materi matematika, rekayasa, serta ilmu pengetahuan. Sementara itu, di dunia industri, Matlab menjadi pilihan utama untuk penelitian yang produktif, pengembangan, dan analisis. Berbagai fitur tambahan Matlab dikenal sebagai *toolbox* telah banyak dikembangkan untuk mendukung fungsinya.

Toolbox sangat penting bagi pengguna Matlab karena membantu dalam mempelajari dan menerapkan teknologi yang sedang dipelajari. *Toolbox* ini merupakan kumpulan fungsi Matlab (M-files) yang dikembangkan khusus untuk lingkungan kerja Matlab guna menyelesaikan masalah pada bidang tertentu. Saat ini, *toolbox* sudah tersedia untuk berbagai bidang seperti pengolahan sinyal, sistem kontrol, jaringan saraf tiruan, logika fuzzy, wavelet, dan lainnya.

Tujuan penggunaan aplikasi matlab adalah untuk memudahkan dalam perhitungan SAIDI dan SAIFI, selain itu matlab juga dapat digunakan untuk menampilkan suatu data dalam bentuk grafik (Adri Senen, Titi Ratnasari, & Dwi Anggaini, 2019).

2.7 Software ETAP (*Exercise-Related Transient Abdominal Pain*)

ETAP (*Electrical Transient Analysis Program*) adalah perangkat lunak yang digunakan untuk sistem tenaga listrik. *Software* ini dapat dijalankan secara *offline* untuk simulasi tenaga listrik, secara online untuk pengelolaan data *real-time*, maupun untuk pengendalian sistem secara langsung. Berbagai fitur yang dimilikinya mencakup analisis pembangkit listrik, sistem transmisi, serta sistem distribusi tenaga listrik.

Beberapa jenis analisis tenaga listrik yang dapat dilakukan menggunakan ETAP meliputi:

- a. Analisis aliran daya
- b. Analisis hubung singkat
- c. Analisis *arc-flash*
- d. Analisis kestabilan *transient*

Dalam analisis tenaga listrik, diagram saluran tunggal (*single line diagram*) digunakan sebagai representasi sederhana dari sistem tenaga listrik tiga fasa. Diagram ini menggantikan penggunaan tiga saluran fasa yang terpisah dengan satu konduktor, sehingga memudahkan pembacaan dan analisis rangkaian. Berbagai elemen listrik seperti pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, bus bar, dan konduktor lain digambarkan dengan simbol-simbol standar yang telah ditetapkan untuk diagram saluran tunggal. Simbol-simbol tersebut tidak mencerminkan ukuran fisik atau posisi sebenarnya dari perangkat listrik, melainkan merupakan konvensi umum yang disusun dari kiri ke kanan dan atas ke bawah sesuai dengan urutan saklar atau peralatan lainnya.

ETAP menggunakan dua standar utama dalam analisis kelistrikan, yaitu ANSI dan IEC. Perbedaan utama antara kedua standar ini terletak pada frekuensi yang digunakan, yang mempengaruhi spesifikasi peralatan yang sesuai. Oleh karena itu, simbol elemen listrik yang dipakai dalam analisis dengan ETAP juga berbeda sesuai standar yang diterapkan.

Beberapa komponen yang biasanya terdapat dalam diagram saluran tunggal antara lain:

- a. Generator

Mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik.

b. Transformator

Alat yang digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai dengan rasio yang dibutuhkan dalam sistem tenaga listrik.

c. Pemutus Rangkaian

Saklar otomatis yang berfungsi melindungi rangkaian listrik dari kerusakan akibat kelebihan beban atau hubungan singkat.

d. Beban

Di ETAP, beban terbagi menjadi dua jenis, yaitu beban statis dan beban dinamis.

2.8 Penelitian Terkait

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

No	Identitas Penelitian	Judul	Permasalahan	Hasil
1.	Nurhaliza Saputri, Bakhtiar, & Andarini Asri. (2022)	Perancangan Pemasangan <i>Express Feeder</i> untuk Perbaikan Profil Tegangan pada Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Gardu Hubung Sungguminasa (GHSM) PT. PLN (Persero) ULP Sungguminasa	Salah satu faktor yang menyebabkan penurunan profil tegangan pada penyulang GHSM adalah panjang saluran. Berdasarkan hasil simulasi aliran daya menggunakan <i>Electrical Transient Analysis Program</i> (ETAP) versi 12.6.0, tegangan terendah diterima pada bus percabangan B078, yaitu sebesar 18,99 kV. Kondisi ini menunjukkan adanya <i>under voltage</i> dan masuk dalam kategori kritis karena penurunan tegangan mencapai 5,202%, yang melampaui batas standar sebesar 5%.	Dengan penambahan <i>express feeder</i> , beban pada penyulang GHSM kini menerima suplai dari dua sumber, yaitu jaringan eksisting dan jaringan baru dari <i>express feeder</i> . Hasil simulasi setelah pemasangan <i>express feeder</i> menunjukkan bahwa tegangan pada bus percabangan berada dalam kondisi stabil. Tegangan yang diterima di bus B078 mencapai 19,628 kV dengan penurunan tegangan sebesar 2,04%. Hal ini menunjukkan bahwa profil tegangan pada penyulang Gardu Hubung Sungguminasa (GHSM) mengalami perbaikan dan telah memenuhi standar SPLN 72 : 1987.
2.	Andri Van Anugrah, Hamzah Eteruddin, & Arlenny. (2020)	Studi Pemasangan <i>Express Feeder</i> Jaringan Distribusi 20 kV untuk Mengatasi <i>Drop Tegangan</i> pada <i>Feeder</i> Sorek PT PLN (Persero) Rayon Pangkalan	<i>Feeder</i> Sorek menerapkan sistem distribusi radial, di mana pasokan listrik hanya berasal dari satu sumber, yaitu Gardu Hubung Kerinci, tanpa adanya sumber alternatif di sekitar <i>feeder</i> tersebut. Panjang saluran yang cukup signifikan menyebabkan terjadinya penurunan tegangan dan rugi-rugi	Pemasangan <i>Express Feeder</i> sepanjang 46 km dari Gardu Hubung (GH) Kerinci hingga GH Sorek menyebabkan peningkatan tegangan pada seluruh transformator di jaringan tersebut. Salah satunya, transformator BM 006 yang terletak di ujung saluran, menunjukkan peningkatan tegangan hingga 17,155 kV. Selain itu, rugi-rugi daya pada sistem PLN berhasil dikurangi sebesar 1.407 kW, yang

No	Identitas Penelitian	Judul	Permasalahan	Hasil
		Kerinci	daya yang besar. Tegangan terendah di ujung saluran tercatat sebesar 11,5 kV, yang berarti telah melebihi batas toleransi penurunan tegangan sebesar 10% dari 18 kV sesuai standar.	secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan kualitas pelayanan distribusi listrik pada feeder Sorek.
3.	Fauzi, Subhan, & Muliadi. (2023)	Analisis Tingkat Keandalan pada Jaringan <i>Express Feeder</i> SUTM A3CS sebagai <i>Incoming</i> Baru	Sistem kelistrikan di ULP Panton Labu saat ini mendapatkan pasokan dari Gardu Induk (GI) Panton Labu yang dilengkapi dengan dua transformator daya (TD), masing-masing berkapasitas 30 MVA. Beban puncak yang tercatat di GI Panton Labu adalah 14,5 MW untuk TD 1 dan 6,5 MW untuk TD 2. Salah satu jalur distribusi dari GI ini adalah ke Gardu Hubung (GH) Panton Labu melalui penyulang PL 05. Namun, sebelumnya GH Panton Labu hanya menerima satu jalur masuk (<i>incoming</i>), meskipun pada TD 2 GI Panton Labu masih tersedia tiga kubikel cadangan yang belum digunakan. Selain itu, GH Panton Labu sendiri telah dilengkapi dengan couple bus dan satu kubikel cadangan. Kondisi ini disebabkan oleh belum tersedianya	Sebagai hasilnya, kualitas tegangan di GH Panton Labu yang sebelumnya berada pada 20,4 kV mengalami peningkatan menjadi 20,7 kV. Penambahan <i>incoming</i> baru melalui rekonfigurasi <i>express feeder</i> SUTM 3x240 mm ² mampu menurunkan durasi gangguan listrik, ditandai dengan penurunan nilai rata-rata indeks keandalan SAIDI di ULP Panton Labu, dari 12,558 menit per pelanggan menjadi 6,205 menit per pelanggan.

No	Identitas Penelitian	Judul	Permasalahan	Hasil
			jaringan <i>express feeder</i> dari GI Pantan Labu menuju GH Pantan Labu, sehingga apabila terjadi gangguan pada suplai utama dari penyulang PL 05, seluruh kubikel di GH Pantan Labu akan mengalami pemadaman.	
4.	Dr. Ir. Satriani Said Akhmad, M.T., Hanifa Fauziah, & Muhammad Fahreza Ali. (2023)	Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20 kV untuk Mengurangi <i>Drop Voltage</i> pada Penyulang Asuhan GI Daya	Salah satu kendala umum dalam sistem distribusi listrik adalah penurunan tegangan (<i>drop voltage</i>), yang salah satunya disebabkan oleh jarak saluran (dalam kilometer) yang terlalu panjang. Untuk mengatasi hal ini, panjang saluran dapat dioptimalkan melalui proses rekonfigurasi jaringan. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan penurunan tegangan pada penyulang yang berada di bawah pengelolaan Gardu Induk Daya (GI Daya), menyusul tidak berfungsinya GI Daya. Upaya perbaikan dilakukan dengan memanfaatkan simulasi aliran daya menggunakan perangkat lunak ETAP.	Setelah dilakukan perubahan konfigurasi pada jaringan, enam bus yang sebelumnya mengalami kondisi tegangan rendah berhasil ditingkatkan ke level tegangan yang sesuai standar. Tegangan terendah yang awalnya sebesar 18,952 kV dengan penurunan sebesar 5,24% berhasil dinaikkan menjadi 19,821 kV, di mana persentase penurunan tegangan turun menjadi 0,895%. Peningkatan ini dicapai melalui penambahan <i>express feeder</i> sebagai jalur suplai baru (<i>incoming</i>) pada GH Daya.
5.	Fery Zen, Asmar, &	Analisis Keandalan Sistem Distribusi	Hasil perhitungan dan simulasi pada penyulang Jambi dalam kondisi saat	Berdasarkan hasil simulasi, skenario kedua menunjukkan hasil terbaik dalam upaya

No	Identitas Penelitian	Judul	Permasalahan	Hasil
	Muhammad Jumnahdi. (2020)	pada Penyulang Jambi Di PLN UP3 Belitung	ini menunjukkan nilai SAIFI sebesar 21,1873 kali per tahun dan SAIDI sebesar 67,0849 jam per tahun. Angka-angka ini menunjukkan bahwa tingkat keandalan penyulang Jambi masih berada di atas ambang batas yang ditetapkan dalam standar SPLN No. 59 Tahun 1985, yaitu SAIFI maksimum 3,21 kali per tahun dan SAIDI maksimum 21,094 jam per tahun.	meningkatkan keandalan penyulang Jambi, dengan nilai SAIFI sebesar 7,1427 kali per tahun dan SAIDI sebesar 22,6123 jam per tahun, meskipun nilai tersebut masih belum memenuhi standar yang ditetapkan dalam SPLN No. 59 tahun 1985.
Berdasarkan sumber referensi diatas berikut beberapa pembaharuan dari penelitian ini yaitu : 1. Tempat yang menjadi objek penelitian yaitu di penyulang CLDG, karena untuk lokasi ini untuk belum ada penelitian yang melakukan perbaikan profil tegangan menggunakan metode penambahan <i>express feeder</i>. 2. Dalam menentukan titik optimal <i>express feeder</i> dilakukan menggunakan <i>software</i> MATLAB R2021a dan divalidasi menggunakan <i>software</i> ETAP 19.0.1 untuk melihat <i>load flow</i> setelah penyambungan <i>express feeder</i> pada penyulang CLDG. 3. Penerapan metode algoritma genetika pada penelitian ini untuk menentukan lokasi yang optimal dalam pemasangan <i>express feeder</i> pada penyulang CLDG.				

Sumber: Data diolah penulis, 2025