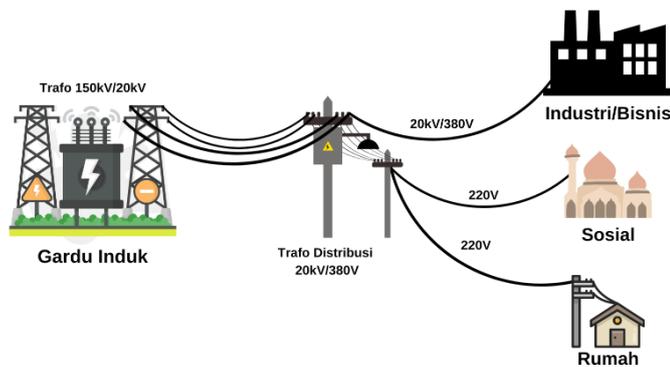


BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Jaringan Distribusi Listrik

Sistem distribusi listrik merupakan sistem penyaluran energi listrik dari Gardu Induk (GI) menuju ke konsumen akhir dengan kualitas yang optimal dan sesuai standar (Fauzi et al., 2023). Jaringan distribusi berfungsi sebagai sistem untuk mendistribusikan energi listrik ke konsumen sesuai dengan daya dan tegangan yang dibutuhkan. Oleh karena itu, jaringan distribusi memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin penyediaan tenaga listrik yang bermutu dan andal bagi berbagai golongan konsumen, yaitu rumah tangga, industri, dan komersial.



Gambar 2.1 Sistem Jaringan Distribusi

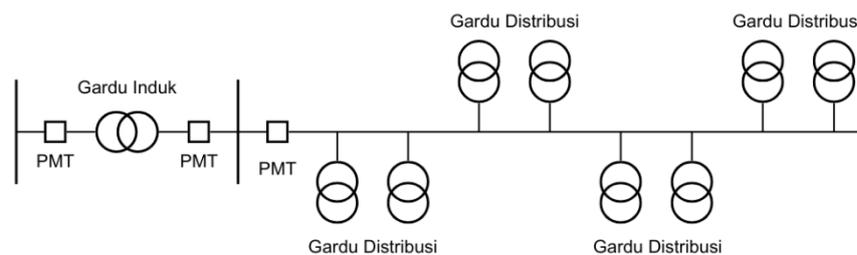
Dalam sistem tenaga listrik, jaringan distribusi berdasarkan level tegangannya terbagi menjadi dua, yaitu jaringan distribusi primer atau jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan distribusi sekunder atau jaringan tegangan rendah (JTR). Jaringan distribusi primer dan sekunder memiliki fungsi utama yang sama yaitu untuk menyalurkan energi listrik. Namun, pada jaringan distribusi primer berfungsi sebagai penghubung antara gardu induk dengan gardu distribusi

yang beroperasi pada tegangan menengah 20 kV. Sedangkan, jaringan distribusi sekunder berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi ke konsumen akhir yang beroperasi pada tegangan rendah 380/220 volt (Muhtar et al., 2021).

Menurut (Suardika et al., 2018) jaringan distribusi dapat diklasifikasikan berdasarkan topologi atau struktur jaringan yaitu meliputi jaringan radial, *loop*, dan *spindle*.

2.1.1 Sistem Jaringan Radial

Sistem jaringan radial merupakan konfigurasi jaringan untuk menyalurkan energi listrik yang memiliki saluran utama dari satu titik sumber menuju beberapa cabang-cabang kecil beban. Jaringan ini merupakan sistem yang umum digunakan karena efisiensi konfigurasi jaringannya yang terbentang dari satu titik sumber.

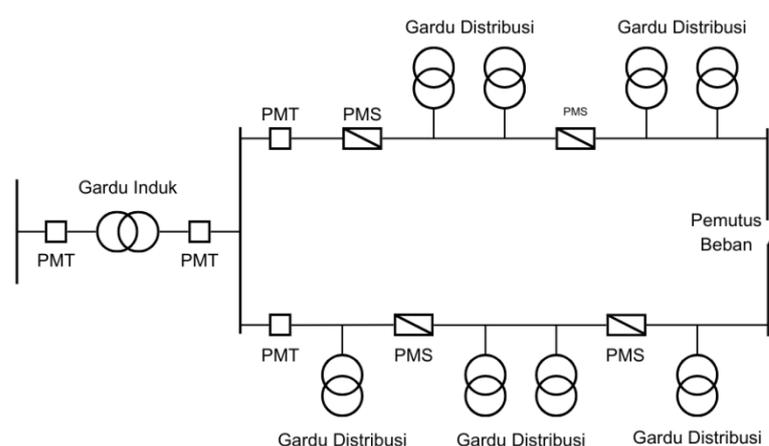


Gambar 2.2 Sistem Jaringan Distribusi Radial

Pada sistem ini dikarenakan berbentuk radial yang terdiri dari satu saluran utama dari titik sumber, sehingga semakin jauhnya saluran dari titik sumber maka akan terdapat perbedaan kualitas daya maupun tegangan. Hal ini terjadi karena terjadinya jatuh tegangan di sepanjang saluran distribusi sebelum mencapai titik saluran paling ujung. Sehingga jaringan radial ini memiliki kelemahan dalam kualitas penyaluran energi listrik.

2.1.2 Sistem Jaringan *Loop*

Sistem jaringan *loop* merupakan konfigurasi jaringan untuk menyalurkan energi listrik yang dirancang dengan saling menghubungkan beberapa saluran distribusi yang berbentuk seperti cincin (Ulahayanan et al., 2019). Penyaluran energi listrik pada sistem ini dapat mengalir dari beberapa arah, sehingga memiliki tingkat keandalan kualitas penyaluran energi listrik yang lebih baik.



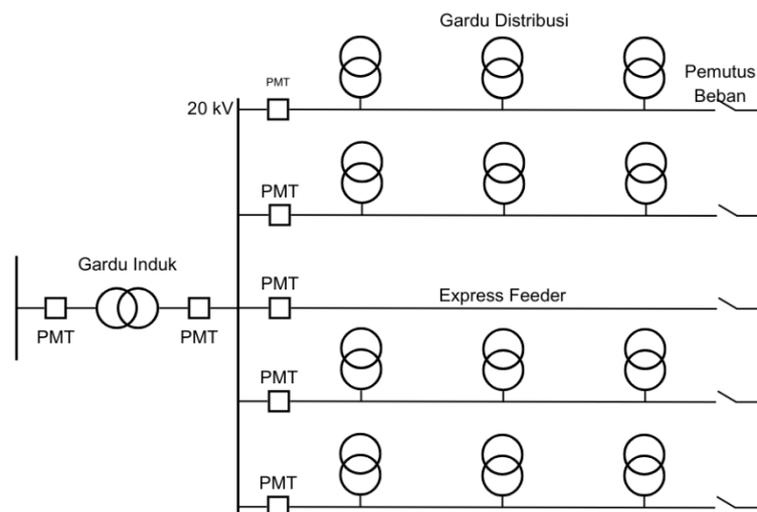
Gambar 2.3 Sistem Jaringan Distribusi *Loop*

Jaringan *loop* ini mempunyai sistem yang saling terhubung, apabila terjadi gangguan pada salah satu saluran, maka penyaluran tenaga listrik kepada konsumen tidak akan terputus karena menggunakan saluran yang lain untuk penyaluran tenaga listriknya.

2.1.3 Sistem Jaringan *Spindle*

Sistem jaringan *spindle* merupakan konfigurasi jaringan yang menggabungkan beberapa saluran tenaga listrik dalam keadaan beroperasi dengan beban (*working feeder*) dan saluran yang beroperasi tanpa beban (*express feeder*)

(Fitriyono et al., 2023). Sistem ini memiliki fungsi sebagai upaya untuk meminimalkan *drop* tegangan yang terjadi pada sistem distribusi.



Gambar 2.4 Sistem Jaringan Distribusi *Spindle*

Jaringan *spindle* terdiri dari saluran tenaga listrik yang beroperasi dengan beban dan saluran *stand by* yang berfungsi sebagai saluran alternatif atau yang sering disebut dengan *express feeder*. *Express feeder* ini berfungsi untuk mengurangi jarak dan beban yang terhubung, sehingga dari gardu induk langsung terhubung ke titik beban agar dapat menekan terjadinya masalah *drop* tegangan pada sistem distribusi.

2.2 Drop Tegangan pada Jaringan Distribusi

Drop tegangan atau jatuh tegangan adalah suatu kondisi hilangnya tegangan pada sistem distribusi listrik akibat adanya impedansi penghantar, beban, dan panjangnya saluran distribusi. Sehingga tegangan yang dikirim pada sisi primer tidak sama dengan tegangan yang diterima pada sisi sekunder. Pada umumnya jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik berbanding lurus dengan panjang saluran dan

beban namun berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar (Shodar, 2023).

Panjang saluran dan besarnya arus yang mengalir pada jaringan distribusi menjadi pengaruh terjadinya *drop* tegangan. Nilai *drop* tegangan diperoleh dari hasil kali arus yang mengalir dengan nilai impedansi jaringan. Hal ini disebabkan oleh resistansi dan reaktansi penghantar akan memberikan hambatan terhadap aliran arus listrik. Oleh karena itu. Apabila semakin panjang jaringan dan arus yang mengalir semakin besar, nilai *drop* tegangan-pun semakin besar. Selain itu, dengan meningkatnya jumlah beban yang terpasang pada jaringan distribusi pun menjadi faktor penyebab meningkatnya nilai *drop* tegangan tersebut.

Dampak dari *drop* tegangan yang terjadi sehingga menurunkan kualitas tegangan menjadi penyebab kerusakan atau tidak berfungsinya peralatan listrik dengan baik. Oleh karena itu, terdapat standar toleransi *drop* tegangan yang diperbolehkan. Menurut (PT. PLN (Persero), 1987) dalam SPLN 72:1987 telah menetapkan nilai *drop* tegangan maksimum yang diperbolehkan pada jaringan tegangan menengah adalah 5% dari tegangan nominal yang ditetapkan. Untuk mengetahui nilai *drop* tegangan pada jaringan distribusi, diperlukan proses perhitungan yang mempertimbangkan daya semu, arus beban, panjang saluran, serta karakteristik penghantar. Berikut adalah tahapan dalam mencari nilai *drop* tegangan pada sistem distribusi.

Arus beban dihitung berdasarkan daya semu yang diberikan dengan persamaan berikut:

- Untuk sistem 3 fasa

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (2.1)$$

- Untuk sistem 1 fasa

$$I = \frac{S}{V} \quad (2.2)$$

Dimana:

I = Arus beban (A)

S = Daya semu (kVA)

V = Tegangan sistem (kV)

Setelah arus beban diperoleh menggunakan persamaan (2.1) atau (2.2), nilai *drop* tegangan dapat dihitung dengan persamaan:

- Untuk jaringan 3 fasa

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

- Untuk jaringan 1 fasa

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

Dimana:

ΔV = *Drop* tegangan (V)

I = Arus beban (A)

R = Resistansi saluran total (ohm/km)

θ = Sudut faktor daya

X = Reaktansi saluran total (ohm/km)

Setelah diketahui nilai *drop* tegangan yang dihitung menggunakan persamaan (2.3) atau (2.4), persentase *drop* tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta V = |V_s - V_r| \quad (2.5)$$

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V_s} \times 100 \quad (2.6)$$

Dimana:

ΔV = *Drop* tegangan (kV)

$\% \Delta V$ = *Drop* tegangan (%)

V_s = Tegangan bus sumber (kV)

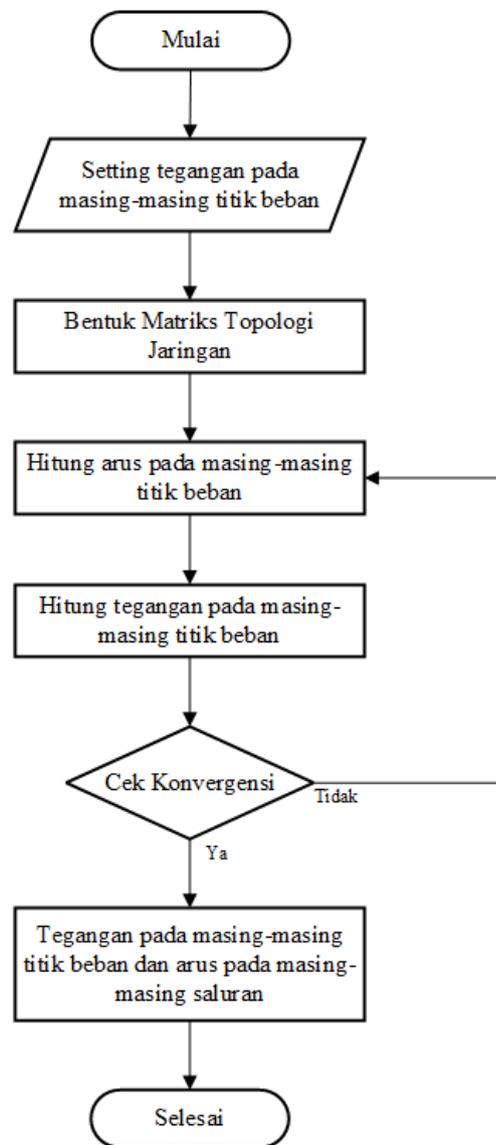
V_r = Tegangan bus terima (kV)

2.3 Aliran Daya Backward Forward Sweep (BFS)

Studi aliran daya merupakan suatu studi untuk menganalisis aliran daya pada suatu sistem jaringan listrik dalam menentukan parameter-parameter, seperti arus, tegangan, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya pada kondisi operasi normal (Hasibuan et al., 2020). Secara umum fungsi dari aliran daya untuk perhitungan atau memberikan gambaran baik dalam proses perencanaan, pengembangan, dan perbaikan pada sistem distribusi tenaga listrik untuk memastikan bahwa suatu sistem beroperasi secara optimal. Adapun beberapa metode yang bisa digunakan dalam studi aliran daya, seperti *newton raphon*, *gauss seidel*, *fast decoupled*, dan *backward-forward sweep*.

Menurut (Faraby et al., 2021) bahwa analisis aliran daya menggunakan metode *Backward Forward Sweep* (BFS) memiliki tingkat akurasi yang baik untuk mendapatkan parameter-parameter sistem tenaga listrik pada saluran distribusi.

Metode *backward-forward sweep* merupakan sebuah konsep dasar untuk melakukan pendekatan terhadap permasalahan yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Berikut merupakan tahapan yang dilakukan untuk melakukan perhitungan metode aliran daya *backward-forward sweep*.



Gambar 2.5 Diagram Alir *Backward Forward Sweep*

Dalam proses perhitungan aliran daya menggunakan metode *Backward-Forward Sweep* terdapat tahapan-tahapan yang harus dilakukan untuk dapat menemukan hasil yang optimal. Tegangan awal pada sumber yaitu di gardu induk

SUTET Tasikmalaya diatur sebagai referensi utama untuk perhitungan aliran daya. *Setting* tegangan pada nilai nominal 20 kV atau 1.0 p.u karena berada pada sistem jaringan distribusi 20 kV. Tegangan di awal titik-titik beban juga diasumsikan untuk memulai iterasi aliran daya.

Dalam menyelesaikan persamaan aliran daya, terdapat dua matriks yang digunakan pada metode *backward-forward sweep* yaitu matriks BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) dan BCBV (*Branch Current to Bus Voltage*). Matriks BIBC merupakan matriks yang memberikan hubungan antara arus injeksi pada bus dengan arus yang mengalir di cabang. Sedangkan, matriks BCBV merupakan matriks yang memberikan hubungan antara arus cabang dengan tegangan pada bus yang.

Pada metode *backward-forward sweep* berlaku prinsip hukum *kirchoff* untuk menghitung arus dan tegangan yang mengalir pada saluran distribusi. Menurut (Santoso, 2017) bahwa pada *backward sweep*, tegangan pada awal iterasi diasumsikan bernilai sama dengan tegangan sumber-sumber. Jika jaringan memiliki lebih dari satu sumber utama, maka pada iterasi awal, nilai arus injeksi kompensasi pada sumber-sumber tersebut dianggap nol. Selanjutnya, tegangan di setiap titik serta arus injeksi kompensasi dihitung berdasarkan hasil iterasi sebelumnya. Langkah ini bertujuan untuk menghitung arus yang mengalir pada setiap titik beban, dimulai dari titik beban terjauh dan bergerak secara mundur (*backward*) menuju sumber daya, yaitu gardu induk. Proses ini menghitung bagaimana daya (daya semu) yang diterima oleh titik beban akan menghasilkan arus yang mengalir di jaringan, untuk menghitung arus beban dapat menggunakan persamaan berikut:

$$I_i = \left(\frac{P_i + Q_i}{V_i} \right)^* \quad (2.7)$$

Dimana:

I_i = Arus pada titik beban i

P_i = Daya aktif pada titik beban i

Q_i = Daya reaktif pada titik beban i

V_i = Tegangan pada titik beban 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:

$$I_{i-1} = I_i + \sum_{l=i} I_l \quad (2.8)$$

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.

$$V_i = V_s - Z_i I_{li} \quad (2.9)$$

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:

$$|V_i^k - V_i^{k-1}| \leq \epsilon \quad (2.10)$$

Dimana:

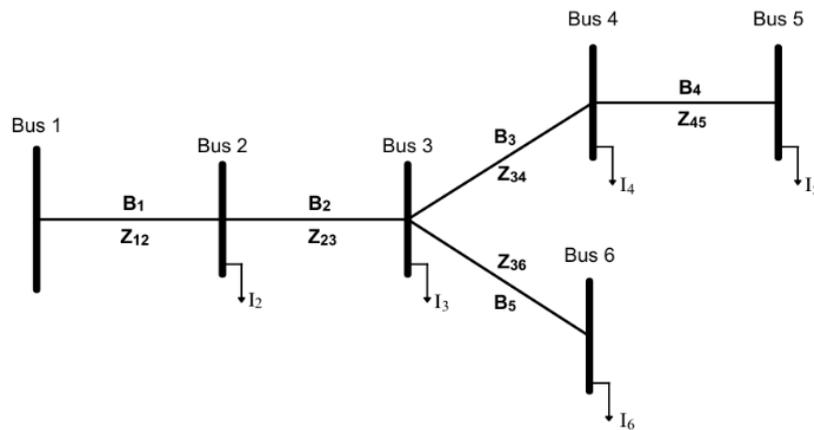
V_i^k = Tegangan di titik beban i pada iterasi ke- k

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.



Gambar 2.6 Sampel pada Jaringan Distribusi Radial

Pada Gambar 2.6 merupakan sampel jaringan distribusi yang akan di analisa menggunakan metode *backward-forward sweep*. Sehingga persamaan arus yang diinjeksi di setiap bus adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_3 &= I_4 + I_5 \\
 B_4 &= I_5 \\
 B_5 &= I_6
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Apabila saluran cabang memiliki arah yang berlawanan dengan bus referensi, maka bernilai -1. Dengan demikian, hubungan antara arus injeksi dan arus cabang dapat dinyatakan dalam bentuk matriks K berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Untuk menyatakan hubungan antara arus injeksi bus dan arus cabang yaitu menggunakan matriks BIBC, sehingga dapat dinyatakan sebagai matriks berikut:

$$[BIBC] = -[\text{Matriks } K] \quad (2.13)$$

Dengan demikian, persamaan hubungan antara arus injeksi pada cabang, sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Sehingga persamaan arus cabang dapat disusun dengan bentuk umum sebagai berikut:

$$[B] = [BIBC][I] \quad (2.15)$$

Sehingga bentuk matriks pada persamaan (2.12) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Persamaan hubungan antara arus cabang dengan tegangan bus, dapat dinyatakan dalam bentuk matriks BCBV sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &= B_1 \cdot Z_{12} \\ V_1 - V_3 &= B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} \\ V_1 - V_4 &= B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_3 \cdot Z_{34} \\ V_1 - V_5 &= B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_3 \cdot Z_{34} + B_4 \cdot Z_{45} \\ V_1 - V_6 &= B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_5 \cdot Z_{56} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Kemudian distribusikan persamaan di atas, maka didapatkan nilai tegangan pada setiap bus, dapat dinyatakan dalam matriks berikut:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Sehingga persamaan (2.18) menyatakan jatuh tegangan dari bus sumber ke bus beban yang di sederhanakan menjadi matriks ΔV , sehingga dapat dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut:

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (2.19)$$

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.20)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (2.21)$$

DLF merupakan matriks *Distribution Load Flow*, yang ditunjukkan pada matriks berikut:

$$\begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} & Z_{12} + Z_{23} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} + Z_{45} & Z_{12} + Z_{23} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{36} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

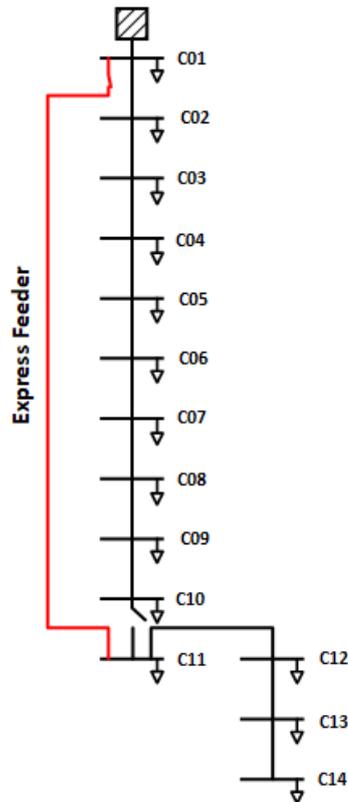
2.4 Rekonfigurasi Jaringan Distribusi

Rekonfigurasi jaringan distribusi merupakan penyesuaian struktur topologi dalam jaringan distribusi, yang mengubah koneksi elemen jaringan seperti penyulang maupun beban (Affandy et al., 2021). Tujuan utama dari proses rekonfigurasi untuk mengoptimalkan beberapa parameter operasi utama dari operasi jaringan, seperti meminimalkan rugi-rugi daya, meningkatkan profil tegangan, dan penyeimbangan sistem untuk pemenuhan permintaan beban secara efektif (Pangestu et al., 2022).

Rekonfigurasi yang digunakan yaitu dengan melakukan pendekatan topologi baru pada desain jaringan distribusi menggunakan konsep topologi jaringan *spindle* atau *express feeder* guna mengurangi nilai *drop* tegangan pada sistem distribusi listrik. Menurut (Shodar, 2023) jaringan distribusi *spindle* dirancang untuk menghubungkan berbagai sub-jaringan sehingga mengurangi panjangnya jarak antara sumber ke beban. Dengan demikian, jarak antara sumber utama listrik terhadap titik beban dapat diminimalkan, sehingga dapat meminimalkan nilai *drop* tegangan. Rekonfigurasi jaringan distribusi dengan perencanaan pengembangan *express feeder* merupakan salah satu solusi yang digunakan untuk mengatasi permasalahan *drop* tegangan karena sistem ini menghubungkan langsung antara titik sumber utama dengan titik akhir beban secara langsung. Hal tersebut telah divalidasi pada penelitian yang dilakukan (Satriani et al., 2023) bahwa penerapan jaringan *express feeder* mampu menurunkan nilai *drop* tegangan secara signifikan dan menghasilkan tegangan yang lebih optimal.

2.5 Express feeder

Express feeder merupakan sub bagian dari jaringan *spindle* sebagai saluran yang menghubungkan sumber utama listrik menuju titik beban. Saluran ini berfungsi sebagai saluran distribusi alternatif yang digunakan untuk mengurangi *drop* tegangan ketika terjadi beban penuh. Selain itu, saluran ini dirancang untuk menghubungkan gardu induk ke beban tertentu secara langsung tanpa terbebani oleh beban yang lain. Hal tersebut membantu menjaga kestabilan tegangan pada jaringan distribusi.



Gambar 2.7 Konsep *Express feeder* pada Jaringan Distribusi

Express feeder dirancang untuk dapat memecah beban yang terdapat di sepanjang saluran suatu penyulang, sehingga ketika memiliki beban yang lebih sedikit pada saluran distribusi, nilai resistansi total dalam saluran akan menurun, dan hal itu akan berpengaruh terhadap nilai dari *drop* tegangan serta menjaga stabilitas tegangan. Selain itu, saluran ini dapat membantu menurunkan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi yang memiliki beban-beban besar yang berlokasi jauh dari sumber utama listrik. Karena beban tertentu dilayani secara langsung atau memiliki jalur khusus ketika terjadinya gangguan pada jalur utama, sehingga hal tersebut dapat diminimalkan.

Berdasarkan penelitian (Anugrah et al., 2020) menyebutkan bahwa kondisi jaringan distribusi Sorek yang di akibatkan oleh panjangnya saluran distribusi, yang

menyebabkan tegangan terendah pada ujung saluran mencapai 11,5 kV. Dengan penerapan *express feeder*, tegangan di ujung saluran meningkat menjadi 17,155 kV. Menurut penelitian (Saputri et al., 2022) dengan adanya penerapan *express feeder* dapat mengoptimalkan kondisi tegangan pada jaringan distribusi. Dengan kondisi awal terjadi *drop* tegangan dengan persentase sebesar 5,202% yang melebihi batas standar 5%. Masalah ini dapat di atasi melalui penerapan *express feeder*, sehingga kondisi *drop* tegangan dapat optimalkan menjadi 2,04% sesuai dengan standar SPLN 72:1987.

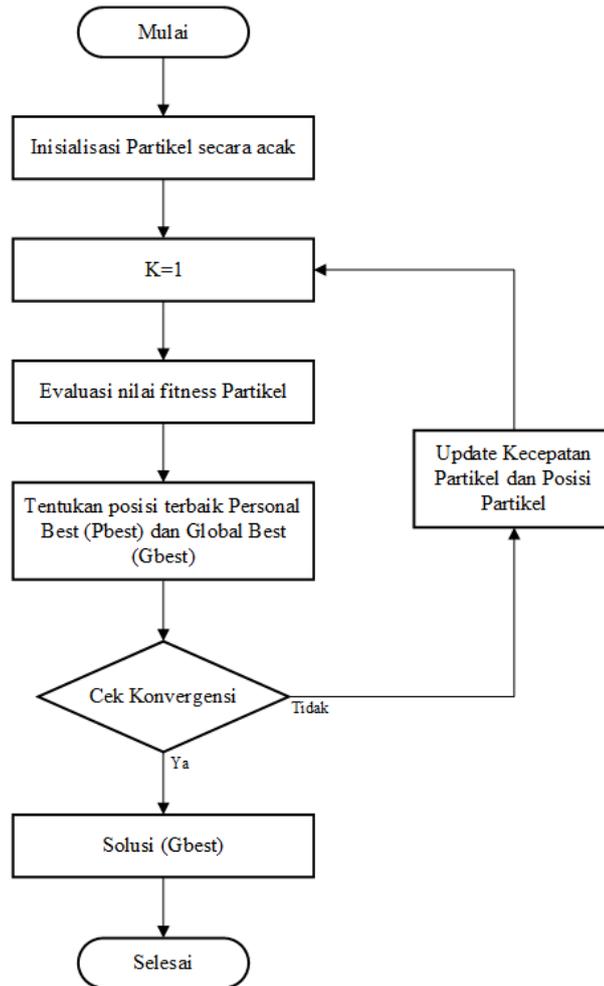
2.6 Metode Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan suatu bagian dari metode optimasi metaheuristik untuk menemukan solusi optimal (Putra et al., 2019). Metode PSO memiliki konsep yang menyerupai pola pikir dari kawanan burung dan ikan yang sedang mencari makan. Metode ini menggunakan konsep interaksi antar individu atau partikel dalam suatu ruang pemecahan masalah untuk menemukan solusi optimal. Untuk menemukan solusi optimal, populasi didasarkan pada pencarian algoritma dan dimulai dengan populasi secara acak yang disebut partikel. Setiap partikel bergerak melintasi ruang pencarian dengan kecepatan dinamis berdasarkan perilaku sebelumnya. Hasilnya, setelah melalui proses pencarian, partikel cenderung berpindah ke area yang lebih baik (Putra et al., 2019). Dalam metode ini, diperlukan asumsi untuk menentukan nilai awal posisi dan kecepatan masing-masing. Proses pencarian posisi optimal atau nilai fungsi objektif dilakukan berdasarkan pergerakan setiap partikel pada berbagai posisi, mulai dari sumber hingga ke jaringan (beban). Setiap partikel akan berbagi informasi yang diperoleh dengan partikel lainnya, yang didasarkan pada posisi dan kecepatan

masing-masing partikel. Setiap partikel merepresentasikan solusi potensial yang dievaluasi berdasarkan fungsi objektif tertentu. Posisi partikel terus diperbarui berdasarkan pengalaman terbaik individu (*Pbest*) serta pengalaman terbaik kelompok (*Gbest*). Pendekatan ini memungkinkan PSO untuk mengidentifikasi solusi optimal, bahkan dalam ruang pencarian yang kompleks dan dinamis.

PSO telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi di bidang sistem tenaga listrik karena kemampuannya dalam menyelesaikan masalah optimasi yang kompleks. Salah satu aplikasi utamanya adalah dalam optimalisasi aliran daya, di mana PSO digunakan untuk meminimalkan rugi-rugi daya, *drop* tegangan dan mengatur distribusi tegangan secara efisien. Selain itu, PSO sering diterapkan dalam perencanaan jaringan distribusi untuk menentukan konfigurasi optimal yang dapat mengurangi *drop* tegangan serta rugi-rugi daya.

Dalam penelitian ini, PSO digunakan untuk merancang perencanaan *express feeder* pada jaringan distribusi penyulang CLDG. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi *drop* tegangan pada jaringan distribusi yang diakibatkan oleh jarak saluran yang panjang dan penambahan beban yang terhubung pada saluran utama. PSO digunakan untuk menentukan konfigurasi optimal *express feeder* yang dapat meningkatkan stabilitas tegangan dan efisiensi sistem distribusi. Dengan mempertimbangkan berbagai skenario pembebanan, PSO membantu memberikan solusi terbaik dalam mendesain jaringan distribusi yang tidak hanya efisien, tetapi juga mampu memenuhi standar kualitas daya yang ditetapkan. Berikut langkah-langkah untuk menjalankan algoritma *particle swarm optimization*, dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram Alir Metode PSO

Adapun langkah-langkah menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) sebagai berikut:

1) Inisialisasi Partikel Secara Acak.

Langkah pertama dalam PSO adalah menginisialisasi sekelompok partikel yang akan digunakan untuk merepresentasikan beberapa solusi dalam ruang pencarian. Sebuah partikel memiliki dua atribut utama, yaitu posisi dan kecepatan. Posisi partikel menunjukkan solusi yang sedang diperiksa, dan kecepatan partikel menentukan seberapa jauh partikel tersebut akan bergerak pada iterasi berikutnya.

Posisi awal setiap partikel biasanya dipilih secara acak dalam beberapa batasan untuk mengeksplorasi seluruh ruang solusi dengan benar.

2) Evaluasi Nilai *Fitness* Pada masing-masing Partikel.

Semua partikel yang telah diinisialisasi kemudian dievaluasi berdasarkan fungsi objektif yang telah ditentukan berdasarkan masalah yang diteliti. Fungsi objektif digunakan untuk mengukur kualitas solusi yang diwakili oleh posisi partikel. Sebagai contoh, dalam perencanaan jaringan distribusi listrik, fungsi objektif dapat berupa meminimalkan rugi-rugi daya atau meminimalkan *drop* tegangan.

3) Menentukan Posisi Terbaik Personal *Best* (*Pbest*) dan *Global Best* (*Gbest*).

Setelah nilai fungsi objektif dihitung, semua partikel akan mencari tahu bagaimana nilai solusi saat ini dibandingkan dengan solusi terbaik yang diperoleh sebelumnya, yang disebut sebagai personal *best* (*Pbest*). Jika nilai fungsi objektif saat ini lebih baik dari *Pbest* sebelumnya, maka nilai *Pbest* akan diperbarui dengan lokasi saat ini. Dengan cara ini, setiap partikel menyimpan riwayat posisi terbaik yang telah ditemukan sejauh ini dalam proses iterasi.

Selain itu, di antara semua partikel dalam populasi, terdapat satu partikel yang memiliki nilai fungsi objektif yang optimal dibandingkan dengan yang lain. Posisi optimal ini disebut sebagai *global best* (*Gbest*), yang merupakan solusi terbaik secara keseluruhan pada iterasi saat ini. Nilai *Gbest* diperbarui setiap kali ditemukan partikel dengan nilai fungsi objektif yang lebih baik dari *Gbest* yang sudah ada. Nilai *Gbest* ini akan digunakan sebagai *template* untuk semua partikel pada proses optimasi berikutnya.

4) *Update* Kecepatan dan Posisi Partikel

Setelah menentukan *Pbest* dan *Gbest*, langkah berikutnya adalah memperbarui kecepatan dan posisi setiap partikel agar bergerak menuju solusi optimal.

Kecepatan partikel diperbarui menggunakan persamaan:

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 r_1 (Pbest_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (best^k - x_i^k) \quad (2.23)$$

Dimana:

v_i^{k+1} = Kecepatan partikel i pada iterasi selanjutnya

v_i^k = Kecepatan partikel i pada iterasi ke- k

w = Bobot inersia

$c1, c2$ = Konstanta percepatan

$r1, r2$ = Bilangan acak antara 0 dan 1

$Pbest_i^k$ = Posisi terbaik yang pernah dicapai oleh partikel i

$Gbest_i^k$ = Posisi terbaik global dalam seluruh partikel

x_i^k = Posisi partikel i pada iterasi ke- k

Setelah kecepatan diperbarui, posisi partikel juga diperbarui dengan persamaan:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.24)$$

Dimana:

x_i^{k+1} = Posisi partikel i pada iterasi selanjutnya

x_i^k = Posisi partikel i pada iterasi ke- k

v_i^{k+1} = Kecepatan baru yang telah diperbarui

Perubahan posisi ini memungkinkan setiap partikel untuk terus menjelajahi ruang pencarian dan bergerak menuju solusi yang lebih baik. Jika suatu partikel

bergerak di luar batas pencarian, maka posisinya akan dikoreksi agar tetap berada dalam ruang pencarian yang diperbolehkan.

5) Cek Kriteria Konvergensi

Tahap selanjutnya adalah memeriksa apakah proses optimasi sudah memenuhi kriteria konvergensi. Konvergensi dapat ditentukan berdasarkan beberapa faktor, seperti:

- a) Jika jumlah iterasi yang telah dilakukan sudah mencapai batas maksimum yang ditetapkan, maka optimasi dihentikan.
- b) Jika dalam beberapa iterasi terakhir tidak ada perubahan signifikan dalam nilai *Gbest*, artinya solusi telah mencapai titik optimal dan proses optimasi dapat dihentikan.
- c) Jika nilai fungsi objektif sudah mendekati nilai optimal dengan tingkat *error* yang dapat diterima, maka proses juga bisa dihentikan.

Jika salah satu dari kriteria ini terpenuhi, maka proses PSO berhenti dan solusi terbaik yang ditemukan dalam bentuk *Gbest* dianggap sebagai solusi optimal dari permasalahan yang sedang diselesaikan. Namun, jika kriteria belum terpenuhi, maka algoritma akan kembali melanjutkan iterasinya ke langkah evaluasi *fitness* dan melanjutkan proses hingga kriteria konvergensi terpenuhi.

2.7 Penelitian Terkait

Tabel 2.1 Tabel Penelitian Terkait

No.	Judul	Identitas Penulis	Pembahasan
1.	Studi Pemasangan <i>Express feeder</i> Jaringan Distribusi 20 kV Untuk Mengatasi <i>Drop</i> Tegangan Pada <i>Feeder</i> Sorek PT PLN (Persero) Rayon Pangkalan Kerinci	(Anugrah et al., 2020)	Penelitian ini menganalisis efektivitas pemasangan <i>express feeder</i> pada penyulang/ <i>feeder</i> Sorek yang memiliki panjang saluran mencapai 194 kms dengan jumlah gardu distribusi sebanyak 152 unit yang melayani 20.606 pelanggan, sehingga mengalami <i>drop</i> tegangan yang signifikan. Kondisi <i>eksisting</i> menunjukkan bahwa tegangan terendah terjadi pada ujung saluran yaitu pada Transformator BM006, hanya mencapai 11,181 kV, yang melampaui batas toleransi <i>drop</i> tegangan standar sebesar 10%. Setelah pemasangan <i>express feeder</i> sepanjang 46 km dari Gardu Hubung (GH), tegangan pada Transformator BM 006 meningkat menjadi 17,155 kV. Selain itu, rugi daya aktif pada sistem berkurang dari 2.063 kW menjadi 656 kW dan rugi daya reaktif menurun dari 3.703 kVAr menjadi

			1.426 kVAr. Penurunan rugi daya sebesar 1.407 kW berdampak langsung pada peningkatan kualitas layanan penyaluran tenaga listrik di <i>feeder</i> Sorek.
2.	Perencanaan Pemasangan <i>Express feeder</i> Untuk Perbaikan Profil Tegangan Pada Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Gardu Hubung Sungguminasa (GHSM) PT. PLN (Persero) ULP Sungguminasa	(Saputri et al., 2022)	Penelitian ini menganalisis kondisi profil tegangan pada penyulang GHSM yang mengalami penurunan tegangan yang signifikan akibat panjang saluran distribusi sepanjang 24,78 km dan melayani 65 unit gardu distribusi. Kondisi <i>eksisting</i> menunjukkan bahwa tegangan terendah terjadi pada bus B078 sebesar 18,99 kV dengan persentase jatuh tegangan 5,202 % yang melebihi batas standar toleransi SPLN 72:1987 sebesar 5%. Setelah pemasangan <i>express feeder</i> secara paralel dari Gardu Induk (GI) Sungguminasa ke Gardu Hubung (GH) Sungguminasa, tegangan terima pada bus B078 meningkat menjadi 19,628 kV dengan persentase jatuh tegangan menurun menjadi 2,04%. Selain itu, seluruh bus percabangan yang sebelumnya berada dalam kondisi kritis

			menunjukkan peningkatan signifikan dengan tegangan yang stabil di atas standar minimum yang sudah ditentukan. <i>Express feeder</i> pun memberikan suplai ganda pada penyulang GHSM, sehingga hal ini meningkatkan keandalan distribusi listrik.
3.	Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20 kV Untuk Mengurangi <i>Drop Voltage</i> Pada Penyulang Asuhan GI Daya	(Satriani et al., 2023)	Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki nilai <i>drop</i> tegangan yang terjadi pada penyulang Asuhan Gardu Induk (GI) Daya yang diakibatkan panjangnya saluran distribusi dan kerusakan pada trafo GI tersebut. kondisi <i>eksisting</i> menunjukkan bahwa beberapa bus memiliki tegangan yang rendah dengan nilai tegangan terendah pada GH POLDA sebesar 18,952 kV dan persentase tegangan mencapai 5,24%, melebihi batas toleransi SPLN 72:1987 sebesar 5%. Setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan dengan mengubah GI Daya menjadi Gardu Hubung (GH) dan penambahan dua <i>feeder express</i> dari GI Daya Baru, tegangan pada GH POLDA meningkat menjadi 19,821 kV dengan persentase jatuh tegangan

			<p>turun menjadi 0,895%. Selain itu, seluruh bus yang sebelumnya dalam kondisi kritis mengalami perbaikan yang signifikan. Dengan terpasangnya <i>feeder express</i> sebagai <i>incoming</i> pada GH Daya jaringan distribusi menjadi lebih stabil dan mampu mengantisipasi beban tambahan tanpa menyebabkan <i>drop</i> tegangan yang signifikan.</p>
4.	<p><i>Comparison Using Express feeder and Capacitor Bank Allocation to Corrective Voltage Level on Primary Distribution Feeder</i></p>	<p>(Hardiantono & Mangera, 2019)</p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas penggunaan <i>express feeder</i> dan <i>capacitor bank</i> untuk memperbaiki profil tegangan pada jaringan distribusi primer di PLTD Kelapa Lima, Merauke. Dengan kondisi <i>eksisting</i> tegangan pada <i>feeder</i> Merkuri berada di 17,65 kV dengan persentase <i>drop</i> tegangan sebesar 13,31% yang melebihi batas toleransi 5%. Hasil penelitian tersebut dengan penggunaan <i>capacitor bank</i> sebesar 134 kVAr mampu meningkatkan tegangan menjadi 17,75 kV dan mengurangi <i>drop</i> tegangan menjadi 11,25%. Sedangkan setelah pemasangan <i>express feeder</i> terjadi peningkatan profil tegangan yang</p>

			signifikan menjadi 19,39 kV, dengan penurunan <i>drop</i> tegangan menjadi 3,05%. Hal tersebut membuktikan bahwa penggunaan <i>express feeder</i> jauh lebih efektif dalam memperbaiki profil tegangan.
5.	Dampak Pembangunan <i>Express feeder</i> Jaringan Distribusi 20 KV untuk Mengatasi <i>Drop</i> Tegangan pada <i>Feeder</i> Retak Mudik PT PLN (Persero) ULP Mukomuko	(Shafitri et al., 2024)	Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi <i>drop</i> tegangan pada penyulang Retak Mudik, yang mengalami <i>drop</i> tegangan sebesar 10,78% dengan tegangan sebesar 17,73 kV. Dilakukan pembangunan jaringan <i>express feeder</i> sepanjang 10 kms. Hasilnya <i>drop</i> tegangan pada penyulang tersebut turun menjadi 7,36% dengan tegangan menjadi 19,025 kV. Selain itu, terjadi pengurangan rugi daya total yang sebelumnya sebesar 76,146 kW menjadi 52,129 kW.