

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pengaruh pemasangan kapasitor bank terhadap jatuh tegangan telah banyak dilakukan. Diantaranya yaitu penelitian yang berjudul “*Studi Pemasangan Kapasitor Bank Untuk Memperbaiki Jatuh Tegangan Pada Jaringan Distribusi Tegangan Menengah Di PT PLN (Persero) ULP Tanjung Selor*” yang dilakukan oleh A. Farhan pada tahun 2020. Pada penelitian ini melakukan simulasi dalam 2 kondisi beban yaitu LWBP dan WBP. Setelah disimulasikan terjadi jatuh tegangan pada pada 7 bus dikondisi beban puncak yang melewati standar yang ditentukan yaitu bus SBL185 18,951 kV, bus SBL123 18,985 kV, bus SBL192 18,976 kV, bus169 18,957 kV, bus SBL138 18,957 kV, PDL194 18,964 kV dan bus PDAM162 18,98 kV. Dilakukan simulasi *Optimal Capacitor Placement* (OCP) dan diperlukannya pemasangan kapasitor bank pada bus yaitu bus SBL185 dengan kapasitas kapasitor bank 2400 kVAr, PDAM 162 dengan kapasitas kapasitor banknya 2800 kVAr, SBL 123 dengan kapasitas kapasitornya banknya 1200 kVAr, PDL 194 dengan kapasitas kapasitornya 2800 kVAr dan SBL192 dengan kapasitas kapsitornya 3200 kVAr. Setelah melakukan pemasangan kapasitor bank pada bus yang mengalami jatuh tegangan, nilai tegangan pada bus menjadi meningkat. Tegangan di bus SBL 185 menjadi 20,158 kV, SBL123 menjadi 20,143 kV, SBL 192 menjadi 20,143 kV, SBL 169 menjadi 20,155 kV, SBL 138 menjadi 20,14 kV, PDL 194 menjadi 20,163 kV, dan PDAM 162 menjadi 20,153 kV [1].

Selain itu, penelitian yang berjudul “*Analisa Perbaikan Faktor Daya Dengan Menggunakan Kapasitor Bank*” yang telah dilakukan oleh M. Ilham pada tahun 2017. Pada penelitian ini dilakukan percobaan dalam menguraikan secara ringkas pemanfaatan Kapasitor Bank yang digunakan di PT. Pacific Medan Industri. Dari data dan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa, nilai daya reaktif sebelum kompensasi adalah 570,06 kVAr dan setelah kompensasi adalah 97,765 kVAr. Adapun besar daya reaktif yang di kompensasi atau di berikan kapasitor adalah 472,295 kVAr. kapasitas kapasitor di PT. Pacific Medan Industri dengan pemasangan kapasitor hubung bintang adalah 26,58 μF / phasa. Adapun perhitungan rekening listrik pada bulan juni 2017 yaitu Rp 510.688.560, -[2].

Penelitian yang berjudul “*Studi Pemasangan Kapasitor Bank Untuk Memperbaiki Faktor Daya Dalam Rangka Menekan Biaya Operasional Pada Jaringan Distribusi 20 kV*” yang telah dilakukan oleh Dede Kaldri S. Pada penelitian ini telah dilakukan pemasangan kapasitor bank, dimana berdampak pada perbaikan nilai faktor daya serta mengakibatkan menurunnya losses di penyulang-penyulang gardu induk Sukolilo. Besarnya total kapasitas kapasitor bank yang harus dipasang pada keseluruhan penyulang-penyulang di Gardu Induk Sukolilo adalah sebesar 11.550 kVAr dengan total biaya investasi sebesar Rp.254.578.500,- sehingga dengan pemasangan kapasitor bank tersebut akan dapat menekan biaya rugi-rugi akibat losses total pertahun sebesar Rp. 1.289.033.851, -. Simulasi aliran daya dilakukan dengan menggunakan software ETAP Power Station [3].

Penelitian yang berjudul “*Studi Evaluasi Pemasangan Kapasitor Bank Pada Pusat Perbelanjaan A. Yani Megamal Pontianak*” yang telah dilakukan oleh Leo Sophian Sirait pada tahun 2018. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan perbaikan faktor daya, daya awal 14,281 MW untuk panel Utilitas dan Kios beban daya reaktif yang terpakai sebesar 11,817 MVarh menjadi 7,279 MVarh setelah perbaikan $\cos \theta$, dari hasil evaluasi daya juga memberikan efek pada tarif tenaga listrik pada A. Yani Megamal Pontianak. Untuk Biaya untuk pemasangan kapasitor Bank dengan penghematan yang dapat dicapai sebesar 9,09%/bulan sehingga dalam kurun waktu tidak sampai 1 tahun sudah dapat mengembalikan modal pemasangan kapasitor bank. Kapasitor yang digunakan untuk memperbaiki dan memperbesar faktor daya dipasangkan paralel dengan $\cos \Theta(\text{optimal}) = 0,91$ untuk panel LVMDP-Utilitas dan untuk panel LVMDP-Kios $\cos \Theta(\text{optimal}) = 0,82$, perbaikan $\cos \Theta(\text{optimal})$ juga mampu menekan biaya lebih kVAr yang tinggi dan pemakaian daya aktif yang lebih optimal [4].

Penelitian yang berjudul “*Implementasi Bank Kapasitor Untuk Perbaikan Profil Tegangan Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan Software ETAP Power Station di Rayon Besuki*” yang telah dilakukan oleh Choirul Saleh, Awan U. Krismanto dan Abraham Lomi pada tahun 2017. Pada penelitian ini dilakukan analisa pemasangan kapasitor dengan kapasitas tertentu berdasarkan hasil simulasi aliran daya. Perhitungan aliran daya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ETAP untuk mengetahui profil tegangan yang terjadi pada jaringan

sebelum dan sesudah dilakukannya pemasangan kapasitor. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan pada system diketahui terjadi kenaikan tegangan sekitar 10% dan kenaikan faktor daya sekitar 10% [11].

Penelitian yang berjudul “*Optimasi Penempatan Kapasitor Menggunakan Algoritma Genetika pada Sistem Distribusi untuk Memperbaiki Faktor Daya Dan Tegangan*” yang telah dilakukan oleh Hadha Alamajibuwono pada tahun 2011. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah *Data IEEE 33 Bus Distribution Test System*. Penelitian ini bertujuan untuk menjaga tegangan dengan batas minimum 95% dan maksimum 105% serta PF 85% dengan penempatan kapasitor bank pada sistem menggunakan metode Algoritma Genetika dan hasil dari penelitiannya didapatkan tegangan serta faktor daya tiap bus tidak melewati batas yang telah ditentukan [12].

Penelitian yang berjudul “*Analisis Penempatan Optimal Bank Kapasitor Pada Sistem Distribusi Radial dengan Metode Algoritma Genetika Aplikasi : PT PLN (Persero) Cabang Medan*” yang dilakukan oleh Tarsin Saragih pada tahun 2011. Adapun tujuan penelitian ini ialah mengetahui rating kapasitor dan letak penempatan optimal kapasitor serta kualitas tegangan sebelum dan sesudah penempatan kapasitor. Analisis aliran daya pada penelitian ini menggunakan *Etap 7.5.0 Optimal Capacitor Placement* yang telah berbasiskan Algoritma Genetika. Dalam penelitiannya empat buah bus yang mewakili sistem dipilih secara acak selanjutnya dengan metode Algoritma Genetika ditentukan berapa rating dan letak optimal kapasitor pada keempat bus tersebut. Penelitian ini menghasilkan penempatan serta rating yang optimal berdasarkan batas tegangan minimal 95% dan batas maksimal 105% [13].

Penelitian yang berjudul “*Analisa Perbaikan Profil Tegangan Sistem Tenaga Listrik Sumbar Menggunakan Kapasitor Bank Dan Tap Transformator*” yang dilakukan oleh Akbar Abadi pada tahun 2015. Pada penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan *PowerWorld simulator* untuk memperoleh nilai dan lokasi kapasitor bank dan tap transformator yang tepat untuk memperbaiki performansi sistem. Berdasarkan hasil simulasi, untuk kondisi awal sistem, terdapat beberapa bus yang mengalami drop tegangan dengan total rugi-rugi sistem sebesar 14,4 MW. Setelah penambahan kapasitor, tegangan sistem mengalami peningkatan yang

signifikan sehingga tidak ada yang melewati nilai toleransi dan rugi-rugi sistem turun menjadi 14,1 MW. Sedangkan untuk pengaturan rasio tap transformator, tegangan sistem tidak mengalami perubahan yang begitu besar, kecuali pada sisi sekunder transformator bus yang diatur dengan rugi-rugi sistem hampir sama yaitu sebesar 14,4 MW. Untuk kasus penambahan kapasitor dan pengaturan rasio tap transformator sekaligus, tidak ada lagi drop tegangan yang melebihi dari 5 % dan total rugi-rugi sistem turun menjadi 13,9 MW [14].

Penelitian yang berjudul “*Optimisasi Penempatan Kapasitor Bank Untuk Memperbaiki Faktor Daya Menggunakan Particle Swarm Optimization Pada Jaringan Auxiliary Load PT PJB Pembangkitan Indramayu 3x330 MW*” yang dilakukan oleh Rizky Maulana Syaefuddin pada tahun 2017. Pada penelitian ini, dibahas optimisasi penempatan kapasitor bank untuk memperbaiki faktor daya dengan menggunakan PSO. Metode optimasi yang didasarkan pada *swarm intelligence* ini disebut *algorithm behaviorally inspired* sebagai alternatif dari algoritma genetika, yang sering disebut *evolution-based procedures*. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa dengan menempatkan 58 kapasitor dengan total rating 1.160 kVAr pada bus 24, 26, 28, 30, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 50, 52, 54, 60, 62, dan 64 mampu memperbaiki faktor daya dan menaikkan profil tegangan pada bus-bus tersebut sehingga rugi daya aktif menurun sebesar 22,6 kW (1,05%) dan rugi daya reaktif menurun sebesar 28,1 kVAr (1,02%) sehingga didapatkan penghematan sebesar \$13.574,2059 dalam kurun waktu 5 tahun [15].

Penelitian yang berjudul “*Simulasi Perbaikan Drop Tegangan Dengan Kapasitor Bank Pada Feeder Krapyak 06 Dengan ETAP 12.6*” yang dilakukan oleh Eggy Surya Yudha pada tahun 2020. Pada penelitian ini dilakukan analisa pengaruh drop tegangan sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan kapasitor bank. Dalam perhitungannya dibantu dengan software ETAP 12.6 untuk simulasi. Adapun hasil simulasi perhitungan pada ETAP 12.6 menunjukkan nilai drop tegangan sebelum dilakukan perbaikan 1567 V atau 7,83% dan nilai drop tegangan setelah dilakukan perbaikan dengan kapasitor bank nilai dari drop tegangan menjadi 860 V atau 4,3%. Dapat disimpulkan bahwa dengan dilakukan perbaikan dengan kapasitor bank akan menurunkan besarnya nilai drop tegangan, sehingga dapat meningkatkan kualitas serta keandalan sistem tenaga listrik [16].

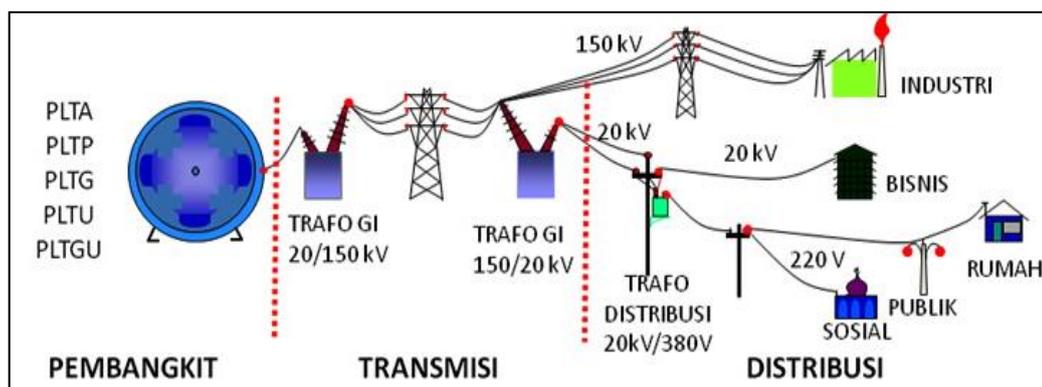
Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian-penelitian di atas menunjukkan bahwa setelah dilakukannya pemasangan kapasitor terjadi perbaikan presentase jatuh tegangan. Adapun perbedaan penelitian yang akan dilakukan dengan penelitian terdahulu adalah objek penelitian dilakukan di Penyulang Sei Deras dan penulis menggunakan studi aliran daya dengan metode *Newton-Rhapson* untuk menghitung jatuh tegangan sebelum dan sesudah dipasang kapasitor bank dengan menggunakan aplikasi MATLAB. Dalam metode penentuan lokasi pemasangan kapasitor bank menggunakan gabungan dari nilai *Loss Sensitivity Factor* dan nilai normalisasi pada bus Penyulang Sei Deras. Kemudian dilakukan 5 skenario pemasangan kapasitor bank. Skenario 1 dilakukan pemasangan 1 buah kapasitor bank 900 kVAr dengan estimasi biaya Rp. 18.000.000,-, skenario 2 dilakukan pemasangan 2 buah kapasitor bank 1800 kVAr dengan estimasi biaya Rp. 36.000.000,-, skenario 3 dilakukan pemasangan 3 buah kapasitor bank 2700 kVAr dengan estimasi biaya Rp. 54.000.000,-, skenario 4 dilakukan pemasangan 1 buah kapasitor dengan kapasitas terbesar yang ada dilapangan 1800 kVAr estimasi biaya Rp. 51.000.000,-, skenario 5 dilakukan pemasangan 2 kapasitor bank 2400 kVAr dengan lokasi acak estimasi biaya Rp. 57.000.000,-.

2.2. Sistem Tenaga Listrik

Secara umum sistem tenaga listrik dapat dikatakan terdiri dari tiga bagian utama, yaitu:

- a. Sistem pembangkit tenaga listrik,
- b. Sistem transmisi tenaga listrik
- c. Sistem Distribusi tenaga listrik.

Sistem tenaga listrik modern merupakan sistem yang kompleks yang terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi dan jaringan distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat beban. Untuk memenuhi tujuan operasi sistem tenaga listrik, ketiga bagian yaitu pembangkit, penyaluran dan distribusi tersebut satu dengan yang lainnya tidak dapat dipisahkan seperti terlihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Sistem Tenaga Listrik

(Sumber : Wibowo, Sigi Syah. 2018. Analisa Sistem Tenaga)

Pada umumnya pusat pembangkit tenaga listrik berada jauh dari pengguna tenaga listrik atau pusat beban. Untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pembangkit, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi yang diperoleh dengan transformator penaik tegangan (*step-up transformer*). Pada transmisi tegangan dinaikkan dengan tujuan mengurangi jumlah arus yang melewati saluran transmisi sehingga dapat memperkecil kebutuhan luas penampang penghantar yang digunakan. Setelah mendekati pusat beban tegangan diturunkan kembali melalui transformator penurun tegangan (*step-down transformer*). Terakhir tegangan akan diturunkan lagi pada gardu distribusi untuk kemudian disalurkan kepada pelanggan [8].

2.3. Sistem Distribusi

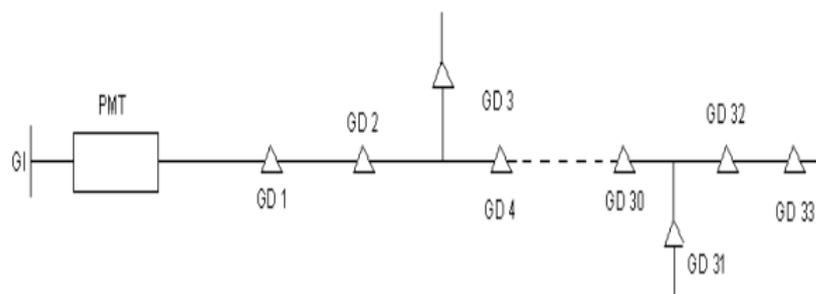
Sistem distribusi daya listrik meliputi semua jaringan tegangan menengah 20 kV dan semua jaringan tegangan rendah 380/220 Volt hingga ke meter-meter pelanggan. Jaringan tegangan menengah (JTM) sering disebut dengan jaringan distribusi primer sedangkan jaringan tegangan rendah (JTR) sering disebut dengan jaringan distribusi sekunder. Pendistribusian daya listrik dilakukan melalui saluran udara atau bawah tanah. Setiap elemen jaringan distribusi pada lokasi tertentu dipasang trafo-trafo distribusi, dimana tegangan distribusi 20 kV diturunkan ke level tegangan yang lebih rendah menjadi 380/220 Volt. Dari trafo-trafo distribusi kemudian para pelanggan listrik dilayani dengan menarik kabel-kabel tegangan rendah menjalar ke sepanjang pusat pemukiman yang meliputi pelanggan komersial maupun beberapa industri yang ada di lokasi tersebut [5].

2.3.1. Sistem Distribusi Primer

Distribusi primer adalah jaringan distribusi daya listrik yang bertegangan menengah (20 kV). Jaringan distribusi primer tersebut merupakan jaringan penyulang. Jaringan distribusi primer berawal dari sisi sekunder trafo daya yang terpasang pada gardu induk hingga ke sisi primer trafo distribusi yang terpasang pada tiang-tiang saluran. Pola konfigurasi jaringan pada distribusi primer terdiri dari 3 tipe yaitu sistem radial, sistem loop, sistem spindel.

1. Sistem Radial

Sistem jaringan radial pada distribusi tenaga listrik paling banyak digunakan dan paling sederhana dibandingkan dengan tipe jaringan yang lain. Tenaga listrik yang disalurkan secara radial melalui gardu induk ke konsumen-konsumen dilakukan secara terpisah satu sama lainnya. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabangkan ke titik-titik beban yang dilayani. Sistem radial terdiri atas penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial [5].



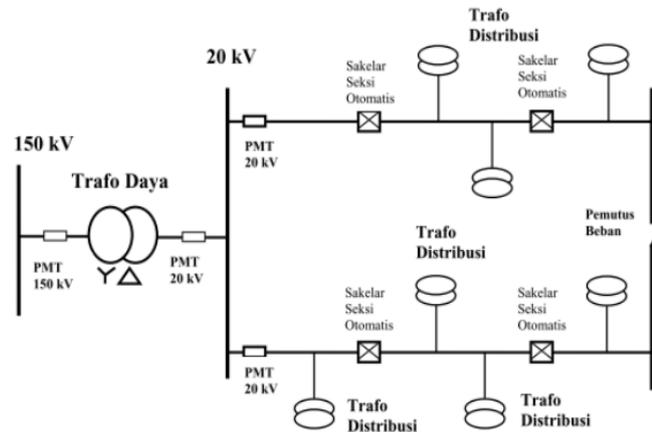
Gambar 2.2. Konfigurasi Jaringan Sistem Radial

(Sumber : Syufrijal, Readysal Monantun, 2014. Jaringan Distribusi Tenaga Listrik)

2. Sistem *Loop*

Sistem jaringan *loop* merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan ring. Susunan rangkaian saluran membentuk ring yang memungkinkan titik beban terlayani dari dua arah saluran, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin serta kualitas dayanya menjadi lebih baik. Struktur jaringan *loop* merupakan gabungan dari dua buah struktur jaringan radial, dimana pada ujung dari dua buah jaringan dipasang sebuah pemutus (PMT) atau pemisah (PMS). Pada saat terjadi gangguan, atau setelah gangguan dapat diisolir, maka pemutus atau pemisah ditutup sehingga aliran daya listrik ke bagian yang tidak terkena gangguan tidak terhenti. Pada umumnya penghantar dari struktur ini mempunyai struktur yang sama, ukuran

konduktor tersebut dipilih lebih besar sehingga dapat menyalurkan seluruh daya listrik beban struktur *loop*, yang merupakan jumlah daya listrik beban dari kedua struktur radial. Jaringan distribusi *loop* mempunyai kualitas dan kontinuitas pelayanan daya yang lebih baik, tetapi biaya investasi lebih mahal dan cocok digunakan pada daerah yang padat dan memerlukan keandalan tinggi [5].

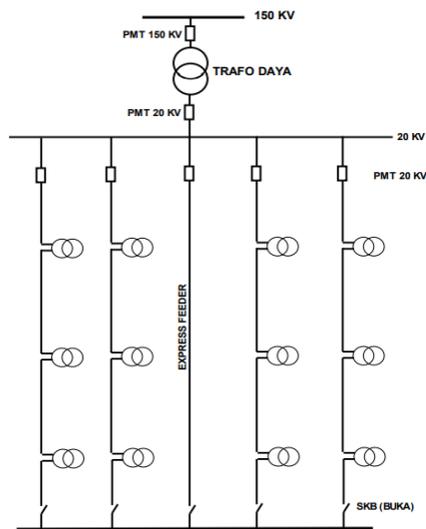


Gambar 2.3. Konfigurasi Jaringan Sistem *Loop*

(Sumber : Syufrijal, Readysal Monantun, 2014. Jaringan Distribusi Tenaga Listrik)

3. Sistem Spindel

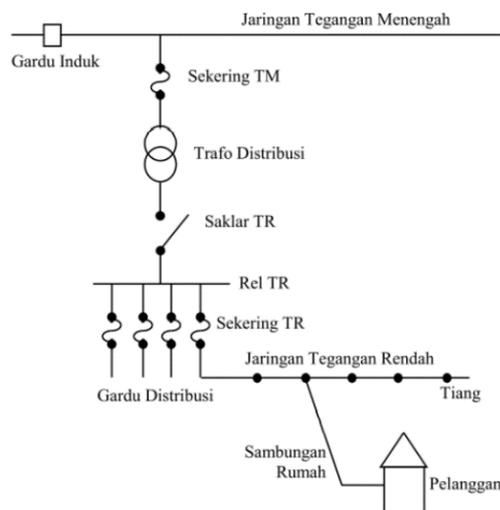
Jaringan distribusi spindel merupakan saluran kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) yang penerapannya cocok di kota-kota besar. Sistem jaringan spindel biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Saluran penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan *working feeder* atau saluran kerja, sedangkan saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan *express feeder*. Fungsi *express feeder* dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu *working feeder*, juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi saat keadaan operasi normal [5].



Gambar 2.4. Konfigurasi Jaringan Sistem Spindel
 (Sumber : Syufrijal, Readysal Monantun, 2014. Jaringan Distribusi Tenaga Listrik)

2.3.2. Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah, merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu pembagi atau gardu distribusi ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan ditribusi sekunder ini adalah 230/480 V. Pada kondisi pelayanan normal perbedaan tegangan maksimum dan tegangan minimum tidak boleh lebih besar $\pm 10\%$ dari tegangan nominal system [6].

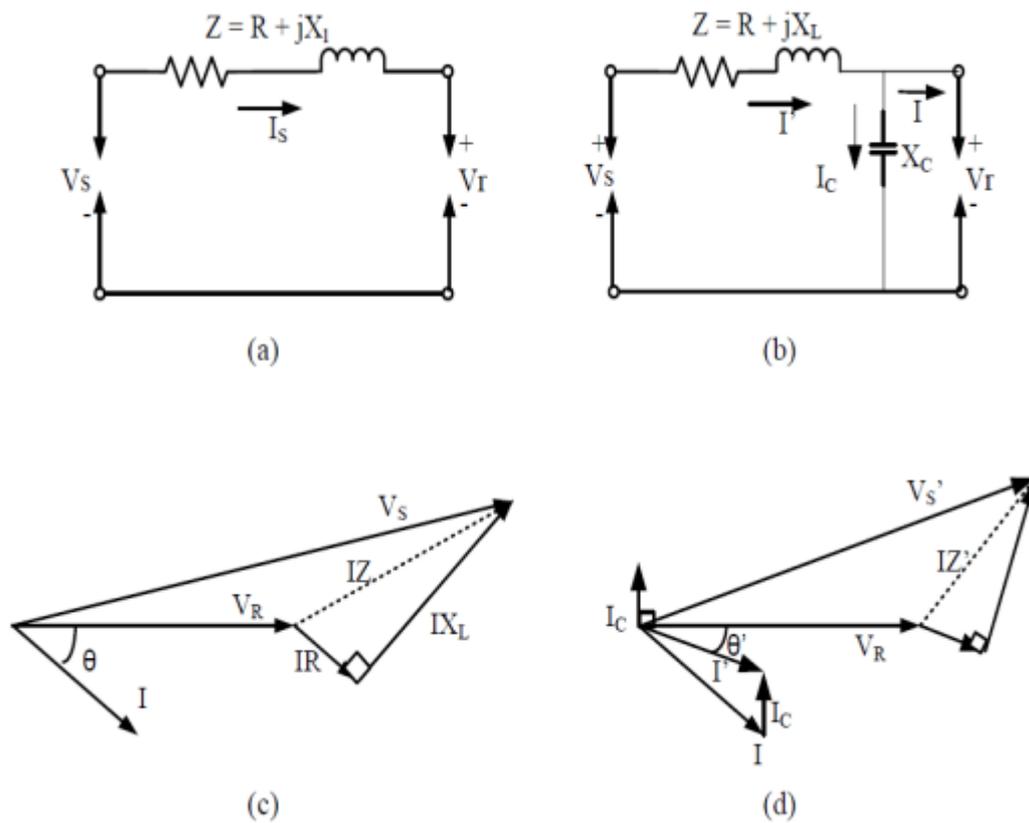


Gambar 2.5. Jaringan Distribusi Sekunder
 (Sumber : Syufrijal, Readysal Monantun, 2014. Jaringan Distribusi Tenaga Listrik)

2.4. Kapasitor Bank

Sepintas, kapasitor tampaknya merupakan peralatan yang sangat sederhana dan tidak canggih, yaitu dua pelat logam dipisahkan oleh bahan isolasi dielektrik. Namun pada kenyataannya, kapasitor bank merupakan perangkat yang sangat teknis dan kompleks. Fungsi dasar kapasitor, apakah kapasitor seri atau shunt, dipasang sebagai satu kesatuan atau sebagai bank, adalah untuk mengatur tegangan dan aliran daya reaktif pada titik dimana kapasitor dipasang. Kapasitor shunt melakukannya dengan mengubah faktor daya beban, Sedangkan kapasitor seri melakukannya dengan langsung mematikan reaktansi induktif rangkaian pada diterapkannya kapasitor [7].

Kapasitor shunt, yaitu kapasitor yang dihubungkan secara paralel dengan saluran, digunakan secara luas dalam sistem distribusi. Kapasitor shunt menghasilkan daya reaktif untuk mengkompensasi yang dibutuhkan oleh beban induktif. Dalam arti tertentu, kapasitor shunt memodifikasi karakteristik beban induktif dengan menarik arus utama yang melawan sebagian atau seluruh komponen *lagging* arus beban induktif pada titik pemasangan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. dengan penerapan kapasitor shunt ke *feeder*, besarnya arus sumber dapat dikurangi, faktor daya dapat ditingkatkan, dan akibatnya tegangan jatuh antara pusat listrik dan beban juga berkurang. Gambar 2.6. (a) dan (c) menunjukkan diagram garis tunggal rangkaian dan diagram tegangan fasornya sebelum penambahan kapasitor shunt dan Gambar 2.6. (b) dan (d) menunjukkannya setelah penambahan kapasitor shunt [7].



Gambar 2.6. Diagram Rangkaian dan Vektor Pemasangan Kapasitor Shunt
 (Sumber : Gonen, Turan. 2008. *Electrical Power Distribution System*)

Dengan pemasangan kapasitor shunt pada saluran sisi penerima, dengan arus kapasitif (I_c) dengan komponen arus reaktif yang leading 90° terhadap tegangan, maka drop tegangan dapat diturunkan seperti gambar diagram. Adapun besarnya jatuh tegangan yang terjadi pada penyulang sebelum dilakukannya pemasangan kapasitor shunt pada ujung saluran ialah [7]:

$$VD = I_R R + I_X X_L \dots\dots\dots (2.1)$$

Bila kapasitor dipasang pada ujung penerima dari saluran, seperti yang terlihat pada gambar 2.6. (b) dan (d), secara pendekatan jatuh tegangan sekarang menjadi :

$$VD = I_R R + I_X X_L - I_C X_L \dots\dots\dots (2.2)$$

Perubahan jatuh tegangan sebelum dan sesudah dipasangnya kapasitor shunt dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$VR = I_C X_L \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

R = Tahanan total dari sirkuit penyulang

X_L = Reaktansi induktif total dari penyulang

I_R = Komponen arus aktif

I_X = Komponen arus reaktif lagging

I_C = Komponen arus reaktif leading

Gambar 2.7. dibawah merupakan salah satu contoh kapasitor bank jenis rak kapasitor yang dipasang di tiang jaringan distribusi dengan unit kapasitor fasa tunggal. Rak kapasitor menampung 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 dan 600 kVAr pada setiap fasanya. Paket rak kapasitor ini menawarkan manfaat sistem seperti peningkatan faktor daya, pelepasan kapasitas sistem, mengurangi rugi-rugi, peningkatan aliran daya, dan penghematan biaya [20].



Gambar 2.7. Kapasitor Bank Pada Tiang Distribusi
(Sumber: www.eaton.com)

Kapasitor bank pada tiang distribusi seperti Gambar 2.7 sangat cocok digunakan pada Penyulang Sei Deras. Setiap fasa dipasang 1 unit kapasitor sehingga membutuhkan 3 unit pada 1 lokasi. Menurut harga dipasaran pada setiap fasa dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Harga Kapasitor Bank

No	Merk	Kapasitas (kVAr)	Harga (Rp.)
1	Eaton Cooper Capacitor	300	6.000.000
2	Eaton Cooper Capacitor	400	10.000.000
3	Eaton Cooper Capacitor	500	13.000.000
4	Eaton Cooper Capacitor	600	17.000.000

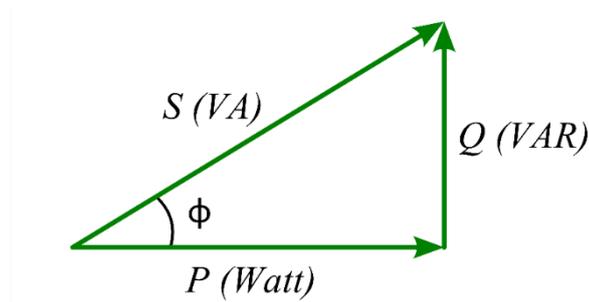
Sumber : www.ebay.com (2022)

2.5. Daya Listrik

Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Terdapat tiga macam daya listrik yang digunakan untuk menggambarkan penggunaan energi listrik, yaitu daya nyata atau daya aktif, daya reaktif serta daya semu atau daya kompleks. Daya nyata atau daya aktif adalah daya listrik yang digunakan secara nyata, misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran pada motor listrik. Daya nyata dihasilkan oleh beban-beban listrik yang bersifat resistif murni. Besarnya daya nyata sebanding dengan dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban resistif dan dinyatakan dalam satuan W (Watt) [9].

Daya reaktif dinyatakan dengan satuan VAr (Volt Ampere Reaktif) adalah daya listrik yang dihasilkan oleh beban-beban yang bersifat reaktansi. Terdapat dua jenis beban reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban-beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan magnet. Contoh beban listrik yang bersifat induktif antara lain transformator, motor induksi satu fasa maupun tiga fasa yang biasanya digunakan untuk menggerakkan kipas angin, pompa air, lift, eskalator, kompresor, konveyor, dan lain-lain. Beban-beban yang bersifat kapasitif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan listrik. Contoh beban yang bersifat kapasitif adalah kapasitor. Besarnya daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban reaktansi. Daya kompleks dinyatakan dengan satuan VA (Volt Ampere) adalah hasil kali

antara besarnya tegangan dan arus listrik yang mengalir pada beban. Sehingga hubungan ketiga daya dapat digambarkan dalam segitiga daya pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Vektor Segi Tiga Daya
(Sumber : Sirait, Bonar. 2016. Sistem Distribusi)

Untuk perhitungan dari ketiga daya tersebut dapat kita lakukan dengan persamaan dibawah ini :

$$S = V I \dots\dots\dots(2.4)$$

$$P = V I \cos \varphi \dots\dots\dots (2.5)$$

$$Q = V I \sin \varphi \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\cos \varphi = pf = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

S = Daya semu (VA)

P = Daya aktif (Watt)

Q = Daya reaktif (VAr)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

φ adalah sudut antara daya aktif (P) dan daya kompleks (S), sehingga $\cos \varphi$ didefenisikan sebagai faktor daya (*power factor*, pf). Faktor daya terdiri dari dua sifat yaitu faktor daya *leading* dan faktor daya *lagging*. Untuk beban yang bersifat induktif, pf *lagging* di mana arusnya tertinggal dari tegangannya. Dan untuk beban yang bersifat kapasitif, pf *leading* dimana arusnya mendahului tegangannya.

2.6. Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah selisih antara tegangan pada ujung kirim (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerima (*receiving end*) tenaga listrik. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. PT PLN (Persero) mengatur tegangan standar dalam SPLN T6.001: 2013 tentang tegangan-tegangan standar dari Tabel 2.2. berikut [6] :

Tabel 2.2. Standar Tegangan Menengah

Tegangan tertinggi untuk perlengkapan (kV)	Tegangan nominal sistem (kV)	Pemanfaatan
7,2	6	Pembangkit
12	11	Pembangkit
24	20	Distribusi dan pembangkit
Tegangan tertinggi dan tegangan terendah perbedaannya tidak boleh lebih besar $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem		

(Sumber : SPLN T6.001: 2013)

Dari Tabel 2.2. penulis menyimpulkan tegangan terendah yaitu 19 kV dan tegangan tertinggi 21 kV untuk menjadi acuan dalam penelitian ini. Sehingga apabila profil tegangan bus dibawah 19 kV maka bus tersebut tidak memenuhi SPLN T6.001: 2013.

Faktor-faktor penyebab terjadinya jatuh tegangan antara lain:

- a. Jarak pusat listrik dengan pusat beban yang jauh.
- b. Pemakaian ukuran penampang konduktor yang kecil.
- c. Banyaknya sambungan antar kabel pada suatu penyulang.

Akibat terjadinya jatuh tegangan pada saluran maka tegangan ditempat yang paling jauh dengan sumber tenaga akan lebih kecil dari tegangan nominal. Adanya tegangan pada sebuah penghantar menyebabkan arus mengalir melalui penghantar tersebut. Bila situasi ini terjadi pada saluran distribusi yang panjang, hal ini dapat menyebabkan penurunan tegangan, Penurunan tegangan ini akibat usaha yang harus dikeluarkan untuk mengatasi perlawanan terhadap aliran arus dan harus disalurkan dari tegangan sumber agar mendapatkan tegangan yang sebenarnya pada

beban [9]. Jatuh tegangan pada suatu saluran dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\Delta V = V_s - V_r \dots\dots\dots (2.8)$$

Dari persamaan di atas, maka dapat diketahui nilai jatuh tegangan relatif atau biasa dikenal dengan *Voltage Regulation* (VR) dengan persamaan:

$$VR = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana:

V_r = Tegangan pada sisi penerima

V_s = Tegangan pada sisi kirim

ΔV = Jatuh Tegangan

VR = *Voltage Regulation*

Upaya untuk mengatasi jatuh tegangan antara lain:

- a. Melakukan penggantian ukuran penampang konduktor dengan yang lebih besar.
- b. Mengganti jenis konduktor yang memiliki koefisien hantar listrik yang lebih baik.
- c. Melakukan pemasangan *distributed generation* (DG) atau kapasitor bank pada penyulang.
- d. Melakukan rekonfigurasi jaringan, manuver beban atau pecah beban.

Pada penelitian ini penulis menggunakan kapasitor bank sebagai upaya perbaikan jatuh tegangan pada Penyulang Sei Deras.

2.7. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya adalah suatu solusi pada jaringan sistem tenaga pada keadaan mantap (*steady state*) yang tunduk kepada batasan ketidaksamaan tertentu dalam operasi sistem. Batasan-batasan itu dapat berupa bentuk tegangan (V), daya reaktif (Q) yang dibangkitkan oleh generator, *setting tap* transformator pada saat melayani beban, dan sebagainya. Solusi aliran daya memberikan hasil berupa : tegangan bus dan sudut fasanya serta juga injeksi daya pada semua bus demikian juga aliran daya melalui saluran interkoneksi (cabang) antar bus [10].

Dalam analisis aliran daya, terdapat beberapa metode klasik yang sering digunakan, antara lain sebagai berikut:

1. Metode *Gauss-Seidel*
2. Metode *Newton-Raphson*
3. Metode *Fast-Decouple*

Dalam penyelesaian perhitungan sebuah aliran daya, sistem dioperasikan dalam kondisi/keadaan tunak dan keadaan seimbang. Setiap bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif P , daya reaktif Q , besar tegangan $|V|$, dan sudut fasa tegangan δ . Jadi ada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P , Q , $|V|$, dan δ . Didalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui dan dua yang lainnya perlu dicari. Berdasarkan hal tersebut diatas, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan bus berayun/bus referensi (*slack bus*) [17].

1. Bus beban (Bus P-Q)

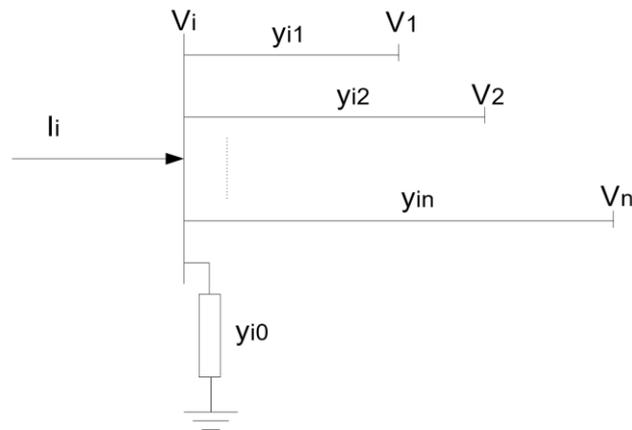
Bus beban adalah bus yang tidak memiliki unsur pembangkitan tenaga listrik/generator dan yang terhubung secara langsung ke beban. Bus beban sering disebut dengan bus P-Q, karena pada bus beban yang dapat diatur adalah kapasitas daya yang terpasang. Pada bus ini, selisih daya yang dibangkitkan oleh generator dengan daya yang diserap oleh beban diketahui nilainya. Besar nilai P pada bus ini merupakan daya aktif terpasang yang diukur dalam satuan Watt (W), sedangkan besar nilai Q merupakan daya reaktif terpasang yang diukur dalam Volt Ampere Reaktif (VAR). Pada bus ini, nilai P dan Q diketahui besarnya, sementara $|V|$ dan δ harus dicari (dihitung) berapa nilainya.

2. Bus generator (Bus P- $|V|$)

Bus generator atau biasa disebut bus *voltage controlled* merupakan bus yang terhubung dengan generator yang dapat dikontrol daya aktif (P) dan tegangan ($|V|$) yang biasanya dijaga konstan. Pengaturan daya aktif pada bus ini diatur dengan mengontrol penggerak mula (*prime mover*). Sedangkan pengaturan tegangan pada bus ini diatur dengan mengontrol arus eksitasi pada generator. Oleh karena daya aktif (P) dan tegangan ($|V|$) dapat dikontrol maka bus ini sering disebut sebagai bus P- $|V|$. Pada bus ini, nilai P dan $|V|$ diketahui besarnya, sementara Q dan δ harus dicari (dihitung) berapa nilainya.

3. Bus referensi (*Slack bus*)

Bus referensi (*slack bus*) adalah sebuah bus generator yang dianggap sebagai bus utama karena merupakan bus yang memiliki kapasitas daya yang paling besar. Oleh karena daya yang dapat disalurkan oleh bus ini besar, maka pada bus ini hanya nilai tegangan $|V|$ dan sudut fasa δ yang bisa diatur, sedangkan besar daya aktif P dan daya reaktif Q akan dicari dalam perhitungan.



Gambar 2.9. Model Bus Sistem Tenaga Listrik
(Sumber : Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*)

Arus pada bus i merupakan perkalian antara admitansi Y dengan tegangan V , dan dalam bentuk persamaan dapat dituliskan:

$$I_i = V_i \sum_{j=0} y_{ij} - \sum_{j=1} y_{ij} V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.10)$$

Daya aktif pada bus- i adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \dots\dots\dots (2.11)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \dots\dots\dots (2.12)$$

Substitusikan persamaan diatas:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.13)$$

Berdasarkan hubungan yang diberikan dalam persamaan diatas, perhitungan masalah aliran daya dalam sistem tenaga harus diselesaikan dengan teknik iterasi [17].

2.8. Aliran Daya Dengan Metode *Newton-Raphson*

Metode *Newton-Raphson* lebih efisien dan praktis dalam perhitungan sistem tenaga yang kompleks. Jumlah iterasi yang diperlukan untuk mencapai konvergensi tidak tergantung pada ukuran sistem, tetapi evaluasi yang lebih fungsional diperlukan pada setiap iterasi. Dalam metode ini, persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar [17]. Persamaan dapat ditulis kembali dalam bentuk matrik bus admitansi sebagai berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots\dots\dots(2.14)$$

Pada persamaan diatas, j termasuk bus-i. Dalam bentuk polar diperoleh persamaan berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.15)$$

Daya kompleks pada bus-i adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots(2.16)$$

Substitusi persamaan (2.15) untuk I_i ke dalam persamaan (2.16),

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.17)$$

Memisahkan bagian real dan imajiner, maka didapatkan:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.18)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.19)$$

Persamaan (2.18) dan (2.19) membentuk satu persamaan aljabar non-linier dengan variabel sendiri. Besarbya setiap variabel tegangan dinyatakan dalam satuan per unit (p.u) dan sudut fasa (radian). Dengan bantuan Deret Taylor, mengabaikan semua suku orde yang lebih tinggi menghasilkan himpunan persamaan linier. Sehingga persamaannya menjadi berikut :

$$\begin{vmatrix} \Delta P \\ \dots \\ \Delta Q \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \dots & \vdots & \dots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \Delta |V| \end{vmatrix} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana elemen J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.21)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana elemen J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.23)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana elemen J_3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.26)$$

Dimana elemen J_4 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.27)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.28)$$

Nilai $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ adalah perbedaan nilai terjadwal dan perhitungan yang dikenal sebagai daya sisa, yang dinyatakan oleh :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.29)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.30)$$

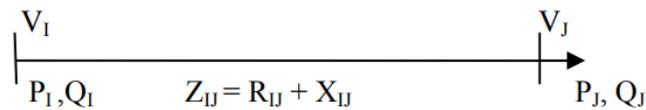
Perkiraan untuk tegangan bus selanjutnya adalah :

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots\dots\dots(2.31)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.32)$$

2.9. Loss Sensitivity Factor (LSF) dan Nilai Normalisasi

Loss Sensitivity Factor (LSF) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan kandidat bus yang akan dipasang kapasitor bank. Bus yang memiliki nilai LSF terbesar menjadi kandidat bus yang akan dipasang kapasitor bank. Keuntungan menggunakan metode ini dapat mengurangi ruang pencarian pada proses optimasi [18]. Metode ini dilakukan dengan melakukan perhitungan sensitifitas rugi-rugi yang dapat diilustrasikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Saluran Distribusi

(Sumber : Sirait, Bonar, 2017. Diktat Kuliah Analisa Sistem Tenaga)

LSF dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$LSF_j = \frac{2Q_{IJ}R_{IJ}}{|V_J|^2} \dots \dots \dots (2.33)$$

Selain mempertimbangan nilai LSF bus, parameter untuk menentukan lokasi kapasitor dengan menggunakan nilai normalisasi dengan persamaan berikut:

$$norm_j = \frac{V_J}{V_{min}} \dots \dots \dots (2.34)$$

Ketika bus dengan nilai normalisasi kurang dari 1,01 dan nilai LSF terbesar, maka bus tersebut dapat dipilih menjadi kandidat lokasi penempatan kapasitor bank [19].