

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Adapun beberapa jurnal penelitian sejenis yang telah ada sebelumnya yang menjadi bahan penyusunan proposal penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan oleh M. Taufieq Haerwana dari Universitas Tanjungpura yang berjudul “*Evaluasi Profil Tegangan dan Susut Daya Pada Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) Di Komplek Perkantoran Kabupaten Sambas*” [3]. Jurnal ini menyajikan perhitungan persentase jatuh tegangan pada JTR dengan ketentuan di SPLN No. 72 Tahun 1987 tentang Spesifikasi Desain Untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR), dimana persentase jatuh tegangan pada jaringan tegangan rendah maksimum 5%. Persentase jatuh tegangan minimum pada jaringan tegangan rendah (JTR) terdapat pada Gardu 116 yang terjadi di bus 1 dengan beban kantor Diklat sebesar 0,527% sehingga tegangan bus tersebut sebesar 377,997 Volt. Persentase jatuh tegangan maksimum JTR terdapat pada Gardu 104 yang terjadi di bus 6 dengan beban kantor BLK Sambas sebesar 12,225% sehingga tegangan bus tersebut sebesar 333,544 Volt. Dengan mengacu pada SPLN No. 72 Tahun 1987 dimana persentase jatuh tegangan pada JTR maksimum 5%, terdapat 16 bus yang memiliki persentase jatuh tegangan di atas 5% dengan rincian sebagai berikut : pada Gardu 87 terdapat 1 bus, yaitu pada bus 5, pada Gardu 87 terdapat 5 bus yaitu pada bus 4 sampai dengan bus 8, pada Gardu 129 terdapat 4 bus yaitu pada bus 2 sampai dengan bus 5, pada Gardu 104 terdapat 6 bus yaitu bus 1 sampai dengan bus 6 (seluruh bus pada Gardu 104 memiliki persentase jatuh tegangan diatas 5%).

Penelitian yang dilakukan oleh Ardhi Surya Nopianto dari Universitas Tanjungpura yang berjudul “*Perhitungan Jatuh Tegangan dan Susut Daya Serta Upaya Perbaikan Penyaluran Daya Listrik Pada PT. PLN (Persero) Rayon Sambas*” [4]. Jurnal ini menyajikan data saluran penyulang Galing, data beban Penyulang Galing, analisis jaringan distribusi 20 kV pada penyulang Galing dan upaya perbaikan penyaluran daya listrik pada penyulang Galing. hasil perhitungan persentase jatuh tegangan pada jurnal tersebut setelah divalidasi dengan hasil

perhitungan metode injeksi arus terdapat selisih (*error*), yang disebabkan oleh pendekatan perhitungan jatuh tegangan antar saluran dimana rugi-rugi daya pada saluran diabaikan. Sedangkan metode injeksi arus merupakan metode perhitungan aliran daya radial yang selalu menyertakan rugi-rugi yang terjadi pada saluran.

Penelitian yang dilakukan oleh Asnal Effendi, Arfita Yuana Dewi dan Edward Crismas dari Institut Teknologi Padang yang berjudul “*Analisa Drop Tegangan PT. PLN (Persero) Rayon Lubuk Sikaping Setelah Penambahan PLTM Guntung*” [5]. Jurnal ini menyajikan grafik tegangan pada setiap Gardu Hubung (GH) dan Gardu Induk (GI) pada pola operasi normal, grafik tegangan pada setiap GH dan GI setelah perubahan pola operasi dan perbandingan tegangan feeder Rao sebelum dan sesudah perubahan pola operasi yang menggunakan aplikasi software ETAP 12.7. Dengan melakukan rekonfigurasi pola operasi jaringan pada penyulang yang ada pada wilayah kerja Rayon Lubuk Sikaping maka sangat berdampak dalam perbaikan tegangan pada penyulang Rao.

Penelitian yang dilakukan oleh Bastanna Erlayas Bangun dari Universitas Sumatera Utara yang berjudul “*Studi Penempatan Transformator Distribusi Berdasarkan Jatuh Tegangan (Studi Kasus Pada PT. PLN (Persero) Rayon Medan Kota*” [6]. Jurnal ini menyatakan hasil analisa data yang dilakukan pada penelitian, yaitu pada transformator distribusi yang besar tegangan jatuh pada sisi saluran distribusi primernya lebih dari 5%. Panjang transformator yang di ubah pada sisi yang terjauh dari transformator, dimana pada penelitian ini terdapat empat transformator yang mengalami perubahan letaknya yaitu pada sisi lateral. Dengan nomor gardu sebagai berikut : SL 117 dari jarak 3,38 Kms menjadi 2,46 Kms, SL 164 dari jarak 3,29 Kms menjadi 2,37 Kms, B 97 dari jarak 3,1 Kms menjadi 3,02 Kms, B 212 dari jarak 1 Kms menjadi 0,01 Kms. Dengan memperbaiki posisi atau jarak transformator distribusi dari GI yang dibuat pada keempat transformator tersebut. Transformator bekerja akan lebih optimal melalui diperbaikinya daya input transformator, daya output transformator, dan efisiensi transformator.

Penelitian yang dilakukan oleh M. Najmul Fadli, Ni Made Seniari dan I Made Ginarsa Dari Universitas Mataram yang berjudul “*Analisis Rencana Pemasangan Transformator Sisipan Pada Saluran Transformator Distribusi Penyulang Pagutan (Studi Kasus : Transformator Distribusi AM097 Di Jalan Banda Seraya,*

Pagesangan, Kota Mataram)” [7]. Jurnal ini menyajikan adanya penambahan transformator sisipan pada JTR Transformator Distribusi AM097 berpengaruh terhadap beberapa hal, diantaranya adalah pembebanan pada Transformator Distribusi AM097 mengalami penurunan dari 92,82% menjadi 69,16%, karena adanya pembagian beban ke transformator sisipan. Sehingga dengan persentase pembebanan 69,16% Transformator Distribusi AM097 tidak lagi mengalami *overload*, Nilai rugi daya total pada saluran JTR Transformator Distribusi AM097 mengalami penurunan yang signifikan, dengan nilai rugi daya menjadi 4159,35 W, Pemasangan transformator sisipan pada Transformator Distribusi AM097 dapat meningkatkan tegangan ujung, dari 183,85 V menjadi 222,3 V, Persentase *drop* tegangan pada ujung beban Transformator Distribusi AM097 setelah adanya transformator sisipan adalah 3,46%. Nilai ini masih dalam ketentuan regulasi tegangan PLN.

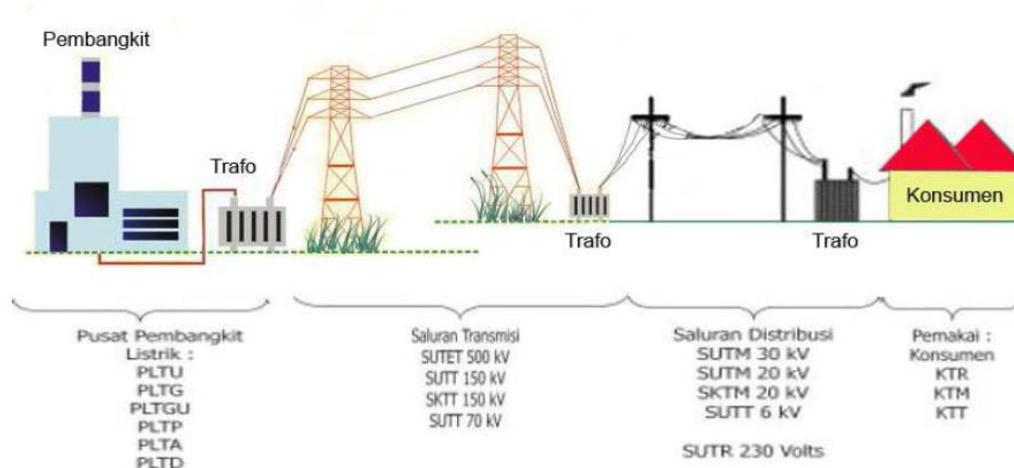
Penelitian yang dilakukan oleh Rayhans Najib Al-Farouq dari Universitas Tanjungpura Pontianak yang berjudul “Analisis Rencana Pemasangan Transformator Distribusi Sisipan Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV Penyulang Kijing” [1]. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya jatuh tegangan pada setiap bus pada Penyulang Kijing, mengacu pada SPLN No. 72 Tahun 1987 dan mengetahui berapa besar transformator sisipan yang dibutuhkan pada transformator distribusi di Penyulang Kijing. Penelitian ini menggunakan metode Newton-Rhapson dengan aplikasi MATLAB. Berdasarkan hasil simulasi aliran daya pada 4 skenario, sebelum dipasang transformator sisipan, jatuh tegangan pada tidak lebih dari 3%. Skenario 1 dan skenario 2 didapatkan nilai jatuh tegangan diantara 3%-4%. Skenario 3 mendapatkan hasil nilai jatuh tegangan diantara 8%-9%. Skenario 4 memiliki nilai jatuh tegangan yang paling besar di antara tanpa sisip trafo, skenario 1, skenario 2 dan skenario 3 yaitu sebesar 18,01%. Nilai jatuh tegangan semakin besar dan nilai tegangan pada bus mengalami penurunan setelah dipasang transformator sisipan. Hasil perhitungan persentase pembebanan terdapat 4 bus yang melebihi standar batas yang telah ditentukan yakni 80%. Meningkatnya jatuh tegangan pada saluran disebabkan oleh beberapa hal salah satunya yaitu jarak antara GI ke transformator distribusi. Semakin jauh jarak maka akan semakin panjang kabel penghantar yang digunakan maka akan semakin besar jatuh tegangan

yang terjadi pada saluran. Kabel penghantar yang digunakan juga akan mempengaruhi jatuh tegangan. Apabila gardu distribusi jaraknya jauh dari GI tetapi menggunakan kabel penghantar yang kecil, maka jatuh tegangan yang terjadi pada saluran tersebut

Berdasarkan beberapa penelitian yang sudah dilakukan di atas penelitian ini akan melakukan penambahan gardu distribusi sisipan terhadap kemampuan hantar arus (KHA) jaringan distribusi primer 20 kV pada GI 150 kV penyulang Keraton, dimana metode yang digunakan untuk menganalisa KHA dan jatuh tegangan dengan metode *Newton-Rhapson* menggunakan 3 skenario yaitu tanpa sisip trafo, skenario 1 dilakukan penyisipan trafo pada 3 bus yaitu bus 7 (SG0025TY), bus 11 (SG0033TY) dan bus 12 (SG0003TY) dengan beban sebesar 0,200 MW dan 0,100 MVAr skenario 2 dilakukan penyisipan trafo pada 6 bus yaitu bus 16 (SG0032TY), bus 38 (SG0015TY sampai bus 41 (SG0004TY) dan bus 43 (SG0012TY), skenario 3 dilakukan penyisipan trafo pada 9 bus yaitu bus 7, bus 11, bus 12, bus 16, bus 38 sampai bus 41 dan bus 43 dengan beban sebesar 1 MW dan 0,800 MVAr. Dalam proses penyelesaian pada Analisa disimulasikan menggunakan perangkat lunak (*software*) aplikasi MATLAB R2016a.

2.2 Pengertian Sistem Tenaga Listrik

Pada umumnya, sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu pembangkit tenaga listrik, penyaluran tenaga listrik, dan distribusi tenaga listrik. Ketiga bagian ini tidak dapat dipisahkan karena merupakan suatu sistem yang kompleks yang bekerja untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat - pusat beban [8]. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut :



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sumber : Mulyadi (2012)

Energi listrik yang dihasilkan pusat pembangkit listrik akan disalurkan melalui saluran transmisi kemudian melalui saluran distribusi akan sampai ke konsumen.

2.2.1 Pusat Pembangkit Listrik (*Power Plant*)

Pusat pembangkit listrik merupakan tempat pertama kali energi listrik dibangkitkan atau dihasilkan. Di sini terdapat turbin penggerak awal dan juga generator yang mengubah tenaga turbin menjadi energi listrik. Terdapat beberapa jenis pusat pembangkit listrik yang biasanya dibagi kedalam dua bagian besar yaitu pembangkit *hidro* (PLTA) dan pembangkit *thermal* (PLTU, PLTG, PLTGU, PLTD, PLTP).

2.2.2 Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan listrik hingga saluran distribusi listrik sehingga nantinya sampai pada konsumen atau pengguna listrik.

Macam-macam Saluran Transmisi:

1. Saluran udara : Kawat atau konduktor telanjang (tanpa isolasi) yang digantung dengan ketinggian tertentu pada tower dengan menggunakan isolator.
2. Saluran bawah tanah : kabel atau konduktor berisolasi yang ditanam dalam tanah dengan kedalaman tertentu.
3. Saluran bawah laut : kabel atau konduktor berisolasi yang diletakkan di dasar laut

Saluran transmisi biasanya digunakan untuk mengirimkan daya listrik untuk jarak yang relatif jauh. Dari ketiga jenis saluran transmisi, paling banyak digunakan adalah saluran udara, karena lebih ekonomis. Biaya pembangunan saluran udara relatif lebih ringan dibandingkan dengan jenis yang lain, karena menggunakan penghantar yang telanjang atau tidak berisolasi, sedang jenis yang lain harus menggunakan penghantar berisolasi. Penghantar merupakan komponen pokok dari saluran transmisi, sehingga biaya pembangunannya sangat dipengaruhi oleh jenis penghantar yang digunakan. Saluran bawah tanah dan saluran bawah laut hanya digunakan jika saluran udara tidak lagi bisa digunakan, misalnya untuk menyalurkan daya antar pulau.

Pada saluran bawah tanah dan saluran bawah laut, kekuatan fisik maupun listrik isolasi penghantar merupakan hal yang sangat penting, karena bila terjadi kerusakan atau kebocoran akan sangat membahayakan lingkungan di sekitarnya. Sedangkan pada saluran udara, yang penting adalah memenuhi batas ketinggian saluran minimum, sehingga induksi elektromagnetik dan pengaruh medan magnet yang ditimbulkan tidak membahayakan penghuni atau tanaman yang ada di bawah saluran tersebut.

Fungsi secara garis besar sebagai berikut:

1. Pembangkitan merupakan komponen yang berfungsi membangkitkan tenaga listrik, yaitu mengubah energi yang berasal dari sumber energi lain misalnya: air, batu bara, panas bumi, minyak bumi dll. menjadi energi listrik.
2. Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi dari pusat pembangkitan ke pusat beban.
3. Distribusi merupakan komponen yang berfungsi mendistribusikan energi listrik ke lokasi konsumen energi listrik.
4. Beban adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut.

Level tegangan saluran transmisi: Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) berkisar antara 70 s/d 150 kV, Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) di atas 150 kV s/d 750 kV dan Saluran Udara Tegangan Ultra Tinggi (SUTUT) di atas 750 kV.

2.2.3 Sistem Distribusi

Sistem distribusi ini merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan/konsumen dan berfungsi dalam hal pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat. Sub sistem ini terdiri dari : pusat pengatur atau GI, GH, saluran tegangan menengah atau jaringan primer (6 kV dan 20 kV) yang berupa saluran udara atau kabel bawah tanah, SUTR atau jaringan sekunder (380 V dan 220 V), gardu distribusi tegangan yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan baik tegangan menengah ataupun tegangan rendah, dan transformator.

2.3 Jaringan Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi dalam lingkup ketenagalistrikan dibatasi mulai dari GI sebagai terminal akhir dari saluran transmisi, kemudian dari GI tersebut didistribusikan ke gardu-gardu distribusi, baru kemudian ke pelanggan. Jaringan pada sistem distribusi tegangan menengah atau JTM merupakan bagian dari sistem distribusi yang berhubungan langsung ke pelanggan. JTM ini mempunyai peranan yang sangat penting bagi kelangsungan suplai energi listrik ke pelanggan. Berbagai persyaratan yang harus dipenuhi dalam perencanaan JTM antara lain meliputi konfigurasi jaringan, panjang maksimum jaringan, ukuran penghantar jaringan, kapasitas maksimum jaringan, jumlah fase jaringan, maksimum susut tegangan yang diperkenankan serta pemilihan tipe jaringan (saluran udara atau saluran bawah tanah).

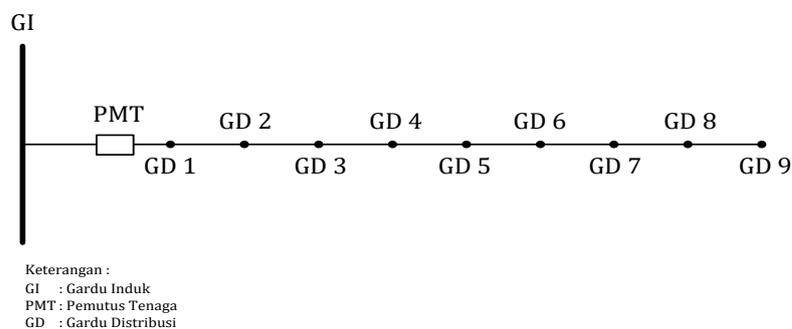
Di dalam konfigurasi sistem distribusi ditampilkan hubungan diantara komponen-komponen sistem yang digunakan. Komponen-komponen utama didalam sistem distribusi tenaga listrik adalah GI distribusi, jaringan primer, gardu distribusi, serta peralatan-peralatan pengamanan jaringan[6].

Secara umum sistem jaringan dengan keandalan yang tinggi akan diikuti dengan kebutuhan investasi yang meningkat. Jenis-jenis konfigurasi jaringan tegangan menengah antara lain :

2.3.1 Struktur Radial

Struktur radial adalah sistem dengan jaringan tunggal yang ditarik dari GI sampai ke pusat beban. Dilihat dari segi investasi maka JTM dengan struktur radial

ini merupakan sistem yang paling murah. Sistem operasi dan pengembangannya pun sederhana. Apabila dilihat dari sisi keandalan, struktur radial memiliki keandalan rendah. Sistem JTM struktur radial disuplai hanya dari satu sumber, bila pada satu sisi terjadi gangguan atau adanya perawatan ataupun penggantian peralatan, maka saluran pada ujung berikutnya akan mengalami penghentian suplai. Jaringan tegangan menengah struktur radial tepat untuk daerah-daerah yang belum memerlukan keandalan tinggi.

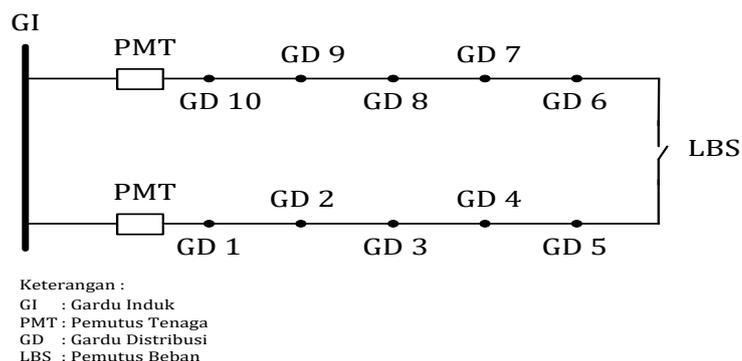


Gambar 2.2 Jaringan Tegangan Menengah Struktur Radial

Sumber : SPLN (1985)

2.3.2 Struktur Tertutup (*Loop*)

Struktur tertutup adalah sistem yang dikembangkan untuk meningkatkan keandalan sistem dan kontinuitas suplai dibandingkan dengan JTM struktur radial. Pada JTM struktur tertutup, kedua ujung jaringan disuplai dengan dua sumber, sehingga bila salah satu JTM mengalami gangguan, maka suplai dengan cepat dapat dialihkan dari sumber ujung yang lain, sehingga terhentinya suplai dapat dihindarkan. Dari segi investasi, pembiayaan jaringan tegangan menengah struktur tertutup lebih mahal dibandingkan sistem radial.

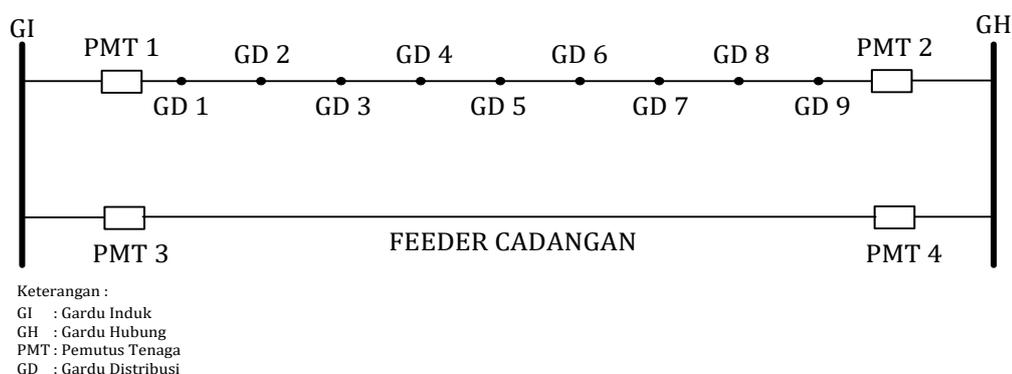


Gambar 2.3 Jaringan Tegangan Menengah Struktur Tertutup (*Loop*)

Sumber : SPLN 59 (1985)

2.3.3 Struktur Spindel

Struktur spindle merupakan suatu sistem yang pada operasi normal, salurannya berupa sistem radial murni hanya pemisah saluran ekspresnya yang terhubung. Pada saat terjadi gangguan disuatu saluran, maka pemisah disuatu saluran tersebut terhubung pada gardu refleksi (GH) sehingga pelayanan beban akan terus berlangsung. Saluran ekspres adalah saluran primer yang padanya tidak terdapat gardu distribusi yang berfungsi memberikan jalan dalam keadaan darurat.

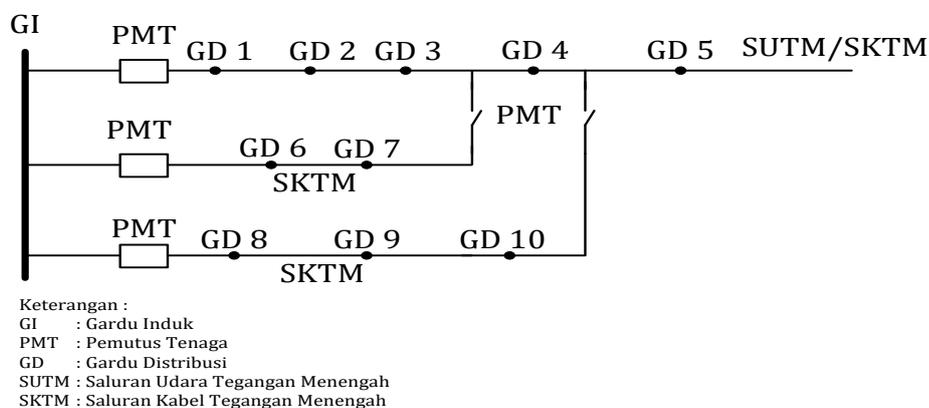


Gambar 2.4 Jaringan Tegangan Menengah Struktur Spindel

Sumber : SPLN 59 (1985)

2.3.4 Struktur Gugus (*Cluster*)

Sistem ini mirip dengan spindle, tetapi saluran ekspres selain sebagai saluran darurat juga berfungsi sebagai GH dan terdapat gardu distribusi.



Gambar 2.5. Jaringan Tegangan Menengah Struktur Gugus (*Cluster*)

Sumber : SPLN 59 (1985)

2.4 Jaringan Sistem Distribusi Sekunder

Menyatakan sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Sistem distribusi

sekunder ini menerima daya listrik dari transformator distribusi, serta mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. Mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik harus dalam kondisi bagus.

Saluran distribusi sekunder menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung dihubungkan dengan konsumen (pemakai tenaga listrik) [7].

2.5 Resistansi Saluran

Jenis-jenis penghantar yang digunakan pada saluran udara adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5% (Cu 97,5%), atau aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%) [10], [12].

Penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut :
AAC : *All Aluminium Conductor*, yaitu penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

AAAC : *All Aluminium Alloy Conductor*, yaitu penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

ACSR : *Aluminium Conductor, Steel Reinforced*, yaitu penghantar aluminium berinti penghantar baja.

ACAR : *Aluminium Conductor, Alloy Reinforced*, penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Resistansi saluran sangat penting dalam evaluasi efisiensi dan studi ekonomis saluran [10]. Resistansi DC pada penghantar pada temperatur tertentu adalah :

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A} \text{ ohm} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

R_{dc} = Resistansi penghantar (Ohm)

ρ = Resistivitas (Ohm/m)

l = Panjang penghantar (meter)

A = Luas penampang penghantar (m^2)

Resistansi penghantar dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu : frekuensi, sifat pilin, dan temperatur. Apabila arus bolak-balik yang mengalir dalam suatu penghantar, distribusi arusnya tidak merata pada permukaan penampang

penghantar maka kerapatan arus akan lebih besar pada permukaan penghantar, hal ini akan menyebabkan resistansi AC akan lebih besar dari resistansi DC. Ini terjadi sebagai akibat dari adanya efek kulit (*skin effect*).

Disebabkan oleh efek di atas, resistansi penghantar lebih baik ditentukan dari data pabrik.

2.6 Reaktansi Induktif Saluran

Dalam penurunan rumus-rumus untuk induktansi dan reaktansi induktif dari suatu penghantar biasanya diabaikan efek kulit (*skin effect*) dan efek sekitar (*proximity effect*) [10], [12].

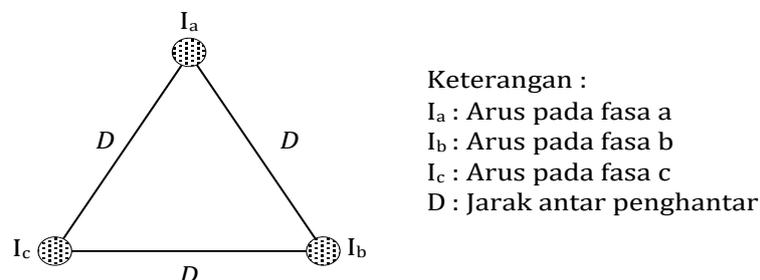
Efek kulit adalah gejala pada arus bolak-balik, bahwa kerapatan arus dalam penampang penghantar tersebut makin besar ke arah permukaan penghantar. Tetapi bila kita hanya meninjau frekuensi kerja (50 Hertz atau 60 Hertz) maka pengaruh efek kulit itu sangat kecil dan dapat diabaikan.

Efek sekitar ialah pengaruh dari penghantar lain yang berada di samping penghantar yang pertama (yang ditinjau) sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi bila radius penghantar kecil terhadap jarak antara kedua penghantar maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan.

Saluran tiga fasa dapat dibedakan menurut susunan penghantarnya yaitu saluran tiga fasa dengan jarak penghantar sama dan saluran tiga fasa dengan jarak penghantar yang tidak sama.

2.6.1 Jarak Antar Ketiga Penghantar Sama (*Symmetrical spacing*)

Diasumsikan saluran tiga fasa dengan tiga penghantar, tiap-tiap memiliki radius r . [1]. Jarak simetris dalam konfigurasi segitiga ditunjukkan pada Gambar 6 di bawah ini :



Gambar 2.6 Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Simetris
Sumber : SPLN 59 (1985)

Pada arus tiga fasa seimbang, diasumsikan :

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

Total fluk lingkup (*flux linkage*) pada penghantar fasa a adalah :

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D} \right) \text{ wb/m} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan :

$$I_b + I_c = -I_a$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} - I_a \ln \frac{1}{D} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{D}{r'} \right) \text{ wb/m} \dots\dots\dots(2.4)$$

Disebabkan simetris, $\lambda_a = \lambda_b = \lambda_c$, dan ketiga induktansi adalah identik, sehingga induktansi per fasa per kilometer panjang adalah :

$$L = 0.2 \ln \frac{D}{D_s} \text{ mH/km} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

λ_a = fluk lingkup (*flux linkage*) penghantar fasa a

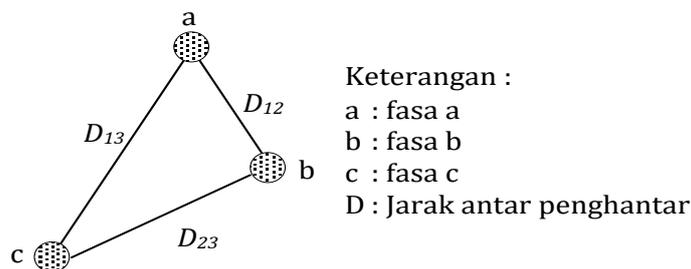
D = Jarak rata-rata geometris (*Geometric mean distance*)

D_s = Radius rata-rata geometris (*Geometric mean Radius*)

2.6.2 Jarak Antar Ketiga Penghantar Tidak Sama (*Asymmetrical spacing*)

Pada kenyataannya saluran tiga fasa tidak dapat dibentuk dengan jarak penghantar yang sama , disebabkan oleh pertimbangan konstruksi [1].

Dengan jarak yang tidak sama, sekalipun dengan arus yang seimbang, jatuh tegangan pada induktansi saluran akan tak seimbang. Pada saluran tiga fasa dengan jarak tiga penghantar yang tidak sama ditunjukkan pada Gambar 7 di bawah ini :



Gambar 2.7 saluran tiga fasa dengan jarak tidak simetris
 sumber : SPLN 59 (1985)

Fluk lingkup (*flux linkage*) pada tiga penghantar adalah :

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \text{wb/m} \\ \lambda_b &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{12}} + I_b \ln \frac{1}{r'} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \text{wb/m} \\ \lambda_c &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{13}} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{r'} \right) \text{wb/m} \dots \dots \dots (2.6) \end{aligned}$$

atau dibentuk kedalam matrik :

$$[\lambda] = [L][I] \text{wb/m} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana matrik induktansi dengan simetris L adalah :

$$L = 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_{12}} & \ln \frac{1}{D_{13}} \\ \ln \frac{1}{D_{12}} & \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_{23}} \\ \ln \frac{1}{D_{13}} & \ln \frac{1}{D_{23}} & \ln \frac{1}{r'} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.8)$$

Untuk arus tiga fasa seimbang dengan I_a sebagai referensi, kita mendapatkan :

$$I_b = I_a \angle 240^\circ = a^2 I_a$$

$$I_c = I_a \angle 120^\circ = a I_a$$

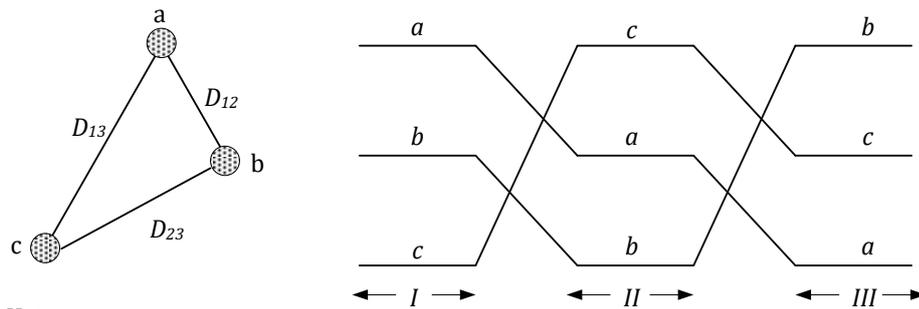
Hasil substitusi persamaan ke dalam persamaan adalah :

$$\begin{aligned} L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} &= 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{12}} + a \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \\ L_b = \frac{\lambda_b}{I_b} &= 2 \times 10^{-7} \left(a \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \\ L_c = \frac{\lambda_c}{I_c} &= 2 \times 10^{-7} \left(a^2 \ln \frac{1}{D_{13}} + a \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{r'} \right) \text{H/Km} \dots \dots \dots (2.9) \end{aligned}$$

Pengujian dari persamaan menunjukkan bahwa induktansi fasa tidak sama dan mengandung istilah imajiner karena induktansi bersama.

2.6.3 Transposisi Saluran

Transposisi digunakan untuk mengatasi tidak simetrisnya posisi penghantar. Penghantar tiap-tiap fasa ditransposisi sehingga tiap-tiap fasa menduduki posisi penghantar untuk 1/3 dari panjang nya. Keadaan ini membutuhkan paling sedikit dua titik transposisi, sehingga membagi jarak itu dalam tiga daerah yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut ini : [1].



Keterangan :
 a : fasa a
 b : fasa b
 c : fasa c
 D : Jarak antar penghantar

Gambar 2.8 Transposisi Saluran Tiga Fasa
 Sumber : SPLN 59 (1985)

Pada transposisi saluran tiap-tiap fasa mengambil tiga posisi, induktansi per fasa dapat diperoleh dengan mencari nilai rata-rata nya :

$$L = \frac{L_a + L_b + L_c}{3} \dots\dots\dots(2.10)$$

Catatan bahwa $a + a^2 = -1$, maka nilai rata-rata menjadi :

$$L = \frac{2 \times 10^{-7}}{3} \left(3 \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{D_{12}} - \ln \frac{1}{D_{23}} - \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{(D_{12} D_{23} D_{13})^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{(D_{12} D_{23} D_{13})^{\frac{1}{3}}}{r'} \dots\dots\dots(2.11)$$

Atau induktansi per fasa per kilometer adalah :

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{D_s} \text{ mH/Km} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}$$

Dimana :

- GMD = Jarak rata-rata geometris (*Geometric mean distance*)
- D_s = Radius rata-rata geometris (*Geometric mean Radius*)

2.7 Sistem Per-Unit (p.u)

Dalam banyak masalah kelistrikan perlu dinyatakan skala atau normalisasi besaran ukur (satuan). Umumnya hal ini dilakukan dalam analisis sistem tenaga dan metode yang standard dipakai adalah sistem per-unit (p.u) [10].

Secara historis telah banyak dilakukan untuk mempermudah proses perhitungan, terutama bila dilakukan dengan tangan. Juga telah terbukti keuntungannya setelah dipergunakan dalam proses komputer.

Keuntungan lain dari penggunaan sistem per-unit adalah :

1. Analisis jaringan akan lebih sederhana bila semua impedansi dari rangkaian pengganti yang diberikan dapat secara langsung dijumlahkan tanpa mempersoalkan sistem tegangannya.
2. Dapat memudahkan proses-proses pembagian dan perkalian akar 3 atau ($\sqrt{3}$) yang diperlukan saat sistem 3 ϕ seimbang dinyatakan oleh sistem per-fasa. Dengan demikian faktor $\sqrt{3}$ dan 3 yang menyatakan besaran untuk Δ dan Y. Dalam sistem 3 ϕ seimbang, secara langsung sudah dicakup oleh besaran dasar.
3. Umumnya impedansi peralatan listrik diberikan dalam % atau p.u oleh pabrik berdasarkan kapasitas identifikasinya.
4. Karakteristiknya (kinerja) yang berbeda dari banyak peralatan listrik dapat diestimasi dengan suatu perbandingan dan konstanta yang dinyatakan dalam p.u.
5. Konstanta mesin-mesin dapat secara mudah diperoleh sejak parameter-parameter peralatan perlengkapan yang sama masih dalam batas-batas ambang yang relatif dan tentunya dapat dibandingkan jika dinyatakan dalam per-unit berdasarkan kapasitas nominalnya.
6. Pemakaian sistem per-unit banyak mempermudah proses perhitungan dalam analisis sistem tenaga.

Untuk memudahkan perhitungan atau analisa pada sistem tenaga listrik biasanya dipakai nilai-nilai dalam “satuan” atau dalam “per-unit”. Nilai-nilai yang dinyatakan dalam satuan ini ialah nilai yang sebenarnya ada dibagi nilai dasar (*base value*).

$$\text{Nilai dalam p.u} = \frac{\text{nilai sebenarnya}}{\text{nilai dasar}}$$

Sebagai contoh, arus :

$$I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3}kV_{base}} \times 1.000 \text{ Amp} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$I_{p.u} = \frac{I_{actual}}{I_{base}} \text{ p.u} \dots\dots\dots(2.14)$$

Impedansi :

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} \text{ Ohm} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$Z_{p.u} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \text{ p.u} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana:

MVA_{base} = Daya (MVA)

kV_{base} = Tegangan dasar (kV)

I_{base} = Arus dasar (Ampere)

$I_{p.u}$ = Arus (p.u)

I_{actual} = Arus sebenarnya (Ampere)

Z_{base} = Impedansi dasar (Ohm)

$Z_{p.u}$ = Impedansi (p.u)

Z_{base} = Impedansi sebenarnya (Ohm)

Pada transformator daya pada umumnya informasi nilai reaktansi menggunakan nilai persentase.

Reaktansi transformator daya dengan daya dasar baru :

$$Xt_{new} = Xt_{old} \times \frac{MVA_{new}}{MVA_{old}} \times \frac{kV_{old}^2}{kV_{new}^2} \text{ p.u} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

Xt_{new} = Reaktansi transformator baru (p.u)

Xt_{old} = Reaktansi transformator lama (p.u)

MVA_{new} = Daya dasar baru (MVA)

MVA_{old} = Daya dasar lama (MVA)

kV_{new} = Tegangan dasar baru (kV)

kV_{old} = Tegangan dasar lama (kV)

2.8 Pengertian Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah bangunan gardu transformator yang memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pemanfaat baik dengan tegangan menengah maupun tegangan rendah.

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan ke konsumen atau mendistribusikan

tenaga listrik pada beban baik konsumen tegangan menengah maupun konsumen tegangan rendah.

Konstruksi gardu distribusi transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan listrik dan jaringan distribusi tegangan tinggi menjadi tegangan terpakai pada jaringan pada jaringan distribusi tegangan rendah (*Step Down Transformer*) dari tegangan 20 kV menjadi tegangan 380 Volt atau 220 Volt. Transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik (*Step Up Transformer*) hanya digunakan pada pusat pembangkit tenaga listrik agar tenaga yang di distribusikan pada suatu jaringan panjang (*Long Line*) tidak mengalami penurunan tegangan (*voltage drop*) yang berarti tidak melebihi ketentuan *voltage drop* yang diperkenankan 5% dan tidak kurang dari 10% dari tegangan semula [1].

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

1. Jenis pemasangan :
 - a. Gardu pasangan luar : Gardu portal dan Gardu cantola.
 - b. Gardu pasangan dalam : Gardu beton dan Gardu kios.
2. Jenis konstruksinya :
 - a. Gardu beton.
 - b. Gardu tiang : Gardu portal dan Gardu Cantol.
 - c. Gardu kios.
3. Jenis penggunaannya :
 - a. Gardu pelanggan utama.
 - b. Gardu pelanggan khusus.

Khusus pengertian gardu hubung adalah gardu yang ditujukan untuk memudahkan mengalihkan pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi atau tidak dilengkapi RTU (Remote Terminal Unit). Untuk fasilitas DC Suplly dari trafo distribusi pemakaian sendiri atau trafo distribusi untuk umum yang diletakkan dalam satu kesalaha.

2.9 Konstruksi Gardu Distribusi

Adapun beberapa konstruksi dari Gardu Distribusi, yaitu :

2.9.1 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

SUTM adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen JTM yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton [11].

Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan faktor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan seperti jarak aman minimum yang harus dipenuhi penghantar bertegangan 20 kV tersebut antar fasa atau dengan bangunan atau dengan tanaman atau dengan jangkauan manusia.

SUTM merupakan jaringan kawat tidak berisolasi dan berisolasi. Bagian utamanya adalah tiang (beton, besi), *cross arm* dan konduktor. Konduktor (kabel) yang biasa digunakan adalah AAAC (*aluminium-magnesium-silicon*) dengan luas penampang berukuran yang berbeda-beda dan sudah diatur ketentuan untuk luas penampang tersebut untuk impedansi urutan positif dan Kuat Hantar Arus (KHA) dalam SPLN No. 64 Tahun 1985 : 64 [11].

Tabel 2.1. Saluran Udara Tegangan Menengah AAAC 20 kV

No.	Luas Penampang (mm ²)	Impedansi urutan positif (Ohm/Km)	KHA terus menerus, untuk penghantar AAAC (A)
1.	16	2,0161 + j 0,4036	105
2.	25	1,2903 + j 0,3895	135
3.	35	0,9217 + j 0,3790	170
4.	50	0,6452 + j 0,3678	210
5.	70	0,4608 + j 0,3572	255
6.	95	0,3096 + j 0,3449	320
7.	120	0,2668 + j 0,3376	365
No.	Luas Penampang (mm ²)	Impedansi urutan positif (Ohm/Km)	KHA terus menerus, untuk penghantar AAAC (A)
8.	150	0,2162 + j 0,3305	425
9.	185	0,1744 + j 0,3239	490
10.	240	0,1344 + j 0,3158	585

Sumber : SPLN 64 (1985) dan SPLN 64 (1995)

2.9.2 Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Konstruksi SKTM ini adalah konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan tenaga listrik Tegangan Menengah, tetapi relatif lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama.

Keadaan ini dimungkinkan dengan konstruksi isolasi penghantar per Fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan. Pada rentang biaya yang diperlukan, konstruksi ditanam langsung adalah termurah bila dibandingkan dengan penggunaan konduit atau bahkan terowongan beton (tunneling).

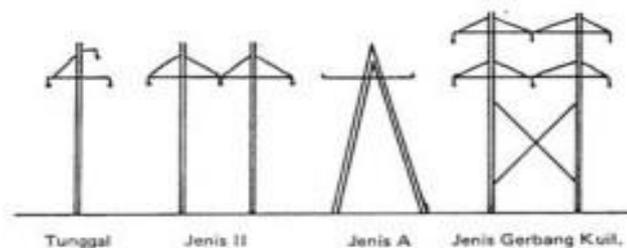
Kabel yang digunakan AAAC, kabel ini terbuat dari *aluminium-magnesium-silicon* campuran logam, keterhantaran listrik tinggi yang berisi *magnesium silicide*,

untuk memberi sifat yang lebih baik. Kabel ini biasanya dibuat dari paduan aluminium 6201. AAAC mempunyai suatu anti karat dan kekuatan yang baik, sehingga daya hantarnya lebih baik.

2.9.3 Tiang Listrik

Tiang berfungsi sebagai penyangga kawat agar berada di atas tiang dengan jarak aman sesuai dengan ketentuan. Terbuat dari bahan yang kuat menahan beban tarik maupun tekan yang berasal dari kawat penghantar ataupun tekanan angin. Menurut bahannya tiang listrik terdiri dari :

1. Tiang Kayu



Gambar 2.9 Konstruksi Tiang Kayu Pada Jaringan Distribusi

Sumber : SPLN 115 (1995)

Tiang kayu terbuat dari kayu yang tahan perubahan cuaca (panas dan hujan) dan tidak mudah rapuh oleh bahan-bahan lain yang ada di dalam tanah, tidak dimakan rayap atau binatang pengerat. Untuk Indonesia jenis tiang kayu yang digunakan dari jenis kayu ulin (*Eusidiraxylon Zwageri*), kayu jati (*Tectona Grandis*), kayu rasamala (*Altanghia Exelsa Novanla*). Sedangkan di Amerika Serikat jenis tiang kayu yang digunakan dari jenis kayu den (*douglas fir*), kayu cemara (*yellow pine*), dan kayu aras (*western red cendar*), kayu Ulin (*Eusidiraxylon Zwageri*), kayu Jati (*Tectona Grandis*), kayu Rasamala (*Altanghia Exelsa Novanla*), kayu Den (*Douglas Fir*), kayu Cemara (*Yellow Pine*), dan kayu Aras (*Western Red Cender*) [12].

Kelebihan tiang kayu ini adalah mempunyai konstruksi yang sederhana, biaya investasi lebih murah, merupakan bahan penyekat (isolasi) yang baik buat penompang jaringan, dapat dibentuk menurut konstruksi, biaya perawatan rendah dan bebas dari gangguan petir sedangkan kelemahan tiang kayu ini adalah tergantung pada persediaan kayu yang ada, perlu pengawetan terlebih dahulu, umur lebih pendek : 10 - 12 tahun bila tak diawetkan dan 20 - 30 tahun bila diawetkan,

tidak dapat menyangga beban secara aman, dan apalagi bila terjadi satu atau dua kawat terputus.

Pada saat ini tiang kayu sudah jarang digunakan lagi dengan alasan ekonomis, yaitu tiang dari bahan beton lebih murah harganya.

Tabel 2.2 Perbandingan Kekuatan Tiang Kayu

Jenis Kayu	Parameter Kelembaban (%)	Berat Jenis (g/cm ²)	Elastisitas Modulus (kg/cm ²)	Ketegangan Serat (kg/cm ²)	Kekuatan Tindas (kg/cm ²)
Tiang Den	12	0,47	137	548	522
Tiang Cemara	12	0,51	127	548	498
Tiang Aras	12	0,33	79	422	353
Tiang Damar	15,7	0,45	4	-	295
Tiang Rasamala	14,7	0,80	92	575	598
Tiang Ulin	15,5	1,04	184	1,113	734

Sumber : SPLN 115 (1995)

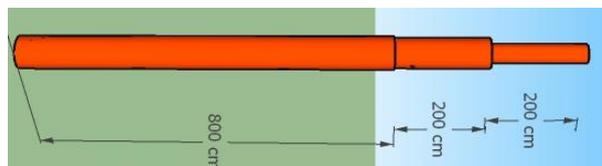
Tabel 2.3 Ukuran Tiang Kayu

Tinggi Tiang (m)	Diameter Bagian Atas (m)	Diameter Bagian Bawah (m)	Kedalaman Pondasi (m)
9	15	20	1,65
	20	25	1,65
	20	30	1,65
10	15	20	1,65
	20	25	1,65
	20	30	1,65
11	15	20	1,80
	20	25	1,80
	20	30	1,80
12	20	20	2,00
	20	25	2,00
	20	30	2,00
13	20	20	2,15
	20	25	2,15
	20	30	2,15
14	20	20	2,30
	20	25	2,30

	20	30	2,30
15	20	20	2,50
	20	25	2,50
	20	30	2,50
16	20	20	2,65
	20	25	2,65
	20	30	2,65
17	20	20	3,00
	20	25	3,00
	20	30	3,00

Sumber : SPLN 115 (1995)

2. Tiang besi / baja



Gambar 2.10 Tiang Listrik Baja

Sumber : Desain 2021 (*apk. SketchUp 2019*)

Tiang besi terbuat dari bahan baja terdiri dari 2 atau 3 susun pipa dengan ukuran berbeda yang bagian atas lebih kecil dari bagian dibawahnya, setiap pipa disambung, bagian yang lebih kecil dimasukkan kedalam bagian yang lebih besar sepanjang 50 cm dipasang paku dan dilas [13].

Spesifikasi tiang besi yang dapat digunakan pada Saluran Udara Tegangan Menengah yaitu tiang dengan panjang 12 meter, sesuai SPLN D3.019-1 Tahun 2012 : 5 tentang spesifikasi tiang listrik dan lengkapannya dapat dilihat pada Tabel 4 berikut :

Tabel 2.4 Standar Tiang Baja

Beban Kerja (daN)		12/200	12/350	12/500	13/200	13/350	13/500
A	Diameter segmen (mm)	216,3	267,4	318,5	216,3	267,4	318,5
	Tebal pipa (mm)	6,0	6,0	6,0	6,0	8,0	7,0
	Panjang segmen (m)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
B	Diameter segmen (mm)	190,7	216,3	267,4	190,7	216,3	267,4
	Tebal pipa (mm)	5,0	6,0	6,0	6,0	7,0	6,0
	Panjang segmen (m)	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0
C	Diameter segmen (mm)	139,8	165,2	216,3	139,8	165,2	216,3
	Tebal pipa (mm)	4,0	4,5	4,5	4,0	4,5	4,5
	Panjang segmen (m)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Lenturan maksimum pada beban kerja (mm)		202	189	152	260	207	187
Berat tiang (kg)		342	440	538	389	581	627

Sumber : SPLN D3.019-1 (2012)

Catatan 1: Toleransi dari ketentuan pada tabel di atas adalah diameter luar $\pm 0,5\%$ dengan tebal $\pm 10\%$; $-1,2\%$ dan panjang dasar ± 15 mm dengan panjang segmen ± 40 mm.

Catatan 2: Tiang SUTM yang dimaksudkan pada tabel di atas adalah untuk penggunaan SUTM murni dan campuran SUTM dengan SUTR.

Catatan 3: Tiang dengan panjang lebih besar dari 12 meter merupakan tipe khusus, dipakai untuk menempuh jarak bebas (ground clearance) 7 meter pada titik terendah andongan SUTM.

3. Tiang beton

Tiang beton terbuat dari bahan campuran semen, pasir dan batu split, dicor dengan kerangka besi baja. Bentuk tiang beton ada 2 macam, yang berbentuk profil H dan berbentuk bulat.

2.9.4 Cross Arm (Lengan Tiang) atau Travers

Cross Arm dipakai untuk menjaga penghantar dan peralatan yang perlu dipasang diatas tiang. Material *cross arm* terbuat dari besi. *Cross arm* dipasang pada tiang. Pemasangan dapat dengan memasang klem-klem, disekrup dengan baut dan mur secara langsung. Pada *cross arm* dipasang baut-baut penyangga isolator dan peralatan lainnya, biasanya *cross arm* ini dibor terlebih dahulu untuk membuat lubang-lubang baut. Dalam bahasa lapangannya pada pln yaitu bracket.

2.9.5 Isolator Piring

Isolator piring dipakai isolator penegang dan isolator gantung. Isolator penegang yaitu isolator yang berfungsi untuk memegang kawat penghantar pada awal atau akhir penarikan kawat penghantar. Jadi isolator penegang terdapat pada travers tiang awal/akhir, tiang penegang, tiang pemisah, dan tiang pencabangan.

2.9.6 Isolator Tumpu

Isolator tumpu berfungsi sebagai tempat mengikat kawat penghantar pada travers tiang lurus, tiang sudut kecil, dan penghubung pada travers tiang penegang.

2.9.7 Lighting Arrester (LA)

Penggunaan LA pada sistem distribusi adalah untuk melindungi peralatan terhadap gangguan akibat sambaran petir. Arrester juga digunakan untuk melindungi saluran distribusi dari flashover. LA dipasang dekat atau pada peralatan yang dihubungkan dari fasa konduktor ke tanah.

Pada saat sistem bekerja normal, arrester memiliki sifat sebagai isolator. Apabila terjadi sambaran petir, arrester akan berubah menjadi konduktor dan membuat jalur ke tanah (*bypass*) yang mudah dilalui oleh arus petir, sehingga tidak menimbulkan tegangan lebih yang tinggi pada trafo.

2.9.8 Fuse Cut Out (FCO)

FCO adalah peralatan proteksi yang bekerja apabila terjadi gangguan arus lebih. Alat ini akan memutuskan rangkaian listrik yang satu dengan yang lain apabila dilewati arus yang melewati kapasitas kerjanya.

Fungsi peralatan pelindung arus lebih pada suatu sistem jaringan adalah mendeteksi gangguan dalam rangkaian, dan memutus arus lebih pada harga rating pemutusannya, sertadapat membantu bilamana peralatan pelindung yang lain yang berdekatan tidak dapat bekerja dengan baik.

Peralatan FCO digunakan sebagai pengaman dan pemisah daerah yang terkena gangguan, agar daerah pemadaman tidak terlalu luas. Pada sistem jaringan distribusi, FCO juga dipasang untuk mengamankan instrumen lainnya, seperti : peralatan transformator, kapasitor pengatur tegangan dan jaringan percabangan satu phasa.

2.9.9 Transformator

Transformator adalah peralatan pada tenaga listrik yang berfungsi untuk memindahkan atau menyalurkan tenaga listrik tegangan rendah ketegangan menengah atau sebaliknya.

2.9.10 Panel PHB-TR

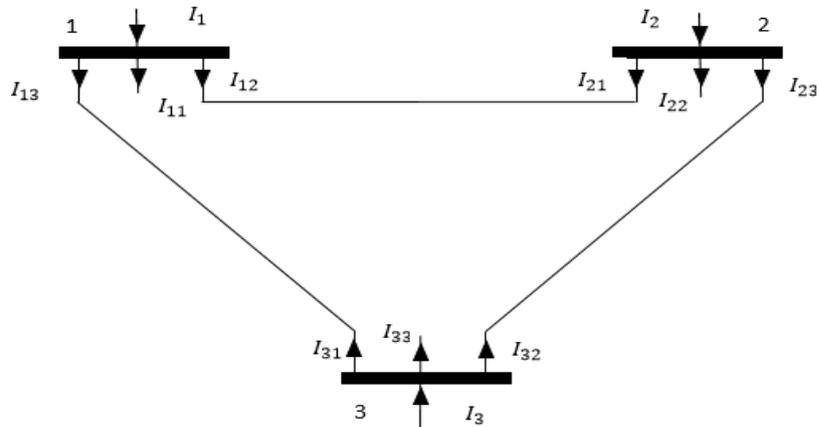
PHB TR adalah kependekan dari Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah, atau istilah lainnya papan bagi. Fungsinya untuk membagi tegangan rendah ke saluran rumah tangga, istilah mudahnya PHB TR adalah terminal pembagi dari trafo pada gardu listrik ke jaringan rumah tangga.

Fungsi dari PHB-TR adalah :

1. Mengendalikan sirkuit dilakukan oleh saklar utama.
2. Melindungi sirkuit dilakukan oleh fasa atau pelebur.
3. Membagi sirkuit dilakukan oleh pembagian jurusan atau kelompok.

2.10 Bentuk Matriks Admitansi Bus

Berdasarkan hukum Kirchoff impedansi-impedansi di ubah ke admitansi-admitansi yang terlihat seperti pada Gambar 11 [10]



Gambar 2.11 Sistem Tenaga Dengan 3 Bus
 Sumber : SPLN 59 (1985)

Pada hukum kirchoff

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{11} + I_{12} + I_{13} \\
 &= V_1 y_{11} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13} \\
 &= V_1 (y_{11} + y_{12} + y_{13}) - V_2 y_{12} - V_3 y_{13} \\
 &= Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 + Y_{13} V_3 \dots\dots\dots(2.18)
 \end{aligned}$$

Di sini y_{11} merupakan admitansi *shunt* pada bus 1, maka :

$$Y_{11} = y_{11} + y_{12} + y_{13} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$Y_{12} = -y_{12} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$Y_{13} = -y_{13} \dots\dots\dots(2.21)$$

Rumus umum dari admitansi sendiri maupun bersama dapat dilihat pada persamaan dibawah ini :

$$Y_{pp} = \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^n y_{pq} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$Y_{pq} = -y_{pq} = Y_{qp} \dots\dots\dots(2.23)$$

Dengan cara yang sama persamaan-persamaan arus untuk admitansi yang lain dapat ditulis sebagai berikut :

$$I_2 = V_1 Y_{21} + V_2 Y_{22} + V_3 Y_{23} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$I_3 = V_1 Y_{31} + V_2 Y_{32} + V_3 Y_{33} \dots\dots\dots(2.25)$$

Persamaan-persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

Atau persamaan-persamaan ini dapat disusun sebagai berikut :

$$I_p = \sum_{q=1}^3 Y_{pq} V_q \quad , \quad p = 1,2,3$$

Dari sini dapat di tulis persamaan arus untuk sistem n-bus, dimana masing-masing simpul terhubung satu sama lain dan rumus umumnya persamaan sebagai berikut :

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad , \quad p = 1,2,3,\dots,n \dots\dots\dots (2.26)$$

Dari persamaan (26) dapat ditulis dalam bentuk matriks jika persamaan matriks lebih banyak (n) maka persamaan-persamaan ini dapat disusun sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.27)$$

Atau $I_{Bus} = Y_{Bus} V_{Bus}$

Tegangan di setiap bus terdiri dari dua besaran yakni besaran $|V|$ dan sudut δ atau dalam koordinat tegak lurus bagian nyata e dan bagian khayal f . Jadi kalua ada n buah bus berarti ada 2n buah besaran yang harus ditentukan. Dalam persoalan aliran daya listrik, dikenal 3 tipe bus :

1. Bus-PQ atau bus beban, disini daya aktif P maupun daya reaktif Q dua-duanya diketahui.
2. Bus-PV atau bus pembangkit, disini daya aktif P dan besar tegangan $|V|$ yang diketahui.
3. Bus Referensi (swing) atau bus penadah (*slack bus*), disini kedua besaran tegangan $|V|$ dan δ diketahui.

Konsep bus penadah dalam persoalan aliran daya listrik diperlukan, karena bus tersebut akan menanggung semua rugi-rugi daya yang terjadi pada jaringan. Rugi-rugi daya ini, khususnya daya aktif tidak dapat dibebankan pada bus jenis

lainnya mengingat besarnya hanya dapat diketahui justru setelah selesai perhitungan.

2.11 Persamaan-persamaan Aliran Daya

2.11.1 Persamaan Pembebanan

Daya aktif dan daya reaktif pada salah satu bus p:

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* i_{pq} \text{ (aktif)} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$P_{pq} + jQ_{pq} = V_p i_{pq}^* \text{ (reaktif)} \dots\dots\dots (2.29)$$

dan arus

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$I_i = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \dots\dots\dots (2.31)$$

I_p Bertanda positif bila arus ke bus dan bertanda negatif bila arus mengalir dari bus, dan tanda menunjukkan susut fasa tertinggal (*lagging*).[9]

Bila elemen shunt tidak termasuk dalam matrik maka arus total pada bus p adalah :

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - Y_p V_p \dots\dots\dots (2.32)$$

Dimana :

Y_p = admitansi shunt total pada bus p

$Y_p V_p$ = arus shunt yang mengalir dari bus p ke tanah

2.11.2 Persamaan Aliran Arus

Setelah tegangan-tegangan diketahui maka arus yang mengalir dari bus p ke bus q dapat diketahui sebagai berikut :

$$I_{pq} = (V_p - V_q) Y_{pq} + \frac{V_p Y_{pq}}{2} \dots\dots\dots (2.33)$$

Dimana:

Y_{pq} = admitansi saluran p ke q

Y_{pq}' = admitansi saluran p – q

$\frac{V_p Y_{pq}}{2}$ = kontribusi arus pada bus p oleh arus shunt

2.11.3 Persamaan Daya

Daya kompleks yang mengalir dari bus p ke bus q :

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* i_{pq} = S_{pq} \dots\dots\dots(2.34)$$

atau

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* (V_p - V_q)Y_{pq} + V_p^* \frac{V_p Y'_{pq}}{2} = S_{pq} \dots\dots\dots(2.35)$$

Sedangkan daya kompleks yang mengalir dari bus q ke bus p :

$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q^* (V_q - V_p)Y_{qp} + V_q^* \frac{V_q Y'_{qp}}{2} = S_{qp} \dots\dots\dots(2.36)$$

Jumlah aljabar persamaan (33) dan (34) adalah rugi-rugi pada transmisi yaitu seperti persamaan berikut:

$$SL_{pq} = S_{pq} + S_{qp} \dots\dots\dots(2.37)$$

Dimana :

- SL_{pq} = Rugi-rugi saluran bus p ke bus q
- S_{pq} = Daya kompleks mengalir dari bus p ke bus q
- S_{qp} = Daya kompleks mengalir dari bus q ke bus p

2.12 Aliran Daya Dengan Metode *Newton-Raphson*

Studi aliran daya atau *loadflow* adalah bagian penting dalam analisa sistem tenaga. Pada umumnya perhitungan aliran daya berguna untuk perencanaan, penjadwalan ekonomis, dan kontrol pada sistem ekisting untuk pengembangan dimasa yang akan datang. Permasalahan aliran daya terdiri dari nilai tegangan dan sudut fasa tegangan pada tiap-tiap bus dan daya aktif dan reaktif yang mengalir pada tiap saluran. Pada solusi permasalahan aliran daya, sistem diasumsikan dalam operasi seimbang dan digunakan model per fasa. Tiap bus dalam sistem tenaga listrik melibatkan empat besaran yaitu : daya aktif (P), daya reaktif (Q), tegangan (V) dan sudut fasa tegangan (δ) [10], [15].

Perhitungan aliran daya dengan metode *Newton Rhapsion* mempunyai kelebihan dan kekurangan [19]:

1. Kelebihan:
 - a. Mempunyai kurva iterasi lebih baik.
 - b. Lebih stabil untuk mencapai komvergen cocok untuk bus yang sedikit dan banyak.

- c. Lebih sesuai untuk menghitung aliran beban pada sistem dengan jumlah yang besar.
- 2. Kekurangan:
 - a. Tidak sesuai untuk sistem yang kecil.
 - b. Untuk membuat elemen matriks membutuhkan pemecahan matematik yang lama.
 - c. Operasi matematik lebih sulit.

Bus-bus sistem umumnya diklasifikasikan dalam tiga tipe yaitu :

1. *Slack bus* : dikenal sebagai *swing bus* diambil sebagai referensi dimana tegangan $|V|$ dan sudut fasa tegangan δ diketahui. Bus ini menghasilkan perbedaan antara beban terjadwal dengan daya yang dibangkitkan karena disebabkan oleh rugi-rugi pada saluran.
2. Bus beban (*load bus*) : pada bus ini daya aktif P dan daya reaktif Q diketahui. Tegangan dan sudut fasa tegangan belum diketahui. Bus ini umumnya disebut bus P-Q.
3. *Regulated bus* : bus ini merupakan bus pembangkit yang dikenal dengan bus kontrol tegangan. Pada bus ini daya aktif dan tegangan diketahui. Bus ini umumnya disebut bus P-V.

Menurut tipikal bus pada sistem tenaga yang ditunjukkan pada Gambar 12, saluran transmisi direpresentasikan oleh model saluran π dimana impedansi saluran telah dikonversikan pada admitansi per unit berdasarkan MVA dasar.

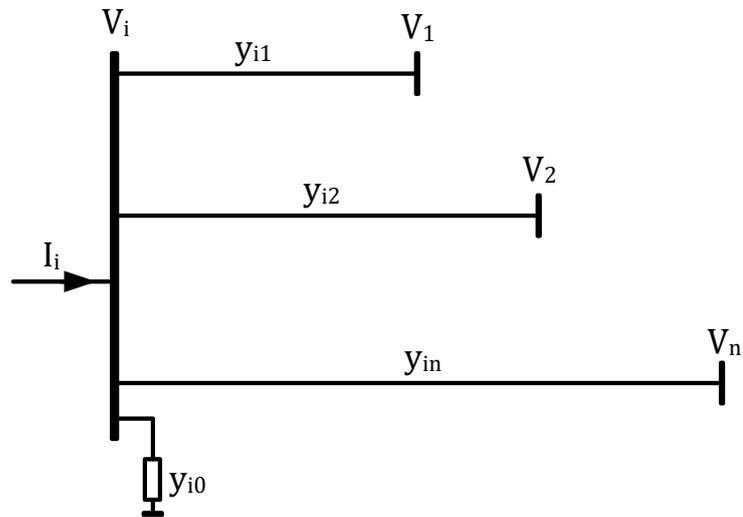
Menggunakan hukum *Kirchoff* untuk arus (*Kirchoff Current Law*) pada bus diperoleh :

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \dots\dots\dots(2.38)$$

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \dots\dots\dots(2.39)$$

atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.40)$$



Gambar 2.12 Tipikal Bus Pada Sistem Tenaga
 Sumber : SPLN 59 (1985)

Daya aktif dan reaktif pada bus i adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \dots\dots\dots(2.41)$$

atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \dots\dots\dots(2.42)$$

Substitusi I_i kedalam persamaan berikut :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.43)$$

Dari hubungan di atas, rumus matematika permasalahan aliran daya menghasilkan persamaan aljabar non-linier yang harus dipecahkan dengan dengan teknik iterasi. Untuk sistem tenaga yang kompleks aliran daya dengan metode *Newton-Raphson* lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang diperlukan untuk mendapatkan solusi tidak tergantung pada ukuran sistem, tetapi evaluasi yang lebih fungsional diperlukan pada setiap iterasi. Karena dalam masalah aliran daya daya nyata dan besar tegangan ditentukan untuk bus yang dikontrol tegangan, persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk kutub. Untuk tipikal bus pada sistem tenaga yang ditunjukkan pada Gambar 18, arus masuk ke bus i merupakan persamaan (37). Persamaan dapat ditulis kembali dalam bentuk matrik bus admitansi sebagai berikut:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots\dots\dots(2.44)$$

Karena,

$$Y_{ij} = G_{ij} + j B_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$$

$$V_j = |V_j| \angle \delta_j$$

Dimana :

$$|Y_{ij}| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$\theta_{ij} = \tan^{-1} G/B$$

Pada persamaan di atas, j termasuk bus i . Dalam bentuk polar diperoleh persamaan berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.45)$$

Daya kompleks pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots(2.46)$$

Substitusi persamaan (43) untuk I_i ke dalam persamaan (45)

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.47)$$

Memisahkan bagian real dan imajiner

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.48)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.49)$$

Dalam sistem tenaga, bus beban mempunyai dua persamaan yaitu (Pp,Qp) dan dalam hal ini kedua persamaan itu bias diartikan 2 variabel, yaitu :

$$F(X_1, X_2) = C$$

Atau secara umum dapat dituliskan,

$$f_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial X_1}\right)^{(0)} \Delta X_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial X_2}\right)^{(0)} \Delta X_2 = C_1 \dots\dots\dots(2.50)$$

$$f_2^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial X_1}\right)^{(0)} \Delta X_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial X_2}\right)^{(0)} \Delta X_2 = C_2 \dots\dots\dots(2.51)$$

Jika,

$$C_1 - f_1^{(0)} = \Delta C_1$$

$$C_2 - f_2^{(0)} = \Delta C_2$$

Maka persamaan (43) dan (44) menjadi :

$$\Delta C_1 = \left(\frac{\partial f_1}{\partial X_1}\right)^{(0)} \Delta X_1 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial X_2}\right)^{(0)} \Delta X_2 \dots\dots\dots(2.52)$$

$$\Delta C_2 = \left(\frac{\partial f_2}{\partial X_1}\right)^{(0)} \Delta X_1 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial X_2}\right)^{(0)} \Delta X_2 \dots\dots\dots(2.53)$$

Selanjutnya,

$f(X_1, X_2)$ identik dengan $f(\delta, |V|)$

C_1 identik dengan P

C_2 identik dengan Q

Sehingga $f_1(X_1, X_2) = C_1$; $f_2(X_1, X_2) = C_2$

Menjadi $f_1(\delta, |V|) = P$; $f_2(\delta, |V|) = Q$

Jadi, persamaan (2.45) dan (2.46) akan menjadi :

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial \delta}\right)^{(0)} \Delta \delta^{(0)} + \left(\frac{\partial P}{\partial |V|}\right)^{(0)} \Delta |V|^{(0)} = J_1 \Delta \delta + J_2 \Delta |V|$$

Dan

$$\Delta Q = \left(\frac{\partial Q}{\partial \delta}\right)^{(0)} \Delta \delta^{(0)} + \left(\frac{\partial Q}{\partial |V|}\right)^{(0)} \Delta |V|^{(0)} = J_3 \Delta \delta + J_4 \Delta |V|$$

Persamaan (47) dan (48) merupakan satu persamaan aljabar nonlinier dalam hal variabel independen, besar tegangan (p.u), dan sudut fasa (radian). Dengan bantuan Deret Taylor, mengabaikan semua suku orde yang lebih tinggi menghasilkan himpunan persamaan linier. Sehingga dapat diuraikan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.54)$$

Sedangkan matriks jacobiannya adalah

$$J_1 = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_3}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \quad J_2 = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V|_3}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V|_3}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.55)$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V|_3}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V|_3}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix}$$

Dengan bantuan Deret Taylor, fungsi nonlinier menjadi linier. Sehingga :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{(k)}}{\partial \delta_1} & \vdots & \frac{\partial P_1^{(k)}}{\partial |V_1|} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{\partial Q_1^{(k)}}{\partial \delta_1} & \vdots & \frac{\partial Q_1^{(k)}}{\partial |V_1|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

Sehingga persamaannya menjadi berikut :

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

Dimana elemen J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.56)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.57)$$

Dimana elemen J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.58)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.59)$$

Dimana elemen J_3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.60)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.61)$$

Dimana elemen J_4 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}|\sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i}^N |V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.62)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.63)$$

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

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.64)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.65)$$

Dalam persamaan (53), bus 1 diasumsikan sebagai bus slack. Matriks jacobian memberikan hubungan linier antara perubahan kecil pada sudut tegangan $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan besaran tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dengan perubahan kecil daya aktif dan reaktif pada $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$. Elemen dari matriks Jacobian merupakan turunan parsial dari (47) dan (48), dievaluasi pada $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta |V_i^{(k)}|$. Persamaan (53) dapat ditulis secara singkat sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.66)$$

Perkiraan terbaru untuk tegangan bus adalah :

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots\dots\dots(2.67)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots\dots\dots(2.68)$$

Aliran arus di setiap saluran dalam system dari bus i ke bus j adalah :

$$I_{ij}^{(k)} = y_{ij}(V_i^{(k)} - V_j^{(k)}) \dots\dots\dots(2.69)$$

Dan aliran arus dari bus j ke bus i adalah :

$$I_{ji}^{(k)} = y_{ji}(V_j^{(k)} - V_i^{(k)}) \dots\dots\dots(2.70)$$

Sementara itu untuk aliran daya dari bus i ke bus j adalah :

$$S_{ij}^{(k)} = V_i^{(k)} I_{ij}^{(k)*} \dots\dots\dots(2.71)$$

Dan untuk aliran daya dari bus j ke bus i adalah :

$$S_{ji}^{(k)} = V_j^{(k)} I_{ji}^{(k)*} \dots\dots\dots (2.72)$$

Maka, dapat dihitung rugi-rugi daya pada setiap saluran sistem :

$$S_{rugi-rugi (ij)}^{(k)} = S_{ij}^{(k)} + S_{ji}^{(k)} \dots\dots\dots(2.73)$$

$$P_{ij} \equiv P_{pq}, P_{qp}$$

$$Q_{ij} \equiv Q_{pq}, Q_{qp}$$

$$P_{rugi-rugi}^{(k)} = Real \left(S_{rugi-rugi (ij)}^{(k)} \right) \quad [MW] \dots\dots\dots(2.74)$$

$$Q_{rugi-rugi}^{(k)} = imag \left(S_{rugi-rugi (ij)}^{(k)} \right) \quad [MVAR] \dots\dots\dots(2.75)$$

Prosedur solusi aliran daya dengan metode *Newton-Rapshon* adalah sebagai berikut :

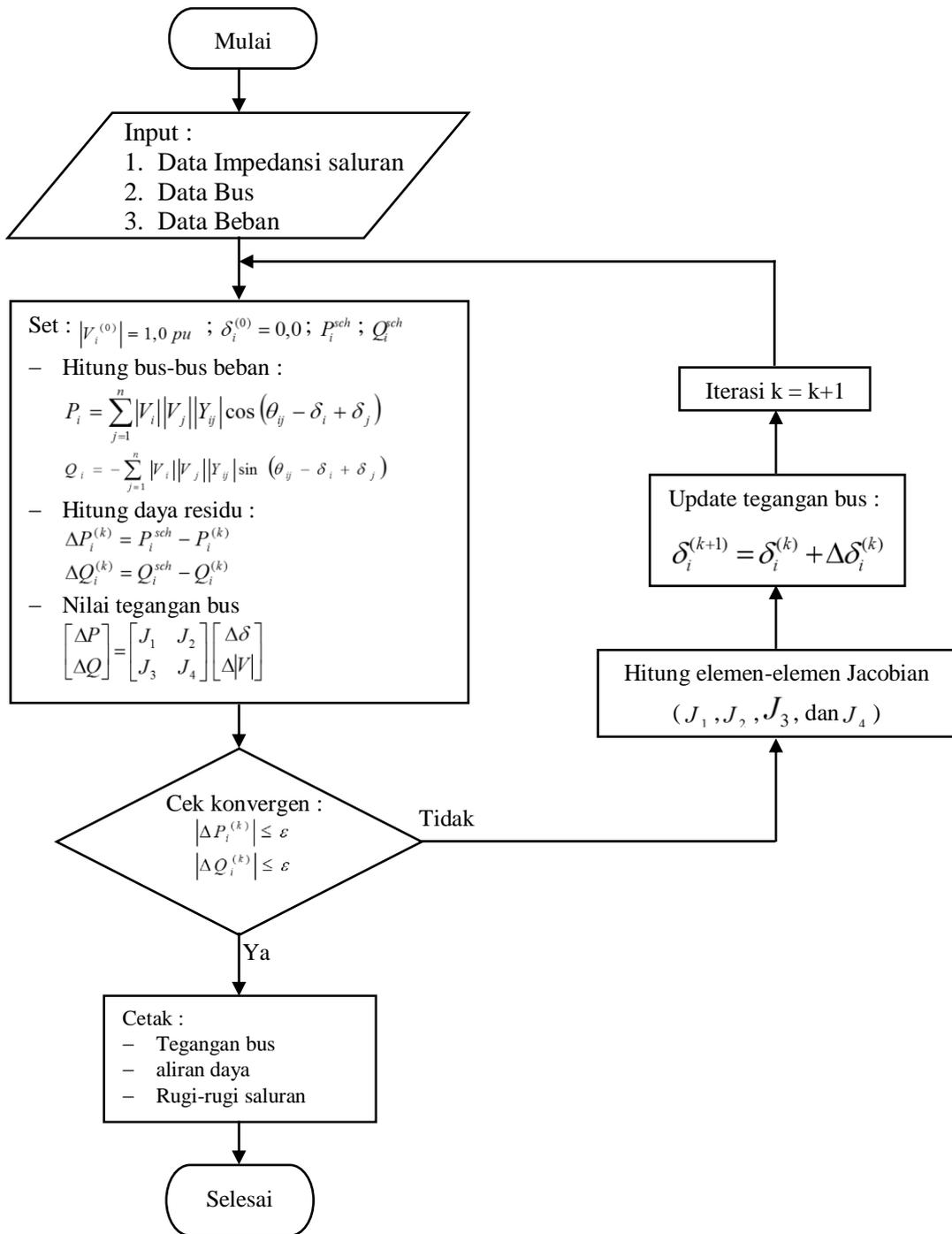
1. Untuk bus-bus beban (bus P-Q) dimana P_i^{sch} dan Q_i^{sch} telah diketahui. Tegangan dan sudut fasa disetting sama dengan nilai slack bus yaitu $|V_i^{(0)}| = 1,0 p.u$ dan $\delta_i^{(0)} = 0,0$. Untuk bus-bus kontrol tegangan (bus P-V) dimana $|V_i|$ dan P_i^{sch} telah diketahui, sudut fasanya disetting sama dengan nilai slack bus yaitu $\delta_i^{(0)} = 0,0$.
2. Untuk bus-bus beban P_i^{sch} dan Q_i^{sch} dihitung dengan persamaan (41) dan (12), serta $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ dihitung dengan persamaan (53) dan (54).
3. Untuk bus-bus kontrol tegangan $P_i^{(k)}$ dan $\Delta P_i^{(k)}$ dihitung dengan persamaan (41) dan (53).
4. Elemen-elemen matrik Jacobian (J_1, J_2, J_3 , dan J_4) dihitung dengan persamaan (45) sampai dengan persamaan (52).
5. Persamaan linier simultan pada persamaan (44) dihitung secara langsung dan faktorisasi optimal dan eliminasi *Gaussian*.
6. Tegangan dan sudut fasa bus terbaru dihitung dengan persamaan (55) dan (56).
7. Proses perhitungan dilanjutkan sampai nilai residu $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ kurang dari toleransi yang telah ditentukan. Misalnya :

$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

$$|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

Dimana :

- P_i^{sch} = Daya aktif terjadwal (MW)
 Q_i^{sch} = Daya reaktif terjadwal (MW)
 V_i = Tegangan bus ke-i (p.u)
 δ_i = Sudut fasa tegangan bus ke-i (rad)
 $\Delta P_i^{(k)}$ = Daya aktif residu pada iterasi ke-k (MW)
 $\Delta Q_i^{(k)}$ = Daya reaktif residu pada iterasi ke-k (MW)



Gambar 2.13 Diagram Alir Perhitungan Aliran Daya Metode *Newton Raphson*

2.13 Kemampuan Hantar Arus (KHA)

Kabel listrik mempunyai ukuran luas penampang inti kabel yang berhubungan dengan kapasitas penghantaran arus listriknya. Dalam istilah PUIL, besarnya kapasitas hantaran kabel dinamakan dengan Kuat Hantar Arus (KHA). Ukuran kabel dan KHA-nya sebaiknya kita pahami dengan baik untuk menentukan

pemilihan kabel yang sesuai dengan kapasitas instalasi listrik rumah kita. Besar kapasitas daya listrik dalam suatu instalasi listrik rumah berhubungan dari berapa besar langganan listrik dari PLN. Dalam hal ini adalah berapa besar rating MCB yang terpasang di kWh meter. Besarnya KHA kabel harus lebih besar dari rating MCB, karena prinsipnya adalah MCB harus trip sebelum kabelnya terkena masalah. Arus listrik yang melebihi KHA dari suatu kabel akan menyebabkan kabel tersebut menjadi panas dan bila melebihi daya tahan isolasinya, maka dapat menyebabkan rusaknya isolasi. Kerusakan isolasi bisa menyebabkan kebocoran arus listrik dan akibatnya bisa fatal seperti kesetrum pada manusia atau bahkan mengakibatkan terjadinya kebakaran [16].

Faktor lain dalam menentukan pemilihan kabel dengan KHA-nya adalah mengenai peningkatan kebutuhan daya listrik di masa depan. Bila dalam beberapa tahun ke depan ternyata ada penambahan daya listrik langganan PLN, tentu lebih baik sedari awal dipersiapkan kabel dengan ukuran yang sedikit lebih besar untuk mengakomodasi peningkatan kebutuhan daya listrik ini sehingga menghindari pekerjaan penggantian kabel. Tetapi perlu diperhatikan juga bila umur kabel ternyata sudah melewati 10 tahun. Pada kasus ini, pemeriksaan kondisi kabel dengan lebih teliti sebaiknya dilakukan untuk memastikan kabel masih dalam kondisi baik. PUIL 2000 memberikan ketentuan mengenai besarnya diameter dari penghantar kabel dan maksimum KHA terus-menerus yang diperbolehkan pada kabel tipe NYA, NYM dan NYY. Menurut PUIL 2000 pasal 5.5.3.1 bahwa “penghantar sirkit akhir yang menyuplai motor tunggal tidak boleh mempunyai KHA kurang dari 125% arus pengenal beban penuh and arus pengenal gawai kendali sisi masuk sekurang – kurangnya 115% dari KHA”

Untuk Arus Searah:

$$I_n = P/V \text{ (A)} \dots\dots\dots(2.76)$$

Untuk Arus Bolak-balik Satu Fasa:

$$I_n = P/(V \cdot \cos \varphi) \text{ (A)} \dots\dots\dots(2.77)$$

Untuk Arus Bolak-balik Tiga Fasa:

$$I_n = P/(\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi) \text{ (A)} \dots\dots\dots(2.78)$$

$$KHA = 125\% \times I_n \dots\dots\dots(2.79)$$

Dimana:

I = Arus Nominal Beban Penuh (A)

P = Daya Aktif (W)

V = Tegangan (V)

Cos ϕ = Faktor Daya

Tabel 2.5 Luas Penampang Tegangan Pengenal KHA Terus - Menerus

Jenis Kabel	Luas Penampang mm ²	KHA Terus Menerus					
		Tegangan Pengenal 0,6/1 kV (1,2 kV)		Tegangan Pengenal 3,6/6 kV (7,2 kV)		Tegangan Pengenal 6/10 kV (12 kV)	
		Di Tanah A	Di Udara A	Di Tanah A	Di Udara A	Di Tanah A	Di Udara A
1	2	3	4	5	6	7	8
NYY NYCY NYCWY NYSY NYHSY	16	100	89	-	-	-	-
	25	129	118	132	122	129	120
	35	155	145	157	147	154	145
	50	183	176	186	278	181	174
	70	225	224	227	222	221	217
	95	270	271	272	271	264	264
	120	306	314	308	312	298	304
	150	344	361	344	354	332	343
	185	389	412	388	406	375	393
	240	452	484	449	480	432	464
300	509	549	503	547	484	528	

Sumber: Puil 2000 (SNI 04-0225-2000, hlm. 310)

2.14 SPLN T6.001 Tahun 2013 Spesifikasi Desain Untuk JTM (Jaringan Tegangan Menengah)

Tabel 2.6 Sistem Fase Tiga a.b. Yang Bertegangan Nominal Antara 1 kV Sampai Dengan 35 kV dan Perlengkapan Terkait

Tegangan tertinggi untuk perlengkapan(kV)	Tegangan nominal sistem (kV)	Pemanfaat
7,2 ¹⁾	6 ¹⁾	Pembangkit
12 ²⁾	11 ²⁾	Pembangkit

24	20	Distribusi & pembangkit
*Sistem fase-tiga tiga-kawat kecuali dinyatakan lain. Nilai yang ditunjukkan adalah tegangan antar fase Tegangan tertinggi dan tegangan terendah perbedaannya tidak boleh lebih besar $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem		
¹⁾ Nilai ini tidak digunakan untuk sistem distribusi umum. ²⁾ Tidak dikembangkan lagi. ³⁾ Untuk sistem fase tiga empat kawat.		

Sumber SPLN T6.001 (2023)

CATATAN 1: Rasio antara dua tegangan nominal yang berdekatan pada satu sistem sebaiknya tidak kurang dari dua.

CATATAN 2: Dalam sistem normal, tegangan tertinggi dan terendah perbedaannya tidak lebih $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem.

Tabel 2.7 Sistem Fase Tiga a.b. Yang Bertegangan Nominal Diatas 35 kV Sampai Dengan 230 kV dan Perlengkapan Terkait

Tegangan tertinggi untuk perlengkapan (kV)	Tegangan nominal sistem (kV)
72,5 170	66 150
Nilai tersebut di atas adalah nilai tegangan antar fase.	

Sumber SPLN T6.001 (2023)

Tabel 2.8 Sistem Fase Tiga a.b. Yang Bertegangan Tertinggi Untuk Perlengkapan Melebihi 245 kV

Tegangan tertinggi untuk perlengkapan (kV)	Tegangan nominal sistem (kV)
300 550	275 500
Nilai tersebut di atas adalah nilai tegangan antar fase.	

Sumber SPLN T6.001 (2023)