



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik dikatakan sebagai kumpulan atau gabungan yang terdiri dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban yang saling berhubungan dan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu sistem.⁷

Lebih lanjutnya pada sistem tenaga listrik yang besar, atau bilamana pusat tenaga listrik (PTL) terletak jauh dari pemakai atau konsumen, maka energi listrik itu perlu diangkut melalui saluran transmisi, dan tegangannya harus dinaikkan dari tegangan menengah (TM) menjadi tegangan tinggi (TT). Pada jarak yang sangat jauh malah diperlukan tegangan ekstra tinggi (TET). Menaikkan tegangan itu dilakukan di gardu induk (GI) dengan menggunakan transformator penaik (step-up transformer). Tegangan tinggi di Indonesia adalah 70 kV, 150 kV dan 275 kV. Sedangkan tegangan ekstra tinggi 500 kV.

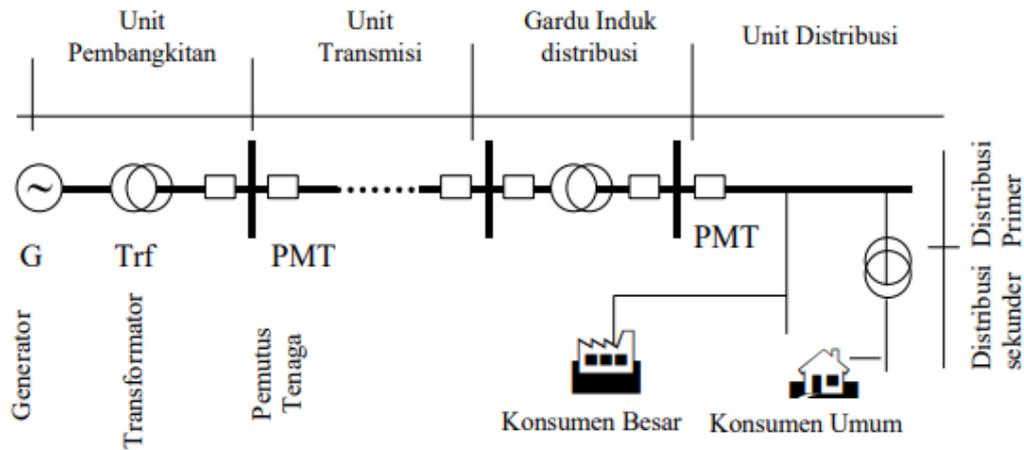
Mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, yang merupakan suatu industri atau suatu kota, tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan menengah (TM). Hal ini juga dilakukan pada suatu GI menggunakan transformator penurun tegangan (step-down transformer). Di Indonesia tegangan menengah adalah 20 kV. Bilamana transmisi tenaga listrik dilakukan dengan mempergunakan saluran - saluran udara dengan menara-menara transmisi, sistem distribusi primer di kota biasanya terdiri atas kabel-kabel tanah yang tertanam di tepi jalan, sehingga tidak terlihat.

Di tepi-tepi jalan biasanya berdekatan dengan persimpangan, terdapat gardu-gardu distribusi (GD), yang mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah (TR) melalui transformator distribusi (distribution transformer). Melalui tiang-tiang listrik yang terdapat di tepi jalan, energi listrik tegangan rendah disalurkan kepada para pelanggan. Di Indonesia tegangan rendah adalah 230/400

⁷ Jasa Pendidikan dan Pelatihan, *01.Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. PT PLN (Persero). Hlm 1



volt dan merupakan sistem distribusi sekunder. Pada tiang tiang TR terdapat pula



lampu – lampu penerangan jalan umum.

Gambar 2. 1 Blok diagram sistem tenaga listrik⁸

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik³

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber energi listrik besar (*bulk power source*) sampai ke pelanggan (Suhadi, 2008). Berdasarkan pernyataan tersebut maka fungsi distribusi tenaga listrik adalah sebagai berikut:

1. Menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke pelanggan secara terus menerus;
2. Bagian sistem tenaga listrik yang berhubungan langsung dengan pelanggan, karena pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan mulai dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan *transformator* penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan

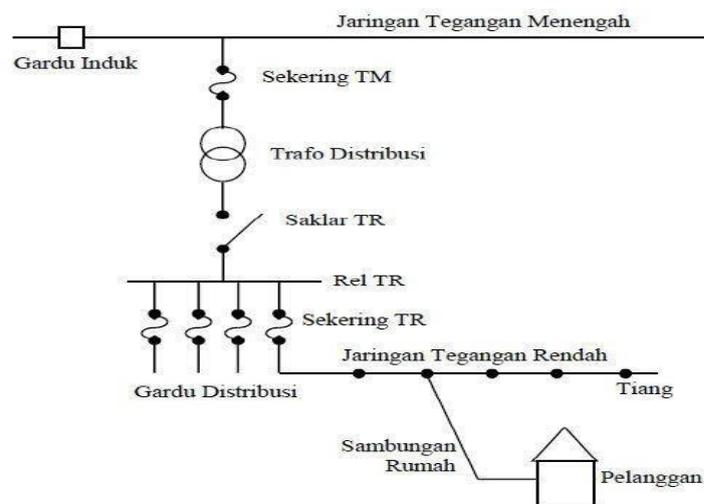
⁸ Jasa Pendidikan dan Pelatihan, 09.Sistem Distribusi Tenaga Listrik. PT PLN (Persero). Hlm 2

³ Suhadi, dkk. (2008). *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional. Hlm 11



ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$).

Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan transformator distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 230/400 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen- konsumen. Hal ini membuktikan bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.



Gambar 2. 2 Sistem Jaringan Tegangan Menengah⁵

⁵ Syufrijal. (2014). *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Semester 1*. Jakarta: Kementerian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia. Hlm 41



2.3 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.3.1 Klasifikasi Jaringan Distribusi

Sistem jaringan distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan dari berbagai segi, antara lain adalah :

- a. Berdasarkan ukuran tegangan
- b. Berdasarkan ukuran arus
- c. Berdasarkan sistem penyaluran
- d. Berdasarkan bentuk jaringan
- e. Berdasarkan bahan konduktornya

a. Berdasarkan Ukuran Tegangan

Berdasarkan ukuran tegangan, jaringan distribusi tenaga listrik dapat dibedakan pada dua sistem, yaitu :

1. Sistem jaringan distribusi primer

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut saluran udara tegangan menengah ini terletak antara gardu induk dengan gardu pembagi, yang memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 20 kV.

2. Sistem jaringan distribusi sekunder

Sistem jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah, merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu peinbagi (gardu distribusi) ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 230/400 V.

b. Berdasarkan Ukuran Arus Listrik

Berdasarkan ukuran arus listrik maka sistem jaringan distribusi dapat dibedakan dalam dua macam, yaitu :



1. Jaringan Distribusi AC

Pada jaringan distribusi AC digunakan arus bolak balik (Alternating Current)

2. Jaringan Distribusi DC

Penggunaan jaringan DC ini dilakukan dengan jalan menyearahkan terlebih dahulu arus bolak-balik ke arus searah dengan alat penyearah Converter, sedangkan untuk mengubah kembali dari arus bolak-balik ke arus searah digunakan alat Inverter.

c. Berdasarkan Sistem Penyaluran

Berdasarkan sistem penyalurannya, jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu dengan :

1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa isolasi) seperti kabel AAAC, kabel ACSR.
2. Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (*Low Voltage Twisted Cable*). Ukuran kabel LVTC adalah : $2 \times 10 \text{mm}^2$, $2 \times 16 \text{mm}^2$, $4 \times 25 \text{mm}^2$, $3 \times 35 \text{mm}^2$, $3 \times 50 \text{mm}^2$, $3 \times 70 \text{mm}^2$.

d. Berdasarkan Bentuk Jaringan

Struktur konfigurasi jaringan distribusi primer, secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep konfigurasi :

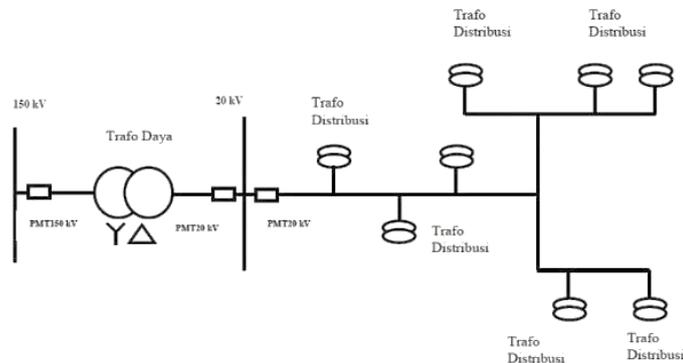
1. Sistem Jaringan Radial²

Sistem jaringan radial adalah yang paling sederhana dan paling banyak dipakai, terdiri atas fider (feeders) atau rangkaian tersendiri, yang seolah-olah keluar dari suatu sumber atau wilayah tertentu secara radial. Fider itu dapat juga dianggap sebagai terdiri atas suatu bagian utama dari mana saluran samping atau lateral lain

² Kadir, Abdul. (2000). *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*. Jakarta: UI Press. Hal 5



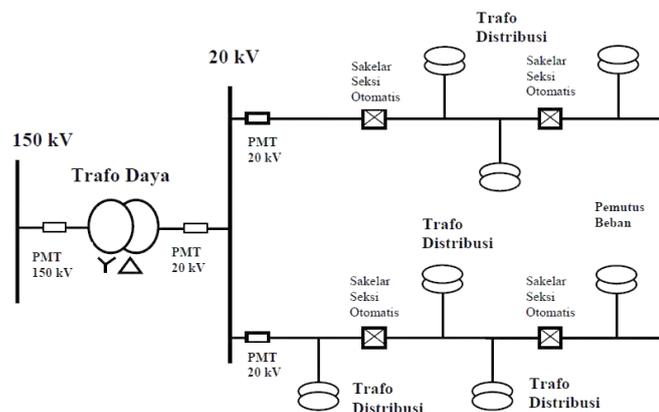
bersumber dan dihubungkan dengan transformator distribusi.



Gambar 2. 3 Skema saluran radial

2. Sistem Jaringan Tertutup⁹

Jaringan bentuk tertutup yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (*black-out*) dapat dikurangi atau bahkan dihindari.



Gambar 2. 4 Pola Jaringan loop tertutup

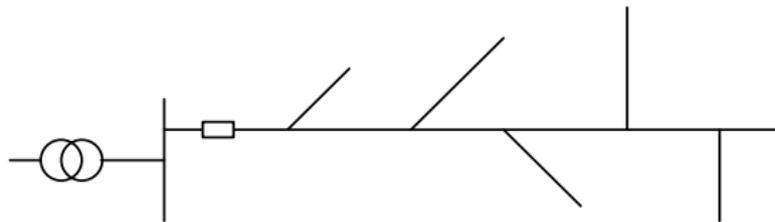
⁹ PT PLN (Persero). (2010). *Kriteria Desain Engineering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Edisi 1*. Jakarta : PT PLN (Persero). Bab 4 Hlm 3



Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat konfigurasi-konfigurasi jaringan sesuai dengan maksud perencanaannya sebagai berikut :

a. Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish-Bone*)

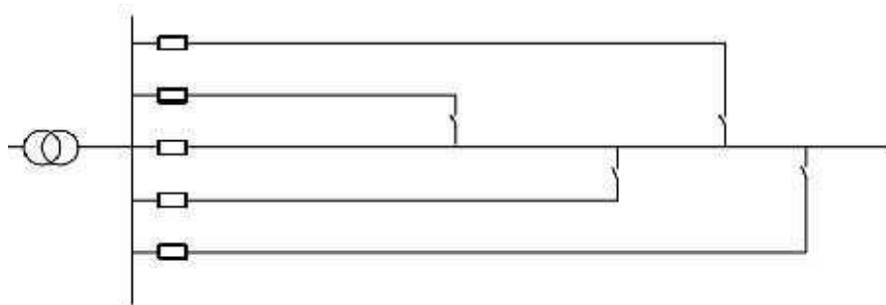
Konfigurasi fishbone ini adalah tipikal konfigurasi dari saluran udara Tegangan Menengah beroperasi radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah [*Pole Top Switch (PTS)*, *Air Break Switch (ABSW)*] dengan koordinasi relai atau dengan system SCADA. Pemutus balik otomatis PBO (*Automatic Recloser*) dipasang pada saluran utama dan saklar seksi otomatis SSO (*Automatic Sectionalizer*) pada pencabangan.



Gambar 2. 5 Konfigurasi Tulang Ikan (*Fishbone*)

b. Konfigurasi Kluster (*Cluster / Leap Frog*)

Konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah yang sudah bertipikal sistem tertutup, namun beroperasi radial (*Radial Open Loop*). Saluran bagian tengah merupakan penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar besar.

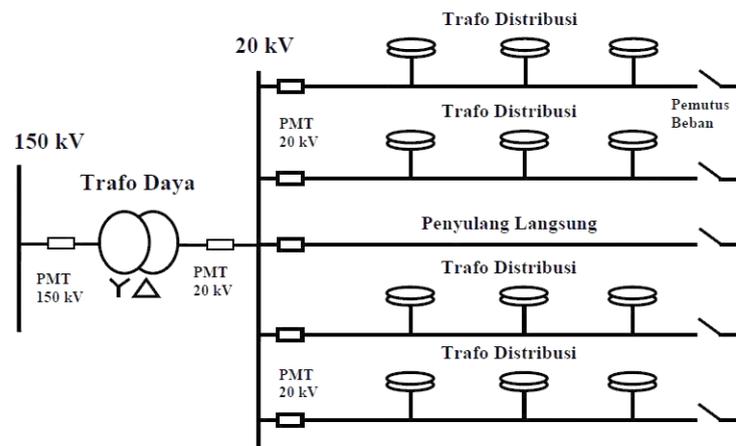


Gambar 2. 6 Konfigurasi Kluster (*Leap Frog*)



c. Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)

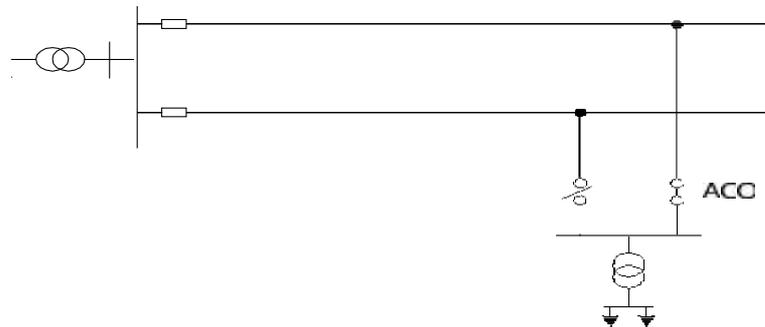
Jaringan ini merupakan jaringan distribusi primer gabungan dari struktur radial yang ujung-ujungnya dapat disatukan pada gardu hubungdan terdapat penyulang ekspres. Penyulang ekspres (*express feeder*) ini harus selalu dalam keadaan bertegangan, dan siap terus menerus untuk menjamin bekerjanya system dalam menyalurkan energi listrik ke beban pada saat terjadi gangguan atau pemeliharaan. Dalam keadaan normal tipe ini beroperasi secara radial.



Gambar 2. 7 Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*).

d. Konfigurasi Fork

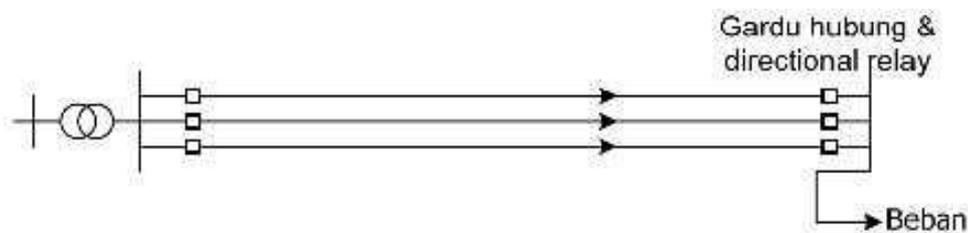
Konfigurasi ini memungkinkan 1(satu) Gardu Distribusi dipasok dari 2 penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman sangat singkat (*Short Break Time*). Jika penyulang operasi mengalami gangguan, dapat dipasok dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu sangat singkat dengan menggunakan fasilitas *Automatic Change Over Switch* (ACOS). Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan *Tee-Off* (TO) dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi



Gambar 2. 8 Konfigurasi Fork

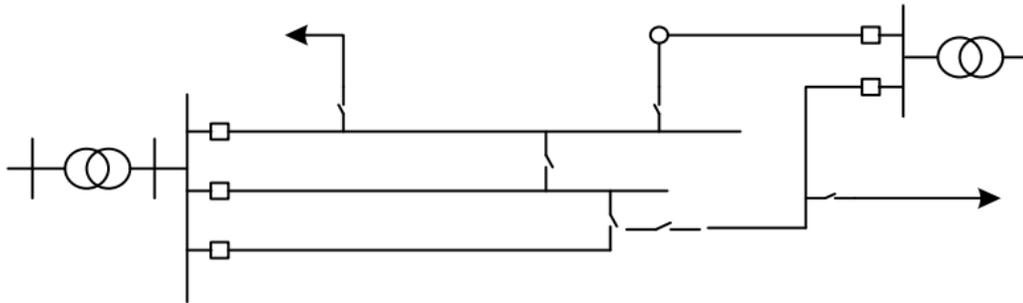
e. Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan kontinuitas penyaluran. Sistem harus dilengkapi dengan rele arah (*Directional Relay*) pada Gardu Hilir (Gardu Hubung).

Gambar 2. 9 Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*).

f. Konfigurasi Jala-Jala (*Grid, Mesh*)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan-pelanggan pemakaian khusus



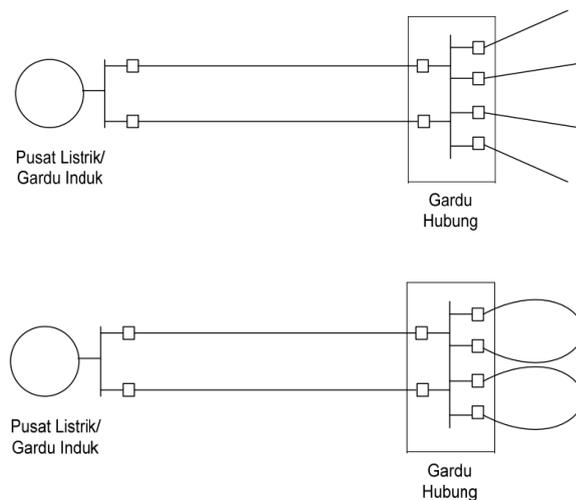
Gambar 2. 10 Konfigurasi Jala Jala

g. Konfigurasi lain-lain

Selain dari model konfigurasi jaringan yang umum dikenal sebagaimana diatas, terdapat beberapa model struktur jaringan yang dapat dipergunakan sebagai alternatif model model struktur jaringan.

1. Struktur Garpu dan Bunga

Struktur ini dipakai jika pusat beban berada jauh dari pusat listrik/Gardu Induk. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) berfungsi sebagai pemasok, Gardu Hubung sebagai Gardu Pembagi, sebagai pemutus tenaga, sebagai pengaman dengan rele proteksi gangguan fasa-fasa dan fasa-tanah pada JTM yang berawal dari Gardu Hubung.

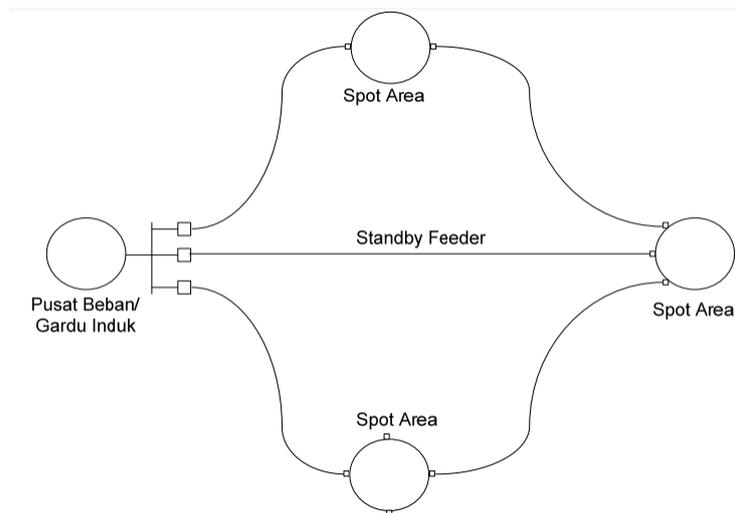


Gambar 2. 11 Konfigurasi Struktur Garpu dan Bunga



2. Struktur Rantai

Struktur ini dipakai pada suatu kawasan yang luas dengan pusat – pusat beban yang berjauhan satu sama lain.



Gambar 2. 12 Konfigurasi Struktur Rantai

e. Jaringan Distribusi Menurut Bahan Konduktornya

Bahan konduktor yang paling populer digunakan adalah tembaga (*copper*) dan alumunium. Tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar alumunium karena konduktifitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya ialah, untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat daripada alumunium, dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar alumunium telah menggantikan kedudukan tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat alumunium digunakan campuran alumunium (*alumunium alloy*). Oleh karena itu ada beberapa macam jenis konduktor, yaitu :

- AAC (*All Alumunium Conductor*) : Kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari alumunium.
- AAAC (*All Alumunium Alloy Conductor*) :Kawat penghantaryang terbuat dari campuran alumunium.



- ACSR (*All Conductor Steel Reinforced*) : Kawat penghantar alumunium berinti kawat baja
- ACAR (*All Conductor Alloy Reinforced*) :Kawat penghantar alumunium yang diperkuat dengan logam campuran.

2.4 Konstruksi SUTM

Konstruksi jaringan dimulai dari sumber tenaga listrik / Gardu Induk dengan kabel tanah Tegangan Menengah kearah tiang pertama saluran udara. Tiang pertama disebut tiang awal, tiang tengah disebut tiang penumpu (line pole) atau tiang penegang (suspension pole), jika jalur SUTM membelok disebut tiang sudut dan berakhir pada tiang ujung (end pole). Untuk saluran yang sangat panjang dan lurus pada titik-titik tertentu dipasang tiang peregang. Fungsi tiang peregang adalah untuk mengurangi besarnya tekanan mekanis pada tiang awal / ujung serta untuk memudahkan operasional dan pemeliharaan jaringan.

Topang tarik (guy wire) dapat dipakai pada tiang sudut dan tiang ujung tetapi tidak dipasang pada tiang awal. Pada tempat-tempat tertentu jika sulit memasang guy wire pada tiang akhir atau tiang sudut, dapat dipakai tiang dengan kekuatan tarik besar. Isolator digunakan sebagai penumpu dan pemegang penghantar pada tiang, hanya dipakai 2 jenis isolator yaitu isolator peregang (hang isolator/suspension isolator) dan isolator penumpu (line-post/pin-post/pin insulator). Isolator peregang dipasang pada tiang awal / akhir / sudut. Isolator penumpu dipasang pada tiang penumpu dan sudut. Konfigurasi konstruksi (Pole Top Construction) dapat berbentuk vertikal, horizontal atau delta.

Konstruksi sistem pembumian dengan tahanan ($R = 12 \text{ Ohm}$, 40 Ohm dan 500 Ohm) atau dengan multi grounded common netral (solid grounded) yaitu dengan adanya penghantar netral bersama TM, TR. Isolator dipasang pada palang (cross arm/bracket/ travers) tahan karat (Galvanized Steel Profile).

Penghantar Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) ini dapat berupa A3C (All Alumunium Alloy Conductor), A3C-S (Half insulated A3C, HIC) atau full



insulated (FIC), Full insulated A3C twisted (A3C-TC) Luas penampang penghantar 35 mm², 50 mm², 70 mm², 150 mm², 240 mm².

2.5 Transformator Distribusi

Transformator adalah salah komponen listrik yang berkerja untuk menaikkan tegangan serta menurunkan tegangan dengan prinsip kerja gandengan elektromagnetik. Dalam sistem distribusi tenaga listrik transformator dapat dibagi berdasarkan sistem kerja menjadi dua macam yaitu:

1. Transformator Step Up (11,6 kV menjadi 150 kV)
2. Transformator Down (150 kV menjadi 20 kV) dan (20 kV menjadi 380 / 220 Volt) Sistem distribusi menggunakan jenis transformator step down untuk menghasilkan tegangan yang diinginkan.

Transformator distribusi lebih baik dibebani tidak lebih dari 80% atau di bawah 40% (PT. PLN). Jika beban melebihi atau kurang dari range tersebut, maka transformator dapat dikatakan overload atau underload. Jika beban transformator terlalu besar atau melebihi range tersebut maka perlu dilakukan penggantian atau penyisipan transformator⁶ . Daya transformator jika ditinjau dari sisi tegangan sekunder transformator dapat dirumuskan dengan persamaan di bawah ini :

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots(2- 1)$$

Sehingga perhitungan nilai arus sisi sekunder transformator menggunakan persamaan:

$$I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_2} \dots\dots\dots(2- 2)$$

Untuk mengetahui besar nilai arus primer transformator dapat menggunakan Rasio (a) dengan membandingkan nilai tegangan dan arus seperti persamaan berikut:

⁶ Eksan Esmaul, Didik. *Analisa Pembebanan Transformator di PT Indoprime Gemilang Surabaya.*:Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.



$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \dots\dots\dots(2- 3)$$

Setelah nilai rasio didapatkan, nilai arus primer bisa didapatkan menggunakan persamaan berikut ini:

$$I_1 = \frac{I_2}{a} \dots\dots\dots(2- 4)$$

Setelah nilai arus primer didapat maka untuk mengetahui nilai tegangan pada sisi primer dapat menggunakan persamaan berikut ini:

$$V_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \times I_1} \dots\dots\dots(2- 5)$$

Untuk menghitung jumlah arus pada percabangan sesuai hukum kirchoff 1 Jumlah arus listrik yang masuk ke suatu titik percabangan sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik percabangan tersebut.

$$\Sigma I_{\text{masuk}} = \Sigma I_{\text{keluar}} \dots\dots\dots(2- 6)$$

Keterangan:

S = Daya Transformator (VA)

V₁ = Tegangan sisi primer transformator (V)

V₂ = Tegangan sisi sekunder transformator (V)

I₁ = arus sisi primer transformator (A)

I₂ = arus sisi sekunder transformator (A)

2.6 Parameter-Parameter Saluran Distribusi

2.6.1 Resistansi saluran

Nilai tahanan saluran transmisi dipengaruhi oleh resistivitas konduktor, suhu, dan efek kulit (skin effect). Tahanan merupakan sebab utama timbulnya susut tegangan pada saluran transmisi. Dikenal dua macam tahanan, yaitu tahanan arus searah dan tahanan arus bolak-balik. Tahanan arus searah ditentukan oleh nilai resistivitas material konduktor:

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots(2- 7)$$



Keterangan :

- R = tahanan arus searah (Ω)
 ρ = tahanan jenis penghantar / resistivitas ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)
 l = panjang saluran/konduktor (m)
 A = Iuas penampang penghantar (mm^2)

Dimana :

$$\rho_{\text{Al (aluminium)}} = 2,83 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} [20^\circ\text{C}]$$

$$\rho_{\text{Cu (tembaga)}} = 1,77 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} [20^\circ\text{C}]$$

Kenaikan resistansi karena pembentukan lilitan diperkirakan mencapai 1% untuk penghantar dengan tiga serat dan 2% untuk penghantar dengan lilitan konsentris. Jika suhu dilukiskan pada sumbu tegak dan resistansi pada sumbu mendatar maka titik pertemuan perpanjangan garis dengan sumbu suhu dimana resistansinya sama dengan nol adalah suatu konstanta untuk bahan logam bersangkutan, maka tahanan searahnya dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\frac{Rt_2}{Rt_1} = \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \dots\dots\dots(2- 8)$$

Dimana :

- Rt_1 = Resistansi pada suhu t_1 (temperatur sebelum operasi konduktor)
 Rt_2 = Resistansi pada suhu t_2 (temperatur operasi konduktor)
 t_1 = Temperatur awal ($^\circ\text{C}$)
 t_2 = Temperatur akhir ($^\circ\text{C}$)
 T_0 = Konstanta Penghantar

Nilai-nilai konstanta T_0 adalah sebagai berikut:

- T_0 = 234,5 untuk tembaga dengan konduktivitas 100%
 T_0 = 241 untuk tembaga dengan konduktivitas 97,3%
 T_0 = 228 untuk aluminium dengan konduktivitas 61%



Tabel 2. 1 Resistansi penghantar AAAC

Luas Penampang		Jumlah kawat diameter kawat n/d_1	Diameter hantaran kira-kira d_2	Berat hantaran kira-kira	Perbedaan berat maksimum	Tahanan DC, 20°C maksimum	Beban putus perhitungan
Nominal	Sebenarnya						
mm ²	mm ²	n/mm	mm	kg/km		ohm/km	kg
16	16,84	7/1,75	5,25	46	+ 2,9	1,955	480
25	27,83	7/2,25	6,75	76	+ 2,2	1,183	790
35	34,36	7/2,5	7,50	94	+ 2,0	0,958	980
50	49,48	7/3,0	9,0	135	+ 2,0	0,665	1410
	45,70	19/1,75	8,75	126	+ 2,9	0,724	1300
55	58,07	7/3,25	9,75	160	+ 2,0	0,567	1655
70	75,55	19/2,25	11,25	208	+ 2,2	0,438	2150
95	93,27	19/2,5	12,5	256	+ 2,0	0,355	2660
100	99,30	7/4,25	12,75	272	+ 2,0	0,332	2830
120	112,85	19/2,75	13,75	310	+ 2,0	0,293	3220
150	157,6	19/3,25	16,25	434	+ 2,0	0,210	4490
	147,1	37/2,25	15,75	406	+ 2,2	0,225	4190
185	181,6	37/2,5	17,5	501	+ 2,0	0,183	5175
240	238,8	19/4,0	20,0	670	+ 2,0	0,137	6805
	242,5	61/2,25	20,2	657	+ 2,2	0,139	6910
300	299,4	61/2,5	22,5	827	+ 2,0	0,111	8530
400	431,1	61/3,0	27	1191	+ 2,0	0,077	12290
500	506,0	61/3,25	29,25	1398	+ 2,0	0,066	14420
630	643,2	91/3,0	33,0	1782	+ 2,0	0,052	18330
800	754,9	91/3,25	35,75	2091	+ 2,0	0,044	21515
1000	1005,1	91/3,75	41,25	2784	+ 2,0	0,033	28640

Sumber : SPLN 48-1 Tahun 1981

Tabel 2. 2 Resistansi penghantar XLPE

MEDIUM VOLTAGE XLPE INSULATED POWER CABLES													
TABLE 12 THREE-CORE 22kV ARMoured CABLES (ALUMINIUM CONDUCTOR)													
Nominal Area of Conductors	Thickness of Insulation	Thickness of Extruded Bedding	Nominal Armour Wire Diameter	Thickness of Outer Sheath	Overall Diameter	Approx. Weight	Electrical Characteristics						
							Current Rating		Conductor Resistance		Reactance at 50Hz	Capacitance	
							In Air at 40°C	In Ground at 25°C	dc at 20°C	50Hz at 90°C			
sq. mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg/km	amp	amp	Ω/km	Ω/km	Ω/km	μF/km	
35	5.5	1.5	2.5	2.8	62.8	5870	123	122	0.868	1.11	0.133	0.178	
50	5.5	1.5	2.5	2.9	65.5	6310	149	144	0.641	0.821	0.127	0.194	
70	5.5	1.6	2.5	3.0	69.1	6930	183	176	0.443	0.569	0.119	0.216	
95	5.5	1.7	2.5	3.2	73.1	7670	221	207	0.320	0.409	0.113	0.240	
120	5.5	1.7	3.2	3.3	77.9	9270	255	234	0.253	0.324	0.109	0.261	
150	5.5	1.8	3.2	3.4	81.1	9950	285	261	0.206	0.265	0.105	0.28	
185	5.5	1.9	3.2	3.6	85.0	10850	332	297	0.164	0.211	0.102	0.303	
240	5.5	2.0	3.2	3.7	90.2	12080	391	342	0.125	0.160	0.098	0.334	
300	5.5	2.0	3.2	3.9	95.4	13360	442	383	0.100	0.129	0.094	0.367	

Sumber : Standar IEC 60502-2



2.6.2 Reaktansi Kawat Penghantar

Untuk menentukan besarnya induktansi saluran pada jaringan distribusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$L = (0,5 + 4,6 \log \frac{D-r}{r}) \times 10^{-7} \text{H/m} \dots \dots \dots (2-9)$$

Dimana D adalah jarak antara konduktor dan r adalah radius masing-masing konduktor tersebut. Bila letak konduktor tidak simetris, maka D pada persamaan diatas perlu diganti dengan:

$$D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}} \dots \dots \dots (2-10)$$

Untuk menghitung nilai r penghantar menggunakan persamaan :

$$A = \pi r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots \dots \dots (2-11)$$

Maka dapat dicari nilai reaktansi induktif saluran dengan menggunakan persamaan di bawah ini

$$X_L = \omega L = 2 \pi \cdot f \cdot L \dots \dots \dots (2-12)$$

Dimana:

X_L = Reaktansi induktif saluran (Ω/km)

2π = Sudut arus bolak balik.

F = Frekuensi sistem (50 Hz)

L = Induktansi dari konduktor (H/km)

2.6.3 Impedansi Jaringan

Untuk menghitung impedansi jaringan menggunakan persamaan :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \dots \dots \dots (2-13)$$



Keterangan:

Z = Impedansi saluran (Ω)

R = Resistansi saluran (Ω)

X = Reaktansi saluran (Ω)

θ = Sudut theta

2.7 Model Saluran Distribusi

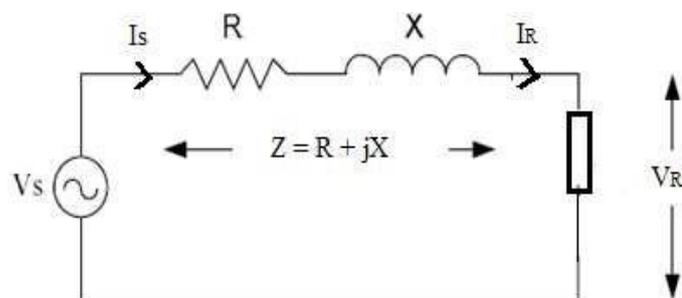
Saluran distribusi digambarkan melalui suatu model ekivalen dengan mengambil parameter rangkaian pada suatu basis per fasa. Tegangan terminal digambarkan dari saluran ke netral, arus dari satu fasa saluran sehingga sistem distribusi tiga fasa berkurang menjadi ekivalen sistem distribusi fasa tunggal.

Model saluran distribusi digunakan untuk menghitung tegangan, arus dan aliran daya daya yang dipengaruhi oleh panjang saluran. Model saluran distribusi diperoleh dengan mengalikan impedansi saluran persatuan panjang dengan panjang saluran.

$$Z = (r + j\omega L) \dots\dots\dots (2- 14)$$

$$Z = R + jX \dots\dots\dots(2- 15)$$

Dimana R dan X merupakan resistansi dan induktansi perfasa per satuan panjang, dan l merupakan panjang saluran. Model saluran distribusi pada suatu basis per fasa ditunjukkan pada gambar 2.13



Gambar 2. 13 Rangkaian ekivalen saluran distribusi



2.8 Jatuh Tegangan ⁴

Jatuh tegangan atau *drop* tegangan (*drop voltage*) atau juga rugi tegangan adalah besaran tegangan yang hilang pada suatu penghantar atau bias dikatakan adanya perbedaan tegangan antara tegangan kirim dengan tegangan terima. Jatuh tegangan pada suatu saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Jatuh tegangan selalu terjadi pada jaringan, baik pada pelanggan maupun pada perusahaan listrik. Apabila perbedaan nilai tegangan tersebut melebihi standar yang ditentukan, maka mutu penyaluran tersebut rendah. Di dalam saluran transmisi persoalan tegangan sangat penting, baik dalam keadaan operasi maupun dalam perencanaan sehingga harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik saluran. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk tegangan menengah harus diperhatikan.

Berdasarkan dari standar SPLN T6.001: 2013, Dengan memperhatikan julat tegangan pasok, pada kondisi pelayanan normal direkomendasikan bahwa tegangan pada terminal pasok perbedaannya tidak boleh lebih besar $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem.

Adapun penyebab jatuh tegangan (*drop* tegangan) adalah :

1. Panjang jaringan, jauhnya jaringan dari trafo
2. Rendahnya tegangan yang diberikan dari trafo distribusi
3. Jenis penghantar yang digunakan
4. Sambungan penghantar atau konektor yang tidak baik
5. Arus yang dihasilkan terlalu besar

Selain pemilihan penghantar yang digunakan harus dibatasi besar arus beban yang mengalir sesuai dengan KHA (Kemampuan Hantar Arus) dari jenis penghantar agar batas drop tegangan yang diijinkan dapat tercapai.

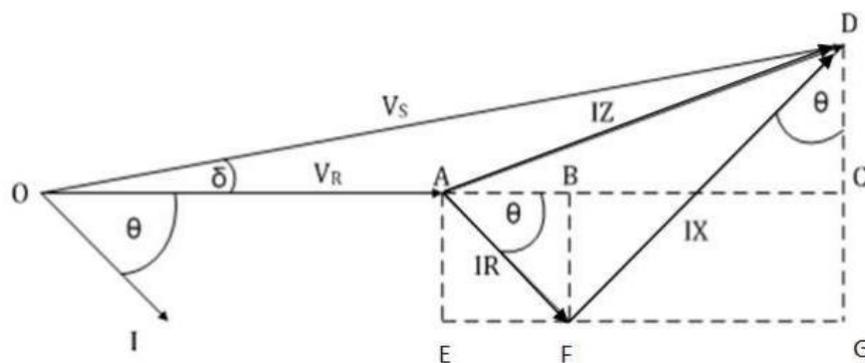
⁴ Syufrijal. (2014). Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Semester 1. Jakarta: Kementerian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia. Hlm 54



Jenis penghantar untuk JTM ada dua macam menurut konstruksinya yaitu *Open Wire* (telanjang) dan yang berisolasi (*Insulated*) sedang ditinjau dari bahan yang digunakan ada dua jenis yang umum digunakan yaitu dari bahan Tembaga (CU) dan dari bahan *Aluminium* (Al).

Jenis bahan penghantar berisolasi yang banyak digunakan adalah dari bahan aluminium (Al) karena lebih ringan namun daya hantarnya lebih rendah dibandingkan dengan dari bahan Tembaga (Cu). Jenis, Luas, dan panjang penghantar yang digunakan untuk JTM akan mempengaruhi besarnya Impedansi (Z) dari JTM, perkalian impedansi Z dengan arus yang mengalirakan didapatkan besarnya Drop tegangan pada JTM.

Berdasarkan rangkaian ekivalen saluran pada gambar 2.13 dapat digambarkan diagram fasor arus dan tegangan seperti pada gambar berikut :



Gambar 2. 14 Diagram fasor saluran distribusi

Pada diagram fasor diatas, berlaku persamaan dibawah ini:

$$OD = OC = OA + AB + BC \dots\dots\dots(2- 16)$$

Dimana:

$$OD = V_S$$

$$OA = V_R$$

$$AB = I R \cos \theta$$



$$BC = I X \sin \theta$$

Dengan mensubstitusikan OD, OA, AB, dan BC ke dalam persamaan(2-16)

$$V_s = V_R + I R \cos \theta + I X \sin \theta \dots\dots\dots(2- 17)$$

$$(V_s - V_R) = I R \cos \theta + I X \sin \theta \dots\dots\dots(2- 18)$$

$$V_s - V_R = \Delta V \dots\dots\dots(2- 19)$$

$$\Delta V = I R \cos \theta + I X \sin \theta \dots\dots\dots(2- 20)$$

Sehingga:

$$\Delta V = I (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots(2- 21)$$

Maka untuk saluran distribusi pada saluran distribusi 3 fasa adalah :

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots(2- 22)$$

Jika :

Impedansi total saluran merupakan $R = r \times l$ dan $X = x \times l$

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times l \times (r \cos \theta + x \sin \theta) \dots\dots\dots(2- 23)$$

Dimana :

$$\cos \theta = 0,85 \text{ (standar PLN)}$$

$$\sin \theta = \text{Arc cos } \theta = 0,53$$

jatuh tegangan dalam persentase :

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V_s} \times 100\% \dots\dots\dots(2- 24)$$

Keterangan:

ΔV = jatuh tegangan (V)

V_s =Tegangan awal (V)

I = Arus saluran (A)

V_R =Tegangan akhir (V)

l = Panjang penghantar (Km)

I_R = Komponen arus aktif



I_x	= Komponen arus reaktif	X	= Reaktansi saluran (Ω)
R	= Resistansi saluran (Ω)	x	= Reaktansi saluran (Ω/Km)
r	= Resistansi saluran (Ω / Km)		

2.9 ETAP (*Electric Transient Analysis Program*)

ETAP (*Electric Transient Analysis Program*) merupakan suatu software (perangkat lunak) yang digunakan suatu sistem tenaga listrik. Perangkat ini dapat bekerja dalam keadaan offline yaitu untuk simulasi tenaga listrik, dan juga dalam keadaan online untuk pengelolaan data real time. Analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan dengan menggunakan ETAP antara lain¹⁰ :

1. Membuat aliran daya (*Load Flow*)
2. Hubung singkat (*Short Circuit*)
3. Drop tegangan (*Voltage Drop*)
4. Motor Starting
5. Arc Flash
6. Harmonics Power System
7. Kestabilan Transien (*Transient Stability*)

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menggunakan program ETAP antara lain:

- **(SLD) Single Line Diagram**¹

ETAP (*Electric Transient Analysis Program*) menyediakan user interface secara utuh untuk membuat single line diagram. Pada bagian editor kita dapat

¹⁰Fauzan, Muhammad. (2021). *Sekilas Tentang Software ETAP Beserta Tollbarnya*. diakses pada 24 febuari 2022 pukul 10:27 WIB, dari https://www.anakteknik.co.id/fauzan_triyanto02/articles/sekilas-tentang-software-etap-beserta-tollbarnya

¹ Eirene Patoding, Hestikah. (2019). *Buku Ajar Energi dan Operasi Tenaga Listrik dengan Aplikasi ETAP*. Yogyakarta: CV Budi Utama. Hal 91



menambahkan, menghapus, memindahkan, dan menghubungkan elemen-elemen secara grafis, memperbesar, memperkecil, memunculkan grid atau tidak, mengubah ukuran elemen dan lain-lain.

- **Library**

informasi atau data mengenai semua komponen atau peralatan yang akan digunakan dalam suatu sistem tenaga listrik baik data elektrik maupun mekanis yang bertujuan untuk membantu dalam menentukan spesifikasi peralatan yang belum diketahui.

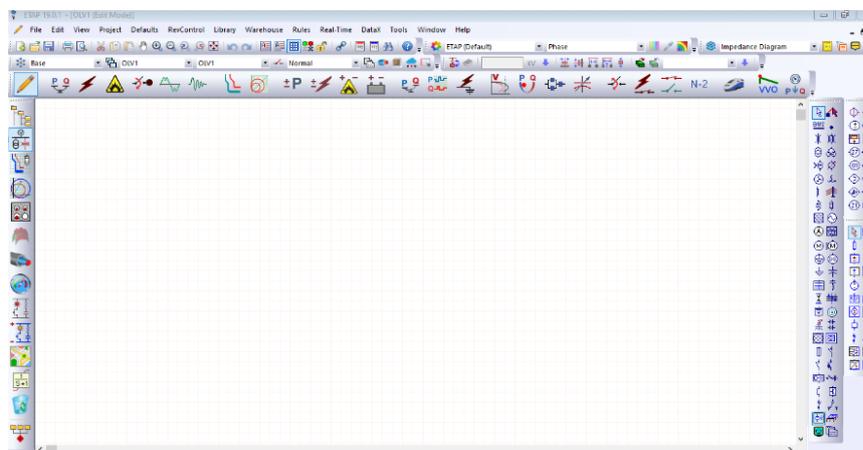
- **Study Case**

Parameter yang berhubungan dengan metode studi yang dilakukan serta format hasil analisa.

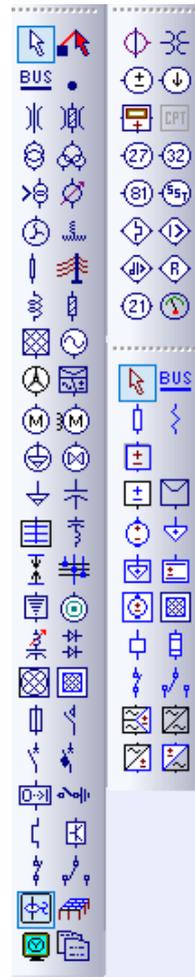
- **Standar yang digunakan**

Standar yang akan dipakai pada peralatan listrik. The American National Standards Institute (ANSI) dan the International Electrotechnical Commission (IEC) merupakan standar yang biasa digunakan pada spesifikasi peralatan listrik. Perbedaan terletak pada standar frekuensi yang digunakan, IEC menggunakan nilai frekuensi 50 Hz sedangkan ANSI menggunakan nilai frekuensi 60 Hz.

Berikut ini menu-menu bar dan tampilan window yang terdapat pada program ETAP 19.0.1 yang dapat digunakan :



Gambar 2. 15 Tampilan window Program ETAP 19.0.1

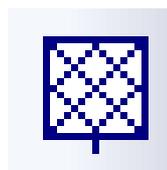


Gambar 2. 16 Menu bar Program ETAP 19.0.1

Berikut ini penjelasan beberapa elemen menu bar program ETAP 19.0.1 standar IEC yang akan digunakan :

1. Power Grid

Adalah supply yang digunakan oleh sistem sebagai sumber tegangan dalam hal ini adalah supply dari PLN.



Gambar 2. 17 Icon menu bar power grid



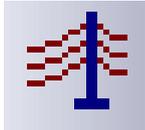
2. Transformator

Merupakan peralatan yang digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan dengan rasio tertentu sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan.



Gambar 2. 18 Icon menu bar transformator

3. Transmission Line



Gambar 2. 19 Icon menu transmission line

4. Bus

Tempat penyambung beberapa komponen system tenaga listrik seperti saluran transmisi, jaringan distribusi, power grid, dan generator.



Gambar 2. 20 Icon menu Bus

5. Lumped load (Beban)



Gambar 2. 21 Icon menu bar lumped load



6. Load Flow Analysis (Analisa aliran daya)

Analisa aliran daya digunakan untuk mengetahui besar daya pada suatu system tenaga listrik.



Gambar 2. 22 Icon menu Load Flow Analysis

