

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

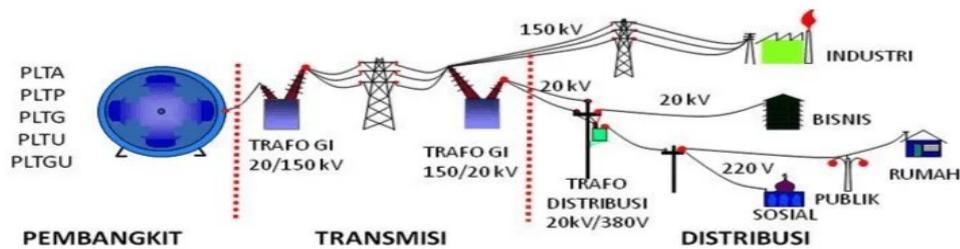
#### **2.1. Sistem Ketenagalistrikan**

Dalam sepuluh tahun terakhir ini, masalah listrik menjadi polemik yang berkepanjangan dan telah memunculkan multi implikasi yang sangat kompleks di berbagai aspek kehidupan, antara lain : keuangan, ekonomi, sosial, budaya, politik, dan lain-lain. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa listrik telah menjadi bagian yang sangat penting bagi umat manusia. Oleh karenanya tak berlebihan bahwa listrik bisa dikatakan sebagai salah satu kebutuhan utama bagi penunjang dan pemenuhan kebutuhan hidup umat manusia. Beberapa tantangan besar yang dihadapi dunia pada masa kini, antara lain, bagaimana menemukan sumber energi baru, mendapatkan sumber energi yang pada dasarnya tidak akan pernah habis untuk masa mendatang, menyediakan energi di mana saja diperlukan, dan mengubah energi dari satu ke lain bentuk, serta memanfaatkannya tanpa menimbulkan pencemaran yang dapat merusak lingkungan hidup kita. Dibanding dengan bentuk energi yang lain, listrik merupakan salah satu bentuk energi yang praktis dan sederhana.

Di samping itu listrik juga mudah disalurkan dari dan pada jarak yang berjauhan, mudah didistribusikan untuk area yang luas, mudah diubah ke dalam bentuk energi lain, dan bersih (ramah lingkungan). Oleh karena itu, manfaat listrik telah dirasakan oleh masyarakat, baik pada kelompok perumahan, sosial, bisnis atau perdagangan, industri dan publik. Tenaga listrik sebagai bagian dari bentuk energi dan cabang produksi yang penting bagi negara sangat menunjang upaya dalam memajukan dan mencerdaskan bangsa. Sebagai salah satu hasil pemanfaatan kekayaan alam yang menguasai hajat hidup orang banyak, tenaga listrik perlu dipergunakan untuk kesejahteraan dan kemakmuran rakyat. Yang dimaksud dengan sistem tenaga listrik adalah sekumpulan pusat listrik dan gardu induk (pusat beban) yang satu dengan yang lain dihubungkan oleh jaringan terinterkoneksi. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu: pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi. Suatu sistem



distribusi menghubungkan semua beban yang terpisah satu dengan yang lain kepada saluran transmisi. Hal ini terjadi pada gardu-gardu induk (*substation*) di mana juga dilakukan transformasi tegangan dan fungsi-fungsi pemutusan (*breaker*) dan penghubung beban (*switching*). Gambar 2.1 memperlihatkan sistem tenaga listrik mulai dari pembangkit sampai ke pengguna/pelanggan.



Gambar 2.1 Sistem Pendsitribusian Tenaga Listrik

### 2.1.1. Klasifikasi Sistem Tenaga Listrik

Pembangkit tenaga listrik (PTL) biasanya membangkitkan energi listrik pada tegangan menengah (TM), yaitu pada umumnya antara 6 sampai 20 kV. Jika pembangkit terletak jauh dari pemakai, maka energi listrik perlu diangkut melalui saluran transmisi dan tegangannya dinaikkan dari tegangan menengah menjadi tegangan tinggi (TT) ataupun tegangan ekstra tinggi (TET). Keuntungan transmisi (transmission capability) dengan tegangan lebih tinggi akan menjadi jelas jika kita melihat pada kemampuan transmisi (transmission capability) suatu saluran transmisi. Kemampuan ini biasanya dinyatakan dalam Mega-Volt-Ampere (MVA). Tetapi kemampuan transmisi dari suatu saluran dengan tegangan tertentu tidak dapat diterapkan dengan pasti, karena kemampuan ini masih tergantung lagi pada batasan-batasan termal dari penghantar, jatuh tegangan (drop voltage) yang diperbolehkan, keandalan, dan persyaratan kestabilan sistem. Menaikkan tegangan pertama dilakukan di gardu induk (GI) dengan menggunakan transformator penaik tegangan (Step Up). Tegangan tinggi di Indonesia yaitu 70 kV, 150 kV dan 275 kV. Sedangkan tegangan ekstra tinggi yaitu diatas 500 kV.



Penurunan tegangan dari tingkat transmisi pertama-tama terjadi pada gardu induk bertenaga besar, di mana tegangan diturunkan ke daerah antara 70 kV dan 150 kV, sesuai dengan tegangan saluran transmisinya. Beberapa pelanggan yang memakai tenaga untuk keperluan industri sudah dapat dicatu dengan tegangan ini. Penurunan tegangan berikutnya terjadi pada gardu distribusi primer, di mana tegangan diturunkan lagi menjadi 1 sampai 30 kV. Tegangan yang lazim digunakan pada gardu-distribusi adalah 20.000 V antar-fasa atau 11.500 V antara fasa ke tanah. Tegangan ini biasanya dinyatakan sebagai 20.000 V/11.500 V. Sebagian besar beban untuk industri dicatu dengan sistem distribusi primer, yang mencatu transformator distribusi.

Transformator - transformator ini menyediakan tegangan sekunder pada jaringan tegangan rendah tiga-fasa empat-kawat untuk pemakaian di rumah-rumah tempat tinggal. Standar tegangan rendah yang digunakan adalah 380 V antara antar fasa dan 220V di antara masing-masing fasa dengan tanah, yang dinyatakan dengan 220/380 V.

## **2.2. Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik<sup>8</sup>**

Secara umum, saluran tenaga listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

### **2.2.1. Menurut Nilai Tegangannya**

#### **a. Saluran Distribusi primer**

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik Sekunder trafo substation (G.I.) dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini ber- tegangan menengah 20kV. Jaringan listrik 70 kV atau 150 kV, jika langsung melayani pelanggan , bisa disebut jaringan distribusi.

#### **b. Saluran Distribusi Sekunder**

Terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban/pelanggan.

---

Suhadi, dkk, 2008, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jild 1 dan 3*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan<sup>8</sup>



### 2.2.2. Menurut Bentuk Tegangannya

- a. DC (Direct Current) menggunakan sistem tegangan searah.
- b. AC (Alternating Current) menggunakan sistem tegangan bolak-balik.

### 2.2.3. Menurut Jenis/Tipe Konduktornya

#### a. Saluran udara

Dipasang pada udara terbuka dengan bantuan support (tiang) dan perlengkapannya, dibedakan atas:

1. Saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus.
2. Saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.

#### b. Saluran Bawah

Tanah, dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (ground cable).

#### c. Saluran Bawah Laut

dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (submarine cable)

## 2.3. Jaringan Tegangan Menengah<sup>3</sup>

Pada pendistribusian tenaga listrik ke pengguna tenaga listrik di suatu kawasan, penggunaan sistem Tegangan Menengah sebagai jaringan utama adalah upaya utama menghindarkan rugi-rugi penyaluran (losses) dengan kualitas persyaratan tegangan yang harus dipenuhi oleh PT PLN Persero selaku pemegang Kuasa Usaha Utama sebagaimana diatur dalam UU ketenagalistrikan No 30 tahun 2009.

Dengan ditetapkannya standar Tegangan Menengah sebagai tegangan operasi yang digunakan di Indonesia adalah 20 kV, konstruksi JTM wajib memenuhi kriteria enjineriing keamanan ketenagalistrikan, termasuk didalamnya adalah jarak aman minimal antara Fase dengan lingkungan dan antara Fase

---

<sup>3</sup> PT. PLN PERSERO. 2010. Buku 5 : *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik*. Jakarta



dengan tanah, bila jaringan tersebut menggunakan Saluran Udara atau ketahanan Isolasi jika menggunakan Kabel Udara Pilin Tegangan Menengah atau Kabel Bawah Tanah Tegangan Menengah serta kemudahan dalam hal pengoperasian atau pemeliharaan Jaringan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) pada jaringan utama. Hal ini dimaksudkan sebagai usaha menjaga keandalan kontinuitas pelayanan konsumen.

Ukuran dimensi konstruksi selain untuk pemenuhan syarat pendistribusian daya, juga wajib memperhatikan syarat ketahanan isolasi penghantar untuk keamanan pada tegangan 20 kV. Lingkup Jaringan Tegangan Menengah pada sistem distribusi di Indonesia dimulai dari terminal keluar (out-going) pemutus tenaga dari transformator penurun tegangan Gardu Induk atau transformator penaik tegangan pada Pembangkit untuk sistem distribusi skala kecil, hingga peralatan pemisah/proteksi sisi masuk (in-coming) transformator distribusi 20 kV - 220/380V.

Konstruksi jaringan Tenaga Listrik Tegangan Menengah dapat dikelompokkan menjadi 3 macam konstruksi sebagai berikut :

### **2.3.1. Saluran Udara Tegangan Menengah**

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan Tegangan Menengah yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton. 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 Fase atau dengan bangunan atau dengan tanaman atau dengan jangkauan manusia. Termasuk dalam kelompok yang diklasifikasikan SUTM adalah juga bila penghantar yang digunakan adalah penghantar berisolasi setengah AAAC-S (half insulated single core). Penggunaan penghantar ini tidak menjamin keamanan terhadap tegangan sentuh yang



dipersyaratkan akan tetapi untuk mengurangi resiko gangguan temporer khususnya akibat sentuhan tanaman.

### **2.3.2. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah**

Untuk lebih meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi setengah pada konstruksi jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah 20 kV, dapat juga digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Isolasi penghantar tiap Fase tidak perlu di lindungi dengan pelindung mekanis. Berat kabel pilin menjadi pertimbangan terhadap pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton penopangnya.

### **2.3.3. Saluran Kabel Tegangan Menengah**

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 conduit atau bahkan *tunneling* (terowongan beton).

## **2.4. Gardu Distribusi**

Gardu Distribusi merupakan suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Tegangan Menengah (PHB-TM) Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V).



### 2.4.1. Jenis-Jenis Gardu Disrtibusi<sup>5</sup>

Secara umum gardu distribusi dibedakan menjadi 3 jenis yaitu jenis pemasangannya, jenis konstruksinya, dan jenis penggunaannya. Menurut jenis pemasangannya ialah gardu pasang dalam dan gardu pasang luar. Menurut Jenis Konstruksinya ialah gardu beton, gardu tiang dan gardu kios (MC). Dan menurut Jenis Penggunaannya ialah gardu pelanggan umum dan gardu pelanggan khusus.

### 2.4.2. Macam-Macam Gardu distribusi

#### 2.4.2.1. Gardu Beton

Yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya terbuat dari beton (campuran pasir, batu dan semen). Gardu beton termasuk `gardu jenis pemasangan dalam, karena pada umumnya semua peralatan peng-hubung/pemutus, pemisah dan trafo distribusi terletak di dalam bangunan beton. Dalam pembangunannya semua peralatan tersebut di disain dan diinstalasi di lokasi sesuai dengan ukuran bangunan gardu



Gambar 2.2 Gardu Beton

#### 2.4.2.2. Gardu Kios / Gardu *Metal Clad*

Yaitu Gardu Distribusi Tenaga Listrik yang kontruksi pembuatanya terbuat dari bahan kontruksi baja, fiberglas atau kombinasinya. Gardu ini dibangun di lokasi yang tidak memungkinkan didirikanya Gardu Beton atau Gardu tembok.

---

<sup>5</sup> PT. PLN PERSERO. 2010. Buku 4 : *Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Jakarta



Karna Sifatnya Mobilitas, maka kapasitas Transformator yang terpasang terbatas yakni maksimum 400 Kva



Gambar 2.3 Gardu kios / *Metal clad*

#### 2.4.2.3. Gardu Hubung

Gardu yang ditujukan untuk memudahkan manuver pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi/tidak dilengkapi RTU (Remote Terminal Unit). Untuk fasilitas ini lazimnya dilengkapi fasilitas DC Supply dari Trafo Distribusi pemakaian sendiri atau Trafo distribusi untuk umum yang diletakkan dalam satu kesatuan.



Gambar 2.4 Gardu Hubung



#### 2.4.2.4. Gardu Cantol

Gardu Cantol adalah tipe gardu distribusi jenis pasangan luar (outdoor) yang terpasang dengan konstruksi 1 tiang dan memiliki transformator yang terpasang jenis 3 fasa atau 1 fasa dengan tipe CSP (Completely Self Protected Transformator) yaitu peralatan switching dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki transformator. Perlengkapan perlindungan tambahan LA (Lightning Arrester) dipasang terpisah dengan penghantar hubung bagi tegangan rendah (PHB-TR) maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (type NH,NT) sebagai pengaman jurusan



Gambar 2.5 Gardu Cantol

#### 2.4.2.5. Gardu Portal

Gardu listrik tipe pasang luar dengan memakai konstruksi dua tiang atau lebih. Tempat kedudukan transformator sekurang - kurangnya 3 meter di atas tanah dan ditambahkan platform sebagai fasilitas kemudahan kerja teknisi operasi dan pemeliharaan.



Gambar 2.6 Gardu Portal

#### 2.4.2.5.1. Komponen Pada Gardu Portal

##### a. Komponen Atas Gardu Portal



Gambar 2.7 Komponen Atas Gardu Portal

#### 1. Lightning Arrester (LA)

Berfungsi sebagai alat proteksi atau pengaman trafo distribusi dari tegangan lebih akibat surja petir, khususnya gardu pasang luar.

#### 2. Fused Cut Out (FCO)

Berfungsi sebagai proteksi atau pengaman lebur,. FCO ini berfungsi sebagai alat pelindung transformator dari arus hubung singkat dan sebagai alat untuk membebaskan sumber tegangan jika dilakukan pemeliharaan. Proteksi pada



FCO ini dipasang dalam bentuk Fuse Link yang dapat disesuaikan dengan nominal daya trafo yang terpasang.

### **3. Wiring Gardu**

Berupa pengawatan atau kawat penghubung untuk menghubungkan tegangan dari jaringan SUTM, Lightning Arrester (LA), dan Fused Cut Out (FCO) ke Transformator Distribusi.

### **4. Tiang**

Tiang yang dipergunakan untuk gardu distribusi ini bisa berupa tiang beton maupun tiang besi, Biasanya menggunakan jenis tiang TM KOOI.

### **5. Transformator Distribusi**

Komponen utama dari gardu distribusi untuk menurunkan tegangan dari sisi TM (Tegangan Menengah) 20 kV menjadi tegangan TR 220/380 v. Trafo yang digunakan berkapasitas 50 kVa- 400 kVa sesuai dengan kebutuhan.

### **6. Rangka Gardu**

Pada dasarnya berfungsi untuk menempatkan Trafo distribusi dan komponen lainnya pada Tiang. Rangka Gardu ini biasanya sudah berupa satu Set lengkap.

### **7. Pipa Jurusan**

Berfungsi untuk menempatkan kabel naik atau kabel jurusan dari PHB-TR ke jaringan SUTR di bagian atas

#### **b. Komponen Bawah Gardu Portal**



Gambar 2.8 Komponen PHB TR

1. Saklar utama
2. Rel Tembaga atau Rel Jurusan
3. NH Fuse
4. Kabel naik ( kabel penghubung dari PHB TR menuju JTR)
5. Kabel turun ( kabel penghubung dari Trafo ke PHB TR ).

## 2.5. Transformator

### 2.5.1. Pengertian Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi-elektromagnet. Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Penggunaan transformator yang sederhana dan handal memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan serta merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik



### 2.5.2. Bagian-Bagian Transformator<sup>8</sup>

Bagian-bagian pada transformator terdiri dari :

#### 1. Inti Besi

Memiliki fungsi untuk membangkitkan fluksi yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan trafo, sedang bahan ini terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis, hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus eddy.

#### 2. Kumparan Primer dan Kumparan Sekunder

Kawat email yang berisolasi terbentuk kumparan serta terisolasi baik antar kumparan maupun antara kumparan dan inti besi. Terdapat dua kumparan pada inti tersebut yaitu kumparan primair dan kumparan skunder, bila salah satu kumparan tersebut diberikan tegangan maka pada kumparan akan membangkitkan fluksi pada inti serta menginduksi kumparan lainnya sehingga pada kumparan sisi lain akan timbul tegangan.

#### 3. Minyak Trafo

Belitan primer dan sekunder pada inti besi pada trafo terendam minyak trafo, hal ini dimaksudkan agar panas yang terjadi pada kedua kumparan dan inti trafo oleh minyak trafo dan selain itu minyak tersebut juga sebagai isolasi pada kumparan dan inti besi.

#### 4. Isolator Bushing

Pada ujung kedua kumparan trafo baik primair ataupun sekunder keluar menjadi terminal melalui isolator yang juga sebagai penyekat antar kumparan dengan body badan trafo.

---

<sup>8</sup> Suhadi, dkk, 2008, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jild 3*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.



## 5. Pendingin Trafo

Perubahan temperature akibat perubahan beban maka seluruh komponen trafo akan menjadi panas, guna mengurangi panas pada trafo dilakukan pendingin pada trafo, guna mengurangi pada trafo dilakukan pendinginan pada trafo. Sedangkan cara pendinginan trafo terdapat dua macam yaitu : alamiah/natural (Onan) dan paksa/tekanan (Onaf).

Pada pendinginan alamiah (natural) melalui sirip-sirip radiator yang bersirkulasi dengan udara luar dan untuk trafo yang besar minyak pada trafo disirkulasikan dengan pompa. Sedangkan pada pendinginan paksa pada sirip-sirip trafo terdapat fan yang bekerjanya sesuai setting temperaturnya.

## 6. Tap Changer Trafo

Tap changer adalah alat perubah pembanding transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. Tiap changer hanya dapat dioperasikan pada keadaan trafo tidak bertegangan atau disebut dengan “Off Load Tap Changer” serta dilakukan secara manual.

### 2.5.3. Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibatnya adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

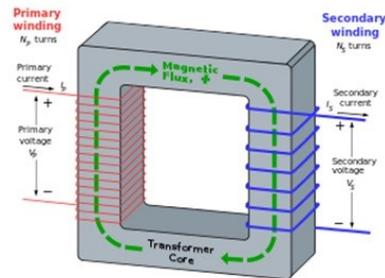
$$e = (-) N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$



Ket :  $e$  = gaya gerak listrik

$N$  = jumlah lilitan

$\frac{d\phi}{dt}$  = perubahan flux magnet (weber/sec)



Gambar 2.9 Prinsip kerja transformator

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan trafo berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti trafo. Selain itu, tegangan induksi juga dapat terbangkitkan apabila ada perubahan fluks terhadap waktu, jika fluks yang mengalir adalah konstan maka tegangan induksi tidak dapat terbangkitkan.

Setiap trafo juga memiliki suatu besaran yang dinamakan perbandingan transformasi ( $a$ ), untuk menunjukkan perbandingan lilitan atau perubahan level tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder yang ditransformasikan pada trafo tersebut. Berikut perumusannya:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

$V_p$  = tegangan primer (volt)

$V_s$  = tegangan sekunder (volt)

$N_p$  = jumlah lilitan primer

$N_s$  = jumlah lilitan sekunder

#### 2.5.4. Transformator Distribusi

Transformator distribusi adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah. Tujuan dari penggunaan transformator distribusi adalah untuk mengurangi tegangan utama dari sistem distribusi tenaga listrik menjadi tegangan untuk



penggunaan konsumen. Penempatan transformator untuk instalasi gardu pasangan luar (outdoor) dipasang diatas tiang, dengan menggunakan satu tiang untuk gardu cantol dan dua tiang untuk gardu portal. Sedangkan penempatan transformator untuk instalasi pasangan dalam dipasang dibawah yang alasnya disemen dengan beton dalam sebuah ruangan tembok atau kios. Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator step down 20 kV/400 kV 3 fasa dan 1 fasa, dan ada juga yang menggunakan tiga buah transformator 1 fasa. Tegangan phasa ke phasa sistem jaringan tegangan rendah 380 Volt. Karena terjadi drop tegangan, maka pada tegangan rendahnya dibuat diatas 380 Volt agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380 Volt.

### 2.5.5. Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator

Daya Transformator bila ditinjau dari sisi tegangan primer dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3}.V.I \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

S : daya transformator (kVA)

V : tegangan primer transformator (kV)

I : Arus jala-jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}.V} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

$I_{FL}$  : arus beban penuh (A)

S : daya transformator (kVA)

V : tegangan sisi sekunder trafo (kV)

Sedangkan untuk menghitung arus hubung singkat pada transformator digunakan rumus :

$$I_{sc} = \frac{S \times 100}{\%Z \times \sqrt{3} \times V_s} \dots\dots\dots (2.5)$$



Dimana :

$I_{sc}$  : arus hubung singkat (A)

$S$  : daya transformator (kVA)

$V_s$  : tegangan sisi sekunder transformator (kV)

$\%Z$  : persentase impedansi transformator

### 2.5.6. Pembebanan Transformator

Beban adalah suatu sirkuit akhir pemanfaatan dari suatu jaringan tenaga listrik, yang berarti tempat terjadinya suatu perubahan energi dari energi listrik menjadi energi lainnya, seperti cahaya, panas, gerakan, magnet, dan sebagainya.

Beban merupakan sirkuit akhir pemanfaatan dari jaringan tenaga listrik yang harus dilayani oleh sumber tenaga listrik tersebut untuk diubah menjadi bentuk energi lain. Oleh karena itu, pelayanan terhadap beban haruslah terjamin kontinuitasnya untuk menjaga kehandalan dari sistem tenaga listrik.

Untuk mencapai keadaan yang handal tersebut, suatu sistem tenaga listrik haruslah dapat mengatasi semua gangguan yang terjadi tanpa melakukan pemadaman terhadap bebannya.

Menurut PT.PLN (Persero), transformator distribusi diusahakan agar tidak dibebani lebih dari 80% untuk keadaan *overload* dan dibawah 40 % untuk keadaan *underload*.

Untuk menghitung besar persentase pembebanan transformator dapat menggunakan rumus berikut :

$$\% \text{ Persentase pembebanan trafo} : = \frac{I_{rata-rata}}{I_{fl}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

Persentase pembebanan trafo : persen (%)

$I_{rata-rata}$  : arus rata-rata fasa R,S,T (A)

$I_{fl}$  : arus beban penuh (A)

Untuk mendapatkan nilai arus rata-rata, dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$I_{rata-rata} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

$I_{rata-rata}$  = Arus (A)



$I_r$  = arus fasa R (A)

$I_s$  = arus fasa S (A)

$I_t$  = arus fasa T (A).

## 2.6. Ketidakseimbangan Beban

### 2.6.1. Pengertian Beban Tidak Seimbang

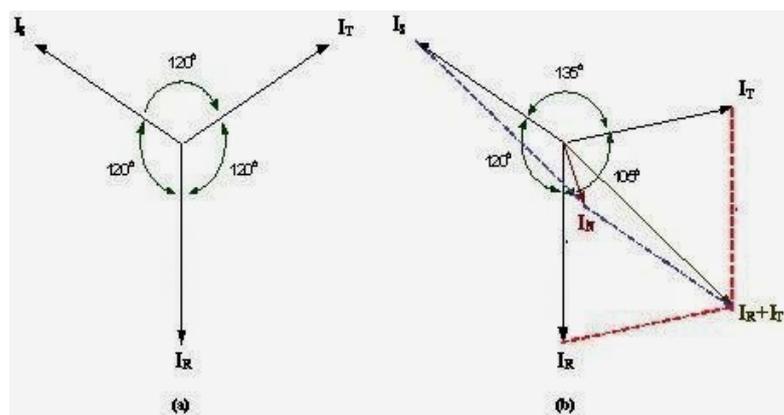
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

- Ketiga vektor arus / tegangan sama besar
- Ketiga vector saling membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi.

Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu :

- Ketiga vector sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain



Gambar 2.10 Vektor diagram arus

Gambar 2.10 (a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ )



adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral ( $I_N$ ). Sedangkan pada gambar 2.10 (b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ ) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral ( $I_N$ ) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

### 2.6.2. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

Untuk menghitung arus rata-rata dapat digunakan rumus berikut ini :

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang ( $I$ ) sama dengan besarnya arus rata-rata, maka koefisien a, b dan c diperoleh dengan :

$$a = \frac{I_R}{I} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$b = \frac{I_S}{I} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$c = \frac{I_T}{I} \dots\dots\dots (2.11)$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$\% \text{ketidakseimbangan beban} = \frac{|a-1| + |b-1| + |c-1|}{3} \times 100 \dots\dots\dots (2.12)$$

### 2.6.3. Arus Netral

Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral ini muncul jika :

- a. Kondisi beban tidak seimbang
- b. Karena adanya arus harmonisa akibat beban non-linear.

Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus bolak balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris.



#### 2.6.4. Arus Netral Ketika Beban Tidak Seimbang

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada tegangan akan didapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \dots \dots \dots (2.13)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \dots \dots \dots (2.14)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \dots \dots \dots (2.15)$$

Dengan tiga langkah yang telah dijabarkan dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negative, dan urutan nol terdahulu, maka arus-arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga kita dapatkan juga:

$$I_1 = 1/3 (I_a + a I_b + a^2 I_c) \dots \dots \dots (2.16)$$

$$I_2 = 1/3 (I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots \dots \dots (2.17)$$

$$I_0 = 1/3 (I_a + I_b + I_c) \dots \dots \dots (2.18)$$

Di sini terlihat bahwa arus urutan nol ( $I_0$ ) adalah merupakan sepertiga dari arus netral atau sebaliknya akan menjadi nol jika dalam sistem tiga fasa empat kawat. Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral, menjadi :

$$I_N = I_a + I_b + I_c \dots \dots \dots (2.19)$$

Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral. Jika arus-arus fasanya seimbang maka arus netralnya akan bernilai nol, tapi jika arus-arus fasanya tidak seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem (arus netral akan mempunyai nilai dalam arti tidak nol).



### 2.6.5. Rugi-rugi Akibat Adanya Arus Netral Pada Saluran Netral Sekunder Transformator

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo menyebabkan rugi-rugi. Rugi-rugi pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots \dots \dots (2.20)$$

Dimana :

$P_N$  = rugi-rugi pada penghantar netral trafo (watt)

$I_N$  = arus yang mengalir pada netral trafo (A)

$R_N$  = tahanan penghantar netral trafo ( $\Omega$ )

Sedangkan rugi-rugi yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (ground) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana :

$P_G$  = rugi-rugi akibat arus netral mengalir ke tanah (watt)

$I_G$  = arus yang mengalir ke tanah (A)

$R_G$  = tahanan pembumian netral trafo ( $\Omega$ )

### 2.7. *ETAP (Electric Transient and Analysis Program)*

*ETAP (Electric Transient and Analysis Program)* merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelolaan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara



real-time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. *ETAP* ini awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di Amerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara real time, simulasi, kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik. *ETAP* dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (one line diagram) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: aliran daya, hubung singkat, starting motor, transient stability, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

*ETAP PowerStation* memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan tampilan gambar single line diagram/diagram satu garis. Program ini dirancang sesuai dengan tiga konsep utama :

### **1. *Virtual Reality Operation***

Sistem operational yang ada pada program sangat mirip dengan sistem operasi pada kondisi realnya. Misalnya, ketika anda membuka atau menutup sebuah sirkuit breaker, menempatkan suatu elemen pada sistem, dan mengubah status operasi suatu motor.

### **2. *Total Integration Data***

*ETAP PowerStation* menggabungkan informasi sistem elektrikal, sistem logika, sistem mekanik, dan data fisik dari suatu elemen yang dimasukkan dalam sistem database yang sama. Misalnya, untuk elemen sebuah kabel, tidak hanya berisikan data kelistrikan dan tentang dimensi fisiknya, tapi juga memberikan informasi melalui raceways yang di lewati oleh kabel tersebut. Dengan demikian, data untuk satu kabel dapat digunakan untuk dalam menganalisa aliran beban (load flow analysis) dan analisa hubung singkat (short-circuit analysis) yang



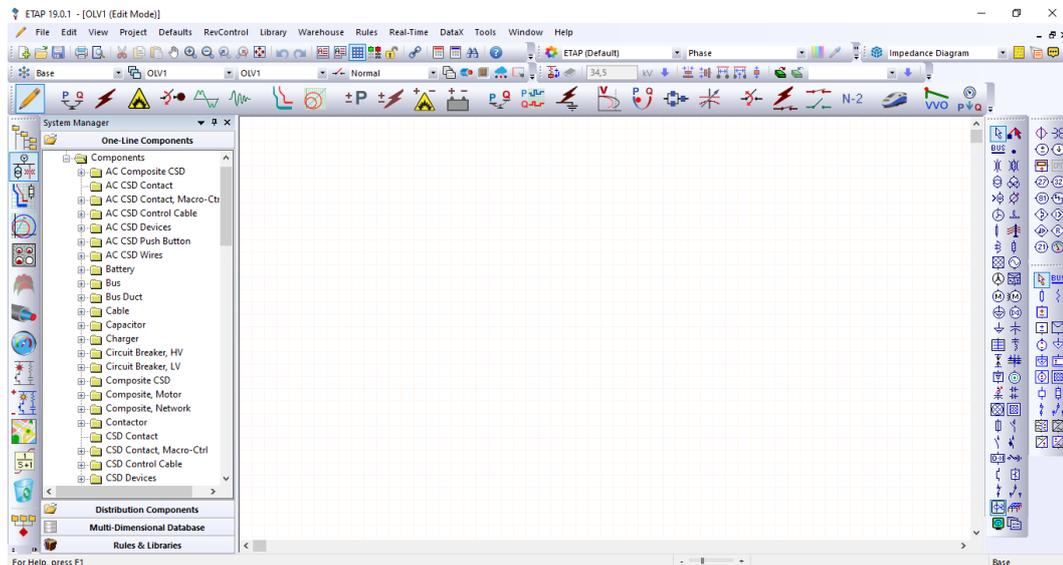
membutuhkan parameter listrik dan parameter koneksi serta perhitungan ampacity derating suatu kabel.

### 3. *Simplicity In Data Entry*

*ETAP PowerStation* memiliki data yang detail untuk setiap elemen yang digunakan. Dengan menggunakan editor data, dapat mempercepat proses pemasukkan data suatu elemen. Data-data yang ada pada program ini telah di masukkan sesuai dengan data-data yang ada di lapangan untuk berbagai jenis analisa atau desain.

*ETAP PowerStation* dapat melakukan penggambaran single line diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisa/studi yakni load flow (aliran daya), unbalanced load flow (aliran beban tidak seimbang) short circuit (hubung singkat), motor starting, harmonisa, transient stability, protective device coordination, cable derating, dll. *ETAP PowerStation* juga menyediakan fasilitas Library yang akan mempermudah desain suatu sistem kelistrikan. Library ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan bila perlu. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan *ETAP PowerStation* adalah:

1. *On Line Diagram*, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk sebuah sistem kelistrikan.
2. *Library*, informasi mengenai sema peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
3. Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
4. *Study Case*, berisikan parameter-parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

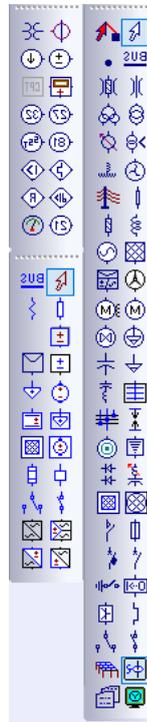


Gambar 2.11 Gambar Kerja Editor *ETAP* 19.0.1

### 2.7.1. Elemen-elemen Sistem Tenaga Listrik Pada *ETAP*

Suatu sistem tenaga terdiri atas sub-sub bagian, salah satunya adalah aliran daya dan hubung singkat. Untuk membuat simulasi aliran daya dan hubung singkat, maka data-data yang dibutuhkan untuk menjalankan program simulasi antara lain:

1. Data Generator
2. Data Transformator
3. Data Kawat Penghantar
4. Data Beban
5. Data Bus



Gambar 2.12 Elemen-elemen di *ETAP* 19.0.1

Program analisis ketidakseimbangan aliran daya pada software *ETAP* dapat menghitung tegangan pada tiap-tiap cabang, aliran arus pada sistem tenaga listrik, dan aliran daya yang mengalir pada sistem tenaga listrik. Metode perhitungan ketidakseimbangan aliran daya pada *software ETAP* menggunakan metode *Current Injection*.



Gambar 2.13 Toolbar Unbalanced Load Flow *ETAP* 19.0.1

Gambar atas ke bawah menunjukkan toolbar aliran daya, yaitu :



1. *Run Unbalanced Load Flow* adalah icon toolbar aliran daya yang menghasilkan atau menampilkan hasil perhitungan aliran daya sistem distribusi tenaga listrik dalam diagram satau garis.
2. *Fault Insetion Open Phase A* adalah icon untuk membuat beban tak seimbang
3. *Alert View* adalah icon untuk menampilkan batas kritis dan marginal dari hasil keluaran aliran daya sistem distribusi tenaga listrik
4. *Report Manager* adalah icon untuk menampilkan hasil aliran daya dalam bentuk report yang dapat dicetak