

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sistem Tenaga Listrik<sup>[5]</sup>**

Sekalipun tidak terdapat suatu sistem tenaga listrik yang “tipikal”, namun pada umumnya, dapat dikembalikan batasan pada suatu sistem yang lengkap yang mengandung empat unsur, yaitu:

1. Adanya suatu unsur pembangkit listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik itu biasanya merupakan tegangan menengah (TM).
2. Suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT) atau tegangan ekstra tinggi (TET).
3. Adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR).
4. Adanya unsur pemakaian atas utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri menggunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi.

Gambar 2.1 memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem terinterkoneksi.

Energi listrik dibangkitkan pada pembangkit tenaga listrik (PTL) yang dapat merupakan suatu pusat listrik tenaga uap (PLTU), pusat tenaga listrik air (PLTA), pusat listrik tenaga gas (PLTG), pusat listrik tenaga diesel (PLTD), ataupun pusat listrik tenaga nuklir (PLTN).

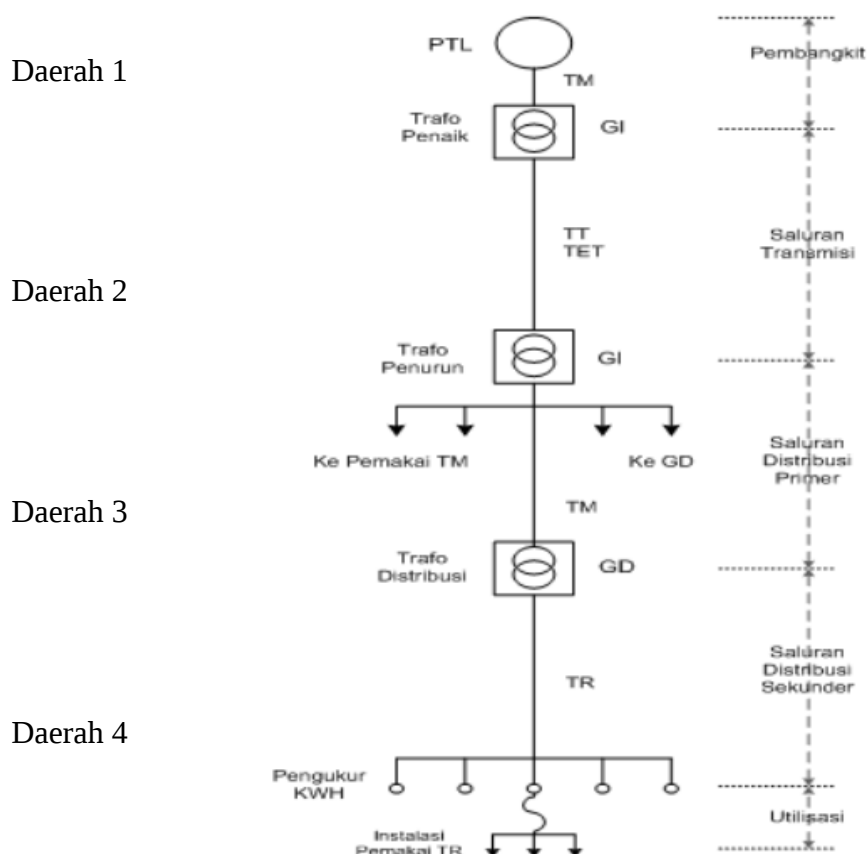
Pembangkit tenaga listrik (PTL) biasanya membangkitkan energi listrik pada tegangan menengah (TM), yaitu pada umumnya antara 6 sampai 20 kV. Jika pembangkit terletak jauh dari pemakai, maka energi listrik perlu diangkut melalui

---

<sup>5</sup> Sumber Abdul Kadir, *Distribusi Dan Utilisasi Tenaga Listrik*, Universitas Indonesia, Jakarta, 2000, hlm. 3.

saluran transmisi dan tegangannya dinaikkan dari tegangan menengah menjadi tegangan tinggi (TT) ataupun tegangan ekstra tinggi (TET). Menaikkan tegangan itu dilakukan di gardu induk (GI) dengan menggunakan transformator penaik tegangan. Tegangan tinggi di Indonesia yaitu 70 kV, 150 kV dan 275 kV. Sedangkan tegangan ekstra tinggi yaitu diatas 500 kV.

Mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan menengah. Di Indonesia tegangan menengah yaitu 20 kV. Di tepi – tepi jalan, biasanya berdekatan dengan persimpangan, terdapat gardu – gardu distribusi (GD) yang mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah (TR) melalui transformator distribusi. Melalui tiang – tiang listrik, energi listrik tegangan rendah disalurkan kepada para pemakai. Di Indonesia, tegangan rendah yaitu 220/380 volt dan merupakan sistem distribusi sekunder.



**Gambar 2.1** Sistem tenaga listrik<sup>[5]</sup>

<sup>5</sup> Sumber Abdul Kadir, *Distribusi Dan Utilisasi Tenaga Listrik*, Universitas Indonesia, Jakarta, 2000, hlm. 5.

Berdasarkan gambar 2.1 di atas, maka dapat dikelompokkan dalam beberapa pembagian sebagai berikut:

- Daerah 1 : Bagian pembangkitan (*generation*).
- Daerah 2 : Bagian penyaluran (*transmission*) bertegangan tinggi (HV, UHV, EHV).
- Daerah 3 : Bagian distribusi primer bertegangan menengah (6 kV, 12 kV, atau 20 kV).
- Daerah 4 : Bagian distribusi sekunder tegangan rendah.

## 2.2 Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik<sup>[9]</sup>

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

### 2.2.1 Menurut nilai tegangannya

#### 2.2.1.1 Saluran distribusi primer

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

#### 2.2.1.2 Saluran distribusi sekunder

Terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban (Lihat Gambar 2.1)

### 2.2.2 Menurut bentuk tegangannya

- a. Saluran Distribusi DC (*Direct Current*) menggunakan sistem tegangan searah.
- b. Saluran Distribusi 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:

---

<sup>9</sup> Sumber Suhadi, dkk. *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Jakarta. 2008. Hlm. 14.

- Saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus.
- 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).

#### 2.2.4 Menurut susunan (konfigurasi) salurannya

##### a. Saluran konfigurasi horisontal

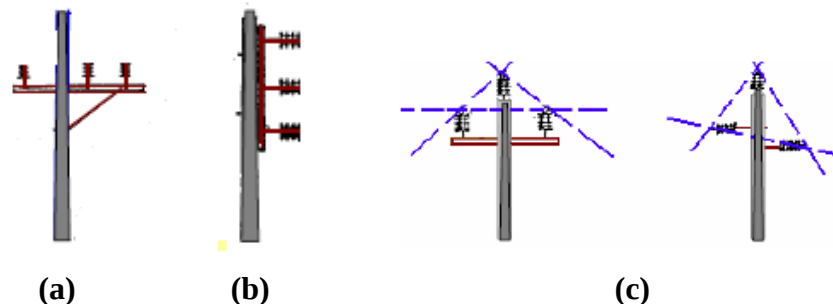
Bila saluran fasa terhadap fasa yang lain/terhadap netral, atau saluran positif terhadap negatif (pada sistem DC) membentuk garis horisontal.

##### b. Saluran konfigurasi vertikal

Bila saluran – saluran tersebut membentuk garis vertikal.

##### c. Saluran konfigurasi delta

Bila kedudukan saluran satu sama lain membentuk suatu segitiga (delta).



**Gambar 2.2 (a) Konfigurasi horisontal, (b) Konfigurasi vertikal, (c) Konfigurasi delta**

#### 2.2.5 Menurut susunan rangkaiannya

Dari uraian diatas telah disinggung bahwa sistem distribusi di bedakan menjadi dua yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder.

### 2.2.5.1 Jaringan sistem distribusi primer

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan disuplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer.

#### 1) Jaringan distribusi radial

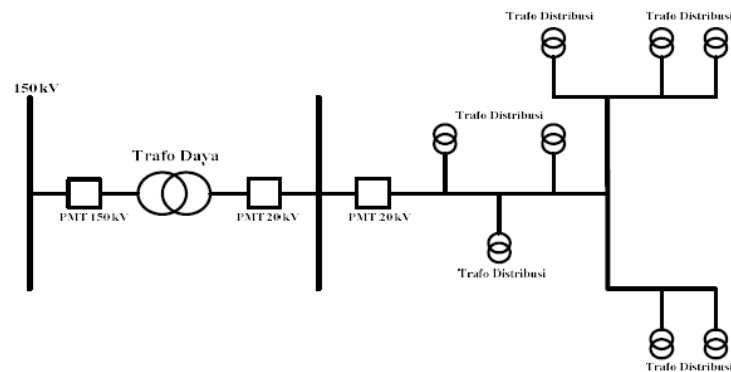
Bila antara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (line), tidak ada alternatif saluran lainnya. Bentuk Jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar.

Oleh karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama. Maksudnya, saluran utama (dekat sumber) yang menanggung arus beban besar, ukuran penampangnya relatif besar, dan saluran cabang-cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil, ukurannya lebih kecil pula.

Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah:

- a). Bentuknya sederhana.(+)
- b). Biaya investasinya relatif murah.(+)
- c). Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.(-)
- d). Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami "black out" secara total.(-)



**Gambar 2.3** Jaringan distribusi sistem radial<sup>[7]</sup>

## 2) Jaringan distribusi ring (Loop)

Bila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber. Jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan "loop". Susunan rangkaian penyulang membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil.

Bentuk loop ini ada 2 macam, yaitu:

### (a) Bentuk open loop

Bila diperlengkapi dengan normally-open switch, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

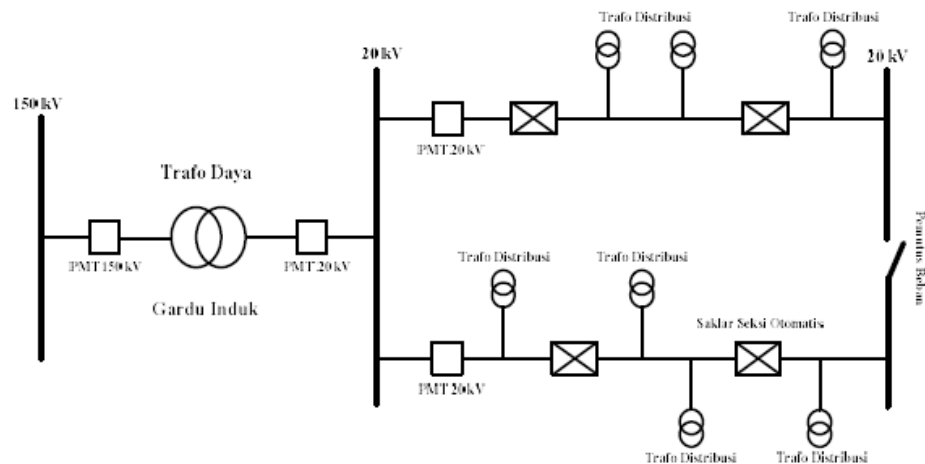
### (b) Bentuk close loop

Bila diperlengkapi dengan normally-close switch, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

Pada tipe ini, kualitas dan kontinuitas pelayanan daya memang lebih baik, tetapi biaya investasinya lebih mahal, karena memerlukan pemutus beban yang lebih banyak. Bila digunakan dengan pemutus beban yang otomatis (dilengkapi dengan recloser atau AVS), maka pengamanan dapat berlangsung cepat dan praktis, dengan cepat pula daerah gangguan segera beroperasi kembali

<sup>7</sup> Sumber Yunita Panjaitan, *Analisis Efisiensi Jaringan Distribusi 20 kV di Gardu Induk Seduduk Putih PT PLN (Persero) Rayon Kenten*, Tidak Diterbitkan, Palembang, 2013, hlm. 11.

bila gangguan telah teratasi. Dengan cara ini berarti dapat mengurangi tenaga operator. Bentuk ini cocok untuk digunakan pada daerah beban yang padat dan memerlukan keandalan tinggi.



**Gambar 2.4** Jaringan distribusi sistem loop<sup>[7]</sup>

### 3) Jaringan distribusi jaring – jaring (NET)

Merupakan gabungan dari beberapa saluran mesh, dimana terdapat lebih satu sumber sehingga berbentuk saluran interkoneksi. Jaringan ini berbentuk jaring-jaring, kombinasi antara radial dan loop.

Titik beban memiliki lebih banyak alternatif saluran/penyulang, sehingga bila salah satu penyulang terganggu, dengan segera dapat digantikan oleh penyulang yang lain. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin.

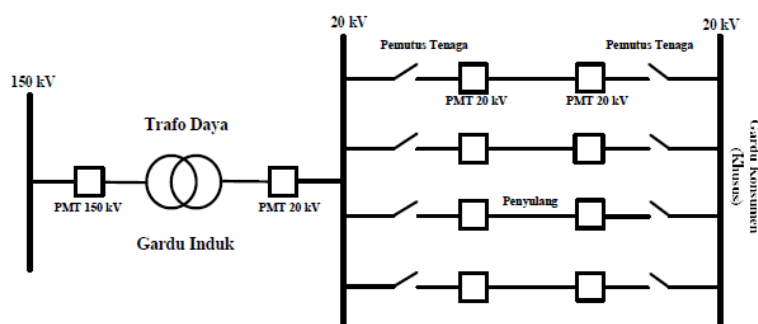
Spesifikasi Jaringan NET ini adalah:

- 1) Kontinuitas penyaluran daya paling terjamin.(+)
- 2) Kualitas tegangannya baik, rugi daya pada saluran amat kecil.(+)
- 3) Dibanding dengan bentuk lain, paling flexible (luwes) dalam mengikuti pertumbuhan dan perkembangan beban. (+)
- 4) Sebelum pelaksanaannya, memerlukan koordinasi perencanaan yang teliti dan rumit. (-)

<sup>7</sup> Sumber Yunita Panjaitan, *Analisis Efisiensi Jaringan Distribusi 20 kV di Gardu Induk Seduduk Putih PT PLN (Persero) Rayon Kenten*, Tidak Diterbitkan, Palembang, 2013, hlm. 13.

- 5) Memerlukan biaya investasi yang besar (mahal) (-)
- 6) Memerlukan tenaga-tenaga terampil dalam pengoperasian nya.(-)

Dengan spesifikasi tersebut, bentuk ini hanya layak (feasible) untuk melayani daerah beban yang benar-benar memerlukan tingkat keandalan dan kontinuitas yang tinggi, antara lain: instalasi militer, pusat sarana komunikasi dan perhubungan, rumah sakit, dan sebagainya. Karena bentuk ini merupakan jaringan yang menghubungkan beberapa sumber, maka bentuk jaringan NET atau jaring-jaring disebut juga jaringan "interkoneksi".



**Gambar 2.5** Jaringan Distribusi Sistem Jaring – Jaring (Ring)<sup>[7]</sup>

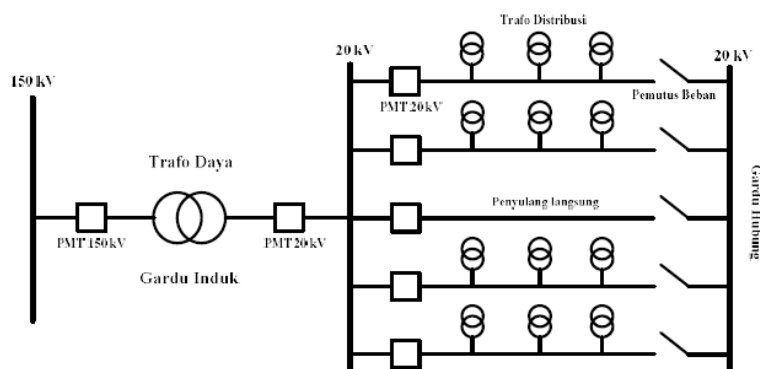
#### 4) Jaringan distribusi spindle

Selain bentuk-bentuk dasar dari jaringan distribusi yang telah ada, maka dikembangkan pula bentuk-bentuk modifikasi, yang bertujuan meningkatkan keandalan dan kualitas sistem. Salah satu bentuk modifikasi yang populer adalah bentuk spindle, yang biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Perhatikan gambar 2-22. Saluran 6 penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan "working feeder" atau saluran kerja, dan satu saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan "express feeder".

Fungsi "express feeder" dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu "working feeder", juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada

<sup>7</sup> Sumber Yunita Panjaitan, *Analisis Efisiensi Jaringan Distribusi 20 kV di Gardu Induk Seduduk Putih PT PLN (Persero) Rayon Kenten*, Tidak Diterbitkan, Palembang, 2013, hlm. 13.

keadaan operasi normal. Dalam keadaan normal memang "*express feeder*" ini sengaja dioperasikan tanpa beban. Perlu diingat di sini, bahwa bentuk-bentuk jaringan beserta modifikasinya seperti yang telah diuraikan di muka, terutama dikembangkan pada sistem jaringan arus bolak-balik (AC).



**Gambar 2.6** Jaringan Distribusi Sistem Spindle<sup>[7]</sup>

#### 2.2.5.2 Jaringan sistem distribusi sekunder<sup>9</sup>

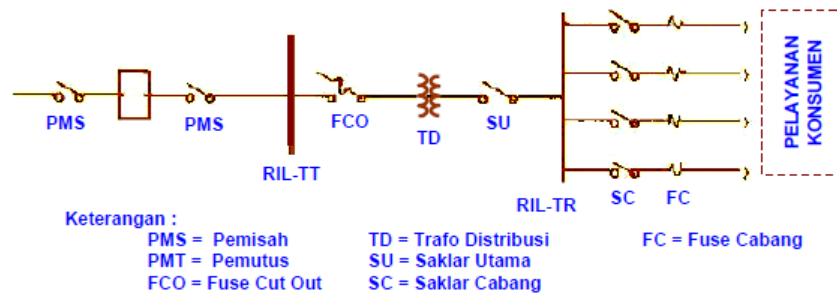
Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen/pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sebagai berikut:

- 1) Papan pembagi pada trafo distribusi,
- 2) Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
- 3) Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai)
- 4) Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH. meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan.

Komponen saluran distribusi sekunder seperti ditunjukkan pada gambar 2. berikut ini.

<sup>7</sup> Sumber Yunita Panjaitan, *Analisis Efisiensi Jaringan Distribusi 20 kV di Gardu Induk Seduduk Putih PT PLN (Persero) Rayon Kenten*, Tidak Diterbitkan, Palembang, 2013, hlm. 13.

<sup>9</sup> Sumber Suhadi, dkk. *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Jakarta. 2008. Hlm. 26.



**Gambar 2.7** Komponen Sistem Distribusi

## 2.3 Transformator<sup>[6]</sup>

### 2.3.1 Umum

Transformator merupakan suatu alat elektromagnetik, yang mengubah energi listrik dari satu tingkat tegangan ke tegangan yang lain. Hal ini dilakukan dengan perantaraan suatu medan magnet. Transformator terdiri atas dua kumparan yang digulung pada satu inti feromagnet. Kumparan-kumparan itu pada umumnya tidak berhubungan secara elektrik, melainkan secara magnetik melalui suatu fluks magnet yang berada di dalam inti feromagnet.

Salah satu kumparan dihubungkan pada sumber energi listrik. Kumparan ini dinamakan kumparan primer, yang memiliki sejumlah  $N_s$  belitan, dihubungkan pada beban listrik dan dinamakan kumparan sekunder.

### 2.3.2 Klasifikasi transformator<sup>[11]</sup>

- Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:
  1. Transformator daya
  2. Transformator distribusi
  3. Transformator pengukuran (*instrument*), yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.

<sup>6</sup> Sumber Abdul Kadir, *Pengantar Teknik Tenaga Listrik*, Universitas Indonesia, Jakarta, 1993, hlm. 154.

<sup>11</sup> Sumber Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, ITB, Bandung, 1991, hlm. 16.

- Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan menjadi :
  1. Frekuensi daya, 50-60 c/s
  2. Frekuensi pendengaran, 50 c/s – 20 kc/s
  3. Frekuensi radio, diatas 30 kc/s
- Berdasarkan jumlah fasanya dibagi atas 2 bagian yaitu:
  1. Transformator 1 fasa
  2. Transformator 3 fasa

### 2.3.2.1 Transformator daya

Transformator daya memiliki peranan sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Transformator daya digunakan untuk menyalurkan daya dari generator bertegangan menengah ke transmisi jaringan distribusi. Kebutuhan transformator daya bertegangan tinggi dan berkapasitas besar, menimbulkan persoalan dalam perencanaan isolasi ukuran bobotnya.

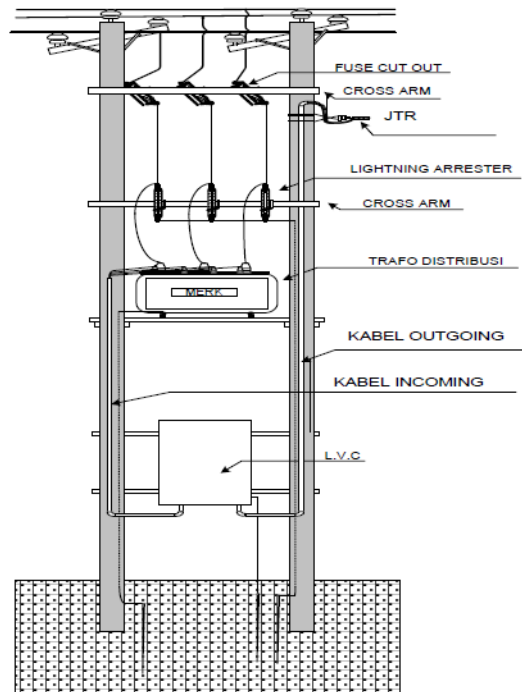
### 2.3.2.2 Transformator distribusi

Transformator distribusi yang umum digunakan adalah *transformator step down* 20/0,4 kV, tegangan fasa-fasa sistem JTR adalah 380 Volt karena terjadi drop tegangan maka tegangan pada rak TR dibuat diatas 380 Volt agar tegangan pada ujung beban menjadi 380 Volt.

Pada kumparan primer akan mengalir arus jika kumparan primer dihubungkan ke sumber listrik arus bolak-balik, sehingga pada inti transformator yang terbuat dari bahan *ferromagnet* akan terbentuk sejumlah garis-garis gaya magnet ( fluks =  $\Phi$  ).

Karena arus yang mengalir merupakan arus bolak-balik maka fluks yang terbentuk pada inti akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah-ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinus maka fluks yang terjadi akan berbentuk sinus pula karena fluks tersebut mengalir melalui inti yang mana pada inti tersebut terdapat lilitan primer dan lilitan sekunder maka pada lilitan primer dan sekunder tersebut akan timbul GGL (gaya gerak listrik) induksi, tetapi arah dari GGL induksi primer berlawanan dengan arah GGL induksi sekunder sedangkan

frekuensi masing-masing tegangan tersebut sama dengan frekuensi sumbernya.



**Gambar 2.8** Trafo distribusi

### 2.3.2.3 Transformator pengukuran

Dalam prakteknya tidaklah aman menghubungkan instrumen, alat ukur atau peralatan kendali langsung ke rangkaian tegangan tinggi. Transformator pengukuran (*instrumen*) umumnya digunakan untuk mengurangi tegangan tinggi dan arus hingga harga aman dan dapat digunakan untuk kerja peralatan demikian.

Transformator *instrumen* melakukan dua fungsi yakni:

1. Dipergunakan sebagai alat perbandingan (*ratio device*) yang memungkinkan penggunaannya alat ukur dan *instrumen* tegangan rendah dan arus rendah baku.
2. Digunakan sebagai alat pemisah (*insulating device*) untuk melindungi peralatan dan operator dari tegangan tinggi.

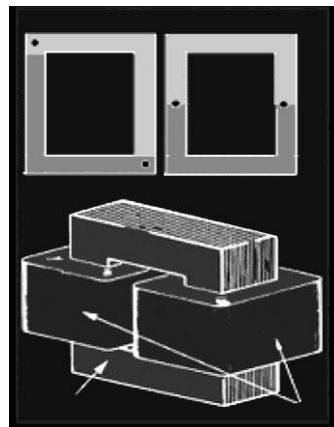
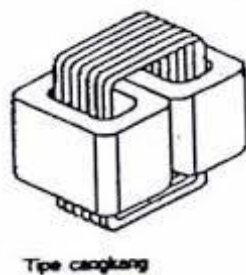
### 2.3.3 Bentuk dan konstruksi transformator

Konstruksi transformator distribusi terdiri dari beberapa bagian :

1. Inti, terbuat dari lempengan-lempengan pelat besi lunak atau baja silikon yang diklem menjadi satu.
2. Belitan, terbuat dari tembaga yang letaknya dibelitkan pada inti dengan bentuk konsentrik atau *spiral*.
3. Sistem pendinginan, (pada transformator dengan kapasitas besar).
4. *Bushing*, berfungsi untuk menghubungkan rangkaian dalam dari transformator ke rangkaian luar, (pada transformator daya).
5. *Arrester*, sebagai pengaman trafo terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir dan *switching* (SPLN se.002/PST/73).

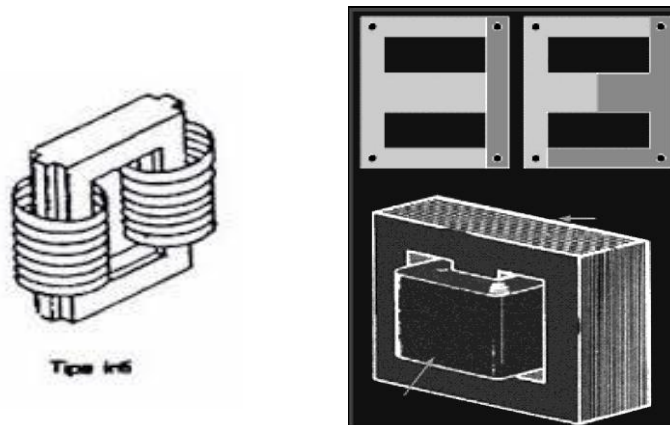
Bila dilihat dari letak belitannya, maka transformator terdiri dari :

1. Transformator jenis inti (*core type*), yaitu transformator dengan belitannya mengelilingi inti dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf L atau U.



**Gambar 2.9** Konstruksi transformator tipe inti

2. Transformator jenis cangkang (*shell type*), inti transformator ini mengelilingi belitannya dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf E, I atau F.



**Gambar 2.10** Konstruksi transformator tipe cangkang

### 2.3.4 Prinsip kerja transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan Hukum *ampere* dan Hukum *faraday*, yaitu arus listrik menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik.

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris 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. Akibat 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 di bebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

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

dimana :

$e$  = gaya gerak listrik

$N$  = jumlah lilitan

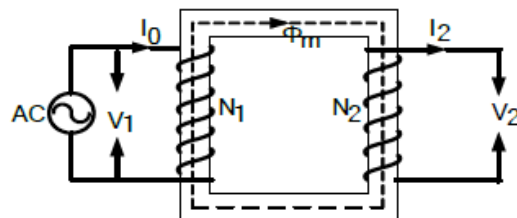
$dt$  = perubahan flux magnet (weber/sec)

Perlu diingat bahwa hanya tegangan listrik arus bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian.

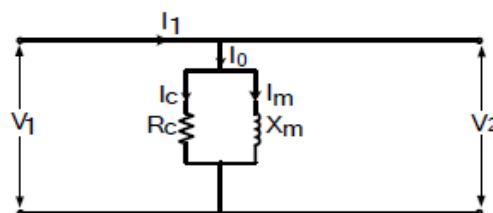
Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*).

#### 2.3.4.1 Keadaan transformator tanpa beban<sup>[11]</sup>

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan  $V_1$  yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer  $I_0$  yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan  $N_1$  reaktif murni.  $I_0$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$ . Arus primer  $I_0$  menimbulkan fluks ( $\Phi$ ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal.

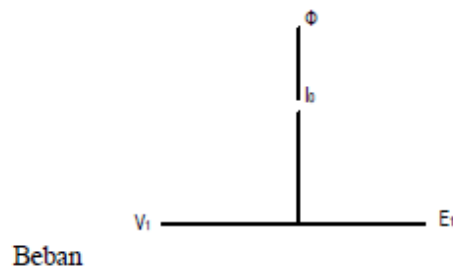


**Gambar 2.11** Transformator dalam keadaan tanpa beban

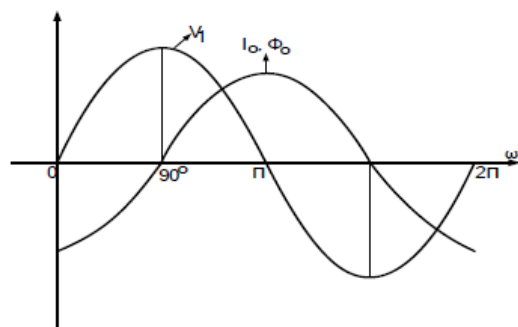


**Gambar 2.12** Rangkaian ekivalen transformator dalam keadaan tanpa beban

<sup>11</sup> Sumber Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, ITB, Bandung, 1991, hlm. 17.



**Gambar 2.13** Gambar vektor transformator dalam keadaan tanpa beban



**Gambar 2.14** Gambar gelombang  $I_0$  tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t \text{ (weber) ..... (2.2)}$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi  $e_1$  (Hukum Faraday):

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{\max} \sin \omega t)}{dt}$$

$$e_1 = -N_1 \omega \phi_{\max} \cos \omega t$$

$$e_1 = -N_1 \omega \phi_{\max} \cos (\omega t - 90) \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \phi) \text{ ..... (2.3)}$$

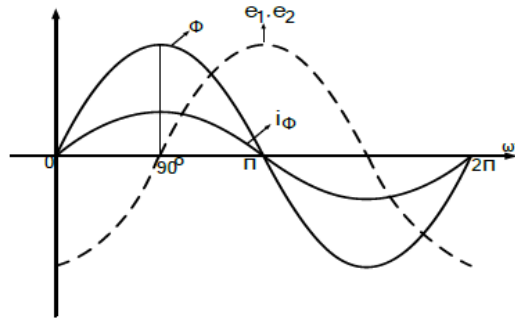
dimana :

$e_1$  = gaya gerak listrik (volt)

$N_1$  = jumlah belitan di sisi primer (turn)

$\omega$  = kecepatan sudut putar (rad/sec)

$\phi$  = fluks magnetik (weber)



**Gambar 2.15** Gambar gelombang  $e_1$  tertinggal  $90^\circ$  dari  $\phi$

Harga efektifnya  $e_1$  :

$$e_1 = \frac{N_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \phi_{maks}}{\sqrt{2}}$$

$$e_1 = 4,41 N_1 \cdot f \cdot \phi_{maks} \dots\dots\dots (2.4)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks ( $\phi$ ) bersama tadi menimbulkan :

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \omega \phi_{maks} \cos \omega t \dots\dots\dots (2.5)$$

Harga efektifnya  $e_2$  :

$$e_2 = 4,44 N_2 \cdot f \cdot \phi_{maks} \dots\dots\dots (2.6)$$

Sehingga perbandingan antara rangkaian primer dan sekunder adalah :

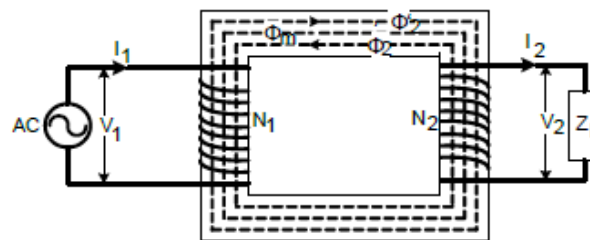
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana :

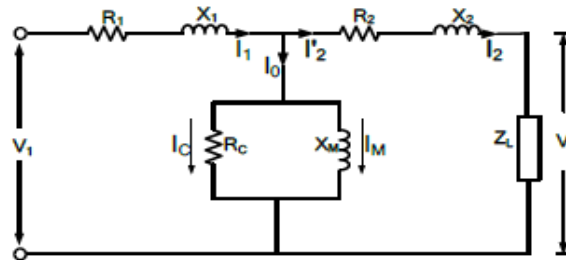
- $e_1$  = ggl induksi di sisi primer (volt)
- $e_2$  = ggl induksi di sisi sekunder (volt)
- $N_1$  = jumlah belitan sisi primer
- $N_2$  = jumlah belitan sisi sekunder
- $a$  = faktor transformasi

### 2.3.4.2 Keadaan transformator berbeban<sup>[11]</sup>

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z_L$ ,  $I_2$  mengalir pada kumparan sekunder, dimana  $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$



**Gambar 2.16** Transformator dalam keadaan berbeban



**Gambar 2.17** Rangkaian ekivalen transformator dalam keadaan berbeban

Arus beban  $I_2$  ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm)  $N_2 I_2$  yang cenderung menentang fluks ( $\Phi$ ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan. Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus  $I_2'$ , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban  $I_2$ , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I_2' \text{ (Ampere) } \dots\dots\dots (2.8)$$

Bila komponen arus rugi inti ( $I_c$ ) diabaikan, maka  $I_0 = I_m$ , sehingga :

$$I_1 = I_m + I_2' \text{ (Ampere) } \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana:

$I_1$  = arus pada sisi primer (Ampere)

$I_2'$  = arus yg menghasilkan  $\Phi'2$  (Ampere)

$I_0$  = arus penguat (Ampere)

<sup>11</sup> Sumber Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, ITB, Bandung, 1991, hlm. 21.

$I_M$  = arus pemagnetan (*Ampere*)

$I_C$  = arus rugi-rugi inti (*Ampere*)

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar  $g_m$  yang dihasilkan oleh arus pemagnetan  $I_M$ , maka berlaku hubungan :

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I_2') - N_2 I_2$$

$$N_1 I_2' = N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.10)$$

Karena  $I_M$  dianggap kecil, maka  $I_2' = I_1$ . Sehingga :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

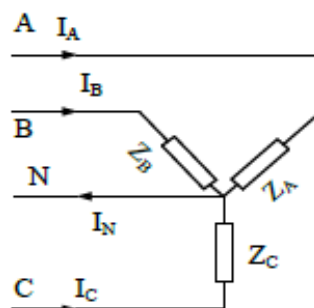
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (2.11)$$

## 2.4 Hubungan Tiga Fasa Dalam Transformator

Secara umum ada 3 macam jenis hubungan pada transformator tiga fasa yaitu:

### 2.4.1 Hubungan bintang (Y)

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujung-ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan bintang yaitu;  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  masing-masing berbeda  $120^\circ$ .



**Gambar 2.18** Transformator tiga fasa hubungan bintang.

Dari gambar diperoleh bahwa:

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L}$$

$$I_{L-L} = I_{ph} \text{ (Ampere) } \dots\dots\dots (2.12)$$

dan,

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L}$$

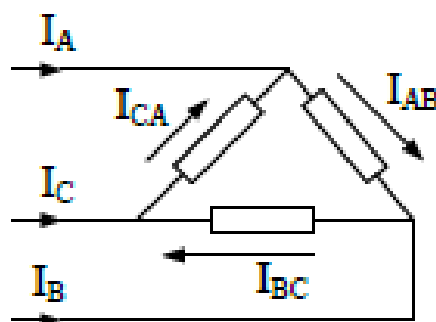
$$V_{L-L} = \sqrt{3} \cdot V_{ph} = \sqrt{3} \cdot E_1 \text{ (Volt) } \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana:

- $I_{L-L}$  = Arus fasa – fasa
- $I_{ph}$  = Arus fasa – netral
- $V_{L-L}$  = Tegangan fasa – fasa
- $V_{ph}$  = Tegangan fasa – netral

#### 2.4.2 Hubungan delta ( $\Delta$ )

Hubungan segitiga/delta adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan segitiga yaitu;  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  masing-masing berbeda  $120^\circ$ .



**Gambar 2.19** Transformator tiga fasa hubungan delta.

Dari gambar diperoleh bahwa:

$$I_A = I_B = I_C = I_{L-L}$$

$$I_{L-L} = \sqrt{3} \cdot I_{ph} \text{ (Ampere) } \dots\dots\dots (2.14)$$

dan,

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L}$$

$$V_{L-L} = V_{ph} = E_1 \text{ (Volt) } \dots\dots\dots (2.15)$$

dimana :

$V_{L-L}$  = tegangan fasa – fasa (Volt)

$V_{ph}$  = tegangan fasa (Volt)

$I_{L-L}$  = arus fasa – fasa (Ampere)

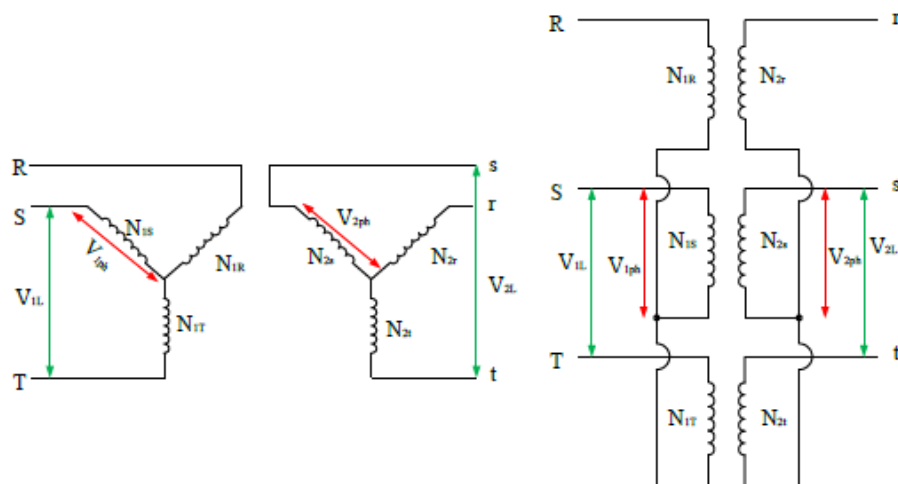
$I_{ph}$  = arus fasa (Ampere)

## 2.5 Jenis – jenis hubungan belitan transformator 3 fasa<sup>[2]</sup>

Transformator tiga fasa terdiri dari tiga transformator, baik terpisah atau dikombinasikan pada satu inti. Primer dan sekunder dari setiap transformator tiga fasa dapat terhubung baik dalam wye (Y) atau delta ( $\Delta$ ). ini memberikan total kemungkinan empat koneksi bagi transformator tiga fasa, yaitu:

### 2.5.1 Hubungan Wye – Wye (Y – Y)

Hubungan ini ekonomis digunakan untuk melayani beban yang kecil dengan tegangan dengan tegangan transformasi yang tinggi. Hubungan Y – Y pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.20 berikut ini.



**Gambar 2.20** Transformator 3 fasa hubungan Y-Y.

<sup>2</sup> Sumber Stephen J. Chapman, *Electric Machinery and power System Fundamentals*, Singapore, Mc Graw – Hill Companies, 2002, hlm. 135.

Pada hubungan ini, tegangan primer pada masing – masing fasa adalah:

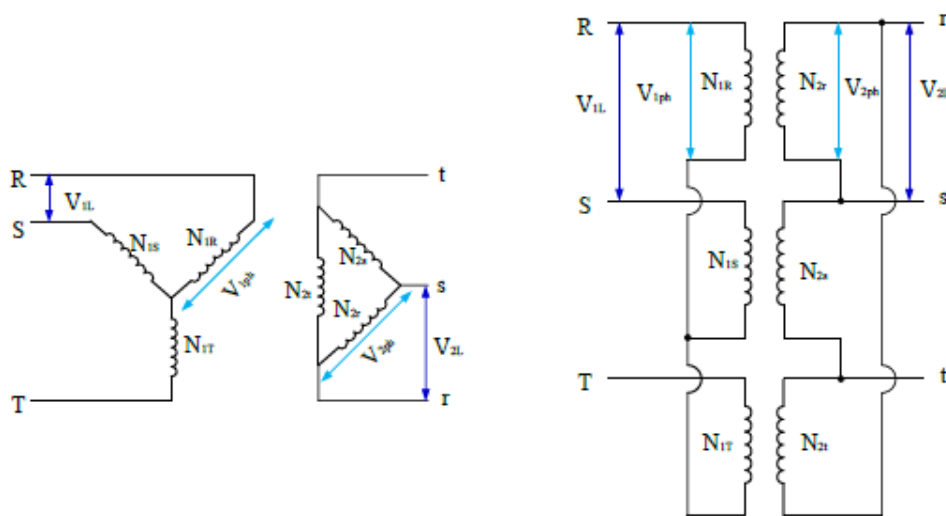
$$V_{LP} = \sqrt{3} V_{\phi P} \text{ (Volt) ..... (2.16)}$$

Tegangan fasa primer sebanding dengan tegangan fasa sekunder dan perbandingan belitan transformator. Maka diperoleh perbandingan tegangan pada transformator adalah:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} V_{\phi P}}{\sqrt{3} V_{\phi S}} = a \text{ ..... (2.17)}$$

### 2.5.2 Hubungan wye – delta (Y – Δ)

Digunakan sebagai penurun tegangan untuk sistem tegangan tinggi. Hubungan Y-Δ pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.21 berikut ini.



**Gambar 2.21** Transformator 3 fasa hubungan Y-Δ.

Pada hubungan ini, hubungan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fasa primer  $V_{LP} = \sqrt{3} V_{\phi P}$  dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fasa sekunder  $V_{LS} = V_{\phi S}$ . Sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah:

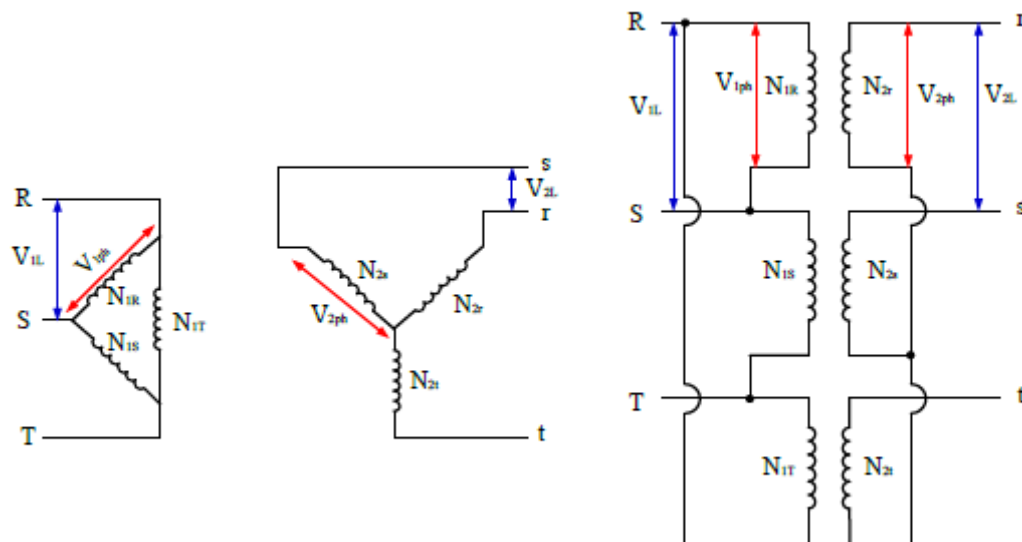
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3} a \dots\dots\dots (2.18)$$

Hubungan ini lebih stabil dan tidak ada masalah dengan beban tidak seimbang dan harmonisa.

### 2.5.3 Hubungan *delta – wye* ( $\Delta - Y$ )

Umumnya digunakan untuk menaikkan tegangan dari tegangan pembangkitan ke tegangan transmisi. Hubungan  $\Delta - Y$  pada transformator tiga fasa ditunjukkan pada gambar 2.22 di bawah ini.



**Gambar 2.22** Transformator 3 fasa hubungan  $\Delta$ -Y.

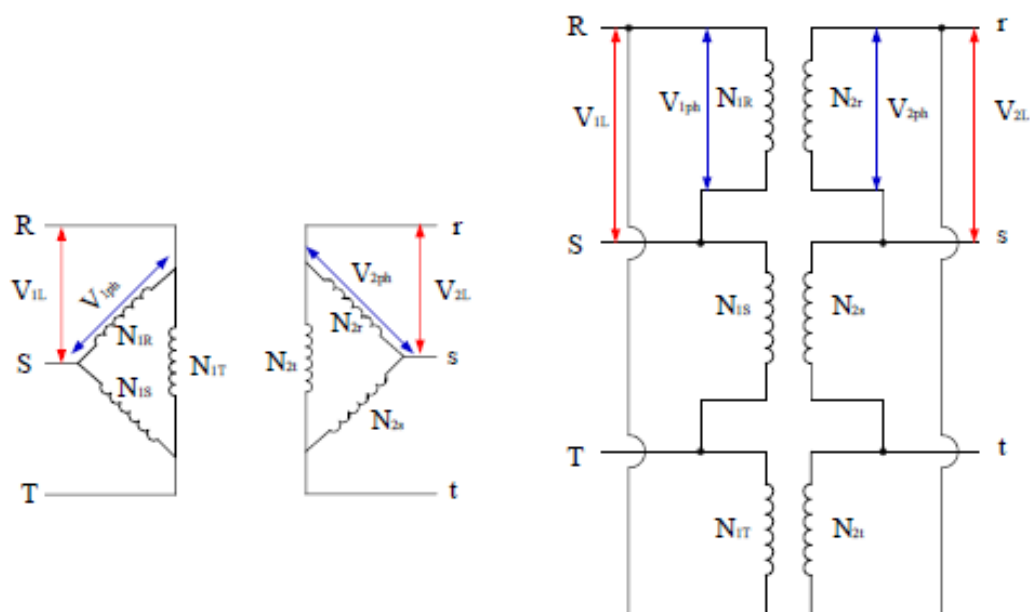
Pada hubungan ini, hubungan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fasa primer  $V_{LP} = \sqrt{3} V_{\phi P}$  dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fasa sekunder  $V_{LS} = V_{\phi S}$ . Sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah:

$$\begin{aligned} \frac{V_{LP}}{V_{LS}} &= \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3} V_{\phi S}} = a \\ \frac{V_{LP}}{V_{LS}} &= \frac{a}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.19) \end{aligned}$$

Hubungan ini memberikan keuntungan yang sama dan beda fasa yang sama seperti pada hubungan  $Y - \Delta$ .

#### 2.5.4 Hubungan *delta – delta* ( $\Delta - \Delta$ )

Hubungan ini ekonomis digunakan untuk melayani beban yang besar dengan tegangan pelayanan yang rendah. Hubungan  $\Delta-\Delta$  ini pada transformator tiga fasa ditunjukkan pada gambar 2.23 berikut ini.



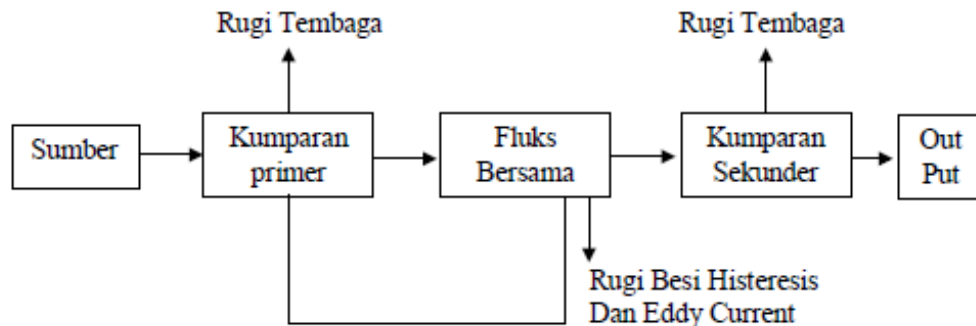
**Gambar 2.23** Transformator 3 fasa hubungan  $\Delta - \Delta$ .

Pada hubungan ini, hubungan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fasa primer  $V_{LP} = V_{\phi P}$  dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fasa sekunder  $V_{LS} = V_{\phi S}$ . Sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a \dots\dots\dots (2.20)$$

Salah satu keuntungan pemakaian transformator tiga fasa hubungan  $\Delta - \Delta$  adalah perbedaan fasa pada hubungan ini tidak ada dan stabil terhadap beban tidak seimbang dan harmonisa. Selain itu keuntungan lain yang dapat diambil adalah apabila transformator ini mengalami gangguan pada salah satu belitannya maka transformator ini dapat terus bekerja melayani beban walaupun hanya menggunakan dua buah belitan.

## 2.6 Rugi – rugi transformator<sup>[10]</sup>



**Gambar 2.24** Blok diagram rugi – rugi pada transformator

### 2.6.1 Rugi tembaga ( $P_{Cu}$ )

Rugi yang disebabkan arus mengalir pada kawat tembaga yang terjadi pada kumparan sekunder dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{Cu} = I^2 R \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.21)$$

Formula ini merupakan perhitungan untuk pendekatan. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban. Dan perlu diperhatikan pula resistansi disini merupakan resistansi AC.

### 2.6.2 Rugi besi ( $P_i$ )

Rugi besi terdiri atas :

- a) Rugi histerisis ( $P_h$ ), yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak – balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai :

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ (watt)} \dots\dots\dots (2.22)$$

dimana:

$k_h$  = konstanta histerisis, tergantung pada bahan inti

$B_{maks}$  = Fluks maksimum (weber)

$f$  = frekuensi jala – jala (Hz)

<sup>10</sup> Sumber Zuhal, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta, Gramedia Pustaka Utama, 1995, hlm. 54.

- b) Rugi arus eddy ( $P_e$ ) , yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. dirumuskan sebagai :

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B_{\text{maks}}^2 \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.23)$$

dimana:

$k_e$  = konstanta arus eddy, tergantung pada volume inti

$B_{\text{maks}}$  = Fluks maksimum ( weber )

$f$  = frekuensi jala – jala (Hz)

Jadi, rugi besi ( rugi inti ) adalah :

$$P_i = P_h + P_e \text{ (Watt)}$$

$$P_i = (k_h \cdot f \cdot B_{\text{maks}}^{1.6}) + (k_e \cdot f^2 \cdot B_{\text{maks}}^2) \dots\dots\dots (2.24)$$

Efisiensi menunjukkan tingkat keefisienan kerja suatu peralatan, dalam hal ini transformator yang merupakan perbandingan rating output (keluaran) terhadap inputnya (masukkan) yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi } (\eta) &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \\ &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \Sigma \text{ rugi-rugi}} \dots\dots\dots (2.25) \end{aligned}$$

Maka persentase efisiensi adalah:

$$\% \text{ Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \Sigma \text{ rugi-rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.26)$$

## 2.7 Efisiensi Transformator

Efisiensi menunjukan tingkat keefisienan kerja suatu peralatan, dalam hal ini transformator yang merupakan perbandingan rating *output* (keluaran) terhadap *input*-nya (masukkan) yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi } (\eta) &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \\ &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \Sigma \text{ rugi-rugi}} \dots\dots\dots (2.27) \end{aligned}$$

Maka persentase efisiensi adalah:

$$= \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma_{rugi-rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.28)$$

dimana:

$P_{in}$  = daya input transformator

$P_{out}$  = daya output transformator

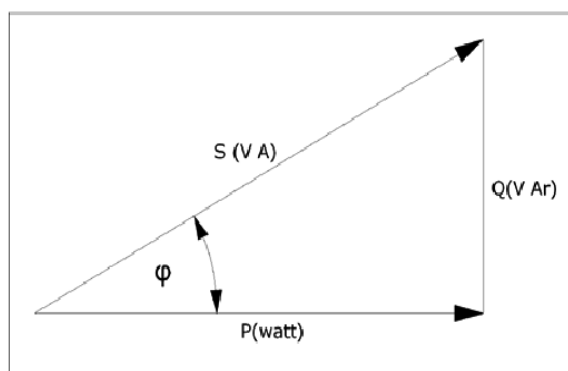
$\Sigma_{rugi - rugi}$  =  $P_{cu} + P_i$

## 2.8 Faktor Daya

Pengertian faktor daya ( $\cos \varphi$ ) adalah perbandingan antara daya aktif ( $P$ ) dan daya semu ( $S$ ). Dari pengertian tersebut, faktor daya ( $\cos \varphi$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya} &= \frac{\text{Daya aktif}}{\text{Daya semu}} \\ &= \frac{P}{S} \\ &= \frac{V.I.\cos \varphi}{V.I} \\ \text{Faktor Daya} &= \cos \varphi \dots\dots\dots (2.29) \end{aligned}$$

Untuk penjelasan tentang daya-daya dapat dilihat pada gambar segitiga daya berikut ini :



**Gambar 2.25** Segitiga daya

Dari gambar dapat dilihat bahwa:

$$\text{Daya Semu (S)} = V.I \text{ (VA)} \dots\dots\dots (2.30)$$



$$\text{Daya Aktif (P)} = V.I. \cos \varphi = S. \cos \varphi \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$\text{Daya Reaktif (Q)} = V.I. \sin \varphi = S. \sin \varphi \text{ (VAR) m}\dots\dots\dots (2.32)$$

## 2.9 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator<sup>[3]</sup>

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots (2.33)$$

dimana :

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi primer transformator (kV)

I = arus jala-jala (A)

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

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} V} \dots\dots\dots (2.34)$$

dimana:

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

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (kV)

Besarnya persentase kenaikan beban yang dilayani dapat dihitung dengan :

$$\% \text{ pembebanan} = \frac{I_{rata-rata \text{ beban}}}{I_{beban \text{ penuh transformator}}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.35)$$

dimana:

$I_{rata-rata \text{ beban}}$  = arus rata-rata beban yang digunakan (A)

$I_{beban \text{ penuh transformator}}$  = arus beban penuh transformator (A)

---

<sup>3</sup> Sumber Moh. Dahlan, *Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi*, Kudus, hlm. 3.

## 2.10 Ketidakseimbangan Beban<sup>[3]</sup>

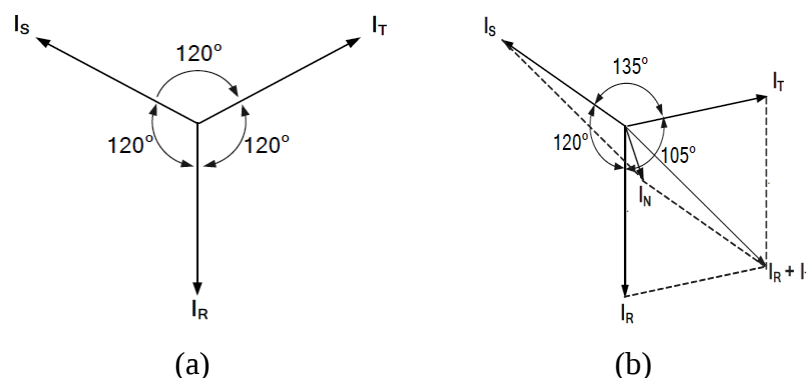
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

- Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- ketiga vektor saling membentuk sudut 120.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga, yaitu:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120<sup>0</sup> satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120<sup>0</sup> satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120<sup>0</sup> satu sama lain.

Pada gambar 2.26a menunjukkan diagram vektor arus dalam keadaan seimbang. Disini 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 2.26b menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Disini 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.



**Gambar 2.26** Vektor diagram arus

<sup>3</sup> Sumber Moh. Dahlan, *Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi*, Kudus, hlm. 4.

## 2.11 Daya Pada Saluran Distribusi<sup>[3]</sup>

Bila daya sebesar  $P$  disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = 3.[V] . [I] . \cos \varphi \dots\dots\dots (2.36)$$

dimana :

$P$  = daya pada ujung kirim

$I$  = arus pada ujung kirim

$V$  = tegangan pada ujung kirim

$\cos \varphi$  = faktor daya

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari  $P$  karena terjadi penyusutan dalam saluran.

Jika  $[I]$  adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar  $P$  pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien  $a$ ,  $b$  dan  $c$  sebagai berikut :

$$[I_R] = a[I]$$

$$[I_S] = a[I]$$

$$[I_T] = a[I] \dots\dots\dots (2.37)$$

dengan  $I_R$  ,  $I_S$  dan  $I_T$  berturut-turut adalah arus di fasa R, S dan T.

Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai :

$$P = (a + b + c) . [V] . [I] . \cos \varphi \dots\dots\dots (2.38)$$

Apabila persamaan (2.36) dan persamaan (2.37) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  yaitu:

$$a + b + c = 3$$

dimana pada keadaan seimbang, nilai  $a = b = c = 1$

---

<sup>3</sup> Sumber Moh. Dahlan, *Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi*, Kudus, hlm. 4.

Dengan anggapan yang sama, arus yang mengalir di penghantar netral dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} I_N &= I_R + I_S + I_T^{[1]} \\ &= [I] \{a + b \cos(-120^\circ) + j b \sin(-120^\circ) + c \cos(-120^\circ) + j c \sin(-120^\circ)\} \dots\dots\dots (2.39) \end{aligned}$$

$$= [I] \left\{ a - \frac{(b+c)}{2} + j \frac{(c-b)\sqrt{3}}{2} \right\} \dots\dots\dots (2.40)$$

## 2.12 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban<sup>[1]</sup>

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.41)$$

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

$$a = \frac{I_R}{I} \dots\dots\dots (2.42)$$

$$b = \frac{I_S}{I} \dots\dots\dots (2.43)$$

$$c = \frac{I_T}{I} \dots\dots\dots (2.44)$$

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

$$\% \text{ ketidakseimbangan} = \frac{[|a-1| + |b-1| + |c-1|]}{3} \times 100\% \dots\dots\dots (2.45)$$

## 2.13 Rugi-rugi Akibat Adanya Arus Netral Pada Saluran Netral Sekunder Transformator<sup>[1]</sup>

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:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots (2.46)$$

<sup>1</sup> Sumber Badaruddin, *Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon*, Laporan Penelitian Internal, Tidak Diterbitkan, 2012, hlm. 13,17,18.



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 :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \dots\dots\dots (2.47)$$

dimana :

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

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

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

## 2.14 *Electric Transient and Analysis Program (ETAP)*<sup>[4]</sup>

ETAP 12.6.0 adalah suatu *software* analisis yang *comprehensive* untuk mendesain dan mensimulasikan suatu sistem rangkaian tenaga. Analisis yang ditawarkan oleh ETAP yang digunakan penulis adalah *drop tegangan* dan *losses* jaringan. ETAP juga bisa memberikan *warning* terhadap bus – bus yang *under voltage* dan *over voltage* sehingga pengguna bisa mengetahui bus mana yang tidak beroperasi optimal. Untuk menganalisa suatu rangkaian diperlukan data rangkaian yang lengkap dan akurat sehingga hasil perhitungan ETAP bisa dipertanggungjawabkan.

ETAP mengintegrasikan data – data rangkaian tenaga listrik seperti kapasitas pembangkit, panjang jaringan, resistansi jaringan per km, kapasitas busbar, rating trafo, impedansi urutan nol, positif dan negatif suatu peralatan listrik seperti trafo, generator dan penghantar.

ETAP memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan diagram satu garis grafis dan sistem kabel bawah tanah *raceway*. Program ini telah dirancang berdasarkan tiga konsep kunci:

### 1. *Virtual reality operasi*

Program operasi menyerupai sistem operasi listrik nyata sedekat mungkin. Sebagai contoh, ketika membuka atau menutup sebuah pemutus sirkuit, tempat elemen dari layanan atau mengubah status operasi dari motor, *under de-energized* dan sub-sistem yang ditunjukkan pada diagram satu baris berwarna abu – abu. ETAP menggabungkan konsep – konsep baru untuk menentukan perangkat pelindung koordinasi langsung dari diagram satu garis.

### 2. Integrasi total data

ETAP menggabungkan listrik, atribut logis, mekanik dan fisik dari elemen sistem dalam *database* yang sama. Misalnya, kabel tidak hanya berisi data yang mewakili sifat listrik dan dimensi fisik tapi juga informasi yang menunjukkan *raceways* melalui yang disalurkan.

---

<sup>4</sup> Sumber Anton firmansyah, *Modul Pelatihan ETAP*, Tidak Diterbitkan, 2016, hlm. 23.

### 3. Kesederhanaan di data entri

ETAP melacak data rinci untuk setiap alat listrik. Editor data dapat mempercepat proses entri data dengan meminta data minimum untuk studi tertentu. Untuk mencapai hal ini, kita telah terstruktur editor properti dengan cara yang paling logis untuk memasukkan data untuk berbagi jenis analisis atau desain. ETAP diagram satu garis mendukung sejumlah fitur untuk membantu dalam membangun jaringan dari berbagai kompleksitas. Misalnya, setiap elemen secara individu dapat memiliki berbagai orientasi, ukuran dan simbol – simbol *display* (IEC atau ANSI). Diagram satu garis juga memungkinkan untuk menempatkan beberapa alat pelindung antara sirkuit cabang dan bus.

ETAP menyediakan berbagai pilihan untuk menampilkan atau melihat sistem listrik. Pandangan ini disebut presentasi. Lokasi, ukuran, orientasi dan simbol setiap unsur dapat berbeda di masing – masing presentasi. Selain itu, alat pelindung dan *relay* dapat ditampilkan (terlihat) atau disembunyikan (tidak terlihat) untuk presentasi tertentu. Misalnya, satu presentasi dapat menggunakan tampilan *relay* dimana semua perangkat pelindung ditampilkan. Presentasi lain mungkin menunjukkan diagram satu garis dengan beberapa pemutus sirkuit ditampilkan dan sisanya tersembunyi (tata letak paling cocok untuk hasil aliran beban).

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja ETAP adalah:

1. **One Line Diagram**, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk sebuah sistem kelistrikan.
2. **Library**, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektrik 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.

### 2.14.1 Mempersiapkan *plant*

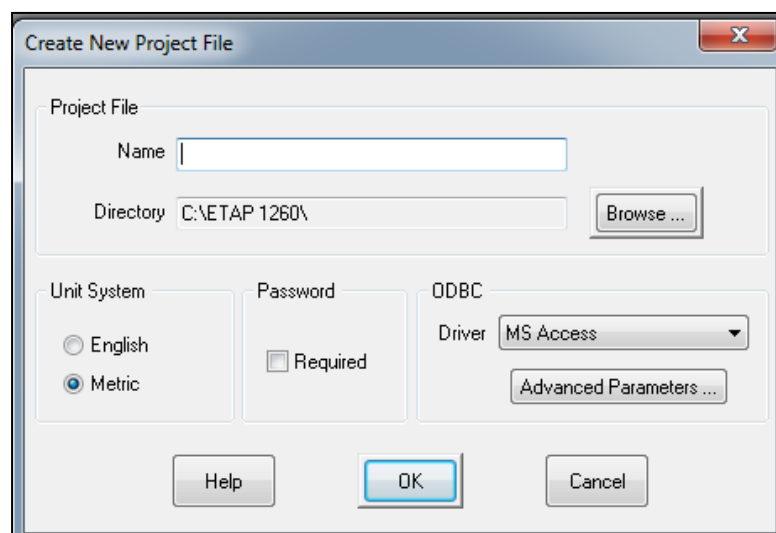
Persiapan yang perlu dilakukan dalam analisa/desain dengan bantuan ETAP adalah:

1. *Single line diagram*.
2. Data peralatan baik elektris maupun mekanis.
3. *Library* untuk mempermudah mengedit data.

### 2.14.2 Membuat proyek baru

Berikut ini merupakan langkah – langkah untuk membuat proyek baru:

1. Klik tombol *New* atau klik menu *file* lalu akan muncul kotak dialog sebagai berikut.



**Gambar 2.27** Membuat file proyek baru

2. Lalu ketik nama di kolom *project file*. Lalu klik OK.
3. Lalu akan muncul kotak dialog *User Information* yang berisi data pengguna *software*. Isi nama dan deskripsikan proyek yang akan dibuat. Lalu klik OK.
4. *File* proyek baru telah dibuat dan siap untuk menggambar *one line diagram*.



### 2.14.3 Menggambar *single line diagram*

Menggambar *single line diagram* dilakukan dengan cara memilih simbol peralatan listrik pada menu bar disebelah kanan layar. Klik pada simbol, kemudian arahkan kursor pada media gambar. Untuk menempatkan peralatan pada media gambar, klik kursor pada media gambar.

Untuk mempercepat proses penyusunan *single line diagram*, semua komponen dapat diletakkan secara langsung pada media gambar. Untuk mengetahui kontinuitas antar komponen dapat di cek dengan *Continuty Check* pada menu bar utama.

Pemakaian *Continuty Check* dapat diketahui hasilnya dengan melihat warna komponen/*branch*. Warna hitam berarti telah terhubung, warna abu – abu berarti belum terhubung.