



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Distribusi (Operasi Sistem Tenaga Listrik)

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah tenaga listrik ke gardu induk (GI) untuk diturunkan tegangannya melalui transformator penurun tegangan (*step down transformer*) menjadi tegangan menengah atau yang juga disebut sebagai tegangan distribusi primer.

Sistem kelistrikan yang ada di kilang Plaju dan Sungai Gerong maupun Perumahan yang ada di komplek Pertamina berasal dari tiga generator utama yang dihubungkan secara paralel, satu *steam generator* dan satu generator darurat, yaitu

1. *Gas Turbine Generator (GTG2015 UA/UB/UC)*

Masing-masing generator gas turbin 2015 UA, 2015 UB dan 2015 UC menghasilkan kapasitas sebesar 31 MW dengan tegangan sebesar 12 KV dan bekerja pada frekuensi 50 Hz. pada kondisi normal hanya dua unit pembangkit generator turbin gas yang digunakan dan satu pembangkit sebagai cadangan.

2. *Steam Turbine Generator*

Memiliki kapasitas sebesar 3,2 MW steam turbin sendiri merupakan *secure power* yang digunakan jika terjadi daya hilang yang berasal dari turbin gas dan *emergency diesel*. Fungsi utamanya adalah sebagai pembangkit pengaman (*Secure Power*) untuk kilang TA/PTA dimana apabila terjadi kegagalan total pada kedua GTG maka kilang masih dapat mendapatkan supply listrik dari STG untuk melakukan *shutdown* secara normal tanpa merusak peralatan yang ada di kilang tersebut.

3. *Diesel Emergency Generator 2016-U*

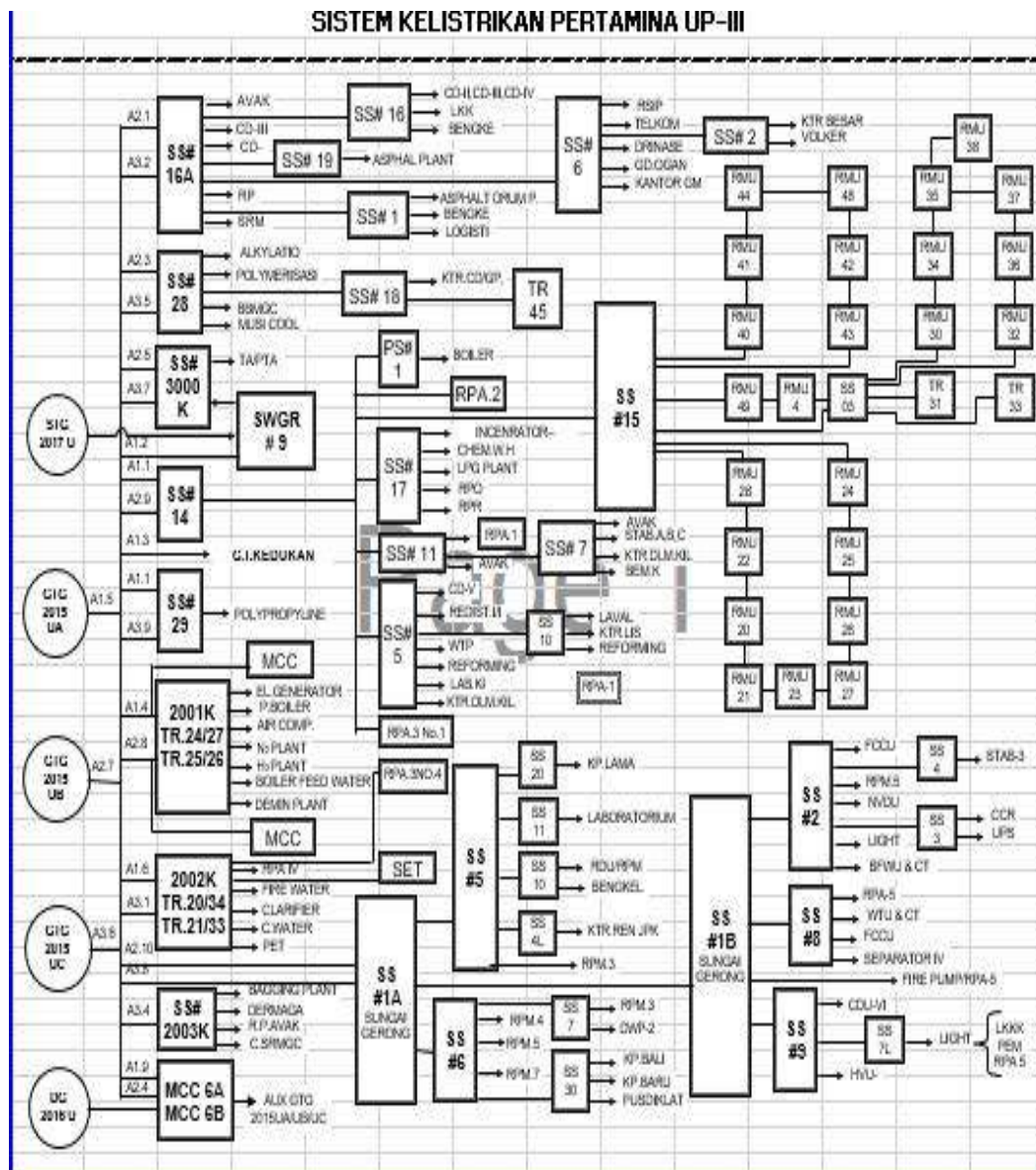
Fungsi DEG 2016-U adalah sebagai black star, jadi DEG 2016-U akan beroperasi secara *autostart* apabila dua unit GTG 2015 stop Karena gangguan (total black out). Tegangan keluaran pembangkit dari utama (GTG



2015-UA/UN/UC) adalah 12 kV. Tegangan keluaran *steam turbine* (STG 2017-U) adalah 6,9 KV. Tegangan keluaran *emergency diesel* (DEG 2016-U) adalah 0,4 KV. Ketiga pembangkit utama masing masing dihubungkan melalui *synchronizing bus*, sehingga hanya ketiga pembangkit utama yang memungkinkan untuk bekerja parallel. Untuk pola operasi normal, dipakai 2 unit gas turbin ditambah dengan satu steam turbin sebagai secure power. Tenaga listrik yang dihasilkan dari power station 2 plaju didistribusikan keseluruh beban dikilang plaju, kilang sungai gerong serta perumahan – perumahan di bagus kuning, plaju dan sungai gerong. Table dibawah ini adaah data pemakaian beban yang disupply dari GTG 2015-UA/UB/UC.

Sistem distribusi listrik yang ada di UP III mempunyai area yang cukup luas mulai dari bagus kuning sampai dengan daerah kampung bali di sungai gerong. Dan memakai tegangan bervariasi mulai dari 12.000 V, 6.600 V, 3.300 V, 500 V, 440 V, 415 V, 380 V, 220 V, dan 110 V. Sistem tegangan yang bervariasi ini dikarenakan dulunya kilang plaju dan kilang sungai gerong merupakan kilang yang terpisah operasionalnya sehingga memiliki acuan standar yang berbeda. Namun, pada saat sekarang standar tegangan yang dipakai yaitu 12.000 V , 6.600 V, 380 V/400 V untuk 3 fasa, dan 220 V 1 fasa.

Sistem distribusi dapat dibagi dalam dua sub bagian yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Makin besar suatu sistem tenaga listrik makin banyak unsur yang harus dikoordinasikan serta yang harus diamati, sehingga diperlukan perencanaan, pelaksanaan, pengendalian serta analisa operasi sistem yang cermat.



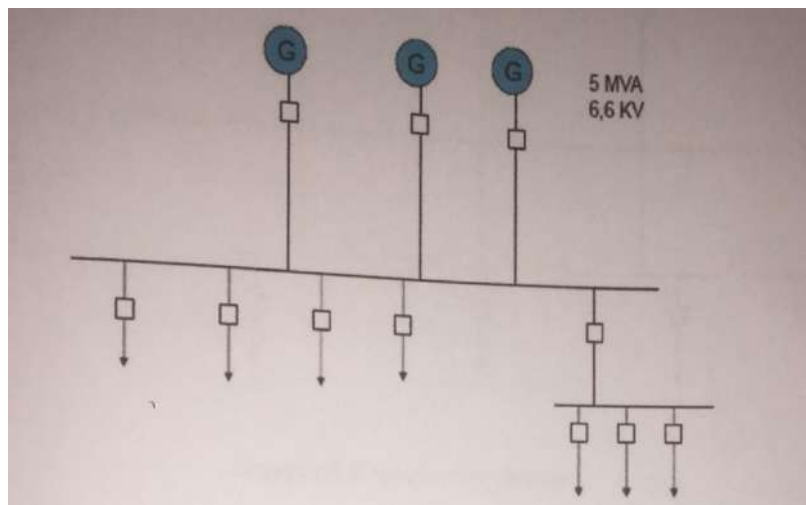
**Gambar 2.1** Sistem Kelistrikan PT Pertamina RU III

Pada suatu sistem distribusi tenaga listrik pada umumnya terdiri dari penghantar/kabel dengan variasi ukuran, trafo, peralatan proteksi dan metering. Di beberapa beban tertentu dipakai DC supply dan UPS (*Uninterruptable Power Supply*). Sistem distribusi listrik di kilang RU III memakai sistem *busbar*, merupakan perlengkapan penampung daya dipusat pembangkit yang terdiri dari beberapa unit generator/sumber daya yang beroperasi parallel. Penyalur daya dari busbar dikenal sebagai FEEDER. Bentuk busbar pada umumnya adalah lempengan/batangan tembaga yang disangga oleh isolator. Ada beberapa sistem

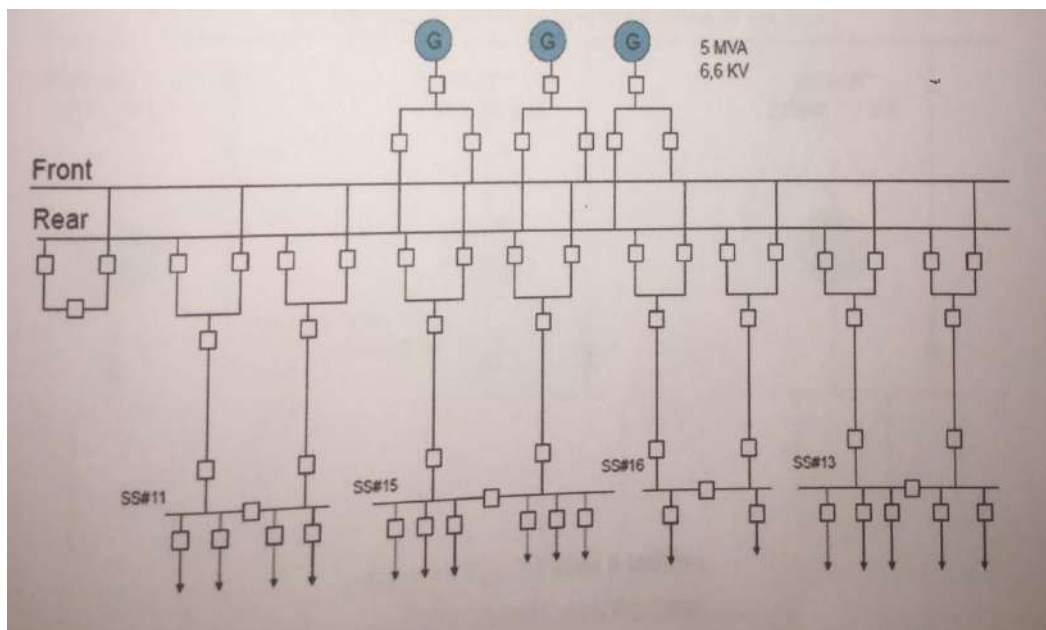


busbar, diantaranya adalah :

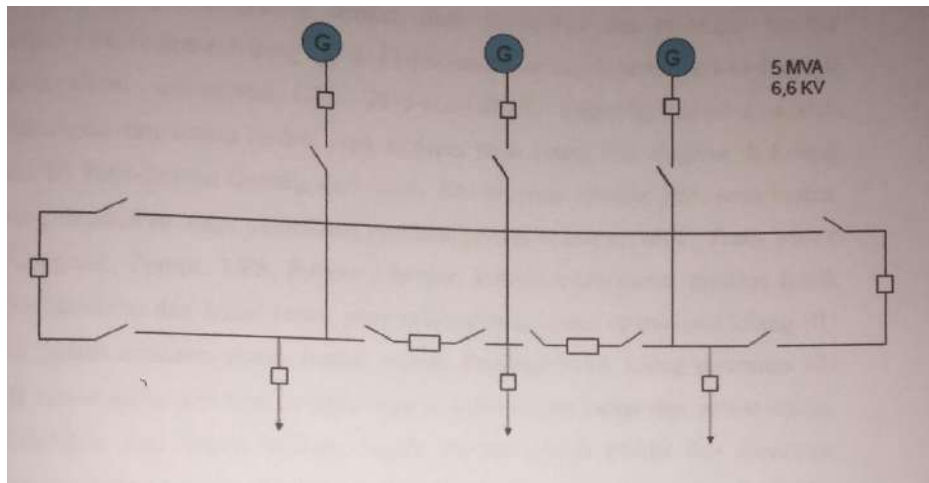
- 1) Sistem single busbar
- 2) Sistem double busbar
- 3) Sistem ring busbar
- 4) Sistem synchronizing busbar



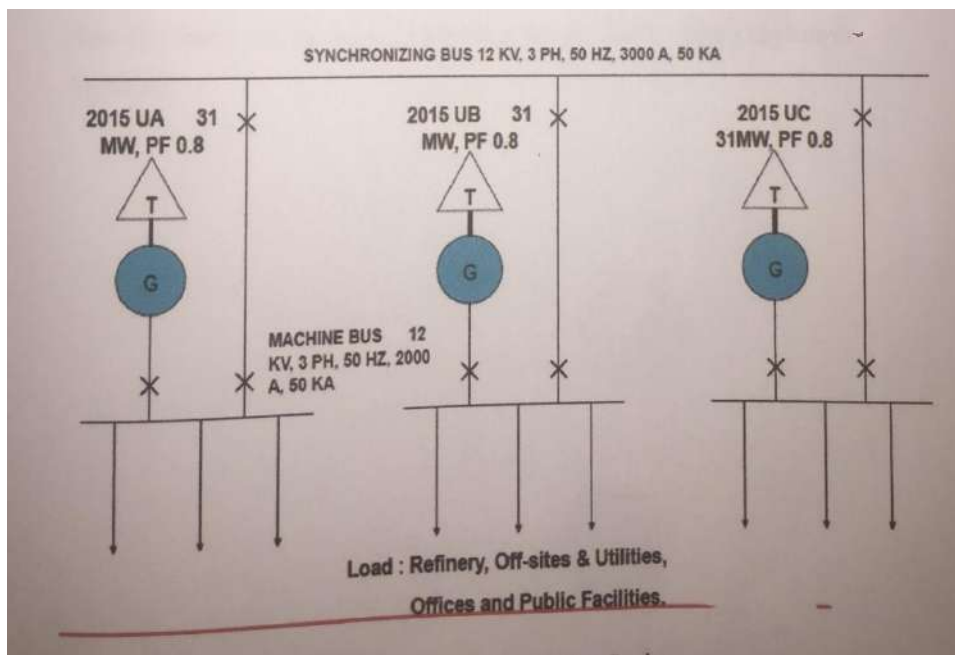
**Gambar 2.2** Sistem *Single Busbar*



**Gambar 2.3** Sistem *Double Busbar*



**Gambar 2.4** Sistem *Ring Busbar*

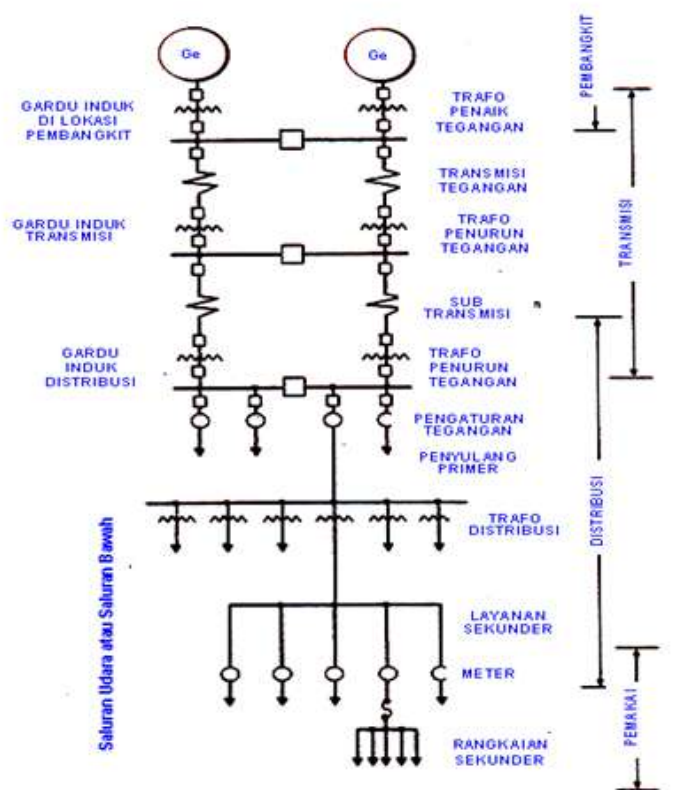


**Gambar 2.5** Sistem *Synchronizing Busbar*

Pada gambar-gambar berikut, akan ditunjukkan 2 potongan gambar single line diagram kilang RU III Plaju-Sungai Gerong beserta *one line diagram* pada sistem sinkronisasi GTG 2015-UA/UB/UC. Pada gambar tersebut ditunjukkan penerapan dari sistem busbar yang terdapat pada *single line diagram* di kilang RU III plaju-sungai gerong, dari *single line diagram* tersebut jenis-jenis busbar

yang diterapkan untuk menunjang peralatan-peralatan kilang (MCC, Trafo, Motor Penggerak, Pompa, UPS, *Battery Charger*, Komponen-komponen proteksi listrik dan lain-lain) dan lokasi-lokasi yang membantu kegiatan operasional kilang RU III. Selain memakai sistem busbar, sistem distribusi listrik kilang Pertamina RU III menerapkan dua tipe jaringan *supply*, yaitu sistem radial dan sistem cincin. Kelebihan dari sistem jaringan *supply* jari-jari adalah praktis dan ekonomis. Namun, kekukarangannya adalah misalkan ada dua beban yang dihubung listrik, maka beban itu akan mati sampai gangguan tersebut dapat diatasi. Untuk mengatasi ini, dikembangkan sistem radial dengan *double feeder* dimana untuk setiap daerah beban disuplai 2 buah saluran. Di kilang Plaju dan Sungai Gerong inilah sistem radial dengan *double feeder* yang banyak digunakan.

### 2.1.1 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik



**Gambar 2.6** Pembagian / pengelompokan Tegangan Sistem Tenaga Listrik  
(Sumber [www.google.com](http://www.google.com))



Untuk kemudahan dan penyederhanaan, lalu diadakan pembagian serta pembatasan-pembatasan seperti pada Gambar Pembagian / pengelompokan Tegangan Sistem Tenaga Listrik:

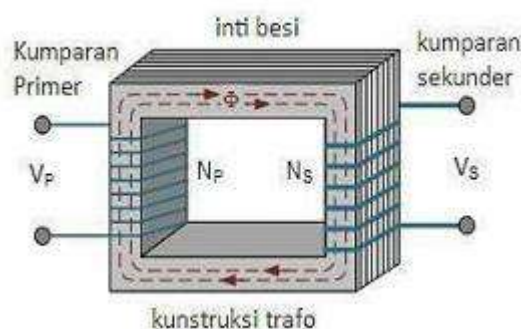
- Daerah I : Bagian pembangkitan (Generation)  
 Daerah II : Bagian penyaluran (Transmission), bertegangan tinggi (HV,UHV,EHV) Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah (6 atau 20kV).  
 Daerah IV : Di dalam bangunan pada beban/konsumen, Instalasi, bertegangan rendah.

Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi Sistem Distribusi adalah Daerah III dan IV, yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu dibuat.

## 2.2 Transformator

Transformator atau trafo adalah peralatan yang berfungsi mengkonversi (merubah) arus atau tegangan bolak-balik dari nilai tertentu menjadi nilai yang lain. Konstruksi dasar transformator adalah sebuah inti atau teras besi terdiri dari keping-keping besi tipis yang disekat satu dengan lain yang dililiti oleh 2 bagian kumparan konduktor. Satu sisi kumparan bagian tegangan rendah (primer) kawatnya tebal dan jumlah lilitannya sedikit, kawatnya tipis dan jumlah kumparan (lilitannya) banyak.

### 2.2.1 Konstruksi Transformator



**Gambar 2.7** Konstruksi Trafo



Konstruksi transformator dapat terdiri dari bagian-bagian utama berikut.

- Inti Transformator, inti besi transformator memiliki fungsi sebagai tempat mengalirnya fluks dari suatu kumparan primer ke kumparan sekunder. Diketahui berdasarkan cara melilit kumparannya ada dua jenis, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.
- Kumparan transformator, kumparan transformator terdiri dari lilitan kawat berisolasi dan membentuk kumparan. Kawat yang dipakai adalah kawat tembaga berisolasi yang berbentuk bulat atau pelat. Kumparan-kumparan transformator diberi isolasi baik terhadap kumparan lain maupun inti besinya. Bahan isolasi berbentuk padat seperti kertas prespan, dan lainnya.
- Minyak transformator, minyak pada trafo digunakan untuk mendinginkan transformator saat beroperasi. Kumparan dan inti pada transformator direndam di dalam minyak transformator hal ini dilakukan karena minyak berfungsi sebagai pendingin panas pada kumparan dan inti. Diketahui di dalam minyak transformator, ternyata harus memiliki persyaratan sebagai berikut.
  - a. Mempunyai kekuatan isolasi
  - b. Penyalur panas yang baik dengan berat yang kecil, sehingga partikel-partikel kecil dapat mengendap dengan cepat.
  - c. Sifat kimia yang stabil.
  - d. Tidak nyala yang tinggi, tidak mudah menguap.
  - e. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- Tangki transformator berfungsi untuk menyimpan minyak transformator dan sebagai pelindung bagian-bagian transformator yang direndam dalam minyak.
- Konservator merupakan tabung berisi minyak transformator yang diletakkan pada bagian atas tangki. Fungsinya yaitu untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan dan sebagai saluran pengisian minyak.





- Sistem pendinginan pada transformator dibutuhkan supaya panas yang timbul pada inti besi dan kumparan dapat disalurkan keluar sehingga tidak merusak isolasi di dalam transformator. Media yang digunakan seperti berupa udara/gas, minyak dan air.
- Sirip-sirip pada kerangka, bagian ini memiliki fungsi sebagai memperluas daerah pendinginan, yaitu daerah yang berhubungan langsung dengan udara luar dan sebagai tempat terjadinya sirkulasi panas

### 2.2.2 Jenis-jenis Transformator

#### 1. Transformator Berdasarkan pasangan kumparan.

Transformator dapat dibedakan berdasarkan pasangan kumparan atau lilitannya yaitu :

- a. Transformator satu belitan, lilitan primer merupakan bagian dari lilitan sekunder atau sebaliknya, trafo satu belitan ini lebih dikenal sebagai auto trafo atau trafo hemat.
- b. Transformator dua belitan, mempunyai dua belitan, yaitu sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah, primer dan sekunder berdiri sendiri.
- c. Transformator 3 belitan, pada transformator tiga belitan mempunyai belitan primer, sekunder dan tertier, masing-masing berdiri sendiri pada tegangan yang berbeda.

#### 2. Transformator Berdasarkan Fungsinya

Menurut fungsinya transformator dibagi atas:

##### a. Transformator daya

Transformator daya adalah trafo yang digunakan untuk pemasok daya. Transformator daya mempunyai dua fungsi yaitu menaikkan tegangan listrik (step-up) dan menurunkan tegangan (step-down). Trafo daya tidak dapat digunakan langsung untuk menyuplai beban, karena sisi tegangan rendahnya masih lebih tinggi dari tegangan beban, sedangkan sisi tegangan tingginya merupakan tegangan transmisi. Trafo berfungsi sebagai steep-up pada sistem dimana tegangan keluaran lebih tinggi dari pada tegangan masukan II-10 (misalnya pada pengiriman/penyaluran



daya) dan sebaliknya trafo berfungsi sebagai stepdown jika tegangan keluaran lebih rendah dari pada tegangan masukan (misalnya menerima/mengeluarkan daya).

b. Transformator pengukuran

Transformator ukur dibedakan sebagai trafo arus dan trafo tegangan, trafo ini digunakan untuk mengukur arus atau tegangan yang besar yang tidak mungkin dapat diukur langsung dihubungkan pada Ampere meter atau voltmeter.

- 1) Transformator Tegangan Fungsinya adalah mentransformasikan besaran Tegangan Tinggi ke besaran Tegangan Rendah guna pengukuran atau proteksi dan sebagai isolasi antara sisi tegangan yang diukur atau diproteksikan dengan alat ukurnya / proteksinya.
- 2) Transformator Arus (Current Transformer- CT) adalah salah satu peralatan di Gardu Distribusi, fungsinya untuk mengkonversi besaran arus besar ke arus kecil guna pengukuran sesuai batasan alat ukur, juga sebagai proteksi serta isolasi sirkit sekunder dari sisi primernya.
- 3) Transformator elektronik, Transformator ini prinsipnya sama seperti transformator daya, tapi kapasitas daya reaktif sangat kecil, yaitu kurang 300 VA yang digunakan untuk keperluan pada rangkaian elektronik.

c. Transformator distribusi

Transformator distribusi adalah suatu peralatan listrik utama yang berperan penting untuk penyaluran daya listrik dalam suatu sistem distribusi yang berfungsi untuk menurunkan tegangan distribusi primer yang merupakan tegangan menengah menjadi tegangan rendah pada sisi sekunder. Trafo Distribusi yang umum digunakan adalah trafo step down 20/0,4 kV, tegangan fasa-fasa sistem JTR adalah 380 Volt, karena terjadi drop tegangan maka tegangan rak TR dibuat diatas 380 Volt agar tegangan pada ujung beban menjadi 380 Volt.



Transformator distribusi pada dasarnya sama dengan transformator daya, bedanya adalah tegangan rendah pada trafo daya bila dibandingkan dengan tegangan tinggi trafo distribusi masih lebih tinggi. Kedua tegangan pada transformator distribusi merupakan tegangan distribusi yaitu untuk distribusi tegangan menengah (TM) dan distribusi tegangan rendah (TR). Trafo distribusi digunakan untuk mendistribusikan energi listrik langsung ke pelanggan. (Sulasno, 2009).

### 3. Transformator Berdasarkan Jenis Pendinginnya

#### a. Dry Type Transformers Trafo Kering (Dry Type Transformer)

Trafo yang satu ini termasuk jenis yang agak baru. Transformator tipe kering memiliki kumparan di udara terbuka. dan trafo jenis ini diclaim sebagai trafo free maintenance karena tidak menggunakan oil sebagai bahan pendinginnya melainkan menggunakan fan yang berada didalam unit trafo namun karena panasnya yang lumayan tinggi sehingga biasanya membutuhkan AC (Air conditioning) sebagai pendingin tambahan.

#### b. Gas Immersed Transformers

GIT (Gas Immersed Transformers) menggunakan pendingin Gas (biasanya SF<sub>6</sub>) yang tidak mudah terbakar dan tidak eksplosif membuat GIT lebih aman dan lebih ramah lingkungan dibanding minyak terisolasi transformer, yang membawa risiko bahaya kebakaran, ledakan, dan kebocoran minyak yang bisa mencemari sumber daya alam.

#### c. Oil Immersed Transformers

Seiring dengan meningkatnya kemampuan daya suatu transformator, maka masalah yang muncul adalah bagaimana mendisipasikan panas yang dibangkitkan oleh inti dan belitan transformator secara aman dan efektif. Solusi yang sangat umum digunakan untuk transformator-transformator distribusi yaitu dengan menempatkan transformator dalam suatu wadah yang dengan minyak (oil) trafo yang melingkupi inti dan belitan secara menyeluruh. Minyak ini berfungsi ganda yaitu sebagai pendingin sekaligus media isolasi untuk inti transformator.



Transformator dalam keadaan berbaban temperturnya akan meningkat dan membangkitkan aliran konveksi sirkulasi minyak transformator. Trafo jenis ini merupakan jenis lama yang sampai saat ini masih banyak digunakan. Trafo jenis terendam minyak ini memiliki harga yang masih lebih murah daripada jenis yang lain.

Transformator berdasarkan sistem pendinginannya seperti Dry Type Transformer, Gas Immersed Transformers, dan Oil Immersed Transformers di atas memiliki macam-macam media pendingin dan cara pengalirannya tersendiri. Media pendingin dan cara pengalirannya dapat diklasifikasikan seperti pada Tabel 2.1 berikut.

**Tabel 2.1 Macam-macam Sistem Pendingin**

No	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Transformator		Luar Transformator	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7	OFWF	-	Minyak	-	Air
8	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

### 2.2.3 Prinsip Kerja Transformator

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 jikarangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

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

Dimana :

$e$  = gaya gerak listrik (Volt)

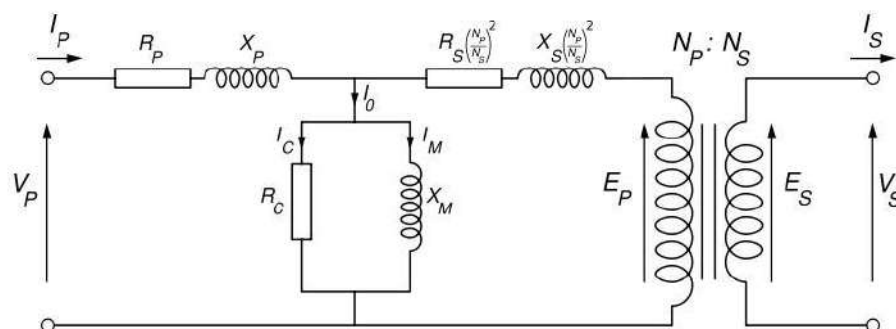
$N$  = jumlah lilitan (turn)

$\frac{d\phi}{dt}$  = perubahan fluks 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 atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis.

#### 2.2.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Transformator dapat dimodelkan dengan rangkaian elektrik ekuivalen. Gambar rangkaian ekuivalen sebuah transformator dapat dilihat pada Gambar 2.8.

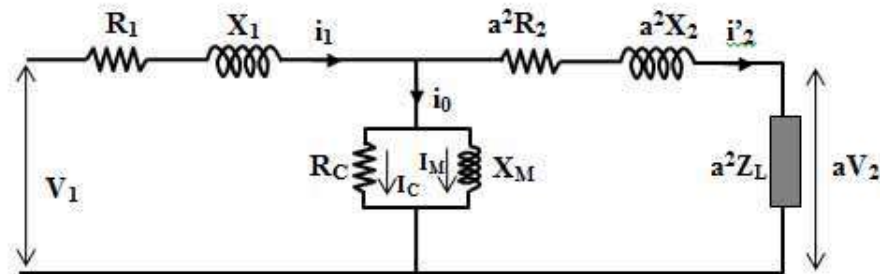


**Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Transformator**

Dari rangkaian tranformator ideal di atas, apabila semua nilai parameter sekunder dinyatakan pada sisi rangkaian primer, harganya perlu dikalikan dengan



faktor  $a^2$ . Berikut model rangkaian ekivalen sebuah transformator jika dilihat dari sisi primer.



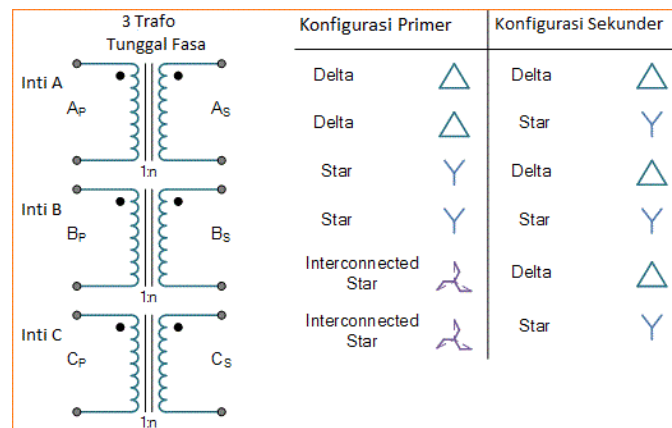
**Gambar 2.9** Rangkaian Ekivalen Transformator Dilihat dari Sisi Primer

Keterangan :

- $I_1$  = Arus pada sisi primer (A)
- $I_2$  = Arus pada sisi sekunder (A)
- $V_1$  = Tegangan pada sisi primer (V)
- $V_2$  = Tegangan pada sisi sekunder (V)
- $R_1$  = Hambatan pada sisi primer ( $\Omega$ )
- $R_2$  = Hambatan pada sisi sekunder ( $\Omega$ )
- $X_1$  = Reaktansi pada sisi primer ( $\Omega$ )
- $X_2$  = Reaktansi pada sisi sekunder ( $\Omega$ )
- $I_C$  = Arus pada inti besi (A)
- $I_M$  = Arus pemagnetan (A)
- $X_M$  = Reaktansi pemagnetan ( $\Omega$ )
- $R_C$  = Hambatan inti besi ( $\Omega$ )

### 2.2.5 Transformator Tiga Fasa

Tiga transformator satu fasa yang dapat dihubungkan menjadi transformator tiga fasa dengan salah satu cara dari berbagai cara menghubungkan belitan transformator. Pada tiga buah transformator satu fasa yang dipakai sebagai transformator tiga fasa, kumparan primer dari setiap transformator dihubungkan dengan kumparan sekunder transformatornya. Perlu diketahui bahwa pada transformator tiga fasa ini besar tegangan antar fasa ( $V_{L-L}$ ) dan daya transformator (kVA) tidak tergantung dari hubungan belitannya, tetapi tegangan fasa netral ( $V_{L-N}$ ) serta arus dari masing-masing transformator tergantung pada hubungan belitannya. Ada beberapa jenis hubungan belitan yang terdapat pada transformator tiga fasa ini.



**Gambar 2.10** Transformator 3 fasa

Hubungan  $Y/\Delta$  atau  $\Delta/Y$  biasa digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau rendah ataupun sebaliknya. Hal ini bertujuan, agar pada sisi tegangan tingginya apabila akan dibumikan telah tersedia saluran netralnya. Dapat dibuktikan bahwa hubungan belitan ini adalah hubungan yang paling banyak dipergunakan di lapangan.

Hubungan  $\Delta/\Delta$  adalah salah satu jenis hubungan belitan yang tidak ada pergeseran fasa. Keuntungannya yaitu salah satu belitan transformator dapat dipindahkan apabila terjadi kerusakan atau apabila akan dilakukan perawatan, sementara dua yang tertinggal dapat terus beroperasi sebagai transformator 3 fasa dengan rating kVA yang turun sampai dengan 57,7% dari bank yang asli. Hubungan ini dikenal sebagai hubungan belitan open-delta. Hubungan  $Y/Y$  paling jarang digunakan karena kesukaran dalam gejala arus penalaan dan harmonisa.

### 2.2.6 Rugi-Rugi pada Transformator

Pada umumnya energi listrik yang dimasukkan ke transformator tidak sama dengan energi listrik yang dikeluarkan dari transformator tersebut. Hal ini dikarenakan adanya rugi-rugi yaitu adanya pada transformator tersebut. Rugi-rugi daya dapat dibagi menjadi dua yaitu rugi inti ( $P_i$ ) dan rugi tembaga ( $P_{cu}$ ). Selain rugi inti dan rugi tembaga, ada lagi rugi-rugi yang menyebabkan berkurangnya efisiensi trafo, yaitu rugi-rugi akibat arus netral pada transformator ( $P_n$ ) dan rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah ( $P_G$ ).



### 2.2.6.1 Rugi-Rugi Inti

Rugi-rugi inti ( $P_i$ ) dapat digolongkan kepada dua bagian yaitu rugi histeresis dan rugi eddy current. Adapun persamaan untuk mencari rugi inti, yaitu:

$$P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana :

$P_i$  = rugi inti (watt)

$P_h$  = rugi histeresis

$P_e$  = rugi eddy current

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

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^n \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana :

$K_h$  = konstanta histeresis

$f$  = frekuensi (Hz)

$B_{maks}^n$  = kerapatan fluks maksimum (weber)

Rugi eddy current ( $P_e$ ), yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi yang persamaannya dinyatakan sebagai berikut :

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^n \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana :

$K_e$  = konstanta eddy current

$f$  = frekuensi (Hz)

$B_{maks}^n$  = kerapatan fluks maksimum (weber)





### 2.2.6.2 Rugi-Rugi Tembaga

Rugi-rugi tembaga disebabkan arus mengalir pada kawat tembaga. yang terjadi pada kumparan sekunder. Persamaan untuk mencari rugi tembaga dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana:

R = Tahanan penghantar ( $\Omega$ )

I = Arus pada penghantar (A)

### 2.2.6.3 Rugi-Rugi Akibat Arus Netral pada Transformator dan Arus Netral pada Tanah

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

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana :

$P_N$  = Rugi-rugi yang timbul pada penghantar netral (watt)

$I_N^2$  = Arus yang mengalir melalui kawat netral (A)

$R_N$  = Tahanan pada kawat netral ( $\Omega$ )

Sedangkan rugi-rugi karena adanya arus netral yang mengalir ke tanah dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana:

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

$I_G^2$  = Arus netral yang mengalir ke tanah (A)

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



### 2.2.7 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 :

1. Kondisi beban tidak seimbang
2. 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. 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 :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \dots\dots\dots(2.8)$$

$$I_b = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \dots\dots\dots(2.9)$$

$$I_c = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana :

$$I_1 = \text{Arus urutan positif (A)}$$

$$I_2 = \text{Arus urutan negatif (A)}$$

$$I_0 = \text{Arus urutan nol (A)}$$

$$I_a = \text{Arus pada fasa a (A)}$$

$$I_b = \text{Arus pada fasa b (A)}$$

$$I_c = \text{Arus pada fasa c (A)}$$

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

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) \dots\dots\dots(2.11)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots\dots\dots(2.12)$$

$$I_0 = \frac{1}{3} I_a + I_b + I_c \dots\dots\dots(2.13)$$



dimana :

$I_1 =$  Arus urutan positif (A)

$I_2 =$  Arus urutan negatif (A)

$I_0 =$  Arus urutan nol (A)

$I_a =$  Arus pada fasa a (A)

$I_b =$  Arus pada fasa b (A)

$I_c =$  Arus pada fasa c (A)

Disini 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 :

$$I_N = I_a + I_b + I_c \dots\dots\dots(2.14)$$

dimana :

$I_N =$  Arus netral (A)

$I_a =$  Arus pada fasa a (A)

$I_b =$  Arus pada fasa b (A)

$I_c =$  Arus pada fasa c (A)

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.13) ke (2.14) maka diperoleh :

$$I_N = 3I_0 \dots\dots\dots(2.15)$$

dimana :

$I_N =$  Arus netral (A)

$I_0 =$  Arus urutan nol (A)

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).



### 2.2.8 Penyaluran dan Susut Daya pada Transformator

Misalkan 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:

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana:

$P_{in}$  = Daya pada sisi primer

$V_p$  = Tegangan Primer (V)

$I_p$  = Arus Primer (A)

$\cos \varphi$  = Faktor Daya

$$P_{out} = \sqrt{3} \cdot V_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana:

$P_{in}$  = Daya pada sisi sekunder

$V_p$  = Tegangan Sekunder (V)

$I_p$  = Arus Sekunder (A)

$\cos \varphi$  = Faktor Daya

Daya yang diterima pada 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 :

$$I_R = a \cdot I \dots\dots\dots(2.18)$$

$$I_S = b \cdot I \dots\dots\dots(2.19)$$

$$I_T = c \cdot I \dots\dots\dots(2.20)$$



Dengan  $I_R$ ,  $I_S$ , dan  $I_T$  berturut-turut adalah arus di fasa. Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai:

$$P = (a + b + c) V \cdot I \cdot \cos\phi \dots\dots\dots(2.21)$$

Apabila persamaan (2.21) dan persamaan (2.16) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a, b, dan c yaitu:

$$a + b + c = 3. \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana pada keadaan seimbang, nilai  $a = b = c = 1$ . Dengan demikian, rata-rata ketidakseimbangan beban dalam (%), yaitu:

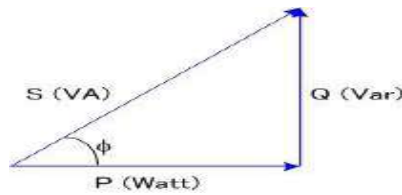
$$\% \text{ ketidakseimbangan beban} = \frac{[a-1]+[b-1]+[c-1]}{3} \times 100\%. \dots\dots\dots(2.22)$$

### 2.2.9 Faktor Daya

Faktor daya ( $\cos \phi$ ) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya semu (VA) yang digunakan dalam listrik arus bolak-balik (AC) atau beda sudut fasa antara  $V$  dan  $I$  yang biasanya dinyatakan dalam  $\cos \phi$ . Berdasarkan pengertian tersebut, faktor daya ( $\cos \phi$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2.23)$$

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



**Gambar 2.11** Segitiga Daya

Daya aktif (Active Power) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Adapun persamaan untuk mencari daya aktif sebagai berikut :

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi \dots\dots\dots(2.24)$$

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, dan lain – lain. Satuan daya reaktif adalah Var.

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \dots\dots\dots(2.25)$$

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar. Adapun persamaan untuk mencari daya semu sebagai berikut:

$$S = V \cdot I \dots\dots\dots(2.26)$$

**2.2.10 Efisiensi pada Transformator**

Untuk setiap mesin atau peralatan listrik, efisiensi ditentukan oleh besarnya rugi-rugi yang selama operasi normal. Untuk mencari besarnya efisiensi pada transformator, maka dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.27)$$



$$P_{in} = P_{out} + \Sigma \text{rugi-rugi} \dots\dots\dots(2.28)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.28) ke dalam persamaan (2.27), maka diperoleh persamaan berikut untuk mencari efisiensi transformator :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma \text{rugi-rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.29)$$