

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan topik tugas akhir yang diambil, terdapat beberapa referensi dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya guna menentukan batasan-batasan masalah yang berkaitan erat dengan topik yang sedang diambil. Referensi ini kemudian akan digunakan untuk mempertimbangkan permasalahan-permasalahan apa saja yang berhubungan dengan topik yang diambil. Adapun beberapa referensi tinjauan pustaka yang digunakan sebagai acuan adalah sebagai berikut :

1. Skripsi yang dilakukan Epo Wardi (2015), yang berjudul “Analisis Pembebanan Transformator Distribusi Fasa Tiga 1000 kVA 20 kVA/400 V di Politeknik Negeri Sriwijaya “Pada skripsi ini Nilai transformator yang didapat dari hasil perhitungan menemukan persentase pembebanan tertinggi sebesar 54,11% sedangkan terendah 36,82% diwaktu siang hari (beban puncak). Dari hasil perhitungan daya rata-rata transformator yang melewati sisi sekunder penulis menemukan daya tertinggi sebesar 443.516 kW sedangkan terendah hanya sebesar 302.803 kW. Efisiensi transformator tertinggi sebesar 43,41% dan efisiensi terendah yang didapat sebesar 29,77%. Maka dari hasil ini pembebanan transformator tersebut dapat dikatakan masih dalam tingkat yang rendah dan masih dapat

dimaksimalkan lagi pembebanannya.

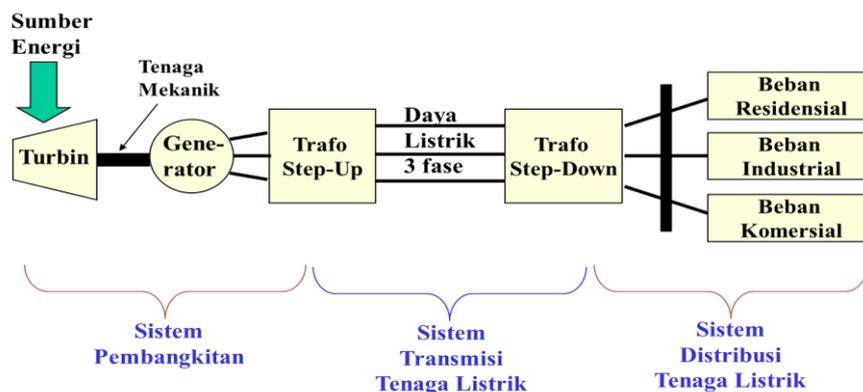
2. Penelitian yang dilakukan Try Lestari (2013), dalam *Jurnal* tugas akhirnya di jurusan Teknik Elektro, Universitas Pakuan Bogor yang berjudul “EVALUASI PEMBEBANAN TRANSFORMATOR III 60 MVA 150/20 KV GARDU INDUK BOGOR BARU ” Transformator III Gardu Induk Bogor Baru merupakan transformator tenaga yang mempunyai daya sebesar 60 MVA untuk menopang atau mendistribusikan beban konsumen. Berdasarkan data beban harian yang dianalisa pada tanggal 01 Juni – 30 Juni 2013 pada pukul 01.00 – 24.00 dari data beban teraebut dapat diketahui faktor beban trafo III 60 MVA 150/20 KV Gardu Induk Bogor Baru. Berdasarkan hasil analisis dapat diketahui faktor beban pada tanggal 01 Juni 2013 sebesar 80,4% berdasarkan beban puncak sebesar 39 MW dan pada tanggal 30 Juni 2013 diketahui beban puncak sebesar 71% dengan beban puncak mencapai 36 MW. Dari seluruh perhitungan Faktor Beban Trafo III Gardu Induk Bogor Baru dari tanggal 01 Juni – 30 Juni 2013 diketahui faktor beban tertinggi sebesar 87% dengan beban puncak sebesar 34 MW yang terjadi pada pukul 10.00.

Perbedaan dengan penelitian yang akan dilakukan adalah, lokasi penelitian dilakukan pada Gardu Induk Cempaka di Banjarbaru, Kalimantan Selatan, pada transformator 150/20 kV unit VI, dalam jangka waktu selama 3 tahun yaitu mulai dari tahun 2014 hingga tahun 2016.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Secara umum definisi sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari berbagai peralatan listrik yang meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi, yang saling berhubungan dan bekerja sama satu sama lain sehingga menghasilkan tenaga listrik untuk kemudian digunakan oleh pelanggan (Syahputra, 2010). Siklus aliran energi listrik pada sistem tenaga listrik dijelaskan pada gambar 2.1 sebagai berikut.



Gambar 2.1 Tiga komponen utama dalam penyaluran tenaga listrik

(Sumber: Syahputra, 2010)

Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Melalui transformator *step-up*, energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban (Syahputra, 2010).

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

Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

2.2.2 Gardu Induk Distribusi

Gardu induk (GI) merupakan suatu instalasi listrik yang terdiri dari beberapa peralatan listrik dan berfungsi untuk:

1. Transformasi tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan tinggi yang lainnya atau ke tegangan menengah.
2. Pengukuran, pengawasan operasi, serta pengaturan pengamanan dari sistem tenaga listrik.
3. Pengaturan daya ke gardu-gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan gardu-gardu induk distribusi melalui *feeder* tegangan menengah.

2.2.2.1 Jenis Gardu Induk

Menurut konstruksinya gardu induk dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Gardu Induk Pasangan Luar (*Outdoor*)

Peralatan listrik tegangan tinggi pada gardu induk ini ditempatkan di luar bangunan atau di tempat terbuka (*switchyard*). Peralatan lain seperti *HV cell*, panel kontrol dan rele-rele, serta sumber DC ditempatkan di dalam gedung. Gardu induk ini biasanya disebut gardu induk konvensional.

Kelebihan gardu induk *outdoor*, yaitu:

- a.) Konstruksinya lebih murah dibanding dengan gardu induk *indoor*.
- b.) Isolasi antara peralatan dan antara busbar menggunakan media udara terbuka sehingga mengurangi biaya untuk media isolasi.

Kelemahan gardu induk *outdoor*, yaitu:

- a.) Membutuhkan area tanah yang luas.
- b.) Lebih rentan terhadap hujan dan debu (kondisi cuaca) sehingga peralatan mudah kotor dan jadwal pemeliharaan harus lebih sering dilakukan.
- c.) Memungkinkan untuk mengalami *over voltage* akibat sambaran petir.

2. Gardu induk Pasangan Dalam (*Indoor*)

Pada gardu induk *indoor* instalasi peralatan listrik ditempatkan di dalam gedung atau di tempat tertutup. Pada gardu induk *indoor* menggunakan media isolasi gas dan disebut *Gas Insulated Switchyard (GIS)*.

Kelebihan gardu induk *indoor* adalah:

- a.) Membutuhkan area yang kecil.
- b.) Lebih aman terhadap petir dan pengaruh cuaca lainnya.
- c.) Biaya perawatan yang lebih sedikit.

Kelemahan gardu induk *indoor* adalah:

- a.) Konstruksinya lebih mahal.

3. Gardu Induk Pasangan Gabungan

Pada gardu induk pasangan gabungan hanya transformatornya yang diletakkan diluar, sedangkan peralatan lainnya berada di dalam gedung. Disebut gardu induk pasangan gabungan.

4. Gardu Induk Dalam Tanah

Gardu induk dalam tanah mempunyai ciri khas mirip dengan gardu induk pasangan dalam, hanya saja tempatnya di dalam tanah. Gardu Induk jenis ini umumnya berada di pusat kota. Karena tanah tidak memadai jadi semua peralatannya dipasang dibangunan bawah tanah, kecuali pendingin.

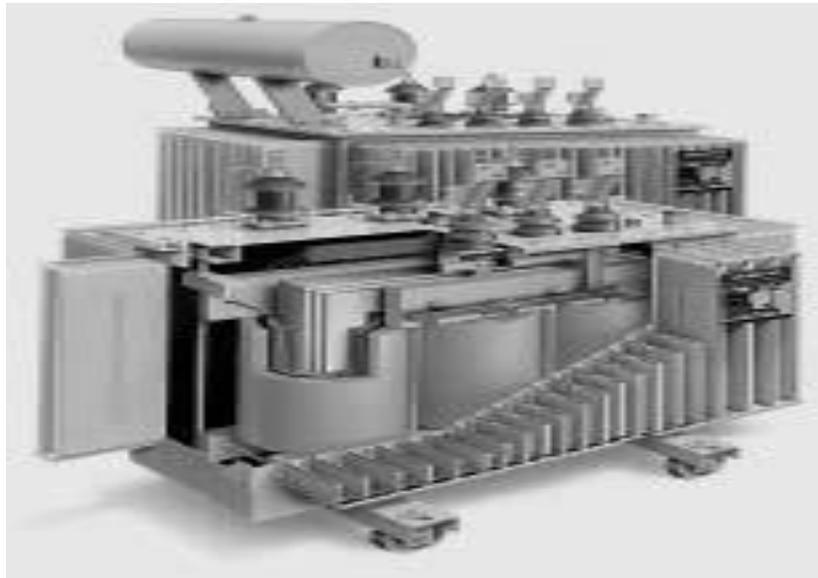
2.2.2.2 Peralatan Gardu Induk

Peralatan dalam sebuah gardu induk bergantung pada tipe gardu induk, fungsi serta tingkat proteksi yang diinginkan. Secara umum, sebuah gardu induk memiliki peralatan utama sebagai berikut:

1. Transformator Daya

Transformator ini berfungsi menyalurkan besaran daya tertentu dengan mengubah besaran tegangannya. Transformator daya yang digunakan di gardu induk ada yang berupa satu transformator 3 fase ataupun tiga transformator 1 fase. Jika transformator 3 fase dibanding dengan tiga transformator 1 fase yang kapasitasnya sama, didapati bahwa berat transformator 3 fase kira-kira sebesar 80% dari berat tiga transformator 1 fase. Transformator 3 fase juga lebih menguntungkan dalam hal pondasi, *wiring*, dan ruang yang diperlukan. Kelebihan menggunakan transformator 1 fase yaitu apabila diperlukan transformator cadangan, maka untuk transformator 1 fase cukup ditambah satu transformator 1 fase saja sehingga menjadi empat transformator 1 fase, sehingga sangat ekonomis. Namun, jika dalam suatu gardu induk terdapat banyak transformator, maka

transformator 3 fase lebih menguntungkan. Konstruksi transformator daya ditunjukkan seperti gambar 2.2.

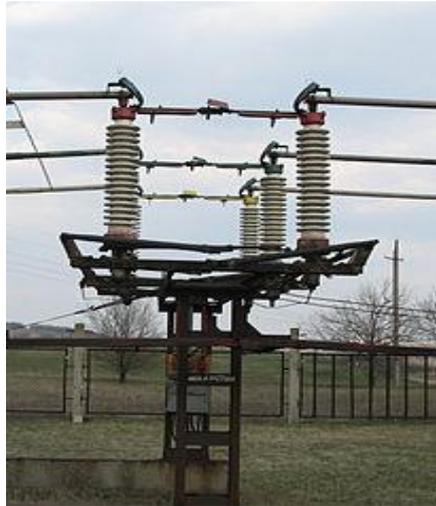


Gambar 2.2 Konstruksi transformator daya 3 fase

(Sumber:PT.PLN (Persero), 2010)

2. *Circuit Breaker (CB)*

CB merupakan alat yang dapat membuka atau menutup rangkaian baik pada kondisi kerja normal maupun pada saat terjadi kegagalan. Pada kondisi kerja normal CB dapat dioperasikan secara manual ataupun dengan menggunakan remote kontrol, sebaliknya pada saat terjadi kegagalan CB akan bekerja secara otomatis. Pada CB dilengkapi dengan media untuk memadamkan busur api (*arc*), seperti dengan media udara, gas, minyak dan lain sebagainya.

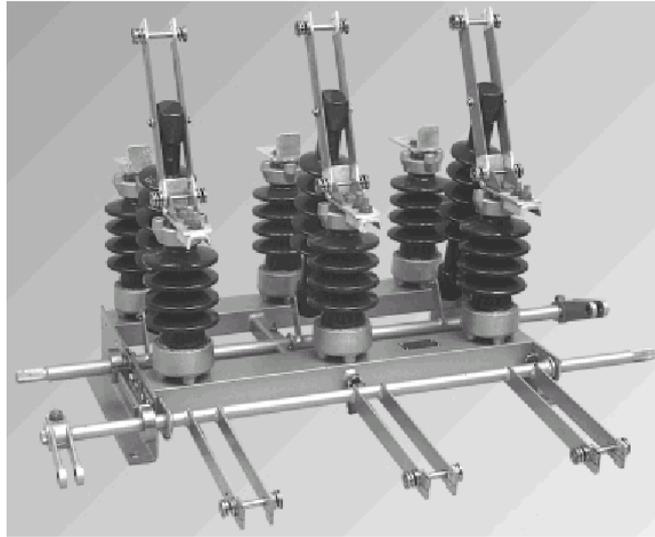


Gambar 2.3 *Circuit breaker*

(Sumber: Marsudi, 2005)

3. Saklar Pemisah (*Disconnecting Switch*)

DS berfungsi memisahkan rangkaian listrik dalam keadaan tidak berbeban. Pada umumnya DS tidak dapat memutuskan arus. Meskipun dapat memutuskan arus yang kecil, dalam membuka atau menutup DS harus dilakukan setelah membuka CB terlebih dahulu. Untuk menjamin agar kesalahan urutan operasi tidak terjadi, maka harus ada keadaan saling mengunci (*interlock*) antara CB dan DS. Di dalam rangkaian kontrolnya, rangkaian *interlock* akan mencegah bekerjanya DS apabila CB masih dalam keadaan menutup. DS seperti gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 *Disconnecting switch*

(Sumber: Marsudi, 2005)

4. Trafo Ukur

Trafo ukur terdiri dari trafo arus (*current transformer*) dan trafo tegangan (*potential transformer*). Trafo arus berfungsi mengubah besaran arus pada sistem ke besaran yang lebih kecil untuk keperluan pengukuran arus, kWh meter, dan rele proteksi. Trafo tegangan berfungsi mengubah besaran tegangan dari tegangan tinggi ke rendah untuk keperluan penunjukan nilai tegangan pada voltmeter, serta untuk pengukuran energi.

5. *Lightning Arrester*

Lightning arrester merupakan kunci dalam koordinasi isolasi suatu sistem tenaga listrik untuk melindungi transformator distribusi, khususnya pada pemasangan luar dari tegangan lebih akibat surja petir. Bila terjadi surja atau petir, maka

arrester berfungsi melepaskan muatan listrik ke sistem pentanahan, serta mengurangi tegangan lebih yang akan mengenai peralatan di dalam gardu induk.



Gambar 2.5 *Lightning arrester*

(Sumber: PT.PLN (Persero), 2010)

6. Trafo pemakaian sendiri

Trafo pemakaian sendiri berfungsi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dalam gardu induk itu sendiri, misalnya untuk penerangan, *air conditioning*, serta keperluan pengoperasian peralatan listrik lainnya.

7. *HV Cell 20 kV (Cubicle)*

Di dalam *HV Cell 20 kV* terdapat sekumpulan *cell incoming* (penyulang masuk), *cell outgoing* (penyulang keluar), *cell PMT* kopel, *cell spare*, dan lain-lain. *HV Cell 20 kV* berfungsi sebagai pusat beban untuk jaringan distribusi 20 kV, di mana sisi sekunder dari trafo 150/20 kV mengisi *cell incoming* yang berada

dalam ruang *HV Cell* 20 kV, kemudian mengalirkan arus di sepanjang bus (rel tegangan menengah) pada *cell-cell outgoing* penyulang. Selanjutnya, dari penyulang-penyulang inilah suplai daya listrik akan didistribusikan kepada konsumen dalam wilayah sesuai dengan yang *dihandle* oleh masing-masing penyulang.



Gambar 2.6 *HV Cell* 20 kV (*cubicle*)

(Sumber: PT.PN (Persero), 2010)

Selain peralatan utama, di dalam gardu induk juga terdapat peralatan kontrol yang terdiri dari:

a. Panel kontrol utama

Panel kontrol utama berfungsi mengontrol dan memonitor operasi gardu induk dan merupakan pusat pengendali suatu gardu induk. Panel kontrol dibagi menjadi panel instrumen dan panel operasi. Pada panel instrumen terpasang instrumen, seperti *amperemeter* dan kWh meter, serta penunjuk gangguan, dari sini keadaan operasi dapat diawasi. Sedangkan pada panel operasi terpasang saklar operasi dari CB dan DS serta lampu penunjuk posisi saklar.

b. Panel rele

Pada panel rele terpasang rele pengaman, seperti *over current relay (OCR)* dan *directional ground relay*. Kerja rele dikoordinasikan dengan CB, sehingga apabila terjadi gangguan (misalnya karena hubung singkat), rele segera memerintahkan CB untuk trip. Dengan demikian gangguan tidak akan meluas dan mengakibatkan kerusakan pada peralatan.

Di samping peralatan utama dan peralatan kontrol, dalam gardu induk juga terdapat peralatan bantu (*auxiliary*), seperti alat pendingin, baterai, kompresor, alat penerangan dan sebagainya. Karena dalam operasinya gardu induk berhubungan dengan pusat pembagi beban, maka diperlukan juga peralatan komunikasi.

2.2.3 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran, yang terdiri dari atas transformator arus dan Transformator tegangan.

2.2.3.1 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.

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \text{ Volt} \quad (2.1)$$

Dimana : E = gaya gerak listrik (ggl) volt

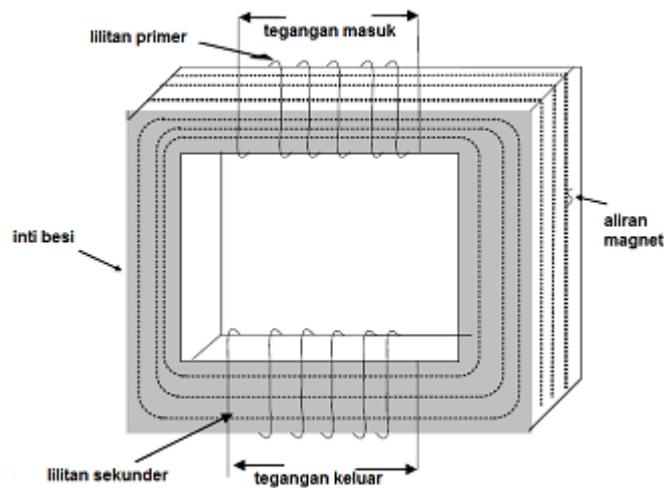
 N = jumlah lilitan

$\frac{d\Phi}{dt}$ = perubahan fluks magnet

Perlu diingat bahwa hanya tegangan listrik 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) rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*).

2.2.3.2 Komponen Transformator

Tranformator daya adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari generator bertegangan menengah ke transmisi bertegangan tinggi dan untuk menyalurkan daya dari transmisi bertegangan tinggi ke jaringan distribusi bertegangan rendah.



Gambar 2.7 Konstruksi kumparan transformator daya

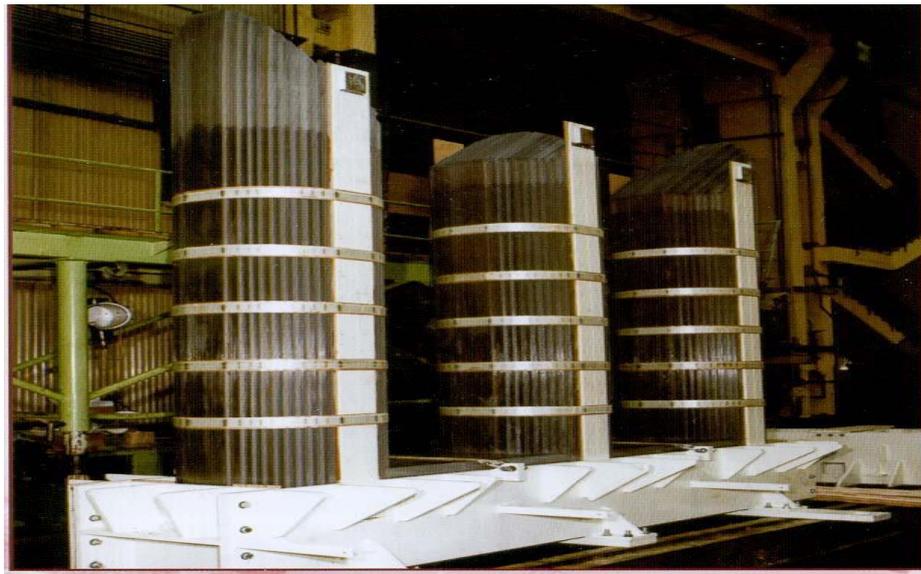
(Sumber: Lestari, 2014)

Pada gambar terlihat bahwa bagian utama dari transformator adalah inti, dua set kumparan atau lebih dan isolasi. Inti trafo yang terbuat dari lembaran-lembaran baja silikon yang satu dengan lainnya diisolasi dengan pennis. Kumparan terbuat dari bahan tembaga yang dihubungkan dengan sumber energi disebut kumparan primer, sedang yang dihubungkan dengan beban disebut kumparan sekunder.

2.2.3.3 Bagian-Bagian Utama Transformator

1. Inti Besi

Berfungsi untuk mempermudah jalan *fluks*, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh *Eddy Current*. Inti trafo dibentuk dari lapisan lembaran pelat besi silikon yang memiliki lapisan isolasi sangat tipis pada salah satu sisinya, yang tahan terhadap panas tinggi serta mempunyai koefisien penyebaran panas yang rendah, dengan ketebalan yang sangat tipis untuk dapat menekan rugi-rugi inti yang semakin kecil. Disusun sedemikian rupa sehingga membentuk suatu luasan inti magnetis yang kokoh serta efisien.

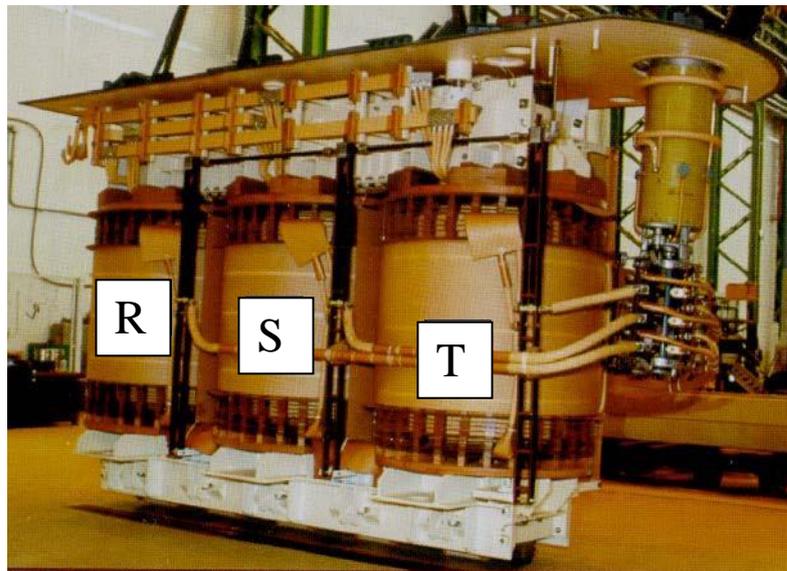


Gambar 2.8 Inti besi dan laminasi yang diikat *fiber glass*

(Sumber: Marsudi, 2005)

2. Kumparan Transformator

Kumparan Transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.9 Kumparan fasa RST

(Sumber: Marsudi, 2005)

3. Minyak Transformator

Sebagian besar kumparan-kumparan dan inti trafo tenaga direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah, sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

Di dalam sebuah transformator terdapat dua komponen yang secara aktif membangkitkan energi panas, yaitu besi (inti) dan tembaga (kumparan). Bila energi panas tidak disalurkan melalui suatu sistem pendinginan akan mengakibatkan besi maupun tembaga akan mencapai suhu yang tinggi, yang akan merusak nilai isolasinya. Sebagai maksud untuk pendinginan, kumparan dan inti dimasukkan ke dalam suatu jenis minyak, yang dinamakan minyak transformator. Minyak itu mempunyai fungsi ganda, yaitu pendinginan dan isolasi.

Perlu dikemukakan bahwa minyak transformator harus memiliki mutu yang tinggi dan senantiasa berada dalam keadaan bersih. Disebabkan energi panas yang dibangkitkan dari inti maupun kumparan, maka suhu minyak akan naik. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya perubahan-perubahan pada minyak transformator. Lagi pula dalam jangka waktu yang lama akan terbentuk berbagai pengotoran yang akan menurunkan mutu minyak transformator. Hal-hal ini dapat mengakibatkan kemampuan pendinginan maupun isolasi minyak akan menurun. Selanjutnya dapat pula terjadi bahwa hawa lembab yang sebagaimana halnya terjadi di daerah tropis, mengakibatkan masuknya air didalam minyak transformator.

Bila suhu minyak transformator yang sedang dioperasikan diukur, akan tampak bahwa suhu minyak itu akan tergantung pada tinggi pengukuran pada bak. Suhu tertinggi akan ditemukan pada sekitar 70% - 80% tinggi bejana.

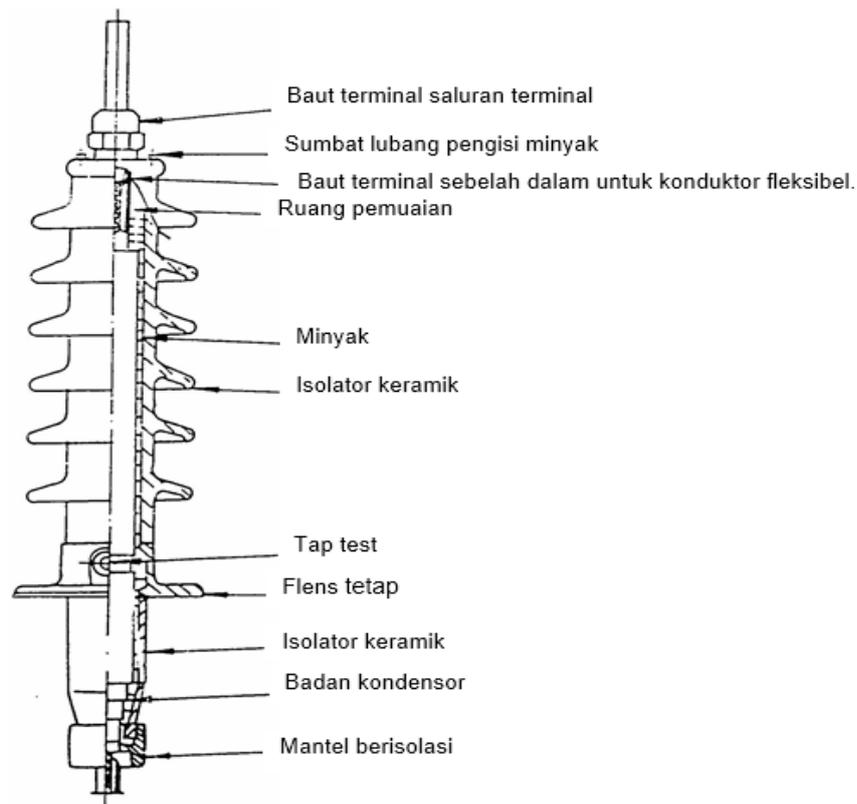
Minyak trafo sebagai bahan isolasi sekaligus sebagai media penghantar panas dari bagian yang panas (belitan dan inti) kedinding tangki atau radiator pendingin memiliki karakteristik sebagai berikut:

- a. Berat jenis (*specific gravity*) 0,85 sampai 0,90 pada suhu 13,5° C
- b. Kekentalan (*viscosity*) cukup rendah untuk memperlancar sirkulasi dari bagian yang panas ke bagian yang dingin, yaitu 100 sampai 10 *Saybolts second* pada 40° C
- c. Titik didih tidak kurang dari 135° C
- d. Titik beku tidak lebih dari -45° C
- e. Tegangan tembus tidak kurang dari 30 kV per 2,5 mm atau 120 kV/1 cm
- f. Koefisien muai 0,00065 per 1° C
- g. Titik api (*flash point*) 180° C sampai 190° C
- h. Titik nyala (*burning point*) 205° C
- i. Kelembaban terhadap uap air (*moisture*) nihil

4. *Bushing*

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah *bushing* yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Fungsinya sebagai penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan di luar transformator. *Bushing* seperti gambar 2.10 terdiri dari sebuah konduktor yang terhubung dengan kumparan yang berada di dalam transformator dan konduktor

tersebut diselubungi oleh bahan isolator. Bahan isolator berfungsi sebagai media isolasi antara konduktor *bushing* dengan badan tangki utama transformator. Secara garis besar, *bushing* terdiri dari empat bagian utama, yaitu konduktor, isolator, klem koneksi, dan aksesoris.



Gambar 2.10 Konstruksi *bushing*

(Sumber: PT.PLN(Persero) 2010)

5. Tangki Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemaian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator. Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada

transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu. Seiring dengan naik turunnya volume minyak dikonservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara didalam konservator pun akan bertambah dan berkurang.

Penambahan atau pembuangan udara di dalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar, maka udara yang akan masuk ke dalam konservator akan difilter melalui silica gel. Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan brether bag/rubber bag, yaitu sejenis balon karet yang dipasang di dalam tangki konservator seperti gambar 2.11.



Gambar 2.11 Tangki konservator pada transformator

2.2.3.4 Peralatan Bantu

1. Pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi (di dalam transformator). Maka untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan maka perlu dilengkapi dengan alat/sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa:

- a. Udara/gas
- b. Minyak
- c. Air

Sedangkan pengalirannya (sirkulasinya) dapat dengan cara :

- a. Alamiah (Natural)
- b. Tekanan/paksaan

Pada cara alamiah (natural), pengaliran media sebagai akibat adanya perbedaan suhu media dan untuk mempercepat perpindahan panas dari media tersebut ke udara luar diperlukan bidang perpindahan panas yang lebih luas antara media (minyak, udara dan gas), dengan cara melengkapi transformator dengan sirip-sirip (*radiator*).

Bila diinginkan penyaluran panas yang lebih cepat lagi, cara natural/alamiah tersebut dapat dilengkapi dengan peralatan untuk mempercepat sirkulasi media

pendingin dengan pompa-pompa sirkulasi minyak, udara dan air. Cara ini disebut pendingin paksa (*forced*).

Macam-macam sistem pendingin transformator berdasarkan media dan cara pengalirannya dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Tabel 2.1 Macam-macam sistem pendingin

No.	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar	
		Sirkulasi	Sirkulasi	Sirkulasi	Sirkul
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. Perubahan Tap (*Tap Changer*)

Tap changer adalah alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah. Tap changer yang hanya bisa beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban disebut (*off load tap changer*) dan hanya dapat dioperasikan manual.

Tap changer yang dapat beroperasi untuk memindahkan tap transformator, dalam keadaan transformator berbeban disebut (*on load tap changer*) dan dapat dioperasikan secara manual atau otomatis.

Untuk memenuhi kualitas tegangan pelayanan sesuai kebutuhan konsumen (PLN Distribusi), tegangan keluaran (sekunder) transformator harus dapat dirubah sesuai keinginan. Untuk memenuhi hal tersebut, maka pada salah satu atau pada kedua sisi belitan transformator dibuat tap (penyadap) untuk merubah perbandingan transformasi (rasio) trafo. Ada dua cara kerja *tap changer* :

- a. Mengubah tap dalam keadaan trafo tanpa beban
- b. Mengubah tap dalam keadaan trafo berbeban (*On Load Tap Changer / OLTC*)

Transformator yang terpasang di gardu induk pada umumnya menggunakan tap changer yang dapat dioperasikan dalam keadaan trafo berbeban dan dipasang di sisi primer. Sedangkan transformator penaik tegangan di pembangkit atau pada

trafo kapasitas kecil, umumnya menggunakan tap changer yang dioperasikan hanya pada saat trafo tenaga tanpa beban.

Untuk mengisolasi dari bodi trafo (tanah) dan meredam panas pada saat proses perpindahan tap, maka OLTC direndam di dalam minyak isolasi yang biasanya terpisah dengan minyak isolasi utama trafo (ada beberapa trafo yang compartemennya menjadi satu dengan *main tank*).

Karena pada proses perpindahan hubungan tap di dalam minyak terjadi fenomena listrik, mekanis, kimia dan panas, maka minyak isolasi OLTC kualitasnya akan cepat menurun. tergantung dari jumlah kerjanya dan adanya kelainan di dalam OLTC.

3. Alat Pernapasan

Karena pengaruh naik turunnya beban transformator maupun suhu udara luar, maka suhu minyak pun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya apabila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki. Kedua proses tersebut dinamakan pernapasan transformator.

Akibat pernapasan transformator tersebut maka permukaan minyak akan selalu bersinggungan dengan udara luar. Udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah

hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernapasan, berupa tabung berisi kristal zat *hygroskopis*.

4. NGR (*Neutral Grounding Resistance*)

NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke *ground*/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah. Ada dua jenis NGR, yaitu *liquid* dan minyak. Resistor pada *liquid* menggunakan larutan air murni yang ditampung di dalam bejana dan ditambahkan garam (*NaCl*) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan.

5. Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator sebagai berikut:

- a. Indikator Suhu Minyak
- b. Indikator Permukaan Minyak
- c. Indikator Suhu Belitan
- d. Indikator Kedudukan Tap dan Sebagainya

2.2.3.5 Transformator 3 Fasa

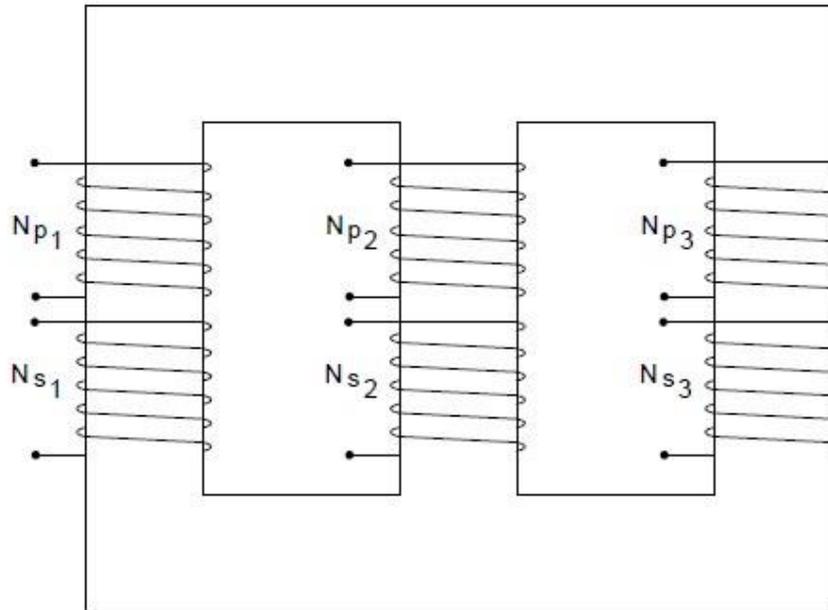
Pada prinsipnya transformator tiga phase sama dengan transformator satu phase, perbedaannya adalah seperti perbedaan sistem listrik satu phase dengan listrik tiga phase, yaitu mengenal sistem bintang (Y) dan segitiga (Δ), serta sistem

zig-zag (Z), dan juga sistem bilangan jam yang sangat menentukan untuk kerja paralel transformator tiga phase. Untuk menganalisa transformator daya tiga phase dilakukan dengan memandang atau menganggap transformator tiga phase sebagai transformator satu phase, teknik perhitungannya pun sama, hanya untuk nilai akhir biasanya parameter tertentu (arus, tegangan dan daya) transformator tiga phase dikaitkan dengan nilai $\sqrt{3}$.

Transformator tiga phase ini dikembangkan dengan alasan ekonomis, biaya lebih murah karena bahan yang digunakan lebih sedikit dibandingkan tiga buah transformator satu phase dengan jumlah daya yang sama dengan satu buah transformator daya tiga phase, lebih ringan dan lebih kecil sehingga mempermudah pengangkutan (menekan biaya pengiriman), pengerjaannya lebih cepat, serta untuk menangani operasinya hanya satu buah transformator yang perlu mendapatkan perhatian (meringankan pekerjaan perawatan).

Selain itu transformator tiga phase juga lebih banyak digunakan di sistem tenaga listrik di dunia sehingga untuk pemesanannya lebih mudah, sedangkan transformator satu phase lebih jarang digunakan.

Untuk mengurangi kerugian yang disebabkan oleh arus pusar di dalam inti, rangkaian magnetik itu biasanya terdiri dari setumpuk laminasi tipis. Dua jenis konstruksi yang biasanya dipergunakan diperlihatkan pada gambar berikut ini.



Gambar 2.12 Tranformator 3 fasa tipe inti

(Sumber: Lestari, 2014)

Dalam jenis inti (*core type*) kumparan dililitkan pada setiap kaki transformator. Dalam jenis cangkang (*shell type*) kumparan dililitkan pada sekitar kaki tengah dari inti. Kebanyakan fluks terkurung dalam inti dan karena itu dirangkum oleh kedua kumparan. Meskipun fluks bocor dirangkum salah satu kumparan tanpa dirangkum yang lain merupakan bagian kecil dari fluks total, ia mempunyai pengaruh penting pada perilaku transformator. Kebocoran dapat dikurangi dengan membagi kumparan dalam bagian-bagian yang diletakkan sedekat mungkin satu sama lainnya.

Secara umum hubungan belitan tiga fasa terbagi atas dua jenis, yaitu hubungan wye (Y) dan hubungan delta (Δ). Masing-masing hubungan ini

memiliki karakteristik arus tegangan yang berbeda-beda. Baik sisi primer maupun sekunde masing-masing dapat dihubungkan wye ataupun delta.

2.2.3.6 Transformator Distribusi

Trafo distribusi merupakan bagian penting dari jaringan distribusi, yaitu untuk menyesuaikan level tegangan agar sesuai dengan keperluan pelanggan. Trafo distribusi biasanya menggunakan pendingin minyak. Kumputan trafo dimasukkan dalam tabung yang berisi minyak pendingin.

Dalam pemakaiannya perlu dipasang peralatan pengaman agar trafo tidak mudah rusak akibat gangguan yang terjadi pada jaringan, baik itu hubung singkat, arus beban lebih maupun gangguan petir. Untuk melindungi dari gangguan petir digunakan *arrester*, yang satu ujungnya dihubungkan dengan kawat tegangan menengah dan ujung lainnya dihubungkan ke tanah. Prinsip kerjanya, pada saat normal *arrester* bekerja sebagai isolator. Kemudian pada saat terjadi tegangan lebih akibat petir, maka *arrester* berubah watak menjadi konduktor yang baik, sehingga tegangan lebih yang terjadi dapat dinetralkan ke tanah. Setelah tegangan lebih petir hilang, maka *arrester* kembali normal sebagai isolator.

Untuk melindungi dari arus lebih digunakan sekering lebur, yang akan memutuskan rangkaian bila terjadi arus lebih, baik akibat beban yang berlebih ataupun terjadi hubung singkat pada jaringan tegangan rendahnya. Transformator distribusi dibagi menjadi 3 tipe berdasarkan kapasitasnya, diantaranya:

1. Tipe tembok : di atas 555 KVA sampai 1 MVA
2. Tipe dua tiang : di atas 200 KVA sampai 555 KVA

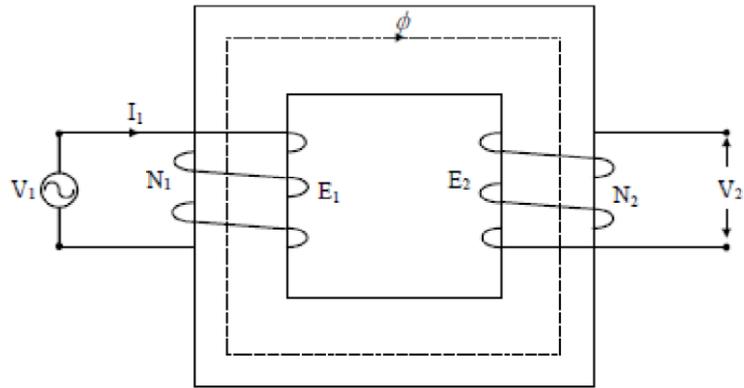
3. Tipe satu tiang : dengan kapasitas 200 KVA atau lebih kecil

Pemilihan kapasitas trafo disesuaikan dengan jumlah beban yang dilayani, baik itu beban pada saat trafo dipasang maupun perkiraan penambahan beban di lokasi tersebut. Demikian pula sistem jaringan tegangan rendahnya menggunakan satu fasa atau tiga fasa. Trafo yang berkapasitas relatif kecil biasanya relatif ringan sehingga cukup dipasang pada satu tiang yang digunakan untuk menyangga kawat penghantar jaringan distribusi. Sedang untuk trafo yang berkapasitas besar tidak lagi dipasang pada tiang jaringan distribusi, tetapi dipasang dalam bangunan.

2.3 Pembebanan Transformator

1. Keadaan Transformator Tanpa Beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal, akan mengalir arus primer I_1 yang juga sinusoidal, dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 . Arus primer I_1 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid. Gelombang sinusoid bisa berbentuk gelombang fungsi sinus atau gelombang fungsi kosinus. Kedua gelombang tersebut pada dasarnya identik, hanya saja memiliki perbedaan sudut sebesar 90° .



Gambar 2.13 Keadaan transformator tanpa beban

(Sumber: Lestari, 2014)

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t \text{ Wb}$$

Fluks yang sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (Hukum Farraday)

$$E_1 = N_1 \omega \Phi_{\max} \cos(\omega t - 90) \quad (2.2)$$

Dimana :

E_1 = Gaya gerak listrik induksi

N_1 = Jumlah lilitan di sisi primer

ω = Kecepatan sudut putar

Φ = Fluks magnetic

Harga efektif :

$$E_1 = 4,44 N_1 f \Phi_{\max} \text{ (Volt)} \quad (2.3)$$

Dimana :

E_1 = Gaya gerak listrik induksi (efektif)

f = Frekuensi

Bila tahanan dan adanya fluks bocor diabaikan akan terdapat hubungan :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.4)$$

Dimana :

E_1 = Gaya gerak listrik di sisi primer (volt)

E_2 = Gaya gerak listrik di sisi sekunder (volt)

V_1 = Tegangan terminal di sisi primer (volt)

V_2 = Tegangan terminal di sisi sekunder (volt)

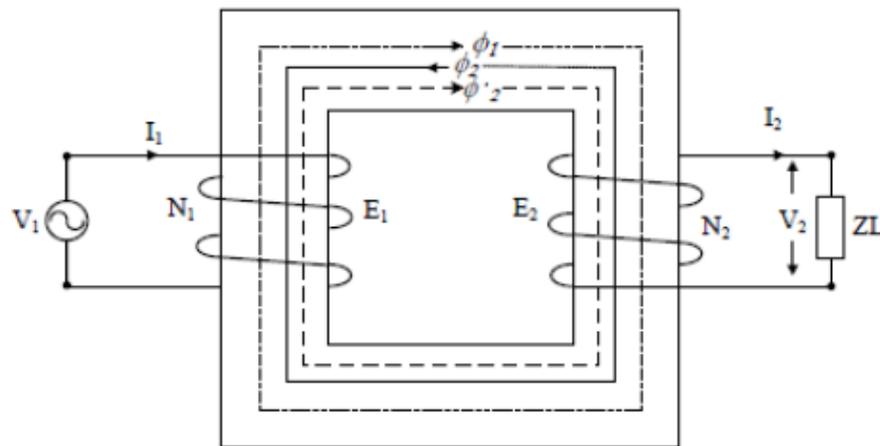
N_1 = Jumlah belitan di sisi primer

N_2 = Jumlah belitan di sisi sekunder

a = Faktor Transformasi

2. Keadaan Transformator Berbeban

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



Gambar 2.14 Keadaan transformator ketika berbeban

(Sumber : Lestari, 2014)

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan. Agar fluks bersama ini 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 :

$$I_1 = I_0 + I_2 \text{ (ampere)} \quad (2.5)$$

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

$$I_1 = I_m + I_2 \text{ (ampere)} \quad (2.6)$$

Dimana :

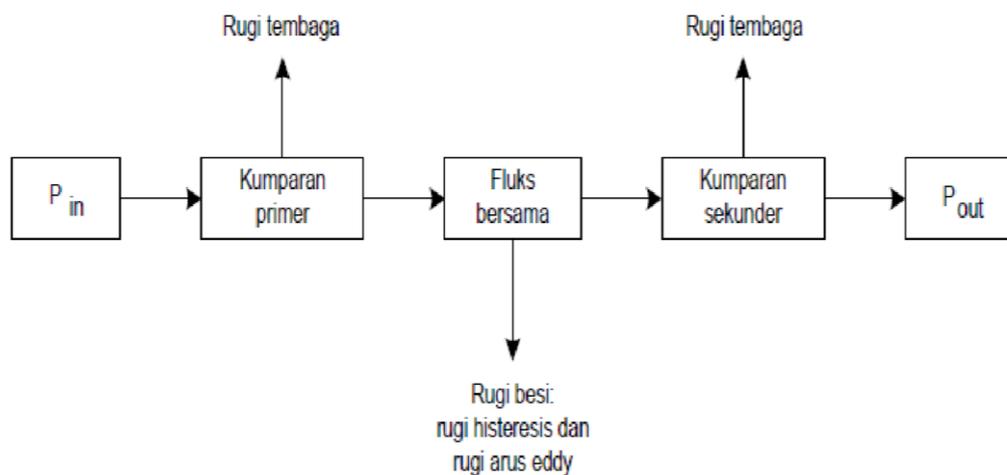
I_1 = arus di sisi primer

I_0 = arus penguat

I_m = arus pemagnetan

I_c = arus rugi-rugi tembaga

2.4 Rugi-rugi dan Efisiensi



Gambar 2.15 Blok diagram rugi-rugi pada transformator

1. Rugi Tembaga (PCu)

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

$$P_{Cu} = I^2 R \text{ (watt)} \quad (2.7)$$

Formula ini merupakan perhitungan untuk pendekatan. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

2. Rugi Besi (Pi)

Rugi-rugi besi terdiri atas :

- a. Rugi histeris, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai :

$$P_h = k_h f B_{Max}^{1.6} \text{ (watt)} \quad (2.8)$$

Dimana:

K_h = konstanta

B_{Max} = Fluks maksimum (webber)

- b. Rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi.

Dirumuskan sebagai :

$$P_e = k_e f^2 B_{Max}^2 \text{ (watt)} \quad (2.9)$$

Dimana:

K_e = konstanta

B_{Max} = Fluks maksimum (webber)

Jadi , rugi besi (rugi inti) adalah :

$$P_i = P_h + P_e \text{ (watt)} \quad (2.10)$$

3. Efisiensi

Efisiensi dinyatakan sebagai :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + \sum \text{rugi-rugi}} \times 100\% \quad (2.11)$$

Dimana :

P_{in} = Daya input Transformator

P_{out} = Daya output Transformator

$$\sum \text{rugi-rugi} = P_{Cu} + P_i$$

2.5 Faktor-Faktor pembangkitan

Faktor-faktor pembangkitan adalah faktor-faktor yang mempengaruhi pembangkitan energi listrik faktor-faktor tersebut ada beberapa macam yaitu;

1. Faktor Beban

Faktor beban adalah perbandingan antara besarnya beban rata-rata untuk selang waktu tertentu terhadap beban puncak tertinggi dalam selang waktu yang sama misalnya satu hari atau satu bulan. Sedangkan beban rata-rata untuk suatu selang waktu tertentu adalah jumlah produksi kWh dalam selang waktu tersebut dibagi dengan jumlah jam dari selang waktu tersebut.

Faktor beban dapat memuat dalam beberapa cakupan antara lain faktor beban harian, mingguan, bulanan atau tahunan. Bila yang di bahas tentang beban harian maka beban rata – rata tersebut adalah beban dalam satu hari dibagi 24 jam. Sedangkan beban puncak adalah beban tertinggi yang terjadi dalam 24 jam. faktor beban sistem diinginkan setinggi mungkin karena faktor beban yang makin tinggi berarti makin rata beban sistemnya, sehingga tingkat pemanfaatan alat-alat yang ada dalam sistem tersebut dapat diusahakan setinggi mungkin.

Rumus untuk mencari persentase faktor beban dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\text{Beban rata-rata}}{\text{Beban puncak}} \times 100\% = \text{Faktor beban} \quad (2.12)$$

Dalam praktiknya, faktor beban tahunan sistem berkisar antara 60%-80%

Tabel 2.2 Keterangan faktor beban

Faktor beban	Keterangan
<60%	Ringan
60%-80%	Optimal
80%-100%	Berat
>100%	Overload

2. Faktor Kapasitas

Faktor kapasitas sebuah unit pembangkit menggambarkan seberapa besar sebuah unit pembangkit itu dimanfaatkan. Faktor kapasitas tahunan (8760 jam) didefinisikan sebagai:

$$\frac{\text{Produksi KWh 1 tahun}}{\text{daya terpasang MW} \times 8760 \text{ jam}} = \text{Faktor kapasitas} \quad (2.13)$$

Dalam praktiknya, faktor kapasitas tahunan untuk unit PLTU hanya dapat mencapai angka antara 60% - 80% karena adanya masa pemeliharaan dan jika adanya gangguan atau kerusakan yang dialami oleh unit pembangkit tersebut. Untuk PLTA, faktor kapasitas tahunannya berkisar antara 30% - 50%, hal ini berkaitan dengan ketersediaan air.

3. Faktor Penggunaan (Utilitas)

faktor ini sesungguhnya serupa dengan faktor kapasitas, tetapi disini menyangkut daya. Faktor Utilitas sebuah alat dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\frac{\text{Beban alat tertinggi}}{\text{Kemampuan alat}} = \text{Faktor kapasitas} \quad (2.14)$$

beban dinyatakan dalam ampere atau megawatt (MW) tergantung alat yang diukur faktor utilitasnya. Untuk saluran, umumnya dalam ampere, tetapi untuk unit pembangkit dalam MW. Faktor utilitas ini perlu diamati darikeperluan pemanfaatan alat dan juga untuk mencegah pembebanan yang berlebihan pada suatu alat.

4. *Forced Outage Rate (FOR)*

FOR adalah sebuah faktor yang menggambarkan sering-tidaknya suatu unit pembangkit mengalami gangguan, biasanya diukur untuk masa satu tahun dan didefinisikan sebagai:

$$\frac{\text{Jumlah jam gangguan unit pembangkit}}{\text{jumlah jam operasi} + \text{jumlah jam gangguan}} = \text{FOR} \quad (2.15)$$

FOR tahunan untuk PLTA berkisar 0,01 dan *FOR* tahunan untuk pembangkit thermis berkisar 0,1 - 0,5. makin andal suatu unit pembangkit, maka makin kecil nilai *FOR*-nya dan berarti makin jarang terjadi gangguan pada unit pembangkit tersebut. Begitu pula sebaliknya, jika nilai *FOR* tinggi, berarti unit pembangkit tersebut sering terjadi gangguan dan tidak andal