

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

1.1 Tinjauan Pustaka

Rahman, (2015) melakukan penelitian tentang prakiraan dan analisis kebutuhan energi listrik Provinsi Sumatra Barat hingga tahun 2024. Penulis melakukan penelitian pada kapasitas transformator distribusi untuk wilayah Provinsi Sumatra Barat. Berdasarkan hasil penelitian menggunakan metode linier berganda dengan memprediksikan 10 tahun kedepan. Untuk sektor rumah tangga menjadi yang paling tinggi kebutuhan energi listriknya pada tahun 2024 yaitu sebesar 2.332.704,91 (*Megawatt-hour*) MWh dengan persentase rata-rata kenaikan per tahun sebesar 5,68 persen. Namun jika dilihat dari persentase rata-rata kenaikan per tahun yang tertinggi justru pada sektor komersial sebesar 7,08 persen. Pada sektor publik persentase rata-rata kenaikan per tahun adalah sebesar 1,15 persen. Keadaan sebaliknya terjadi pada sektor industri yang mengalami penurunan dengan persentase sebesar -4,94 persen. Hal ini disebabkan oleh semakin majunya teknologi industri menyebabkan perusahaan industri berinovasi untuk mendapatkan sumber energi dan sumber peralatan kepada yang lebih hemat energi.

Nugroho, F.A. (2016) melakukan penelitian terhadap evaluasi kemampuan transformator Gardu Induk Ciligon lama 150 KV. Penulis melakukan peramalan terhadap 2 unit trafo yang ada di Gardu Induk Ciligon lama 150 KV. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan metode regresi linier ganda, penulis memprediksi pada 15 tahun yang akan mendatang untuk transformator pertama yang berkapasitas 56 (*Megavolt-ampere*) MVA. Dengan hasil bahwa pada tahun 2030 kondisi pada transformator pertama sudah tidak mampu lagi melayani beban yang tinggi sebesar 59,24 MVA (106 %). Sementara ketersediaan kapasitas transformator yang terpasang sebesar 56 MVA. Kemudian pada prediksi trafo unit kedua yang berkapasitas 60 MVA pada tahun 2030 masih dalam batas standar optimal operasi trafo yaitu sebesar 47,025 MVA (78 %). Sehingga transformator dapat bekerja dengan optimal dalam kurun waktu 15 tahun mendatang.

Krisno, (2017) melakukan penelitian terhadap evaluasi kemampuan transformator daya berdasarkan perkembangan penduduk dan beban puncak di Gardu Induk 150 KV Cikupa. Penulis melakukan estimasi terhadap 2 unit transformator di Gardu Induk 150 KV Cikupa dengan menggunakan metode regresi linier ganda, penulis memprediksi pada 10 tahun yang akan mendatang untuk transformator pertama dengan kapasitas 60 MVA. Dengan hasil bahwa pada tahun 2026 kondisi pada transformator pertama tidak lagi mampu melayani beban yang tinggi sebesar 124 MVA (207%). Sementara pada transformator kedua dengan kapasitas 60MVA tidak mampu melayani beban untuk 10 tahun yang akan mendatang pada tahun 2026 dimana beban di prediksi mencapai 158,5 MVA (264%). Sehingga transformator pada Gardu Induk 150 KV Cikupa mengalami *overload* dengan beban pada 10 tahun yang akan mendatang.

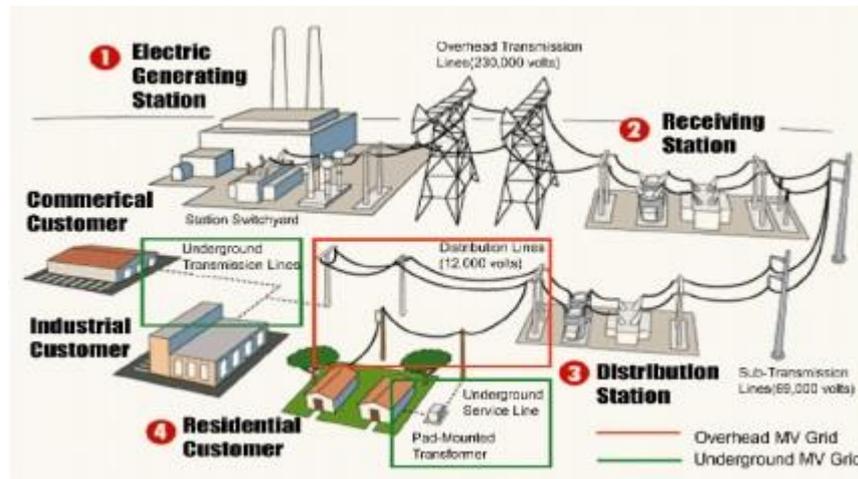
1.2 Dasar Teori

1.2.1 Proses distribusi energi listrik ke konsumen

Listri dibangkitkan dari suatu pembangkit listrik seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU), pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan masih banyak lagi jenis pembangkit baik berskala kecil maupun berskala besar. Dari pembangkit tersebut energi listrik yang telah dihasilkan kemudian dilakukan penaikan tegangan menggunakan transformator *step-up* yang ada pada pusat listrik. Dengan menaikkan tegangan sebesar 500 KV yang dilakukan oleh transformator *step up* maka energi listrik akan di transmisikan pada Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) menuju Gardu Induk Sebelum di distribusikan. kemudian tegangan ekstra tinggi 500 KV disalurkan menuju Gardu Induk maka akan diturunkan menggunakan transformator *step-down* yang semula 500 KV ke 150 KV, 500KV ke 70 KV atau sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan dalam gardu induk untuk proses penyaluran kepada pelanggan.

Setelah energi listrik yang ditransmisikan melalui jaringan SUTET menuju gardu induk maka selanjutnya energi listrik tersebut akan di salurkan melalui Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) yang kemudian tegangan diturunkan untuk kedua kalinya menggunakan transformator *step-down* yang semula tegangan 150 KV menjadi 20 KV. Selanjutnya tegangan dari SUTT tersebut digolongkan kedalam tegangan distribusi primer. Untuk tegangan distribusi primer yang digunakan PLN adalah 20KV, 12 KV, dan 6 KV. Kecenderungan saat ini menunjukkan bahwa tegangan distribusi primer PLN yang berkembang adakah 20 KV. Jaringan distribusi tegangan primer disebut juga saluran tegangan menengah (STM). Sedangkan tegangan 220/380 V digolongkan tegangan distribusi sekunder atau saluran tegangan Rendah (STR).

Kemudian tegangan primer 20 KV akan didistribusikan ke industri-industri maupun pelanggan (konsumen) yang membutuhkan daya energi listrik sebesar 20 KV, sedangkan tegangan 220/380 V melaluai saluran tegangan rendah (STR) akan disalurkan ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) PLN melalui sambungan rumah.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik
(sumber: Syahputra, 2016)

Sistem tenaga listrik secara keseluruhan merupakan suatu rangkaian terpadu yang terdiri dari 3 komponen yaitu:

1. Pusat listrik atau pembangkit tenaga listrik seperti PLTA, PLTP, PLTG, PLTU, PLTGU, dan sumber pembangkit lainnya yang

berfungsi untuk menyediakan tenaga listrik kemudian disalurkan melalui saluran transmisi terlebih dahulu dinaikkan tegangannya.

2. Saluran transmisi, berfungsi menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban atau gardu induk.
3. Jaringan distribusi, yang berfungsi mendistribusikan daya listrik dari gardu induk ketiap-tiap beban untuk kebutuhan pelanggan.

Jaringan distribusi dibagi menjadi beberapa bagian yang mempunyai komponen utama sistem distribusi, yaitu:

1. Jaringan Distribusi Primer Jaringan distribusi primer menyalurkan daya dari sisi sekunder transformator gardu induk ke sisi primer transformator distribusi. Jaringan distribusi primer umumnya memiliki tegangan 20 KV.
2. Jaringan Distribusi Sekunder atau jaringan tegangan rendah berfungsi menyalurkan daya dari gardu distribusi sampai kepada pelanggan energi listrik. Jaringan distribusi sekunder pada umumnya mempunyai tegangan 220 Volt, secara umum sistem distribusi tenaga listrik dari pembangkit sampai ke beban tegangan rendah.

1.2.2 Gardu Induk

Pada umumnya gardu induk terdiri dari saluran masuk dan dilengkapi dengan transformator daya, peralatan ukur, peralatan penghubung, peralatan proteksi dan lainnya yang saling terhubung. Untuk menunjang sistem tenaga listrik pada gardu induk yang disusun sedemikian rupa sesuai dengan pola tertentu dengan pertimbangan teknis, ekonomis, serta keindahan. Di dalam dasar sistem tenaga gardu induk merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berupa sejumlah peralatan pemutus atau penghubung aliran arus dan trafo penaik maupun penurun tegangan yang dipasang di antara dua komponen sistem tenaga listrik lainnya (slamet 2014). Gardu Induk sendiri memiliki beberapa fungsi sebagai berikut:

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

Gardu induk biasanya dibangun berdasarkan kondisi dari tempat, dan faktor ekonomi. Di dalam teknik tenaga listrik mengenai gardu induk (Arismunandar 2004) menunjukkan beberapa faktor yang harus diperhatikan dalam pemilihan jenis gardu induk pada tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2. 1 Perbandingan Berbagai Jenis Gardu Induk

Item	Jenis		
	Pasang Luar	Pasang Dalam	Pasang Bawah-Tanah
saluran transmisi yang keluar	atas-tanah	terutama bawah-tanah	hanya bawah-tanah
keselarasan dengan lingkungan	cocok untuk jalur hijau dan daerah industri	cocok untuk daerah perumahan dan daerah industri	cocok untuk jalan-jalan yang ramai dan banyak gedung tinggi
pengecahan terhadap gangguan suara	agak sukar	Mudah	Mudah
pengecahan terhadap kebakaran	Mudah	Mudah	sukar, dan perlu hati-hati
pengecahan terhadap banjir	sukar didaerah yang rendah	Mudah	sukar, dan perlu hati-hati
pengecahan terhadap salju	sukar, perlu hati-hati	tidak perlu	tidak perlu
pengecahan terhadap debu dan pengotoran garam	sukar, perlu hati-hati	tidak perlu	tidak perlu
daerah yang diperlukan	Besar	Sedang	Kecil

mudah atau sukar dibangun	Mudah	agak sukar	agak sukar
waktu pembangunan	Singkat	agak lama	Lama
harga tanah	cocok bila harga tanah murah	cocok bila harga tanah mahal	cocok bila harga tanah mahal sekali
operasi dan pemeliharaan	Murah	agak sukar	agak sukar

(sumber: Arismunandar 2004: 2)

1.2.3 Klasifikasi Gardu Induk

Didalam sistem tenaga listrik gardu induk berperan sangat penting di dalam mendistribusikan suatu tegangan atau daya listrik ke pelanggan (konsumen). Gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam dari segi fungsi, segi pemasangan, maupun dari segi lainnya. Berikut adalah jenis-jenis dari Gardu Induk berdasarkan klasifikasi:

1.2.3.1 Menurut Penempatan Peralatan

Berdasarkan pemasangan peralatan gardu induk secara umum dapat dibedakan menjadi empat macam. Namun didalam dasar sistem tenaga gardu induk diklasifikasikan menjadi 5 jenis (Slamet 2014).

Adapun jenis penempatannya sebagai berikut:

1. Gardu Induk Pasang Luar

Jenis gardu induk pasang luar ini terdiri dari peralatan tegangan tinggi pasang luar. Pasang luar yang dimaksud adalah pemasangan diluar gedung atau *outdoor substation* sehingga terpengaruh langsung terhadap kondisi lingkungan sekitar. Walaupun ada beberapa peralatan lain berada didalam gedung , seperti peralatan panel kontrol, meja penghubung (*switch board*) dan batrai maupun yang lainnya. Untuk lebih jelasnya lihat gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2. 2 Gardu Induk Pasang Luar
Sumber: Gardu Induk 150 KV Wates

Gardu induk pasang luar mempunyai kelebihan dan kekurangan. Dimana salah satu kelebihannya biaya pembangunan atau konstruksi lebih murah serta perawatan yang mudah dibanding dengan konstruksi pasang lainnya. Untuk kekurangannya sendiri gardu induk pasang luar memerlukan lahan yang cukup luas dalam pembangunannya.

2. Gardu Induk Pasang dalam

Gardu induk pasang dalam merupakan gardu induk yang sebagian besar peralatannya berada didalam suatu bangunan (*indoor substation*). Dari mulai komponen utama seperti trafomator, rangkaian *switch gear* dan panel kontrol serta komponen pendukung lainnya di dalam sistem gardu induk tersebut. Untuk lebih detail mengenai gardu induk pasang dalam atau *indoor substation* dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2. 3 Gardu Induk Pasang Dalam
(sumber: <http://gisbandara.blogspot.co.id/2014/08/>)

Gardu Induk semacam ini biasa disebut Gas Insulated Substation (GIS). GIS merupakan bentuk pengembangan gardu induk, yang pada umumnya dibangun di daerah perkotaan atau padat pemukiman yang sulit untuk mendapatkan lahan. Beberapa keunggulan GIS dibanding GI konvensional :

- a. Hanya membutuhkan lahan seluas $\pm 3.000 \text{ M}^2$ atau $\pm 6 \%$ dari luas lahan GI konvensional.
- b. Jumlah penyulang keluaran (output feeder) sebanyak 24 penyulang (feeder) dengan tegangan kerja masing-masing 20 KV.
- c. Bisa dipasang di tengah kota yang padat pemukiman.
- d. Keunggulan dari segi estetika dan arsitektural, karena bangunan bisa didesain sesuai kondisi sekitarnya

Namun selain memiliki keunggulan di atas gardu induk jenis pasang dalam juga memiliki kekurangan di antaranya sebagai berikut:

- a. Biaya pembangunannya lebih mahal karena memerlukan bangunan gedung yang dapat meliputi semua peralatan gardu induk.
- b. Harga konduktor yang relatif mahal karena memerlukan konduktor yang berisolasi
- c. Gardu Induk ini memiliki kapasitas yang relatif kecil dibanding lainnya.

3. Gardu Induk Setengah pasang Luar

Sebagian peralatan tegangan tingginya terpasang di dalam gedung dan yang lainnya dipasang diluar dengan mempertimbangkan situasi dan kondisi lingkungan. Karena konstruksi yang berimbang antara pasangan dalam dengan pasangan luar inilah tipe gardu induk ini disebut juga gardu induk semi pasangan dalam. Untuk lebih jelasnya lihat gambar 2.4 dibawah ini.

GI Setengah Pasangan Luar



Gambar 2. 4 Gardu induk pasang setengah luar
(Sumber: <http://slideplayer.info/slide/5253652/>)

4. Gardu Induk Pasang Bawah tanah

Gardu Induk jenis ini umumnya berada di pusat kota. Hampir semua peralatan terpasng dalam bangunan bawah tanah, dan peralatan-peralatan yang tidak mungkin ditempatkan

dibangun bawah tanah hanya peralatan pendinginan. Gardu induk pasang bawah tanah umumnya dibagian kota yang sangat ramai, dijalan-jalan perkotaaan dan jalan-jalan dengan gedung bertingkat tinggi. Kebanyakan gardu induk jenis pemasangan bawah tanah dibangun di bawah jalan raya.

5. Gardu Induk Mobil

Gardu induk jenis ini secara garis besar lebih praktis dari pada jenis gardu induk lainnya dimana gardu induk jenis ini hanya dipakai untuk kepentingan khusus. Namun dalam teknik tenaga listrik mengungkapkan bahwa gardu induk mobil ini di perlengkapi dengan peralatan di atas kreta hela (trailer) atau semacam truck (Arismunandar 2004). Untuk penyediaan tenaga listrik gardu nduk ini tidak dapat dipakai secara luas, melainkan sebagai transformator yang mudah di pindah-pindah di atas truck untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dalam keadaan darurat. misalnya dalam acara-acara tertentu atau untuk kepentingan mengganti sementara gardu induk yang masih dalam perbaikan. Seperti yang terlihat pada gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2. 5 Gardu induk mobil
(sumber: <http://www.heksaaditama.com/gallery>)

1.2.3.2 Menurut Tegangan

Berdasarkan tegangan gardu induk dapat di bedakan menjadi 2 macam yaitu:

1. Gardu Induk Transmisi

Merupakan gardu induk yang mendapat daya dari saluran transmisi untuk kemudian menyalurkannya ke daerah beban (industri, kota, dan sebagainya). Gardu induk yang ada di PLN umumnya memiliki tegangan tinggi 150 KV dan 70 KV akan tetapi tegangan yang sering digunakan dalam gardu induk tegangan 150 KV.

2. Gardu Induk Distribusi

Merupakan gardu induk yang menerima daya listrik dari gardu induk transmisi 150 KV maupun 70 KV. Daya listrik yang diterima dari gardu induk tegangan tinggi akan di *step-down* menggunakan transformator menjadi tegangan menengah (20 KV, 12 KV, atau 6 KV). Dari tegangan menengah tersebut kemudian diturunkan kembali menggunakan transformator *step-down* menjadi tegangan rendah 127/220 V, atau 220/380 V sesuai dengan kebutuhan pelanggan (konsumen) dalam sistem tenaga listrik.

1.2.3.3 Menurut Fungsinya

Gardu induk merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berperan sangat penting dalam pendistribusian suatu daya listrik kepada konsumen. Berdasarkan fungsinya gardu induk dapat dibedakan menjadi 5 macam diantaranya sebagai berikut:

1. Gardu Induk Penaik Tegangan

Merupakan gardu induk yang berfungsi sebagai penaik tegangan, yaitu tegangan pembangkit (generator) menjadi tegangan sistem tenaga listrik. Jenis gardu induk ini biasanya terdapat di lokasi pembangkit tenaga listrik. Gardu induk ini digunakan karena tegangan output yang dihasilkan pembangkit listrik kecil dan harus disalurkan pada jarak yang jauh, maka dengan pertimbangan efisiensi, tegangannya dinaikkan menjadi

tegangan ekstra tinggi atau tegangan tinggi pada sistem tenaga listrik.

2. Gardu Induk Penurun Tegangan

Merupakan gardu induk yang berfungsi sebagai penurun tegangan dari tegangan ekstra tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah maupun menengah setara dengan tegangan distribusi. Gardu induk jenis ini terletak pada area pusat-pusat beban yang digunakan pelanggan (beban) atau dengan kata lain gardu induk inilah yang mendistribusikan daya listrik ke pelanggan.

3. Gardu Induk Pengatur Tegangan

Gardu induk jenis ini biasanya terletak jauh dari pusat pembangkit tenaga listrik, karena tegangan yang disalurkan cukup jauh maka kemungkinan drop tegangan terjadi pada jaringan transmisi. Oleh karena itu diperlukan suatu peralatan yang digunakan untuk mengurangi terjadinya drop tegangan, seperti capacitor bank, sehingga tegangan kembali dalam keadaan normal atau sesuai dengan yang diinginkan oleh sistem tenaga listrik.

4. Gardu Induk Pengatur Beban

Pada sistem gardu induk ini berfungsi sebagai pengatur beban. Dimana pada gardu induk ini terpasang sebuah beban motor yang dapat berfungsi sebagai generator pembangkit tegangan listrik serta dapat menjadi beban pada keadaan tertentu.

5. Gardu Induk Distribusi

Gardu induk distribusi berfungsi sebagai penyaluran daya listrik dari jaringan transmisi sistem tenaga listrik ke jaringan distribusi pelanggan (konsumen). Gardu induk ini terletak pada pusat-pusat beban.

1.2.3.4 Fasilitas dan peralatan gardu induk

Gardu induk memiliki suatu sistem agar dapat mendistribusikan energi listrik kepada pelanggan, agar sistem berjalan sesuai dengan fungsi dan tujuannya maka gardu induk dilengkapi dengan peralatan serta fasilitas. Secara umum gardu induk mempunyai peralatan utama maupun pendukung agar dapat menjalankan sistem tersebut. Adapun peralatan-peralatan gardu induk tersebut adalah sebagai berikut:

1. Transformator Daya

Transformator berfungsi sebagai menaikkan atau menurunkan tegangan yang di pasang di antara dua sistem yang mempunyai level tegangan yang berbeda. Ada dua jenis transformator 1-fase dan 3-fase. Namun di dalam sistem gardu induk lebih banyak menggunakan transformator 3-fase dikarenakan lebih menguntungkan, awet dan pemeliharaan yang sangat mudah. Pada umumnya transformator 3-fasa terdiri dari tiga buah transformator 1-fasa dengan tiga buah inti besi yang dipasang pada satu kerangka. Dari tiga inti besi ini ditempatkan masing-masing sepasang kumparan yakni kumparan primer dan kumparan sekunder. Sehingga di dapatlah tiga kumparan primer dan tiga kumparan sekunder. Dari ketiga kumparan primer maupun ketiga kumparan sekunder dapat dihubungkan secara hubungan bintang (star connection) Y, dihubungkan segitiga (delta connection) Δ , dan dihubungkan Zig-zag (Z). Merujuk pada SPLN untuk transformator 3-fase ada tiga tipe vektor grup yang di gunakan oleh PLN, yaitu $Yzn5$, $Dyn5$, dan $Ynyn0$. Titik netral langsung dihubungkan dengan tanah. Untuk lebih jelas tentang vektor group yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2. 2 Vektor Group Dan Daya Transformator

No	Vektor Group	Daya (KVA)	Keterangan
1	Yzn5	50,100,160	Untuk sistem 3 kawat
2	Dyn5	200, 250, 315, 400, 500, 630	Untuk sistem 3 kawat
3	Ynyn0	50, 100, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630	Untuk sistem 4 kawat

(sumber: PLN buku 4 2010: 7)

Dari data vektor grup yang tertera di atas maka dapat diidentifikasi sebagai berikut:

- Abjad pertama adalah bentuk hubungan lilitan tiga fasa pada sisi HV, **Y** untuk bintang, **D** untuk Delta dan **Z** untuk zigzag.
- Abjad kedua adalah bentuk hubungan belitan tiga fasa pada sisi LV, **y** untuk bintang, **d** untuk Delta dan **z** untuk Zigzag.
- Bila ada huruf "**n**" setelah huruf **Y**, menandakan titik netral pada hubungan **Y** tersebut ditanahkan.

Angka yang terdapat diakhir menandakan jam trafo. Yang berarti, sebuah lingkaran jam memiliki sudut 360° dengan urutan angka dari 1 sampai 12, maka untuk angka 1 besar sudutnya adalah 30° , untuk angka 5 adalah 150° dan seterusnya. Namun selain angka 1 sampai 12 terdapat Angka 0, berarti tidak ada beda fasa antara sisi LV-HV Jadi, setiap 1 jam ada sudut 30° . Sehingga bila pada nameplate tertera angka tertentu, misalnya **Yzn5** maka dapat dibaca belitan tiga fasa pada sisi HV (*High voltage*) dihubungkan secara bintang (**Y**), dan belitan

tiga fasa pada sisi LV (*Low voltage*) di hubungkan secara zigzag (**z**) dengan titik netralnya (**n**) dibumikan dan pergeseran antar fasa HV dan LV sebesar 150° ($5 \times 30^\circ$). Untuk konstruksi, peralatan transformator distribusi sepenuhnya merujuk pada SPLN D3.002-1: 2007. Untuk gardu induk pasang luar transformator dilengkapi dengan *bushing* tegangan menengah isolator kramik. Sedangkan gardu induk pasang dalam dilengkapi dengan *bushing* tegangan menengah isolator kramik atau menggunakan isolator *plug-in premoulded* (PLN buku 2010). Untuk lebih jelasnya bentuk dari transformator daya seperti pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2. 6 Transformator Daya

(sumber: <https://berdiklat.com/tag/pelatihan-transformator-daya-operasi-dan-pemeliharaan-terbaru/>)

Seperti yang terlihat pada gambar 2.6 di atas Peralatan transformator daya dalam sistem tenaga listrik yang terletak di gardu induk memiliki berbagai fungsi di antaranya sebagai berikut:

- a) Mentransformasikan daya listrik, dengan merubah besaran tegangan, sedangkan frekuensinya tetap
- b) Pengatur tegangan

c) Trafo daya dilengkapi dengan trafo pentanahan yang berfungsi untuk mendapatkan titik netral dari trafo daya atau disebut dengan *neutral current transformer (NCT)*.

2. *Neutral grounding resistance (NGR)*

Neutral grounding resistance adalah komponen yang terpasang antara titik netral traformator dengan pertanahan. *NGR* berfungsi untuk memperkecil arus gangguan yang terjadi. Gambar 2.7 dibawah ini adalah bentuk dari *NGR*.



Gambar 2. 7 *Neutral grounding resistance (NGR)*

Sumber: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/JTE/article/download/ID25791/20911/>

3. *Lightning arrester (LA)*

Lightning arrester berfungsi sebagai pengaman instalasi (peralatan listrik pada instalasi) dari gangguan tegangan berlebih yang diakibatkan oleh sambaran petir (*lightning surge*) maupun surya hubung (*switching surge*) pada kawat transmisi. Dalam keadaan normal (tidak ada gangguan) *LA* bersifat isolatif atau tidak bisa menghantarkan arus listrik namun saat terjadi gangguan *LA* berubah menjadi bersifat koonduktif sebagai penyalur arus ke *grounding* (pertanahan). Bentuk la sendiri dapat dilihat pada gambar 2.8 dibawah ini.

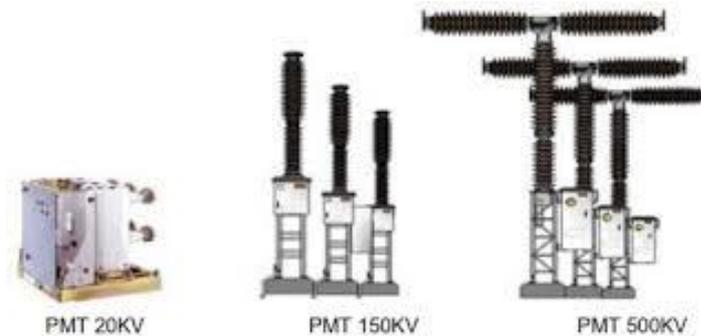


Gambar 2. 8 *Lightning Arester (LA)*

Sumber: <http://www.kwj.co.id/en/2015/01/polymer-lightning-arrester/>

4. Pemutus tegangan (PMT)

Pemutus tegangan berfungsi sebagai pemutus hubungan tenaga listrik dalam keadaan gangguan maupun dalam keadaan berbeban yang berlebih dan proses ini harus dilakukan dengan cepat (Amin 2014). Dalam keadaan gangguan pemutus tegangan listrik (PMT) akan menimbulkan arus yang relatif besar, pada keadaan tersebut PMT bekerja sangat berat. Apabila PMT dalam kondisi menurun karena kurangnya pemeliharaan yang tidak sesuai dengan kemampuan dengan daya yang diputuskannya, maka PMT tersebut akan mengalami kerusakan bahkan dapat menimbulkan ledakan. PMT bekerja secara otomatis ketika terjadi gangguan sedangkan dalam keadaan perbaikan PMT bekerja secara manual. PMT dilengkapi dengan pemadam busur api dikarenakan PMT beroperasi untuk memutus arus beban yang dapat menimbulkan busur api. Untuk lebih jelasnya bentuk dari PMT dapat dilihat pada gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2. 9 Pemutus Tegangan (PMT)

Sumber: buku pedoman pemeliharaan pemutus tegangan, 2014

5. Pemisah Tegangan (PMS) atau *Disconnecting Switch* (DS)

Dalam sistem tenaga listrik pemilihan pemisah (*Disconnect switch*) dilakukan berdasarkan lokasi, tata bangunan luar (*outdoor structure*) dan sebagainya. Pada umumnya dalam gardu induk *Disconnecting Switch* (DS) kebanyakan terpasang pada *Transformer Bay* (TR Bay), *Transmission Line Bay* (TL Bay), Busbar, dan *Bus Couple*. Meskipun dapat memutuskan arus yang kecil, seperti arus pembangkit transformator. PMS bekerja secara manual karena PMS hanya sebagai pemisah dan penghubung rangkaian dalam sistem gardu induk. Dalam hal pemutus beban (pembukaan) yang dioperasikan terlebih dahulu PMT kemudian PMS sedangkan dalam pengoprasian (penutupan) PMS dioperasikan terlebih dahulu kemudian PMT.

Hal ini berkaitan dengan karakteristik dari peralatan PMS, dimana PMS beroperasi dalam keadaan tidak berbeban sedangkan PMT beroperasi saat berbeban. sehingga PMS tidak didesain untuk memutus arus beban sedangkan PMT didesain mampu untuk memutus arus beban dan gangguan hubung singkat yang terjadi. Karena hal tersebutlah PMS tidak dilengkapi dengan pemadam busur api karena hanya sebagai pemisah, sedangkan PMT dilengkapi dengan pemadam busur api dikarenakan PMT beroperasi untuk

memutus arus beban yang dapat menimbulkan busur api. Dari hal tersebutlah yang harus dioperasikan terlebih dahulu PMT kemudian PMS dalam pemutusan arus beban. Agar tidak terjadi kesalahan dalam urutan operasi antara PMS dan PMT maka harus ada keadaan saling mengunci (*interlock*) dalam sistem tersebut. Seperti pada gambar 2.10 dibawah ini.



Gambar 2. 10 Saklar Pemisah Tegangan (PMS)
Sumber: http://www.elektro.undip.ac.id/el_kpta/wp-content/uploads/2012/05/L2F606049_MKP.pdf

Sesuai dengan kegunaan dan fungsinya PMS dibagi menjadi 2 macam menurut (Amin 2014) sebagai berikut:

- 1) Pemisah tanah, berfungsi untuk mengamankan peralatan dari sisi tegangan yang timbul sesudah Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) diputuskan, atau induksi tegangan dari penghantar, hal ini perlu untuk pengamanan dari orang yang bekerja pada instalasi.
- 2) Pemisah peralatan, berfungsi untuk mengisolasi peralatan listrik dari peralatan yang bertegangan. Pemisah ini dioperasikan tanpa beban.

6. *Current Transformer (CT)*

Transformator arus berfungsi untuk menurunkan arus besaran pada tegangan tinggi menjadi arus kecil pada tegangan rendah untuk keperluan pengukuran dan pengamanan

(proteksi). Atau memperkecil besaran arus listrik pada sistem tenaga listrik, menjadi arus untuk sistem pengukuran dan proteksi. Untuk lebih detail bentuk dari CT dapat dilihat pada gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2. 11 *Current Transformer (CT)*
Sumber: buku pedoman trafomator arus, 2014

7. *Potential Transformer (PT)*

Transformator Tegangan berfungsi untuk merubah besaran tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau memperkecil besaran tegangan listrik pada sistem tenaga listrik, menjadi besaran tegangan untuk pengukuran dan pengamanan (proteksi). Sedangkan menurut (Amin 2014) transformator tegangan berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi ke tegangan rendah, yang di perlukan untuk alat-alat ukur (pengukuran) dan alat pengaman (proteksi). Bentuk dari PT dapat dilihat pada gambar 2.12 dibawah ini.



Gambar 2. 12 *Potential Transformer (PT)*
Sumber: PT.PLN(persero) Gardu Induk Bukit Siguntang Palembang

8. *Circuit Breaker* (CB)

Circuit Breaker adalah peralatan pemutus apabila terjadinya trip atau gangguan dalam sistem tenaga listrik, yang berfungsi sebagai pemutus rangkaian listrik dalam keadaan berbeban (berarus). CB dapat dioperasikan pada saat jaringan dalam kondisi normal maupun dalam pada saat terjadi gangguan. Pada saat CB bekerja dalam memutuskan rangkaian dari sistem tenaga listrik, CB mengeluarkan busur api. Sehingga dalam peralatan CB dilengkapi dengan pemadam busur api atau sebagai isolasi sebagai pada gambar 2.13 dibawah:

- a) Minyak (OCB)
- b) Udara (ACB)
- c) Gas (GCB)



a. Minyak (OCB) b. Udara (ACB) c. Gas (GCB)

Gambar 2.13 *Circuit Breaker* (CB)

Sumber: <http://www.dfliq.net/electrical-materials-products/circuit-breakers/>

Pada gambar di atas merupakan bentuk dari CB. Dengan adanya isolasi tersebut diharapkan dapat mengurangi timbulnya busur api pada saat (CB) bekerja dalam pengamanan peralatan sistem tenaga listrik.

9. Transformator Pemakaian Sendiri (TPS)

Transformator Pemakaian Sendiri dalam gardu induk memiliki jalur penyulang (*Feeder*) khusus untuk TPS itu

sendiri. TPS berbeda dengan transformator distribusi. Perbedaan tersebut terletak pada tegangan primer dan sekundernya untuk transformator distribusi untuk tegangan sisi primernya 150 KV menjadi tegangan menengah pada sisi sekundernya 20 KV. Selain transformator distribusi dengan tegangan 150/20 KV terdapat juga tegangan 70/20 KV. Sedangkan TPS yaitu dari tegangan menengah sisi primer 20 KV menjadi tegangan rendah sisi sekunder 220/380 V. Seperti yang terlihat pada gambar 2.14 dibawah ini bentuk dari TPS pada gardu induk.



Gambar 2. 14 Transformator Pemakaian Sendiri (TPS)
Sumber: Krisno Murti P, 2017

Dari tegangan tersebut digunakan dalam pengoperasian peralatan untuk kebutuhan internal gardu induk, diantaranya sebagai berikut ini:

- 1) Penerangan di *Switch yard*, gedung kontrol, halaman Gardu Induk, dan area Gardu Induk lainnya
- 2) Alat pendingin ruangan *Air Conditioning* (AC)
- 3) *Recifier*
- 4) Pompa air dan motor-motor listrik
- 5) Dan peralatan lain sebagai pendukung pengoperasian Gardu Induk Yang membutuhkan tegangan rendah 220/380 Volt.

Transformator Pemakaian Sendiri sebagai peralatan pendukung untuk pengorasian dan kenyamanan dalam instansi Gardu Induk.

10. Panel Kontrol

Dalam pengoprasiannya pada sistem tenaga listrik khususnya pada Gardu Induk dibutuhkan suatu panel kontrol. Seperti yang terlihat pada gambar 2.15 dibawah ini.



Gambar 2. 15 Panel Kontrol

Adapun Jenis-jenis panel kontrol yang ada dalam suatu Gardu Induk sebagai berikut:

- a) Panel kontrol utama terdiri dari panel instrumen dan panel operasi. Pada panel instrumen terpasang alat-alat ukur dan indikator gangguan dari panel ini alat-alat tersebut dapat diawasi dalam keadaan beroperasi. Pada panel operasi terpasang saklar operasi dari pemutus tenaga, pemisah serta lampu indikator posisi saklar dan diagram rail. Diagram rail, saklar dan lampu indikator diatur letak dan hubungannya sesuai dengan rangkaian yang sesungguhnya sehingga keadaannya dapat dilihat dengan mudah. Panel utama ini merupakan panel pusat di Gardu Induk. Panel utama ini juga berfungsi untuk pengukuran transformator (*Instrument*) mengubah menjadi tegangan dan arus rendah, sekaligus memisahkan alat-alat dari sisi

tegangan tinggi. Adapun jenis transformator ukur yaitu transformator tegangan, transformator arus, transformator, serta transformator tegangan dan arus.

- b) Pada panel relay terpasang relay pengaman untuk SUTT, relay pengaman untuk trafo dan sebagainya. Bekerjanya relay dapat diketahui dari penunjukan pada relay itu sendiri dan pada indikator gangguan dipanel kontrol utama. Pada Gardu Induk ada yang memanfaatkan sisi depan dari panel dipakai sebagai panel utama dengan instrumen dan sakelar, kemudian sisi belakangnya dipakai sebagai panel relay, dan ada pula pada Gardu Induk jika rangkaianannya sudah rumit, maka panel relay terpasang dalam panel tersendiri.

11. Baterai

Sistem tenaga listrik disamping tegangan bolak-balik *Alternating Current* (AC) terdapat juga tegangan searah *Direct current* (DC). Tegangan searah (DC) ini biasanya didapat dari baterai yang digunakan untuk peralatan pada Gardu Induk menurut (Marsudi 2011: 31) sebagai berikut:

- 1) Menjalankan motor pengisian (penegan) pegas PMT
- 2) Men-*Trip* PMT apabila terjadi gangguan
- 3) Melayani alat-alat telekomunikasi
- 4) Memasok instalasi penerangan darurat

Adapun bentuk dari batrai yang digunakan dalam gardu induk seperti pada gambar 2.16 dibawah ini.



Gambar 2. 16 Batrai

Sumber: PT.PLN(persero) Gardu Induk Bukit Siguntang Palembang
Batrai ini harus diisi melalui penyearah (*Rectifier*) untuk kutup negatif dari batrai sebaiknya di tanamkan untuk memudahkan dalam deteksi gangguan hubung tanah pada instalasi arus searah.

12. Gedung Gardu Induk

Gedung gardu induk berbeda-beda tergantung pada skala dan jenis gardu induk yang dipakai. Pada jenis Gardu Induk pemasangan luar didalam ruangan hanya terdapat panel kontrol dan panel hubung serta peralatan instansi kantor sehingga ruangan yang dipakai kecil.



Gambar 2. 17 Gedung

Berbeda halnya dengan gardu induk pemasangan dalam yang membutuhkan ruangan lebih besar untuk peralatan yang digunakan serta peralatan instansi perkantoran yang mendukung dalam pengoprasiannya gardu induk.

1.2.4 Sistem Proteksi Gardu Induk

Dalam penyaluran daya listrik ke konsumen suatu gardu induk dilengkapi dengan peralatan proteksi agar terciptanya sistem yang andal dalam penyaluran daya listrik serta sebagai pengaman peralatan yang digunakan dalam penyaluran daya listrik. Oleh karena itu sistem proteksi sangat diperlukan dalam gardu induk. Sistem proteksi adalah suatu sistem pengaman terhadap peralatan listrik, yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi dan penyebab yang lainnya. Ada beberapa peralatan yang harus diamankan (proteksi) pada gardu induk sebagai berikut:

1.2.4.1 Proteksi Transformator Daya

Seperti yang diketahui bahwa transformator daya merupakan komponen yang sangat penting dalam gardu induk. Transformator daya berperan penting dalam penyaluran daya listrik ke konsumen. Sehingga transformator perlu adanya pengamanan agar tetap bekerja secara optimal. Adapun beberapa peralatan proteksi (pengaman) transformator daya sebagai berikut:

a) Relay Arus Lebih atau *Over Current Relay (OCR)*

Relay arus lebih berfungsi mengamankan trafo dari gangguan hubung singkat (short circuit) antara fasa didalam maupun diluar daerah pengamanan trafo. Relay arus lebih bekerja dengan membaca input berupa besaran arus kemudian membandingkan dengan nilai setting, apabila nilai arus yang terbaca oleh relay melebihi nilai setting, maka relay akan mengirim perintah trip (lepas) kepada Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker (CB) setelah tunda waktu yang diterapkan pada setting

b) Relay Differensial

Relay differensial berfungsi mengamankan trafo dari gangguan hubung singkat (short circuit) yang terjadi didalam

daerah pengaman trafo. Relay differential bekerja berdasarkan perbandingan arus masukan dan arus keluaran atau sesuai dengan *hukum kirchoff* dimana arus yang masuk pada suatu titik, sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut. Jika terjadi perbedaan maka relay akan mendeteksi adanya gangguan pada peralatan yang diamankan. Relay ini efektif untuk mengamankan gangguan yang bersifat internal atau hanya daerah transformator.

c) Relay Gangguan Tanah terbatas

Relay gangguan tanah terbatas atau *Restricted earth fault (ref)* berfungsi mengamankan Transformator Daya dari gangguan hubung tanah, di dalam dan di luar daerah pengaman trafo didekat titik netral transformator yang tidak dirasakan oleh rele diferensial.

d) Relay Tangki Tanah

Berfungsi untuk mengamankan Transformator Daya terhadap hubung singkat (*short circuit*) antara fasa dengan tangki trafo dan trafo yang titik netralnya ditanahkan. Perinsip kerja relay tanah yang terpasang, mendeteksi arus gangguan dari tangki trafo ke tanah, apabila terjadi kebocoran isolasi dari belitan trafo ke tangki, arus yang mengalir ke tanah akan dideteksi relay arus lebih melalui CT. Relay akan mentriapkan PMT di kedua sisi (TT dan TM). Jadi arus gangguan kembali kesistem melalui pembumian trafo.

e) Relay Suhu

Berfungsi untuk mendeteksi suhu minyak trafo dan kumparan secara langsung, yang akan membunyikan alarm serta mentriapkan CB. Relay HV/LV *Winding Temperature* bekerja apabila suhu kumparan trafo melebihi batas yang telah ditentukan dari relay HV/LV *Winding*, besarnya kenaikan suhu adalah sebanding dengan faktor pembebanan dan suhu udara

luar trafo. Relay HV/LV *Oil temperature* bekerja apabila suhu minyak trafo melebihi setting dari pada relay HV/LV *oil*. Besarnya kenaikan suhu adalah sebanding dengan faktor pembebanan dan suhu udara luar trafo. Urutan kerja relay suhu kumparan maupun suhu oil sama yaitu mengoprasikan alarm (*winding temperature alarm*) terlebih dahulu kemudian memberi perintah trip ke CB (*winding temperature trip*).

f) Relay Jansen

Relay Jansen Berfungsi untuk mengamankan pengubah atau pengatur tegangan (*Tap Changer*) dari Trafo. Prinsip kerja relay jansen, sebagai berikut:

- a. Rele buchholz *tap change* (jansen) untuk mengamankan ruangan beserta isinya dari diverter switch.
- b. Rele jansen akan bekerja apabila ada desakan tekanan yang terjadi akibat flash over antar bagian bertegangan atau bagian bertegangan dengan body atau ada desakan aliran minyak karena gangguan eksternal.
- c. Prinsipnya ada aliran minyak yang deras, ada tekanan minyak sehingga ada minyak mengalir ke konservator, goncangan minyak yang cukup besar, dan semua itu menyebabkan katup akan berayun dan megerjakan kontak tripping, akhirnya melepas gangguan.

g) Relay Bucholz

Relay Bucholz Berfungsi mendeteksi adanya gas yang ditimbulkan oleh loncatan bunga api dan pemanasan setempat dalam minyak trafo. Konstruksi relay dilengkapi dengan dua buah pelampung (*floating-rest*) yaitu pelampung atas dan bawah, yang terbuat dari besi cor yang diambangkan di permukaan minyak dengan posisi ketinggian yang berbeda, masing-masing dari pelampung mempunyai kontak bantu (*auxiliary contact*). Pelampung ini dapat berputar di sekitar

sumbukan masing-masing pelampung terdapat kontak merkuri yang melekat agar kontak dapat berputar dengan sudut tertentu.

Prinsip kerja dari relay bucholz ketika terjadi gangguan secara bertahap pelampung atas akan bertindak. Dalam kasus ini, jika gas yang dihasilkan dalam tangki cukup banyak, maka gas tersebut akan menggerakkan pelampung atas sehingga kontak bantu akan bekerja “*close* atau *open*” tergantung mana yang akan dipergunakan, dan pelampung atas membuat kontak merkuri beroperasi sehingga relay berfungsi sebagai alarm (*warning-signal*).

h) Relay Tekanan Lebih

Relay tekanan lebih berfungsi mengamankan transformator daya dari tekanan udara yang berlebih. Bagi trafo tanpa konservator, dipasang relay tekanan mendadak dipasang pada tangki dan bekerja secara manual.

Prinsip kerja dari relay tekanan berlebih Ketika terjadi kenaikan tekanan udara akibat terjadinya gangguan didalam trafo, maka katup relay akan tertekan oleh pegas yang terpasang didalamnya dan akan membuka dan membuang tekanan keluar bersamaminyak

1.2.4.2 Proteksi Penghantar SUTT/ SKTT

a) Relay Jarak

Berfungsi mengamankan SUTT dari gangguan antar fasa maupun gangguan hubungan tanah. Adapun prinsip kerja dari relay jarak adalah mengukur tegangan pada titik relay dan arus gangguan yang terlihat dari relay, dengan membagi besaran tegangan dan arus, maka impedansi sampai titik terjadinya gangguan dapat ditentukan

b) Relay Arus Lebih

Relay arus lebih adalah relay yang bekerja terhadap arus yang melebihi dari batas yang telah ditentukan. Relay arus lebih merupakan pengaman yang bekerja karena adanya besaran arus. Relay arus lebih berfungsi mengamankan SUTT dan gangguan antara phasa maupun gangguan hubungan tanah.

Relay arus lebih umumnya terpasang pada jaringan tegangan tinggi, tegangan menengah dan pada transformator tenaga. Relay arus lebih adalah peralatan yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan trafo arus.

c) Relay Tegangan Lebih

Relay tegangan lebih berfungsi mengamankan SUTT atau SKTT terhadap tegangan lebih. Relay tegangan lebih bekerja berdasarkan kenaikan tegangan yang melebihi batas yang telah ditentukan. Biasanya digunakan untuk pengamanan gangguan fase ke tanah pada jaringan yang disupply dari transformator tenaga atau daya dimana titik netralnya ditanahkan.

d) Relay Gangguan Tanah atau *Ground Fault Relay* (GFR)

Relay gangguan tanah berfungsi mengamankan SUTT terhadap gangguan hubung tanah. Prinsip kerja *Ground Fault Relay* (GFR) yaitu pada kondisi normal dengan beban seimbang arus – arus fasa I_r , I_s , dan I_t (I_b) sama besar sehingga kawat netral tidak timbul arus dan relay gangguan tanah tidak dialiri arus. Namun bila terjadi ketidak seimbangan arus atau terjadi gangguan hubung singkat fasa ke tanah maka akan timbul arus urutan nol pada kawat netral. Arus urutan nol ini akan mengakibatkan *Ground Fault Relay* (GFR) bekerja. (Edil Herwan : 2009).

e) Relay Penutup Balik

Relay penutup balik adalah suatu alat yang fungsinya untuk keandalan sistem yaitu akan membuka PMT (Pemutus Tenaga) secara otomatis apabila terjadi gangguan yang bersifat temporer pada SUTT/SUTET.

Gangguan yang bersifat temporer adalah gangguan hubung tanah dan sering terjadi, maka untuk memenuhi pelayanan energi listrik secara kontinyu maka perlu adanya pemasangan penutup balik tersebut. Prinsip Kerjanya dari relay penutup balik sebagai berikut:

Kondisi normal Switch S Recloser menutup, bila terjadi gangguan temporer maka rele akan bekerja dan memberikan perintah trip PMT pada saat itu juga recloser mulai bekerja saat mendapat tegangan positif dari rele, maka elemen yang mulai bekerja terlebih dahulu sebagai berikut:

- a) Elemen *Dead Time* (DT), setelah beberapa waktu elemen DT menutup kontakannya dan memberi perintah PMT untuk masuk, bersamaan itu juga mengenergise elemen *Blocking Time* (BT).
- b) Elemen BT ini segera membuka rangkaian *closing coil* PMT sehingga PMT tidak akan bisa *reclose*.
- c) Setelah waktu elemen BT terlampaui sesuai dengan batas yang telah ditentukan maka elemen BT akan reset kembali. Selanjutnya elemen DT akan siap kembali untuk melakukan *reclos* PMT kembali bila terjadi gangguan baru lagi.

1.2.4.3 Proteksi Busbar

a) Proteksi Busbar

Dalam pengamanan busbar terhadap gangguan yang terjadi, digunakan relay differential. Relay differential selain

digunakan pada transformator juga digunakan dalam busbar dan generator, sangat selektif, cepat bekerja tidak perlu berkoordinasi dengan relay lain dan tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk seksi atau daerah berikutnya, adapun cara kerja dari relay differentil Relay differential bekerja berdasarkan perbandingan arus masukan dan arus keluaran atau sesuai dengan hukum kirchoff dimana arus yang masuk pada suatu titik, sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut. Jika terjadi perbedaan maka relay akan mendeteksi adanya gangguan pada peralatan yang diamankan

1.2.5 Peramalan

Pada dasarnya peramalan merupakan suatu perkiraan atas sesuatu kejadian yang akan datang dengan waktu yang relative lama. Sedangkan menurut Jay Heizer dan Barry Render (2011) adalah ‘seni dan ilmu untuk memprediksi kejadian di masa depan dengan melibatkan pengambilan data historis dan memproyeksikannya ke masa mendatang dengan model pendekatan sistemati’. peramalan bisa bersifat kuantitatif maupun kualitatif. Untuk memprediksi hal tersebut dibutuhkan data yang akurat dimasa lalu, sehingga dapat dilihat prospek situasi dan kondisi dimasa yang akan mendatang. Adapun kegunaan dari peramalan adalah sebagai berikut:

1. Sebagai alat bantu untuk melakukan perencanaan secara efektif dan efisien
2. Untuk menentukan kebutuhan suatu sistem maupun keddupan di masa yang akan mendatang dan seterusnya
3. Membantu dalam pengambilan keputusan yang tepat dalam berbagai aspek.

Dalam pengambilan keputusan yang baik harus didasarkan atas pertimbangan apa yang terjadi dimasa lampau agar dimasa sekarang atau selanjutnya dapat terakomondasi dengan baik. Baik tidaknya suatu hasil

peramalan dalam penelitian sangat ditentukan oleh ketetapan yang dibuat. Walaupun demikian perlu diketahui bahwasannya peramalan selalu ada unsur kesalahannya, sehingga dituntut untuk berusaha memperkecil kesalahan dalam peramalan beban ini. Ada beberapa jenis peramalan di antara sebagai berikut:

1.2.5.1 Peramalan Berdasarkan Jenis Data

Menurut Saputro dan Asri (2000) ‘jenis data ramalan yang disusun, peramalan dibagi menjadi dua jenis’ yaitu sebagai berikut:

- a) Peramalan kualitatif yaitu peramalan yang didasarkan atas kualitatif pada masa lalu. Hasil ramalan yang dibuat sangat tergantung pada orang yang menyusunnya. Hal ini penting karena peramalan tersebut ditentukan berdasarkan pemikiran yang bersifat intuisi, pendapat dan pengetahuan serta pengalaman dari penyusunnya. Biasanya peramalan secara kualitatif ini didasarkan atas hasil penyelidikan seperti pendapat salesman, pendapat sales manajer pendapat para ahli dan survey konsumen.
- b) Peramalan kuantitatif yaitu peramalan yang didasarkan atas data penjualan pada masa lalu. Hasil peramalan yang dibuat sangat tergantung pada metode yang dipergunakan dalam peramalan tersebut. Penggunaan metode yang berbeda akan diperoleh hasil yang berbeda pula. Peramalan kuantitatif dapat diterapkan bila terdapat kondisi sebagai berikut:
 - 1) Tersedia informasi (data) tentang masa lalu
 - 2) Informasi (data) tersebut dapat dikuatitatifkan dalam bentuk data numerik
 - 3) Dapat diasumsikan bahwa beberapa aspek pola masa lalu akan terus berlanjut pada masa yang akan mendatang.

1.2.5.2 Peramalan Berdasarkan Horizon Waktu

Berdasarkan horizon waktu penulis meyakini bahwa beban sistem tenaga listrik merupakan pemakainya energi listrik oleh konsumen. Sehingga besar kecilnya suatu beban dan perubahannya tergantung pada kebutuhan pelanggan energi listrik yang dipakai. Maka perkiraan beban merupakan masalah yang sangat menentukan bagi perusahaan listrik baik dari segi material maupun operasional. Untuk dapat membuat perkiraan atau peramalan yang baik perlu adanya data beban sistem tenaga listrik dimasa lalu untuk di analisis. sehingga peramalan dapat dikelompokkan dalam tiga bagian berdasarkan horizon waktu, yaitu:

1. Peramalan jangka panjang, yaitu yang mencakup waktu lebih besar dari 18 bulan. Dalam peramalan beban jangka panjang masalah-masalah makro ekonomi yang merupakan masalah eksternal perusahaan listrik merupakan faktor utama dalam menentukan arah perkiraan beban. Metode ini yang digunakan dalam estimasi gardu induk transformator 150 KV Wates dengan memperkirakan selama 10 tahun ke depan. Faktor makro tersebut merupakan pendapatan perkapita penduduk Indonesia. Karena perkiraan beban jangka panjang banyak menyangkut masalah ekonomi makro yang bersifat eksternal perusahaan listrik, maka penyusunannya dimintakan pengarahannya dari pemerintah.
2. Peramalan jangka menengah, yaitu mencakup waktu antara 3 sampai 18 bulan. Dalam peramalan beban jangka menengah mengacu pada peramalan beban jangka panjang, dimana perkiraan beban jangka menengah tidaklah menyimpang jauh dari perkiraan beban jangka panjang. Dalam peramalan beban jangka menengah faktor yang mempengaruhi adalah faktor manajer dari suatu perusahaan berbeda dengan peramalan beban jangka panjang yang

justro faktor ekonomi makro sebagai faktor utamanya. Adapun masalah manajer dalam suatu perusahaan penyedia listrik adalah kemampuan teknik memperluas jaringan distribusi dalam menyelesaikan proyek saluran transmisi. Dalam peramalan beban jangka menengah tidak banyak dilakukan pengembangan. Oleh karenanya peramalan mengenai beban besarnya beban inimum juga dipeprlukan karena dengan adanya beban rendah dapat menimbulkan persoalan opresional seperti timbulnya tegangan yang berlebih dalam sistem tenaga listrik.

3. Peramalan jangka pendek, yaitu mencakup jangka waktu kurang dari 3 bulan. Dalam peramalan beban jangka pendek terdapat batas atas untuk beban maksimum dan batas bawah untuk beban minimum yang ditentukan atau mengacu dari peramalan beban jangka menengah. Besarnya beban untuk setiap peramalan jangka pendek biasanya diasumsikan dalam satuan jam dimana setiap jamnya ditentukan dengan memperhatikan banyak pemakain beban diwaktu lalu dengan memperhatikan beberapa aspek yang mepengaruhi bebannya besarnya pemakaian energi listrik dalam sistem seperti peralatan elektonik, cuaca dan suhu udara dilingkungan sekitar.

1.2.5.3 Peramalan Berdasarkan Model peramalan beban

Tahapan akhir dari penyusunan beban adalah pembuatan model peramalan beban. Dari pembuatan model peramalan maka dapat dihitung kebutuhan energi listrik yang terpakai. Model yang dimaksud dalm peramalan ini adalah suatu fungsi mstematis untuk memformulasikan kebutuhan energi listrik sebagai fungsi variabel yang dipilih. Sehingga untuk membuat suatu peramalan kebutuhan energi listrik, model yang akan digunakan sebagai berikut:

1. Model Sektoral

Model sektoral adalah model cara peramalan beban dengan menggunakan pendekatan sektoral pemakai dengan memakai metode gabungan. Pada umumnya model ini digunakan dalam penyusunan peramalan tingkat distribusi atau wilayah.

2. Model Lokasi

Pada umumnya model ini thampir mirip dengan model sektoral, model lokasi adalah model peramalan dengan cara penyederhanaan pada beberapa variabel atau asumsi. Biasanya model lokasi seringkali digunakan dalam peramalan tingkat pusat beban (*Load Center*).

3. Model Gardu Induk

Mode gardu induk ini menggunakan metode *Time Series (moving average time series)*, dengan input tunggal beban puncak bulanan pada sistem tenaga listrik bagian gardu induk. Model ini digunakan dalam peramalan suatu gardu induk dengan kebutuhan beban yang akan terpasang pada masa yang akan datang.

1.2.5.4 Peramalan Berdasarkan Metode peramalan beban

Metode penelitian merupakan metode yang sering digunakan untuk mendapatkan data dengan tujuan tertentu. Dalam hal ini pendekatan yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan energi listrik adalah dengan metode yang meninjau secara umum dengan menyederhanakan variabel yang mempengaruhi penjualan energi listrik. Adapun metode yang berkaitan dengan metode peramalan beban energi listrik sebagai berikut:

1. Metode Analisis

Metode ini digunakan berdasarkan data dari analisis penggunaan akhir energi listrik pada setiap kusemen (pelanggan). Sehingga data yang diperoleh dari survei

lapangan. Dan data yang umumnya di perlukan dalam metode analisis ialah data yang memberi gambaran penggunaan peralatan listrik di masyarakat atau kemampuan masyarakat dalam membeli peralatan listrik dalam kehidupan sehari-hari.

Keuntungan menggunakan metode ini ialah hasil perkiraan merupakan hasil simulasi dari penggunaan energi listrik di masyarakat, sederhana dan mengurangi masalah validitas parameter model. Sebaliknya metode ini tidak tanggap terhadap perkembangan atau perubahan parameter ekonomi, sebagai contoh pengaruh kenaikan tarif penggunaan energi listrik, pendapatan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) dan sebagainya.

2. Metode Ekonometri

Suatu metode yang digunakan dengan mengikuti indikator-indikator ekonomi. Peramalan (prakiraan) ini didasarkan adanya hubungan antara penjualan energi listrik dengan beban puncak dan berbagai variabel ekonomi seperti pendapatan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB), harga dan penggunaan peralatan listrik yang dipakai konsumen. Metode ekonometri ini cocok diterapkan dalam suatu kasus, misalnya pada suatu daerah atau wilayah tertentu.

3. Metode *Times Series*

Metode *Times Series* adalah metode yang disusun berdasarkan hubungan data-data masa lalu tanpa memperhatikan faktor-faktor penyebabnya, misalnya pengaruh ekonomi, iklim, dan teknologi.

4. Metode Gabungan

Jenis metode ini adalah metode gabungan antara metode analisis dan metode ekonometri. Sehingga didapat suatu metode yang tanggap terhadap aktivitas ekonomi. Seperti

harga energi listrik, pergeseran pola penggunaan, kemajuann teknologi, kebijaksanaan pemerintah, dan sosisldemografi.

5. Metode Regresi

Metode ini metode yang paling banyak digunakan dalam perhitungan statistika. Menurut Algafari (2000: 2) etode regresi adalah suatu formula matematis yang menunjukkan hubungan keterkaitan antara satu atau beberapa variabel yng nilainya sudah diketahui (*know variabel*) dengan satu variabel lainnya yang belum diketahui (*unknown variabel*). Metode ini dapat di pakai dalam mengasunsi faktor yang diperkirakan menuju hubungan sebab dan akibat dengan satu atau lebih variabel bebas, sehingga metode ini bertujuan untuk mengetahui bentuk hubungan tersebut dan memperkirakan nilai yang akan datang dari variabel tidak bebas

Dari paparan berbagai jenis metode peramalan secara umum, maka dipilihlah metode regresi dalam peramalan beban pada transformator 150 KV Wates untuk 10 tahun yang akan datang.

1.2.6 Penggunaan Metode Regresi untuk Peramalan Beban

Di dalam peramalan beban sistem tenaga listrik tidaklah mungkin ditemukan menggunakan rumus yang eksak untuk menentukan besarnya suatu beban yang digunakan oleh konsumen. Tetapi beban dapat diprediksi besarnya menggunakan pengalaman-pengalaman dan pengamatan dimasa lalu. Sehingga dapat di perkirakan kebutuhan beban listrik untuk masa yang akan mendatang.

Dengan menggunakan metode regresi linier berganda diharapkan dapat memperkirakan kebutuhan daya listrik untuk masa yang akan datang. Dengan adanya metode tersebut maka dapat dilakukan pembuatan model yang akan mempresentasikan data dan informasi menjadi suatu fungsi matematis untuk menghitung proyeksi kebutuhan akan daya listrik yang mendatang sesuai dengan kebutuhan dan permintaan konsumen untuk 10

tahun yang akan datang. Pemilihan metode ini digunakan dalam peramalan beban. Ada beberapa metode regresi yang dapat digunakan untuk memperkirakan beban pada sebuah gardu induk yang menggunakan transformator 150 KV maupun yang lainnya, diantara metode regresi sebagai berikut:

1.2.6.1 Metode Regresi Linier Sederhana

Penggunaan metode ini berkaitan dengan menentukan hubungan sebab-akibat antara satu variabel dengan variabel-variabel lainnya. Dalam jurnal Arif Rahman (2015) menjelaskan bahwa “variabel penyebab disebut dengan bermacam-macam istilah seperti: *variabel penjelas, variabel explanatorik, variabel independen, variabel bebas, variabel X* (karena seringkali digambarkan dalam grafik sebagai absis, atau sumbu X)”. Sedangkan variabel akibat dikenal sebagai *variabel yang di pengaruhi, variabel dependen, variabel terikat, variabel tak bebas atau variabel Y*. Analisis regresi ini dapat digunakan untuk mendapatkan persamaan regresi yang menunjukkan hubungan antara dependen (*variabel tak bebas*) dengan satu atau beberapa variabel independen (*variabel bebas*). Sehingga dapat ditulis persamaan regresi linier sederhana menurut (Algafari 2000) sebagai berikut:

$$Y = a + bX \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

Y = variabel dependen (tidak bebas)

a = intersep (titik potong kurva terhadap sumbu Y)

b = kemiringan (slope) kurva linier

x = variabel independen (bebas)

jika variabel dependen dihubungkan dengan satu variabel dependen saja, maka regresi yang dihasilkan adalah regresi linier sederhana. Nilai koefisien yang dihasilkan harus diuji secara statistik signifikan atau tidak. Apabila semua koefisien signifikan, persamaan

regresi yang dihasilkan dapat digunakan untuk memprediksi nilai variabel dependen jika nilai variabel independen ditentukan. ‘Untuk mendapatkan persamaan regresi linier berganda yang baik maka pemilihan berdasarkan persamaan regresi yang dihasilkan untuk setiap variabel bebas yang ada, pemilihan tersebut didasarkan kepada (Arsyad, 2001)’:

1. Nilai koefisien terbesar (R^2), semakin besar nilai koefisien determinasi atau semakin mendekati angka 1 maka semakin dekat hasil persamaan regresi akan semakin dekat dengan data yang diamati.
2. Nilai standar baku estimasi yang terkecil, karena nilai ini menyatakan penyimpangan atau kesalahan trend dengan hasil sebenarnya.
3. Menggunakan nilai uji statistik F, dimana persamaan yang digunakan adalah jika $F_{hitung} > F_{Tabel}(F_{aik-1:n-k})$.
4. Menggunakan uji statistik t, yang digunakan adalah persamaan dengan nilai uji statistik $|t_{hitung}| > t_{Tabel}(t_{a:n-k})$.

1.2.6.2 Metode Regresi Linier Berganda

Analisis regresi linier berganda adalah hubungan secara linear antara dua atau lebih variabel independen (X_1, X_2, \dots, X_n) dengan variabel dependen (Y). Analisis ini untuk mengetahui arah hubungan antara variabel independen dengan variabel dependen apakah masing-masing variabel independen berhubungan positif atau negatif dan untuk memprediksi nilai dari variabel dependen apabila nilai variabel independen mengalami kenaikan atau penurunan. Data yang digunakan biasanya berskala interval atau rasio. Dalam penggunaan metode ini hampir sama dengan metode linier berganda sederhana, yang yang membedakan hanyalah pada regresi linier berganda variabel bebasnya lebih dari satu variabel penduga. Tujuan analisis

regresi linier berganda adalah untuk mengukur intensitas hubungan antara dua variabel atau lebih dan membuat prediksi perkiraan nilai Y atas X.

Persamaan regresi linear berganda sebagai berikut:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots \dots \dots (2. 2)$$

Dimana :

- Y : variabel dependen
- X₁ dan X₂ : variabel independen
- a : konstanta (nilai Y apabila x₁ x₁...x_n=0)
- b₁ dan b₂ : koefisien regresi

Untuk mendapatkan nilai b₁, b₂ dan a, dapat menggunakan

persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sum X_1^2 &= \sum X_1^2 - \frac{(\sum X_1)^2}{n} \\ \sum X_2^2 &= \sum X_2^2 - \frac{(\sum X_2)^2}{n} \\ \sum Y^2 &= \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n} \\ \sum X_1Y &= \sum X_1Y - \frac{\sum X_1 * \sum Y}{n} \\ \sum X_2Y &= \sum X_2Y - \frac{\sum X_2 * \sum Y}{n} \\ \sum X_1X_2 &= \sum X_1X_2 - \frac{\sum X_1 * \sum X_2}{n} \end{aligned}$$

sehingga, dari persamaan diatas untuk mencari nilai b₁ dan b₂ dan a dapat dicari menggunakan rumus sebagai berikut:

$$b_1 = \frac{[(\sum X_2^2 * \sum X_1Y) - (\sum X_2Y * \sum X_1X_2)]}{[(\sum X_1^2 * \sum X_2^2) - (\sum X_1X_2)^2]} \dots \dots \dots (2. 3)$$

Kemudian untuk mencari nilai b₂ dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{[(\sum X_1^2 * \sum X_2Y) - (\sum X_1Y * \sum X_1X_2)]}{[(\sum X_1^2 * \sum X_2^2) - (\sum X_1X_2)^2]} \\ a &= \frac{(\sum Y) - (b_1 * \sum X_1) - (b_2 * \sum X_2)}{n} \dots \dots \dots (2. 4) \end{aligned}$$

1.2.7 Faktor Penting Dalam Sebuah Peramalan Beban

Untuk melakukan sebuah peramalan pembebana dalam sistem tenaga listrik ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan seperti faktor cuaca, kelompok konsumen, dan waktu. Dalam peramalan pembebanan jangka menengah dan jangka panjang menggunakan data historis beban dan cuaca, banyanya pelanggan dalam kelompok yang berbeda serta banyaknya

penggunaan energi listrik dalam suatu area tertentu. Kondisi cuaca sangat mempengaruhi terhadap energi listrik yang dipakai oleh konsumen. Seperti pemakaian alat elektronik seperti kipas angin dan *air conditioner* (AC) lebih banyak dipakai saat suhu udara meningkat, hal ini menyebabkan kenaikan beban puncak pada sistem tenaga listrik. Dengan situasi tersebut terjadi hubungan antara kebutuhan energi listrik terhadap perubahan cuaca atau suhu. Dalam peramalan jangka pendek faktor cuaca merupakan parameter yang sangat penting dalam melakukan peramalan beban.

1.2.8 Kebutuhan beban

Dalam sistem tenaga listrik kebutuhan beban adalah beban yang terpasang pada terminal penerima rata-rata dalam suatu selang (interval) waktu tertentu. Beban tersebut bisa dalam satuan *ampere* (A), *watt* (W), dan *volt-ampere* (VA).

Dalam suatu daerah kebutuhan akan beban listrik tergantung dari pertumbuhan penduduk, pertumbuhan ekonomi, rencana pengembangan dalam waktu dekat dan waktu yang akan datang. Sehingga kebutuhan akan beban yang akan mendatang dapat diantisipasi dengan adanya faktor-faktor yang telah diketahui. Dengan demikian diharapkan dapat terciptanya suatu sistem yang berkualitas dalam penyaluran beban kepada pelanggan.

1.2.9 Karakteristik beban

Tujuan utama dari sistem distribusi tenaga listrik adalah mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk ke pelanggan (beban). Dilihat dari kegiatan pemakaian energi listrik, konsumen listrik dapat dikelompokkan menjadi pelanggan rumah tangga, komersial, publik, dan pelanggan industri. Faktor utama yang paling penting dalam mendistribusikan energi listrik adalah karakteristik berbagai beban. Pada konsumen rumah tangga (perumahan) karakteristik pembebanan ditunjukkan oleh adanya fluktuasi konsumsi energi listrik yang cukup besar. Sedangkan pada konsumen industri fluktuasi energi listrik hampir sama dengan konsumen rumah tangga sehingga perbandingan beban rata-rata terhadap

beban puncak hampir mendekati satu, dan pada konsumen komersial akan mempunyai beban puncak yang lebih tinggi pada malam hari.

Dengan adanya berbagai jenis karakteristik beban diperlukan analisis dengan pengaruh termis pada sistem tenaga listrik dapat menentukan keadaan awal yang akan diproyeksikan dalam perancangan selanjutnya. Penentuan karakteristik beban listrik suatu gardu distribusi sangat penting artinya untuk mengevaluasi pembebanan gardu distribusi tersebut, ataupun dalam merencanakan suatu gardu distribusi yang baru. Karakteristik beban ini sangat memegang peranan penting dalam memilih kapasitas transformator secara tepat dan ekonomis. Di lain pihak sangat penting artinya dalam menentukan rating peralatan pemutus rangkaian, analisa rugi-rugi dan menentukan kapasitas pembebanan dan cadangan tersedia dan suatu gardu. Karakteristik beban listrik suatu gardu sangat tergantung pada jenis beban yang dilayaninya. Menurut Suswanto (2009) ada beberapa faktor yang menentukan karakteristik beban sebagai berikut:

1. Faktor Kebutuhan (*Demand Factor*)

Faktor kebutuhan (*Demand Factor*) didefinisikan sebagai perbandingan antara beban puncak dengan beban terpasang dengan kata lain merupakan derajat pelayanan serentak pada seluruh beban terpasang. Definisi ini dapat dituliskan seperti persamaan berikut:

$$\text{Faktor Kebutuhan } (F_d) = \frac{\text{beban puncak}}{\text{beban terpasang}} \dots\dots\dots (2. 5)$$

Ketrangan:

F_d = Factor Kebutuhan

Untuk suatu perioda waktu tertentu Yang dimaksud dengan beban terpasang adalah jumlah kapasitas yang tertera pada papan nama (name plate). Faktor kebutuhan adalah perbandingan antara kebutuhan maksimum (beban puncak) terhadap beban yang terpasang. Faktor kebutuhan selalu bernilai lebih kecil dari satu. Besarnya faktor kebutuhan dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya sebagai berikut ini:

- a. Besarnya beban yang terpasang

- b. Sifat pemakaian, sebagai contoh: toko-toko, pusat perbelanjaan, perkantoran dan industri memiliki faktor kebutuhan yang tinggi sedangkan gudang dan tempat rekreasi memiliki faktor kebutuhan yang rendah.

2. Faktor Beban Rata-rata

Beban rata-rata (Br) dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara energi yang terpakai dalam rentang waktu tertentu. Dalam waktu satu tahun persamaan dalam mencari beban rata-rata dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Br = \frac{\text{KWH yang terpakai dalam satu tahun}}{365 \text{ hari} \times 24 \text{ jam}} \dots\dots\dots (2. 6)$$

Keterangan:

Br = Beban Rata-rata

3. Faktor Beban (*load factor*)

Faktor beban adalah perbandingan antara beban rata – rata terhadap beban puncak yang diukur dalam suatu periode tertentu. Beban rata – rata dan beban puncak dapat dinyatakan dalam kilowatt, kilovolt – amper, amper dan sebagainya, tetapi satuan dari keduanya harus sama. Faktor beban dapat dihitung untuk periode tertentu biasanya dipakai harian, bulanan atau tahunan. Definisi itu dapat ditulis dalam persamaan berikut ini:

$$F_{Ld} = \frac{P_{av}}{P_{max}} \dots\dots\dots (2. 7)$$

Keterangan:

F_{Ld} = faktor beban (*Load Factor*)

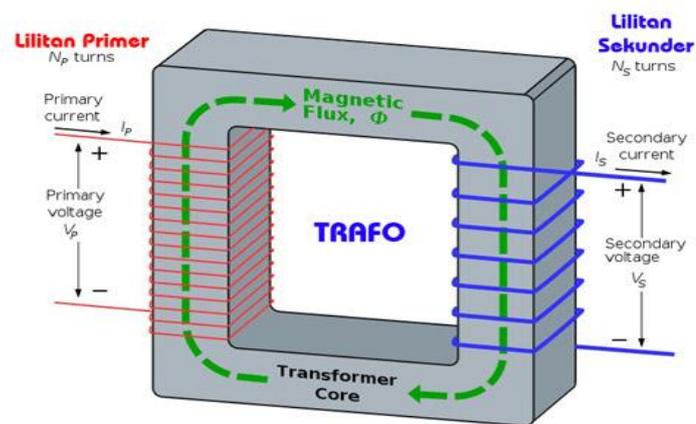
p_{av} = beban rata-rata

P_{max} = beban puncak.

1.2.10 Transformator

Transformator merupakan peralatan yang sangat penting keberadaannya didalam sistem tenaga listrik yang memiliki sifat elektromagnetik stastik yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik kerangkaian listrik lainya dengan

frekuensi yang sama. Menurut Zuhana dalam dasar teknik tenaga listrik dan elektronika daya (1988) “transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian ke rangkaian listrik lainnya”. Untuk lebih jelasnya lihat pada gambar 2.18 di bawah ini.



Gambar 2. 18 Traformator

Sumber: <http://www.budhii.web.id/2016/11/transformator-step-up.html?m=0>

Dalam sistem tenaga listrik terdapat banyak jenis transformator yang umumnya digunakan dalam pusat listrik yang besar 10 MW. Menurut Marsudi dalam pembangkitan energi listrik (2011) terdapat beberapa macam transformator dalam pusat listrik yang besar diantaranya sebagai berikut:

1. Transformator Penaik Tegangan Generator

Transformator ini berfungsi apabila rel dalam pusat listrik menggunakan tegangan di atas tegangan generator, maka tegangan dari generator perlu dinaikan terlebih dahulu melalui transformator penaik tegangan sebelum dihubungkan ke rel tersebut. Transformator ini termasuk dalam transformator *step-up* dimana jumlah kumparan sekunder (N_s) lebih banyak dari pada kumparan primer (N_p). Sedangkan untuk tegangan pada sisi sekunder (V_s) lebih besar daripada sisi primer (V_p) dan untuk arusnya pada sisi primer (I_p) lebih besar daripada sisi sekunder (I_s).

2. Transformator Unit Pembangkit

Setiap unit pembangkit memiliki transformator pembangkit, yaitu transformator yang mengambil daya langsung dari generator untuk memasok alat-alat bantu unit pembangkit yang bersangkutan, seperti: motor pompa pendingin, motor pompa minyak pelumas, dan lain-lain

3. Transformator Pemakaian Sendiri

Transformator pemakaian sendiri mendapat pasokan daya dari rel pusat listrik kemudian memasok daya ke rel pemakaian sendiri.

4. Transformator Antar-Rel

Dalam pusat listrik ada beberapa rel dengan tegangan operasi yang berbeda-beda, maka ada transformator antar-rel. Adanya rel-rel yang berbeda dapat disebabkan karena perkembangan sistem tenaga listrik dan juga dapat terjadi karena di perlukan rel tegangan menengah (antara 6 KV sampai 40 KV) untuk keperluan distribusi di daerah sekitar pusat listrik selain rel tegangan tinggi (di atas 60 KV) untuk saluran transmisi jarak jauh.

Seperti tampak pada gambar 2.21 di atas, pada prinsipnya transformator tersusun dari dua buah lilitan yang di pasang pada sebuah inti besi. Salah satu kumparan di sebelah kiri di hubungkan dengan tegangan masukan yang disebut sisi primer sedangkan lilitan sebelah kanan yang di hubungkan dengan beban di sebut sisi sekunder. Adapun cara kerja transformator sebagai berikut ini:

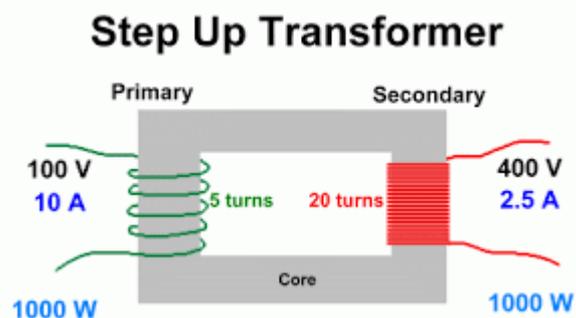
1.2.10.1 Prinsip kerja transformator

Prinsip kerja transformator memanfaatkan medan elektromagnetik dan induksi elektromagnetik dimana bila sisi kumparan primer diberi masukan tegangan bolak balik (AC), maka pada sisi kumparan primer tersebut timbul medan magnet yang berubah-ubah. Kekuatan medan magnet yang terjadi pada sisi kumparan tersebut dipengaruhi dengan adanya aliran arus. Sehingga timbullah flux magnet yang akan mengalir melalui inti besi pada

transformator menuju sisi sekunder. Akibat mengalirnya flux magnet ke sisi sekunder melalui inti besi maka konduktor akan terkena medan magnet yang berubah-ubah dari sisi primer yang mengakibatkan terjadi tegangan induksi antara ujung sisi kumparan sekunder. Bila sisi kumparan sekunder pada trafomator dirangkain dengan beban maka akan mengalirkan arus beserta tegangan menuju kebeban yang terpasang. Dalam sistem tenaga listrik dikenal dengan trafomator step-up dan step-down adapun prinsip kerjanya sama pada umumnya namun berbeda pada jumlah lilitan kumparan baik pada sisi primer maupun sekunder.

1. Prinsip kerja trafomator step-up

Apabila jumlah lilitan sisi sekunder lebih banyak dari pada lilitan sisi primer, maka transformator akan menaikkan tegangan. Sehingga di sebut trafomator step-up. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.19 di bawah ini

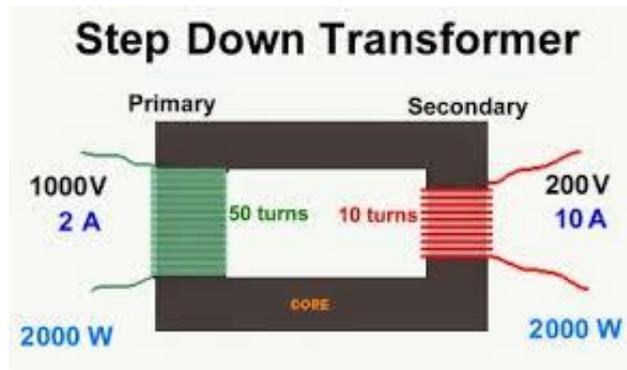


Gambar 2. 19 Transformator Step-up

Sumber: <https://mohamadramdhani.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2015/09/Bab-3-Teknik-Tenaga-Listrik.pdf>

2. Prinsip kerja trafomator step-down

Apabila jumlah lilitan sisi primer lebih banyak dari pada lilitan sisi sekunder, maka transformator akan menurunkan tegangan. Sehingga di sebut trafomator step-down. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.20 di bawah ini.



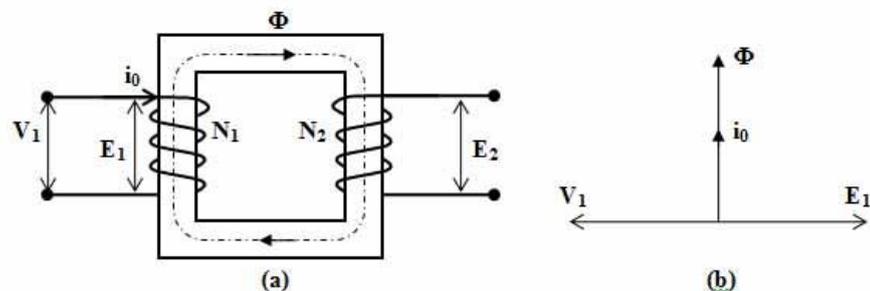
Gambar 2. 20 Transformator Step-down

Sumber: <https://mohamadramdhani.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2015/09/Bab-3-Teknik-Tenaga-Listrik.pdf>

Dalam dunia kelistrikan sistem tenaga listrik transformator memiliki peranan dalam menyalurkan energi listrik ke konsumen. Sehingga transformator memiliki keadaan tanpa beban dan keadaan berbeban. Menurut Zuhani dalam dasar teknik tenaga listrik dan elektronika daya (1988: 44) keadaan tersebut dapat dilihat di bawah ini

1.2.10.2 Transformator dalam keadaan tanpa beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid, akan mengalir arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 relatif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 dapat dilihat pada gambar 2.21 dibawah. Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid.



Gambar 2. 21 keadaan Tanpa Beban

Sumber: zulhan, 1988

$$\Phi = \Phi_{maks} \sin \omega t$$

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

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

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

$$= -N_1 \omega \Phi_{maks} \cos \omega t$$

(tertinggal 90° dari Φ)

Harga efektif

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \Phi_{maks}}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 f \Phi_{maks} \dots\dots\dots (2. 8)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (Φ) bersama tadi menimbulkan

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

$$e_2 = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f \Phi_{maks}$$

Sehingga,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor

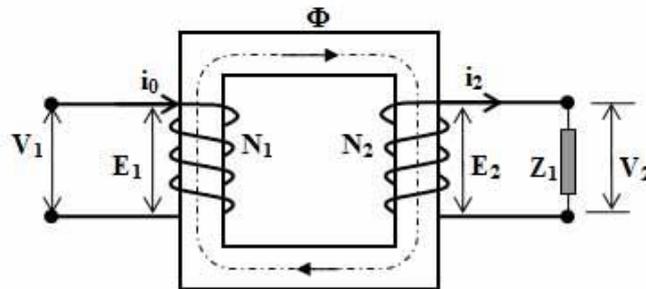
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots (2. 9)$$

a = perbandingan transformasi

Dalam hal ini tegangan induksi E_1 mempunyai kebesaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sekunder V_1

1.2.10.3 Transformator dalam keadaan berbeban

Apabila kumparan sekunder digabungkan dengan beban Z_L, I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$ dengan θ_2 = faktor kerja beban. Seperti yang terlihat pada gambar 2.22 dibawa ini.



Gambar 2. 22 Transformator Keadaan Berbeban
 Sumber: zulhan, 1988

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 I_M . agar fluks bersama tersebut tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir I_2 , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$$I_1 = I_0 + I'_2$$

Bila rugi besi di abaikan (I_C diabaikan) maka $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2$$

Untuk menjaga agar fluks tetapi tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M saja, berlaku hubungan:

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

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2$$

Hingga,

$$N_1 I'_2 = N_2 I_2$$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka $I'_2 = I_1$

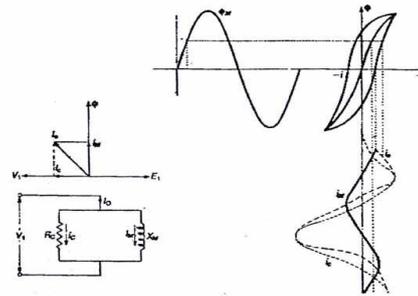
Jadi,

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \text{ atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots(2. 10)$$

Kondisi transformator baik dalam keadaan berbeban maupun tanpa beban memerlukan arus penguat. Seperti yang dijelaskan Zulhan dalam dasar teknik tenaga listrik (1988: 45) sebagai berikut:

1.2.10.4 Arus Penguat Transformator

Arus primer I_0 yang mengalir pada saat kumparan sekunder tidak dibebani disebut arus penguat. Dalam kenyataannya arus primer I_0 bukanlah merupakan arus induktif murni. Hingga ia terdiri atas dua komponen yang terlihat pada gambar 2.23 dibawah:



Gambar 2. 23 Arus Penguat Transformator

Sumber: zulhan, 1988

1. Komponen arus pemagnetan I_M , yang menghasilkan fluks (Φ). Karena sifat besi yang non linier (ingat kurva $B-H$), maka arus pemagnetan I_M . Dan juga fluks (Φ) dalam kenyataannya tidak berbentuk sinusoid seperti terlihat pada gambar 2.26.
2. Komponen arus rugi tembaga I_C , menyatakan daya yang hilang akibat adanya rugi histeresis dan 'arus eddy'. I_C sefasa dengan V_1 , dengan demikian hasil perkaliannya ($I_C \times V_1$) merupakan daya (watt) yang hilang.

1.2.10.5 Pembebanan transformator

Dalam pengoperasiannya sebuah transformator dalam sistem tenaga listrik memiliki suatu beban dimana pembebanan transformator didapat dari hasil peramalan beban dibagi dengan kapasitas transformator. Sedangkan kapasitas transformator didapat data spesifikasi transformator yang dipakai. Dalam pembebanan sebuah transformator, perlu adanya batas optimal yang diperhatikan dalam penyalurannya yaitu sebesar 60 – 80 %. Berdasarkan SPT PLN no 50 tahun 1997, klasifikasi pembebanan trafo adalah sebagai berikut:

- 0 – 60 % = Beban Ringan (*Ekonomis*)
- 60 – 80 % = Beban Optimal (*Maximum*)
- > 80 % = Beban Berat (*Overload*)

$$\% \text{ *pembebanan* } = \frac{S_t}{K_{\text{transformator}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2. 11)$$

Dimana,

S_t : pemakaian beban pada tahun (yang diramalkan)

$K_{\text{transformator}}$: Kapasitas Trafo (data)

Dalam pembebanan suatu transformator diperlukan suatu estimasi agar dapat memperkirakan umur trafo serta dapat memperkirakan atau menggambarkan keadaan beban dimasa yang akan mendatang.

1.2.10.6 Analisis kemampuan transformator

Untuk mengetahui kemampuan suatu peralatan khususnya transformator perlu adanya analisis pada peralatan tersebut. Menurut wiradi analisis adalah aktivitas yang memuat sejumlah kegiatan seperti mengurai, membedakan, memilih sesuatu untuk digolongkan dan dikelompokan kembali menurut kriteria tertentu yang kemudian dicari keterkaitannya dan ditaksir maknanya. Dalam tugas akhir ini penulis menjelaskan tentang kebutuhan energi atau pembebanan pada gardu induk transformator 150 KV Wates sebagaimana dijelaskan oleh marsudi dalam pembakitan energi listrik edisi kedua (2011) yang meliputi sebagai berikut:

1. Analisis kebutuhan energi dalam kurun waktu tertentu, misalnya kebutuhana tahunana sampai 10 tahun yang akan datang.
2. Analisis kebutuhan daya dalam bentuk kurva beban harian
3. Analisis tingkat keandalan yanag dibutuhkan
4. Peranan pusat listrik yang akan dibangun dalam oprasi pembangkitan apakah sebagai penyedia beban dasar, penyedia beban semi-datar, penyedia beban puncak, atau sebagai unit cadangan.

Berdasarkan analisi kebutuhan energi ini, kemudian dipelajari sebagai alternatif bagaimana cara memenuhi kebutuhan energi listrik

baik sekarang maupun pada tahun-tahun kedepannya sesuai dengan kapasitas transformator yang terpasang ataupun dengan penambahan kapasitas transformator. Untuk kapasitas suatu transformator berhubungan erat dengan kemampuan. Kemampuan merupakan segala sesuatu yang dapat digunakan dan menghasilkan sesuai dengan kapasitas individual maupun suatu peralatan tanpa terjadinya penurunan kualitas. Dengan begitu kemampuan suatu transformator untuk digunakan mendistribusikan energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya sesuai dengan nilai dari kapasitas transformator yang telah ditetapkan.

Dari beberapa penjelasan diatas maka analisis kemampuan transformator dapat diartikan sebagai penaksiran atau melilah terhadap kemampuann transformator untuk digunakan dalam mendistribusaikan energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya sesuai dengan kemapuan transformator yang telah ditetapkan tanpa mengurangi tingkat kualitas transformator tersebut.