

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Arynugraha T.S (2015), penelitian tentang Prediksi Perkembangan Beban Listrik di Kecamatan Ranah Pesisir Sampai Tahun 2025. Penelitian dilakukan guna memperoleh gambaran mengenai perkembangan beban listrik mulai tahun 2010 hingga 2025 dengan acuan dataang tersambung (VA) dan pemakaian energi listrik (kWh) mulai tahun 2000 hingga 2009 dari PT. PLN (Persero) Kantor Ranting Balai Selasa, serta prediksi tersebut dianalisis menggunakan persamaan kuadrat terkecil dan persamaan eksponensial. Setelah dilakukan validasi menggunakan SPSS V.15 ternyata error terkecil dimiliki oleh persamaan eksponensial. Pada persamaan kuadrat terkecil nilai *error* strandar pelanggan yang didapat sebesar 59,846, sedangkan pada persamaan eksponensial nilai error standar pelanggan yang didapat sebesar 0,021 sehingga prediksi perkembangan beban listrik dianalisis menggunakan persamaan eksponensial. Pada tahun 2010 diperkirakan nilai pertumbuhan pelanggan yaitu sebesar 4.078,17 dengan prakiraan daya tersambung sebesar 3.190.010,45 VA, sedangkan pada tahun 2025 diprakirakan nilai pertumbuhan pelanggan sebesar 9.575,38 dengan prakiraan daya tersambung sebesar 14.401.741,92 VA. PT PLN (Persero) Kantor Ranting Balai Selasa seharusnya sudah melakukan perencanaan pengembangan atau uprating dari gardu-gardu distribusi mengingat di tahun 2025 prakiraan daya tersambung dari pelanggan akan menjadi 14.401.741,92 VA.

Fahza A.N (2016), penelitian tentang Evaluasi Kemampuan Transformator di Gardu Induk Cilegon Lama 150 kV dengan prediksi untuk 15 tahun kedepan. Pada tahun 2022 gardu induk Cilegon lama di transformator I 56 MVA prediksi kebutuhan bebannya mencapai batas minimal standar optimal beban trafo, yaitu sebesar 34,15 MVA (61%). Untuk

batas maksimal standar pemakaian beban trafo terjadi pada tahun 2026 yaitu sebesar 44,27 MVA (79%), dan tahun 2030 beban di trafo I sudah mengalami overload yaitu sebesar 59,24 MVA (106%). Sedangkan pada transformator II untuk 15 tahun yang akan datang tetap dapat bekerja secara optimal. Batas standar yang diperoleh untuk prediksi trafo II di tahun 2030 sebesar 47,025 MVA (78%).

Doni Swastika (2017), penelitian terhadap Evaluasi Kemampuan Transformator Tenaga Gardu Induk 150 kV Purworejo. Pada tahun 2016 hingga 2020 pada transformator 1 30 MVA kondisi beban masih optimal 23,76 MVA, persentase pembebanan yaitu 79,19%. Akan tetapi pada tahun 2021 hingga 2035 telah memasuki kondisi pembebanan berat dengan nilai presentase 99,21%. Kondisi transformator 2 60 MVA pada tahun 2016 hingga 2029 diperkirakan kondisi beban ringan yaitu dengan nilai presentase 40,96% sampai 59,91%. Sedangkan pada tahun 2030 hingga 2035 kondisi pembebanan masih optimal dengan presentase pembebanan 61,96% sampai 72,88%.

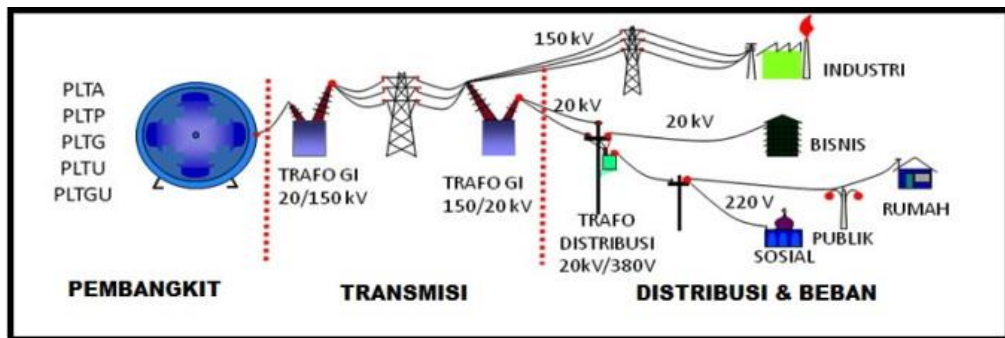
Qari Walu C (2017), penelitian tentang Evaluasi Kemampuan Transformator Tenaga Pada Gardu Induk Kentungan 150 kV. Prakiraan dilakukan untuk memprediksi beban pada transformator 2 dengan daya 60 MVA pada gardu induk Kentungan untuk 10 tahun yang akan datang. Pada tahun 2016 hingga tahun 2027 kondisi beban sudah melebihi batas maksimal optimal beban yaitu sebesar 52,21 MVA (87%) dan 54,16 MVA (90%) sehingga sudah dalam kategori beban berat. Saat ini transformator 2 masih dapat melayani beban yang ada akan tetapi untuk beberapa puluh tahun yang akan datang kemungkinan sudah tidak mampu melayani beban yang ada sehingga diperlukan adanya penambahan transformator mator lagi.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Pembangkitan dan Penyaluran Tenaga Listrik

Pembangkit dan penyaluran tenaga listrik merupakan dua bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi membangkitkan energi listrik dari sumber energi tertentu seperti air, angin, batu bara, bahan bakar minyak, dan lain-lain dan kemudian energi tersebut diubah menjadi energi listrik.

Energi listrik yang telah di hasilkan dari berbagai energi lain kemudian disalurkan kepada konsumen untuk dimanfaatkan sesuai kebutuhan masing-masing. Ada beberapa tahapan yang dilalui agar energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit sampai kepada konsumen, yaitu:



Gambar 2.1 Penyaluran energi listrik

a. Pusat listrik/ pembangkit

Pusat listrik seperti PLTA, PLTU, PLTP, PLTG, PLTGU, dan lain-lain yang memiliki fungsi sebagai penyedia energi listrik dan kemudian dinaikkan tegangannya dan disalurkan melalui saluran transmisi.

b. Saluran transmisi

Saluran transmisi berfungsi untuk mengirimkan energi listrik yang berasal dari pusat pembangkit hingga ke pusat beban. Ada tiga macam saluran transmisi yaitu saluran udara, saluran bawah tanah, dan saluran bawah laut. Akan tetapi saluran transmisi yang paling banyak digunakan yaitu saluran udara karena lebih ekonomis.

c. Jaringan distribusi

Jaringan distribusi berfungsi untuk mendistribusikan energi listrik dari gardu induk ke konsumen sesuai dengan kebutuhan. Ada dua level tegangan dalam jaringan distribusi, yaitu:

1. Jaringan tegangan menengah

Jaringan tegangan menengah ini umumnya memiliki tegangan sebesar 20 kV dan menjadi penghubung antar gardu induk tegangan menengah atau antara gardu induk tegangan menengah dengan trafo distribusi tegangan rendah.

2. Jaringan tegangan rendah

Jaringan tegangan rendah umumnya memiliki nilai tegangan sebesar 220 V dan menjadi penghubung antara trafo tegangan ke pelanggan.

## **2.2.2 Gardu Induk**

### **2.2.2.1 Pengertian dan fungsi Gardu Induk**

Gardu induk adalah sebuah instalasi listrik yang terdiri dari berbagai peralatan listrik yang merupakan satu kesatuan dari sistem tenaga listrik. Fungsi dari gardu induk yaitu sebagai pemutus/ penghubung aliran arus listrik serta penyesuai terhadap level tegangan dari sistem-sistem yang dihubungkan.

### **2.2.2.2 Klasifikasi Gardu Induk**

a. Berdasarkan Penggunaannya

Berdasarkan penggunaan, secara umum gardu induk dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu:

1. Gardu induk tegangan ekstra tinggi

Fungsi gardu induk tegangan ekstra tinggi adalah sebagai penurunan tegangan di saluran transmisi ekstra tinggi ke saluran tegangan tinggi.

2. Gardu induk tegangan tinggi

Fungsi dari gardu induk tegangan tinggi sebagai penurun tegangan tinggi di saluran transmisi ke tegangan menengah di jaringan distribusi.

b. Berdasarkan Letak Peralatannya

Ada lima jenis gardu induk berdasarkan letak peralatannya diantaranya:

1. Gardu induk pasangan luar

Gardu induk yang tersusun atas sekumpulan peralatan tinggi pasangan luar seperti transformator dan peralatan penghubung lain. Umumnya, gardu induk yang memiliki kondensator pasangan dalam serta sisi transier trafo utama dan trafo pasangan dalam dapat disebut juga sebagai pasangan luar. Gardu induk ini biasanya dipasang pada lokasi pinggiran kota serta membutuhkan lahan yang luas. Akan tetapi biaya yang dibutuhkan dalam pembangunan gardu induk pasangan luar ini lebih murah/ ekonomis.

2. Gardu induk pasangan dalam

Jenis gardu induk ini merupakan gardu induk yang peralatannya terpasang di dalam walaupun ada sebagian kecil yang terpasang diluar. Biasanya gardu induk pasangan dalam dipakai pada pusat kota dan biaya yang dibutuhkan dalam pembangunannya lebih mahal. Gardu induk pasangan dalam memiliki keuntungan aman dari gangguan cuaca.

3. Gardu induk setengah pasang luar

Gardu induk yang sebagian peralatan instalasi listiknya terpasang di dalam ruangan dan di luar ruangan sehingga disebut sebagai gardu induk setengah pasang luar. Gardu induk ini memiliki ragam bentuk dengan adanya bermacam-macam pertimbangan yang sangat ekonomis.

4. Gardu Induk pasang bawah tanah

Hampir seluruh peralatan listrik di gardu induk pasang bawah tanah ini terinstalasi pada bangunan dibawah tanah. Umumnya pendingin

dari gardu induk tersebut terpasang diatas tanah dan letaknya dipusat kota.

5. Gardu induk jenis mobil

Gardu jenis mobil dapat disebut juga dengan gardu induk cadangan karena digunakan jika pada saat gardu induk di daerah tertentu mengalami gangguan dan pencegahan terhadap beban lebih secara berkala.

c. Berdasarkan Isolasi Busbar

Ada 2 jenis gardu induk berdasarkan isolasi busbar diantaranya:

1. Gardu induk konvensional

Karena gardu induk ini sebagian peralatannya terpasang diluar gedung (*switch yard*), maka peralatannya berisolasi udara bebas. Akan tetapi ada sebagian ada sebagian kecil dari peralatannya yang berada di dalam gedung. Areal tanah yang diperlukan untuk pembangunan gardu induk ini relatif luas.

2. Gardu induk GIS (*Gas Insulated Switchgear*)

Letak dari gardu induk GIS yaitu di dalam gedung dan dikemas dalam tabung sehingga semua peralatan *switchgear* dari gardu induk ini terisolasi dengan gas SF-6.

## 2.2.3 Peralatan Gardu Induk

### 2.2.3.1 Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan sistem tenaga listrik yang memiliki fungsi sebagai pentransformasi daya listrik dengan frekuensi tetap. Untuk mendapatkan titik netral maka transformator daya dilengkapi dengan trafo pentanahan yang disebut *Neutral Current Transformer* (NTC). Trafo pentanahan lain yang digunakan yaitu *Neutral Grounding Resistance* (NGR).



Gambar 2.2 Transformator daya

### 2.2.3.2 *Neutral Grounding Resistance (NGR)*

*Neutral Grounding Resistance (NGR)* merupakan suatu tahanan yang terpasang secara serial dengan neutral sekunder di transformator sebelum terhubung ke tanah. Tujuan pentanahan dari sistem neutral ini adalah:

- a. Membatasi arus gangguan satu fasa-tanah.
- b. Membatasi tegangan pada fasa yang sehat.
- c. Membantu pemadaman busur api.

Pada umumnya ada dua jenis NGR diantaranya:

- a. Resistance liquid (Air)

Jenis ini berbahan air murni guna mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan dan ditambahkan kedalam garam KOH.

- b. Resistance logam

Resistansi yang nilainya sudah ditentukan dan terbuat dari logam berbahan nekelin serta pembuatannya didalam panel.

### 2.2.3.3 *Circuit Braker (CB)*

*Circuit breaker (CB)* merupakan sebuah peralatan pemutus rangkaian listrik dalam keadaan berbeban. Pengoperasian CB ini dapat dilakukan dalam dua kondisi yaitu saat keadaan normal dan saat keadaan mengalami gangguan. CB ini dilengkapi dengan pemadam busur api berupa minyak, gas dan udara yang berfungsi ketika CB beroperasi dan

timbul busur api maka dengan pemadam busur api tersebut dapat dipadamkan.

#### **2.2.3.4 Disconnecting Switch (DS)**

*Disconnecting switch* (DS) merupakan sebuah peralatan pemisah rangkaian listrik dalam keadaan tidak berarus (berbeban). Pengoperasian DS dilakukan ketika CB beroperasi terlebih dahulu. Pada gardu induk, letak pemasangan DS yaitu di empat tempat:

- a. Transformator Bay (TR Bay).
- b. Transmission Line Bay (TL Bay).
- c. Busbar
- d. Bus Couple

#### **2.2.3.5 Lighting Arrester**

*Lightning arrester* merupakan peralatan pengaman yang digunakan sebagai pelindung peralatan listrik dari gangguan sambaran petir. Dalam keadaan normal (tidak terjadi gangguan) *lightning arrester* bersifat isolative dan pada saat terjadi gangguan maka *lightning arrester* bersifat konduktif. Batas kerja dari Lighting arrester yaitu pada level tegangan 350V.

#### **2.2.3.6 Current Transformer (CT)**

*Current Transformer* (CT) atau biasa disebut trafo arus merupakan peralatan listrik yang difungsikan sebagai pengubah nilai arus tinggi ke rendah dan sebaliknya guna keperluan pengukuran ataupun proteksi.

#### **2.2.3.7 Potential Transformer (PT)**

*Potential Transformer* (PT) atau biasa disebut trafo tegangan merupakan peralatan listrik yang difungsikan sebagai pengubah nilai tegangan tinggi ke rendah guna untuk pengukuran ataupun pengamanan.

#### **2.2.3.8 Trafo Bantu (Auxilliary)**

Trafo bantu atau sering disebut dengan trafo pemakaian sendiri yaitu trafo yang dipakai untuk membantu pengoperasian secara keseluruhan pada gardu induk. Beberapa keperluan trafo bantu yang digunakan di gardu induk antara lain:



- a. *Rectifier*.
- b. Alat pendingin.
- c. Pencahayaan pada gedung kontrol, *switch yard*, dan sekeliling halaman gardu induk.
- d. Pompa air serta motor-motor listrik.
- e. Peralatan lain yang membutuhkan listrik bertegangan rendah.

#### **2.2.3.9 Busbar**

Busbar berfungsi sebagai titik (pusat) pertemuan/ hubungan antara transformator tenaga, SUTT, SKTT, dan peralatan listrik lain guna menerima dan menyalurkan daya listrik. Umumnya komponen/ bahan dari busbar yaitu tembaga ( *bar copper, hollow conductor*), dan aluminium.

#### **2.2.4 Forecasting (Peramalan)**

Dugaan atau perkiraan atas terjadinya peristiwa diwaktu yang akan datang disebut dengan peramalan. Adanya perbedaan waktu antara kesadaran akan kejadian (peristiwa) atas kebutuhan mendatang dengan waktu kejadian itu sendiri sehingga peramalan ini diperlukan. Peramalan akan sangat dibutuhkan ketika perbedaan waktu tersebut panjang terutama dalam penentuan kejadian (peristiwa) yang terjadi sehingga dapat dipersiapkan berbagai langkah antisipasi yang dibutuhkan guna menghadapi peristiwa tersebut.

Ada dua macam peramalan ( Assauri, 1984) diantaranya:

- a. Peramalan kualitatif

Peramalan yang didasarkan atas data kumulatif pada masa lampau disebut dengan peramalan kualitatif. Orang yang menyusunnya akan menentukan hasil dari peramalan itu sendiri, karena hasil tersebut ditentukan berdasarkan intuisi, tanggapan (pendapat), pengetahuan (wawasan), dan pengalaman penyusun.

- b. Peramalan kuantitatif

Peramalan yang tergantung dengan metode yang digunakan dalam peramalan disebut dengan dengan peramalan kuantitatif. Kualitas metode

yang digunakan ditentukan oleh perbedaan dari hasil peramalan dengan kenyataan yang sebenarnya terjadi. Metode peramalan akan semakin baik ketika selisih (penyimpangan) antara peramalan dengan kejadian yang terjadi semakin kecil.

Menurut waktunya peramalan dibagi menjadi tiga dan sesuai dengan topik yang diramalkan. Berikut merupakan tiga periode peramalan dalam peramalan beban listrik:

a. Peramalan jangka pendek

Peramalan ini dapat dilakukan dalam jangka waktu harian bahkan setiap jam dengan tujuan untuk studi perbandingan prakiraan beban listrik yang aktual.

b. Peramalan jangka menengah

Peramalan yang dilakukan dalam prakiraan periode mingguan atau bulanan dengan tujuan persiapan agenda (jadwal) persiapan operasional pembangkit.

c. Peramalan jangka panjang

Peramalan yang dilakukan untuk memprakirakan kondisi (keadaan) dalam kurun waktu beberapa tahun kedepan dengan tujuan untuk mempersiapkan, baik persiapan penggantian sebuah peralatan listrik ataupun yang lain.

#### **2.2.4.1 Metode Peramalan**

Secara umum berikut merupakan beberapa metode yang biasa digunakan oleh perusahaan listrik dalam melakukan sebuah peramalan beban listrik, diantaranya:

a. Metode analitis (*end use*)

Penyusunan metode analisis berdasar pada data analisis pemakaian akhir tenaga listrik di setiap sektor pemakai.

b. Metode ekonometri

Penyusunan metode ekonometri berdasar kepada dua kaidah, yaitu kaidah ekonomi dan statistik.

c. Metode *time series*

Penyusunan metode *time series* didasarkan pada korelasi (hubungan) data-data masa lampau dan mengabaikan factor penyebabnya (pengaruh ekonomi, cuaca/ iklim, teknologi, dan lain-lain).

d. Metode gabungan (metode analitis dan ekonometri)

Metode gabungan merupakan gabungan dari dua metode (analitis dan ekonometri), sehingga akan didapatkan suatu metode yang tanggap terhadap beberapa pengaruh, seperti:

1. Pengaruh aktivitas ekonomi
2. Pengaruh harga listrik
3. Pengaruh pergeseran pola penggunaan
4. Pengaruh kemajuan teknologi
5. Pengaruh kebijakan pemerintah
6. Pengaruh sosio demografi

e. Metode regresi

Dalam perhitungan statistik metode yang paling sering digunakan yaitu metode regresi. Untuk mencari hubungan antara konsumsi (pemakaian) energi dan faktor lain seperti cuaca, tipe hari dan jenis konsumen digunakan prakiraan regresi beban listrik. Metode regresi adalah metode yang memperhitungkan faktor yang diperkirakan menunjukkan sebab- akibat dengan satu atau lebih variabel bebas. Metode regresi ini bertujuan untuk mengetahui bentuk hubungan tersebut dan memprakirakan nilai mendatang dari variabel tidak bebas. Berikut merupakan beberapa metode regresi yang bisa digunakan dalam peramalan beban di gardu induk:

1. Regresi linier

Regresi linier merupakan regresi yang variabel bebasnya (variabel X) berpangkat paling tinggi satu. Dalam regresi linier variabel yang dilibatkan hanya ada dua yaitu variabel X dan Y. persamaan umum dari regresi linier adalah:

$$y = a + bx \dots (2.1)$$

dimana:

$$a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{(n)(\sum x)^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{(n)(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{(n)(\sum x)^2 - (\sum x)^2} \dots (2.2)$$

$$a = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n} \dots (2.3)$$

Keterangan:

$x$  = Variabel bebas

$y$  = Variabel tak bebas

$a$  = Koefisien intersepsi

$b$  = Koefisien kemiringan

## 2. Regresi eksponensial

Regresi eskponensial merupakan regresi pengembangan dari regresi linier yang memanfaatkan fungsi logaritmik. Dalam regresi eksponensial ada beberapa jenis *trend* yang tidak linier akan tetapi dapat dibuat linier dengan melakukan transformasi, seperti:

$$y = e^{a+bx} \text{ dapat diubah menjadi: } \ln y = \ln e (ax + bx) \dots (2.4)$$

$$\text{karena } \log e = 1, \text{ maka: } \ln y = a + bx \dots (2.5)$$

Jika  $\ln y = \ln y'$ , maka persamaannya akan menjadi persamaan linier, yaitu  $y' = a + bx$ . Nilai koefisien  $a$  dan  $b$  dicari melalui persamaan (2.2) dan (2.3).

## 3. Regresi linier berganda

Regresi yang menjelaskan hubungan antara peubah respon *Variable dependen* (variabel tergantung) dengan faktor yang mempengaruhi lebih dari satu prediktor *variable independen* (variabel bebas) disebut dengan regresi linier berganda. Regresi linier berganda mirip dengan regresi linier sederhana, pembedanya yaitu pada regresi linier berganda varibel bebasnya lebih dari satu

penduga. Regresi linier berganda bertujuan untuk mengukur intensitas hubungan antara dua variabel atau banyak variabel dan membuat dugaan prakiraan nilai Y atas X.

Berikut merupakan model umum regresi linier berganda untuk populasi:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2$$

Untuk mendapatkan nilai  $b_1$ ,  $b_2$ , dan  $a$  dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\sum x_1^2 = \sum X_1^2 - \frac{(\sum x_1)^2}{n}$$

$$\sum x_2^2 = \sum X_2^2 - \frac{(\sum x_2)^2}{n}$$

$$\sum y^2 = \sum Y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}$$

$$\sum x_1y = \sum X_1Y - \frac{\sum x_1y}{n}$$

$$\sum x_2y = \sum X_2Y - \frac{\sum x_2y}{n}$$

$$\sum x_1x_2 = \sum X_1X_2 - \frac{\sum x_1x_2}{n}$$

Sehingga:

$$b_1 = \frac{[(\sum x_2^2)(\sum x_1y) - (\sum x_2y)(\sum x_1x_2)]}{[(\sum x_1^2)(\sum x_2^2) - (\sum x_1x_2)^2]}$$

$$b_2 = \frac{[(\sum x_1^2)(\sum x_2y) - (\sum x_1y)(\sum x_1x_2)]}{[(\sum x_1^2)(\sum x_2^2) - (\sum x_1x_2)^2]}$$

$$a = \frac{(\sum y) - (b_1 \sum x_1) - (b_2 \sum x_2)}{n}$$

Keterangan:

$a$  = konstanta

$y$  = variabel terikat/ tidak bebas

$b_1, b_2 \dots b_k$  = koefisien regresi linier berganda

$x_1, x_2 \dots x_k$  = variabel bebas

#### **2.2.4.2 Model Pendekatan Sektoral Untuk Prakiraan Beban**

Pembuatan model merupakan tahapan akhir dari sebuah penyusunan prakiraan beban. Model tersebut berupa fungsi matematis yang digunakan untuk memformulasikan kebutuhan tenaga listrik sebagai fungsi variabel yang dipilih dan dari model tersebut akan dihitung kebutuhan listrik.

Model sektoral merupakan model yang menggunakan pendekatan sektoral pemakai. Fungsi dari model sektoral digunakan dalam pengamatan pertumbuhan beban listrik pada tiap-tiap sektor beban dan digunakan dalam penyusunan prakiraan tingkat distribusi atau wilayah. Dalam prakiraan model sektoral beban difungsikan sebagai  $Y$  sedangkan jumlah penduduk dan PDRB difungsikan sebagai  $X_1$  dan  $X_2$ .

#### **2.2.4.3 Faktor Penting Prakiraan**

Dalam sebuah prakiraan ada beberapa faktor penting yang perlu diperhatikan seperti faktor cuaca, kelompok konsumen, dan waktu. Data historis beban dan cuaca digunakan dalam prakiraan jangka menengah dan jangka panjang. Sifat beban akan berbeda-beda dalam minggu yang berbeda. Parameter ramalan cuaca merupakan faktor penting pada prakiraan beban jangka pendek sehingga dapat dikatakan kondisi cuaca mempengaruhi beban listrik.

#### **2.2.5 Kebutuhan Beban**

Beban terminal terima secara rata-rata dalam selang waktu tertentu disebut dengan kebutuhan sistem tenaga listrik. Pada suatu daerah kebutuhan

listrik tergantung dari kondisi penduduk, pertumbuhan ekonomi, dan *planning* pembangunan di waktu mendatang.

#### 2.2.5.1 Karakteristik Beban

Menurut kegiatan pemakaian listrik, umumnya konsumen listrik dapat dikelompokkan menjadi konsumen industri, publik, komersil, dan rumah tangga. Konsumen tersebut mempunyai karakteristik beban yang berbeda, hal ini berkaitan dengan pola pemakaian energi listrik di masing-masing pemakai. Untuk pemakaian rumah tangga pola pembebanan ditunjukkan oleh adanya fluktuasi konsumsi listrik yang cukup besar pada malam hari. Pada konsumen komersil akan memiliki beban puncak di malam hari, sedangkan pada konsumen industri fluktuasi energi listrik terjadi pada siang hari.

#### 2.2.5.2 Beban Rata-Rata

Perbandingan antara energi yang terpakai dengan periode tertentu disebut dengan beban rata-rata (Br). Persamaan untuk periode satu tahun adalah sebagai berikut:

$$\text{Beban rata - rata} = \frac{\text{kWh Produksi Total 1 Tahun}}{8760 \text{ jam}} \quad (\text{watt})$$

#### 2.2.5.3 Faktor Beban

Perbandingan antara beban rata-rata dengan beban puncak yang diukur pada satu periode tertentu disebut dengan faktor beban. Beban puncak yang dimaksud yaitu beban puncak sesaat dalam selang waktu tertentu. Berikut ini merupakan persamaan dari faktor beban:

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

Beban puncak akan selalu lebih besar dari beban rata-rata, sehingga pada beban rata-rata faktor beban akan selalu lebih kecil dari satu.

### 2.2.6 Evaluasi Kemampuan Transformator

- Pengertian kemampuan

Menurut **KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia)** kemampuan merupakan suatu kesanggupan dalam melakukan sesuatu.

- **Pengertian Kapasitas**

Menurut **Stevenson (2000,P 712)** kapasitas adalah beban maksimal yang dapat ditangani oleh sebuah unit produksi.

- **Pengertian evaluasi**

Menurut **Stark & Thomas (1994)** evaluasi adalah sebuah proses atau kegiatan pemilihan, pengumpulan, analisis, dan penyajian informasi yang bisa digunakan untuk dasar keputusan serta penyusunan program selanjutnya.

- **Kemampuan transformator**

Kemampuan transformator dipakai untuk mentransformasikan daya/energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya dengan nilai kapasitas yang sudah ditetapkan padasebuah transformator.

Dari beberapa pengertian menurut para ahli dan sumber lain maka kemampuan transformator bisa diartikan sebagai penaksiran/penilaian, pengukuran terhadap kemampuan transformator yang difungsikan untuk mentransformasikan daya/ energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya dengan niai kapasitas yang sudah ditetapkan pada sebuah transformator.

Evaluasi transformator bertujuan untuk mengetahui berapa besar pertumbuhan beban dan sampai kapan transformator masih dapat melayani beban tinggi hingga direncanakan adanya penambahan transformator baru/ penambahan gardu induk baru.

#### **2.2.6.1 Tentang Transformator**

Transformator merupakan sebuah peralatan listrik yang difungsikan untuk mentransformasikan energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, melalui suatu magnet dari inti besi yang berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Prinsip kerja transformator adalah hokum amper dan hukun faraday, yaitu: arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya. Penggunaan transformator sangat luas baik dibidang elektronika maupun tenaga listrik. Dalam sistem tenaga penggunaan transformator memungkinkan terpilihnya tegangan



yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan seperti akan terjadi tegangan tinggi dalam pengiriman daya/ energi listrik jarak jauh.

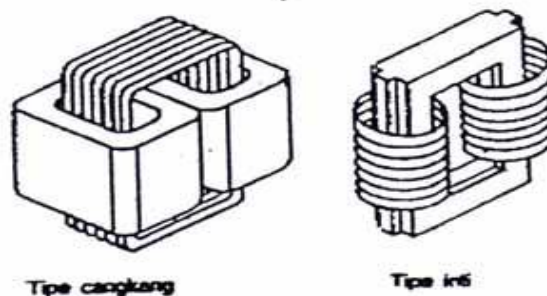
Ada tiga kelompok pemakaian transformator dibidang tenaga listrik, diantaranya:

- a. Transformator daya.
- b. Transformator distribusi.
- c. Transformator pengukuran (transformator arus dn transformator tegangan).

#### a. Prinsip kerja transformator

Prinsip kerja transformator yaitu berdasarkan hukum ampere dan hukum Faraday: “Arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik”. Apabila salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak-balik, maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah yang berakibat di sisi primer mengalami induksi, sedangkan pada sisi sekunder yaitu menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah-ubah pula sehingga timbul induksi pada sisi sekunder. Akibatnya, antara dua ujung terdapat beda tegangan.

Ada dua macam transformator berdasarkan cara melilitkannya, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.

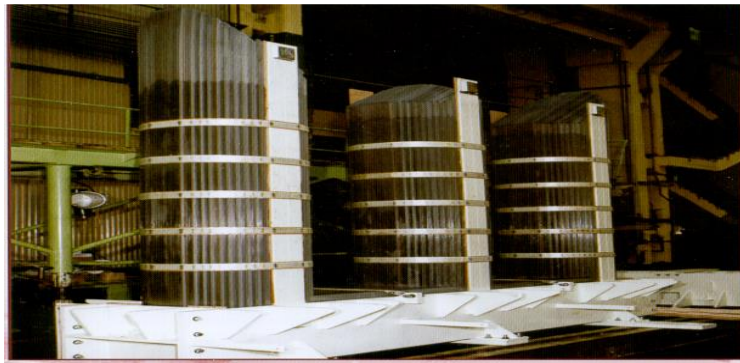


Gambar 2.3 Tipe pada kumparan transformator

## b. Bagian utama transformator

### 1. Inti besi

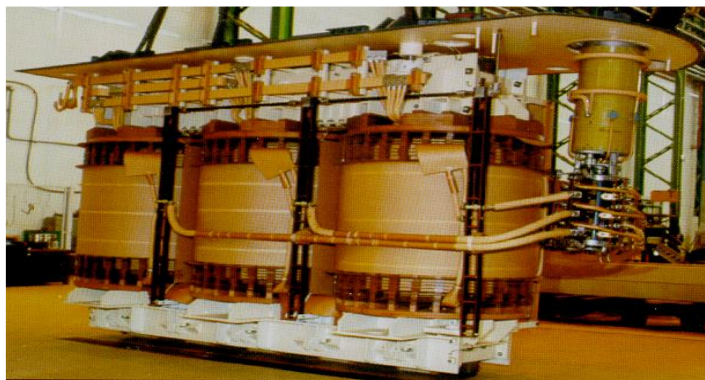
Fungsi dari inti besi yaitu untuk mempermudah jalannya fluks yang ditimbulkan oleh arus listrik melalui kumparan. Bahan dari inti besi yaitu lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi guna mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus pusar atau arus eddy (*eddy current*).



Gambar 2.4 Inti besi

### 2. Kumparan transformator

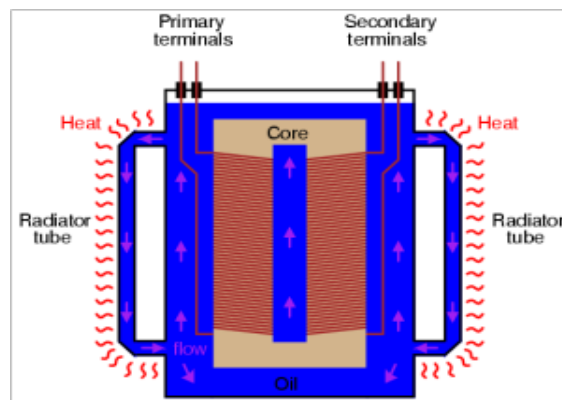
Kumparan transformator merupakan belitan yang terdiri dari belitan batang (kawat) berisolasi yang mengelilingi inti besi. Pada saat arus bolak balik mengalir di belitan tembaga tersebut, maka inti besi akan terinduksi dan menimbulkan fluks magnetik. Ada dua kumparan pada sebuah transformator, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder.



Gambar2.5 Kumparan transformator

### 3. Minyak transformator

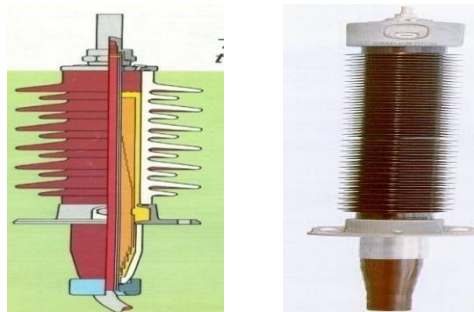
Minyak transformator berfungsi sebagai isolator dan pendingin. Minyak transformator sebagai isolator berarti mengisolasi kumparan di dalam transformator agar tidak terjadi loncatan bunga api listrik yang diakibatkan karena tegangan tinggi. Minyak transformator berfungsi sebagai pendingin yaitu mengambil panas yang ditimbulkan pada saat transformator berbeban kemudian melepaskannya dan melindungi komponen yang berada di dalamnya terhadap oksidasi dan korosi.



Gambar 2.6 Minyak transformator

### 4. Bushing

Sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar disebut dengan *bushing*. *Bushing* terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator.



Gambar 2.7 Bushing

## 5. Tangki dan konservator

Umumnya bagian-bagian transformator yang terendam minyak transformator ditempatkan dalam tangki. Konservator berfungsi sebagai penampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo (kenaikan suhu).



Gambar 2.8 Konservator

### 2.2.6.2 Rugi tembaga ( $P_{CU}$ )

Penyebab rugi tembaga yaitu adanya arus yang mengalir pada tembaga. Umumnya kumparan terbuat dari gulungan kawat (tembaga) yang cukup panjang, sehingga gulungan kawat panjang tersebut akan meningkatkan hambatan dalam kumparan. Ketika transformator dialiri arus listrik maka hambatan kumparan akan mengubah sejumlah kecil arus listrik menjadi panas. Semakin besar hambatan maka akan semakin besar pula panas yang akan timbul. Berikut merupakan persamaan dari rugi tembaga:

$$P_{CU} = I^2R(\text{watt})$$

Keterangan:

$P_{CU}$  = Rugi tembaga

$I$  = Arus

$R$  = Hambatan kawat

Akibat arus beban yang berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan tergantung kepada beban.

### 2.2.6.3 Rugi Inti Besi

Ada dua jenis rugi inti besi, diantaranya:

a. Rugi histeris

Rugi histeris terjadi karena adanya gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet dalam magnet sehingga timbul panas pada moekul inti besi yang mengakibatkan terjadinya kerugian energi.

b. Rugi arus eddy

Rugi arus eddy diakibatkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Hal tersebut diakibatkan oleh adanya aliran fluks magnetik disekitaran inti besi. Apabila lempengan pada inti besi dibuat tebal maka akan banyak menimbulkan kerugian energi, sehingga pada inti besi dibuat lempengan berlapis-lapis untuk mengurangi kerugian energi tersebut.

### 2.2.6.4 Efisiensi Transformator

Efisiensi adalah perbandingan antara daya yang keluar dan daya yang masuk. Efisiensi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta = (P_{out} / P_{in}) \times 100\% \quad (\text{dalam satuan } \%)$$

Keterangan:

$P_{in}$  = daya input transformator

$P_{out}$  = daya output transformator

### 2.2.6.5 Pembebanan Transformator

Pembebanan transformator diperoleh dari hasil prakiraan beban dibagi dengan kapasitas transformator dan kapasitas transformator diperoleh data transformator yang dipakai. Berdasarkan SPT. PLN No.50 tahun 1997, ada empat kalsifikasi dalam pembebanan yaitu:

a. Beban kecil

Keadaan (kondisi) beban kecil pada transformator terjadi ketika beban transformator kurang dari 60%. Pada kondisi ini, kinerja transformator tidak efisien karena arus yang mengalir pada transformator kecil sehingga hanya mempengaruhi tembaga dan tidak akan mempengaruhi inti besi.

b. Beban optimal

Dapat dikatakan sebagai beban optimal ketika beban transformator diantara 60% hingga 80%.

c. Beban berat

Kondisi beban berat pada transformator terjadi ketika beban transformator tersebut berada diatas 80% sampai dengan 100%, akibatnya transformator akan mengalami panas yang berlebih.

d. *Overload*

Overload akan terjadi ketika terjadi pembebanan pada transformator diatas 100%, sehingga transformator bekerja terlalu berat yang mengakibatkan transformator padas dan dapat terbakar.

Berikut merupakan persamaan dari pembebanan transformator:

$$\% \text{Pembelian} = \frac{Y_x}{K_t} \times 100\% \text{ (dalam satuan \%)}$$

Keterangan:

$Y_x$  = pembebanan di tahun x (MVA)

$K_t$  = kapasitas transformator (MVA)

#### **2.2.6.6 Capacity Balance Gardu Induk**

Cara untuk mengetahui batas kapasitas transformator pada gardu induk yang mendukung beban, dan dikaitkan dengan peningkatan kebutuhan tenaga listrik berdasarkan prakiraan disebut dengan *capacity balance* gardu induk. Berikut merupakan syarat-syarat gardu induk sesuai dengan perencanaan sistem penyaluran dan pusat pendidikan dan pelatihan PT PLN (Persero):

- a. Dalam satu gardu induk 150 kV hanya diijinkan maksimal tiga buah transformator dengan kapasitas masing-masing 60 MVA.
- b. Kapasitas gardu induk maksimal 3 x 60 MVA untuk 150 kV dan 3 x 30 MVA di 70 kV.
- c. Pembebanan yang dilakukan tidak boleh melebihi 100% dari kapasitas transformator.
- d. Jika beban mendekati 80%, ada beberapa hal yang perlu dipersiapkan:
  1. Mengganti transformator dengan kapasitas yang lebih besar (*Uprating*), jika kapasitas transformator dibawah 60 MVA.
  2. Ditambahkan transformator baru jika kapasitas transformator tersebut 60 MVA dan jumlah transformator di gardu induk tersebut kurang dari 3.