

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Penelitian Terdahulu**

Pada penelitian ini memperhatikan penelitian sebelumnya termasuk jurnal-jurnal yang berhubungan dengan penelitian ini yang akan dijelaskan Pada penelitian ini mengutip beberapa referensi dari penelitian sebelumnya termasuk jurnal-jurnal yang berhubungan dengan penelitian ini yang akan dijelaskan antara lain:

Syamsul Bahri, (2015) Studi Pertambahan Beban Transformator Daya pada Gardu Induk Parit Baru PT. PLN (Persero) Cabang Pontianak, Peramalan beban menggunakan regresi Linier dan regresi Eksponensial. Berdasarkan hasil perhitungan perkiraan beban dan menurut SPLN 17A/79, pada tahun 2016 beban puncak yang terjadi sebesar 30,904 MVA sudah melewati kapasitas transformator daya pada Gardu Induk Parit Baru dan perlu diantisipasi, sehingga sebelum tahun 2016 kapasitas Transformator Daya pada Gardu Induk Parit Baru sudah harus dinaikkan.

Jimmy Trio Putra, (2021) Peramalan Beban pada Gardu Induk Mantingan dalam Penentuan Kapasitas Transformator, dengan Metode Regresi Linear Metode yang digunakan adalah metode regresi linear dengan perencanaan satu tahap,.Penelitian menunjukkan bahwa GI baru dibangun dengan kapasitas 60 MVA dan besar nilai pembebanan trafo Gardu Induk Mantingan selama 8 tahun memiliki rata-rata sebesar 41,41% serta biaya pokok penyediaan listik (BPP) rata-rata sebesar Rp. 2.101.

Rahmat Arfan Abdillah, (2020) Analisis Prakiraan Kebutuhan Energi Listrik Tahun 2019-2028 di Pekanbaru Menggunakan Metode Regresi Linier Sederhana Pertambahan penduduk sangat berpengaruh terhadap pemakaian energi listrik. Populasi penduduk terus meningkat sehingga Jumlah kebutuhan energi listrik di Pekanbaru setiap tahunnya mengalami kenaikan yaitu jumlah total pemakaian energi listrik pada tahun 2019-2028 sebesar 20.245.511,34 MWH Jumlah pemakaian energi listrik pada tahun 2019-2028 selalu meningkat berdasarkan hasil perhitungan manual yang telah dilakukan. Pada sektor rumah tangga yaitu

sebesar 11.407.614,34 MWH, sektor industri yaitu sebesar 916.835,79 MWH, sektor komersial yaitu sebesar 6.897.186,46 MWH, sektor publik yaitu sebesar 1.023.781,84 MWH. Pemakaian energi listrik terbesar terdapat pada sektor rumah tangga yaitu sebesar 11.407.614,34 MWH sedangkan untuk pemakaian energi listrik terkecil terdapat pada sektor industri yaitu sebesar 916.835,79 MWH.

Sulistiyono (2017) Peramalan Produksi dengan Metode Regresi Linier Berganda, Hasil penelitian didapatkan persamaan matematika regresi yang mempengaruhi jumlah produksi adalah variabel kerusakan mesin (KM) dan harga bahan baku (HBB) serta jumlah tenaga kerja (JTK) adalah:  $Y = a + bX_1 + bX_2 + bX_3$  dengan nilai  $Y = 500.308 + 47.869 \text{ KM} + 7.2750000 \text{ HBB} - 3.460 \text{ JTK}$ , hal ini berarti pada nilai konstanta 500.308 menyatakan bahwa jika tidak ada variabel kerusakan mesin, harga bahan baku dan jumlah tenaga kerja, maka jumlah produksi sebesar 500.300. Kemudian nilai koefisien untuk variabel independent kerusakan mesin ( $X_1_{\text{KM}}$ ) bernilai positif sebesar 47.869 hal ini menunjukkan bahwa dengan mengasumsikan diabaikannya variabel independen lainnya, jika variabel kerusakan mesin semakin berkurang 1 % maka dapat mempengaruhi peningkatan jumlah produksi. Selanjutnya nilai koefisien untuk variabel independent harga bahan baku ( $X_2_{\text{HBB}}$ ) bernilai positif sebesar 7.2700000 hal ini menunjukkan bahwa dengan mengasumsikan diabaikannya variabel independen lainnya, jika variabel harga bahan baku meningkat sebesar 1 %, maka dapat mempengaruhi peningkatan jumlah produksi. Serta nilai koefisien untuk variabel independent jumlah tenaga kerja ( $X_3_{\text{JTK}}$ ) bernilai negatif sebesar - 3.460 hal ini menunjukkan bahwa dengan mengasumsikan diabaikannya variabel independen lainnya, jika variabel jumlah tenaga kerja mengalami peningkatan 1 %, maka mempengaruhi penurunan jumlah produksi sebesar 3.640

Ryan Septyawan (2018) Analisis Permalan Kebutuhan Energi Listrik PLN Area Batam Menggunakan Metode Regresi Linear, Prediksi total kenaikan jumlah pelanggan listrik pada beban industri adalah sebesar 104 pelanggan (rata-rata pertumbuhan per tahun sebesar 4,33%) dan pada beban non- industri sebesar 81.632 pelanggan (rata-rata pertumbuhan per tahun sebesar 4,11%). Prediksi total kenaikan jumlah pendapatan penjualan pada beban industri sebesar 414.934 Juta Rupiah (rata-rata pertumbuhan per tahun sebesar 7,99%) dan pada beban non-

industri sebesar 697.428 Juta Rupiah (rata-rata pertumbuhan per tahun sebesar 5,30%)

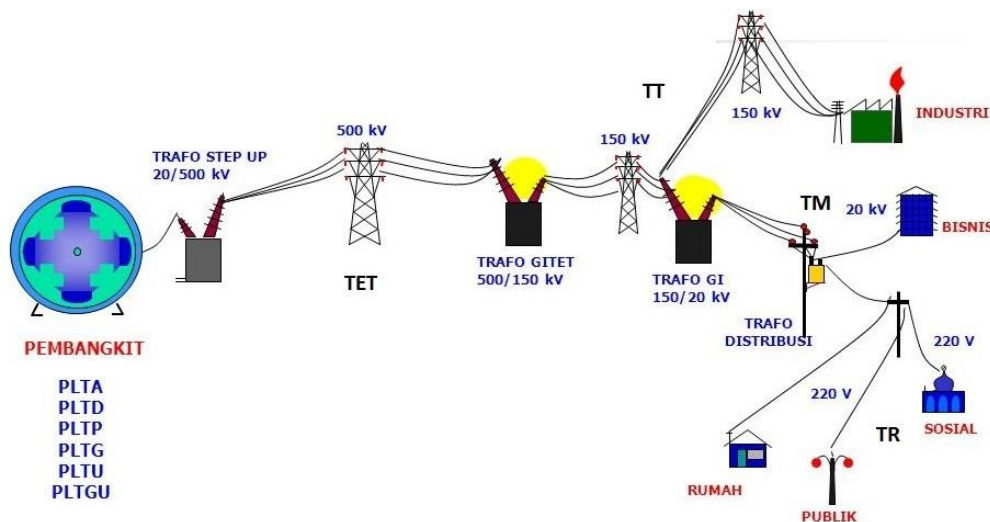
Pada penelitian ini menganalisa peramalan beban GI pada Sistem Khatulistiwa PT PLN (Persero) UP3B Kalimantan Barat dengan menggunakan 3 (tiga) jenis regresi yaitu : regresi Linier, regresi Eksponensial, dan regresi Power. Salah satu dari ketiga jenis regresi tersebut dipilih yang mempunyai nilai standar kesalahan terkecil untuk peramalan beban GI pada Sistem Khatulistiwa PT PLN (Persero) UP3B Kalimantan Barat sebagai bahan evaluasi perencanaan kapasitas pembebanan GI di masa yang akan datang.

## **2.2. Sistem Tenaga Listrik**

Tenaga listrik dibangkitkan dalam Pusat-pusat Listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTP dan PLTD kemudian disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (step up transformator) yang ada di pusat listrik. Saluran transmisi tegangan tinggi di PLN kebanyakan mempunyai tegangan 66kV, 150kV, dan 500kV. Khusus untuk tegangan 500 KV dalam praktek saat ini disebut sebagai tegangan ekstra tinggi. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah tenaga listrik ke Gardu Induk (GI) untuk diturunkan tegangannya melalui transformator penurun tegangan (step down transformator) menjadi tegangan menengah atau yang juga disebut sebagai tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20kV, 12kV, dan 6kV. Kecenderungan saat ini menunjukkan bahwa tegangan distribusi primer PLN yang berkembang adalah 20kV.

Jaringan setelah keluar dari GI biasa disebut jaringan distribusi, sedangkan jaringan antara Pusat Listrik dengan GI disebut jaringan transmisi. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer maka kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dalam gardu-gardu distribusi menjadi tegangan rendah dengan tegangan 380/220 Volt, kemudian disalurkan melalui Jaringan Rendah untuk selanjutnya disalurkan ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) PLN melalui Sambungan Rumah. Konsumen yang mempunyai daya tersambung besar tidak dapat disambung melalui Jaringan Tegangan Rendah melainkan disambung

langsung pada jaringan Tegangan Menengah bahkan ada pula yang disambung pada jaringan Transmisi Tegangan Tinggi, tergantung besarnya daya yang tersambung. [7], [11].



**Gambar 2.1** Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik

Sumber : <https://www.imaduddin.files.wordpress.com>

## 2.3 Gardu Induk

Gardu induk adalah alat penghubung listrik dari jaringan transmisi ke jaringan distribusi primer. Gardu Induk merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi) tenaga listrik, atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran yang disusun menurut pola tertentu dengan pertimbangan teknis, ekonomis, serta keindahan.[7]

### 2.3.1 Klasifikasi Gardu Listrik.

Klasifikasi gardu listrik dapat dibedakan menurut dua hal :

#### 1. Menurut lokasi dan fungsi.

Merurut lokasinya di dalam sistem tenaga listrik, fungsi dan tegangannya (tinggi, menengah atau rendah) maka gardu listrik dapat dibagi :

##### a. Gardu Induk.

Adalah gardu listrik yang mendapatkan daya dari satuan transmisi atau subtransmisi suatu sistem tenaga listrik untuk kemudian menyalurkannya ke daerah beban (industri, kota dan sebagainya) melalui saluran distribusi primer.

b. Gardu Distribusi.

Adalah gardu listrik yang mendapatkan daya dari saluran distribusi primer yang menyalurkan tenaga listrik ke pemakai dengan tegangan rendah.

**2. Menurut penempatan peralatannya.**

Menurut penempatannya, gardu listrik dapat dibagi :

a. Gardu Induk pemasangan dalam.

Gardu Induk dimana semua peralatannya (switchgear, isolator dan sebagainya) di pasang di dalam gedung/ruangan tertutup.

b. Gardu Induk pemasangan luar.

Gardu Induk dimana semua peralatannya (switchgear, isolator dan sebagainya) di tempatkan di udara terbuka.

**3. Menurut isolasi yang digunakan.**

Gardu Induk yang menggunakan isolasi udara :

- Adalah gardu induk yang menggunakan isolasi udara antara bagian yang bertegangan yang satu dengan bagian yang bertegangan lainnya.
- Gardu Induk ini berupa gardu induk konvensional, memerlukan tempat terbuka yang cukup luas.



**Gambar 2.2** Gardu Induk Konvensional

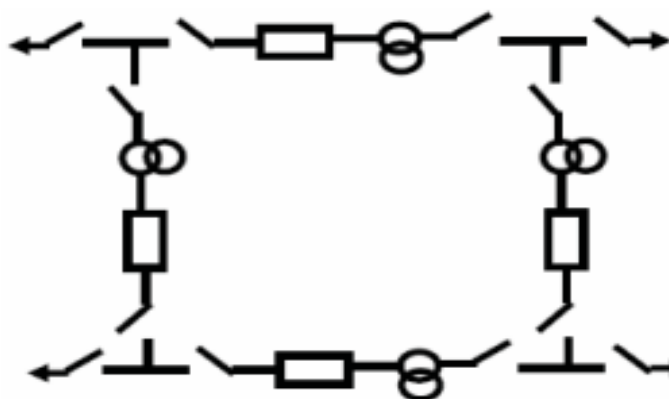
Sumber : <https://repositori.kemendikbud.go.id>

#### 4. Menurut sistem rel (busbar).

Rel (busbar) merupakan titik hubungan pertemuan (*connecting*) antara transformator daya, SUTT/ SKTT dengan komponen listrik lainnya, untuk menerima dan menyalurkan tenaga listrik. Berdasarkan sistem rel (busbar), gardu induk dibagi menjadi beberapa jenis, sebagaimana tersebut di bawahini :

##### a. Gardu Induk sistem ring busbar :

Adalah gardu induk yang busbarnya berbentuk ring. Pada gardu induk jenis ini, semua rel (busbar) yang ada, tersambung (terhubung) satu dengan lainnya dan membentuk ring (cincin).

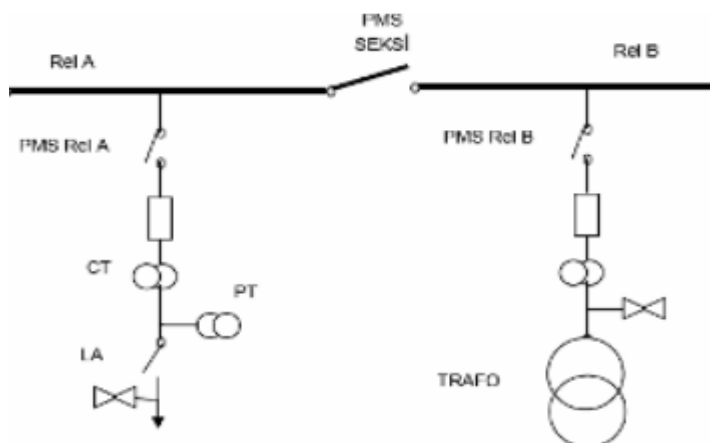


**Gambar 2.3** Single Line Diagram Gardu Induk Single Busbar

Sumber : <https://repositori.kemendikbud.go.id>

##### b. Gardu Induk sistem single busbar :

Adalah gardu induk yang mempunyai satu (single) busbar. Pada umumnya gardu dengan sistem ini adalah gardu induk yang berada pada ujung (akhir) dari suatu sistem transmisi.

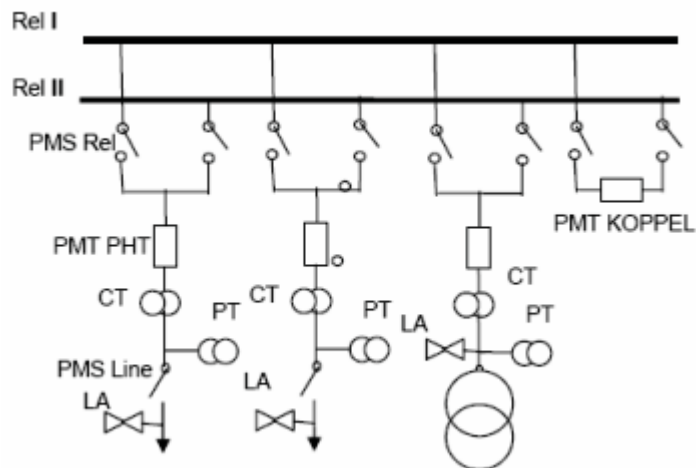


**Gambar 2.4** Single Line Diagram Gardu Induk Single Busbar

Sumber : <https://repositori.kemendikbud.go.id>

c. Gardu Induk sistem double busbar :

Adalah gardu induk yang mempunyai dua (*double*) busbar. Gardu induk sistem double busbar sangat efektif untuk mengurangi terjadinya pemadaman beban, khususnya pada saat melakukan perubahan sistem (*manuver sistem*). Jenis gardu induk ini pada umumnya yang banyak digunakan.

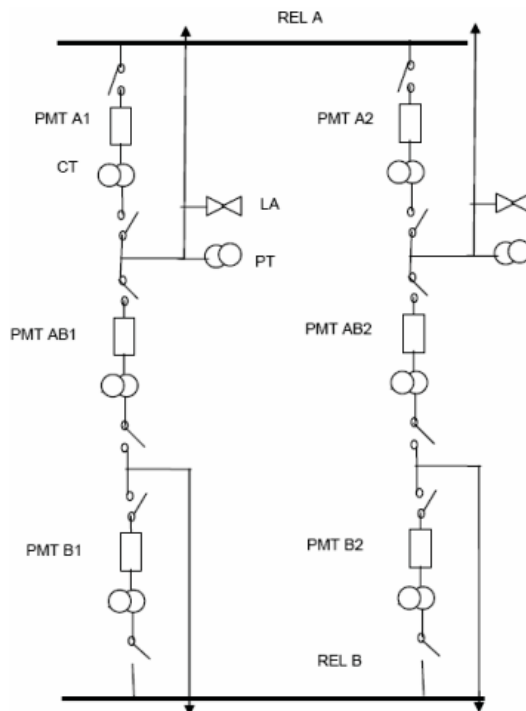


**Gambar 2.5** Single Line Diagram Gardu Induk Sistem Double Busbar

Sumber : <https://repositori.kemendikbud.go.id>

d. Gardu Induk sistem satu setengah (*on half*) busbar :

Adalah gardu induk yang mempunyai dua (*double*) busbar. Pada umumnya gardu induk jenis ini dipasang pada gardu induk di pembangkit tenaga listrik atau gardu induk yang berkapasitas besar. Dalam segi operasional, gardu induk ini sangat efektif, karena dapat mengurangi pemadaman beban pada saat dilakukan perubahan sistem (*manuver sistem*). Sistem ini menggunakan 3 buah PMT dalam satu diagonal yang terpasang secara deret (*seri*).



**Gambar 2.6** Single Line Diagram Gardu Induk Satu Setengah Busbar  
 Sumber : <https://repositori.kemendikbud.go.id>

### 2.3.2 Peralatan dan Fasilitas Gardu Induk.

Peralatan dan Fasilitas suatu Gardu Induk pada umumnya adalah :

**1. Instalasi transformator tenaga dan peralatan penyaluran tenaga listrik yang terdiri dari :**

- a. Transformator daya
- b. Peralatan tegangan tinggi (sisi primer), antara lain :
  - Lightning arrester.
  - Spark rod.
  - Pemutus tenaga (PMT).
  - Saklar pemisah (PMS).
  - Trafo arus (CT).
  - Trafo tegangan (PT).
- c. Peralatan tegangan menengah (sisi sekunder).

Peralatan untuk tegangan menengah (sisi sekunder) ragamnya adalah sama dengan peralatan untuk tegangan tinggi (sisi primer).



d. Peralatan kontrol.

Digunakan untuk mengontrol palayanan gardu induk dari suatu tempat dari dalam gedung kontrol yang terdiri dari :

- Panel kontrol.
- Panel relay.
- Meter-meter pengukuran.
- Peralatan telekomunikasi (telepon, PLC dan radio pemancar).
- Batere dan rectifier.
- Dan lain-lain.

e. Peralatan lain.

Kecuali peralatan yang disebut diatas masih ada peralatan-peralatan seperti :

- Petersen coil.
- Reaktor
- Statik kapasitor.
- Resistor dan lain-lain

Gunanya untuk memperbaiki sistem penyaluran tenaga listrik.

### 2.3.3 Fungsi dari Peralatan Gardu Induk.

#### 1. Lighting arrester

Berfungsi untuk mengamankan instalasi (peralatan listrik pada instalasi) dari gangguan tegangan lebih yang di akibatkan oleh sambaran petir maupun oleh surja petir.

#### 2. Pemisah (PMS).

##### a. Pemisah tanah

Berfungsi untuk mengamankan peralatan dari sisa tegangan yang timbul sesudah SUTT di putuskan, atau induksi tegangan dari penghantar, hal ini perlu untuk keamanan dari orang yang bekerja pada instalasi.

##### b. Pemisah peralatan.

Berfungsi untuk mengisolasi peralatan listrik dari peralatan yang bertegangan. Pemisah di operasikan tanpa beban.

### 3. Pemutus tenaga (PMT).

Berfungsi untuk memutuskan hubungan tenaga listrik dalam keadaan gangguan maupun dalam keadaan berbeban dan proses ini harus dapat dilakukan dengan cepat. Pemutus tenaga listrik dalam keadaan gangguan akan menimbulkan arus yang relatif besar, pada saat tersebut PMT bekerja sangat berat. Bila kondisi peralatan PMT menurun karena kurangnya pemeliharaan, sehingga tidak sesuai lagi kemampuan dengan daya yang diputuskannya, maka PMT tersebut akan dapat rusak.

### 4. Trafo tegangan (PT)

Berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah, yang diperlukan untuk alat-alat ukur (pengukuran) dan alat pengaman (proteksi).

### 5. Trafo arus (CT)

Berfungsi untuk menurunkan arus besar pada tegangan tinggi menjadi arus kecil pada tegangan rendah untuk keperluan pengukuran dan pengaman (proteksi).

### 6. Rel (busbar).

Berfungsi sebagai titik pertemuan/hubungan trafo-trafo tenaga, SUTT-SUTT dan peralatan listrik lainnya untuk menerima dan menyalurkan tenaga/daya listrik. Bahan dari rel umumnya terbuat dari bahan tembaga (*bar copper*, atau *hollow konduktor*), ACSR : almalec atau alumunim (busbar alumunium atau *hollow conductor*).

### 7. Trafo daya

Trafo tenaga berfungsi menyalurkan tenaga/daya dari tegangan tinggi atau sebaliknya (mentransformasikan tegangan).

### 8. Panel kontrol.

Jenis-jenis panel kontrol yang ada dalam suatu Gardu Induk terdiri dari panel kontrol utama, panel relay, panel pemakaian sendiri.

- 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 sakelar dan diagram rail. Diagram rel (busbar), sakelar dan lampu indikator diatur letak dan hubungannya sesuai dengan rangkaian yang sesungguhnya sehingga keadaannya dapat dilihat dengan mudah.



**Gambar 2.7** Panel Kontrol Utama.

Sumber : <https://repositori.kemendikbud.go.id>

- b. Pada panel relay terpasang relay pengaman untuk SUTT, relay pengaman untuk trafo dan sebagainya. Bekerjanya relay dapat diketahui dari penunjukan pada relay itu sendiridan 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 rangkaiannya sudah rumit, maka panel relay terpasang dalam panel tersendiri.



**Gambar 2.8** Panel Relay

Sumber : <https://repositori.kemendikbud.go.id>

### **9. Batere.**

Sumber tenaga untuk sistem kontrol dan proteksi selalu harus mempunyai keandalan dan stabilitas yang tinggi, maka batere dipakai sebagai sumber tenaga kontrol dan proteksi di dalam Gardu Induk. Peranan dari batere adalah sangat penting karena justru pada saat gangguan terjadi, batere inilah yang merupakan sumber tenaga untuk menggerakkan alat-alat kontrol dan proteksi.

### **10. Sistem pembumian titik netral.**

Pembumian titik netral suatu sistem dapat melalui kumparan Petersen, tahanan (resistor) atau langsung (solidly) yang berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan fasa ke bumi pada sistem. Arus yang melalui pembumian merupakan besaran ukur untuk alat proteksi. Pada trafo yang sisi primernya dibumikan dan sisi sekundernya juga dibumikan, maka gangguan fasa ke bumi disisi primer selalu dirasakan pada sisi sekunder dan sebaliknya.

### **11. Kapasitor.**

Kapasitor berfungsi untuk memperbaiki faktor kerja dan tegangan dan jaringan tenaga listrik.

### **12. Reaktor.**

Reaktor berfungsi untuk mengurangi/membatasi arus hubung singkat dan arus switching dalam jaringan tenaga listrik.

## **2.4 Transformator**

Transformator berasal dari kata transformatie yang berarti perubahan, yang mempunyai pengertian suatu peralatan listrik yang tidak berputar yang meneruskan tegangan listrik dari suatu rangkaian ke rangkaian listrik yang lain pada frekuensi yang sama dan tegangan yang sama atau berbeda dengan perantara gandingan magnet. Transformator (trafo) bisa disebut sebagai alat untuk menaikkan dan menurunkan tegangan AC. Transformator ini berbentuk empat persegi panjang dimana didalamnya terdapat susunan plat baja berbentuk huruf E.

Transformator terbuat dari bahan kawat tembaga berukuran kecil yang melilit plat tersebut yang membentuk kumparan/lilitan primer dan sekunder. Tegangan dan arus pada kumparan primer dan pada kumparan sekunder dapat

diubah-ubah sesuai dengan yang dikehendaki. Kumparan dimana fluks berasal dinamakan kumparan primer atau lilitan primer, sedangkan kumparan yang terinduksi dinamakan lilitan sekunder. [8]

#### **2.4.1 Transformator Daya**

Transformator daya (trafo daya) merupakan suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menaikkan tenaga atau daya listrik dari pembangkit untuk kemudian disalurkan ke Gardu Induk.

Pada penyaluran tenaga listrik akan terjadi kerugian daya sebesar  $I^2R$  (Watt). Kerugian ini akan banyak berkurang apabila tegangan dinaikkan. Dengan menaikkan tegangan mengakibatkan arus pada saluran kecil. Apabila arus pada saluran kecil, maka rugi daya akan menurun. Pada saluran transmisi tenaga listrik lebih sering mempergunakan tegangan tinggi. Tegangan transmisi yang tertinggi di Indonesia pada saat ini adalah 500 KV. Hal ini dilakukan terutama untuk mengurangi kerugian energi listrik yang terjadi. Dengan menaikkan tegangan listrik di pembangkit dari tegangan generator yang biasanya berkisar 6 sampai 20 KV, kemudian menurunkannya lagi pada akhir saluran ketegangan yang lebih rendah, yang dilakukan dengan transformator tegangan. [8].

#### **2.4.2 Transformator Distribusi**

Transformator distribusi (trafo distribusi) ini berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah 20 kV ke tegangan rendah 400/230 Volt. Disebut trafo distribusi karena trafo ini digunakan untuk mendistribusikan energi listrik atau menyalurkan energi listrik dari Gardu Induk ke konsumen. [8]

Ciri-cirinya dari trafo distribusi yaitu:

- Jumlah lilitan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan sekunder
- Tegangan primer lebih besar dari pada tegangan sekunder
- Kuat arus primer lebih kecil dari pada kuat arus sekunder

#### **2.4.3 Bagian-Bagian Transformator Daya**

Suatu transformator daya terdiri atas beberapa bagian yang mempunyai fungsi masing-masing :

## 1. Bagian Utama

### a. Inti Besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh "*Eddy Current*". [8]

### b. Kumparan Transformator

Beberapa belitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat seperti karton, pertinax dan lain-lain. Umumnya pada transformator terdapat kumparan primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/arus bolak-balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi yang menginduksikan tegangan, bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaiannya beban) maka akan mengalir arus pada kumparan ini. Jadi kumparan sebagai alat transformasi tegangan dan arus. [8]

### c. Kumparan Tersier

Kumparan tersier diperlukan untuk memperoleh tegangan tersier atau untuk kebutuhan lain. Untuk kedua keperluan tersebut, kumparan tersier selalu dihubungkan delta. Kumparan tersier sering dipergunakan juga untuk penyambungan peralatan Bantu seperti kondensator sinkron, kapasitor shun dan reaktor shun, namun demikian tidak semua transformator daya mempunyai kumparan tersier. [8]

### d. Minyak Transformator

Sebagian besar transformator tenaga kumparan-kumparan dan intinya direndam dalam minyak transformator, terutama transformator tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak transformator mempunyai sifat sebagai media pemindah panas dan bersifat pula sebagai isolasi (daya tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. [8]

### e. Bushing

Hubungan antara kumparan transformator ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus

berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator. [8]

#### f. Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari transformator yang terendam minyak transformator berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuaian minyak transformator, tangki dilengkapi dengan konservator. [8]

## 2. Peralatan Bantu

### a. Pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi di dalam transformator, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut, transformator perlu dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator. Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa udara/gas, minyak dan air. Pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara alamiah (*natural*) dan dengan cara tekanan/paksaan (*forced*). [8]

Cara pemberian nama untuk tipe pendingin pada transformator daya yang diberikan oleh International Elektrotechnical Commission (IEC) adalah:

ONAN : *Oil Natural Air Natural*, yaitu sirkulasi minyak dan udara berlangsung secara alamiah.

ONAF : *Oil Natural Air Forced*, yaitu sirkulasi minyak secara alamiah tetapi sirkulasi udara secara paksaan.

OFAN : *Oil Forced Air Natural*, yaitu sirkulasi minyak secara paksaan tetapi sirkulasi udara secara alamiah.

OFAF : *Oil Forced Air Forced*, yaitu sirkulasi minyak dan sirkulasi udara berlangsung secara paksaan.

AFWF : *Air Force Water Forced*, sirkulasi udara dan sirkulasi air berlangsung secara paksaan.

### b. Perubah Tap (*Tap Changer*)

*Tap Changer* adalah perubah perbandingan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder sesuai dengan yang diinginkan dari tegangan jaringan

primer yang berubah-ubah. *Tap changer* dapat dilakukan baik dalam keadaan berbeban (*on-load*) atau dalam keadaan tak berbeban (*off-load*).[8]

c. Alat pernapasan

Karena pengaruh naik turunnya beban transformator maupun suhu udara luar, maka suhu minyakpun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan medesak udara di atas permukaan minyak keluar dari dalam tangki, sebaliknya bila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk kedalam tangki. Kedua proses diatas disebut pernapasan transformator. Permukaan minyak transformator akan selalu bersinggungan dengan udara luar yang menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi tabung berisi kristal zat *hygroskopis*. [8]

d. Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada trafo sebagai berikut: [8]

- indikator suhu minyak
- indikator permukaan minyak
- indikator sistem pendingin
- indikator kedudukan tap

#### **2.4.4 Pembebanan Lebih Pada Transformator Daya**

Pembebanan lebih pada transformator daya merupakan terjadinya penambahan beban pada transformator daya yang melebihi batas-batas ketentuan dari kapasitas nominal transformator tersebut.

Kapasitas nominal transformator daya dapat diketahui seperti yang tercantum pada name plate dari masing-masing transformator daya. Kapasitas ini merupakan data pengenalan dari transformator daya, yang memberi pengertian bahwa transformator daya yang dimaksud hanya dapat dibebani secara kontinyu dengan batas nominal pada suhu standard, tetapi transformator daya tersebut masih mungkin dibebani lebih pada batas yang ditentukan dalam publikasi IEC 354/72 yang telah diangkat menjadi SPLN 17A/79. Untuk perbebanan lebih dapat



dikenakan kurang lebih 5% sampai dengan 10% dari kapasitas nominalnya. (Sumber : SPLN 17a, 1979).

Pada publikasi tersebut ditunjukkan bagaimana transformator daya dengan pendingin minyak dioperasikan pada beban lebih tanpa merusak isolasi yang disebabkan oleh pengaruh termis. Dengan dasar tersebut, diambil kebijaksanaan pembebanan lebih pada transformator daya. Hal ini dimanfaatkan pada saat beban puncak berlangsung atau pada keadaan darurat dimana salah satu unit transformator gagal bekerja atau tidak berfungsi, maka diharapkan dapat bekerja pada beban lebih. Dengan adanya kebijakan ini dapat memberikan penghematan dengan penundaan pengadaan transformator baru. [8]

#### 2.4.5 Prinsip Kerja Transformator

Bekerjanya suatu transformator ialah karena kumparan primer transformator mendapat tegangan listrik arus bolak balik sehingga menimbulkan induksi medan elektromagnetis pada kumparan primer tersebut yang dapat memindahkan medan ini ke besi kern (besi lunak yang mengandung silikon), medan elektromagnetis yang didapat oleh besi kern dipindahkan pada kumparan sekunder transformator tersebut, akibatnya timbul tegangan dikedua ujung kawat email kumparan sekunder yang biasanya lebih tinggi atau lebih rendah tegangannya. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan (sumber), maka mengalir arus bolak balik  $I_p$  pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus  $I_p$  menimbulkan fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi  $e_p$ . Besarnya GGL induksi pada kumparan primer yaitu : [8]

$$e_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

dimana :

$e_p$  = GGL induksi pada kumparan primer (Volt)

$N_p$  = Jumlah belitan kumparan primer

$d\phi$  = Perubahan garis-garis gaya magnet

$dt$  = Perubahan waktu (detik)

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi  $e_p$  juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (*mutual fluks*). Dengan

demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi  $e_s$  pada kumparan sekunder. Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder yaitu : [8]

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

dengan  $N_s$  jumlah belitan kumparan sekunder.

Besarnya tegangan induksi dapat dicari dengan menggunakan persamaan

$$E_p = V_p - (I_p \times Z_p) \dots\dots\dots (3)$$

$$E_s = V_s - (I_s \times Z_s) \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

$V_p$  = Tegangan sisi primer (Volt)

$V_s$  = Tegangan sisi sekunder (Volt)

$I_p$  = Arus sisi primer (Amper)

$I_s$  = Arus sisi sekunder (Amper)

$Z_p$  = Impedansi sisi primer (Ohm)

$Z_s$  = Impedansi sisi sekunder ( Ohm )

Dari persamaan (1) dan (2) didapat perbandingan belitan berdasarkan perbandingan GGL induksi yaitu: [8]

$$a = \frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \dots\dots\dots (5)$$

$a$  : Nilai perbandingan belitan transformator (*turn ratio*)

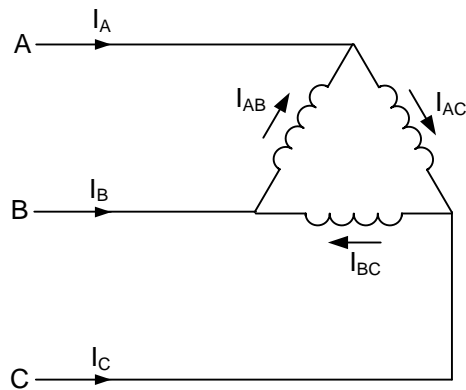
Apabila,  $a < 1$ , maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan  $a > 1$ , maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan.

**2.4.6 Transformator Tiga Fasa**

Pada transformator tiga fasa, secara umum terdapat dua jenis hubungan belitan, yaitu hubungan segitiga (*delta* ) dan hubungan bintang (*star*).[8]

**1. Hubungan Delta ( $\Delta$ )**

Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta yaitu  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  dan  $V_{CA}$ , masing-masing berbeda fasa  $120^\circ$ , seperti Gambar 2.9 dibawah ini:



**Gambar 2.9** Hubungan Delta Transformator Tiga Fasa  
Sumber : Djoko (1986)

Untuk beban yang seimbang :

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

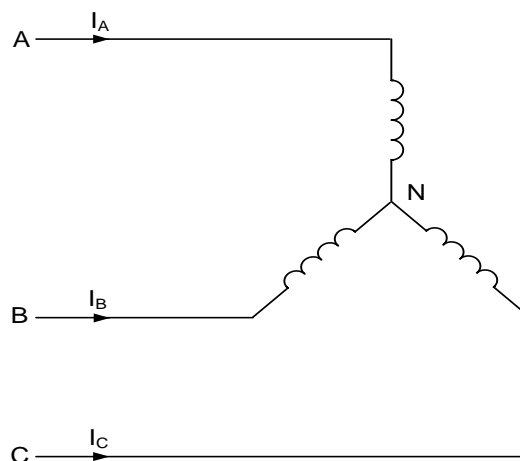
$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

Pada hubungan delta,  $I_A$  (arus jala-jala) adalah  $\sqrt{3} \times I_{AB}$  (arus fasa-fasa). Tegangan jala-jala dalam hubungan delta sama dengan tegangan fasanya.

$$V_A \text{ hubungan delta} = 3V_P \cdot I_P = 3V_L \left( \frac{I_L}{\sqrt{3}} \right) = \sqrt{3}V_L I_L$$

## 2. Hubungan Bintang (Y)

Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu,  $I_A$ ,  $I_B$ , dan  $I_C$  masing-masing berbeda fasa  $120^\circ$ , seperti Gambar 11.



**Gambar 2.10** Hubungan Bintang Transformator Tiga Fasa  
Sumber : Djoko (1986)

Untuk beban yang seimbang :

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0$$

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

Pada hubungan bintang  $I_A$  (arus jala-jala) sama dengan  $I_{AB}$  (arus fasa).

Tegangan jala-jala dalam hubungan bintang sama dengan  $\sqrt{3}$  tegangan fasa.

$$I_P = I_L, V_{AB} = \sqrt{3} V_{AN}, \text{ atau } V_L = \sqrt{3} V_P$$

$$\text{Jadi } V_A \text{ hubungan bintang} = 3V_P I_P = 3(V_L / \sqrt{3}) I_L = \sqrt{3} V_L I_L$$

### 2.4.7 Rugi-Rugi Transformator

Tidak semua energi dari input akan disalurkan ke output. Maka dapat diketahui bahwa selisih P input dan P output adalah rugi total dari transformator dan dapat dirumuskan sabagai berikut: [8]

$$\text{Rugi Total} = P_{in} - P_{out} \dots\dots\dots (6)$$

### 2.4.8 Rugi Tembaga dan Kebocoran Fluksi

Rugi tembaga adalah rugi yang disebabkan karena mengalirnya arus beban pada belitan sisi primer maupun belitan pada sisi sekunder transformator serta adanya resistansi dari tembaga. Rugi tembaga ( $P_{Cu}$ ) dapat dirumuskan sebagai: [8]

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \text{ Watt} \dots\dots\dots (7)$$

- dimana:  $P_{cu}$  : Rugi tembaga (Watt)
- $I$  : Arus beban (Amper)
- $R$  : resistansi belitan (Ohm)

Sedangkan kebocoran fluksi disebabkan adanya kenyataan bahwa tidak semua garis-garis fluks yang ditimbulkan oleh lilitan primer dan sekunder mengalir pada inti besi.

**2.4.9 Rugi Inti**

Rugi inti terdiri dari rugi histerisis dan rugi arus eddy.

1. Rugi Histerisis

Rugi histerisis adalah rugi yang disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi. Rugi histerisis ( $P_h$ ) dapat dirumuskan: [8]

$$P_h = \frac{m}{\delta} \cdot f \cdot B_m^x \dots\dots\dots (8)$$

dengan:

- $P_h$  : Rugi histerisis (Watt)
- $m$  : Massa inti besi
- $\delta$  : kerapatan
- $f$  : Frekuensi
- $B_m$  : Rapat fluks
- $x$  : Ketetapan

2. Rugi Arus Eddy

Karena inti besi transformator adalah suatu bahan penghantar, maka medan magnet transformator tersebut akan menginduksikan tegangan pada inti. Tegangan inti kemudian menimbulkan arus kecil yang mengalir dalam inti, dan arus ini dinamakan arus pusar. Arus pusar mengurangi energi pada belitan transformator, hal ini menunjukkan adanya daya yang terbuang.

Rugi arus Eddy ( $P_e$ ) dapat ditulis: [8]

$$P_e = \frac{m}{\delta} \cdot \left( \frac{\pi^2}{8\rho} \right) \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_m^x \dots\dots\dots (9)$$

dimana:  $P_e$  = Rugi arus Eddy (Watt)

$\rho$  = Tahanan jenis inti besi

$d$  = Tebal laminasi

**2.4.10 Daya Transformator**

Daya masukan ( $P_m$ ) transformator dapat dinyatakan sebagai berikut: [8]

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_{p_{L-L}} \times I_{p_{L-L}} \times \text{Cos}\phi \dots\dots\dots (10)$$

dengan:

$P_{in}$  : Daya masukan (Watt)

$V_{P_{L-L}}$  : Tegangan primer line to line (Volt)

$I_{P_{L-L}}$  : Arus primer line to line (Amper)

$\cos\varphi$  : Faktor daya

Sedangkan daya keluaran ( $P_{out}$ ) transformator dapat dinyatakan sebagai berikut:

[8]

$$P_{out} = \sqrt{3} \times V_{S_{L-L}} \times I_{S_{L-L}} \times \cos\varphi \dots\dots\dots (11)$$

dengan :

$P_{out}$  : Daya keluaran (Watt)

$V_{S_{L-L}}$  : Tegangan sekunder line to line (Volt)

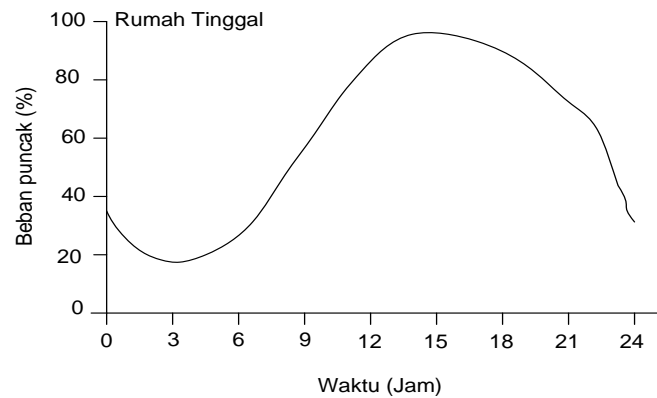
$I_{S_{L-L}}$  : Arus sekunder line to line (Amper)

## 2.5 Kategori Beban

Konsumen listrik di Indonesia yang menggunakan sumber dari PLN atau Perusahaan swasta lainnya dapat dibedakan menjadi 4 sektor, yaitu sebagai berikut: [11]

### 2.5.1 Sektor Rumah Tinggal

Pada umumnya daya yang terpasang di rumah-rumah berkisar antara 450 VA sampai dengan 4.400 VA, yang menggunakan 1 fasa dengan tegangan rendah 220V / 380V. Pada umumnya beban rumah tangga berupa lampu untuk penerangan dan alat rumah tangga seperti kipas angin, pemanas air, lemari es, penyejuk udara, mixer, oven, motor pompa air dan sebagainya. Beban rumah tangga biasanya mengalami beban puncak pada malam hari. [11]



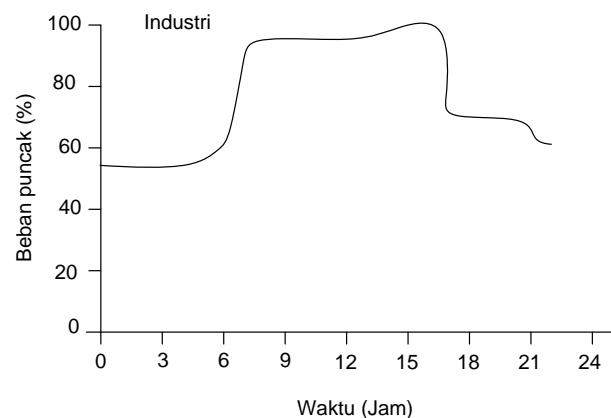
**Gambar 2.11** Kurva Beban Sektor Rumah Tinggal  
Sumber : Sirait (2016)

### 2.5.2 Sektor Penerangan Jalan Umum (PJU)

Pada PJU umumnya daya yang tersambung pada setiap tiang berkisar antara 50VA sampai dengan 250VA tergantung pada jenis jalan yang diterangi, menggunakan system 1 fasa dengan tegangan rendah 220V / 380V. [11]

### 2.5.3 Sektor Industri

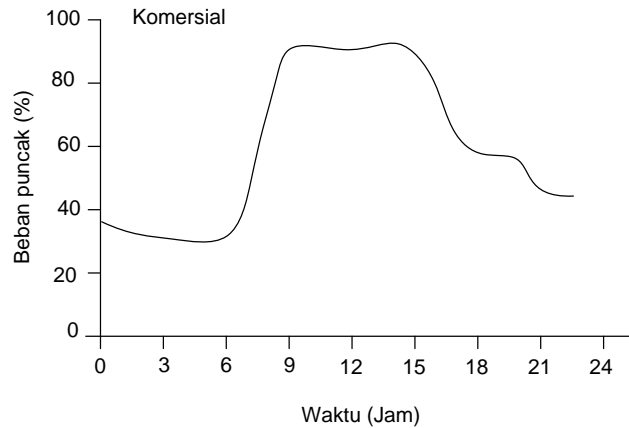
Beban sektor industri dibedakan dalam skala kecil dan skala besar. Untuk skala kecil banyak beroperasi di siang hari, masih menggunakan sistem 1 fasa dengan tegangan rendah 220V / 380V. Sedangkan sektor industri berskala besar sekarang ini banyak yang beroperasi sampai 24 jam, menggunakan jaringan tegangan menengah 20 kV dengan sistem 3 fasa. [11].



**Gambar 2.12** Kurva Beban Sektor Industri  
Sumber : Sirait (2016)

**2.5.4 Sektor Komersial**

Pelanggan komersial yaitu stasiun, kereta rel listrik (KRL), rumah sakit besar, mall, kampus, hotel-hotel berbintang, stadion olahraga, apartemen, penerangan untuk reklame, perkantoran. Beban ini secara drastis naik di siang hari untuk beban perkantoran dan pertokoan dan menurun di waktu sore. Rata-rata menggunakan jaringan tegangan menengah 20 kV dengan sistem 3 fasa. [11].



**Gambar 2.13** Kurva Beban Sektor Komersial  
Sumber : Sirait (2016)

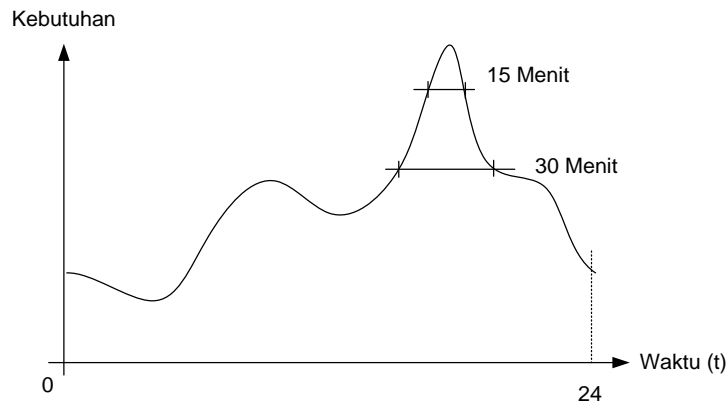
**2.6 Karakteristik Beban**

Sifat umum beban, karakteristiknya ditentukan oleh:

**2.6.1 Faktor Kebutuhan (Demand Factor)**

Faktor kebutuhan didefinisikan sebagai perbandingan antara kebutuhan maksimum (beban puncak) terhadap kebutuhan tersambung total.

$$F. K = \frac{\text{KebutuhanMaksimum (BebanPuncak)}}{\text{KebutuhanTersambungTotal}} \times 100\% \dots\dots\dots (12)$$



**Gambar 2.14** Kurva Kebutuhan Beban Vs Waktu  
Sumber : Sirait (2016)



**2.6.2 Faktor Beban (*Load Factor*)**

Faktor beban didefinisikan sebagai perbandingan antara beban rata-rata terhadap beban maksimum atau beban puncak. [11].

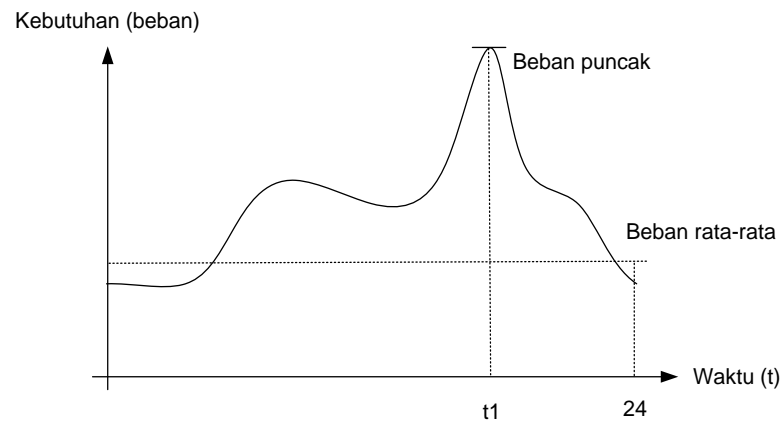
$$F. B = \frac{BebanRata-Rata}{BebanPuncak} \times 100\% \dots\dots\dots (13)$$

Faktor beban menjadi tidak berarti apa-apa apabila interval waktu antara kebutuhan maksimum dan periode waktu yang diambil rata-ratanya tidak ditentukan (misalnya 15 menit, 30 menit).

Beban rata-rata dapat diperoleh dengan persamaan berikut : [11]

$$BebanRata - rata = \frac{JumlahEnergiTerpakaiSelamaPeriode}{JumlahJamPeriode} \dots\dots\dots (14)$$

$$F. B = \frac{JumlahEnergiTerpakaiSelamaPeriode}{BebanPuncak \times JumlahJamPeriode} \times 100\% \dots\dots\dots (15)$$

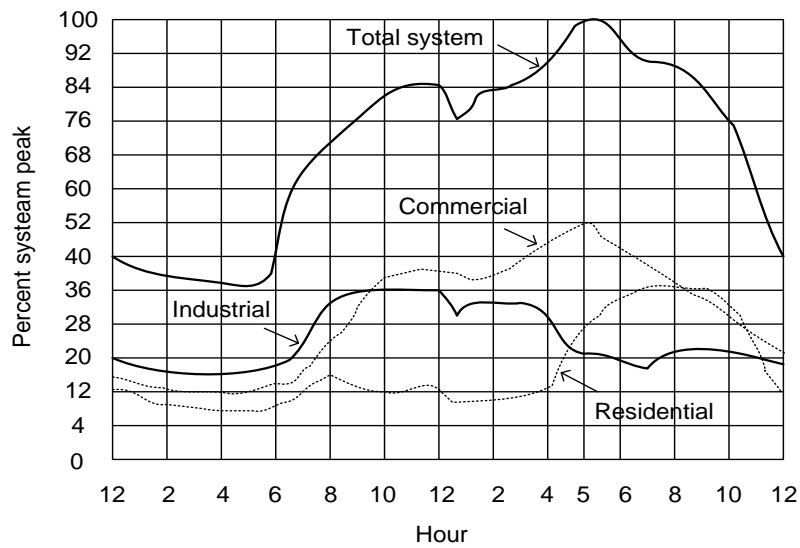


**Gambar 2.15** Kurva Beban VS Waktu  
 Sumber : Sirait (2016)

**2.6.3 Faktor Diversitas / Keanekaragaman (*Diversity Factor*)**

Faktor diversitas didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah daya / beban maksimum yang dibutuhkan konsumen atau subbagian dari sembarang sistem ataupun sebagian dari sistem terhadap kebutuhan maksimum keseluruhan atau bagian dari sistem yang dimaksud. [11].

$$F. D = \frac{\sum_{i=1}^n Bebanpuncak_i}{Bebanpuncaksistem} \dots\dots\dots (16)$$



**Gambar 2.16** Kurva Beban Total Sistem  
 Sumber : Sirait (2016)

**2.6.4 Faktor Kesamaan / Keseragaman (Coincidence Factor)**

Faktor keseragaman didefinisikan sebagai invers dari faktor diversitas.[11].

$$F. C = \frac{1}{FaktorDiversitas} \dots\dots\dots (17)$$

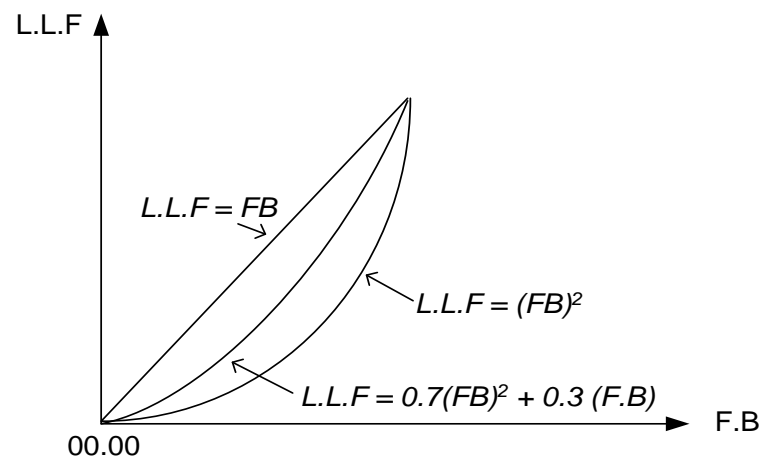
**2.6.5 Faktor Rugi-Rugi Beban (Loss Load Factor)**

Faktor rugi-rugi beban didefinisikan sebagai perbandingan antara rugi-rugi daya rata-rata terhadap rugi-rugi daya pada beban puncak dalam periode waktu tertentu.[11].

$$L. L. F = \frac{Rugi-rugidayarata-rata}{Rugi-rugidayabebanpuncak} \times 100\% \dots\dots\dots (18)$$

Oleh Buller dan Woodrow faktor rugi-rugi beban ini dapat dinyatakan sebagai fungsi dari faktor beban, bisa ditulis dengan persamaan berikut : [11]

$$L. L. F = 0.7(F. B)^2 + 0.3(F. B) \dots\dots\dots (19)$$



**Gambar 2.17** Kurva Faktor Rugi-Rugi Beban Sebagai Fungsi Faktor Beban  
Sumber : Sirait (2016)

## 2.7 Peramalan Beban

Menurut *Suswanto* (2009), peramalan pada dasarnya merupakan suatu dugaan atau prakiraan mengenai terjadinya suatu kejadian atau peristiwa dimasa yang akan datang. Dalam kegiatan perencanaan peramalan merupakan kegiatan mula dari proses tersebut. Ramalan di bidang tenaga elektrik pada dasarnya merupakan ramalan kebutuhan energi elektrik (watt jam) dan ramalan beban tenaga elektrik (watt). Keduanya sering disebut dengan istilah *Demand and Load Forecasting*. Hasil peramalan ini dipergunakan untuk membuat rencana pemenuhan kebutuhan maupun pengembangan penyediaan tenaga elektrik setiap saat secara cukup dan baik serta terus menerus. Secara garis besar pembuatan ramalan kebutuhan tenaga elektrik dapat dibagi dalam tiga tahap, yaitu : [12]

- a. Pengumpulan dan penyiapan data.
- b. Pengolahan dan analisa data.
- c. Penentuan metode dan pembuatan model.

### 2.7.1 Analisis Regresi

Istilah "regresi" pertama kali diperkenalkan oleh *Sir Francis Galton* pada tahun 1886. *Galton* menemukan adanya tendensi bahwa orang tua yang memiliki tubuh tinggi, memiliki anak-anak yang tinggi pula dan orang tua yang pendek memiliki anak-anak yang pendek pula. Kendati demikian, ia mengamati ada kecenderungan bahwa tinggi anak bergerak menuju rata-rata tinggi populasi

secara keseluruhan. Dengan kata lain ketinggian anak yang amat tinggi atau orang tua yang amat pendek cenderung bergerak ke arah rata-rata tinggi populasi. Inilah yang disebut hukum Galton mengenai regresi universal. Dalam bahasa *Galton* menyebutnya sebagai regresi menuju medikritis. [13].

Regresi merupakan suatu alat ukur yang juga digunakan untuk mengukur ada atau tidaknya korelasi antarvariabelnya. Istilah regresi itu sendiri berarti ramalan atau taksiran. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan garis regresi pada data diagram pencar disebut persamaan regresi.

Menurut *Gonen* (2008:64), beberapa kurva regresi yang umumnya digunakan dalam peramalan sistem tenaga adalah :

#### 1. Regresi Linier

Bentuk umumnya adalah :

$$Y = a + bX \dots\dots\dots (20)$$

dimana :

Y = variabel terikat

X = variabel bebas

a = intersep

b = slop

Konstanta a dan b dapat dicari dengan menggunakan metode kuadrat terkecil. Metode kuadrat terkecil (*Least Square Method*) linier adalah suatu metode yang digunakan untuk menentukan hubungan linier dari suatu data agar dapat diprediksi nilai-nilainya yang mana nilai tersebut tidak terdapat pada data-data yang kita miliki, yang mana dapat ditentukan dengan suatu kumpulan titik-titik x dan y. Metode ini menghendaki agar jumlah kuadrat dari semua titik-titik kuadrat dan garis menghasilkan kriteria kesalahan minimal.

Metode kuadrat terkecil ini, koefisien-koefisien a dan b dapat dihitung berdasarkan jumlah data sebanyak n yang dikembangkan dengan menggunakan persamaan : [9]

$$\sum Y_i = a.n + b \sum X_i \dots\dots\dots (21)$$

$$\sum X_i Y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2 \dots\dots\dots (22)$$

dari kedua persamaan diatas dapat ditentukan untuk nilai a dan nilai b, yang kemudian dengan cara substitusi maka didapat :

$$a = \frac{\sum Y_i \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i Y_i}{n \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i} \dots\dots\dots (23)$$

$$b = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i} \dots\dots\dots (24)$$

2. Regresi Eksponensial

Bentuk umumnya adalah :

$$Y = C e^{DX} \dots\dots\dots (25)$$

Linierisasi kurva lengkung dapat dilakukan sebagai berikut :

Untuk regresi linier dengan a dan b merupakan konstanta dapat direpresentasikan sebagai : [9]

$$\ln Y = \ln C + \ln e^{DX} \dots\dots\dots (26)$$

Dimana :

$$a = \frac{\sum \ln Y_i \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i \ln Y_i}{n \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i} \dots\dots\dots (27)$$

$$b = \frac{n \sum X_i \ln Y_i - \sum X_i \sum \ln Y_i}{n \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i} \dots\dots\dots (28)$$

Sehingga :

$$C = e^a \dots\dots\dots (29)$$

$$D = b \dots\dots\dots (30)$$

3. Regresi Power

Bentuk umumnya adalah :

$$Y = P X^Q \dots\dots\dots (31)$$

Linierisasi kurva lengkung dapat dilakukan sebagai berikut :

Untuk regresi linier dengan a dan b merupakan konstanta dapat direpresentasikan sebagai : [9]

$$\log Y = \log P + Q \log x \dots\dots\dots (32)$$

Sehingga :

$$a = \frac{\sum \log Y_i \sum \log X_i^2 - \sum \log X_i \sum \log X_i \log Y_i}{n \sum \log X_i^2 - \sum \log X_i \sum \log X_i} \dots\dots\dots (33)$$

$$b = \frac{n \sum \log X_i \log Y_i - \sum \log X_i \sum \log Y_i}{n \sum \log X_i^2 - \sum \log X_i \sum \log X_i} \dots\dots\dots (34)$$

Sehingga :

$$P = 10^a \dots\dots\dots (35)$$

$$Q = b \dots\dots\dots (36)$$

**2.7.2 Standar Kesalahan**

Ukuran berapa jauh kecocokan sebuah garis atau kurva dalam mencocoki titik-titik data adalah standard kesalahan yang dirumuskan melalui : [11]

$$S_{y_x} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - Y_{est})^2}{n}} \dots\dots\dots (37)$$

Keterangan :

Sy.x = Standard kesalahan

n = Jumlah data

**2.7.3 Korelasi**

Korelasi menyatakan derajat hubungan antara dua variabel tanpa memperhatikan variabel mana yang menjadi peubah. Karena itu hubungan korelasi belum dapat dikatakan sebagai hubungan sebab akibat.

Paramater teoritik yang dapat digunakan untuk mengukur hubungan linier antara variabel X dan Y adalah koefisien korelasi Pearson (R). Koefisien korelasi tersebut didefinisikan sebagai berikut : [6]

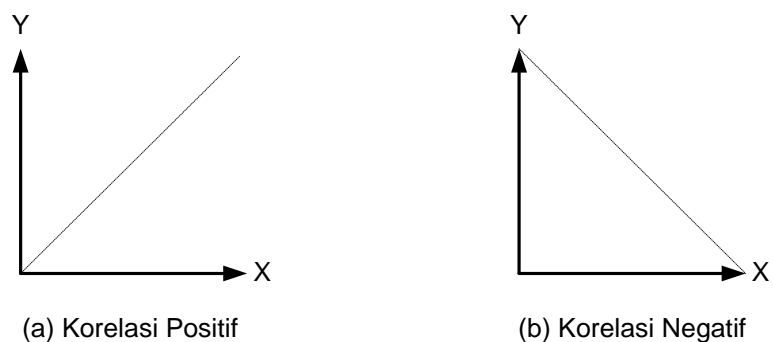
$$R = \frac{n \sum XiYi - \sum Xi \sum Yi}{\sqrt{\{n \sum Xi^2 - (\sum Xi)^2\} \{n \sum Yi^2 - (\sum Yi)^2\}}} \dots\dots\dots (38)$$

Dimana :

Batas-batas koefisien korelasi ditentukan oleh :

$$-1 \leq R \leq 1 \dots\dots\dots (41)$$

Untuk tanda positif menyatakan bahwa antara variabel-variabel itu terdapat korelasi positif, dimana penambahan nilai variabel X yang kecil akan diikuti oleh penambahan nilai variabel Y yang kecil, demikian pula untuk nilai variabel X yang besar akan diikuti oleh penambahan nilai variabel Y yang besar. Gambar kurva bentuk hubungan korelasi ditunjukkan pada gambar berikut ini :[6]



**Gambar 2.18** Bentuk Hubungan Korelasi  
Sumber : (Unipdu, 2016)

Sedangkan kekuatan hubungan koefisien korelasi ditunjukkan pada Tabel 2 dibawah ini :

**Tabel 2.1** Kekuatan Hubungan Koefisien Korelasi

<b>Koefisien</b>	<b>Kekuatan Hubungan</b>
0,00	Tidak ada hubungan
0,01 – 0,09	Hubungan kurang berarti
0,10 – 0,29	Hubungan lemah
0,30 – 0,49	Hubungan moderat
0,50 – 0,69	Hubungan kuat
0,70 – 0,89	Hubungan sangat kuat
> 0,90	Hubungan mendekati sempurna

Sumber :(Unipdu, 2016)