

## BAB II LANDASAN TEORI

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian tentang analisis kebutuhan *Capacitor Bank* beserta implementasinya untuk memperbaiki faktor daya pernah dilakukan di Poleteknik Malang dan didapatkan Nilai kapasitansi kompensasi daya reaktif pada instalasi di Politeknik Kota Malang adalah 137,38  $\mu\text{F}$  sampai dengan 1.295  $\mu\text{F}$ . Sedangkan daya reaktif yang dibutuhkan agar nilai faktor daya meningkat menjadi faktor daya ideal adalah 6,23 kVAr sampai dengan 58,74 kVAr. Sehingga rating *capacitor bank* yang dipilih adalah 30 kVAr dengan nilai kapasitansi yaitu 661  $\mu\text{F}$ . Pemasangan *capacitor bank* memperbaiki kualitas daya listrik Politeknik Kota Malang karena meningkatkan faktor daya menjadi 0,96 dan menurunkan daya reaktif menjadi 4,6 kVAr(Hakim, 2014).

Penelitian tentang analisis pengaruh pemasangan *Capacitor Bank* terhadap faktor daya pernah dilakukan pada universitas Halu Oleo, setelah dilakukan penelitian maka didapatkan hasil kompensasi daya reaktif yang harus diberikan ialah sebesar 14.42 kVAR. Sehingga dalam pemasangannya nanti sistem dirancang menggunakan 1 modul 6 step dengan tiap *bank* mengoreksi atau mengkompensasi 5 kVAR dengan nilai *capasitor*nya sebesar 107 *microFarad*. Dengan menaikkan faktor daya menjadi 0,85 menyebabkan penurunan arus beban sebesar 96,84(Putra, 2015)

Penelitian tentang perancangan kebutuhan *capasitor bank* untuk perbaikan faktor daya pada line mess I di PT. Bumi lamongan indah (WBL) pernah dilakukan , dengan hasil penelitian Perbaikan faktor daya pada Mess I di PT.Bumi Lamongan Sejati (WBL) dengan cara menambahkan *capasitor bank* pada setiap stasiun, mampu meningkatkan  $\text{Cos } \phi$  menjadi 0,99 lagging dengan kebutuhan kapasitas *capasitor bank*nya sebesar 219, 858 KVAR. Besar daya reaktif yang dikompensasi dan kapasitas *capasitor*nya adalah : Stasiun Istana Boneka (18,553 KVAR , 409,2  $\mu\text{F}$ ), stasiun Tagada (14,957 KVAR ,329,9  $\mu\text{F}$ ), stasiun Rukyat (76,79 KVAR, 1693,6  $\mu\text{F}$ ), stasiun Pool (27,011 KVAR, 595,7  $\mu\text{F}$ ), dan stasiun Bajak Laut (36, 582 KVAR , 806,8  $\mu\text{F}$ .), serta stasiun Speed Flip (45,965 KVAR, 1014  $\mu\text{F}$ )(Alland dkk, 2013)

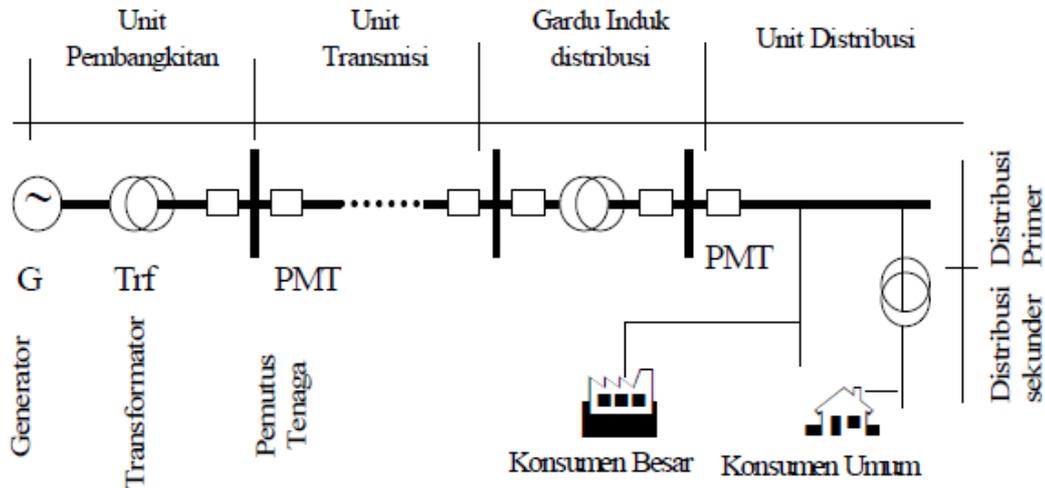
Pada tahun 2010 pernah dilakukan penelitian tentang efektifitas pemasangan kapasitor sebagai metode alternatif penghemat energi listrik, dengan hasil penelitian, Besarnya harga arus resistif murni tidak berubah dengan adanya penambahan kapasitor daya pada suatu janggan listrik. Dengan tidak berubahnya harga arus resistif murni maka tidak akan mengubah besaran nilai energi yang pada alat ukur Kwh meter karena yang diukur adalah harga daya aktif, Pemasangan kapasitor akan menurunkan daya reaktif (induktif) pada suatu sistem jaringan listrik, Efektifitas dapat didapatkan dari pemasangan kapasitor daya yaitu akan menimbulkan penurunan arus total rangkaian yang merupakan akumulasi dari beberapa komponen arus, Efektifitas tertinggi dari penurunan arus total jaringan didapatkan dari pemilihan harga induktansi dan harga kapasitansi kapasitor yang akan digunakan sesuai dengan table efisiensi, Pemilihan harga induktansi dan harga kapasitansi kapasitor yang tidak sesuai akan menimbulkan penurunan efektifitas pemasangan *capasitor*, Pemasangan kapasitor dalam rumah tangga tidak terlalu signifikan dalam menurunkan arus total jaringan, tetapi kalau dipasang secara serentak pada suatu wilayah akan sangat signifikan sekali dalam penurunan arus total, sehingga bisa menjadi acuan untuk berbagai kepentingan termasuk mengatasi krisis energi listrik dalam skala besar (Prasetyo, MT & Assaffat 2010).

Penelitian yang dilakukan ini berbeda dengan penelitian sebelumnya, dimana dalam penelitian ini menggunakan simulasi Simulink untuk memodelkan sistem tenaga listrik sebelum dan sesudah pemasangan *capasitor bank* terhadap faktor daya, yang dilakukan studi kasus di PT. Bogowonto.

## **2.2 Sistem Tenaga Listrik**

Proses penyaluran tenaga listrik terdiri dari tiga komponen utama yaitu pembangkit, penghantar (saluran transmisi/distribusi), dan beban. Pada sistem transmisi berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari unit-unit pembangkit di berbagai lokasi ke sistem distribusi yang pada akhirnya menyuplai beban. (Marsudi, 1990). Sistem Tenaga Listrik dikatakan sebagai kumpulan/gabungan yang terdiri dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran

transmisi, saluran distribusi dan beban yang saling berhubungan dan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu system(Chandra,2015).



**Gambar 2.1** Diagram blok sistem tenaga listrik(Chandra,2015).

Tenaga listrik dibangkitkan di pusat-pusat tenaga listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTD kemudian disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (*step up transformer*) yang ada di pusat listrik(Chandra,2015).

Pemberian nama PLTA PLTU PLTP dan sebagainya yang umum diberikan kepada unit pembangkit listrik di lingkungan PLN didasarkan atas nama tenaga penggerak mulanya. PLTA misalnya dimana mesin pembangkit listriknya (generator) yang ada di kawasan tersebut digerakan atau diputar oleh suatu turbin penggerak yang berputar karena digerakan oleh pergerakan aliran air (turbin air) demikian juga halnya dengan PLTU mesin pembangkit listriknya digerakan oleh turbin uap(Chandra,2015).

Saluran tenaga listrik yang menghubungkan pembangkitan dengan gardu induk dikatakan sebagai saluran transmisi karena saluran ini memakai standard tegangan tinggi yang sering disebut dengan singkatan SUTT. Dilingkungan operasional PLN saluran transmisi terdapat dua macam nilai tegangan yaitu saluran transmisi yang bertegangan 70 KV dan saluran transmisi yang bertegangan 150 KV dimana SUTT 150 KV lebih banyak digunakan dari pada SUTT 70 KV. Khusus

untuk tegangan 500 KV dalam praktek saat ini disebut sebagai tegangan ekstra tinggi. yang disingkat dengan nama SUTET(Chandra,2015).

Pada saat ini masih ada beberapa saluran transmisi dengantegangan 70 KV namun tidak dikembangkan lagi oleh PLN. Saluran transmisi ada yang berupa saluran udara dan ada pula yang berupa saluran kabel tanah. Karena saluran udara harganya jauh lebih murah dibandingkan dengan kabel tanah maka saluran transmisi PLN kebanyakan berupa saluran udara. Kerugian dari saluran udara dibandingkan dengan saluran kabel tanah adalah saluran udara mudah terganggu oleh gangguan yang ditimbulkan dari luar sistemnya, misalnya karena sambaran petir, terkena ranting pohon, binatang, layangan dan lain sebagainya(Chandra,2015).

Sistem tenaga listrik di salurkan melalui sistem transmisi untuk sampai ke Gardu Induk sebagai pusat beban untuk diturunkan tegangannya melalui transformator penurun tegangan (*step down transformer*) menjadi tegangan menengah atau yang juga disebut sebagai tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20 KV, 12 KV dan 6 KV. Kecenderungan saat ini menunjukkan bahwa tegangan distribusi primer PLN yang berkembang adalah 20 KV.

Jaringan distribusi primer yaitu jaringan tenaga listrik yang keluar dari gardu induk baik itu berupa saluran kabel tanah, saluran kabel udara atau saluran kawat terbuka yang menggunakan standard tegangan menengah dikatakan sebagai jaringan tegangan menengah yang sering disebut dengan singkatan JTM dan sekarang salurannya masing masing disebut SKTM untuk jaringan tegangan menengah yang menggunakan saluran kabel tanah, SKUTM untuk jaringan tegangan menengah yang menggunakan saluran kabel udara dan SUTM untuk jaringan tegangan menengah yang menggunakan saluran kawat terbuka. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer maka kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dengan menggunakan trafo distribusi (*step down transformer*) menjadi tegangan rendah dengan tegangan standar 380/220 Volt atau 220/127 Volt dimana standar tegangan 220/127 Volt pada saat ini tidak diberlakukan lagi dilingkungan PLN. Tenaga listrik yang menggunakan standard tegangan rendah ini kemudian disalurkan

melalui suatu jaringan yang disebut jaringan tegangan rendah yang sering disebut dengan singkatan JTR(Chandra,2015).

Sama halnya pada JTM jenis saluran yang dipergunakan pada JTR dapat menggunakan tiga jenis saluran yaitu SUTR untuk saluran udara tegangan rendah dengan menggunakan saluran kawat terbuka SKUTR untuk saluran kabel udara tegangan rendah dengan menggunakan saluran kabel udara yang dikenal dengan sebutan kabel twisted yang sering disebut dengan singkatan TIC singkatan dari Twisted Insulation Cable, SKTR untuk saluran udara tegangan rendah dengan menggunakan saluran kabel tanah.

Tenaga listrik dari jaringan tegangan rendah ini untuk selanjutnya disalurkan ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) melalui suatu sarana yang disebut Sambungan Pelayanan atau Sambungan Rumah yang dapat dipisahkan menjadi dalam 2 bagian yaitu Sambungan Luar Pelayanan dan Sambungan Masuk Pelayanan. Dalam proses bisnis PLN pelanggan-pelanggan yang mempunyai daya tersambung besar aturannya tidak disambung melalui jaringan tegangan rendah melainkan disambung langsung pada jaringan tegangan menengah dan yang sangat besar disambung pada Jaringan Transmisi Tegangan Tinggi, tergantung besarnya daya tersambung. Dari gambar diatas terlihat bahwa di Pusat Listrik maupun di GI selalu ada *transformator* Pemakaian Sendiri guna melayani keperluankeperluan peralatan listrik yang digunakan didalam Pusat Listrik maupun GI, misalnya untuk keperluan penerangan, mengisi batere listrik dan menggerakkan berbagai motor listrik. Dalam praktek karena luasnya jaringan distribusi sehingga diperlukan banyak sekali *transformator* distribusi, maka gardu distribusi seringkali disederhanakan menjadi *transformator* tiang/gardu trafo tiang yang rangkaian listriknya lebih sederhana dari pada yang digambarkan. Setelah tenaga listrik melalui jaringan tegangan menengah, jaringan tegangan rendah dan sambungan rumah maka tenaga listrik selanjutnya dilewatkan alat pembatas daya dan KWH meter di sisi pelanggan(Chandra,2015).

Energi listrik yang dipakai oleh pelanggan tersebut di catat oleh petugas sesuai angka di register kWh meter tersebut selanjutnya dicatat di dalam rekening listrik. Rekening listrik pelanggan tergantung kepada daya tersambung serta pemakaian

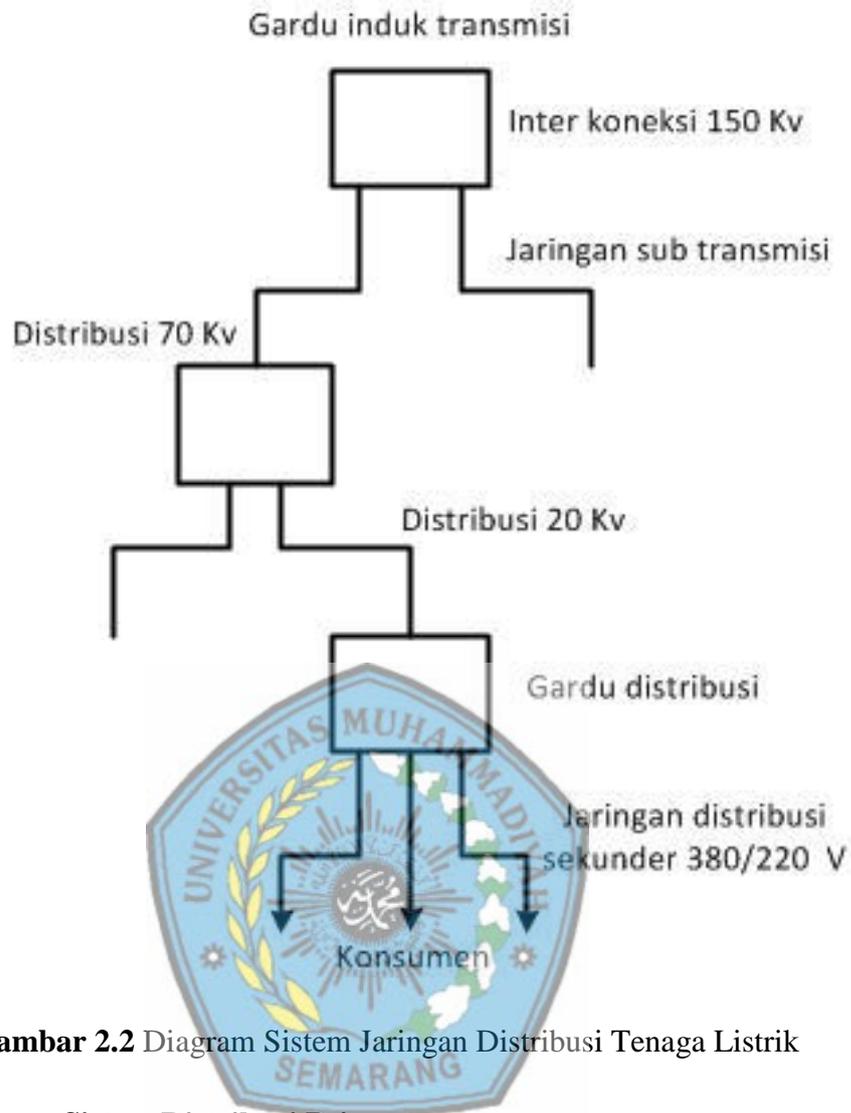
KWHnya, oleh karenanya PLN memasang pembatas daya dan KWH meter. Setelah melalui KWH meter, tenaga listrik kemudian memasuki instalasi rumah yaitu instalasi milik pelanggan. Instalasi PLN pada umumnya hanya sampai dengan KWH meter dan sesudah KWH meter instalasi listrik pada umumnya adalah instalasi milik pelanggan. Dalam instalasi pelanggan tenaga listrik langsung memasuki alat-alat listrik milik pelanggan seperti lampu, setrika, lemari es, pesawat radio, pesawat televisi dan lain-lain(Chandra,2015).

### 2.3 Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan salah satu bagian dari suatu sistem tenaga listrik yang dimulai dari PMT *incoming* di gardu induk sampai dengan alat penghitung dan pembatas di instalasi konsumen yang berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk sebagai pusat beban ke pelanggan secara langsung atau melalui gardu-gardu distribusi (gardu trafo) dengan mutu yang memadai sesuai standar pelayanan yang berlaku. Dengan demikian sistem distribusi ini menjadi suatu sistem tersendiri karena unit distribusi ini memiliki komponen peralatan yang saling berkaitan dalam operasinya untuk menyalurkan tenaga listrik. Dimana sistem adalah perangkat unsur-unsur yang saling ketergantungan yang disusun untuk mencapai suatu tujuan tertentu dengan menampilkan fungsi yang ditetapkan(Ardiansyah,2010).

Jaringan distribusi terdiri atas dua bagian, yang pertama adalah jaringan tegangan menengah/primer, yang menyalurkan daya listrik dari gardu induk subtransmisi ke gardu distribusi, jaringan distribusi primer menggunakan tiga kawat atau empat kawat untuk tiga fasa. Jaringan yang kedua adalah jaringan tegangan rendah, yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen, dimana sebelumnya tegangan tersebut ditransformasikan oleh transformator distribusi dari 20 kV menjadi 380/220 Volt, jaringan ini dikenal pula dengan jaringan distribusi sekunder.

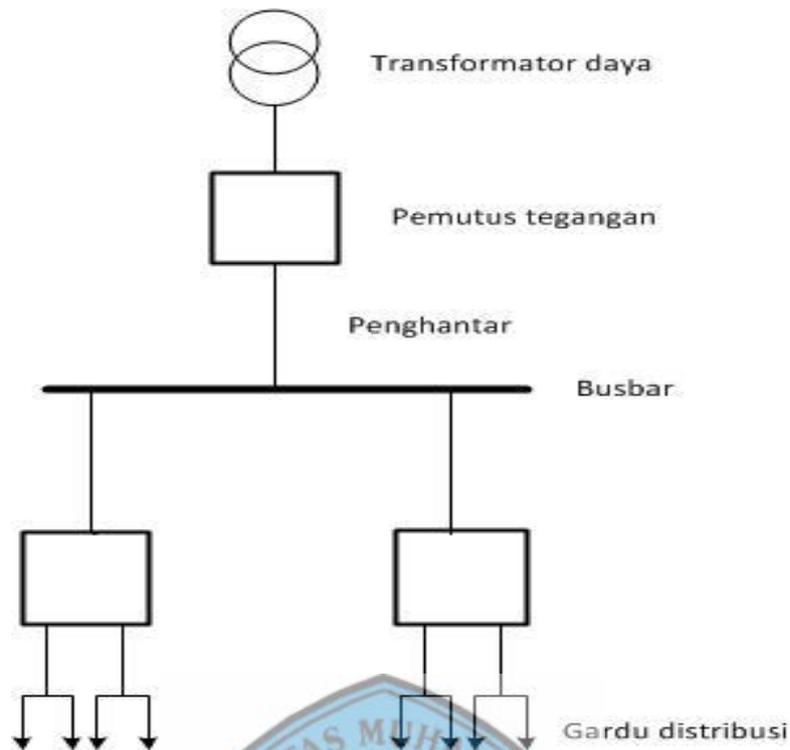
Jaringan distribusi sekunder terletak antara *transformator* distribusi dan sambungan pelayanan (beban) menggunakan penghantar udara terbuka atau kabel dengan sistem tiga fasa empat kawat (tiga kawat fasa dan satu kawat netral). Dapat kita lihat gambar dibawah proses penyediaan tenaga listrik bagi para konsumen(Ardiansyah,2010).



**Gambar 2.2** Diagram Sistem Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

### 2.3.1 Jaringan Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplay tenaga listrik sampai ke pusat beban. Distribusi primer, sering disebut sistem jaringan tegangan menengah dengan tegangan operasi nominal 20 kV/ 11,6 kV Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer. Berikut adalah gambar bagian-bagian distribusi primer secara umum(Ardiansyah,2010).



**Gambar 2.3** Bagian-bagian Sistem Distribusi Primer

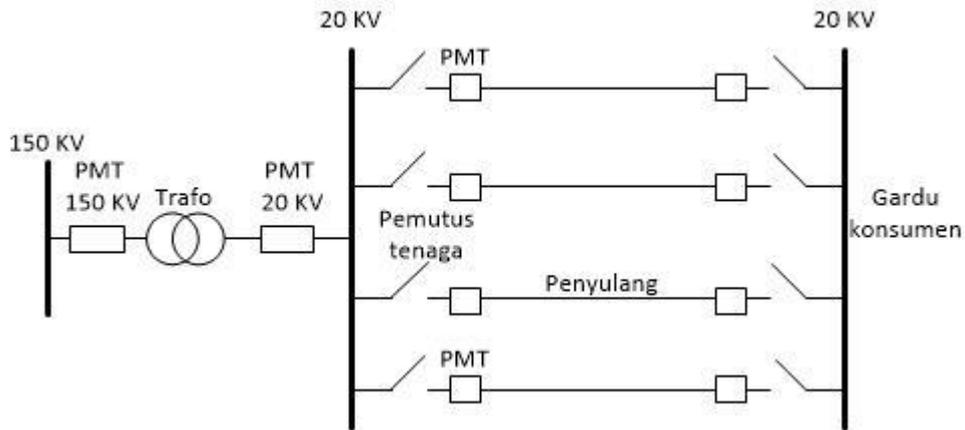
Bagian-bagian sistem distribusi primer terdiri dari :

- 1) Transformator daya, berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya.
- 2) Pemutus tegangan, berfungsi sebagai pengaman yaitu pemutus daya
- 3) Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya
- 4) Busbar, berfungsi sebagai titik pertemuan / hubungan antara trafo daya dengan peralatan lainnya
- 5) Gardu hubung, berfungsi menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi tanpa mengubah tegangan.
- 6) Gardu distribusi, berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

### 2.3.1.1 Jaringan Distribusi Primer Menurut Susunan Rangkaiannya

Jaringan Pada Sistem Distribusi tegangan menengah (Primer 20kV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu Jaringan Radial, Jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*), Jaringan Lingkaran (Loop), Jaringan Spindel dan Sistem Gugus atau Kluster(Ardiansyah,2010).

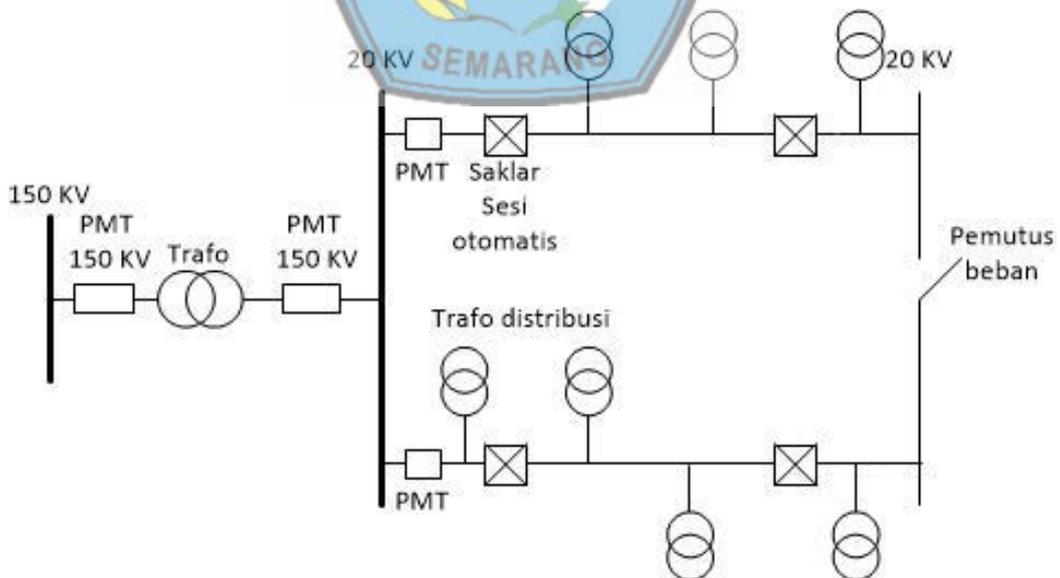




**Gambar 2.5** Skema Saluran Tie Line

**c. Jaringan Loop**

Tipe ini merupakan jaringan distribusi primer, gabungan dari dua tipe jaringan radial dimana ujung kedua jaringan dipasang PMT. Pada keadaan normal tipe ini bekerja secara radial dan pada saat terjadi gangguan PMT dapat dioperasikan sehingga gangguan dapat terlokalisir. Tipe ini lebih handal dalam penyaluran tenaga listrik dibandingkan tipe radial namun biaya investasi lebih mahal(Ardiansyah,2010).

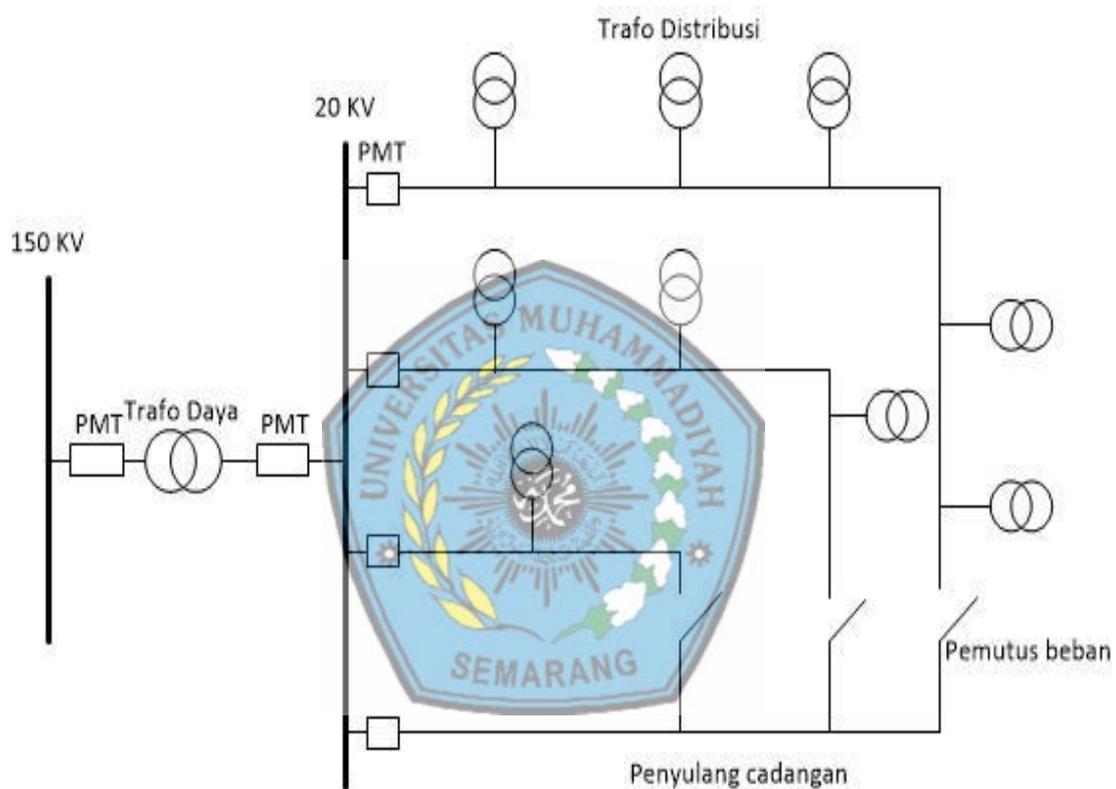


**Gambar 2.6** Skema Saluran Sistem Loop



### e. Sistem Cluster

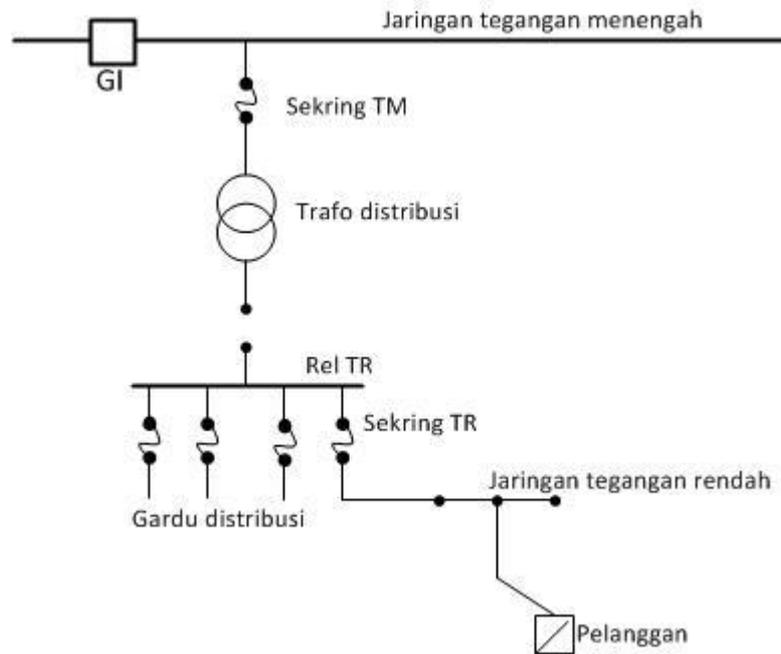
Sistem ini mirip dengan sistem spindle. bedanya pada sistem cluster tidak digunakan gardu hubung atau gardu switching, sehingga express feeder dari gardu hubung ke tiap jaringan. Express feeder ini dapat berguna sebagai titik manufer ketika terjadi gangguan pada salah satu bagian jaringan(Ardiansyah,2010).



**Gambar 2.8** Skema Saluran Sistem Cluster

### 2.3.2 Jaringan Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.5 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen. . Distribusi sekunder sering disebut sistem jaringan tegangan rendah dengan tegangan operasi nominal 380 / 220 volt(Ardiansyah,2010).



**Gambar 2.9** Hubungan tegangan menengah ke tegangan rendah dan konsumen

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi(Ardiansyah,2010).

Melihat letaknya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini berfungsi menerima daya listrik dari sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik selayaknya harus sangat diperhatikan(Ardiansyah,2010).

Sistem penyaluran daya listrik pada Jaringan Tegangan Rendah dapat dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut :

1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa isolasi) seperti kabel AAAC, kabel ACSR.
2. Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (*Low Voltage Twisted*)

*Cable*).ukuran kabel LVTC adalah : 2x10mm<sup>2</sup>, 2x16mm<sup>2</sup>, 4x25mm<sup>2</sup>, 3x35mm<sup>2</sup>, 3x50mm<sup>2</sup>, 3x70mm<sup>2</sup>.

Menurut SPLN No.3 Tahun 1987, jaringan tegangan rendah adalah jaringan tegangan rendah yang mencakup seluruh bagian jaringan beserta perlengkapannya, dari sumber penyaluran tegangan rendah sampai dengan alat pembatas/pengukur. Sedangkan STR (Saluran Tegangan Rendah) ialah bagian JTR tidak termasuk sambungan pelayanan (bagian yang menghubungkan STR dengan alat pembatas/pengukur) (Ardiansyah,2010).

## 2.4 Rangkaian AC

*Alternating current* atau arus bolak-balik adalah arus yang berubah tanda(polaritas) pada selang waktu tertentu. Arus bolak-balik dapat berupa sinyal periodik maupun sinyal tak periodik, sinyal periodik adalah suatu sinyal yang bersifat berulang untuk selang waktu tertentu yang sama(perioda) yang dinyatakan dalam fungsi sinusoidal. Nilai-nilai dari besaran listrik arus dan tegangan bolak balik antara lain :

- a. Nilai sesaat (*peak*)

$$V_p = \max\{|v(t)|\} \quad (2.1)$$

- b. Nilai maksimum(*peak to peak*)

$$V_{pp} = \max\{v(t)\} - \min\{v(t)\} \quad (2.2)$$

- c. Nilai rata-rata

$$V_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (2.3)$$

- d. Nilai efektif atau *rms*(*root mean square*)

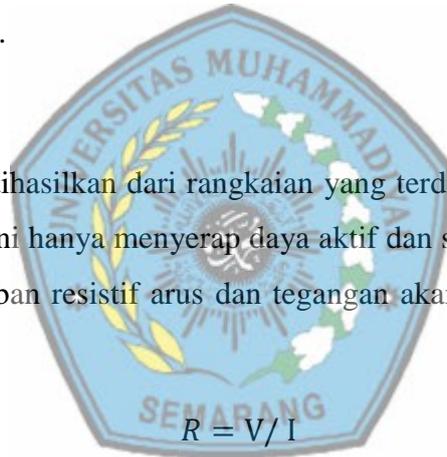
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt} \quad (2.4)$$

## 2.5 Sifat Beban Kelistrikan

Beban listrik didefinisikan sebagai jumlah listrik yang digunakan oleh masyarakat. Beban listrik dapat dibagi menjadi beban seimbang dan beban tidak seimbang. Pada beban seimbang jumlah daya yang dibangkitkan oleh generator tiga fasa atau daya yang diserap oleh beban tiga fasa, diperoleh dengan menjumlahkan daya dari tiap-tiap fasa. Pada sistem yang seimbang, daya total tersebut sama dengan tiga kali daya fasa, karena daya pada tiap-tiap fasanya sama. Pada listrik arus DC (arus searah) besar beban induktif dan beban kapasitif tidak berpengaruh terhadap rangkaian, sehingga yang menjadi beban hanya beban resistif murni saja. Kemudian pada rangkaian arus AC (Bolak-balik), beban kapasitif dan induktif akan memberi pengaruh ke rangkaian, sehingga beban yang bekerja yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Berikut adalah pengertian dari beban resistif, kapasitif, dan induktif(Nur,2017).

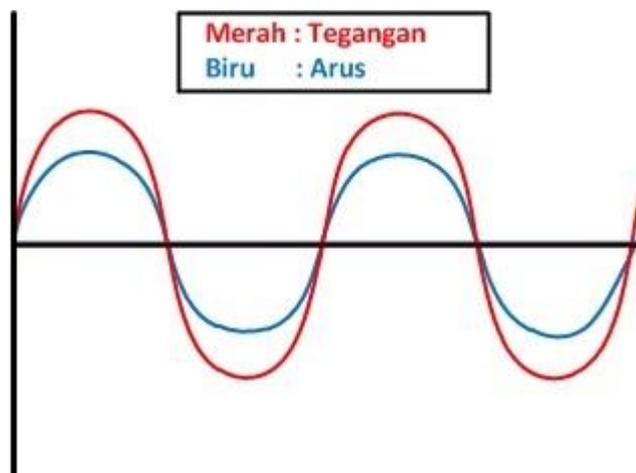
### 2.5.1 Beban Resistif

Beban resistif dihasilkan dari rangkaian yang terdiri dari penghambat berupa resistor murni. Beban ini hanya menyerap daya aktif dan sama sekali tidak menyerap beban reaktif. Pada beban resistif arus dan tegangan akan sefasa. Secara matematis dinyatakan (Nur,2017):



$$R = V/I$$

(2.5)



**Gambar 2.10** Gelombang Arus dan Tegangan pada Beban Resistif

### 2.5.2 Beban Induktif

Beban induktif adalah beban yang menyerap daya aktif dan daya reaktif dengan faktor daya *lagging*, yaitu saat tegangan mendahului arus sebesar sudut  $\theta$ . Beban induktif dihasilkan dari komponen-komponen listrik yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada inti besi. Contoh peralatan listrik yang merupakan beban induktif adalah motor-motor dan transformator. Beban induktif dihasilkan dari rangkaian yang mengandung komponen pasif, berupa induktor. Berikut adalah gambar gelombang pada beban induktif(Nur,2017).



**Gambar 2.11** Gelombang arus dan tegangan pada beban induktif.

### 2.5.3 Beban Kapasitif

Beban kapasitif adalah beban yang mengandung komponen pasif, yaitu *capasitor*. Beban kapasitif menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. Bentuk gelombang dari beban kapasitif adalah arus mendahului tegangan. Berikut adalah gelombang yang dihasilkan pada beban kapasitif(Nur,2017).



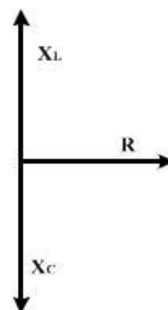
**Gambar 2.12** Gelombang arus dan tegangan pada beban kapasitif.

Pada beban listrik tiga fasa seimbang, besar perbedaan sudut fasa antara tiap fasanya adalah  $120^\circ$  (Nur, 2017).

#### 2.5.4 Diagram *Fasor*

Diagram *fasor* adalah diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran tegangan dan arus. Besar dan arah diagram *fasor* tergantung dari kondisi beban. Ketika beban cenderung induktif maka diagram *fasor* akan cenderung mengarah ke atas, sementara ketika kondisi beban cenderung kapasitif maka diagram *fasor* akan cenderung mengarah ke bawah, dan ketika kondisi beban resistif maka diagram *fasor* akan berada pada sumbu-X (Nur, 2017).

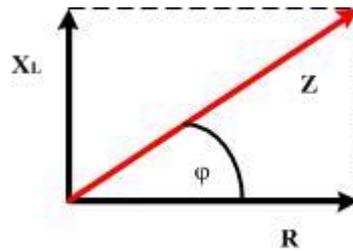
Berikut adalah gambar diagram *fasor* selengkapnya.



**Gambar 2.13** Diagram *Fasor* pada Komponen R, L, C.

Gambar 2.9 menunjukkan arah *fasor* pada komponen R, L, dan C. Komponen R merupakan komponen *fasor* pada beban resistif, sedangkan komponen L merupakan komponen *fasor* pada beban induktif, dan C menunjukkan komponen

pada beban kapasitif. Pada saat beban cenderung induktif maka besar komponen arah L akan lebih besar daripada komponen arah C sehingga vektor pada *fasor* akan cenderung mengarah miring ke atas. Kemudian saat beban cenderung bersifat kapasitif maka besar komponen C akan lebih besar daripada komponen arah L sehingga *fasor* akan miring ke bawah. Terakhir saat beban bersifat resistif maka komponen L dan C akan sama besar sehingga *fasor* akan memiliki arah lurus pada sumbu-X (Nur, 2017).



**Gambar 2.14** Komponen *Fasor* pada Beban Induktif.



**Gambar 2.15** Komponen *Fasor* pada Beban Kapasitif.

**Gambar 2.16** Komponen *Fasor* pada Beban Resistif.

Berdasarkan gambar 2.9 , 2.10 , 2.11 dan 2.12 dapat dilihat komponen *fasor* saat kondisi beban induktif, kapasitif, dan resistif serta dapat dihitung total impedansinya. Saat beban induktif nilai reaktansi induktif ( $X_L$ ) akan lebih besar dibanding reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) sehingga arah vektor impedansi akan cenderung ke atas. Kemudian saat beban cenderung kapasitif maka nilai reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) akan lebih besar dibanding nilai reaktansi induktif ( $X_L$ ) sehingga vektor impedansi akan cenderung mengarah ke bawah. Terakhir saat beban bersifat resistif nilai reaktansi induktif ( $X_L$ ) akan sama dengan nilai reaktansi

kapasitif ( $X_C$ ) sehingga arah impedansi akan sama dengan arah hambatan pada resistor keadaan ini dapat disebut sebagai resonansi(Nur,2017).

Nilai reaktansi induktif ( $X_L$ ), reaktansi kapasitif ( $X_C$ ), dan impedansi ( $Z$ ), dapat dicari berdasarkan persamaan:

$$XL = \omega . L = 2\pi f . L \tag{2.6}$$

$$XC = \frac{1}{\omega . c} \tag{2.7}$$

$$Z = R + j(X_L - X_C) \tag{2.8}$$

Dimana :

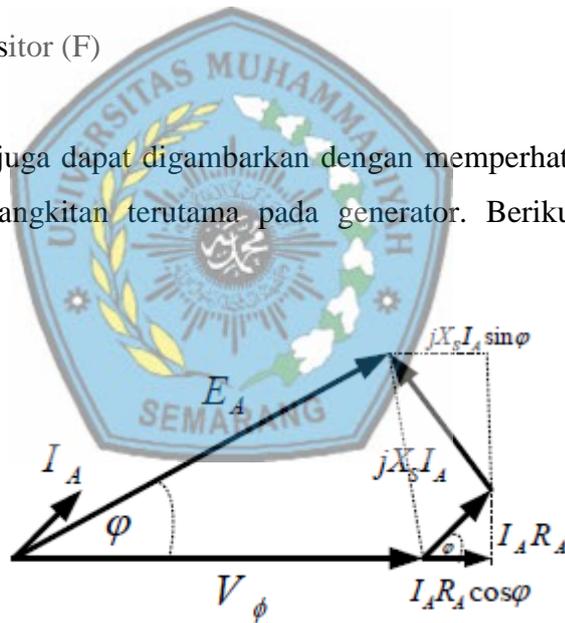
$\omega$  = kecepatan sudut (rad/s)

f = frekuensi (Hz)

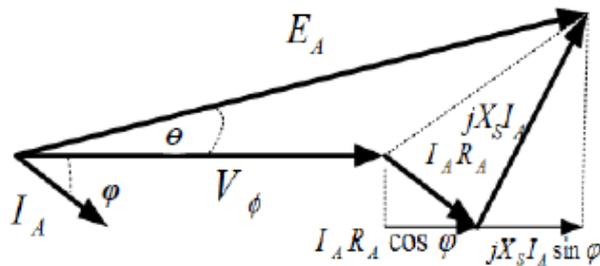
L = Induktansi (H)

C = Kapasitas kapasitor (F)

Diagram fasor juga dapat digambarkan dengan memperhatikan bentuk fasor pada sistem pembangkitan terutama pada generator. Berikut adalah gambar selengkapnya.

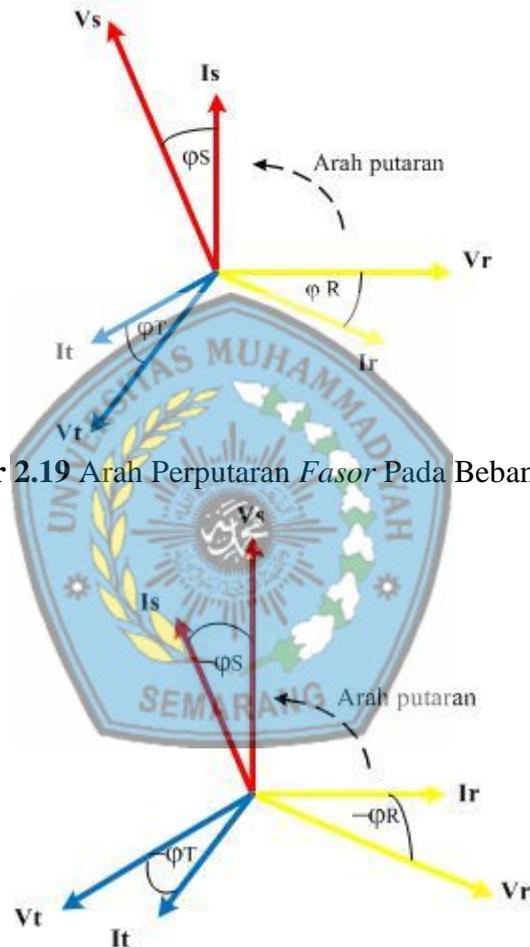


Gambar 2.17 Diagram Fasor Generator pada Beban Kapasitif.



Gambar 2.18 Diagram Fasor Generator pada Beban Induktif.

Selain memiliki diagram, *fasor* juga memiliki arah putaran. Arah putaran yang digunakan adalah berlawanan jarum jam atau mengikuti arah perputaran kuadran satu sampai kuadran empat. Pada beban yang cenderung bersifat induktif sudut fasa antara arus dan tegangan akan bernilai positif sedangkan pada beban yang cenderung bersifat kapasitif sudut fasa antara arus dan tegangan akan bernilai negatif. Berikut adalah arah perputaran *fasor* pada kondisi beban bersifat induktif dan kapasitif(Nur,2017):



**Gambar 2.19** Arah Perputaran *Fasor* Pada Beban Induktif.

**Gambar 2.20** Arah putaran *fasor* pada beban kapasitif.

## 2.6 Daya Sistem Tenaga Listrik

Daya merupakan jumlah energi listrik tiap satuan waktu. Daya listrik dibagi menjadi tiga, yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu. Berikut adalah penjelasan dari ketiga daya tersebut:

### 2.6.1 Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang sebenarnya digunakan oleh konsumen. Daya aktif memiliki satuan Watt. Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk mendapatkan besar daya aktif(Putra,2015):

$$\text{Daya Aktif 1 Fasa } P = V.I.\cos\varphi \quad (2.9)$$

$$\text{Daya Aktif 3 Fasa } P = 3.V.I.\cos\varphi \quad (2.10)$$

### 2.6.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet. Daya aktif diberi simbol Q, sedangkan satuan daya reaktif adalah Var (*Volt Ampere Reactive*). Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk mendapatkan daya reaktif(Putra,2015):

$$\text{Daya Reaktif 1 Fasa } Q = V.I.\sin\varphi \quad (2.11)$$

$$\text{Daya Reaktif 3 Fasa } Q = \sqrt{3}.V.I.\sin\varphi \quad (2.12)$$

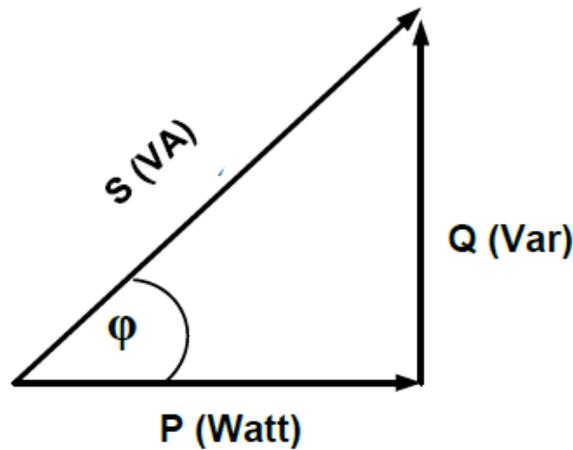
### 2.6.3 Daya kompleks

Daya kompleks merupakan daya yang dibangkitkan oleh generator pada sistem pembangkit listrik. Daya semu diberi simbol S dan memiliki satuan VA (*Volt Ampere*). Daya semu terdiri dari daya aktif dan daya reaktif. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan daya semu tiga fasa adalah(Putra,2015):

$$S = 3.V.I \quad (2.13)$$

### 2.6.4 Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara tipe - tipe daya yang berbeda antara daya semu, daya aktif dan daya reaktif berdasarkan prinsip trigonometri(Putra,2015)



Gambar 2.21 Segitiga Daya.

### 2.6.5 Faktor Daya

Faktor daya merupakan cosinus dari beda sudut fasa antara arus dan tegangan. Faktor daya disimbolkan dengan  $\cos \phi$  dan mempunyai rentang nilai antara 0 sampai 1. Semakin mendekati 1 maka nilai faktor daya akan semakin baik. Kemudian untuk mencari nilai faktor daya dapat dilakukan dengan membagi daya aktif (P) dengan daya kompleks (S). Faktor daya dibagi menjadi dua yaitu faktor daya tertinggal (*lagging*) dan faktor daya mendahului (*leading*) (Putra, 2015).

Faktor Daya = Daya Aktif (P) / Daya kompleks (S)

$$Pf = kW / kVA \quad (2.14)$$

$$Pf = V.I \cos \phi / V.I \quad (2.15)$$

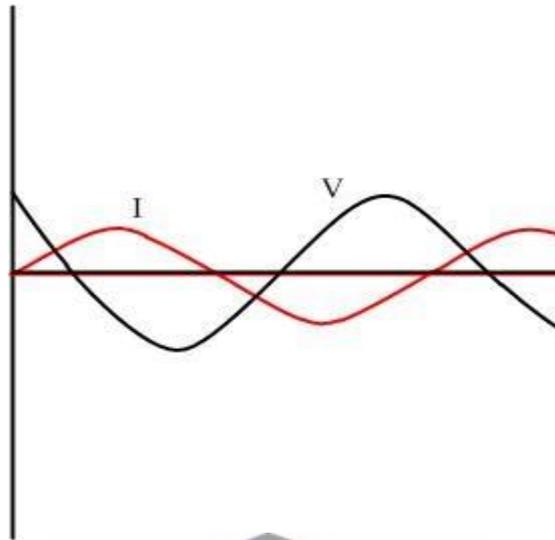
$$Pf = \cos \phi \quad (2.16)$$

Berikut adalah penjelasan mengenai kedua faktor daya tersebut:

a) Faktor Daya Tertinggal (*lagging*)

Faktor daya *lagging* menunjukkan kondisi disaat beban bersifat induktif dan memerlukan daya reaktif dari jaringan. Nilai  $\cos \phi$  pada kondisi *lagging* akan bernilai positif. Kemudian pada gelombang sinus, arus (I) akan tertinggal dengan tegangan

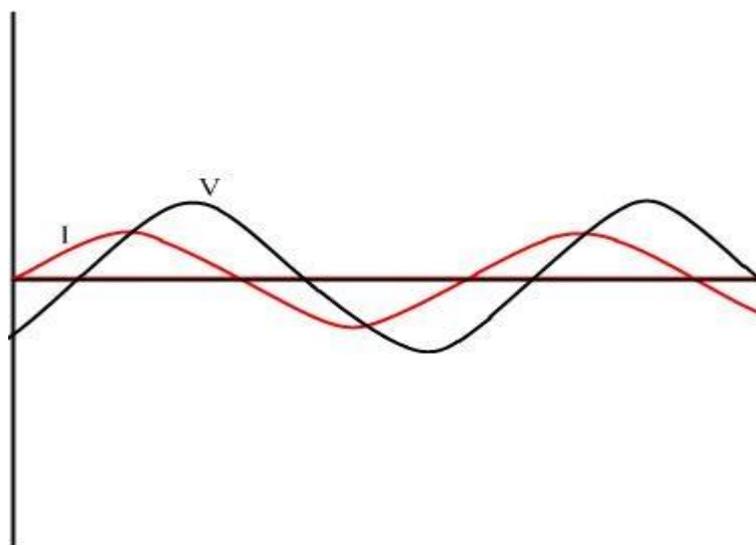
(V) atau tegangan (V) akan mendahului arus (I) dengan sudut  $\phi$ . Berikut adalah gelombang sinus pada faktor daya *lagging*(Nur,2017) :



**Gambar 2.22** Gelombang Sinus pada Faktor Daya *Lagging*.

b) Faktor Daya Mendahului (*leading*)

Faktor daya *leading* menunjukkan kondisi disaat beban bersifat kapasitif dan memberikan daya reaktif ke jaringan. Nilai  $\cos \phi$  pada kondisi *leading* akan bernilai negatif. Kemudian pada gelombang sinus, Arus (I) akan mendahului tegangan (V) atau tegangan (V) akan tertinggal terhadap arus (I) sebesar sudut  $\phi$ . Berikut adalah gambar gelombang sinus pada faktor daya *leading*(Nur,2017):



**Gambar 2.23** Gelombang Sinus pada Faktor Daya *Leading*.

Faktor daya mempunyai nilai range antara 0 – 1 dan dapat juga dinyatakan dalam persen. Faktor daya yang bagus apabila bernilai mendekati satu.

$$\begin{aligned} \tan \varphi &= \frac{\text{Daya reaktif } (Q)}{\text{Daya Aktif } (P)} \\ &= \frac{kV AR}{kW} \end{aligned} \tag{2.17}$$

Karena komponen daya aktif umumnya konstan (komponen kVA dan kVAR berubah sesuai dengan faktor daya), dapat juga di tulis sebagai berikut:

$$Q = P. \tan \varphi \tag{2.18}$$

Sebuah contoh, rating kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya sebagai berikut :

$$\text{Daya reaktif pada pf awal} = P. \tan \varphi_1 \tag{2.19}$$

$$\text{Daya reaktif pada pf diperbaiki} = P. \tan \varphi_2 \tag{2.20}$$

Sehingga rating kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya adalah:

$$\text{Daya reaktif } (kVAR) = \text{Daya Aktif } (kW) \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \tag{2.21}$$

Beberapa keuntungan meningkatkan faktor daya

- a) Tagihan listrik akan menjadi kecil
- b) Kapasitas distribusi sistem tenaga listrik akan meningkat
- c) Mengurangi rugi – rugi daya pada sistem
- d) Adanya peningkatan tegangan karena daya meningkat. Jika pf lebih kecil dari 0,85 maka kapasitas daya aktif (kW) yang digunakan akan berkurang. Kapasitas itu akan terus menurun seiring dengan menurunnya Pf sistem kelistrikan(Putra,2015)

## 2.7 Capacitor Bank

### 2.7.1 Definisi Capacitor Bank

*Capacitor bank* adalah peralatan elektrik untuk meningkatkan faktor daya, yang akan mempengaruhi besarnya arus (Ampere). Pemasangan *capacitor bank* pada sebuah sistem listrik akan memberikan keuntungan sebagai berikut .

Peningkatan faktor daya ini tergantung dari seberapa besar nilai kapasitor yang dipasang (dalam kVAR). Sehingga denda VARh Anda bisa dikurangi. Pada kehidupan modern dimana salah satu cirinya adalah pemakaian energi listrik yang besar. Besarnya energi atau beban listrik yang dipakai ditentukan oleh reaktansi (R), induktansi (L) dan kapasitansi (C). Besarnya pemakaian energi listrik itu disebabkan karena banyak dan beraneka ragam peralatan (beban) listrik yang digunakan. Sedangkan beban listrik yang digunakan umumnya bersifat induktif dan kapasitif. Di mana beban induktif (positif) membutuhkan daya reaktif seperti trafo pada *rectifier*, motor induksi (AC) dan lampu TL, sedang beban kapasitif (negatif) mengeluarkan daya reaktif(Putra,2015).

Daya reaktif itu merupakan daya tidak berguna sehingga tidak dapat dirubah menjadi tenaga akan tetapi diperlukan untuk proses transmisi energi listrik pada beban. Jadi yang menyebabkan pemborosan energi listrik adalah banyaknya peralatan yang bersifat induktif. Berarti dalam menggunakan energi listrik ternyata pelanggan tidak hanya dibebani oleh daya aktif (kW) saja tetapi juga daya reaktif (kVAR). Penjumlahan kedua daya itu akan menghasilkan daya nyata yang merupakan daya yang disuplai oleh PLN(Putra,2015) .

Jika nilai daya itu diperbesar yang biasanya dilakukan oleh pelanggan industri maka rugi-rugi daya menjadi besar sedang daya aktif (kW) dan tegangan yang sampai ke konsumen berkurang. Dengan demikian produksi pada industri itu akan menurun hal ini tentunya tidak boleh terjadi untuk itu suplai daya dari PLN harus ditambah berarti penambahan biaya. Karena daya itu(Putra,2015),

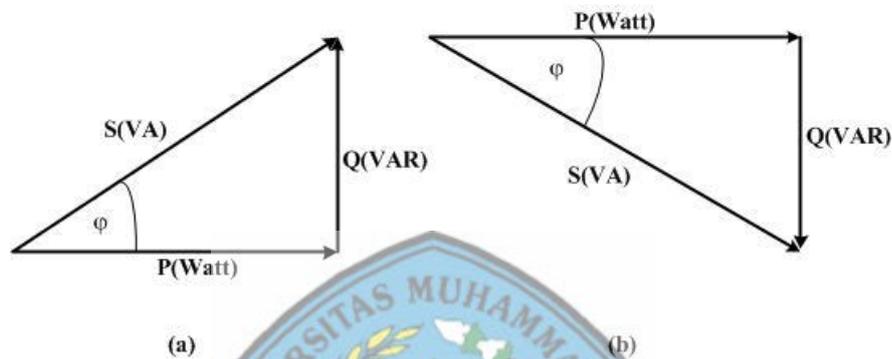
$$P = V . I \quad (2.22)$$

Keterangan : P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

maka dengan bertambah besarnya daya berarti terjadi penurunan harga V dan naiknya harga I. Dengan demikian daya aktif, daya reaktif dan daya nyata merupakan suatu kesatuan yang kalau digambarkan seperti segi tiga siku-siku pada Gambar 2.6 berikut(Putra,2015).



**Gambar 2.24** Segitiga Daya (a) Karakteristik Beban Kapasitif, (b) Karakteristik Beban Induktif.

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ atau } S = V \cdot I$$

$$\text{Faktor daya} = \frac{\text{Daya nyata}}{\text{Daya semu}} = \cos \varphi \quad (2.23)$$

Seperti kita ketahui bahwa harga  $\cos \varphi$  adalah mulai dari 0 s/d 1. Berarti kondisi terbaik yaitu pada saat harga P (kW) maksimum [  $P \text{ (kW)} = S \text{ (kVA)}$  ] atau harga  $\cos \varphi = 1$  dan ini disebut juga dengan  $\cos \varphi$  yang terbaik. Namun dalam kenyataannya harga  $\cos \varphi$  yang ditentukan oleh PLN sebagai pihak yang mensuplai daya adalah sebesar 0,8. Jadi untuk harga  $\cos \varphi < 0,8$  berarti pf dikatakan jelek. Jika pf pelanggan jelek (rendah) maka kapasitas daya aktif (kW) yang dapat digunakan pelanggan akan berkurang. Kapasitas itu akan terus menurun seiring dengan semakin

menurunnya pf sistem kelistrikan pelanggan. Akibat menurunnya pf itu maka akan muncul beberapa persoalan sbb:

- a. Membesarnya penggunaan daya listrik kWh karena rugi-rugi.
- b. Membesarnya penggunaan daya listrik kVAR.
- c. Mutu listrik menjadi rendah karena jatuh tegangan.

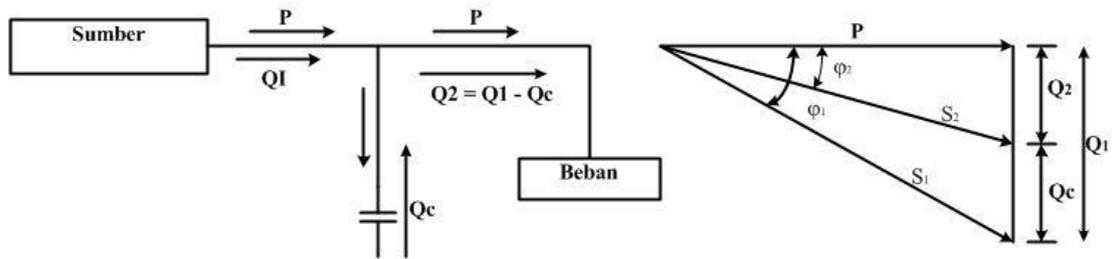
Secara teoritis sistem dengan pf yang rendah tentunya akan menyebabkan arus yang dibutuhkan dari pensuplai menjadi besar. Hal ini akan menyebabkan rugi-rugi daya (daya reaktif) dan jatuh tegangan menjadi besar. Dengan demikian denda harus dibayar sebab pemakaian daya reaktif meningkat menjadi besar. Denda atau biaya kelebihan daya reaktif dikenakan apabila jumlah pemakaian kVARH yang tercatat dalam sebulan lebih tinggi dari 0,62 jumlah kWh pada bulan yang bersangkutan sehingga pf rata-rata kurang dari 0,85(Putra,2015).

### 2.7.2 Prinsip Kerja *Capasitor Bank*

Berdasarkan dari cara kerjanya, *capasitor bank* dibedakan menjadi 2 :

- 1) **Fixed type**, yaitu dengan memberikan sebuah beban kapasitif yang tetap ataupun berubah-ubah pada beban. Biasanya digunakan pada beban langsung seperti pada motor induksi. Pada tipe ini harus dipertimbangkan adalah pada saat pemasangan *capasitor bank* tanpa beban.
- 2) **Automatic type**, yaitu memberikan beban kapasitif yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan *capasitor bank* yang terpasang. Pada tipe ini jenis panel dilengkapi dengan sebuah *Power Factor Controller* (PFC) sebagai pengaman. PFC akan menjaga  $\cos \phi$  pada jaringan listrik yang sesuai dengan target yang ditentukan. Apabila pada tipe ini terjadi perubahan beban, maka PFC secara otomatis akan memperbaiki  $\cos \phi$ .

Sebagaimana diketahui membangkitkan daya reaktif pada pusat pembangkit tenaga dan menyalurkannya kepusat beban yang jaraknya jauh, sangatlah tidak ekonomis. Hal ini dapat di atasi dengan meletakkan kapasitor pada pusat beban. Gambar 2.24 berikut menunjukkan cara perbaikan faktor daya untuk sistem tersebut(Putra,2015).



**Gambar 2.25** Perbaikan Faktor Daya Dengan *Capasitor*

### 2.7.3 Proses Kerja Kapasitor

kapasitor yang akan digunakan untuk meperbesar pf dipasang paralel dengan rangkaian beban. Bila rangkaian itu diberi tegangan maka elektron akan mengalir masuk ke kapasitor. Pada saat kapasitor penuh dengan muatan elektron maka tegangan akan berubah. Kemudian elektron akan ke luar dari kapasitor dan mengalir ke dalam rangkaian yang memerlukannya dengan demikian pada saat itu kapasitor membangkitkan daya reaktif. Bila tegangan yang berubah itu kembali normal (tetap) maka kapasitor akan menyimpan kembali elektron. Pada saat kapasitor mengeluarkan elektron ( $I_c$ ) berarti sama juga kapasitor menyuplai daya treaktif ke beban. Karena beban bersifat induktif (+) sedangkan daya reaktif bersifat kapasitor (-) akibatnya daya reaktif yang berlaku menjadi kecil. Rugi-rugi daya sebelum dipasang kapasitor(Putra2015).

$$\text{Rugi daya aktif} = I^2 R \text{ (Watt)}$$

$$\text{Rugi daya reaktif} = I^2 x X_c \text{ (VAR)} \quad (2.24)$$

Rugi-rugi daya sesudah dipasang kapasitor :

$$\text{Rugi daya aktif} = (I^2 - I_c^2) R \text{ (Watt)}$$

$$\text{Rugi daya reaktif} = (I^2 - I_c^2) x X_c \text{ (VAR)} \quad (2.25)$$

### 2.7.4 Hubungan Kapasitor 3 Fasa

Adapun cara memasang *capasitor bank* pada instalasi listrik dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu (Bukhari, 2012):

1) *Global compensation*

Dengan metode ini *capasitor bank* dipasang pada induk panel *mine distribution panel* (MDP) dan arus yang turun dari pemasangan model ini hanya pada penghantar antara panel MDP dan transformator

2) *Sectoral Compensation*

Dengan metoda ini pemasangan *capasitor bank* yang terdiri dari beberapa panel kapasitor yang akan dipasang pada setiap panel *sub distribution panel* (SDP).

3) *Individual Compensation*

Dengan metoda ini *capasitor bank* langsung dipasang pada masing masing beban yang akan digunakan khususnya beban yang mempunyai daya yang besar.

**2.7.5 Komponen-komponen *Capasitor Bank***

**a. *Main switch / load Break switch***

*Main switch* ini sebagai peralatan kontrol dan isolasi jika ada pemeliharaan panel . Sedangkan untuk pengaman kabel / instalasi sudah tersedia disisi atasnya dari PDU. *Main switch* atau lebih dikenal *load break switch* adalah peralatan pemutus dan penyambung yang sifatnya on load yakni dapat diputus dan disambung dalam keadaan berbeban, berbeda dengan *on-off switchmodel knife* yang hanya dioperasikan pada saat tidak berbeban .Untuk menentukan kapasitas yang dipakai dengan perhitungan minimal 25 % lebih besar dari perhitungan KVar terpasang dari sebagai contoh : Jika daya kvar terpasang 400 Kvar dengan arus 600 Ampere , maka pilihan kita berdasarkan  $600 A + 25 \% = 757$  Ampere yang dipakai size 800 Ampere.

**b. *Capasitor Breaker***

*Capasitor Breaker* digunakan untuk mengamankan instalasi kabel dari breaker ke *Capasitor bank* dan juga kapasitor itu sendiri. Kapasitas breaker yang digunakan sebesar 1,5 kali dari arus nominal dengan  $I_m = 10 \times I_r$ .

Untuk menghitung besarnya arus dapat digunakan rumus  $I_n = Q_c / 3 \cdot V_L$ . Sebagai contoh : masing masing steps dari 10 steps besarnya 20 Kvar maka dengan menggunakan rumus diatas didapat besarnya arus sebesar 29 ampere , maka pemilihan kapasitas breaker sebesar  $29 + 50 \% = 43 \text{ A}$  atau yang dipakai 40 Ampere. Selain breaker dapat pula digunakan Fuse , Pemakaian Fuse ini sebenarnya lebih baik karena respon dari kondisi over current dan Short circuit lebih baik namun tidak efisien dalam pengoperasian jika dalam kondisi putus harus selalu ada penggantian fuse. Jika memakai fuse perhitungannya juga sama dengan pemakaian breaker.

**c. *Magnetic Contactor***

*Magnetic contactor* diperlukan sebagai Peralatan kontrol. Beban kapasitor mempunyai arus puncak yang tinggi , lebih tinggi dari beban motor. Untuk pemilihan magnetic contactor minimal 10 % lebih tinggi dari arus nominal (pada AC 3 dengan beban induktif/kapasitif). Pemilihan magnetic dengan range ampere lebih tinggi akan lebih baik sehingga umur pemakaian magnetic contactor lebih lama.

**d. *Capasitor Bank***

*Capasitor bank* adalah peralatan listrik yang mempunyai sifat kapasitif yang akan berfungsi sebagai penyeimbang sifat induktif. Kapasitas kapasitor dari ukuran 5 KVar sampai 60 Kvar. Dari tegangan kerja 230 V sampai 525 Volt.

**e. *Reactive Power Regulator***

Peralatan ini berfungsi untuk mengatur kerja kontaktor agar daya reaktif yang akan disupply ke jaringan/ system dapat bekerja sesuai kapasitas yang dibutuhkan. Dengan acuan pembacaan besaran arus dan tegangan pada sisi utama *Breaker* maka daya reaktif yang dibutuhkan dapat terbaca dan regulator inilah yang akan mengatur kapan dan berapa daya reaktif yang diperlukan. Peralatan ini mempunyai bermacam macam steps dari 6 steps , 12

steps sampai 18 steps. Peralatan tambahan yang biasa digunakan pada panel kapasitor antara lain :

- 1) *Push button on* dan *push button off* yang berfungsi mengoperasikan *magnetic contactor* secara manual.- *Selektor auto – off – manual* yang berfungsi memilih system operasional auto dari modul atau manual dari *push button*.
- 2) *Exhaust fan + thermostat* yang berfungsi mengatur *ambein temperature* dalam ruang panel kapasitor. Karena kapasitor , kontaktor dan kabel penghantar mempunyai disipasi daya panas yang besar maka temperature ruang panel meningkat. Setelah setting dari *thermostat* terlampaui maka *exhust fan* akan otomatic berhenti.

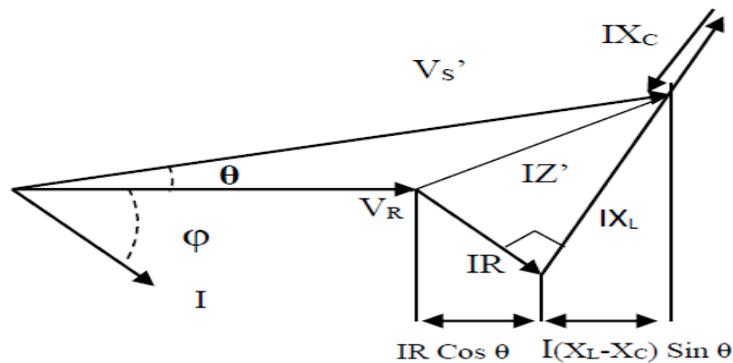
**f. Setup C/K PFR**

*Capacitor Bank* agar *Power Factor Regulator* (PFR) yang terpasang pada *Panel Capacitor Bank* dapat bekerja secara maksimal dalam melakukan otomatisasi mengendalikan kerja kapasitor maka diperlukan *setup C/K* yang sesuai.

**2.7.6 Instalasi Kapasitor 3 Fasa**

**1) Series Capacitor (kapasitor Seri)**

*Series Capacitor* (kapasitor Seri) merupakan kapasitor yang terpasang seri dengan saluran. Penggunaan kapasitor seri untuk mengkompensasi reaktansi induktif. Pada kurva gambar 2.8 dapat ditunjukkan bahwa kapasitor yang merupakan reaktansi negatif dan akan mengurangi reaktansi induktif yang bernilai positif. Sehingga penggunaan kapasitor seri dapat meminimisasi tegangan jatuh yang disebabkan oleh reaktansi induktif saluran dan menaikkan tegangan(Nur,2017)



**Gambar 2.26** Kurva Kompensasi Reaktansi Induktif dengan Pemasangan kapasitor Seri.

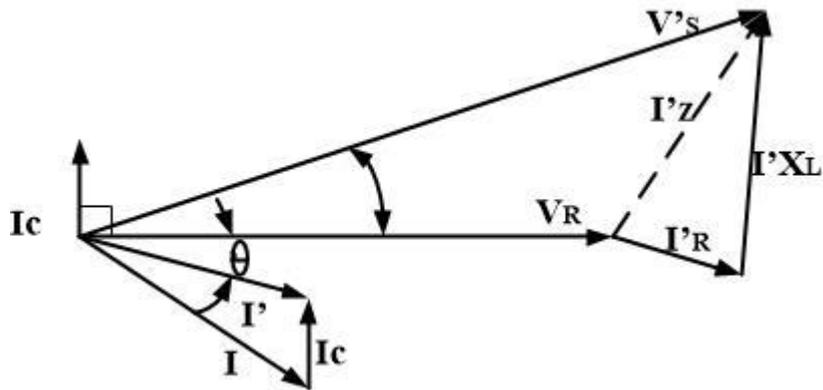
Secara umum persamaan voltage drop setelah adanya kompensasi kapasitor seri dapat ditunjukkan pada persamaan .

$$VD = IR \cos \varphi + I(X_L - X_C) \sin \varphi \quad (2.26)$$

Namun pemilihan kapasitas dari kapasitor seri yang terlalu besar dibandingkan nilai kompensasi reaktansi induktif yang diinginkan, maka akan menyebabkan mudah terjadi *over compensation* sehingga sistem akan mengalami *leading power factor*. Selain itu pemasangan kapasitor seri akan menyebabkan adanya fero resonansi pada transformer, resonansi *subsynchronous* selama *starting* pada beban motor, dan sulitnya pemasangan sistem proteksi untuk kapasitor seri, maka penerapan dari kapasitor seri jarang digunakan pada sistem distribusi(Nur,2017).

## 2) *Shunt Capacitor* (Kapasitor Pararel)

*Shunt Capacitor* (kapasitor Pararel) merupakan kapasitor yang terpasang secara pararel dengan saluran, dan sering diterapkan pada sistem distribusi karena dapat mengatasi *voltage drop*, mengurangi rugi-rugi daya, dan memperbaiki nilai factor daya, serta mudah diterapkan sistem proteksi. Penggunaan kapasitor pararel dapat memberikan kompensasi daya reaktif kepada beban. Pada kurva gambar 2.9 menunjukkan arus yang diinjeksikan oleh kapasitor pararel mampu mengubah vektor arus ke arah *leading* sehingga *voltage drop* akibat beban induktif saluran dapat teratasi dan tegangan pada beban tetap terjaga pada kondisi yang diinginkan(Nur,2017).



**Gambar 2.27** Kurva Kompensasi Arus Kapasitor Untuk Mereduksi *Voltage Drop*.

Persamaan (2.10) menunjukkan reduksi *voltage drop* dengan pemasangan Kapasitor paralel, sehingga tegangan yang dinaikkan oleh Kapasitor paralel dapat ditunjukkan pada persamaan (Nur, 2017).

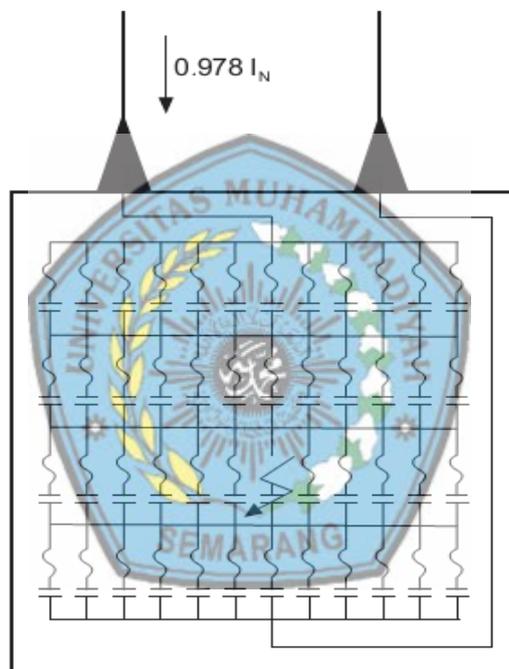
$$V_D = I_R R + I_L X_L - I_C X_C \quad (2.27)$$

$$V_{RISE} = I_C X_C \quad (2.28)$$

### 2.7.7 Model *Capacitor Bank* pada Sistem Distribusi

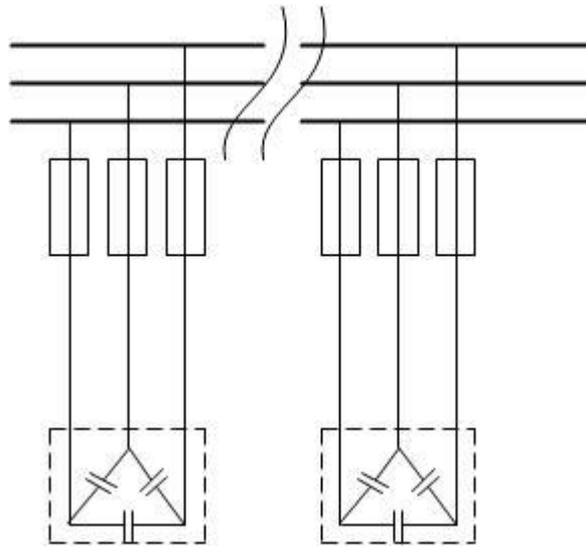
*Capacitor Bank* merupakan suatu Kapasitor yang terdiri lebih dari satu unit Kapasitor yang saling terhubung paralel maupun seri untuk menginjeksikan daya reaktif ke sistem tenaga listrik sehingga meminimisasi adanya *voltage drop* dan rugi-rugi daya. Pada sistem distribusi, jika suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban maka semua kebutuhan beban reaktifnya dipikul oleh gardu induk yang tersuplai dari generator pada pembangkit listrik, sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan yang mengakibatkan faktor daya menurun, *voltage drop*, dan bertambahnya rugi-rugi daya. Sehingga dengan adanya pemasangan *capacitor bank* mampu memperbaiki kualitas dan stabilitas sistem pada kondisi yang baik. Model *capacitor bank* yang digunakan pada sistem distribusi diantaranya adalah *fixed capacitor bank* dan *automatic capacitor bank*. Perbedaan dari kedua model *capacitor bank* ini yaitu, pada *automatic capacitor bank* memiliki kemampuan *switching* setiap unit kapasitor maupun setiap segmen Kapasitor yang ada didalamnya sehingga penentuan kapasitas daya reaktif yang diinjeksikan dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem, sedangkan *fixed capacitor bank* hanya

memiliki kemampuan injeksi besaran daya reaktif yang tetap. Sedangkan berdasarkan konfigurasinya, *capacitor bank* terdiri dari satu fasa dan tiga fasa. *Capacitor bank* satu fasa memiliki unit-unit kapasitor yang saling terhubung paralel dalam satu segmen, setiap segmen kapasitor dapat saling terhubung seri atau paralel sesuai kebutuhan, hal tersebut juga dimiliki oleh *Capacitor bank* tiga fasa. Namun *capacitor bank* tiga fasa memiliki konfigurasi belitan delta dan bintang (*star/bye*) sesuai kebutuhan dari penggunaan Kapasitor. *Capacitor bank* satu fasa dapat dilihat pada gambar 2.10 yang memiliki dua terminal *output*, yaitu terminal yang terhubung dengan fasa dan terminal yang terhubung dengan netral(Nur,2017).



**Gambar 2.28** *Capacitor Bank* Satu Fasa.

Pada gambar 2.11 dan 2.12 masing-masing menunjukkan konfigurasi *Capacitor bank* tiga fasa hubung delta dan bintang (*star/bye*). Kedua belitan tersebut masing-masing memiliki tiga terminal output yang terhubung pada masing-masing fasa R, S, T. Secara umum *capacitor bank* dengan konfigurasi belitan dellta digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif pada beban motor tiga fasa sehingga penggunaannya banyak ditemukan di dunia industri, sedangkan *capacitor bank* dengan konfigurasi belitan bintang (*star/bye*) digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif pada sistem tenaga listrik tingkat distribusi maupun transmisi(Nur,2017).



**Gambar 2.29** Konfigurasi *Capacitor Bank* Hubung Delta.

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_c \cdot V_L \quad (2.29)$$

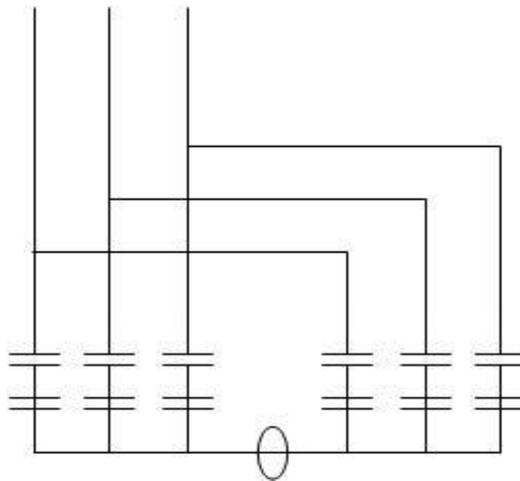
$$Q_c = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I_c \cdot I_c \quad (2.30)$$

$$Q_c = 3 \cdot I_c \cdot V_L \quad (2.31)$$

$$I_c = \frac{V_c}{X_c} \quad (2.32)$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c} \quad (2.33)$$

$$C_d = \frac{Q_c}{6\pi f v^2} \quad (2.34)$$



**Gambar 2.30** Konfigurasi *Capacitor Bank* Hubung Bintang (*Wye/Star*).

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_L \cdot V_c \quad (2.35)$$

$$I_c = \frac{V_c}{X_c} = \frac{V_L/\sqrt{3}}{X_c} \quad (2.36)$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c} \quad (2.37)$$

$$C_b = \frac{Q_c}{2\pi f v^2} \quad (2.38)$$

### 2.7.8 Menentukan Ukuran Kapasitor untuk Memerbaiki Faktor Daya

Ukuran kapasitor untuk memperbaiki faktor daya sistem pada titik-titik tertentu dapat secara manual untuk sistem distribusi yang relatif kecil, KVAR kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya  $\cos \phi_1$  sampai dengan  $\cos \phi_2$ . Ada beberapa Metode dalam mencari ukuran kapasitor untuk perbaikan faktor daya seperti dengan metode perhitungan sederhana, metode tabel kompensasi dan metode diagram (Putra, 2015).

#### a. Metode Perhitungan Sederhana

Dalam metode sederhana dapat kita mencari ukuran kapasitor data yang diperlukan antara lain :

Daya Semu = S ( kVA)

Daya Aktif = P (kW)

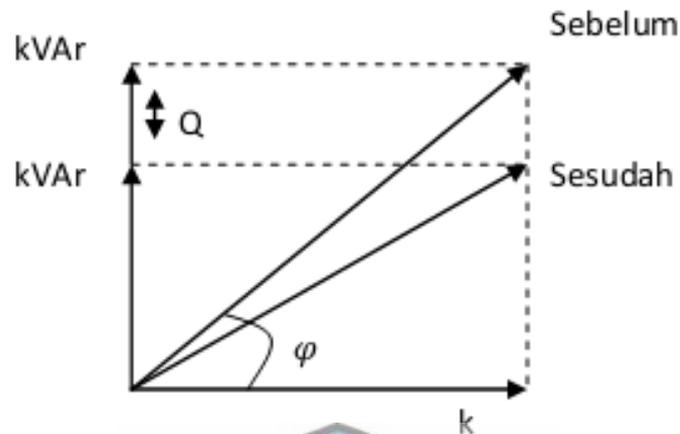
Daya Reaktif = Q

Agar mempermudah mengingat simbol Daya reaktif kita gunakan simbol QL ( Daya reaktif PF lama) dan QB (Daya Reaktif PF baru). Jadi dapat kita simpulkan bahwa persamaan perhitungan sederhana yaitu :

$$Q_c = Q_L - Q_B \quad (2.39)$$

## b. Metode Diagram

Dalam menentukan besarnya kapasitor yang dibutuhkan diperlukan diagram sebelum kompensasi dan sesudah kompensasi maka dapat di gambarkan sebagai berikut :



**Gambar 2.31** Diagram Daya Untuk Menentukan *Capasitor*.

Dapat di peroleh persamaan sebagai berikut :

$$Q_c = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (2.40)$$

## 2.8 Kualitas Daya Listrik

Peningkatan terhadap kebutuhan dan konsumsi energi listrik yang baik dari segi kualitas dan kuantitas menjadi salah satu alasan mengapa perusahaan utilitas penyedia listrik perlu memberi perhatian terhadap isu kualitas daya listrik. Terlebih pada konsumen perindustrian yang membutuhkan suplay listrik yang baik yaitu dari segi kontinuitas dan juga kualitas tegangan yang disuplay (karena mesin - mesin pada perindustrian sensitif terhadap lonjakan/ ketidakstabilan tegangan) perlu diusahakan suatu sistem pendistribusian tenaga listrik yang dapat memberikan pelayanan yang memenuhi kriteria yang diinginkan konsumennya. Istilah kualitas daya listrik bukanlah hal yang baru melainkan sudah menjadi isupenting pada industri sejak akhir 1980 - an. Kualitas daya listrik memberikan gambaran akan baik buruknya suatu sistem ketenagalistrikan dalam mengatasi gangguan - gangguan pada sistem tersebut(Putra,2015).

Roger C. Dugan memberikan empat alasan utama perlunya perhatian lebih akan masalah kualitas daya :

1. Perangkat listrik yang digunakan pada saat ini sangat sensitif terhadap kualitas daya listrik yang mana perangkat berbasis mikroprosesor dan elektronika daya lainnya membutuhkan tegangan pelayanan yang stabil dan level tegangannya juga harus dijaga pada tegangan kerja perangkat tersebut.
2. Peningkatan yang ditekankan pada efisiensi daya / sistem kelistrikan secara keseluruhan yang mengakibatkan pertumbuhan lanjutan dalam aplikasi perangkat dengan efisiensi tinggi, seperti pengaturan kecepatan motor listrik dan penggunaan *capasitor bank* untuk koreksi faktor daya untuk mengurangi rugi –rugi. Hal ini mengakibatkan peningkatan tingkat harmonik pada sistem tenaga dan mengakibatkan banyak praktisi dibidang sistem tenaga listrikan khawatir akan dampak tersebut di masa depan (dikhawatirkan dapat menurunkan kemampuan dari sistem tersebut).
3. Meningkatnya kesadaran para konsumen akan masalah kualitas daya. Dimana pelanggan / konsumen menjadi lebih mengerti akan masalah seperti interupsi, sags, dan transien switching dan mengharapkan sistem utilitas listrik untuk meningkatkan kualitas daya yang dikirim.
4. Sistem tenaga listrik sekarang ini sudah banyak yang melakukan interkoneksi antar jaringan, di mana hal ini memberikan suatu konsekuensi bahwa kegagalan dari setiap komponen akan mengakibatkan kegagalan pada komponen lainnya.

Masalah yang dapat timbul dari sistem tenaga listrik dengan kualitas daya yang buruk dapat berupa masalah lonjakan/ perubahan tegangan, arus dan frekuensi yang akan menimbulkan kegagalan/ misoperasi peralatan. Yang mana kegagalan ini merusak peralatan listrik baik dari sisi pengirim maupun sisi penerima. Untuk itu demi mengantisipasi kerugian yang dapat terjadi baik dari pihak PLN maupun masyarakat, pihak PLN harus mengupayakan sistem ketenagalistrikan yang baik.

### 2.8.1 Pengaruh *Capasitor Bank* Terhadap Kualitas Daya Listrik

Pemakaian energi listrik pada beban beban listrik, sering menimbulkan problem karena daya yang dikonsumsi tidak sesuai dengan daya yang dibutuhkan oleh beban Hal ini disebabkan karena faktor daya pada beban terpasang cukup rendah. Umumnya penyaluran akan daya listrik digunakan melayani beban-beban seperti: motor-motor listrik, transformator, lampu TL dan peralatan listrik lainnya yang mana beban-beban tersebut mengandung gulungan-gulungan kawat (induktor). Induktor merupakan komponen yang menyerap daya listrik untuk keperluan magnetisasi dan daya listrik tersebut disebut daya reaktif. Suatu beban dikatakan induktif apabila beban tersebut membutuhkan daya reaktif dan disebut kapasitif apabila menghasilkan daya reaktif. Bertambahnya beban yang bersifat induktif membutuhkan daya reaktif yang sangat besar sehingga sumber (pembangkit listrik) harus mensuplai daya yang lebih besar. Keadaan seperti ini dapat menyebabkan jatuh tegangan, arus pada jaringan bertambah dan faktor daya rendah pada daerah dekat beban. kapasitor adalah komponen pasif yang menghasilkan daya reaktif. Konstruksi kapasitor ini terdiri atas dua keping pelat (konduktor) sejajar dan di tengah-tengahnya terdapat suatu bahan dielektrik (Putra,2015).

Nilai kapasitansi suatu kapasitor (C) adalah :

$$C = \frac{1}{2\pi F X_c} \quad (2.41)$$

C = kapasitansi (farad)

F = frekuensi

Xc = reaktansi kapasitif

$\pi = (3,14)$

Proses pengurangan daya reaktif itu bisa terjadi karena kedua beban (induktor dan kapasitor) arahnya berlawanan akibatnya daya reaktif menjadi kecil. Bila daya reaktif menjadi kecil sementara daya aktif tetap maka harga pf menjadi besar akibatnya daya nyata (kVA) menjadi kecil (Nur,2017).

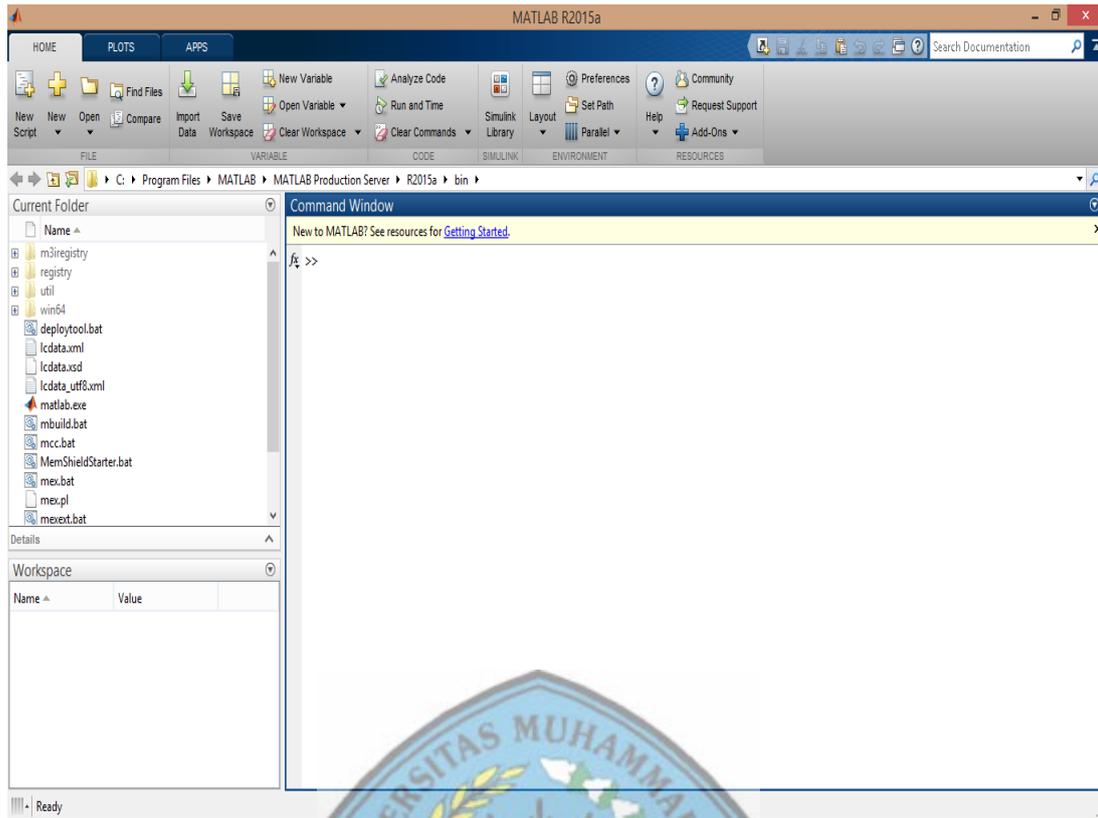
## 2.9 Matlab

MATLAB adalah singkatan dari MATRIX LABORATORY, yang biasanya di gunakan dalam :

- 1) Pengembangan Algoritma matematika dan komputasi
- 2) Pemodelan, simulasi, dan pembuatan *prototype* dari penerimaan data
- 3) Analisa, eksplorasi, dan visualisasi data
- 4) *Scientific* dan *engineering*
- 5) Pengembangan aplikasi berbasis grafik dan pembuatan *Graphical User Interface* (GUI)

Software MATLAB memiliki pengaplikasian yang berbeda – beda khususnya dalam pengaplikasian yang membutuhkan perhitungan secara matematis. Penting untuk mengetahui bahwa matlab melakukan seluruh perhitungan matematis dalam bentuk matriks. Semua operasi matematika dalam MATLAB adalah operasi matriks. MATLAB dapat menunjukkan hasil perhitungan dalam bentuk grafik dan dapat dirancang sesuai keinginan kita menggunakan GUI yang kita buat sendiri.

MATLAB juga bersifat *extensible*, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk menambahkan pada *library*, ketika fungsi-fungsi *built-in* yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu. Kemampuan pemrograman yang dibutuhkan tidak terlalu sulit bila kita telah memiliki pengalaman dalam pemrograman bahasa lain seperti C, PASCAL, atau FORTRAN. MATLAB (*Matrix Laboratory*) yang juga merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks, sering kita gunakan untuk teknik komputasi numerik, yang kita gunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dll. Sehingga Matlab banyak digunakan pada : Matematika dan komputansi, Pengembangan dan algoritma, Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototipe, Analisa data , eksplorasi dan visualisasi, Analisis numerik dan statistik dan Pengembangan aplikasi teknik.



**Gambar 2.32** Tampilan awal MATLAB

Secara default, MATLAB terdiri dari :

*Command window* yang merupakan tempat di mana kita menuliskan fungsi yang kita inginkan. *Command history* untuk melihat dan menggunakan kembali fungsi–fungsi sebelumnya. *Workspace* yang berisi variabel yang kita gunakan dan untuk membuat variabel baru dalam MATLAB. *Current directory* menunjukkan folder- folder yang berisi file MATLAB yang sedang berjalan.

Kelebihan MATLAB :

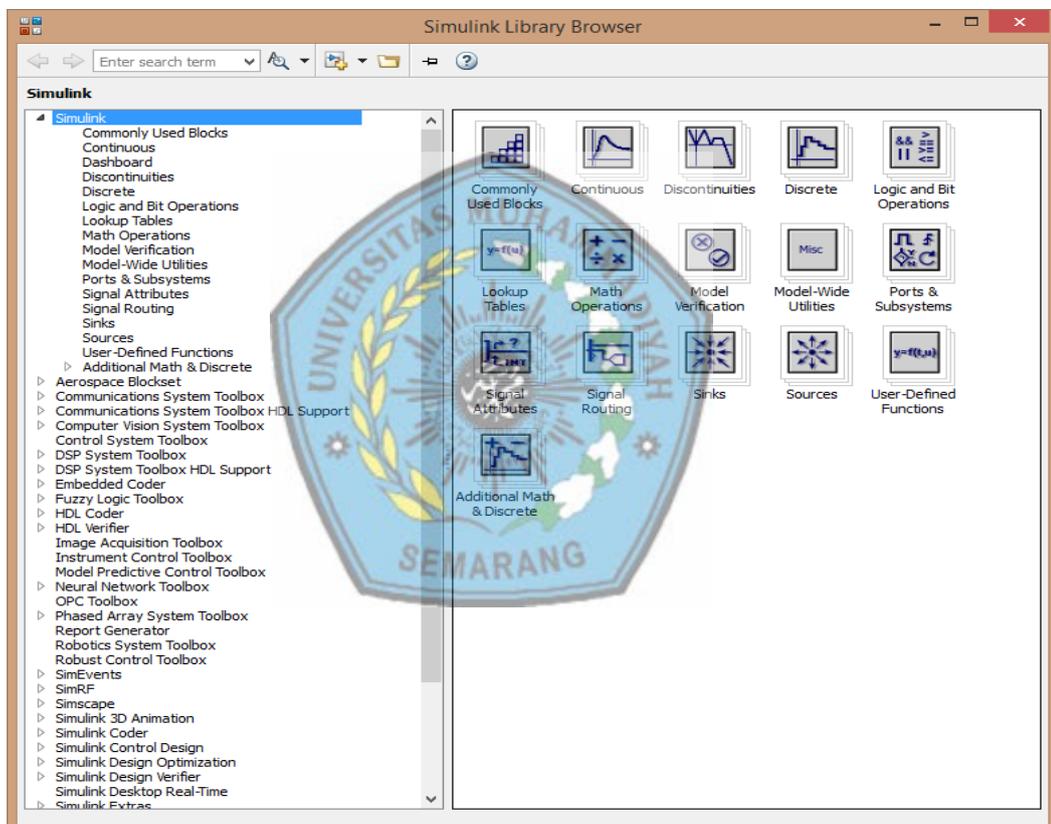
- 1) Mudah dalam memanipulasi struktur matriks dan perhitungan berbagai operasi matriks yang meliputi penjumlahan, pengurangan, perkalian, invers dan fungsi matriks lainnya.
- 2) Menyediakan fasilitas untuk memplot struktur gambar (kekuatan fasilitas grafik tiga dimensi yang sangat memadai).
- 3) Script program yang dapat diubah sesuai dengan keinginan user.
- 4) Jumlah routine – routine powerful yang berlimpah yang terus berkembang.
- 5) Dilengkapi dengan toolbox, simulink, stateflow dan sebagainya.

## Kelemahan MATLAB

- 1) Lebih lambat dalam mengeksekusi
- 2) Mahal

### 2.10 Simulink

Simulink adalah *platform* didalam MATLAB yang digunakan untuk mensimulasikan sistem dinamik secara *realtime*. Untuk memulai simulink Ketik simulink pada jendela perintah MATLAB. Maka akan nampak Library untuk Simulink seperti gambar berikut.

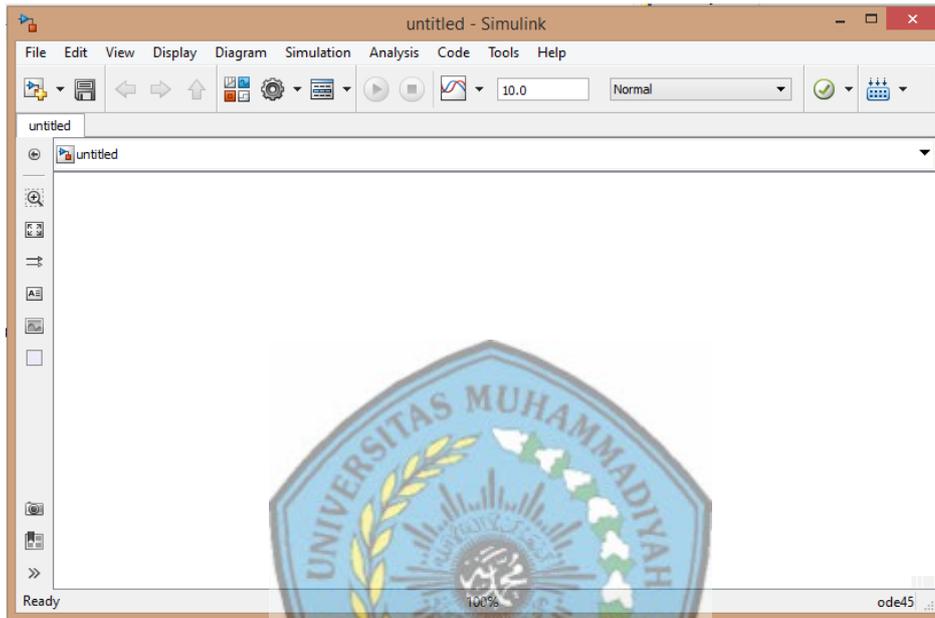


**Gambar 2.33** Simulink library browser.

Didalam simulink terdapat beberapa menu block sheet seperti dashboard yang berisi blok untuk mengontrol dan memvisualisasikan sinyal dalam model sistem kontrol bahan bakar, sink yang berisi komponen yang dapat menampilkan atau mengekspor blok data sinyal seperti scope dan to workspace. Khusus untuk di teknik elektro ada beberapa blocksheet antara lain communications system toolbox yang menyediakan algoritma dan aplikasi untuk analisis, desain, simulasi end-to-end, dan

verifikasi sistem komunikasi di MATLAB. Simscape yang menyediakan sistem seperti motor listrik, penyearah jembatan, aktuator hidrolik, dan sistem pendingin dengan merakit komponen-komponen mendasar tersebut menjadi skema.

Cara untuk membuat model baru yaitu dengan mengklik File > New > Model di *Library* milik Simulink. Maka akan terbuka jendela model yang masih kosong.

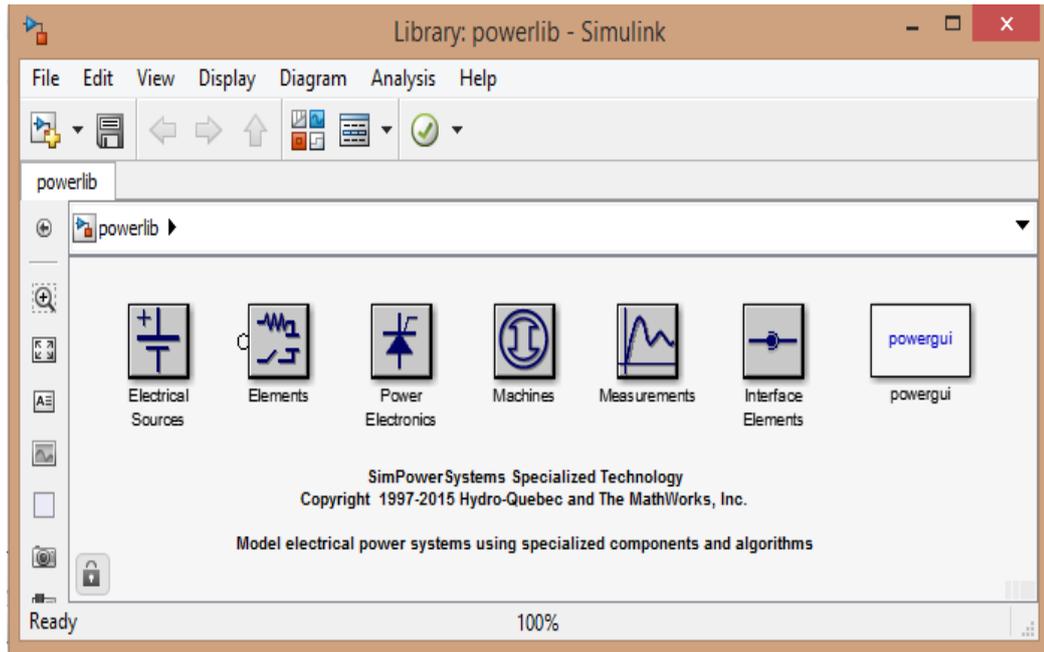


**Gambar 2.34** Model lembar kerja.

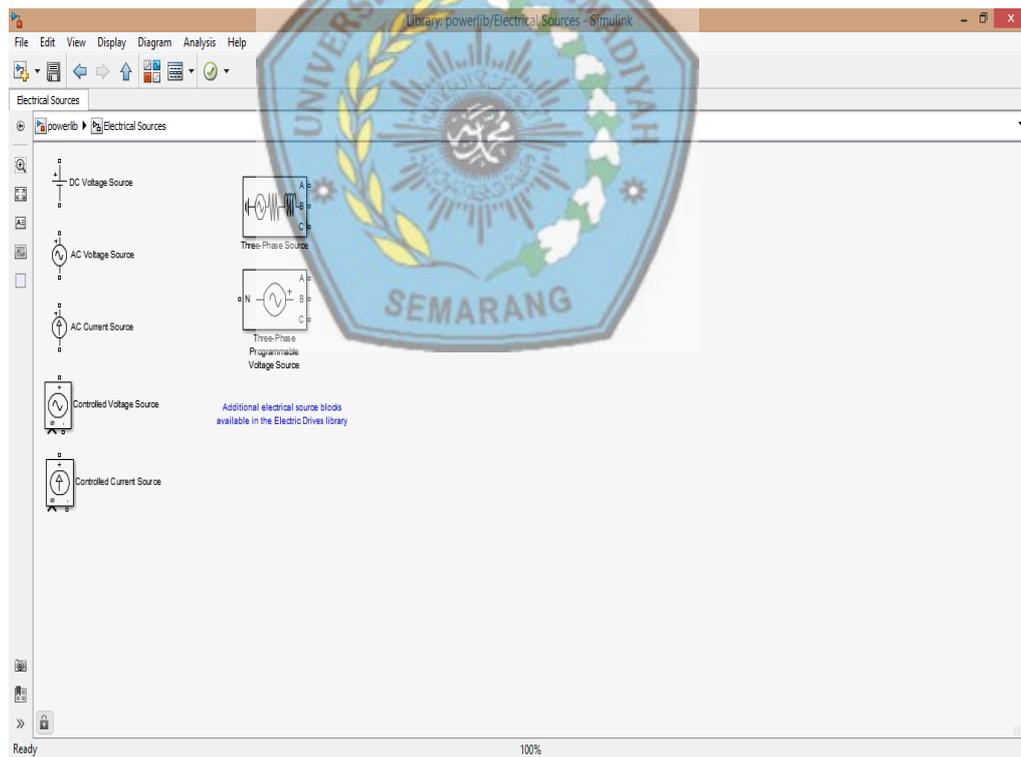
Sistem dari pembuatan suatu simulasi dengan cara mengklik and drag atau dengan cara mengkopi dari library browser ke model lembar kerja. Khusus untuk ketenaga listrikan analisisnya dapat menggunakan *power library*.

### **2.11 Power Library**

Didalam jendela powerlib terdapat beberapa *blocks electrical* antara lain *electrical souce*, *elements*, *power electronics*, *machines*, *measurement*, *interface element* dan *power gui*. Cara untuk menampilkan menu *powerlibrary* adalah dengan menulis *powerlib* pada *command window* lalu tekan *enter* maka akan muncul tampilan seperti gambah dibawah ini.

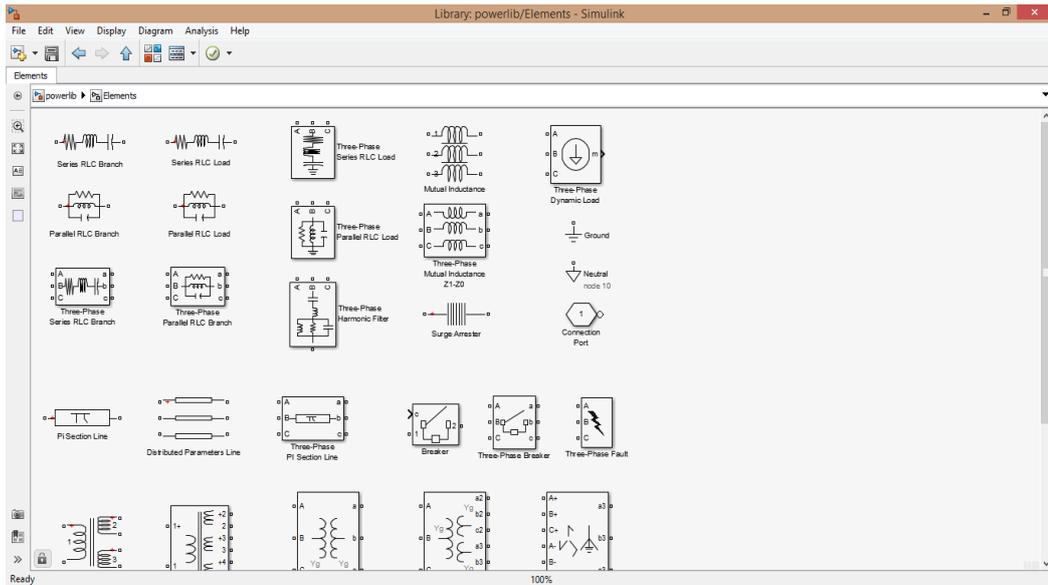


Gambar 2.35 jendela *powerlib electrical*.



Gambar 2.36 *Blocks electrical source*.

Didalam *blocks electrical source* terdapat beberapa blok mulai dari sumber tegangan DC, sumber tegangan AC dan sumber tegangan AC 3 fasa.



**Gambar 2.37** *Blocks element.*

Didalam menu *blocks elements* terdapat beberapa blok mulai dari *transformers*, *series RLC load*, *grounding* dan *breaker*.



**Gambar 2.38** *Blocks measurement.*

Didalam *bock measurement* terdapat beberapa blok seperti *current measurement*, *voltage measurement* dan *multimeter*.