

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kajian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian tentang *losses* dan faktor daya diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Ibnu Hajar dan Suninda Megi Rahayuni (2020) dengan judul “*Analisis Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Bank Di Plant 6 PT Indocement Tungal Prakarsa Tbk. Unit Citeureup*” yang bertujuan untuk menentukan kebutuhan kapasitor, menentukan kapasitas kapasitor dan mengamati pengaruh pemasangan kapasitor bank. Hasil yang didapat adalah Perbaikan faktor daya menjadi 0.95 pada sistem energi listrik di *plant 6* untuk *main feeder AA 5 (from main transformer 6.1)* harus dipasang kapasitor bank sebesar 6172,33 kVAR dan untuk *main feeder AA 8 (from main transformer 6.2)* harus dipasang kapasitor bank sebesar 5388,88 kVAR (kebutuhan total kapasitor bank sebagai kompensasi faktor daya yang harus dipasang adalah 11561,21 kVAR). Kapasitas kapasitor sebesar 4,512 Farad untuk *main feeder AA 5 (from main transformer 6.1)* dan 3,939 Farad untuk *main feeder AA 8 (from main transformer 6.2)*. Dengan total kapasitas kapasitor sebesar 8,451 Farad [1].

Ahmad Rofii dan Rijon Ferdinand (2018) dengan judul penelitian “*Analisa Penggunaan Kapasitor Bank Dalam Upaya Perbaikan Faktor Daya*” yang bertujuan untuk menentukan kebutuhan kapasitas kVAR kapasitor dan membandingkan nilai kVAR dan beban secara keseluruhan. Hasil yang didapat adalah besar daya reaktif untuk penggunaan pompa, yang harus disuplai sebesar 729,02 kVAR [2].

Ratih Novalina Putri dan Hari Putranto (2013) dengan judul penelitian “*Analisis Perhitungan Losses Pada Jaringan Tegangan Rendah Dengan Perbaikan Pemasangan Kapasitor*” yang bertujuan untuk analisis total *losses* yang terjadi pada GTT KA025 dan *losses* yang terjadi pada *line D* dengan perbaikan pemasangan kapasitor. Hasil yang didapat adalah besarnya *losses* yang terjadi pada GTT KA025 Penyulang Sumedangan APJ Pamekasan adalah sebesar 9.8 % [3].

Muhammad Amin R. (2020) dengan judul penelitian “*Evaluasi Perbaikan Faktor Daya dan Tegangan Akibat Pembebanan Pada Sistem Kelistrikan Kapal*”

Latih Sultan Hasanuddin” yang bertujuan untuk menstabilkan faktor daya dan tegangan menggunakan metode Newton-Rapson dengan bantuan simulasi *software* ETAP 16.0.0. Simulasi yang dilakukan mengamati kondisi tegangan dan faktor daya pada masing-masing beban listrik sebelum dan sesudah dipasang kapasitor pada tiga kondisi kapal yakni pada kondisi sandar, berlayar dan manuver. Hasil analisis menunjukkan besarnya perubahan faktor daya pada kondisi berlayar 13% (dari 0.859 menjadi 0.971), manuver 13.6% (dari 0.858 menjadi 0.971), serta kondisi sandar 3% (dari 0.835 menjadi 0.863) dan tegangan 0.025% setelah pemasangan kapasitor bank [7].

Agung Nugroho dan Eko Setiawan (2015) dengan judul penelitian “*Analisa Perbaikan Losses dan Jatuh Tegangan Pada Jaringan Sambungan Rumah Tidak Standar Dengan Simulasi Software ETAP 7.5.0*” yang bertujuan untuk memperbaiki susut daya dan jatuh tegangan pada jaringan sambungan rumah tidak standar. Hasil yang didapat adalah semakin panjang jaringan tersebut dan semakin banyak jumlah tarikan sambungan rumah pada suatu sambungan layanan pelanggan, maka akan berkorelasi dengan besarnya *losses* (susut daya) dan *drop* tegangan [16].

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan maka dalam penelitian ini akan dilakukan analisa perbaikan *losses* dan faktor daya pada jaringan listrik PT Wilmar Cahaya Indonesia Tbk-Pontianak menggunakan simulasi *software* ETAP. *Losses* yang dianalisa berupa *drop voltage* (jatuh tegangan) dan *losses* (rugi daya listrik). Data penelitian menggunakan data penelitian otomatis dan data penelitian manual. Data penelitian otomatis diambil dari hasil pengukuran alat dan data penelitian manual diambil dari hasil perhitungan. Untuk menganalisa aliran daya menggunakan simulasi *software* ETAP 16.0.0 dan menggunakan perhitungan perbaikan faktor daya untuk menentukan kebutuhan daya reaktif. Hasil akhir dari penelitian ini adalah untuk memperbaiki *losses* dan faktor daya dengan penambahan kapasitas kapasitor bank, kemudian dibandingkan dengan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) No. 70-1 Tahun 1985 tentang faktor daya yang diperbolehkan diatas 0,85 dan SPLN No. 1 Tahun 1995 tentang tegangan maksimal +5% dan tegangan minimal -10% terhadap tegangan nominal.

2.2. Umum

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam rangkaian listrik. Arus listrik yang mengalir dalam rangkaian dengan hambatan listrik menimbulkan kerja. Piranti mengkonversikan kerja ini ke dalam berbagai bentuk yang berguna, seperti panas (seperti pada pemanas listrik), cahaya (seperti pada bola lampu), energi kinetik (motor listrik), dan suara (*loudspeaker*). Listrik dapat diperoleh dari pembangkit listrik atau penyimpan energi seperti baterai.

Listrik Arus bolak-balik (AC) adalah arus listrik dimana besarnya dan arahnya arus berubah-ubah secara bolak-balik. Berbeda dengan listrik arus searah dimana arah arus yang mengalir tidak berubah-ubah dengan waktu. Bentuk gelombang dari listrik arus bolak-balik biasanya berbentuk gelombang sinusoidal, karena ini yang memungkinkan pengaliran energi yang paling efisien. Namun dalam aplikasi-aplikasi spesifik yang lain, bentuk gelombang lain pun dapat digunakan, misalnya bentuk gelombang segitiga (*triangular wave*) atau bentuk gelombang segi empat (*square wave*).

Secara umum, listrik bolak-balik berarti penyaluran listrik dari sumbernya (misalnya PLN) ke kantor-kantor atau rumah-rumah penduduk. Namun ada pula contoh lain seperti sinyal-sinyal radio atau audio yang disalurkan melalui kabel, yang juga merupakan listrik arus bolak-balik. Dimana aplikasi ini, tujuan utama yang paling penting adalah pengambilan informasi yang termodulasi atau terkode di dalam sinyal arus bolak-balik tersebut [4].

2.3. Daya

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt atau *Horsepower* (HP), *Horsepower* merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara 746 Watt atau 1 bft/*second*. Sedangkan Watt merupakan unit daya listrik aktif dimana 1 Watt memiliki daya setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian arus 1 Ampere dan tegangan 1 Volt [5].

Terdapat tiga macam daya listrik yang digunakan untuk menggambarkan penggunaan energi listrik, yaitu daya nyata atau daya aktif, daya reaktif serta daya semu atau daya kompleks.

2.3.1. Daya Aktif

Daya nyata atau daya aktif (*active power*) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya., misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran pada motor listrik. Daya nyata dihasilkan oleh beban-beban listrik yang bersifat resistif murni, Besarnya daya aktif sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban resistif dan dinyatakan dalam satuan Watt [6].

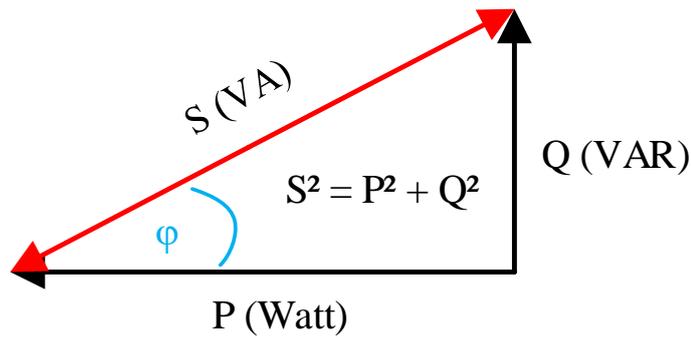
2.3.2. Daya Reaktif

Daya reaktif yaitu daya yang terdisipasi akibat sifat reaktansi komponen dalam sirkuit, memiliki satuan VAR (Volt Amper Reaktif). Terdapat dua jenis beban reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban-beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif. Contoh beban listrik yang bersifat induktif antara lain transformator, motor induksi yang biasanya digunakan untuk menggerakkan kipas angin, pompa air, *lift*, *eskalator*, *compressor*, *konveyor*, dan lain-lain. Beban-beban yang bersifat kapasitif akan menghasilkan daya reaktif. Contoh beban yang bersifat kapasitif adalah kapasitor. Besarnya daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban reaktansi [4].

2.3.3. Daya Semu

Daya kompleks atau lebih sering dikenal sebagai daya semu adalah penjumlahan secara vektor antara daya aktif dan daya reaktif. Daya kompleks didefinisikan dalam satuan VA (Volt Ampere) adalah sebagai hasil kali tegangan dengan konjugasi kompleks arus [2].

Ketiga pengelompokan daya ini dapat dianalogikan dengan menggambarannya dalam bentuk segitiga daya, maka daya tampak S direpresentasikan oleh sisi miring sedangkan daya aktif dan daya reaktif direpresentasikan oleh sisi-sisi segitiga yang saling tegak lurus, seperti ditunjukkan pada gambar berikut [17]:



Gambar 2.1. Vektor Segitiga Daya
 Sumber : [4]

Dari Gambar 2.1 di atas, hubungan antara segitiga daya dinyatakan sebagai berikut :

$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

$$P = S \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.2)$$

$$P = V \cdot I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.3)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots(2.4)$$

$$Q = V \cdot I \sin \varphi \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana : S = Daya Semu (VA)

P = Daya Aktif (Watt)

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.4. Losses

Losses didefinisikan sebagai susut daya (rugi daya) dan *drop voltage* (jatuh tegangan) akibat dari pengaruh pada saluran distribusi.

2.4.1. Rugi-Rugi Daya

Daya listrik yang dikirim dan disalurkan dari *power plant* ke beban mengalami rugi daya, ini disebabkan karena saluran distribusi mempunyai tahanan, induktansi dan kapasitansi [18]. Rumus rugi daya sebagai berikut [17].

$$\text{Rugi daya aktif : } \Delta P = I^2 R \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\text{Rugi daya reaktif : } \Delta Q = I^2 X \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana : P = Daya Aktif (Watt)

Q = Daya Reaktif (VAR)

I = Arus (Ampere)

R = Resistansi (Ohm/Km)

X = Reaktansi (Ohm/Km)

2.4.2. Jatuh Tegangan

Tegangan jatuh secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Tegangan jatuh pada penghantar semakin besar jika arus di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar semakin besar pula [18]. Jatuh tegangan dapat dihitung menggunakan rumus berikut [17].

$$VD = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi) \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana : V = Tegangan (Volt)

I = Arus Beban (Ampere)

R = Resistansi (Ohm/Km)

X = Reaktansi (Ohm/Km)

2.5. Faktor Daya

Istilah faktor daya atau *power factor* (PF) merupakan istilah yang sering kali dipakai pada bidang-bidang yang berkaitan dengan pembangkitan dan penyaluran energi listrik. Faktor daya merupakan istilah penting, tidak hanya bagi penyedia layanan listrik, namun juga bagi konsumen listrik terutama konsumen level industri. Penyedia layanan listrik selalu berusaha untuk menghimbau konsumennya agar berkontribusi supaya faktor daya menjadi lebih baik, para konsumen industri juga berusaha untuk mendapatkan faktor daya yang baik agar tidak sia-sia bayar mahal kepada penyedia layanan.

Faktor daya ($\cos \varphi$) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya semu (VA) yang digunakan dalam sirkuit AC atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \varphi$ [7].

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana : $\cos \varphi$ = Faktor Daya

P = Daya Aktif (Watt)

S = Daya Semu (VA)

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

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana : $\tan \varphi$ = Faktor Daya

Q = Daya Reaktif (VAR)

P = Daya Aktif (Watt)

Karena komponen daya aktif umumnya konstan (komponen VA dan VAR berubah sesuai dengan faktor daya), maka dapat ditulis seperti berikut :

$$Q = P \cdot \tan \varphi \dots \dots \dots (2.11)$$

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.

1. Penyebab rendahnya faktor daya

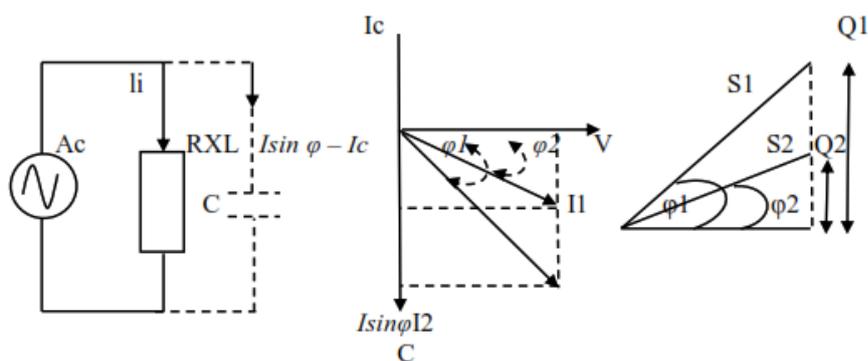
- a. Banyak pemakaian arus bolak – balik (AC) menggunakan motor induksi sebagai penggerak utama yang bekerja pada faktor daya *lagging* dan ini akan menambah *lagging*-nya faktor daya.
- b. Transformator-transformator yang mempunyai faktor daya yang sangat rendah karena menghasilkan arus magnetisasi yang menyebabkan arus totalnya menjadi tertinggal terhadap tegangan.
- c. Penggunaan penyearah sebagai ganti pasangan motor generator untuk mencatu daya arus searah (DC).
- d. Pemakaian lampu tabung (neon) yang beroperasi pada daya rendah.
- e. Alat – alat las busur listrik yang mempunyai faktor daya rendah.

2. Kerugian akibat faktor daya rendah

- a. Pada faktor daya yang rendah, arus yang mengalir relatif besar yang mengakibatkan rugi-rugi tegangan dan rugi-rugi daya.
- b. Arus yang relatif besar akan menyebabkan kenaikan temperature konduktor, hal ini akan menyebabkan umur peralatan menjadi berkurang.

Besar kecilnya daya erat hubungannya dengan kebutuhan beban terhadap daya reaktif. Daya reaktif yang dibutuhkan beban adalah bersifat induktif, dimana fasa arus tertinggal terhadap fasa tegangan sumber. Semakin rendah faktor daya berarti kebutuhan akan daya reaktif induktif beban akan semakin besar jika sudut fasa antara arus semakin kecil.

Cara untuk memperbaiki faktor daya adalah dengan mengurangi daya reaktif induktif. Untuk mengurangi komponen daya reaktif ini dapat dilakukan dengan cara pemasangan daya reaktif kapasitif. Besarnya daya reaktif kapasitif tergantung dari besarnya perbaikan faktor daya yang diinginkan. Faktor daya dari setiap sistem dapat diperbaiki dengan menggunakan kapasitor yang dihubungkan paralel dengan beban yang umumnya bersifat induktif seperti motor induksi, alat las dan sebagainya. Dengan faktor daya maksimum, rugi – rugi daya karena resistansi saluran akan berkurang. Untuk memberikan daya yang sama besar diperlukan arus yang lebih besar bila faktor daya maksimum lebih rendah dari pada faktor daya beban yang mempunyai faktor daya lebih tinggi. Perbaikan faktor daya tersebut dikenal sebagai kompensasi fasa. prinsip perbaikan faktor daya dapat dijelaskan pada gambar berikut [8]:



Gambar 2.2. Rangkaian dan Diagram Faktor Daya

Sumber : [8]

Keterangan gambar :

φ_1 dan φ_2 = Sudut faktor daya sebelum dan sesudah perbaikan faktor daya

I_1 dan I_2 = Arus beban sebelum dan sesudah perbaikan faktor daya

S_1 dan S_2 = Daya semu beban sebelum dan sesudah perbaikan faktor daya

Q_1 dan Q_2 = Daya reaktif sebelum dan sesudah perbaikan faktor daya

P = Daya aktif beban

Q_C = Daya reaktif kapasitor

Diasumsikan daya aktif sebelum dan sesudah perbaikan faktor daya tetap.

- a. Daya reaktif beban sebelum perbaikan faktor daya (Q_1)

$$Q_1 = P \tan \varphi_1$$

- b. Daya reaktif beban sesudah perbaikan faktor daya (Q_2)

$$Q_2 = P \tan \varphi_2$$

Besar daya reaktif yang dikompensasikan atau diberikan kapasitor adalah :

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_c = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana : Q_1 = Daya Reaktif sebelum perbaikan (VAR)

Q_2 = Daya Reaktif sesudah perbaikan (VAR)

Q_C = Daya Reaktif Kapasitor (VAR)

P = Daya Aktif (Watt)

$\tan \varphi_1$ = Faktor Daya sebelum perbaikan

$\tan \varphi_2$ = Faktor Daya sesudah perbaikan

Besar kapasitansi kapasitor adalah :

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c}$$

$$Q = \frac{V^2}{2\pi f C}$$

$$C = \frac{V^2}{2\pi f Q} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana : C = Kapasitansi dalam satuan Farad (F)

V = Tegangan (Volt)

π = 3,14 (desimal) atau $\frac{22}{7}$ (fraksi)

f = Frekuensi dalam satuan Hertz (Hz)

Q = Daya Reaktif (VAR)

Q_C = Daya Reaktif Kapasitor (VAR)

X_c = Reaktansi Kapasitif dalam satuan Ohm (Ω)

Keuntungan dari perbaikan faktor daya adalah sebagai berikut :

1. Mengurangi *drop voltage* di sisi beban.
2. Mengurangi komponen-komponen induktif arus jala-jala.
3. Dapat menghindari trafo kelebihan beban (*overload*), sehingga memberikan tambahan daya yang tersedia.
4. Dapat menghindari kenaikan arus / suhu pada kabel, sehingga mengurangi rugi-rugi daya dalam sistem.
5. Meningkatkan kapasitor dalam alternator.
6. Kapasitas kW dari penggerak mula (primer motor) menjadi lebih baik.
7. Efisiensi dari setiap sistem meningkat.

8. Tagihan listrik akan menjadi kecil.

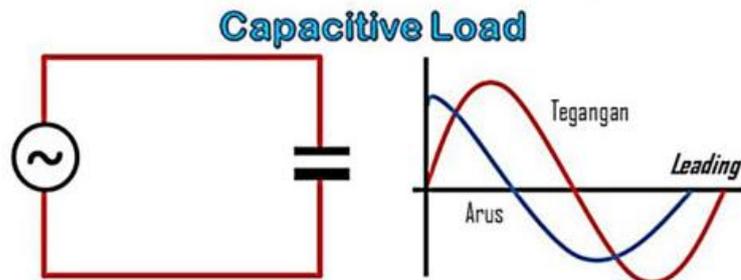
Beberapa strategi untuk koreksi faktor daya adalah :

1. Meminimalkan operasi dari beban motor yang ringan atau tidak bekerja.
2. Menghindari operasi dari peralatan listrik di atas tegangan rata-ratanya.
3. Mengganti motor-motor yang sudah tua dengan energi efisiensi motor. Meskipun dengan energi efisiensi motor, bagaimanapun faktor daya dipengaruhi oleh beban yang variasi. Motor ini harus dioperasikan sesuai dengan kapasitas rata-ratanya untuk memperoleh faktor daya tinggi.
4. Memasang kapasitor pada jaringan AC untuk menurunkan medan dari daya reaktif.

Faktor daya terdiri dari dua sifat yaitu faktor daya “*leading*” dan faktor daya “*lagging*”. Faktor daya ini memiliki karakteristik seperti berikut [8]:

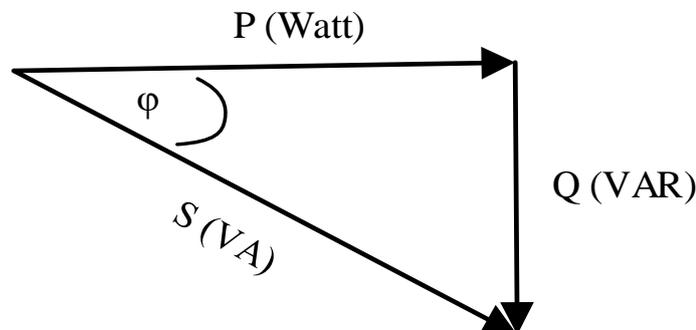
2.5.1. Faktor Daya *Leading*

Apabila arus mendahului tegangan, maka faktor daya ini dikatakan “*leading*”. Faktor daya *leading* ini terjadi apabila bebannya kapasitif, seperti *capasitor*, *synchronocus generators*, *synchronocus motors*, dan *synchronocus condensor*.



Gambar 2.3. Faktor Daya *Leading*

Sumber : [7]

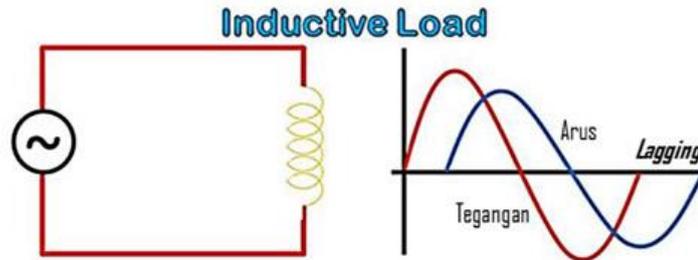


Gambar 2.4. Segitiga Daya Untuk Beban Kapasitif

Sumber : [8]

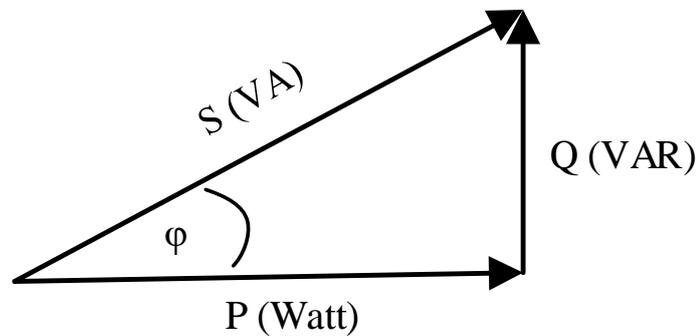
2.5.2. Faktor Daya *Lagging*

Apabila tegangan mendahului arus, maka faktor daya ini dikatakan “*lagging*”. Faktor daya lagging ini terjadi apabila bebannya induktif, seperti *motor induksi*, AC dan *Transformator*.



Gambar 2.5. Faktor Daya *Lagging*

Sumber : [7]



Gambar 2.6. Segitiga Daya Untuk Beban Induktif

Sumber : [8]

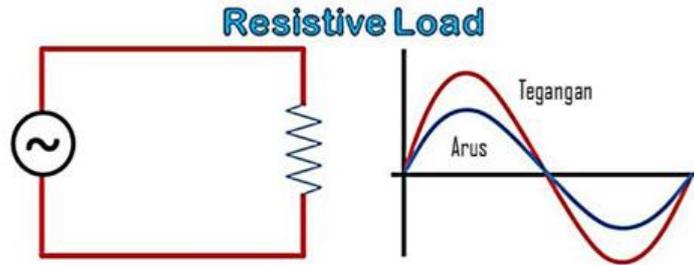
2.6. Beban Listrik

Dalam suatu rangkaian listrik selalui dijumpai suatu sumber dan beban. Bila sumber listrik DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC adalah nol.

Reaktansi induktif (X_L) akan menjadi nol yang berarti bahwa induktor tersebut akan *short circuit*. Reaktansi kapasitif (X_C) akan menjadi tak terhingga yang berarti bahwa kapasitif tersebut akan *open circuit*. Jadi sumber DC akan mengakibatkan beban-beban induktif dan beban kapasitif tidak akan berpengaruh pada rangkaian. Bila sumber listrik AC maka beban dibedakan menjadi 3 yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif sebagai berikut [7].

2.6.1. Beban Resitif

Beban resistif (R) adalah beban yang terdiri dari komponen tahanan ohm/resistor murni, seperti elemen pemanas dan lampu pijar. Resistor tidak menyebabkan adanya geser fasa antara arus dan tegangan pada rangkaian AC. Apabila pada sebuah resistor diterapkan tegangan bolak - balik maka arus dan tegangan sefasa yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Beban Resitif
Sumber : [7]

Beban ini hanya menyerap daya aktif (W) dan tidak menyerap daya reaktif (VAR) sama sekali. Tegangan dan arus se-fasa. Secara matematis dinyatakan :

$$V = I \cdot R$$

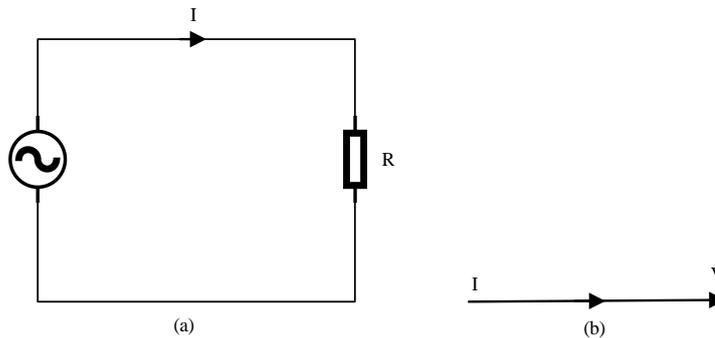
Dikatakan arus dan tegangan sefasa (mempunyai fasa yang sama)

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots(2.14)$$

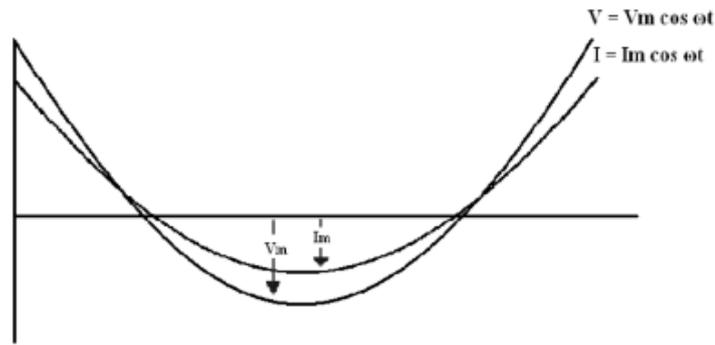
Dimana : R = Resistansi dalam satuan Ohm (Ω)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)



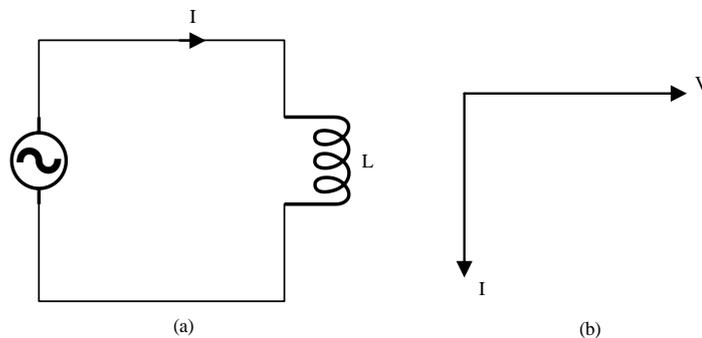
Gambar 2.8. (a) Rangkaian Resitif dan (b) Vektor Resitif
Sumber : [7]



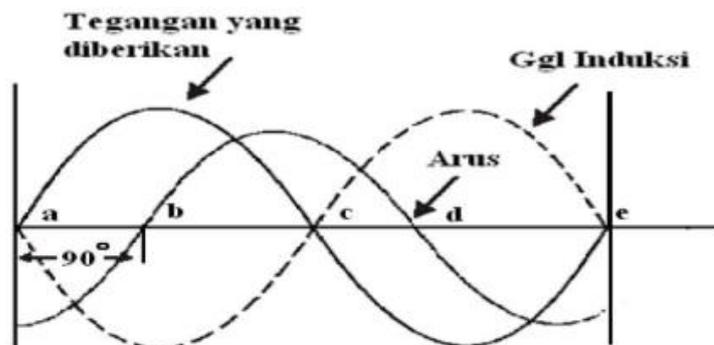
Gambar 2.9. Grafik Sinusoidal Resistif
Sumber : [8]

2.6.2. Beban Induktif

Beban induktif (L) yaitu beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti *coil*, motor-motor listrik, transformator, dan selenoida. Beban jenis ini dapat menyebabkan pergeseran fasa pada arus sehingga bersifat *lagging*. Apabila arus yang berubah-ubah mengalir melewati induktor maka pada induktor tersebut terbangkit gaya gerak listrik (ggl). Beban ini mempunyai faktor daya antara 0-1 “*lagging*”. Beban ini menyerap daya aktif (W) dan daya reaktif (VAR). Tegangan mendahului arus sebesar φ° .



Gambar 2.10. (a) Rangkaian Induktif dan (b) Vektor Induktif
Sumber : [7]



Gambar 2.11. Arus, Tegangan Dan GGL Induksi Pada Beban Induktif
Sumber : [8]

Untuk menghitung besarnya reaktansi induktif (X_L), dapat digunakan rumus :

$$X_L = 2\pi fL \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana : X_L = Reaktansi Induktif dalam satuan Ohm (Ω)

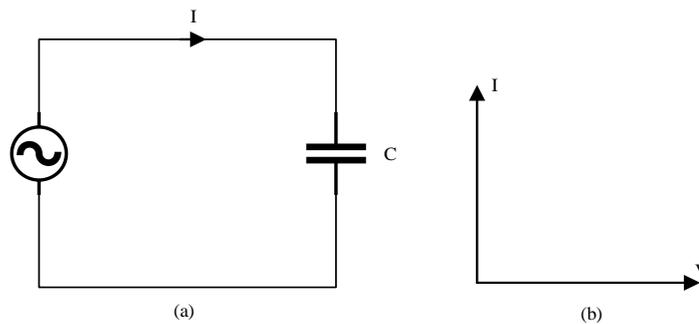
π = 3,14 (desimal) atau $\frac{22}{7}$ (fraksi)

f = Frekuensi dalam satuan Hertz (Hz)

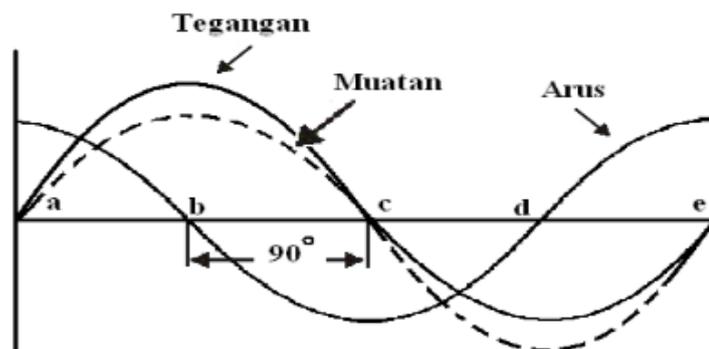
L = Induktansi dalam satuan Henry (H)

2.6.3. Beban Kapasitif

Beban kapasitif (C) yaitu beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian dielektrik (*electrical charge*) pada suatu sirkuit. Komponen ini dapat menyebabkan arus mendahului tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif (W) dan mengeluarkan daya reaktif (VAR).



Gambar 2.12. (a) Rangkaian Kapasitif dan (b) Vektor Kapasitif
Sumber : [7]



Gambar 2.13. Arus, Tegangan Dan GGL Induksi Pada Beban Kapasitif
Sumber : [8]

Untuk menghitung besarnya reaktansi kapasitif (X_C), dapat digunakan rumus :

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana : X_C = Reaktansi kapasitif dalam satuan Ohm (Ω)

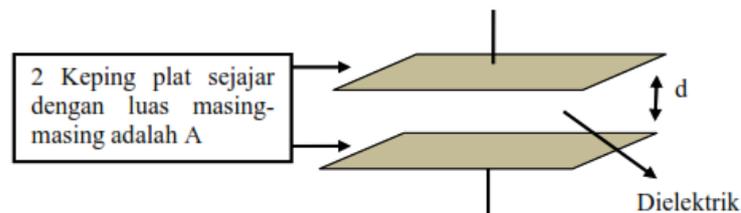
$$\pi = 3,14 \text{ (desimal) atau } \frac{22}{7} \text{ (fraksi)}$$

f = Frekuensi dalam satuan Hertz (Hz)

C = Kapasitansi dalam satuan Farad (F)

2.7. Kapasitor Bank

Kapasitor adalah komponen elektronika yang dapat menyimpan muatan listrik dan umumnya memiliki beda fasa (arus mendahului tegangan). Oleh karenanya kapasitor menyerap daya lebih sedikit dari pada induktor (dalam nilai yang sama). Pada dasarnya kapasitor tersusun oleh dua keping sejajar yang disebut *electrodes* yang dipisahkan oleh suatu ruangan yang disebut *dielectric* yang pada saat diberi tegangan akan menyimpan energi.



Gambar 2.14. Kontruksi Kapasitor

Sumber : [9]

Dalam sistem tenaga listrik kapasitor sering digunakan untuk memperbaiki tegangan jaringan dan untuk menyuplai daya reaktif ke beban yang berfungsi untuk memperbaiki nilai faktor daya dari sistem. Dalam perbaikan faktor daya kapasitor-kapasitor dirangkai dalam suatu panel yang disebut *Capacitor Bank*. Selain itu kapasitor bank dapat juga digunakan untuk aplikasi lain yaitu *filter harmonisa*, proteksi terhadap petir, untuk *transformer testing*, *generator impuls*, *voltage divider kapasitor* [9].

Kapasitor terdiri dari beberapa tipe, tergantung dari bahan dielektriknya. Untuk lebih sederhanya dapat dibagi menjadi 3 bagian, yaitu kapasitor *electrostatic*, kapasitor *electrolytic* dan kapasitor *electrochemical* [10].

1. Kapasitor *Electrostatic*

Kapasitor *electrostatic* (kapasitor *static*) adalah kapasitor yang dibuat dengan bahan dielektrik dari keramik, film, kertas dan mika. Keramik kertas dan mika adalah bahan yang populer serta murah untuk membuat kapasitor yang

kapasitansinya kecil. Tersedia dari besaran pF sampai beberapa uF, yang biasanya untuk aplikasi rangkaian yang berkenaan dengan frekuensi tinggi.

2. Kapasitor *Electrolytic*

Kapasitor *electrolytic* atau yang biasa disebut kapasitor *electrolyte* terdiri dari bahan yang dielektriknya adalah lapisan *metal-oksida*. Umumnya kapasitor yang termasuk kelompok ini adalah kapasitor *polar* (dua kutub) dengan tanda + dan – pada badan kapasitor. Mengapa kapasitor ini jadi memiliki polaritas, adalah karena proses pembuatannya menggunakan elektrolisa sehingga terbentuk kutub positif anoda dan kutub negatif katoda. Bahan *electrolyte* pada kapasitor ada yang cair tetapi ada juga yang padat.

3. Kapasitor *Electrochemical*

Satu jenis kapasitor lain adalah kapasitor *electrochemical*. Termasuk kapasitor jenis ini adalah baterai dan *accu*. Pada kenyataannya batrai dan *accu* adalah kapasitor yang sangat baik, karena memiliki kapasitansi yang besar dan arus bocor (*leakage current*) yang sangat kecil. Tipe kapasitor jenis ini juga masih dalam pengembangan untuk mendapatkan kapasitansi yang besar namun kecil dan ringan, misalnya untuk aplikasi mobil elektrik dan *telephone* selular.

2.7.1. Prinsip Kerja Kapasitor

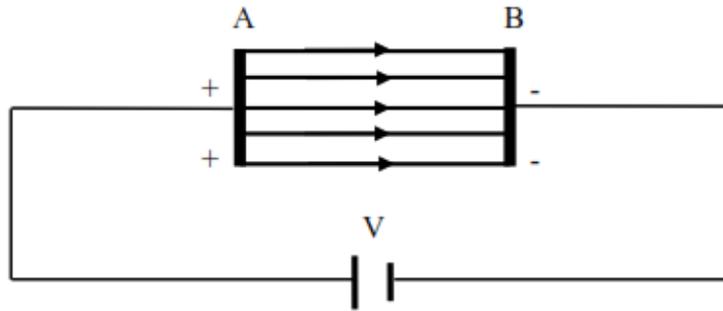
Bila dua buah benda bermuatan dan berlainan tanda yang dipisahkan oleh suatu beban dielektrik maka akan terdapat kapasitansi diantara kedua benda tersebut. Pemberian beda potensial diantara benda konduktor tersebut akan menghasilkan muatan positif pada suatu konduktor dan muatan negatif pada konduktor lainnya. Perbandingan harga listrik dengan harga mutlak beda potensial didefinisikan sebagai suatu kapasitansi.

$$C = \frac{q}{v} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana : C = Kapasitansi dalam satuan Farad (F)

Q = Muatan listrik (Coloumb)

V = Beda potensial (Volt)



Gambar 2.15. Prinsip Kerja Kapasitor
 Sumber : [9]

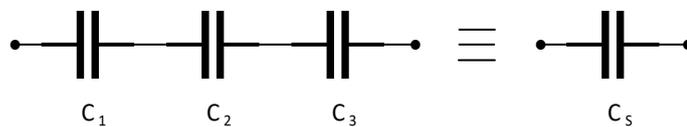
Bila plat A dan B diberi beda potensial V maka akan mengalir arus melalui beban dielektrik pada waktu yang relatif singkat. Bahan dielektrik secara perlahan-lahan akan terpolarisasi. Setelah muatan negatif mengalir dari plat A akan bermuatan positif dan elektron-elektron akan terkumpul pada plat B. sehingga terjadi beda potensial diantara kedua plat yang lama kelamaan arus mengalir semakin kecil dan akhirnya beda potensial antara plat A dan B sama besarnya dengan V dan arus pun berhenti mengalir [9].

2.7.2. Jenis – Jenis Kapasitor

Kapasitor bank berdasarkan cara pemasanganya terdiri dari Kapasitor Seri dan Kapasitor Shunt [19].

1. Kapasitor Seri

Kapasitor seri adalah kapasitor yang terhubung secara seri dengan jala-jala listrik. Bentuk fisik kapasitor seri ini tidak berbeda dengan kapasitor *Shunt* (yaitu kapasitor yang terhubung paralel dengan jala-jala listrik). Walaupun perbedaan kapasitor seri dengan shunt hanya pada masalah hubungan pada jala-jala listrik, akan tetapi keduanya mempunyai fungsi yang berbeda.

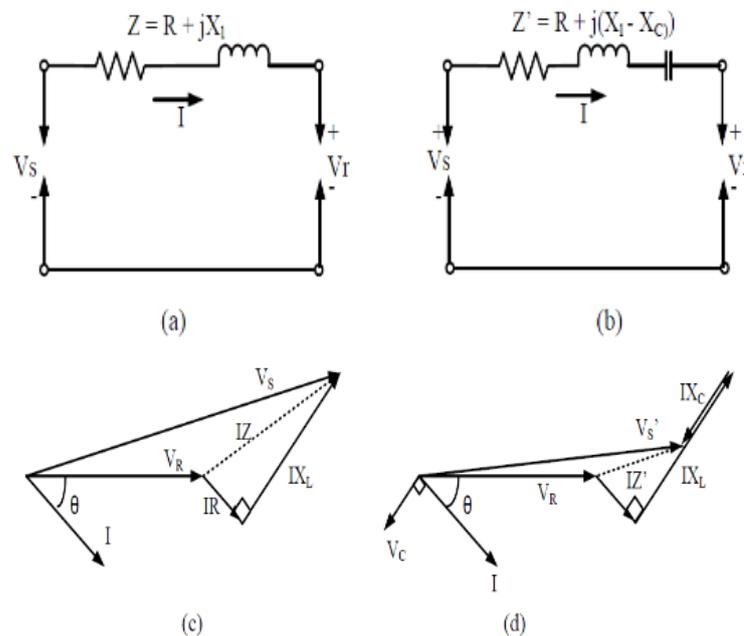


Gambar 2.16. Rangkaian Kapasitor Hubung Seri
 Sumber : [19]

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots\dots\dots(2.18)$$

Suatu kapasitor dapat diasumsikan sebagai suatu reaktansi kapasitif negatif yang terhubung seri dengan jala-jala. Dengan memasang kapasitor seri pada jaringan maka tegangan akan naik. Kenaikan tegangan pada kapasitor adalah

sebagai fungsi dari arus. Perubahan tegangan tersebut adalah secara otomatis dan sesuai dengan perubahan arus. Dengan demikian kapasitor seri dapat juga dianggap sebagai suatu pengatur tegangan (*Voltage Regulator*), akan tetapi berbeda dengan *induction regulator*. Perbedaannya ialah pada kapasitor seri tidak dapat mengkompensasi perubahan tegangan yang terjadi pada sumber dan hanya dapat mengkompensasi perubahan tegangan yang diakibatkan oleh perubahan beban. Kapasitor seri juga dapat memperbaiki faktor daya sebagai mana kapasitor *shunt*, akan tetapi pemakaiannya masih sangat terbatas.



Gambar 2.17. Rangkaian dan Vektor Pemasangan Kapasitor Seri

- (a) Rangkaian dari suatu penyulang
- (b) Rangkaian yang di pasang kapasitor seri
- (c) Diagram fasor dari suatu penyulang
- (d) Diagram fasor hasil pemasangan kapasitor seri

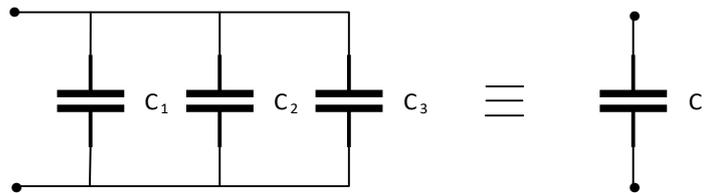
Sumber : [8]

Gambar 2.18 (a) adalah rangkaian satu garis dari suatu penyulang, sedangkan gambar 2.18 (c) adalah diagram fasornya. Bila pada penyulang tersebut diujung penerimanya dipasang kapasitor bank (seri), maka bagan satu garisnya akan terlihat seperti pada gambar 2.18 (b) dan fasor diagramnya seperti pada gambar 2.18 (d).

2. Kapasitor *Shunt*

Kapasitor *shunt* adalah suatu kapasitor yang terhubung paralel dengan jala-jala listrik. Fungsi dari kapasitor *shunt* ini adalah untuk memberikan daya reaktif

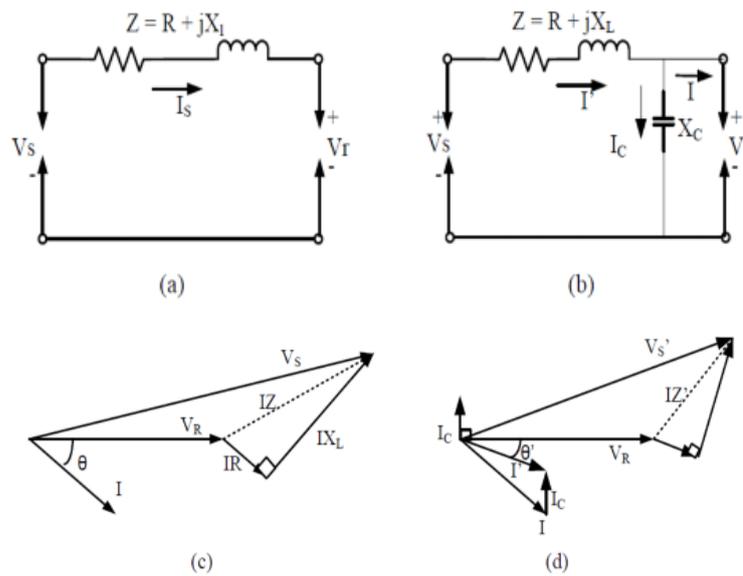
yang diperlukan oleh beban-beban induktif seperti motor induksi dan lain-lain. Dengan pemberian daya reaktif oleh kapasitor shunt maka faktor daya dari beban induktif tersebut akan meningkat. Umumnya beban listrik itu bersifat induktif, sehingga arus yang ditariknya terbelakang terhadap tegangan, maka faktor dayanya akan mengecil.



Gambar 2.18. Rangkaian Kapasitor Hubung Paralel
Sumber : [19]

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 \dots\dots\dots(2.19)$$

Kapasitor *shunt* adalah kapasitor yang pemasanganya dihubungkan paralel dengan saluran dan secara luas digunakan pada sistem distribusi. Kapasitor *shunt* mencatu daya reaktif atau arus yang menentang komponen arus beban induktif. Gambar 2.20 (a) merupakan rangkaian suatu penyulang tanpa kapasitor *shunt*, dan fasor diagramnya dilihat pada gambar 2.20 (c). Gambar 2.20 (b) dan 2.20 (d) masing-masing menggambarkan rangkaian satu garis dan fasor diagram bila saluran tersebut dipasang kapasitor *shunt* di ujung saluran.



Gambar 2.19. Rangkaian Dan Vektor Pemasangan Kapasitor Shunt

- (a) Rangkaian suatu penyulang
- (b) Rangkaian yang dipasang kapasitor shunt
- (c) Diagram fasor dari suatu penyulang
- (d) Diagram fasor hasil pemasangan kapasitor shunt

Sumber : [8]

Dalam prakteknya tegangan kerja tidak benar-benar tepat dengan tegangan ratingnya walaupun masih dalam batas-batas yang diperbolehkan, sehingga daya reaktifnya sebenarnya yang dikeluarkan oleh kapasitor adalah :

$$C \text{ sebenarnya} = C \text{ rating} \left[\frac{\text{Tegangan Operasi}}{\text{Tegangan Rating}} \right]^2$$

Output kivolat kapasitor juga berbanding langsung dengan frekuensi tegangan yang diberikan, sehingga

$$C \text{ sebenarnya} = C \text{ rating} \left[\frac{\text{Frekuensi Operasi}}{\text{Frekuensi Rating}} \right]$$

2.8. Metode Kompensasi Daya

Metode perbaikan faktor daya dengan kapasitor bank disebut juga metode kompensasi yaitu menambah daya reaktif ke jaringan. Ada dua metode kompensasi yaitu metode kompensasi tetap dan metode kompensasi otomatis [11].

2.8.1. Kompensasi Tetap

Kompensasi jenis ini biasanya digunakan pada beban yang relatif konstan. Kapasitor dipasangkan langsung pada pangkal motor atau transformator yang selalu bekerja tanpa memerlukan panel.

Untuk kontrol pada pemasangan kapasitor seperti ini dapat menggunakan :

- a. Sistem manual dengan pemutus daya atau *load break switch*.
- b. Sistem *semi – otomatis* dengan kontaktor.
- c. Koneksi langsung pada pangkal beban.

2.8.2. Kompensasi Otomatis

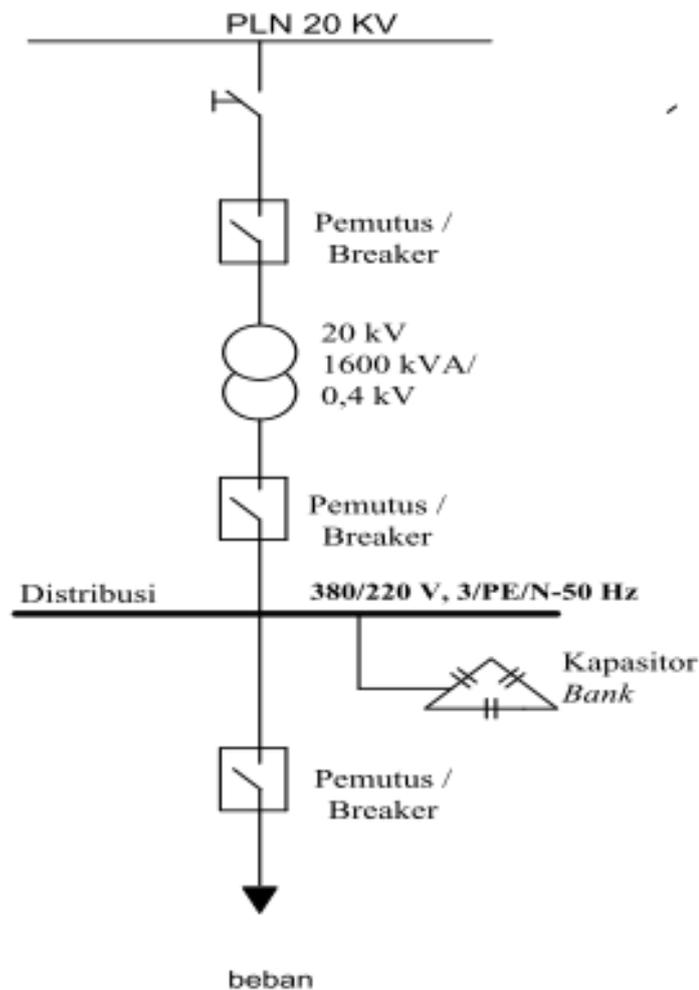
Jika perbandingan daya reaktif yang diperlukan (Q_C) dengan daya trafo (\sin) melebihi 15% sebaiknya dipasang kompensasi otomatis. Juga jika perubahan beban agak besar, padahal faktor daya diinginkan selalu berada pada nilai tertentu, hal ini dapat dilakukan dengan pemasangan *regulator*.

2.9. Pemasangan Kapasitor Bank

Pemasangan kapasitor tergantung dari fungsi yang diinginkan. Cara pemasangan kapasitor dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu *Global Compensation*, *Group Compensation*, dan *Individual Compensation* [12].

1. *Global Compensation*

Dengan cara ini kapasitor dipasang pada induk panel MDP (*Main Distribution Panel*). Arus yang turun dari pemasangan model ini hanya di penghantar antara panel MDP dan transformator. Sedangkan arus yang lewat setelah MDP tidak turun dengan demikian rugi akibat disipasi panas pada penghantar setelah MDP tidak terpengaruh. Terlebih instalasi tenaga dengan penghantar yang cukup panjang *Delta Voltage*-nya masih cukup besar.



Gambar 2.20. Instalasi Kapasitor Bank Sistem *Global Compensation*

Sumber : [13]

Kelebihan :

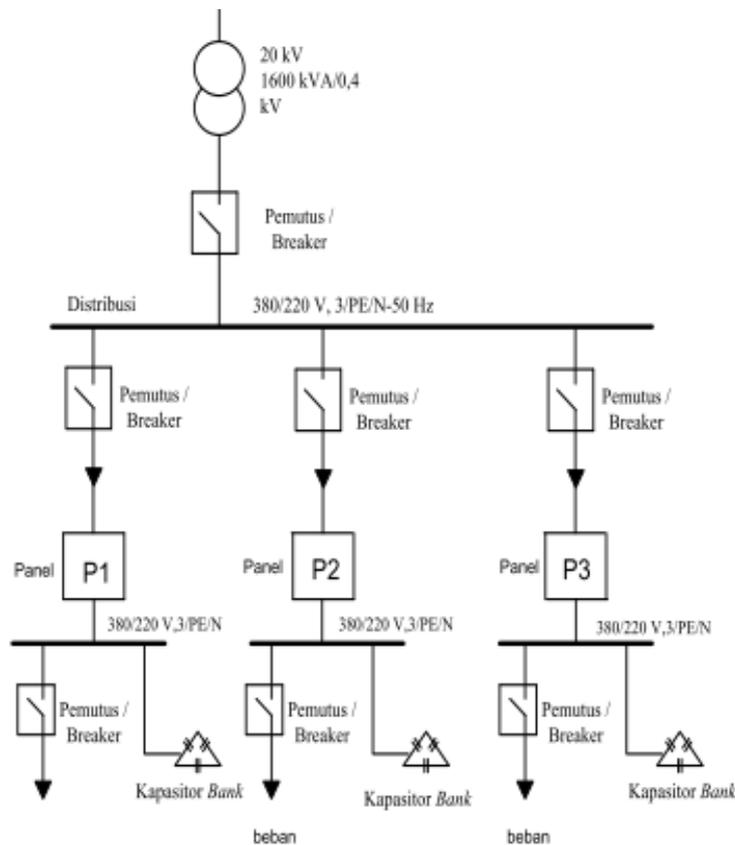
- Pemanfaatan kompensasi daya reaktifnya lebih baik karena semua motor tidak bekerja pada waktu yang sama.
- Biaya pemeliharaan rendah.

Kekurangan :

- Switching* peralatan pengaman bisa menimbulkan ledakan.
- Transient* yang disebabkan oleh *energizing group* kapasitor jumlah besar.
- Hanya memberikan kompensasi pada sisi atasnya (*upstream*).
- Kebutuhan ruang.

2. Group Compensation

Dengan cara ini kapasitor yang terdiri dari beberapa panel kapasitor dipasang pada panel SDP (*Sub Distribution Panel*). Cara ini cocok diterapkan pada industri dengan kapasitas beban terpasang besar sampai ribuan kVA dan terlebih jarak antara panel MDP dan SDP cukup berjauhan.



Gambar 2.21. Instalasi Kapasitor Bank Sistem *Group Compensation*
Sumber : [13]

Kelebihan :

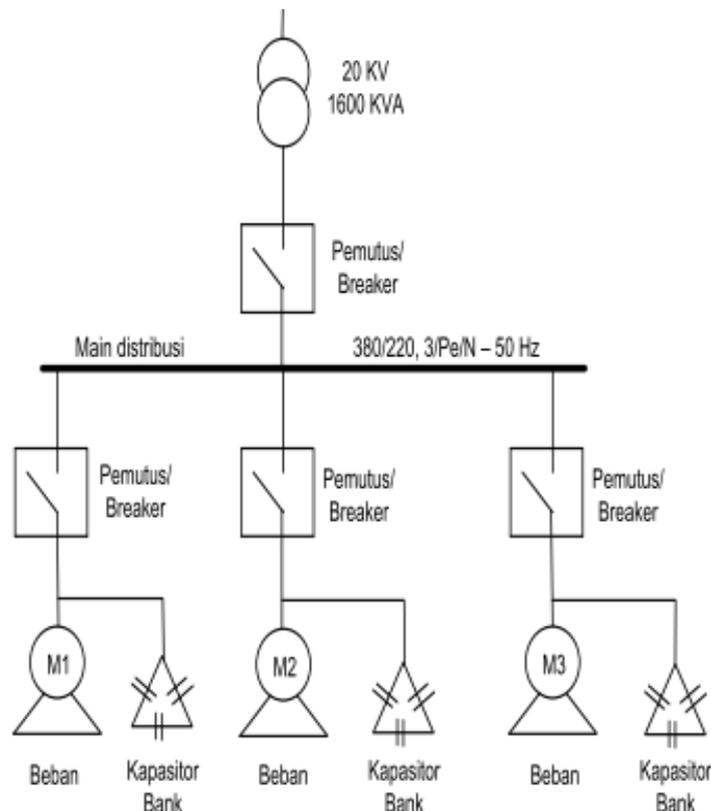
- Biaya pemasangan rendah.
- Kapasitansi pemasangan bisa dimanfaatkan sepenuhnya.
- Biaya pemeliharaan rendah.

Kekurangan :

- Perlu dipasang kapasitor bank pada setiap SDP atau MV/LV bus.
- Hanya memberikan kompensasi pada sisi atas.
- Kebutuhan ruang.

3. *Individual Compensation*

Dengan cara ini kapasitor langsung dipasang pada masing-masing beban khususnya yang mempunyai daya yang besar. Cara ini sebenarnya lebih efektif dan lebih baik dari segi teknisnya. Namun ada kekurangannya yaitu harus menyediakan ruang atau tempat khusus untuk meletakkan kapasitor tersebut sehingga mengurangi nilai estetika.



Gambar 2.22. Instalasi Kapasitor Bank Sistem *Individual Compensation*

Sumber : [13]

Kelebihan :

- a. Meningkatkan kapasitas saluran suplai.
- b. Memperbaiki tegangan secara langsung.
- c. Kapasitor dan beban *ON/OFF* secara bersamaan.
- d. Pemeliharaan dan pemasangan unit kapasitor mudah.

Kekurangan :

- a. Biaya pemasangan tinggi.
- b. Membutuhkan perhitungan yang banyak.
- c. Kapasitas terpasang tidak dimanfaatkan sepenuhnya.
- d. Terjadi fenomena *transient* yang besar akibat sering dilakukan *switching ON/OFF*.
- e. Waktu kapasitor *OFF* lebih banyak dibandingkan waktu kapasitor *ON*.

2.10. Perhitungan Daya Reaktif

Terdapat beberapa cara untuk melakukan perhitungan daya reaktif, cara-cara yang biasa digunakan adalah dengan metode perhitungan biasa, metode tabel kompensasi, metode diagram, dan metode Segi tiga daya [11]

1. Perhitungan Biasa

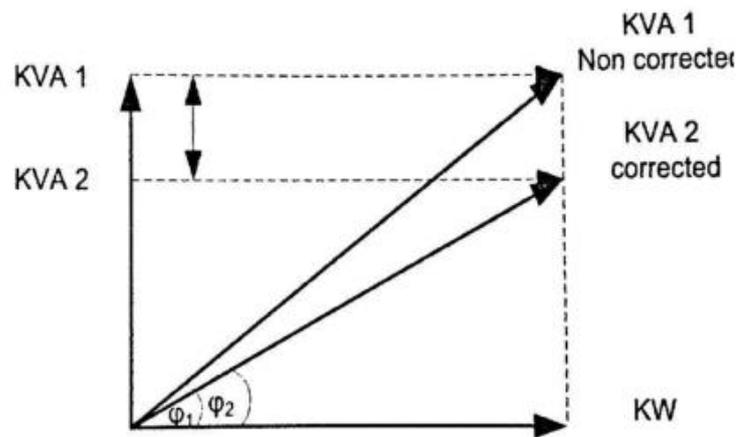
Data yang diperlukan antara lain adalah daya aktif (kW). *Power factor* lama ($\cos \varphi_1$) dan *power factor* baru ($\cos \varphi_2$) seperti pada rumus (2.12).

2. Metode Tabel Kompensasi

Untuk menghitung besarnya daya reaktif dapat dilakukan melalui tabel kompensasi, tabel ini menyajikan suatu data dengan *input* faktor daya mula-mula sebesar $\cos \varphi_1$ dan faktor daya yang diinginkan $\cos \varphi_2$ maka besarnya faktor pengali dapat dilihat melalui tabel kompensasi.

3. Metode Diagram

Dalam menentukan besarnya kapasitor yang dibutuhkan maka diperlukan diagram sebelum kompensasi dan sesudah kompensasi (seperti gambar 2.24)



Gambar 2.23. Diagram Daya Untuk Menentukan Daya Kapasitor
Sumber : [11]

Sebelum ada perbaikan *power factor* Gambar 2.24. Diagram daya untuk menentukan daya kapasitor, dengan ϕ_1 dan setelah dilakukan perbaikan sesuai yang diinginkan ditunjukkan dengan ϕ_2 .

4. Metode Segitiga Daya

Metoda ini dipakai jika data yang diketahui adalah daya aktif (P) dan Daya Semu (S). Perhitungan metoda ini dilakukan dengan segitiga daya seperti pada gambar 2.1.

2.11. ETAP

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real time*. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. ETAP ini awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di Amerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara *real-time*, simulasi, *control*, dan optimasi sistem tenaga listrik.

ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*single line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: aliran daya, hubung singkat, *starting motor*,

transient stability, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan [14].

ETAP memungkinkan untuk bekerja secara langsung dengan tampilan gambar *single line diagram*/diagram satu garis. Dalam penelitian ini *software* ETAP yang digunakan menggunakan versi 16.0.0. Program ini dirancang sesuai dengan tiga konsep utama [6]:

1. *Virtual Reality Operasi*

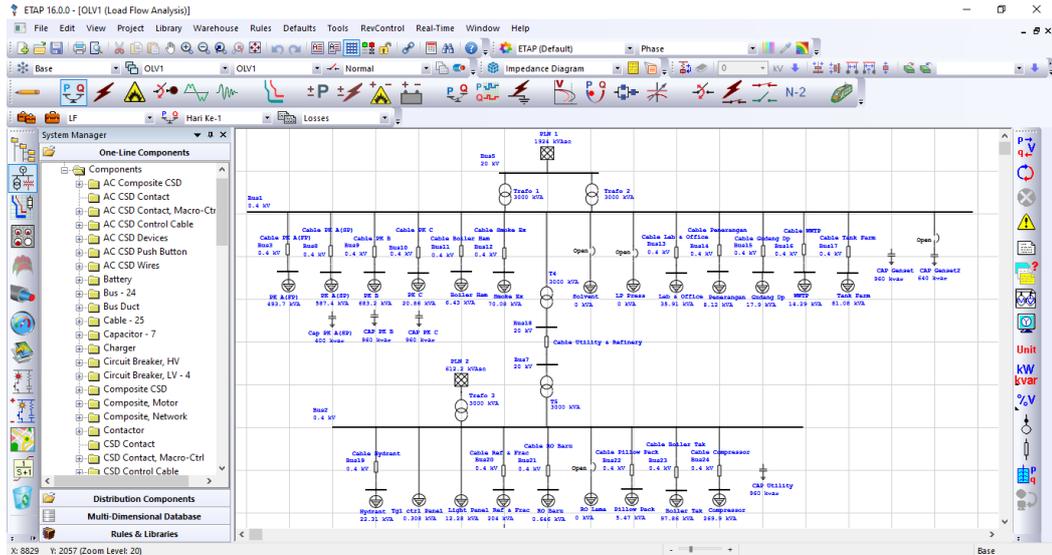
Sistem *operational* yang ada pada program sangat mirip dengan sistem operasi pada kondisi *real* nya. Misalnya, ketika membuka atau menutup sebuah *circuit breaker*, menempatkan suatu elemen pada sistem, mengubah status operasi suatu motor, dan untuk kondisi *de-energized* pada suatu elemen dan sub-elemen sistem ditunjukkan pada gambar *single line diagram* dengan warna abu-abu.

2. *Total Integration Data*

ETAP menggabungkan informasi sistem elektrik, sistem logika, sistem mekanik, dan data fisik dari suatu elemen yang dimasukkan dalam sistem *database* yang sama. Misalnya, untuk elemen sebuah kabel, tidak hanya berisikan data kelistrikan dan tentang dimensi fisiknya, tapi juga memberikan informasi melalui *raceways* yang di lewati oleh kabel tersebut. Dengan demikian, data untuk satu kabel dapat digunakan untuk dalam menganalisa aliran beban (*load flow analysis*) dan analisa hubung singkat (*short circuit analysis*) yang membutuhkan parameter listrik dan parameter koneksi serta perhitungan *ampacity derating* suatu kabel yang memerlukan data fisik *routing*.

3. *Simplicity in Data Entry*

ETAP memiliki data yang detail untuk setiap elemen yang digunakan. Dengan menggunakan editor data, dapat mempercepat proses entri data suatu elemen. Data-data yang ada pada program ini telah di masukkan sesuai dengan data-data yang ada di lapangan untuk berbagai jenis analisa atau *design*.



Gambar 2.24. Tampilan Layar Pada ETAP
Sumber : ETAP 16.0.0

ETAP dapat melakukan penggambaran *single line diagram* secara grafis dan mengadakan beberapa analisa/studi yakni *Load Flow* (aliran daya), *Short Circuit* (hubung singkat), *Motor starting*, *Harmonisa*, *Transient stability*, *Protective device coordination*, dan *Cable derating*.

ETAP juga menyediakan fasilitas *Library* yang akan mempermudah *design* suatu sistem kelistrikan. *Library* ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan bila perlu.

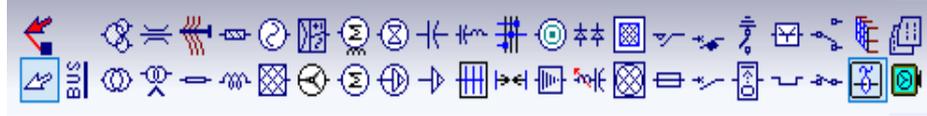
Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP adalah :

- Single Line Diagram*, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
- Library*, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
- Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
- Study Case*, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

2.11.1. Elemen AC Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Komponen elemen AC pada *software power station* ETAP dalam bentuk diagram satu garis ditunjukkan pada Gambar 2.26, kecuali elemen-elemen IDs,

penghubung bus dan status. Semua data elemen AC dimasukkan dalam editor yang telah dipertimbangkan oleh para ahli teknik. Daftar seluruh elemen AC pada *software power station ETAP* ada pada *AC toolbar* [15].



Gambar 2.25. Komponen Elemen AC Pada ETAP
Sumber : ETAP 16.0.0

2.11.2. Data di ETAP

Suatu sistem tenaga terdiri atas sub-sub bagian, salah satunya adalah aliran daya dan hubung singkat. Untuk membuat simulasi aliran daya dan hubung singkat, maka data yang dibutuhkan untuk menjalankan program simulasi antara lain [16]:

- a. Data *Power Grid*
- b. Data Transformator
- c. Data Kawat Penghantar
- d. Data Beban
- e. Data Bus

2.11.3. Elemen Aliran Daya

Program analisis aliran daya pada *software ETAP* dapat menghitung tegangan pada tiap-tiap cabang, aliran arus pada sistem tenaga listrik, dan aliran daya yang mengalir pada sistem tenaga listrik. Metode perhitungan aliran daya pada *software ETAP* ada tiga, yaitu: Newton Raphson, Fast-Decouple dan Gauss Seidel [16].



Gambar 2.26. Toolbar *Load Flow* Di ETAP
Sumber : ETAP 16.0.0

Gambar dari kiri ke kanan menunjukkan tool dan toolbar aliran daya, yaitu:

- a. *Run Load Flow* adalah *icon toolbar* aliran daya yang menghasilkan atau menampilkan hasil perhitungan aliran daya sistem distribusi tenaga listrik dalam diagram satu garis.
- b. *Update Cable Load Current* adalah *icon toolbar* untuk merubah kapasitas arus pada kabel sebelum *load flow* di-running.
- c. *Display Option* adalah bagian tombol untuk menampilkan hasil aliran daya.

- d. *Alert* adalah *icon* untuk menampilkan batas kritis dan marginal dari hasil keluaran aliran daya sistem distribusi tenaga listrik.
- e. *Report Manager* adalah *icon* untuk menampilkan hasil aliran daya dalam bentuk *report* yang dapat dicetak.

2.12. Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN)

Standar yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) sebagai pembanding dari hasil penelitian. SPLN No. 1 Tahun 1995 tentang tegangan maksimal +5% dan tegangan minimal -10% terhadap tegangan nominal [20] dan SPLN No. 70-1 Tahun 1985 tentang faktor daya yang diperbolehkan diatas 0,85 [21].