

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Terdapat beberapa penelitian mengenai perhitungan kapasitor bank dengan salah satu referensi sebagai pedoman untuk Perhitungan Kapasitor Bank dan Harmonik Distortion Rumah Sakit Panti Rapih Yogyakarta yaitu, skripsi yang dilakukan pada Ezar Kuntoro Khairy [2016] tentang Perancangan Instalasi Listrik Gedung Rumah Sakit Al-Irsyad Surabaya. Didalam penelitian tersebut yaitu merancang sistem Instalasi listrik pada Rumah Sakit yang terdiri dari lantai basement, lantai lobby, lantai 2-8, dan lantai atap dengan total daya perencanaan beban pada hotel dengan nilai daya semu (S) = 428,5 kVA dan nilai daya aktif (P) = 300kW, sehingga diperoleh kapasitas minimal kapasitor bank yang akan dipasang sebesar 160,7 kVAR.

Terdapat penelitian serupa sebagai referensi yaitu, skripsi yang dilakukan oleh Bani [2015] tentang Analisis Beban Elektrikal pada Pembangunan Gedung Pasca Sarjana UMY yang terdiri lantai dasar, lantai 1-5 dan lantai atap dengan total beban pada gedung dengan nilai daya semu (S) = 579,053 kVA dan nilai daya aktif (P) = 478 kW. Setelah terkena faktor kebersamaan dan setelah dilakukan perhitungan total daya aktif pada perencanaan pembangunan gedung sebesar 322,666 kW, dan total daya semu setelah terkena faktor kebersamaan sebesar 403,230 kVA. Sebelum dipasang kapasitor bank nilai $\cos \Phi$ pada instalasi gedung sebesar 0,79. Untuk mendapatkan nilai $\cos \Phi$ sebesar 0,9 maka perlu dipasang kapasitor bank sebesar 87,41 kVAR.

Selain itu penelitian ini didasari oleh penelitian yang mengenai harmonik distortion adalah penelitian yang dilakukan oleh Wayan Agus Adi Widiastara, Wayan Rinas, I Wayan Sukerayasa [2017] yang berjudul “Analisis Pengaruh Total Harmonic Distortion Terhadap Losses dan Efisiensi Transformator RSUD

Kabupaten Klungkung”. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui rugi-rugi daya (*losses*) yang dihasilkan dari banyaknya beban yang mempunyai karakteristik non linier. Beban listrik non linier sendiri merupakan beban listrik yang memiliki sifat menyimpang dari hukum ohm, dimana tegangan, arus, dan hambatan/impedansi tidak sebanding dengan maksud respon tegangan yang diberikan pada beban tidak sebanding dengan arus yang muncul sehingga dapat merusak komponen listrik mengakibatkan berbagai macam kerugian dan kerusakan pada beberapa peralatan listrik.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kualitas Daya Listrik

Seiring dengan perkembangan zaman kebutuhan akan konsumsi energi listrik akan terus mengalami peningkatan. Maka dari itu perbaikan akan kualitas dan kuantitas energi listrik menjadi salah satu alasan mengapa perusahaan utilitas penyedia listrik perlu memberi perhatian terhadap isu kualitas daya listrik. Perhatian terhadap isu kualitas daya listrik pada konsumen perindustrian yang membutuhkan supply (karena mesin pada perindustrian sensitif terhadap lonjakan / ketidakstabilan tegangan) maka dari itu perlu diusahakan suatu sistem pendistribusian tenaga listrik yang dapat memberikan pelayanan yang memenuhi kriteria yang diinginkan konsumen.

Sejak akhir tahun 1980-an kualitas daya listrik sudah menjadi isu penting pada industri. Kualitas daya listrik merupakan gambaran akan baik buruknya suatu sistem ketenagalistrikan dalam mengatasi gangguan-gangguan yang mungkin dapat terjadi pada sistem tersebut.

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 dimana perangkat berbasis mikroprosesor dan elektronika daya lainnya membutuhkan pelayanan tegangan yang stabil dan level tegangannya juga harus dijaga.

2. Peningkatan yang ditekan pada efisiensi daya/ sistem kelistrikan secara keseluruhan yang mengakibatkan yang mengakibatkan pertumbuhan lanjutan dalam aplikasi perangkat dengan efisiensi tinggi, seperti pengaturan kecepatan motor listrik dan penggunaan kapasitor bank untuk koreksi faktor daya untuk mengurangi rugi-rugi. Hal ini mengakibatkan peningkatan tingkat harmonik pada sistem tenaga dan mengakibatkan dapat menurunkan kualitas daya .
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 utilitas listrik untuk meningkatkan kualitas daya yang dikirim.
4. Sistem tenaga listrik sekarang ini sudah banyak melakukan interkoneksi antar jaringan, dimana hal ini memberikan suatu konsekuensi bahwa kegagalan dari setiap komponen akan mengakibatkan kegagalan pada komponen lainnya.

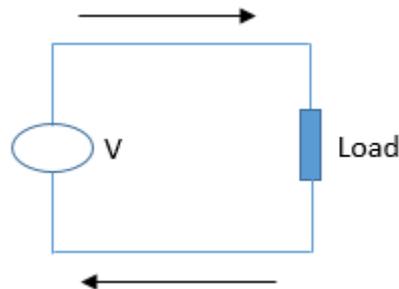
Kualitas daya yang buruk dapat menimbulkan masalah pada sistem tenaga berupa masalah lonjakan / perubahan tegangan yang besar, arus yang tinggi serta frekuensi yang akan menimbulkan kegagalan /kerusakan pada peralatan dimana kegagalan ini dapat merusak peralatan listrik baik dari sisi pengirim maupun sisi penerima. Maka dari itu untuk mengantisipasi kerugian yang dapat terjadi baik dari pihak PLN maupun konsumen, maka pihak PLN harus mengupayakan sistem kelistrikan yang baik.

2.2.1.1 Daya Listrik

Daya listrik merupakan energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Pada sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya memiliki satuan Watt, dimana merupakan perkalian dari Tegangan (volt) dan arus (ampere). Daya dinyatakan dalam P, Tegangan dinyatakan dalam V dan Arus dinyatakan dalam I, sehingga besarnya daya dinyatakan :

$$P = V \times I$$

$$P = \text{Volt} \times \text{Ampere} \times \text{Cos } \varphi \quad (2.1)$$



Gambar 2.1. Arah Aliran Arus Listrik

2.2.1.2 Daya Aktif P (kW)

Daya aktif (*Active Power*) adalah daya yang dipakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah watt. Adapun persamaan daya aktif adalah sebagai berikut :

$$\text{Untuk tiga fasa (P)} = V.I. \text{ Cos } \varphi \quad (2.2)$$

$$\text{Untuk tiga fasa (P)} = \sqrt{3} \cdot V. I. \text{ Cos } \varphi \quad (2.3)$$

Daya ini digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

2.2.1.3 Daya Reaktif Q (kvar)

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor dan lain-lain. Satuan daya reaktif adalah Var. Adapun persamaan daya reaktif sebagai berikut:

$$\text{Untuk satu fasa Q} = V. I. \text{ Sin } \varphi \quad (2.4)$$

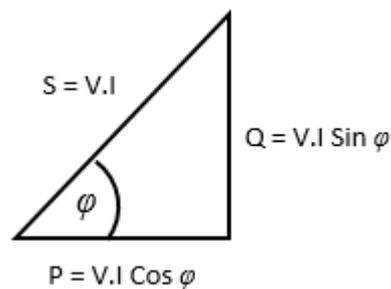
$$\text{Untuk tiga fasa Q} = \sqrt{3} \cdot V. I. \text{ Sin } \varphi \quad (2.5)$$

2.2.1.4 Daya Semu S (kVA)

Daya Semu (*Apparent Power*) adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu jaringan. Satuan daya semu adalah VA. Adapun persamaan dalam daya aktif sebagai berikut:

$$\text{Untuk satu phasa } S = V \cdot I \quad (2.6)$$

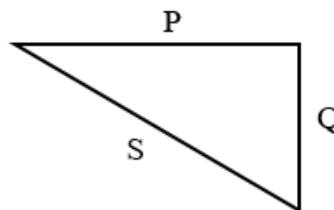
$$\text{Untuk tiga phasa } S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (2.7)$$



Gambar 2.2. Penjumlahan Trigonometri Daya Aktif, Reaktif, dan Semu

2.2.1.5 Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara daya semu, daya aktif dan daya reaktif berdasarkan prinsip trigonometri.



Gambar 2.3. Segitiga Daya

dimana berlaku hubungan :

$$S = V \cdot I$$

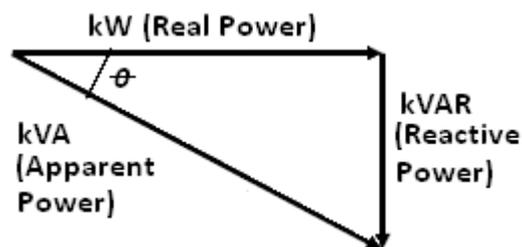
$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (2.8)$$

2.2.2 Faktor Daya

Faktor daya ($\cos \phi$) adalah rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya nyata (VA) yang digunakan dalam sirkuit AC atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \phi$.

$$\begin{aligned}
 \text{Faktor Daya} &= \text{Daya Aktif (P)} / \text{Daya Semu (S)} \\
 &= \text{kW} / \text{kVA} \\
 &= \text{V.I} \cos \phi / \text{V.I} \\
 &= \cos \phi
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$



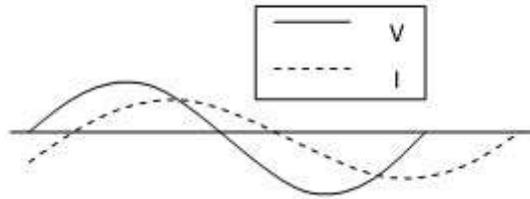
Gambar 2.4 Faktor Daya

(Sumber : electrical installation guide,2017)

2.2.2.1 Faktor Daya Terbelakang (*Lagging*)

Faktor daya terbelakang (*lagging*) merupakan keadaan dimana faktor daya saat memiliki kondisi sebagai berikut :

1. Beban/ peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif
2. Tegangan (V) mendahului I dengan sudut ϕ yang mengakibatkan arus (I) terbelakang dari sumber.

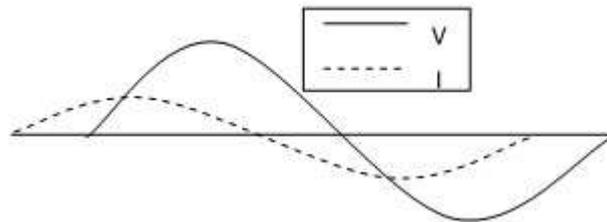


Gambar 2.5 Arus tertinggal dari tegangan sebesar sudut ϕ
(Sumber : Yugi Eryuhanggoro, 2013)

2.2.2.2 Faktor Daya Mendahului (*Leading*)

Faktor daya mendahului (*leading*) adalah keadaan pada saat faktor daya memiliki kondisi sebagai berikut :

1. Beban/ peralatan listrik memberikan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat kapasitif
2. Tegangan (V) terbelakang dari arus dengan sudut ϕ yang mengakibatkan arus mendahului tegangan.



Gambar 2.6 Arus Mendahului Tegangan Sebesar Sudut
(Sumber : Yugi Eryuhanggoro, 2013)

Faktor daya mempunyai nilai range antara 0 – 1 dan dinyatakan dalam bentuk persen (%). Faktor daya yang baik adalah apabila nilai faktor daya mendekati satu.

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \frac{\text{Daya Reaktif (Q)}}{\text{Daya Aktif (P)}} \\ &= \frac{kVAR}{kW} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Daya aktif pada umumnya memiliki nilai yang tetap, sedangkan nilai dari daya semu (kVA) dan daya reaktif (kVAR) memiliki nilai yang berubah-ubah sesuai dengan nilai faktor daya. Sehingga dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Daya Reaktif (Q)} = \text{Daya Aktif (P)} \times \text{Tan } \varphi \quad (2.11)$$

Untuk memperbaiki faktor daya maka rumus untuk menghitung rating kapasitor yang dibutuhkan adalah sebagai berikut :

$$\text{Daya reaktif pada pf awal} = \text{Daya Aktif (P)} \times \text{Tan } \varphi_1 \quad (2.12)$$

$$\text{Daya reaktif pada pf diperbaiki} = \text{Daya Aktif (P)} \times \text{Tan } \varphi_2 \quad (2.13)$$

Sehingga rating kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya adalah:

$$\text{Daya reaktif (kVAR)} = \text{Daya Aktif (kW)} \times (\text{Tan } \varphi_1 - \text{Tan } \varphi_2) \quad (2.14)$$

Dengan meningkatkan faktor daya maka akan memiliki beberapa keuntungan antara lain :

- a) Tagihan listrik menjadi lebih kecil (PLN akan memberikan denda jika nilai pf dibawah 0,85)
- b) Kapasitas distribusi sistem tenaga listrik akan meningkat
- c) Mengurangi rugi-rugi daya pada sistem
- d) Peningkatan tegangan maka akan meminimalkan jatuh tegangan yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Apabila nilai pf lebih kecil dari 0,85 maka kapasitas daya aktif (kW) yang digunakan akan berkurang karena semakin kecil nilai pf maka nilai daya reaktif semakin besar.

2.2.3 Sifat Beban Listrik

Sumber dan beban selalu dijumpai dalam suatu rangkaian listrik. Jika sumber listrik DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC bernilai 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 akan dibedakan menjadi 3, sebagai berikut :

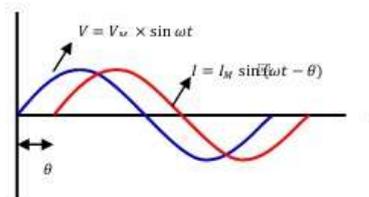
2.2.3.1 Beban Resistif

Beban resistif adalah suatu resistor murni, contoh beban resistif : lampu pijar, pemanas. Beban tersebut hanya menyerap daya aktif sama sekali tidak menyerap daya reaktif. Secara matematis dinyatakan:

$$R = V / I \quad (2.15)$$

2.2.3.2 Beban Induktif

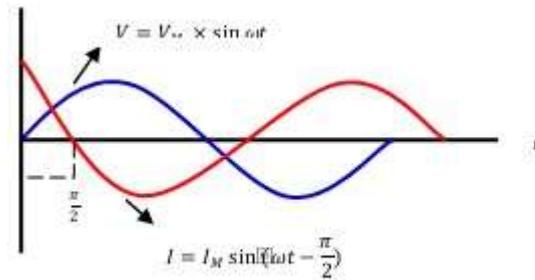
Beban induktif merupakan beban yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada sebuah inti besi, contoh dari beban induktif : motor-motor listrik, induktor dan transformator. Pada beban induktif memiliki faktor daya antara 0-1 “*lagging*”. Pada beban induktif menyerap daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVAR).



Gambar 2.7 Gelombang Arus, tegangan dan GGL induksi-diri pada beban induktif
(Sumber : Yugi Eryuhanggoro, 2013)

2.2.3.3 Beban Kapasitif

Suatu rangkaian kapasitor merupakan beban kapasitif. Beban kapasitif memiliki nilai faktor daya antara 0-1 “*leading*”. Beban kapasitif menyerap daya aktif (kW) namun mengeluarkan daya reaktif (kVAR).



Gambar 2.8 Gelombang Arus, Tegangan dan GGL Induksi diri Pada Beban Kapasitif
(Sumber : Yugi Eryuhanggoro, 2013)

2.2.4 Rugi-rugi Daya atau Losses

Segitiga daya menurut teori listrik adalah arus bolak-balik dengan penjumlahan daya yang dilakukan secara vektoris, bentuk dari vektornya merupakan segitiga siku-siku. Sudut pada segitiga daya merupakan sudut pergeseran fasa, semakin besar sudut yang terbentuk maka nilai faktor daya ($\cos \phi$) semakin kecil, dengan terbentuknya sudut yang besar maka semakin besar nilai Daya Semu (S), dan Daya Reaktif (Q). Faktor daya ($\cos \phi$) merupakan perbandingan antara besar daya aktif dengan daya semu. Adanya beban induktif atau beban kapasitif menyebabkan pergeseran fasa faktor daya.. Daya reaktif merupakan daya yang hilang, atau daya rugi-rugi sehingga semakin besar sudutnya atau semakin kecil faktor dayanya maka rugi ruginya semakin besar.

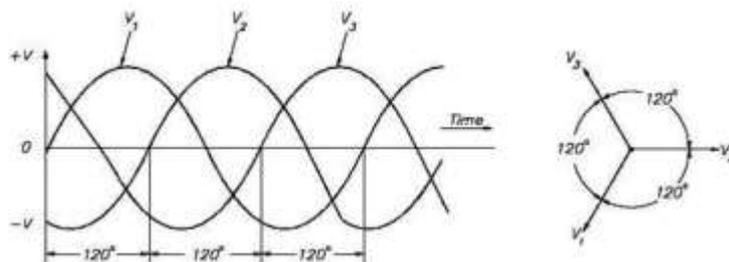
$$\text{Pf} (\cos) \phi = \frac{P (\text{Watt})}{S (\text{VA})} \quad (2.16)$$

Beban yang ada pada sistem bervariasi serta beban yang dipakai besarnya berubah-ubah sepanjang waktu. Jika beban meningkat maka

tegangan diujung penerimaan menurun dan sebaliknya bila beban berkurang maka tegangan di ujung penerimaan naik. Adanya impedansi seri penghantar saluran dan rugi daya merupakan faktor lain yang ikut mempengaruhi perubahan tegangan sistem. Maka dari itu pada umumnya konsumen yang letaknya dekat dari titik pelayanan akan menerima tegangan lebih besar, namun tegangan yang diterima konsumen yang letaknya jauh dengan pusat pelayanan pada umumnya akan menerima tegangan relatif lebih rendah. Adanya hubungan antara tegangan dan daya reaktif menyebabkan perubahan tegangan. Jatuh tegangan dalam penghantar sebanding dengan daya reaktif yang mengalir dalam penghantar tersebut. Berdasarkan hubungan ini maka tegangan dapat diperbaiki dengan mengatur aliran daya reaktif.

2.2.5 Sistem Listrik 3 Fasa

Pada umumnya dalam sistem tenaga listrik 3 fasa, idealnya daya listrik adalah dengan $P_{\text{pembangkitan}} = P_{\text{pemakaian}}$. Daya listrik yang dibangkitkan, disalurkan dan diserap oleh beban semuanya seimbang, dan juga pada tegangan yang seimbang. Tegangan yang seimbang terdiri dari tegangan 1 fasa yang mempunyai magnitudo dan frekuensi yang sama namun antara 1 fasa dengan fasa lainnya mempunyai beda fasa sebesar 120° , sedangkan secara fisik mempunyai perbedaan sebesar 60° , dan dapat dihubungkan secara bintang (Y, wye) atau segitiga (delta, Δ , D).



Gambar 2.9 Sistem Listrik 3 Fasa

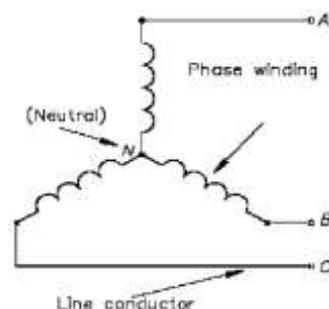
(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.com>)

Pada gambar 2.9 merupakan sistem listrik 3 fasa dimana pada gambar tersebut menunjukkan fasor diagram dari tegangan fasa. Bila fasor- tegangan tersebut berputar dengan kecepatan sudut dan dengan arah berlawanan jarum jam (arah positif), maka nilai maksimum positif dari fasa terjadi berturut-turut untuk fasa V1, V2 dan V3. sistem 3 fasa ini dikenal sebagai sistem yang mempunyai urutan fasa a – b – c . sistem tegangan 3 fasa dibangkitkan oleh generator sinkron 3 fasa.

2.2.5.1 Hubungan Bintang (Y, wye)

Pada hubungan bintang (Y,wye) , ujung-ujung tiap fasa dihubungkan menjadi satu dan menjadi titik netral atau titik bintang. Tegangan antara dua terminal dari tiga terminal a-b-c mempunyai besar magnitude dan beda fasa yang berbeda dengan tegangan tiap terminal terhadap titik netral. Tegangan V_a , V_b dan V_c disebut tegangan “fasa” atau V_f .

Dengan adanya saluran / titik netral maka besaran tegangan fase dihitung terhadap saluran / titik netralnya yang membentuk sistem tegangan 3 fase yang seimbang dengan magnitudenya. Sedangkan untuk arus yang mengalir pada semua fase mempunyai nilai yang sama.



Gambar 2.10 Hubungan Bintang (Y, Wye)

(Sumber:<http://dunia-listrik.blogspot.com>)

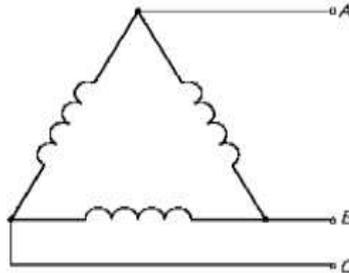
$$V_{\text{line}} = \sqrt{3} \times V_{\text{fase}} = 1,73 \times V_{\text{fase}} \quad (2.17)$$

$$I_{\text{Line}} = I_{\text{fase}} \quad (2.18)$$

$$I_a = I_b = I_c \quad (2.19)$$

2.2.5.2 Hubungan Segitiga

Pada hubungan segitiga (delta, Δ , D) ketiga fase saling dihubungkan sehingga membentuk hubungan segitiga 3 fase.



Gambar 2.11 Hubungan Segitiga (Delta, Δ , D)

(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.com>)

Karena tegangan saluran dan tegangan fasa mempunyai besar magnitude yang sama dan tidak adanya titik netral, maka besarnya tegangan pada saluran dihitung pada antar fase.

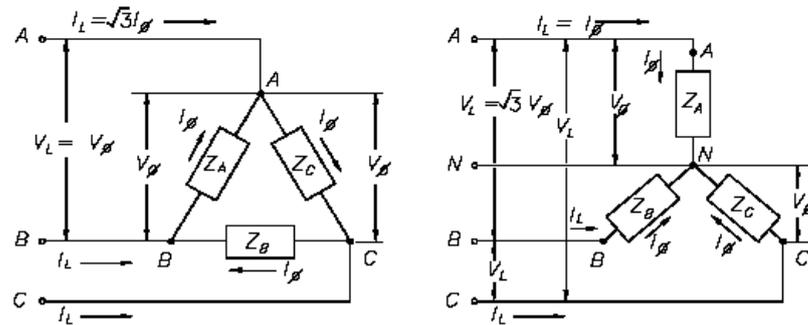
$$V_{\text{Line}} = V_{\text{Fase}} \quad (2.20)$$

Namun arus pada saluran dan arus fasa tidaklah sama, maka hubungan antara kedua arus menggunakan hukum *kirchoff* seperti pada persamaan 2.21 :

$$I_{\text{Line}} = \sqrt{3} \times I_{\text{Fase}} = 1,73 \times I_{\text{Fase}} \quad (2.21)$$

2.2.5.3 Daya Sistem 3 Fase pada Beban

Penjumlahan daya dari tiap-tiap fase merupakan jumlah daya yang diberikan oleh suatu generator 3 fase atau daya yang diserap oleh beban 3 fase. Pada sistem yang seimbang, daya total merupakan 3 kali daya fase, karena daya pada tiap fasenya sama.



Gambar 2.12 Hubungan Bintang dan Segitiga Yang Seimbang
(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.com>)

Apabila sudut antara arus dengan tegangan sebesar ϕ , maka besarnya daya perfasa adalah :

$$P_{\text{Fase}} = V_{\text{Fase}} \cdot I_{\text{Fase}} \cdot \cos \phi \quad (2.22)$$

Untuk menghitung besarnya total daya adalah dengan menjumlahkan besarnya daya pada tiap fase, dan dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$P_{\text{Total}} = 3 \cdot V_{\text{fase}} \cdot I_{\text{fase}} \cdot \cos \phi \quad (2.23)$$

Besarnya tegangan saluran pada hubung bintang adalah $1,73V_{\text{fase}}$ maka tegangan perfasa menjadi $V_{\text{line}}/1,73$, dengan nilai arus saluran sama dengan arus fase. $I_L = I_F$. Maka daya total pada rangkaian hubung bintang adalah :

$$P_T = 3 \cdot V_L/1,73 \cdot I_L \cdot \cos \phi \quad (2.24)$$

Pada hubung segitiga, tegangan line sama dengan tegangan fasenya, maka $V_L = V_{\text{Fase}}$ dan besarnya arus $I_{\text{line}} = 1,73 I_{\text{fase}}$, sehingga arus perfasenya adalah $I_L/1,73$. Maka total daya pada rangkaian segitiga adalah :

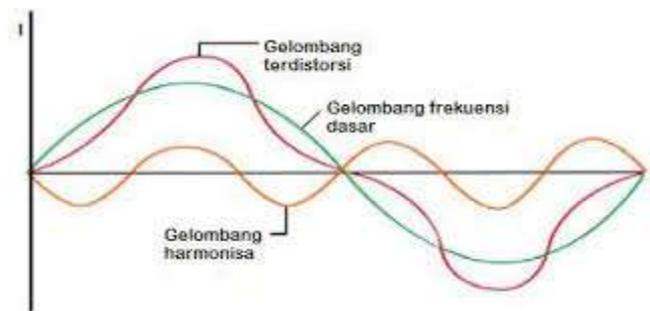
$$P_T = 3 \cdot I_L/1,73 \cdot V_L \cdot \cos \phi \quad (2.25)$$

Berdasarkan persamaan total daya yang ada pada kedua jenis hubungan, terlihat bahwa besarnya daya pada kedua jenis hubungan adalah sama, yang membedakan hanya pada tegangan kerja dan arus yang mengalirnya saja, dan berlaku pada kondisi beban yang seimbang.

2.2.6 Difinisi Harmonisa

Pada sistem tenaga listrik terdapat sebuah fenomena yang disebut harmonisa, dimana bentuk gelombang arus atau tegangan dari suplai akan terdistorsi sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan listrik. Definisi lain tentang harmonisa adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda dimana merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Pada sistem tenaga listrik dirancang untuk beroperasi pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz namun pada kenyataannya terdapat beberapa beban yang menyebabkan munculnya arus dan tegangan yang frekuensinya diatas 50/60 Hz. Beban yang kapasitas frekuensinya melebihi kapasitas yang telah ditentukan dinamakan sebagai beban non linier. Sedangkan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz dinamakan frekuensi fundamental dan yang kelipatannya disebut sebagai harmonisa atau harmonik.

Suatu sistem tenaga listrik memiliki frekuensi dasar sebesar 50 Hz, maka untuk frekuensi keduanya adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 100 Hz, harmonik ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz dan seterusnya. Dalam sistem listrik harmonisa merupakan arus dan tegangan yang terdistorsi dan menyimpang dari bentuk gelombang sinusoidal. Distorsi periodik dari gelombang sinus arus, tegangan, atau daya dengan bentuk gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan diluar bilangan satu terhadap frekuensi fundamental, dimana sistem yang dirancang beroperasi pada 50 Hz atau 60 Hz. Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni atau aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya, seperti pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 Gelombang Harmonisa

(Sumber : <http://dispa-nyaprad.blogspot.com>)

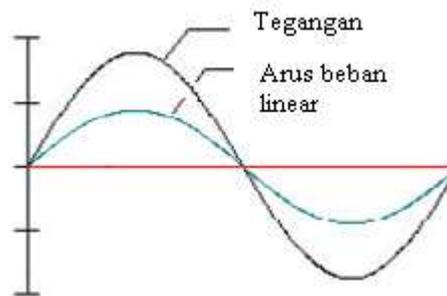
2.2.6.1 Distorsi Harmonisa

Distorsi harmonisa adalah perubahan setiap sinyal yang tidak sengaja dan secara umum keberadaannya tidak diinginkan pada sistem. Terdapat dua jenis beban dalam sistem tenaga listrik yaitu beban linier dan beban non linier. Dimana beban linier merupakan beban yang memiliki bentuk gelombang keluaran yang linier, artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Sedangkan beban non linier merupakan bentuk gelombang keluaran yang tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap siklus sehingga bentuk gelombang ataupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya atau yang sering disebut dengan gelombang yang mengalami distorsi. Alat yang mempunyai impedansi tidak linier merupakan salah satu faktor adanya harmonisa pada sistem tenaga listrik.

Harmonisa merupakan salah satu hal yang dapat menyebabkan distorsi pada bentuk gelombang fundamental tegangan dan arus. Beban non linier yang terhubung pada sistem distribusi listrik dapat menyebabkan arus harmonik. Sebuah beban dikatakan non linier ketika arus keluarannya tidak memiliki bentuk gelombang yang sama dengan tegangan masukannya. Fenomena ini timbul akibat pengaruh dari katakteristik beban non linier yang di modelkan sebagai suatu sumber arus yang menginjeksikan arus harmonisa kedalam sistem listrik.

2.2.6.2 Beban linier

Suatu beban yang memberikan bentuk keluaran arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan disebut beban linier. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linier akan sama dengan bentuk gelombang tegangan. Jika diberi tegangan sinusoidal, maka arus yang mengalir ke beban linier juga merupakan sinusoidal sehingga tidak terjadi distorsi dan tidak menimbulkan harmonisa. Beberapa contoh beban linier yang resistif adalah lampu pijar, pemanas, motor induksi kecepatan konstan, setrika, motor sinkron, rice cooker dan lain-lain



Gambar 2.14 Gelombang Beban linier

(Sumber : <http://dispa-nyaprad.blogspot.com>)

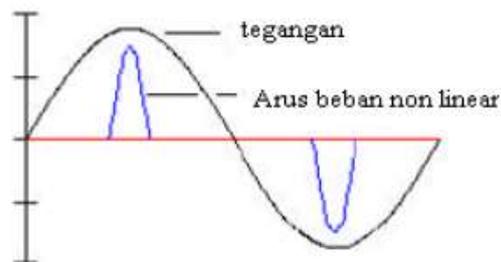
2.2.6.3 Beban non-linier

Beban non linier adalah beban yang impedansinya tidak tetap dalam setiap periode tegangan masukan. Dengan impedansi yang tidak tetap, maka arus yang dihasilkan tidak berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan. Peralatan elektronik yang didalamnya terdapat banyak komponen semi konduktor pada umumnya merupakan beban non linier. Bentuk gelombang pada beban non linier tidak menentu dan dapat berubah sewaktu-waktu bergantung pada pengaturan parameter komponen semi konduktor pada peralatan elektronik. Beberapa contoh beban non linier pada keperluan rumah tangga dan industri sebagai berikut :

- Peralatan dengan feromagnetik (transformator, ballast magnetik, motor induksi)

- Peralatan yang menggunakan busur api listrik seperti; mesin las, *electric arc furnace* dll)
- Konverter elektronik (penyearah, *charger*, ballast elektronik dll)

Pada gambar 2.15 merupakan bentuk gelombang arus dan tegangan yang mengalami distorsi akibat adanya penjumlahan gelombang harmonik dengan gelombang fundamental. Jika beban non linier dihubungkan dengan sumber tegangan sinusoidal, maka gelombang arus dan tegangan yang terjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Gelombang Beban Non linier
(Sumber : <http://dispa-nyaprad.blogspot.com>)

2.2.6.4 Proses Terjadinya Harmonisa

Pada tahun 1916 Steinmetz pertama kali meneliti fenomena harmonik pada sistem tenaga listrik. Steinmetz mengamati pada harmonik ke-3 yang muncul pada sistem 3 fasa. Adanya harmonik ke-3 tersebut disebabkan oleh kejenuhan inti besi pada trafo dan mesin-mesin listrik. Pada tahun 1930-1940, masalah harmonik orde ke-3 dapat teratasi dengan baik. Namun pada zaman sekarang ini alat-alat elektronik daya menjadi penyebab munculnya harmonik.

Rangkaian elektronik daya digunakan secara luas pada *switching power supplies*, UPS, komputer, printer, lampu *flourescent* dan peralatan-peralatan lainnya. Alasan banyak pihak yang menggunakan elektronika daya adalah karena efeasien dan mudah dikendaliakn, namun tetapi perangkat ini dapat

menarik arus AC non sinusoidal dari sumber AC. Bila arus ini beraksi dengan impedansi sistem maka akan membangkitkan tegangan dan arus harmonik. Gelombang tegangan dan arus harmonik ini bergerak seolah-olah melawan arah datangnya gelombang tegangan dan arus yang berasal dari sumber. Apabila gelombang harmonik ini bergabung dengan gelombang fundamentalnya, maka gelombang fundamental akan mengalami distorsi dan mengubah bentuknya menjadi gelombang sinusoidal yang tidak sempurna.

Harmonik merupakan kejadian yang berlangsung secara periodik dan berbentuk *steady state*, adanya harmonik secara terus menerus dapat menyebabkan distorsi pada gelombang sinus tegangan dan arus kemudian akan berpengaruh buruk terhadap sistem ataupun peralatan listrik. Sinyal distorsi sendiri merupakan jumlah dari sejumlah harmonisa yang menyatu.

2.2.6.5 Sumber-Sumber Harmonisa

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Beban non linier merupakan beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier, yang artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Sedangkan beban non linier adalah bentuk gelombang keluaran tidak linier atau dengan kata lain tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi).

Beban non linier pada umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semikonduktor. Penyebab utama terjadinya harmonik adalah beban yang mengandung beban non linier. Rasio antara beban non linier dan beban linier akan memberikan beban lebih pada harmonik. Jika dibandingkan dengan beban linier yang mempunyai bentuk gelombang arus atau tegangan yang selalu berbentuk sinusoidal dengan frekuensi yang sama, beban non linier akan mengakibatkan gelombang sinusoidal yang berubah bentuk menjadi tidak sinusoidal murni

2.2.7 Efek Harmonik

Seluruh peralatan yang terhubung dengan sistem yang mengandung harmonik akan mempunyai efek yang berbeda-beda, seperti peralatan mengalami penurunan kinerja atau dapat juga mengalami kerusakan dan juga akan mempunyai pengaruh terhadap kualitas daya dari sistem daya listrik. Distorsi harmonik ini dapat mengganggu atau menambah beban kerja alat-alat tersambung pada jaringan yang sama. Beberapa hal yang bisa diakibatkan harmonik adalah sebagai berikut :

- Menyebabkan peningkatan pemanasan dan rugi-rugi pada *switchgear*, sehingga mengurangi kemampuan mengalirkan arus dan mempersingkat umur beberapa komponen isolator.
- Timbulnya getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat harmonisa arus frekuensi tinggi.
- Harmonisa dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWh-meter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar, akibatnya putaran piringan akan lebih cepat atau terjadi kesalahan ukur pada kWh-meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.
- Mengurangi umur transformator, Penurunan efisiensi pada daya generator, transmisi dan pemakaiannya
- Suhu kerja peralatan juga semakin tinggi dan pada akhirnya akan mengurangi umur peralatan. Selain itu, meningkatnya rugi-rugi akan menurunkan efisiensi peralatan.
- Kerusakan pada alat koreksi faktor daya (*capacitor bank*).

2.2.8 Total Harmonic Distortion (THD)

Harmonisa adalah pembentukan gelombang-gelombang yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya. Gelombang tegangan maupun arus yang awalnya berupa sinusoidal murni akan terdistorsi menjadi

tidak sinusoidal murni lagi. Indeks yang disebut dengan THD (*Total Harmonic Distortion*) dimana THD merupakan perbandingan nilai komponen fundamental yang biasanya dalam bentuk persen (%). Pada umumnya THD dipakai untuk menentukan bentuk penyimpangan bentuk gelombang arus dan tegangan yang mengandung harmonisa terhadap gelombang sinus asli setiap satu periode.

Perbedaan antara THD_V dan THD_I yaitu jika THD_V adalah untuk menentukan kualitas tegangan dari sumber, sedangkan pada THD_I untuk menentukan kualitas arus dari beban. Pada umumnya sumber dirancang untuk mengalirkan tegangan yang mendekati sinus asli sehingga nilai THD tegangan yang diizinkan jauh lebih kecil dibanding THD_I . Bahaya yang dapat ditimbulkan oleh THD_I adalah mengakibatkan pemanasan yang berlebih. Namun adanya harmonisa arus yang besar akan menyebabkan THD_V yang tinggi.

Tingkat gangguan harmonik pada jaringan listrik menggambarkan faktor distorsi yang ada pada sistem tenaga listrik. Salah satu pengukuran yang pada umumnya digunakan adalah distorsi harmonik total (THD) yang akan digunakan dalam penelitian ini, untuk tegangan ataupun arusnya.

Konsep dasar dari arus filter adalah :

$$\text{Arus Filter} = \text{Arus Fundamental} - \text{Arus Beban} \quad (2.26)$$

Dari rumusan diatas didapatkan bahwa arusfilter adalah arus fundamental dikalikan Total Harmonic Distortion :

$$I_{\text{filter}} = I_1 \times THD I (\%) \quad (2.27)$$

Dengan Faktor Safety sebesar 20% maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$I_{\text{filter}} = I_{RMS} \times \frac{\sqrt{THD (I)^2 (\%)}}{THD (I)^2 (\%)+100^2} \times FS \quad (2.28)$$

$$\text{Tegangan, THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{\infty} V^2 h}}{V_1} \quad (2.29)$$

$$\text{Arus, THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{\infty} I^2 h}}{I_1} \quad (2.30)$$

Persamaan (2.29) dan (2.30) merupakan persamaan yang digunakan untuk menyatakan nilai THD arus dan tegangan.

2.2.9 Usaha Mereduksi Harmonisa

Adapun usaha yang dapat dilakukan untuk mereduksi permasalahan akibat harmonisa dapat bersifat preventif ataupun kuratif. Pada pendekatan preventif pada umumnya dilakukan pada masing-masing beban non linear sedangkan pendekatan kuratif dilakukan terhadap harmonisa yang telah menjalar ke sistem tenaga listrik. Dari sudut pandang yang berbeda, investigasi harmonisa dapat juga dilihat berdasarkan pihak yang melakukannya: pengguna listrik atau perusahaan listrik. Pengguna listrik akan menggunakan pendekatan preventif dan perusahaan listrik bertanggung jawab untuk melakukan pendekatan kuratif. Pendekatan kuratif dapat dilakukan dengan menggunakan filter dan reorganisasi jaringan listrik. Dengan filter, harmonisa-harmonisa tertentu dapat dikurangi amplitudonya sampai ke tingkat yang dapat diterima.

2.2.9.1 Mereduksi harmonisa dengan Filter

Tujuan utama dari filter harmonisa adalah untuk mengurangi amplitudo frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber-sumber

harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruhan jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem. Filter harmonisa dipasang secara paralel dengan peralatan yang merupakan beban non linier dan sumber harmonisa. Banyak sekali cara yang digunakan untuk memperbaiki sistem khususnya meredam harmonisa yang sudah dikembangkan saat ini. Secara garis besar ada beberapa cara untuk meredam harmonisa yang ditimbulkan oleh beban non linier yaitu diantaranya:

1. Filter pasif (*detuned reactor*)

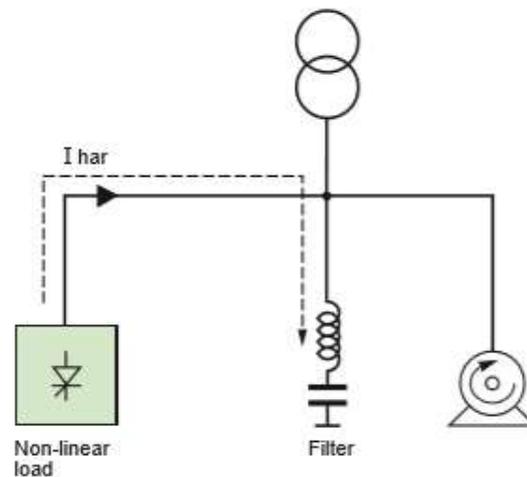
Untuk menghindari efek yang dapat ditimbulkan dari adanya arus harmonik dapat menggunakan *detuned reactor* atau filter pasif, penempatan filter pasif yang utamadiletakkan pada daerah yang dekat dengan sumber pembangkit harmonisa. Tujuan diletakkan dekat dengan sumber pembangkit harmonisa adalah untuk mengurangi penyebaran arusnya. Rangkaian filter pasif terdiri dari komponen R, L, dan C. Kombinasi komponen-komponen pasif di setel pada frekuensi harmonik yang akan direduksi.

Tujuan utama filter pasif dipasang pada sistem untuk meredam harmonik serta untuk memperbaiki faktor daya, berupa komponen L, C yang dapat ditala untuk satu atau dua frekuensi. Filter dengan penalaan tunggal ditala pada salah satu orde harmonisa (biasanya pada orde harmonisa rendah). Namun untuk arus harmonisa yang tinggi, reaktor saja tidak akan mampu untuk mengurangi distorsi harmonisa arus sesuai dengan standar yang telah ditentukan.

Filter pasif merupakan filter yang paling banyak digunakan karena harganya yang lebih murah dibandingkan filter lain dalam meredam distorsi harmonisa. Pada prinsipnya *detuned reactor* atau filter pasif dipasang secara seri dimana komponen kapasitor dan *detuned reactor*

dipasang secara bersamaan yang bertujuan untuk melindungi kapasitor dengan mencegah kenaikan harmonisa yang terjadi pada jaringan.

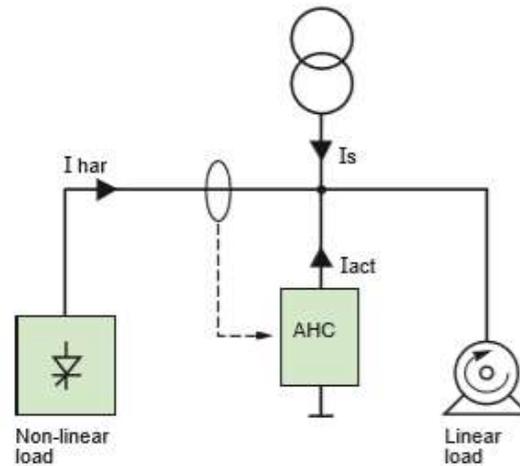
Akan tetapi penggunaan *detuned reactor* pada suatu peralatan listrik yang tidak sesuai antara nilai kapasitor dan *detuned reactor* akan menyebabkan pergeseran pada nilai frekuensi resonansi akibat naiknya tegangan pada terminal kapasitor yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan karena panas yang berlebih dan *over load*.



Gambar 2.16 Harmonisa filter pasif
(Sumber: electrical-installation-guide)

2. Filter aktif

Filter aktif ini dirancang untuk mengurangi harmonik dengan rangkaian elektronika daya berupa PWM inverter. Cara kerja dari penggunaan filter aktif ini adalah dengan cara menyuntikkan arus untuk membatalkan atau mengompensasi harmonik yang di timbulkan oleh beban non-linier. Secara umum filter aktif dibagi menjadi dua jenis berdasarkan caranya dihubungkan dengan sistem, yaitu filter aktif paralel (*shunt*) dan filter aktif seri (*series*). Filter aktif *shunt* merupakan filter yang pada umumnya sering dipakai, karena pada filter aktif model *shunt* tidak membutuhkan tambahan transformator seperti filter aktif *series*.



Gambar 2.17 Harmonisa filter aktif

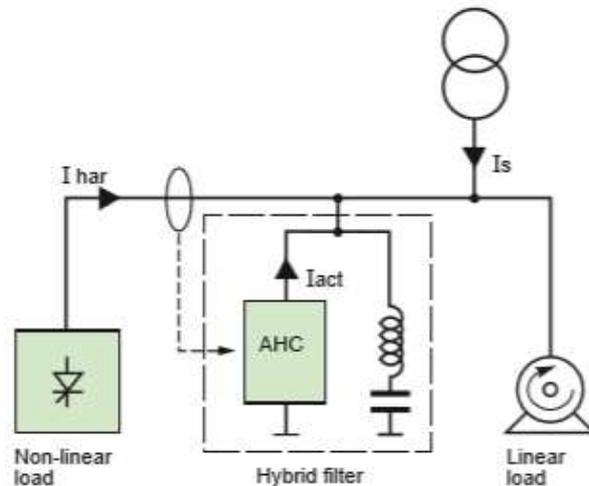
(Sumber: electrical-installation-guide)

3. Filter Daya *Hybrid*

Filter daya aktif dan pasif yang dikombinasikan dengan beberapa konfigurasi dikenal dengan filter daya *hybrid*. Filter daya *hybrid* merupakan solusi atas kekurangan-kekurangan yang dimiliki filter aktif dan filter pasif jika masing-masing digunakan secara individual. Apabila filter aktif dan filter pasif digabungkan akan menjadi filter daya *hybrid*. Dimana filter aktif dapat mengatasi permasalahan harmonik pada beban non linier dinamis yang tidak bisa diatasi filter pasif. Sementara itu, filter pasif mampu mengatasi kelemahan filter aktif dengan mengurangi kebutuhan rating filter aktif sehingga biaya yang dibutuhkan untuk menyediakan dan memasang filter aktif tidak terlalu mahal.

Dalam pemasangan filter daya *hybrid* yang terdiri dari filter aktif seri dan filter pasif *shunt* dipasang secara bersamaan. Filter aktif dipasang seri dengan beban non-linear sedangkan filter pasif dipasang secara paralel terhadap beban non-linear. Filter aktif adalah filter harmonisa yang terdiri dari komponen-komponen aktif, seperti inverter yang dikontrol secara khusus dan secara aktif dapat mendeteksi komponen arus harmonisa di jaringan. Dengan cara sederhana yaitu menyuntikkan arus harmonisa yang fasanya dibuat berbeda, sehingga saling

menghilangkan yang tujuannya untuk menggagalkan arus harmonisa menuju sumber. Filter aktif juga dapat mengkompensasi faktor daya atau fungsi yang lain. Berbeda dengan filter pasif yang hanya dapat memfilter satu harmonisa pada satu link filter pasif, filter aktif bisa mengkompensasi banyak harmonisa hanya dengan satu link filter aktif.



Gambar 2.18 Harmonisa filter hybrid
(Sumber: electrical-installation-guide)

2.2.10 Standar Harmonisa Berdasarkan IEEE 519-2014

Setiap tingkatan tegangan memiliki standar THD_v yang berbeda-beda, berdasarkan standar yang diatur sesuai dengan *Point of Common Coupling* (PCC) standar THD_v . Begitu pula dengan THD_i telah diatur dengan standar yang berbeda-beda sesuai PCC dan perhitungan rasio hubung singkatnya.

- 1) Standar THD_v IEEE 519-2014: Berdasarkan IEEE standard 519-2014 tentang nilai batas maksimum distorsi harmonisa tegangan pada sistem dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 *Voltage Distortion Limits*

<i>Bus Voltage (V) at PCC</i>	<i>Individual Harmonic (%)</i>	<i>Total Harmonic Distortion (%)</i>
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------------

$V \leq 1 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V < 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V < 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5

2) Standar THD_I IEEE 519-2014: Batas THD_I yang direkomendasikan bagi pelanggan yang terhubung dengan sistem tegangan berkisar antara 120 V sampai 69 kV disesuaikan dengan *short circuit ratio* (rasio hubungan singkat).

Tabel 2.2 Harmonic Current Distortion

Maximum Harmonic Current Distortion						
Individual Harmonic Order (odd harmonic)						
ISC/IL	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	THD (%)
< 20 ^c	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

2.2.11 Perbaikan Daya Dengan Kapasitor

Dalam sistem listrik AC/Arus bolak-balik terdapat tiga jenis daya yang dikenal, khususnya untuk beban yang memiliki impedansi (Z), yaitu:

- Daya semu (S, VA, Volt Amper)
- Daya aktif (P, W, Watt)
- Daya reaktif (Q, VAR, Volt Amper Reaktif)

Bentuk gelombang tegangan dan arus sinusoida besarnya daya setiap waktu pada rangkaian listrik AC tidak sama. Maka daya merupakan daya rata-rata diukur dengan satuan Watt, daya ini membentuk energi aktif persatuan

waktu dan dapat diukur dengan kwh meter dan juga merupakan daya nyata atau daya aktif (daya poros, daya yang sebenarnya) yang digunakan oleh beban untuk melakukan tugas tertentu.

Daya semu dinyatakan dengan satuan Volt-Ampere (disingkat, VA), daya semu menyatakan kapasitas peralatan listrik, seperti yang tertera pada peralatan generator dan transformator. Pada suatu instalasi, khususnya di pabrik/industri juga terdapat beban tertentu seperti motor listrik dan peralatan-peralatan seperti AC dan peralatan yang mengandung elektromagnetik memerlukan bentuk lain dari daya, yaitu daya reaktif (VAR) untuk membuat medan magnet atau dengan kata lain daya reaktif adalah daya yang terpakai sebagai energi pembangkitan flux magnetik sehingga timbul magnetisasi dan daya ini dikembalikan ke sistem karena efek induksi elektromagnetik itu sendiri, sehingga daya ini sebenarnya merupakan beban (kebutuhan) pada suatu sistem tenaga listrik.

2.2.11.1 Pengertian Faktor Daya / Faktor Kerja

Perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu (VA) atau perbandingan cosinus sudut daya aktif dan daya semu dinamakan faktor daya. Faktor daya akan menjadi lebih rendah ketika daya reaktif yang tinggi yang menyebabkan meningkatnya sudut daya. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu.

Secara teoritis, apabila seluruh beban daya yang dipasok oleh perusahaan listrik memiliki faktor daya satu, maka daya maksimum yang ditransfer setara dengan kapasitas sistem pendistribusian. Sehingga, dengan beban yang terinduksi dan jika faktor daya berkisar dari 0,2 hingga 0,5, maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Jadi, daya reaktif (VAR) harus serendah mungkin untuk keluaran kW yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya total (VA). Faktor Daya / Faktor kerja menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu.

Peningkatan faktor daya tergantung dari seberapa besar nilai kapasitor yang dipasang (dalam kVAR). Sehingga denda VARh dapat diminimalkan. Salah satu ciri kehidupan modern adalah salah satu cirinya merupakan pemakaian energi listrik yang besar. Beraneka ragam peralatan (beban) listrik yang digunakan menyebabkan besarnya pemakaian energi listrik. Besarnya energi atau beban listrik yang dipakai ditentukan oleh reaktansi (R), induktansi (L) dan kapasitansi (C). Sedangkan beban listrik yang digunakan pada saat ini 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.

Daya reaktif merupakan daya tidak berguna sehingga tidak dapat dirubah menjadi tenaga akan tetapi diperlukan untuk proses transmisi energi listrik pada beban. Jadi semakin besar daya reaktif akan menyebabkan pemborosan energi listrik adalah banyaknya peralatan yang bersifat induktif. Yang artinya 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.

Jika nilai daya itu diperbesar yang biasanya dilakukan oleh pelanggan industri maka rugi-rugi daya menjadi besar sedangkan daya aktif (kW) dan tegangan yang sampai ke konsumen berkurang atau menjadi kecil. Maka dari itu produksi pada industri itu akan menurun hal ini tentunya tidak boleh terjadi untuk itu suplai daya dari PLN harus ditambah berarti akan menyebabkan penambahan biaya. Karena daya itu :

$$P = V.I$$

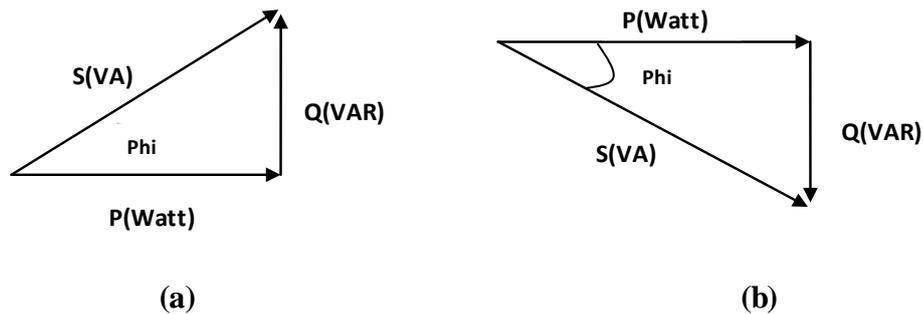
Keterangan :

$$P = \text{Daya (Watt)}$$

$$V = \text{Tegangan (Volt)}$$

$$I = \text{Arus (Ampere)}$$
(2.31)

Bertambah besarnya daya berarti terjadi penurunan nilai tegangan dan naiknya nilai arus. Dengan demikian daya aktif, daya reaktif dan daya nyata merupakan suatu kesatuan yang kalau digambarkan seperti segi tiga siku-siku pada Gambar 2.19 berikut.



Gambar 2.19 Segitiga Daya (a) Karakteristik Beban Kapasitif,
(b) Karakteristik Beban Induktif
(Sumber : Temmy Nanda Hartono, 2014)

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

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

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

$$\text{Faktor Daya (Cos } \varphi) = \frac{\text{Daya Nyata}}{\text{Daya Semu}} \quad (2.32)$$

Nilai $\cos \varphi$ adalah mulai dari 0 s/d 1. Berarti kondisi terbaik yaitu pada saat harga P (kW) maksimum [P (kW) = S (kVA)] atau harga $\cos \varphi = 1$ dan ini disebut juga dengan $\cos \varphi$ yang terbaik. Untuk nilai $\cos \varphi < 0,85$ dapat pf dikatakan jelek karena nilai $\cos \varphi$ yang ditentukan oleh PLN sebagai pihak yang mensuplai daya adalah sebesar 0,85. 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.

Dengan nilai pf yang buruk akan menimbulkan 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. Pemakaian daya reaktif yang tinggi maka nilai pf akan semakin menurun. Jika nilai pf berada dibawah standar yang telah ditentukan PLN maka pihak konsumen harus membayar denda akibat pemakaian daya reaktif yang tinggi. 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.

2.2.11.2 Kapasitor untuk Memperbaiki Faktor Daya

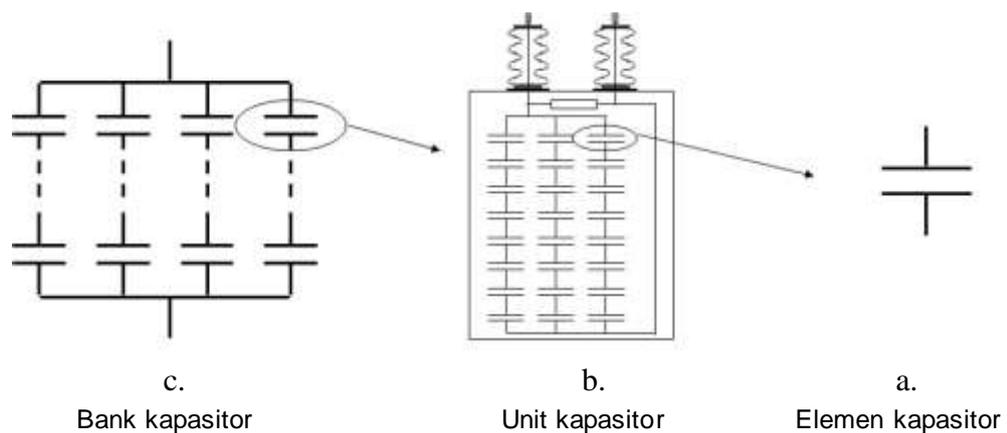
Dengan menggunakan kapasitor dapat memperbaiki faktor daya pada sistem distribusi listrik/instalasi listrik di pabrik/industri. Kapasitor berfungsi sebagai pembangkit daya reaktif maka dari itu kapasitor dapat mengurangi jumlah daya reaktif, juga daya semu yang dihasilkan oleh bagian utilitas.

2.2.11.3 Kapasitor Bank

Kapasitor bank adalah peralatan listrik yang mempunyai sifat kapasitif, yang akan berfungsi sebagai penyeimbang sifat induktif. Kapasitor bank juga merupakan peralatan elektrik yang berfungsi untuk meningkatkan *power factor* (PF), yang akan mempengaruhi besarnya arus (Ampere). Kapasitas kapasitor dari ukuran 5 KVar sampai 60 KVar. Dari tegangan kerja 230 V sampai 525 Volt atau Kapasitor Bank adalah sekumpulan beberapa kapasitor yang disambung secara paralel untuk mendapatkan kapasitas kapasitif tertentu. Besaran yang sering dipakai adalah Kvar (Kilovolt ampere reaktif) meskipun didalamnya terkandung / tercantum besaran kapasitansi yaitu *Farad* atau *microfarad*. Kapasitor ini mempunyai sifat listrik yang kapasitif

(*leading*). Sehingga mempunyai sifat mengurangi / menghilangkan terhadap sifat induktif (*leaging*).

Pada gambar 2.20 merupakan penjelasan istilah yang terkait dengan bagian-bagian kapasitor sebagai berikut :



Gambar 2.20 Ilustrasi bagian-bagian kapasitor
(Sumber:<http://dunia-listrik.blogspot.com>)

a. Elemen kapasitor

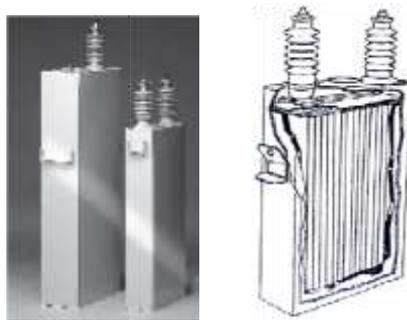
Elemen kapasitor merupakan bagian terkecil dari kapasitor yang berupa belitan aluminium foil dan plastik film.

b. Unit kapasitor

Pada gambar 2.19 merupakan sebuah unit kapasitor yang terdiri dari elemen-elemen kapasitor yang dihubungkan dalam suatu matriks secara seri dan parallel. Unit kapasitor rata-rata terdiri dari 40 elemen-elemen. Elemen-elemen kapasitor dihubungkan secara seri untuk membangun tegangan dan dihubungkan secara paralel untuk membangun daya (VAR) pada unit kapasitor. Unit kapasitor dilengkapi dengan resistor yang berfungsi sebagai elemen pelepasan muatan kapasitor (*discharge device*). Rating tegangan unit kapasitor bervariasi dari 240 V sampai 25 kV dan rating kapasitas dari 2,5 kVAR sampai 1 MVAR.

Pada IEEE std 18-1992 dan std 1036-1992 dinyatakan bahwa :

- Unit kapasitor harus mampu beroperasi terus menerus pada rating 110% V_{rms} dan tegangan puncak tidak melebihi $1,2 \sqrt{2} V_{rms}$ serta harus mampu dilalui arus sebesar 135% $I_{nominal}$.
- Pada rating tegangan dan frekuensi, daya reaktif harus berkisar antara 100% sampai 115% rating daya reaktif.



Gambar 2.21 Unit kapasitor

(Sumber: <http://dunia-listrik.blogspot.com>)

c. *Automatic Power Factor Regulator (APFR)*

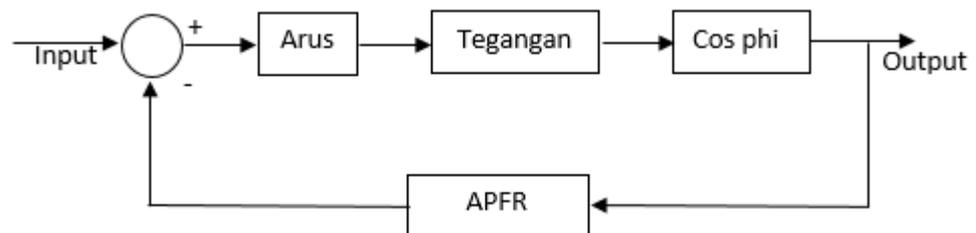
Dalam merakit sebuah *Automatic Capacitor Bank* pasti diperlukan alat yang bernama *Power Factor (PF) Controller*, sering juga disebut *Power Factor Regulator* atau Regulator saja. Alat ini berfungsi untuk menjaga kondisi PF di jaringan agar sesuai dengan PF yang diinginkan. Pada alat tersebut akan menampilkan hasil pengukuran PF pada jaringan, step yang sudah masuk. Namun untuk parameter yang lain seperti tegangan, arus THD, dll tergantung dari jenis dan merknya. Dan untuk type yang sederhana setting hanya dengan memasukkan nilai C/K, target PF, konfigurasi step, dan *time connect / disconnect*. Step merupakan parameter yang menunjukkan jumlah output relay yang di kontrol oleh PF Controller.



Gambar 2.22 Automatic Power Factor Regulator(APFR)
(Sumber : Tarsin Saragih, 2011)

Relay tersebut yang selanjutnya akan memicu salah satu sel *capacitor bank*. Jumlah step dalam PF Controller bermacam-macam mulai dari 4 step, 6 step, 8 step, 12 step dan 14 step tergantung pembuat. Jika menginginkan 7 step dalam sebuah panel *capacitor* di pilih PF Controller yang 8 step, kemudian di OFF kan salah satu stepnya.

Blog diagram cara kerja APFR:



Gambar 2.23 Blog diagram cara kerja APFR
(Sumber:<http://dunia-listrik.blogspot.com>)

Keuntungan dengan pemasangan kapasitor bank pada sebuah sistem listrik adalah sebagai berikut :

1. Dapat meningkatkan kemampuan jaringan dalam menyalurkan daya
2. Dapat meminimalkan optimasi biaya karena ukuran kabel diperkecil
3. Mengurangi besarnya nilai "*drop voltage*"
4. Mengurangi naiknya arus/suhu pada kabel, sehingga mengurangi rugi-rugi daya

Berdasarkan dari cara kerjanya, kapasitor 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 kapasitor bank tanpa beban.
- 2) *Automatic type*, yaitu memberikan beban kapasitif yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan kapasitor 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 $\cos \phi$.

2.2.11.4 Perawatan dan Perlindungan Kapasitor Bank

Untuk perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor bank, agar kapasitor tidak cepat rusak memerlukan pemeriksaan secara rutin dan teratur. Dalam perawatannya, kapasitor bank harus ditempatkan pada tempat yang lembab dan tidak basah yang tidak terlindungi dari debu dan kotoran. Sebelum melakukan pemeriksaan, maka kapasitor bank dipastikan sedang tidak terhubung dengan sumber listrik. Pemeriksaan yang harus dilakukan secara rutin meliputi :

- 1) Pemeriksaan kebocoran.
- 2) Pemeriksaan kabel dan penyangga kapasitor.
- 3) Pemeriksaan isolator.

2.2.11.5 Proses Kerja Kapasitor

Untuk memperbesar nilai pf maka kapasitor yang akan digunakan dipasang paralel dengan rangkaian beban. Apabila rangkaian yang dipasang secara paralel antara beban dan kapasitor itu diberi tegangan maka elektron

akan mengalir masuk ke kapasitor. Kapasitor dapat membangkitkan daya reaktif ketika elektron keluar dari kapasitor kemudian mengalir pada rangkaian. Ketika kapasitor sudah 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. Apabila tegangan yang semula mengalami penurunan tegangan maka akan kembali normal. 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 reaktif ke beban. Kerana beban bersifat induktif (+) sedangkan daya reaktif bersifat kapasitor (-) akibatnya daya reaktif yang berlaku menjadi kecil.

- Rugi-rugi daya sebelum dipasang kapasitor :

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

$$\text{Rugi daya reaktif} = I^2 \times X_c \text{ (VAR)} \quad (2.33)$$

- Rugi-rugi daya sesudah dipasang kapasitor :

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

$$\text{Rugi daya reaktif} = (I^2 - I_c^2) \times X_c \text{ (VAR)} \quad (2.34)$$

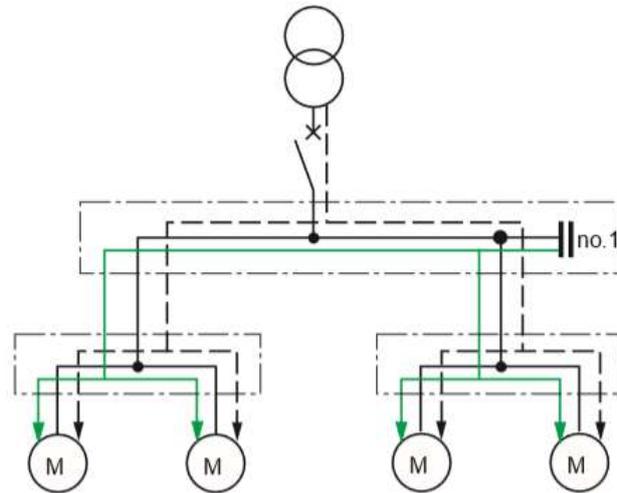
2.2.11.6 Metode Pemasangan Instalasi Kapasitor Bank

Adapun cara memasang kapasitor bank pada instalasi listrik dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu :

1) *Global compensation*

Pada metode *global compensation* kapasitor bank dipasang pada induk panel *mine distribution panel* (MDP) pemasangan dengan menggunakan metode ini dapat menurunkan arus pada penghantar antara panel MDP dan

transformator. Pemodelan jenis *global compensation* berfungsi untuk mengurangi tarif daya untuk konsumsi kvar yang berlebih, mengurangi suplay trafo serta dapat menerima lebih banyak daya aktif yang diperlukan.

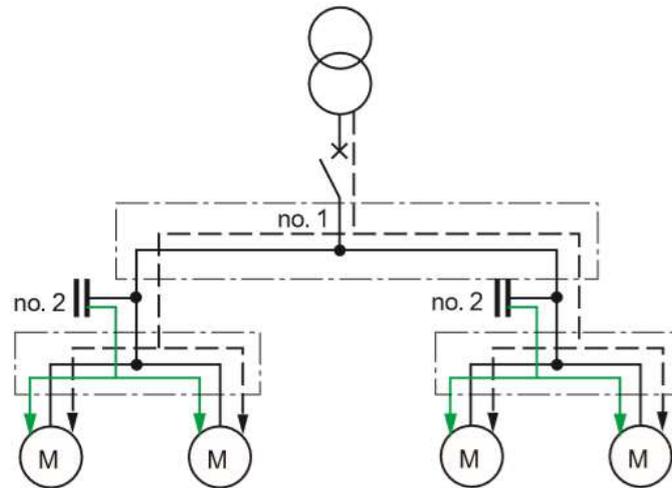


Gambar 2.24 *Global compensation*

(Sumber : Schneider Electric 2017)

2) *Sectoral Compensation*

Dengan metode ini pemasangan kapasitor bank yang terdiri dari beberapa panel kapasitor yang akan dipasang pada masing-masing setiap panel *sub distribution panel* (SDP)/sektor. Dengan menggunakan metode *sectoral compensation* dapat meminimalkan kerugian yang terjadi pada kabel, meminimalkan adanya pinalti dari pihak PLN karena daya reaktif yang berlebih serta mengurangi beban pada transformator daya.

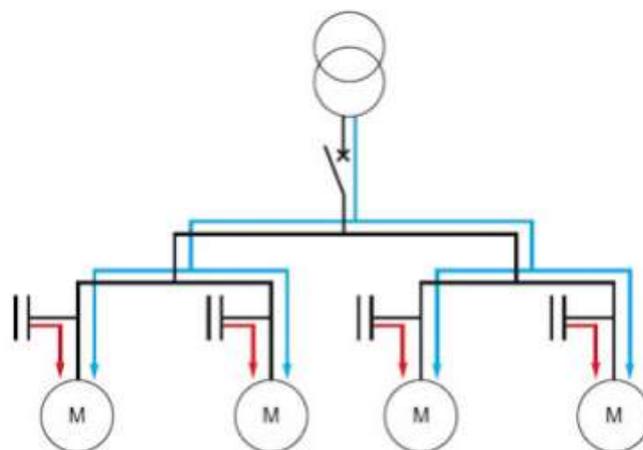


Gambar 2.25 Sectoral compensation

(Sumber : Schneider Electric 2017)

3) Individual Compensation

Pemodelan dengan *individual compensation* adalah pemasangan kapasitor bank langsung dipasang pada masing masing beban yang akan digunakan khususnya pada beban yang mempunyai daya yang besar dan banyak mengandung motor listrik. Karena dengan metode ini kapasitor dipasang pada setiap beban yang memerlukan maka pada metode ini memerlukan biaya yang besar.



Gambar 2.26 Individual Compensation

(Sumber: Schneider Electric 2017)

2.2.9.7 Komponen-komponen Kapasitor bank

1. *Main switch / load Break switch*

Pada komponen kapasitor bank *Main switch* dikenal sebagai peralatan kontrol dan isolasi jika terdapat pemeliharaan panel. *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 switch* model *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 $600 \text{ A} + 25 \% = 757$ Ampere yang dipakai size 800 Ampere.

2. Kapasitor *Breaker*

Kapasitor *Breaker* digunakan untuk mengamankan instalasi kabel dari *breaker* ke Kapasitor 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*.

3. *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.

4. 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 :

- *Push button on* dan *push buttonoff* yang berfungsi mengoperasikan *magnetic contactor* secara manual.- *Selektor auto – off – manual* yang berfungsi memilih system operasional auto dari modul atau manual dari *push button*.
- *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.

5. 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 *capacitor* maka diperlukan *setup C/K* yang sesuai.

2.2.9.8 Menentukan Ukuran Kapasitor untuk Memeperbaiki faktor daya

Terdapat beberapa metode dalam menentukan ukuran kapasitor untuk perbaikan faktor daya seperti dengan metode perhitungan sederhana, metode tabel kompensasi dan metode diagram. Dalam menentukan 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 $\cos \phi_2$.

a. Metode perhitungan sederhana

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

$$\text{Daya Semu} = S \text{ (kVA)}$$

$$\text{Daya Aktif} = P \text{ (kW)}$$

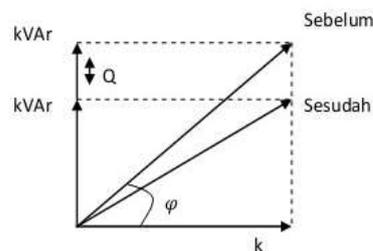
$$\text{Daya Reaktif} = Q \text{ (kVAR)}$$

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

$$Q_c = Q_L - Q_B \quad (2.35)$$

b. Metode Diagram

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



Gambar 2.27 Diagram Daya Untuk Menentukan Kapasitor
(Sumber : Tarsin Saragih, 2011)

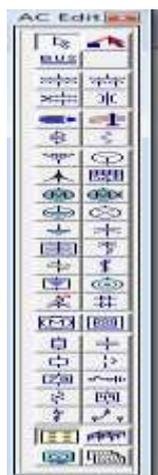
c. Metode Tabel Kompensasi

Tabel 2.3 Tabel kompensasi kapasitor bank

SEBELUM KOMPENSASI		SEBELUM KOMPENSASI (Faktor Daya yang diinginkan)															
$\cos \varphi$		0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
	$\tan \varphi$	0.62	0.59	0.57	0.54	0.51	0.48	0.46	0.43	0.40	0.36	0.33	0.29	0.25	0.20	0.14	0.00
0.40	2.29	1.67	1.70	1.72	1.75	1.78	1.81	1.84	1.87	1.90	1.93	1.96	2.00	2.04	2.09	2.15	2.29
0.41	2.22	1.60	1.63	1.66	1.68	1.71	1.74	1.77	1.80	1.83	1.86	1.90	1.93	1.97	2.02	2.08	2.22
0.42	2.16	1.54	1.57	1.59	1.62	1.65	1.68	1.71	1.73	1.77	1.80	1.83	1.87	1.91	1.96	2.02	2.16
0.43	2.10	1.48	1.51	1.53	1.56	1.59	1.62	1.64	1.67	1.70	1.74	1.77	1.81	1.85	1.90	1.96	2.10
0.44	2.04	1.42	1.45	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.61	1.65	1.68	1.71	1.75	1.79	1.84	1.90	2.04
0.45	1.98	1.36	1.39	1.42	1.44	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.62	1.66	1.69	1.73	1.78	1.84	1.98
0.46	1.93	1.31	1.34	1.36	1.39	1.42	1.45	1.47	1.50	1.54	1.57	1.60	1.64	1.68	1.73	1.79	1.93
0.47	1.88	1.26	1.28	1.31	1.34	1.37	1.39	1.42	1.45	1.48	1.52	1.55	1.59	1.63	1.67	1.74	1.88
0.48	1.83	1.21	1.23	1.26	1.29	1.32	1.34	1.37	1.40	1.43	1.46	1.50	1.54	1.58	1.62	1.69	1.83
0.49	1.78	1.16	1.19	1.21	1.24	1.27	1.29	1.32	1.35	1.38	1.42	1.45	1.49	1.53	1.58	1.64	1.78
0.50	1.73	1.11	1.14	1.17	1.19	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.37	1.40	1.44	1.48	1.53	1.59	1.73
0.51	1.69	1.07	1.09	1.12	1.15	1.17	1.20	1.23	1.26	1.29	1.32	1.35	1.39	1.44	1.48	1.54	1.69
0.52	1.64	1.02	1.05	1.08	1.10	1.13	1.16	1.19	1.22	1.25	1.28	1.31	1.35	1.39	1.44	1.50	1.64
0.53	1.60	0.96	1.01	1.03	1.06	1.09	1.12	1.14	1.17	1.20	1.24	1.27	1.31	1.35	1.40	1.46	1.60
0.54	1.56	0.94	0.97	0.99	1.02	1.05	1.07	1.10	1.13	1.16	1.20	1.23	1.27	1.31	1.36	1.42	1.56
0.55	1.52	0.90	0.93	0.95	0.98	1.01	1.03	1.06	1.09	1.12	1.16	1.19	1.23	1.27	1.32	1.38	1.52
0.56	1.48	0.86	0.89	0.91	0.94	0.97	1.00	1.02	1.05	1.08	1.12	1.15	1.19	1.23	1.28	1.34	1.48
0.57	1.44	0.82	0.85	0.87	0.90	0.93	0.96	0.99	1.02	1.05	1.08	1.11	1.15	1.19	1.24	1.30	1.44
0.58	1.40	0.78	0.81	0.84	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	1.01	1.04	1.08	1.11	1.15	1.20	1.26	1.40
0.59	1.37	0.75	0.78	0.80	0.83	0.86	0.88	0.91	0.94	0.97	1.01	1.04	1.08	1.12	1.17	1.23	1.37
0.60	1.33	0.71	0.74	0.77	0.79	0.82	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97	1.00	1.04	1.08	1.13	1.19	1.33
0.61	1.30	0.68	0.71	0.73	0.76	0.79	0.81	0.84	0.87	0.90	0.94	0.97	1.01	1.05	1.10	1.16	1.30
0.62	1.27	0.65	0.67	0.70	0.73	0.75	0.78	0.81	0.84	0.87	0.90	0.94	0.97	1.01	1.06	1.12	1.27
0.63	1.23	0.61	0.64	0.67	0.69	0.72	0.75	0.78	0.81	0.84	0.87	0.90	0.94	0.98	1.03	1.09	1.23
0.64	1.20	0.58	0.61	0.63	0.66	0.69	0.72	0.74	0.77	0.81	0.84	0.87	0.91	0.95	1.00	1.06	1.20
0.65	1.17	0.55	0.58	0.60	0.63	0.66	0.68	0.71	0.74	0.77	0.81	0.84	0.88	0.92	0.97	1.03	1.17
0.66	1.14	0.52	0.54	0.57	0.60	0.63	0.65	0.68	0.71	0.74	0.78	0.81	0.85	0.89	0.94	1.00	1.14
0.67	1.11	0.49	0.51	0.54	0.57	0.60	0.62	0.65	0.68	0.71	0.75	0.78	0.82	0.86	0.90	0.97	1.11
0.68	1.08	0.46	0.48	0.51	0.54	0.57	0.59	0.62	0.65	0.68	0.72	0.75	0.79	0.83	0.88	0.94	1.08
0.69	1.05	0.43	0.46	0.48	0.51	0.54	0.56	0.59	0.62	0.65	0.69	0.72	0.76	0.80	0.85	0.91	1.05
0.70	1.02	0.40	0.43	0.45	0.48	0.51	0.54	0.56	0.59	0.62	0.66	0.69	0.73	0.77	0.82	0.88	1.02
0.71	0.99	0.37	0.40	0.43	0.46	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.70	0.74	0.79	0.85	0.99
0.72	0.96	0.34	0.37	0.40	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.64	0.67	0.71	0.76	0.82	0.96
0.73	0.94	0.32	0.34	0.37	0.40	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.61	0.64	0.69	0.73	0.79	0.94
0.74	0.91	0.29	0.32	0.34	0.37	0.40	0.42	0.45	0.48	0.51	0.55	0.58	0.62	0.66	0.71	0.77	0.91
0.75	0.88	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.59	0.63	0.68	0.74	0.88
0.76	0.86	0.24	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.56	0.60	0.65	0.71	0.86
0.77	0.83	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37	0.40	0.43	0.47	0.50	0.54	0.58	0.63	0.69	0.83
0.78	0.80	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.44	0.47	0.51	0.55	0.60	0.66	0.80
0.79	0.78	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.45	0.48	0.53	0.57	0.63	0.78
0.80	0.75	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.27	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.50	0.55	0.61	0.75

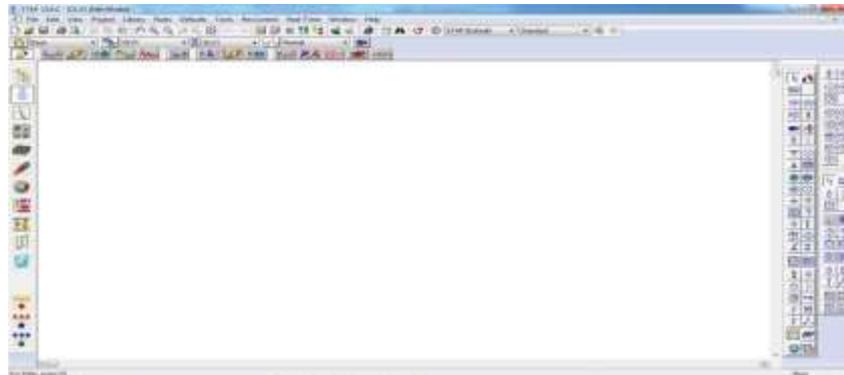
2.2.12 Program ETAP (Electric Transient and Analysis Program) 12.6.0

Software ETAP adalah *software* yang mampu digunakan analisa sistem tenaga listrik dengan cara simulasi. Pada *software* ETAP mampu digunakan dalam keadaan offline yang digunakan simulasi, online untuk pengelolaan dan real time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara real time. Pada *software* ETAP memiliki berbagai macam fitur, yang diantaranya fitur yang dimanfaatkan untuk dilakukan analisa pada sistem pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. Pada awalnya ETAP dirancang dan dikembangkan untuk menjaga kualitas keamanan nuklir di Amerika Serikat yang kemudian dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara real time, kontrol, optimasi sistem tenaga listrik, dan simulasi (Awaluddin, 2007). ETAP digunakan untuk membangun proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk one line diagram dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain aliran daya, hubung singkat, koordinasi relay proteksi, starting motor, sistem harmonisa, dan *transient stability*. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing komponen rangkaian yang dapat diganti secara langsung dari one line diagram maupun jalur sistem pentanahan. Untuk memudahkan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.



Gambar 2.28 Elemen AC toolbar ETAP 12.6.0
(sumber : E:\tugas akhir)

Secara umum tampilan perangkat lunak Etap 12.6.0. seperti gambar 2.29:



Gambar 2.29 Tampilan ETAP 12.6.0.
(sumber : E:\tugas akhir)

2.2.10.1 Langkah penggunaan ETAP 12.6.0

Menggunakan ETAP 12.6.0 dari awal hingga keluaran akhir penggunaan program:

1. Membuat one-line diagram sistem yang akan dibahas, dalam tulisan ini adalah sistem distribusi beban pada Rumah Sakit Panti Rapih Yogyakarta
2. Masukan data studi beban yang ditinjau
3. Jalankan program Etap 12.6.0. dengan memilih icon optimal load flow analysis pada toolbar. Program tidak jalan (error) apabila terdapat kesalahan, data yang kurang dapat dimasukan kembali.
4. Keluaran studi aliran daya dapat diketahui setelah program dapat dijalankan.
5. Setelah mendapat hasil dari aliran daya optimal. Selanjutnya menjalankan program dengan penempatan kapasitor bank.
6. Hasil keluaran didapat dan membandingkan dengan hasil sebelum penempatan kapasitor.

ETAP dimungkinkan dapat digunakan untuk bekerja secara nyata dengan display gambar diagram satu garis. ETAP dibuat sesuai dengan tiga hal utama, antara lain :

1. *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 dimasukkan sesuai dengan data-data yang ada di lapangan untuk berbagai jenis analisa atau desain.

2. *Total Integration Data*

ETAP menggabungkan informasi sistem elektrikal, 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 dimensinya, tapi juga memberikan informasi melalui raceways yang di lewati oleh kabel tersebut. Dengan demikian, data untuk satu kabel dapat digunakan untuk 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. *Virtual Reality Operation*

Sistem operasi yang terdapat pada program yang sama dengan sistem operasi pada kondisi yang nyata. Misal, pada saat membuka atau menutup sebuah sirkuit breaker, menempatkan suatu elemen pada sistem, mengubah status operasi suatu motor, dan untuk kondisi reenergized pada suatu elemen dan subelemen sistem ditunjukkan pada gambar diagram satu garis dengan warna abu-abu.