

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Audit kualitas Energi listrik

2.1.1. Pengertian

Audit yang bersumber dari wikipedia dalam arti luas yang bermakna evaluasi terhadap suatu organisasi, sistem, proses, atau produksi sedangkan yang bersumber dari kualitas daya listrik seperti yang tercantum dalam buku *Electrical Power System Quality* karya Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, dan H. Wayne Beaty pada halaman 2 di definisikan sebagai suatu problem daya yang di timbulkan berupa deviasi tegangan, arus, ataupun frekuensi yang mengakibatkan kegagalan atau tidak beroperasinya peralatan pelanggan. Dari kedua pengertian tersebut bisa di definisikan makna kualitas daya listrik adalah serangkaian proses teknik yang di pakai untk menganalisi dan mengevaluasi besarnya konsumsi energi pada bangunan gedung untuk mengetahui penyimpangan seperti tegangan, arus, ataupun frekuensi yang menyebabkan kegagalan atau tidak beroperasinya peralatan. Sehingga bisa mengenali cara-cara untuk di lakukan penghematan.

Perhatian terhadap kualitas daya listrik pada zaman sekarang lebih meningkat seiring dengan penggunaan energi listrik yang semakin menunjukkan kenaikan, Terdapat beberapa alasan kenapa kualitas daya listrik harus lebih di perhatikan, seperti berikut :

1. Sistem tenaga listrik saling berhubungan dalam satu jaringan interkoneksi, dimana satu sistem memberikan konsekuensi pada sistem lain sehingga akan mengakibatkan kegagalan pada sistem lainnya.
2. Meningkatnya perhatian yang di tekankan pada efisiensi sistem daya listrik secara menyeluruh, sehingga menimbulkan peningkatan penggunaan peralatan yang mempunyai efisiensi yang tinggi.
3. Meningkatnya kesadaran pengguna listrik akan kualitas daya listrik yang di peroleh, sehingga lebih pandai dan bijaksana untuk meningkatkan kualitas daya listriknya.

Melakukan audit energi mempunyai aturan yang harus di kerjakan, Audit energi di bedakan menjadi 3 kategori seperti berikut :

1. Pengamatan Singkat (*Walk-Through Audit*)

Pengamatan secara umum dengan mengumpulkan data, pengamatan singkat secara visual dan wawancara, yang bertujuan untuk mendapatkan gambaran umum pengelolaan energi saja.

2. Audit Awal (*Preliminary Audit*)

Audit ini untuk mengetahui besarnya potensi penghematan energi sehingga lebih lengkap data nya dan informasinya karena sudah dilakukan pengukuran.

3. Audit Rinci (*Detailed Audit*)

Audit ini lebih mendalam dengan rincian lebih luas dan detail karena mengetahui tentang jenis sumber energi, rugi-rugi, faktor yang

mempengaruhi efisiensi energi, karakteristik peralatan, dan potensi penghematan berdasarkan data dan analisis.

Untuk menentukan jenis Audit energi seperti apa yang di harus di lakukan maka harus di lihat dari target penghematan energi, lingkup area yang akan di lakukan audit energi, analisis data yang di perlukan, dan sumber daya atau peralatan yang tersedia.

Tujuan dari audit itu sendiri untuk mencari peluang-peluang penghematan energi yang kemudian di analisis bagian mana yang akan di lakukan penghematan atau pengurangan energi. Beberapa istilah yang di gunakan dalam pelaksanaan audit energi pada bangunan sebagai berikut :

1. Konsumsi energi bangunan

Konsumsi energi bangunan adalah besarnya energi yang terpasang pada sebuah bangunan dalam pada jangka waktu tertentu, berupa perkalian daya yang terpakai dengan periode waktu pemakaian, untuk lebih jelas secara *teoritis* seperti berikut :

$$k_e = D_t \times W_p \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

k_e = Konsumsi daya energi bangunan gedung (kWh)

D_t = Daya terpakai pada bangunan gedung (kW)

W_t = Waktu pemakaian (jam)

2. Intensitas Konsumsi Energi (IKE) Bangunan

Intensitas Konsumsi Energi Bangunan adalah pengukuran target nilai yang sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI) dan pada standar

Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)192.1992.

merupakan pembagian antara konsumsi energi bangunan pada gedung dengan luas total bangunan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\text{IKE} = \frac{K_e}{L_b} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan

IKE = Intensitas Konsumsi Energi bangunan (kWh/m²)

K_e = Konsumsi energi bangunan

L_b = Luas total bangunan (m²)

3. Biaya energi listrik bangunan

Biaya energi listrik bangunan merupakan tarif biaya yang harus di keluarkan dari besarnya konsumsi energi listrik pada bangunan tersebut dalam jangka waktu tertentu, yang di nyatakan sebagai berikut :

$$B_e = \frac{B}{K_e} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan

B_e = Biaya konsumsi energi listrik bangunan (Rp / k Wh)

B = Biaya yang di keluarkan pada suatu bangunan (Rp)

K_e = Konsumsi energi bangunan (kWh)

Intensitas Konsumsi Energi (IKE) listrik adalah Pembagian antara konsumsi energi listrik pada kurun waktu tertentu dengan luasnya bangunan gedung. Salah satu Yang di gunakan untuk menentukan termasuk kategori apa gedung tersebut boros, normal, atau hemat.

Menurut pedoman pelaksanaan konservasi energi dan pengawasan lingkungan tentang niali IKE dari suatu bangunan di golongankan dalam dua kriteria yaitu untuk bangunan ber-AC dan bangunan tidak ber-AC. Seperti pada tabel di bawah :

Tabel 2.1 Kriteria IKE Bangunan gedung tidak ber-ac

No	Kriteria	Keterangan
1	Efisien (10 –20) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Pengelolaan gedung dan peralatan energi dilakukan dengan prinsip konfersi energi listrik.</p> <p>b) Pemeliharaan peralatan energi dilakukan sesuai dengan prosedur.</p> <p>c) Efisiensi penggunaan energi masih mungkin ditingkatkan melalui penerapan sistem manajemen energi.</p>

Tabel 2.1 Kriteria IKE Bangunan gedung tidak ber-ac Lanjutan

No	Kriteria	Keterangan
2	Cukup Efisien (20 – 30) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Penggunaan energi cukup efisien namun masih memiliki peluang konservasi energi.</p> <p>b) Perbaikan efisiensi melalui pemeliharaan bangunan dan peralatan energi.</p>
3	Boros (30 – 40) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Audit energi perlu dilakukan untuk menentukan langkah-langkah perbaikan sehingga pemborosan energi dapat dihindari.</p> <p>b) Desain bangunan maupun pemeliharaan dan pengoperasian gedung belum mempertimbangkan konservasi energi.</p>
4	Sangat Boros (40 – 50) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Instalasi peralatan, desain pengoperasian dan pemeliharaan tidak mengacu pada penghematan energi</p> <p>b) Agar dilakukan peninjauan ulang atas semua instansi / peralatan energi serta penerapan manajemen energi dalam pengelolaan bangunan</p>

Tabel 2.2 Kriteria IKE bangunan ber AC

No	Kriteria	Keterangan
1	Sangat Efisien (50 – 95) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Desain gedung sesuai standar tatacara perencanaan teknis konservasi energy.</p> <p>b) Pengoperasian peralatan energi dilakukan dengan prinsip- prinsip manajemen energy.</p>
2	Efisien (95 -145) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Pemeliharaan gedung dan peralatan energi dilakukan sesuai prosedur.</p> <p>b) Efisiensi penggunaan energy masih mungkin ditingkatkan melalui penerapan sistem menejemen energi terpadu.</p>
3	Cukup Efisien (95 – 145) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Penggunaan energy cukup efisien melalui pemeliharaan bangunan.</p> <p>b) Pengoperasian dan pemeliharaan gedung belum mempertimbangkan prinsip konservasi energy.</p>

Tabel 2.2 Kriteria IKE bangunan ber AC Lanjutan

No	Kriteria	Keterangan
4	Agak Boros (145 – 175) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Audit energy perlu dipertimbangkan untuk menentukan perbaikan efisiensi yang mungkin dilakukan.</p> <p>b) Desain bangunan maupun pemeliharaan belum mengikuti konservasi energi.</p>
5	Boros (175 – 285) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Audit energi perlu dipertimbangkan untuk menentukan langkah-langkah perbaikan sehingga pemborosan energi dapat dihindari.</p> <p>b) Instansi peralatan, desain pengoperasian, dan pemeliharaan tidak mengacu pada konservasi energi.</p>
6	Sangat Boros (285 – 450) kWh/m ² /Tahun	<p>a) Agar ditinjau ulang atas semua instalasi /peralatan energi serta penerapan manajemen energi dalam pengelolaan bangunan.</p>

Apabila sebuah bangunan gedung memiliki kriteria sangat boros maka bangunan tersebut memiliki banyak yang harus di perbaiki dan untuk di lakukan audit energi secara keseluruhan untuk mengurangi pemborosan yang berlebih sehingga menambah pemasukan terhadap pemilik bangunan tersebut dan termasuk bangunan gedung dengan taraf konservasi energi.

2.1.2. Faktor Eksternal dan Internal

Pasokan daya listrik yang didapatkan dari perusahaan berasal dari PLN maka sangat berpengaruh terhadap kualitas daya listrik yang di peroleh, ada beberapa faktor yang sangat berpengaruh terhadap kualitas daya listrik dari PLN ke perusahaan, bagian transmisi dan distribusi dari pln semakin jauh dari perusahaan maka jaringan distribusi dari PLN ke perusahaan sangat berpengaruh terhadap kualitas energi listrik yang di dapatkan. Pembangkit listrik, transmisi dan distribusi (PLN) di tuntutan untuk menjaga kualitas energi listrik sehingga dapat memenuhi syarat dasar kebutuhan layanan kepada konsumen sebagai berikut :

1. Mempunyai deviasi tegangan dan frekuensi yang minimum.
2. Terbebas dari surja tegangan.
3. Dapat memenuhi beban puncak.
4. Dsitorsi gelombang tegangan dan *harmonic* yang minimum.
5. Terjaminya urutan *phase* dengan benar.
6. Memberikan suplay daya dan waktu layanan dengan kehandalan yang tinggi sehingga dapat melayani beban secara *kontinyu*.

Yang berpengaruh terhadap kualitas energi listrik bukan hanya pada pasokan energi listrik saja tetapi berasal dari faktor internal perusahaan tersebut, Seperti berikut :

1. Tidak seimbang besarnya beban terpasang dengan kapasitas beban pemakaian.
2. Kurangnya informasi dan pemahaman dari perusahaan tentang kualitas daya listrik.
3. Beban – beban yang berpengaruh terhadap tingkat harmonik seperti peralatan beban non linier.

2.1.3 Waktu Pemakaian Daya Listrik

Pemakaian daya listrik di konsumen di bagi menjadi 2 jenis waktu pemakaian atau pembebanan seperti berikut :

- a. Waktu Beban Puncak (WBP) adalah tingkat pemakaian daya listrik pada waktu tertentu di konsumen mencapai puncak kapasitas beban. Beban puncak ini berlaku mulai jam 18.00 WIB sampai dengan 22.00 WIB.
- b. Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) adalah waktu tertentu pemakaian daya listrik pada konsumen saat masih di bawah puncak kapasitas beban. Luar waktu beban puncak berlaku pada jam 22.00 WIB sampai dengan 18.00 WIB.

Adanya pembebanan yang berbeda ini maka menimbulkan tarif pemakaian beban yang berbeda pula, untuk mengukur besarnya pemakaian daya listrik ini di gunakanlah kWh meter tarif ganda.

2.2 Kualitas Daya

2.2.1 Arus

Arus listrik adalah aliran muatan listrik, aliran ini melalui penghantar listrik yang disebut dengan konduktor, arus listrik merupakan perpindahan muatan listrik dari satu titik ke titik lain melalui penghantar, arus listrik tercipta dari beda potensial titik satu dan lainnya karena semakin besar beda potensial antara dua titik maka semakin besar pula arus yang mengalir, arus listrik terjadi saat muatan pada tegangan listrik di alirkan melalui beban, karena didalam muatan listrik terdapat berupa aliran elektron sebagai contoh baterai, elektron akan mengalir melalui penghantar dari kutub negatif menuju kutub positif, aliran itulah yang di sebut arus listrik.

2.2.2 Tegangan

Tegangan adalah beda potensial listrik antara dua titik dan dinyatakan dalam satuan (Volt). Tegangan di katakan ideal iyalah yang memiliki gelombang frekuensi sinur murni yang tidak mengalami distorsi, dalam kondisi normal tegangan memiliki toleransi yang di ijinakan oleh PLN sebesar -10 % s/d +5 % apabila dalam kondisi yang darurat menurut standar IEEE pada bukunya memiliki toleransi sebesar -13 % s/d +6 %.

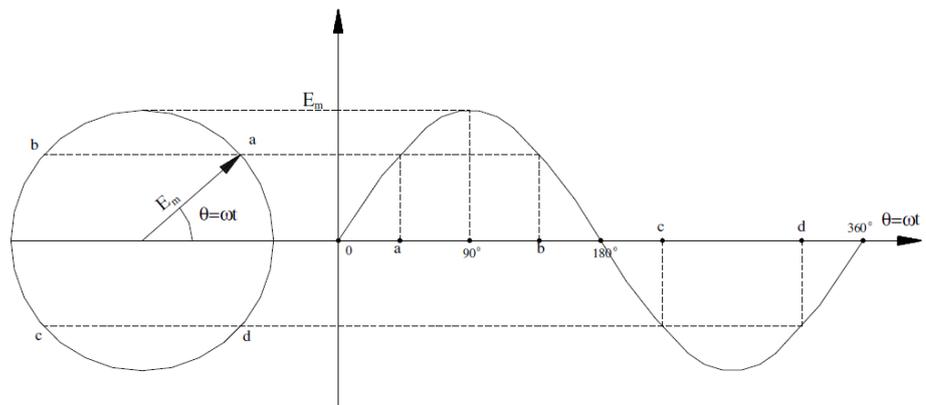
2.2.3 Frekuensi

Frekuensi merupakan ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam selang waktu yang di tentukan, satuan frekuensi adalah herts (Hz). Tegangan dan arus listrik bolak-balik yang berbentuk sinus, sehingga gelombang sinus mempunyai frekuensi, frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi

satu kali perdetik, dimana frekuensi (F) kebalikan dari periode (T) seperti rumus di bawah ini :

$$F = \frac{1}{T} \dots\dots\dots(2.4)$$

Frekuensi tegangan listrik yang berlaku di indonesia adalah 50 Hz, karena setiap negara mempunya frekuensi tegangan listrik yang berbeda-beda. Di indonesia aturan frekuensi tegangan listrik tercantum pada Permen ESDM No.37 Tahun 2008 yang menyebutkan bahwa frekuensi nominal sebesar 50 Hz, di usahakn untuk tidak lebih rendah dari 49.5 Hz atau lebih tinggi dari 50.5 Hz dan dalam keadaan darurat frekuensi di izinkan turun hingga 47.5 Hz atau naik hingga 52 Hz. Tapi harus di ingat jika dalam keadaan darurat (emergency).



Gambar 2.1 Gelombang sinusoidal

2.3 Faktor Daya

2.3.1 Pengertian Faktor daya

Terdapat 3 (tiga) macam daya yang terdapat pada faktor daya seperti berikut ini :

a. Daya Aktif (P)

Daya aktif atau daya nyata merupakan daya yang timbul akibat dari mengalirnya arus listrik melalui hambatan / resistor, daya listrik yang di gunakan untuk melakukan kerja pada beban, daya ini digunakan untuk melakukan kerja atau dengan kata lain di gunakan sesuai dengan kebutuhan tenaga listrik, satuan daya aktif ini di nyatakan dengan watt atau kilo watt. Secara teoritis di tuliskan sebagai berikut :

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \mu \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

P = Daya aktif (kilo watt / kW)

V = Tegangan (volt / V)

I = Arus (Ampere / A)

$\cos \mu$ = Faktor daya

b. Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif di bedakan menjadi :

1. Daya reaktif Induktif adalah daya yang timbul akibat dari mengalirnya arus listrik melalui kumpara – kumparan kawat listrik seperti pada motor listrik, trafo, ballast, dan lain-lain.

2. Daya reaktif kapasitif adalah daya yang timbul akibat dari mengalirnya arus listrik pada sebuah kapasitor.

Satuan dari daya reaktif adalah volt ampere reaktif (VAr) atau Kilo Volt Reaktif (kVAr). Secara teoritis daya reaktif di tuliskan dengan persamaan :

$$Q = P \times \tan \varphi \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

Q = Daya reaktif (Var)

P = Daya aktif (Kw)

$\tan \varphi$ = tangent sudut beda fasa antara arus dengan tegangan

- c. Daya Komplek / Semu (S)

Daya komplek merupalan hasil dari perkalian antara arus dan tegangan listrik pada suatu beban, misalnya pada generator dan transformator. Satuan daya komplek dinyatakan dalam volt ampere (Va) atau kilo volt ampere (kVa) secara matematis dinyatakan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots(2.7)$$

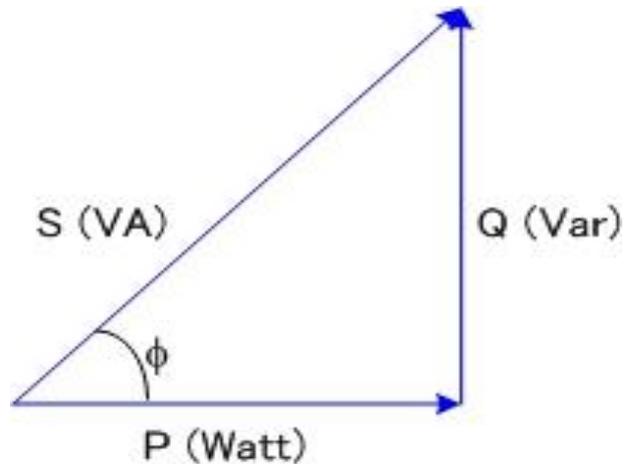
Keterangan :

S = Daya komplek (Va)

V = Tegangan antar phase (volt)

I = Arus listrik (Ampere / A)

Ketiga macam daya yang di bahas di atas, mempunyai hubungan secara matematis yang di namakan segitiga daya



Gambar 2.2 Hubungan segitiga daya

Faktor daya ($\cos \mu$) merupakan perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu / daya total (VA), nilainya berkisar 0 hingga 1.

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya} &= P / S \\ &= \text{KW} / \text{KVA} \dots\dots\dots(2.8) \end{aligned}$$

Pihak PLN mempunyai ketentuan bahwa batas minimal faktor daya ($\cos \varphi$) pada bangunan industri sebesar 0,85 tidak dikenai biaya tambahan, apabila ada perusahaan industri memiliki faktor daya lebih kecil dari 0,85 maka akan dikenakan denda kVAr atau biaya tambahan. Semakin rendah faktor daya maka semakin besar biaya yang dibebankan pada pelanggan industrial di hitung dari besarnya pemakaian daya reaktif dalam waktu tertentu (kVAr). Terkecuali bagi konsumen rumah tangga tidak dikenakan denda, Beban listrik yang banyak digunakan pada bangunan gedung umumnya beban yang bersifat induktif seperti motor-motor listrik, lampu TL, dan lain-lain

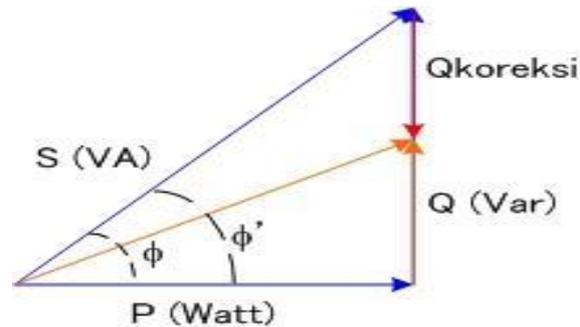
2.3.2 Memperbaiki faktor daya

Pada umumnya suatu pabrik mempunyai faktor daya yang rendah di sebabkan karena banyak menggunakan mesin-mesin listrik, mesin las, lampu TL, trafo, *motor driver*, dan lain-lain. Untuk menentukan nilai faktor daya pada pabrik biasanya digunaka cos phi meter.

Untuk meperbaiki besarnya faktor daya listrik ini dapat di lakukan dengan memasang kapasitor daya secara paralel, kapasitor adalah komponen listrik yang dapat menyimpan dan melepaskan muatan listrik yang menghasilkan daya reaktif yang di butuhkan oleh beban induktif pada jaringan tersebut, sehingga mengurangi daya yang di serap oleh beban induktif dari sumber tegangan.

Beberapa alasan kenapa besarnya faktor daya harus di perbaiki untuk mengurangi biaya pengoperasian peralatan listrik, mengurangi besarnya tegangan jatuh yang biasa di sebabkan pada sistem transmisi daya, meningkatkan kapasitas sistem dan rugi-rugi daya pada pengoperasian.

Untuk memperbaiki faktor daya dengan kapasitor dan bagaimana menentukan kapasitor yang sesua sehingga bisa maksimal untuk faktor daya tersebut. Untuk menghitung berapa besarnya kapasitor yang di perlukan untuk menaikan faktor daya yang sesuai dengan keinginan dengan mengacu kepada persamaan :



Gambar 2.3 Perbaikan Faktor Daya

Dari gambar (2.3) bisa dilihat bahwa sudut Φ (garis orange) menurun setelah dipasang kapasitor sehingga faktor daya jaringan akan naik.

2.4 Harmonik

Semakin majunya teknologi di dunia industri semakin berkembangnya peralatan yang bersifat statis untuk memudahkan dalam pengoperasian membuat kecenderungan menggunakan beban yang bersifat non linier, beban non linier seperti mesin las, mesin-mesin sinkron, AC driver, UPS (*uninterruptible power supply*), Lampu TL, dan lain-lain. Peralatan yang bersifat beban non linier mengakibatkan harmonik, bentuk gelombang maupun arus yang semula sinus menjadi terdistorsi sehingga tidak sinus lagi, tidak seperti peralatan yang bersifat beban linier yang memiliki bentuk gelombang tegangan maupun arusnya masih murni yang sinus tidak mengalami distorsi. Harmonik ini mempengaruhi terhadap kualitas daya listrik dan bisa membuat peralatan bermasalah.

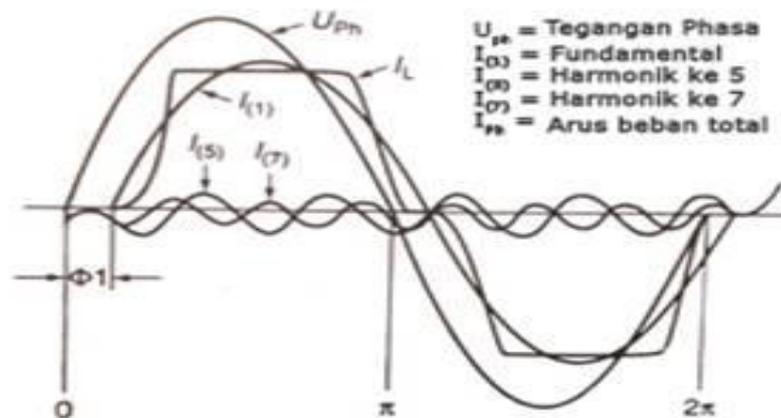
2.4.1 Pengertian Harmonik

Harmonik adalah gelombang sinusoidal tegangan atau arus yang memiliki frekuensi kelipatan dari frekuensi aslinya, bila harmonik menyatu dengan gelombang frekuensi fundamentalnya, mengakibatkan bentuk gelombang yang

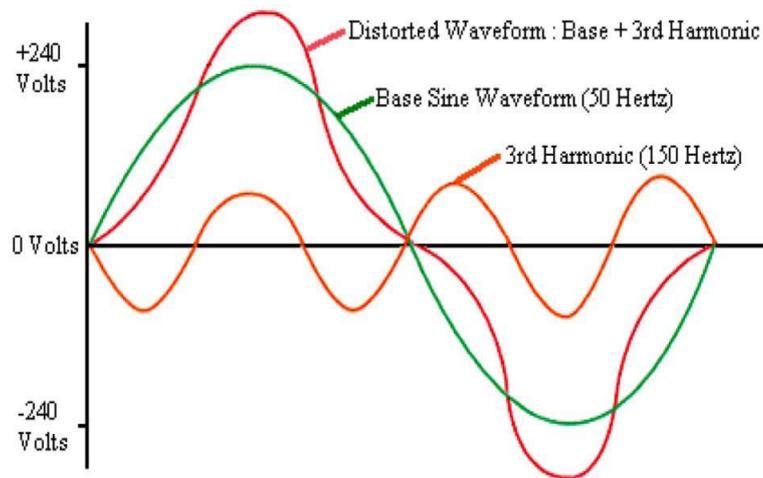
tidak sinus lagi. Seperti frekuensi dasarnya 50 Hz maka harmonik kedua adalah gelombang dengan frekuensi 100 Hz, harmonik ketiga 150 Hz dan seterusnya, sehingga gelombang tersebut menumpang ke frekuensi gelombang fundamentalnya sehingga mengakibatkan distorsi. Gelombang frekuensi murni dan terdistorsi seperti berikut :



Gambar 2.4 Gelombang frekuensi murni dan terdistorsi



Gambar 2.5 Gelombang frekuensi terdistorsi ke 5 dan 7



Gambar 2.6 Gelombang terdistorsi 50 Hz ke 150 Hz

Pada gambar (2.4) menunjukkan gelombang frekuensi murni, gelombang frekuensi ideal, dan gelombang frekuensi yang mengalami distorsi sehingga menjadi harmonik, perbedaan sangat mencolok pada gambar (2.5) kedua gelombang fundamental dan gelombang harmonik ke 5 dan gelombang harmonik ke 7. Pada gambar (2.6) di perlihatkan gelombang frekuensi ke tiga dan kelima pada frekuensi 50 Hz, ketika gelombang dasarnya mencapai satu periode pada saat yang sama gelombang harmonik kelima terbentuk 5 periode dengan frekuensi 150 Hz.

Ada dua kriteria yang di gunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonik yaitu dengan batasan untuk harmonik arus, dan batasan untuk harmonik tegangan, untuk harmonik arus di tentukan dengan rasio I_{sc} / I_L . I_{sc} adalah arus hubung singkat yang terdapat pada PCC (point of common coupling) sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Untuk standar harmonik tegangan di tentukan oleh sistem tegangan yang terpakai.

2.4.2 Istilah Istilah Harmonik

Banyak yang harus di ketahui tentang harmonik atau harmonisa, ada beberapa istilah yang harus di pelajari seperti *Total Harmonik distortion* (THD), *total demand distortion* (TDD), dan nilai RMS. Yang akan di jelaskan seperti berikut ini :

1. Nilai RMS

Nilai rms di hasilkan oleh gelombang arus/tegangan yang terdistorsi harmonik dapat di cari dengan :

$$\begin{aligned} \text{RMS} &= \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} \\ &= M_1 \sqrt{1 + \text{THD}} \dots\dots\dots (2.9) \end{aligned}$$

Keterangan :

M_h = Nilai rms dari arus atau tegangan ke-h

2. Total Harmonik Distorsion (THD)

THD merupakan nilai antara komponen harmonik dengan komponen fundamentalnya / dasarnya, maka semakin besar nilai THD maka semakin besar resiko kerusakan pada komponen yang di akibatkan oleh THD arus maupun tegangan, sedangkan nilai THD yang di rekomendasikan secara internasional maksimal sebesar 5 % dari tegangan atau arus dasarnya. Untuk mencari nilai THD seperti berikut :

$$\text{Jumlah THD} = \frac{\text{Jumlah RMS Semua frekuensi}}{\text{Nilai rms frekuensi dasar}}$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^k I_n^2}}{I_1}$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{I_{DC}^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_{31}^2}}{I_1} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan :

THD = Total Harmonik Distorsi

I_n = Nilai rms arus harmonik ke-n

I_1 = Nilai rms arus pada frekuensi dasar

3. Total Demand Distorsion (TDD)

Apabila Nilai THD memiliki kesalahan dalam perhitungan atau ada yang tidak sesuai dan mengalami kesulitan maka untuk membenarkan dengan mencari TDD pada arus beban puncak frekuensi dasar , pada standar IEEE 519-1992 tentang “ Recomended practices and requirements for harmonic control in electrical power system “. TDD dapat di cari dengan :

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan :

I_n = arus harmonik orde ke-n

I_L = arus beban puncak pada frekuensi dasar yang di ukur pada PCC

2.4.3 Macam-Macam Harmonik

Harmonik bedakan lagi dalam beberapa jenis, dari sumber gelombangnya harmonik ada dua harmonik arus dan harmonik tegangan sedangkan berdasarkan ordenya harmonik di bedakan menjadi harmonik urutan ganjil dan harmonik urutan genap, harmonik urutan ganjil merupakan kelipatan ganjil dari frekuensi fundamentalnya yaitu 3,5,7,9,11 dan seterusnya. Harmonik urutan genap merupakan kelipatan genap dari frekuensi fundamentalnya atau dasarnya yaitu 1,2,4,6,8, dan seterusnya, yang di akibatkan karena gelombang tidak simetris terhadap sumbu karena ada komponen dc pada bebanya. Interharmonik merupakan harmonik yang frekuensinya tidak merupakan kelipatan integral dari frekuensi dasarnya. Subharmonik merupakan harga frekuensi yang lebih kecil dari frekuensi fundamentalnya.

Harmonik yang berdasarkan urutan fasanya di bedakan menjadi 3 macam yaitu harmonik urutan positif, harmonik urutan negatif, dan harmonik urutan nol. Seperti berikut penjelasanya :

1. Harmonik urutan positif (positif sequence)

Harmonik yang mempunya urutan fasa yang sama dengan harmonik fundamentalnya atau dasarnya 50 Hz, harmonik ini berdampak pada penambahan panas di konduktor , CB, dan panel-panel.

2. Harmonik urutan negatif (negatif sequence)

Harmonik yang kebalikan dari harmonik urutan positif yaitu mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan harmonik dasarnya 50 Hz, harmonik ini urutan negatif mengakibatkan panas dan menyebabkan masalah pada motor induksi sehingga motor mengalami perlambatan.

3. Harmonik urutan nol (zero sequence)

Harmonik urutan nol tidak memproduksi perputaran medan di kedua arah, sehingga menghasilkan panas yang lebih dibandingkan dengan harmonik urutan positif dan urutan negatif, harmonik ini tidak dapat di hilangkan sehingga bahaya yang di timbulkan besar yaitu arus normal yang lebih besar, sehingga arus yang besar itu bisa menimbulkan kebakaran.

Tabel 2. 3 Polaritas orde Harmonik

Order harmonik	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frkuensi (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Urutan/polaritas	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Harmonik pertama urutan polaritasnya positif, harmonik kedua urutan polaritasnya negatif, dan harmonik ketiga urutan polaritasnya 0 (nol) , akibat dari setiap masing-masing urutan polaritas komponen harmonik mempunyai akibat yang berbeda - beda seperti tabel berikut ini :

Tabel 2.4 Akibat polaritas komponen harmonik

Urutan	Pengaruh pada motor	Pengaruh pada sistem distribusi
Positif	<ul style="list-style-type: none"> Menimbulkan medan magnet putar arah maju (forward) 	<ul style="list-style-type: none"> Panas
Negatif	<ul style="list-style-type: none"> Menimbulkan medan magnet putar arah mundur (reverse) 	<ul style="list-style-type: none"> Panas Arah putaran motor berubah
Nol	<ul style="list-style-type: none"> Tidak ada 	<ul style="list-style-type: none"> Panas Menimbulkan / menambah arus pada kawat netral

2.4.4 Sumber-Sumber Harmonik

Penyebab terjadinya harmonik adalah adanya beban non linier pada sistem bisa sistem kelistrikan ataupun peralatan. Banyaknya beban non linier seperti converter statis, AC/DC driver, harmonik bisa juga di beban non linier seperti berikut :

1. Pengecoran Logam
2. Trafo
3. Inti magnet pada trafo
4. Mesin las
5. UPS (uninterruptible power supply)
6. Mesin-mesin sinkron
7. Lampu Hemat Energi
8. Adjustable speed drives (ASD)
9. Generator

2.4.5 Standar Harmonik

Tabel 2.5 Standar distorsi harmonik tegangan berdasarkan standar IEEE

Distorsi Tegangan Harmonik Dalam % Nilai fundamental			
Sistim Tegangan	< 69 kV	69 – 138 kV	> 138 kV
Total Harmonik Distosion	5.0	2.5	1.5

Tabel 2.6 Standar distorsi harmonik arus berdasarkan standar IEEE

Distorsi Arus Harmonik Dalam % Nilai fundamental	
I_{sc} / I_L	THD
< 20	5.0
20 – 50	8.0
50 – 100	12.0
100 – 1000	15.0
> 1000	20.0
THD = total harmonik distorsi I_{sc} = Arus hubung singkat maks I_L = Arus beban maks	

Untuk mencari standar arus maka menggunakan tabel arus tersebut, dengan mencari terlebih dahulu besarnya arus short circuit I_{sc} dan mengukur arus beban I_L , untuk mengukur I_{sc} dengan menggunakan rumus seperti berikut ini :

$$I_{SC} = \frac{\text{DAYA TRAFO (Va)}}{\sqrt{3} \times V_{LL} \times Z \%} \dots\dots\dots (2.12)$$

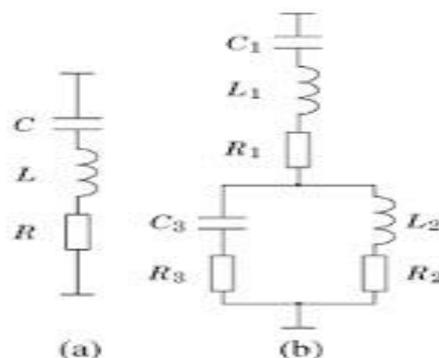
Keterangan :

V_{LL} = Tegangan antar fasa (Volt)

$Z\%$ = Impedansi Trafo

2.4.6 Filter Harmonik

Filter harmonik berfungsi untuk menurunkan dan mereduksi amplitudo frekuensi harmonik arus maupun harmonik tegangan. Filter harmonik di bedakan menjadi filter aktif dan filter pasif, filter pasif bisa disusun dari komponen induktor, kapasitor, dan resistor. Karena terdiri dari komponen pasif maka filter jenis ini di pengaruhi oleh impedansinya jala-jala oleh karna itu pemasanganya perlu mempertimbangkan impedansi jala-jala. Jenis filter pasif seperti berikut :



Gambar 2.7 (a) single tuned (b) double tuned

Rangkaian di atas menunjukkan bentuk rangkaian (a) single tuned filter dan (b) double tuned filter. Single tuned merupakan filter yang mempunyai frekuensi

kerja pada satu frekuensi sedangkan double tuned dua frekuensi kerja. Diharapkan filter ini dapat memperbaiki faktor daya pada jala-jala listrik tersebut.

2.4.7 Dampak Harmonik

Peran harmonik pada sistem kelistrikan cukup besar , terutama pada alat-alat yang membutuhkan arus listrik sebagai sumbernya, di dunia kelistrikan terdapat dua beban, yang pertama beban linier dan beban non linier, di katakan beban linier bila bentuk gelombang arus akan sama dengan bentuk gelombang tegangan. Di katakan beban non linier apa bila bentuk gelombang arus tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan karena mengalami distorsi berbentuk sinusoidal, beban non linier inilah sebagai sumber harmonik pada sistem kelistrikan.

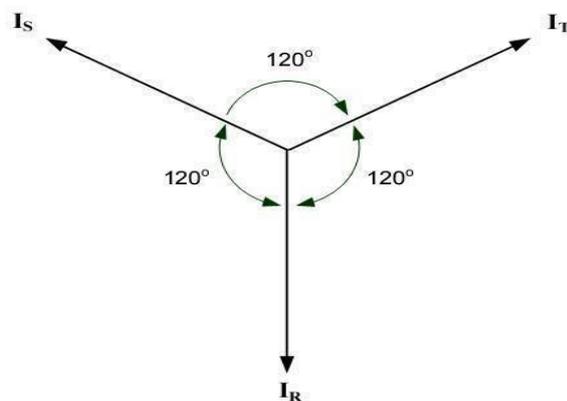
Jadi harmonik pada kelistrikan akan mengakibatkan seperti panas berlebih pada beberapa alat seperti generator dan trafo, peralatan menjadi rusak, temperatur pada trafo lebih meningkat dari pada biasanya, terjadi kesalahan pada penunjukan alat ukur, putusnya pengaman pada kapasitor bank. Untuk harmonik urutan positif yang berdampak pada motor bisa menyebabkan menimbulkan medan magnet putar arah maju, berdampak pada panasnya circuit breaker dan konduktor Untuk harmonik urutan negatif berdampak pada motor bisa menyebabkan panas dan arah motor berubah. Harmonik urutan nol walaupun tidak memproduksi putaran di kedua arah akan tetapi menghasilkan panas yang berlebih.

2.5 Ketidakseimbangan beban

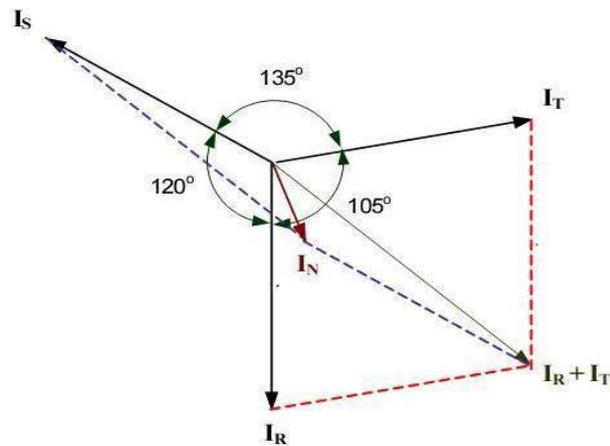
Yang di maksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan ketiga vektor arus / tegangan sama besar dan ketiga vektor saling membentuk sudut 120 satu sama lainnya. Sedangkan yang di maksud dengan ketidakseimbangan beban adalah keadaan dimana salah satu atau dua syarat keadaan seimbang di atas tidak terpenuhi, ketidakseimbangan beban munculnya arus di netral trafo, arus yang mengalir di netral trafo mengakibatkan terjadinya losses (rugi-rugi) karena losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Kemungkinan ketidakseimbangan beban ada 3(tiga) yaitu :

1. Ketiga vector sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120 satu sama lain.
2. Ketiga vector tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120 satu sama lain.
3. Ketiga vector tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120 satu sama lain

Berikut ini vektor arus atau tegangan dalam keadaan seimbang dan dalam keadaan tidakseimbang :



Gambar 2.8 vektro arus / tegangan dalam keadaan seimbang



Gambar 2.9 vektro arus / tegangan dalam keadaan tidakseimbang

Gambar (2.8) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I). Sedangkan pada Gambar (2.9) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

2.5.1 Dampak ketidakseimbangan beban

Ketidakseimbangan beban sangat berdampak pada sistem distribusi terutama pada trafo distribusi karena menimbulkan losses (rugi-rugi). Losses Akibat Adanya Arus Netral Rugi ini terjadi karena ada arus yang cukup besar mengalir penghantar netral sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T). Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan losses (rugi-rugi). Losses pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_N = I_n^2 \times R_n \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

P_N = Losses pada penghantar netral (W)

I_n = Arus yang mengalir pada penghantar netral (A)

R_n = Tahanan penghantar netral (Ω)

Losses (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Grounding terjadi karena Ketidakseimbangan beban juga mengakibatkan adanya arus yang mengalir pada penghantar grounding (pentanahan), Besarnya daya yang hilang akibat arus grounding ini adalah sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \times R_G \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

P_G = Losses akibat arus netral mengalir ketanah (watt)

I_G = Arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G = Tahanan penghantar netral (Ω)

2.5.2 Menentukan besaran ketidakseimbangan beban

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_R = a \times I_{Rata-rata} \quad \text{maka : } a = \frac{I_R}{I_{Rata-rata}}$$

$$I_S = b \times I_{Rata-rata} \quad \text{maka : } b = \frac{I_S}{I_{Rata-rata}}$$

$$I_T = c \times I_{Rata-rata} \quad \text{maka : } c = \frac{I_T}{I_{Rata-rata}}$$

$$\text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{[a-1]+[b-1]+[c-1]\}}{3} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.15)$$