

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan hidup yang yang paling penting bagi kehidupan. Tanpa adanya energi listrik, berbagai aktivitas manusia tidak dapat berjalan dengan baik dan lancar. Namun konsumsi energi listrik secara berlebihan akan membawa dampak negatif. Oleh karena itu, pemanfaatan energi listrik harus dilakukan secara hemat dan efisien. Untuk mengetahui profil penggunaan energi listrik di suatu bangunan gedung dapat dilakukan audit energi listrik pada bangunan gedung tersebut. Audit energi listrik terdiri dari beberapa tahap. Mulai dari pengumpulan data mengenai penggunaan energi listrik pada periode sebelumnya, pengukuran langsung penggunaan energi listrik, perhitungan intensitas kebutuhan energi listrik (IKE) serta analisa mengenai peluang penghematan energi. Hasil dari pengambilan data dan analisa tersebut kemudian dilaporkan dengan disertai rekomendasi upaya penghematan energi pada bangunan gedung yang bersangkutan. Sehingga pemakaian energi listrik pada bangunan gedung tersebut bisa lebih efektif dan efisien (Hadiputra, 2007).

Krisis energi yang melanda dunia mengharuskan pelaksanaan hemat energi di segala lini dan tempat, termasuk didalamnya energi listrik. Kampus Kasipah UNIMUS Semarang yang memiliki tingkat pemakaian ruangan yang cukup tinggi pada saat jam kerja dan daya listrik yang terpasang sering *trip* karena kelebihan beban. Untuk itu diperlukan audit energi untuk menentukan (klarifikasi)

nilai indeks konsumsi energi (IKE) dan membandingkannya dengan standar IKE Asia. Hasil penelitian berupa nilai IKE gedung kampus Kasipah UNIMUS Semarang adalah 117,4 kWh/m². Nilai ini masih dibawah standar IKE gedung perkantoran (240 kWh/m²). Dari hasil ini dapat direkomendasikan dua hal yaitu : pemakaian daya di gedung kampus Kasipah UNIMUS Semarang masih dapat ditingkatkan guna mencapai standar minimal peralatan ruangan dan menaikkan kapasitas daya terpasang menjadi 33 kVA agar tidak sering terjadi *trip* (Achmad Solichan, 2009).

Masalah kelistrikan timbul akibat kebutuhan energi listrik yang meningkat lebih pesat dibandingkan kemampuan PT. PLN (Persero) untuk memenuhi pasokan listrik yang dibutuhkan. Akibatnya, terjadi gangguan, pemadaman bergilir dimana-mana dan masih terdapat beberapa daerah di Indonesia yang belum mendapatkan kesempatan untuk dialiri listrik. Penghematan energi listrik merupakan langkah nyata dalam upaya mengatasi masalah tersebut. Sebagai upaya nyata proses penghematan energi adalah manajemen energi dan salah satu diantaranya adalah audit energi (Yadi Mulyadi, dkk, 2013).

Tenaga listrik merupakan bentuk energi sekunder yang memegang peranan penting dalam pembangunan ekonomi, sosial dan budaya suatu bangsa, terutama di hitung perkapita menunjukkan tingkat kemajuan dari negara tersebut dalam bidang industri maupun bidang ekonomi. Seiring dengan berjalannya pertumbuhan pembangunan dan bertambahnya kebutuhan akan energi listrik, maka langkah nyata yang dapat dilakukan oleh PT. PLN (Persero) adalah dengan menaikkan harga tarif dasar listrik (TDL) dan ini akan berimbas pada sektor

pembisnis yang kebanyakan menggunakan energi listrik dari PT. PLN (Persero). Kenaikan tarif dasar listrik ini harus ditanggapi dengan serius oleh konsumen khususnya dari sektor pembisnis guna memaksimalkan penggunaan energi listrik dan menekan pemakaian energi listrik. Salah satu cara agar pengguna energi bisa dilakukan secara maksimal dan menekan pemakaian energi adalah dengan cara mengaudit pemakaian dan penggunaan energi guna mengidentifikasi potensi penghematan energi pada suatu sarana yang telah ada (Mohamad Jupri, Yuriadi Kusuma, 2010).

Penelitian untuk mengetahui besarnya Intensitas Konsumsi Energi listrik atau IKE ($\text{kWh/m}^2/\text{tahun}$) untuk beban komersial dilakukan oleh Turiel, Isaac, 1998. Komomey, dkk, 1990. Membandingkan efisiensi investasi pembangkitan sebagai program konservasi energi sektor komersial. Penelitian beban sektor industry dan beban lampu pada sektor rumah tangga (Mahmudsyah, dkk, 2000).

Intensitas Konsumsi Energi (IKE) merupakan istilah yang digunakan untuk menyatakan besarnya pemakaian energi dalam bangunan gedung dan telah diterapkan di berbagai negara (ASEAN, APEC), dinyatakan dalam satuan kWh/m^2 per tahun. Untuk Indonesia, menggunakan hasil penelitian yang dilakukan oleh ASEANUSAID pada tahun 1987 yang laporannya baru dikeluarkan pada tahun 1992 dengan rincian sebagai berikut :

- a. IKE untuk perkantoran (komersial) : 240 kWh/m^2 per tahun.
- b. IKE untuk pusat belanja : 330 kWh/m^2 per tahun.
- c. IKE untuk hotel / apartemen : 300 kWh/m^2 per tahun.
- d. IKE untuk rumah sakit : 380 kWh/m^2 per tahun.

Tidak menutup kemungkinan nilai IKE tersebut berubah sesuai dengan kesadaran masyarakat terhadap penggunaan energi, seperti mahalnya Singapura yang telah menetapkan IKE listrik untuk perkantoran sebesar 210 kWh/m² per tahun. Dalam menghitung besarnya IKE listrik pada bangunan gedung ada beberapa istilah yang digunakan, antara lain :

- a. IKE listrik per satuan luas kotor gedung.

Luas kotor = luas total gedung yang dikondisikan (ber AC) + luas total gedung yang tidak dikondisikan (tanpa AC).

- b. IKE listrik persatuan luas total gedung yang dikondisikan (*netto*).

IKE persatuan luas ruang dari gedung yang disewakan (*net product*) sebagai pedoman, telah ditetapkan nilai standar IKE untuk bangunan di Indonesia yang telah ditetapkan oleh Departemen Pendidikan Nasional Republik Indonesia tahun 2004 (Hadiputra, 2007).

Kegiatan pemakaian energi listrik akan lebih baik jika sudah diperkirakan sejak awal perencanaan. Konsumsi energi listrik sebuah bangunan harus sudah dipikirkan sejak akan mau dibangun. Konsumsi energi merupakan hasil pemikiran dari perencanaan pemilik, pemakai dan perencana (*designer*) (Wong, Hon Kwok, 2001).

2.2 Konsep Audit Energi

Audit energi adalah suatu kegiatan dengan maksud untuk mengetahui pola penggunaan energi atau mengidentifikasi dimana dan berapa besar energi yang digunakan, sehingga dapat menemukan dan menentukan berbagai potensi

penghematan energi yang layak dan dapat dilaksanakan secara wajar dengan tidak mengurangi tingkat kenyamanan dan kesehatan. Misal menemukan besar penghematan energi yang digunakan pada : sistem tata udara (mesin AC), mesin-mesin produksi, sistem penerangan, peralatan kantor dan lain-lain.

Audit Energi merupakan usaha atau kegiatan untuk mengidentifikasi jenis dan besarnya energi yang digunakan pada bagian-bagian operasi suatu industri, pabrik atau bangunan dan mencoba mengidentifikasi kemungkinan penghematan energi. Sasaran dari audit energi adalah untuk mencari bagaimana cara mengurangi konsumsi energi persatuan *output* dan mengurangi biaya operasi. Untuk mengukur besarnya efisiensi penghematan digunakan parameter *Benefit Cost Ratio* (BCR) yang didefinisikan sebagai berikut (Abdurachim, 2002) :

$$\text{BCR} = \frac{E.a.b}{c} \quad (2.1)$$

Keterangan :

E = biaya energi tahunan, satuan uang

a = potensi energi tahunan, satuan uang (% dari harga E)

b = realisasi biaya energi yang dapat di hemat (% dari harga a)

c = biaya realisasi (satuan uang)

2.3 Variabel Pelaksanaan Audit

Dalam analisa pemakaian energi listrik di industri, beberapa variabel menjadi perhatian karena dapat memberikan kontribusi penghematan energi antara lain :

1. Profil beban harian.
2. Kecenderungan pemakaian energi listrik tahunan.
3. Keseimbangan beban 3 fasa. Beban 3 fasa yang tidak seimbang akan menyebabkan rugi-rugi daya listrik yang cukup signifikan. Rugi-rugi daya listrik yang timbul pada beban yang tidak seimbang adalah :

$$\text{Rugi-rugi tidak seimbang} = I_R R + I_S R + I_T R \quad (2.2)$$

$$\text{Rugi-rugi seimbang} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (2.3)$$

Prosentase rugi-rugi yang timbul adalah,

$$= \frac{(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) - 3 \cdot I^2}{3 \cdot I^2} \times 100\% \quad (2.4)$$

2.4 Pengukuran Energi

Di dalam melaksanakan kegiatan penelitian audit energi listrik di PT. Sandang Industries Semarang, terdapat berbagai aspek dan tahapan pengukuran demi memperlancar kegiatan pelaksanaan dalam pengambilan data dilapangan untuk perhitungan analisa, antara lain :

2.4.1 Alat Ukur Dan Kalibrasi

Seluruh analisa energi bertumpu pada hasil pengukuran. Hasil pengukuran harus dapat di andalkan dan mempunyai kesalahan *error* yang masih bisa di terima. Untuk itu penting menjamin bahwa alat ukur yang digunakan telah di kalibrasi dalam batas waktu sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Kalibrasi ini dilakukan oleh pihak yang diberi wewenang hukum untuk itu. Alat ukur yang

digunakan dapat berupa alat ukur yang di pasang tetap (*permanent*) pada instalasi atau juga bisa dengan alat ukur yang di pasang tidak tetap (*portable*).

2.4.2 Pengukuran Tingkat Pencahayaan

Suatu kegiatan dimana dalam pelaksanaannya melakukan pengukuran tingkat kuat pencahayaan yang menggunakan alat ukur *Lux meter* pada area ruang kerja atau kantor, laboratorium, ruang produksi (*production*), gudang, kamar mandi atau toilet, tempat ibadah, halaman, teras atau balkon dan jalan raya. Tingkat pencahayaan di hitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

$$E_{rata-rata} = \frac{F_{total} \times K_p \times K_d}{A} \text{ (lux)} \quad (2.5)$$

Keterangan :

F_{total} = fluks luminasi total dari semua lampu yang menerangi bidang kerja (*lumen*)

A = luas bidang kerja (m^2)

K_p = koefisien penggunaan

K_d = koefisien depresi (penyusutan)

2.4.3 Pengukuran Konsumsi Energi Listrik Pencahayaan

Pengukuran besarnya daya listrik untuk pencahayaan menggunakan *watt meter* dan pengukuran konsumsi energi menggunakan *watt-jam meter* yang di pasang tetap pada panel listrik yang melayani pencahayaan.

2.5 Besaran Listrik Dasar

Terdapat tiga buah besaran listrik dasar yang digunakan di dalam teknik tenaga listrik, yaitu beda potensial atau sering di sebut sebagai tegangan listrik, arus listrik dan frekuensi. Ketiga besaran tersebut merupakan satu kesatuan pokok pembahasan di dalam masalah-masalah sistem tenaga listrik.

2.5.1 Beda Potensial

Ketika suatu muatan listrik positif mengalami perpindahan sepanjang lintasan dl di dalam medan listrik E maka energi potensial elektrostatisnya adalah :

$$W = -q \int E \cdot dl \quad (2.6)$$

Keterangan :

W = Perubahan energi potensial (J)

Q = muatan listrik (C)

E = medan listrik (N/C)

dl = panjang lintasan (m)

Atau

$$V = \frac{W}{q} \quad (2.7)$$

Keterangan :

V = beda potensial (V)

W = energi listrik (joule)

q = muatan listrik (Q)



Beda potensial V sebagai kerja (sumber dari luar) yang digunakan untuk memindahkan suatu muatan listrik positif dari suatu titik ke titik lain adalah perubahan energi potensial listrik yang sebanding dengan muatan listriknya :

$$V = \frac{W}{q} = - \int_{awal}^{akhir} E \cdot dl \quad (2.8)$$

Beda potensial dinyatakan dalam satuan *Joule per Coulomb* yang didefinisikan sebagai *Volt (V)*, sehingga beda potensial sering di sebut sebagai Voltase atau tegangan listrik. Beda potensial V_{AB} adalah beda potensial berasal dari luar, yang digunakan untuk memindahkan satu muatan listrik dari titik awal B sampai titik akhir A, sehingga :

$$V_{AB} = - \int_B^A E \cdot dl \quad (2.9)$$

$$V_{AB} = V_B - V_A \quad (2.10)$$

Setiap potensial di ukur terhadap suatu titik acuan nol. Di dalam pengukuran eksperimental fisis, titik acuan yang sering digunakan adalah bumi (*earth*), yaitu potensial permukaan bumi. Sehingga setiap titik mempunyai potensial terhadap titik nol. Potensial A adalah nilai yang di ukur dari titik A terhadap titik acuan nol dan potensial B adalah nilai yang di ukur dari titik B terhadap acuan nol.

2.5.2 Arus Listrik

Arus listrik didefinisikan sebagai laju aliran sejumlah muatan listrik yang melalui suatu luasan penampang melintang. Menurut konvensi, arah arus listrik dianggap searah dengan aliran muatan positif. Arus listrik di ukur dalam satuan **Ampere (A)** adalah satu **Coulomb per detik**. Maka arus listrik dirumuskan dengan,

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.11)$$

Keterangan :

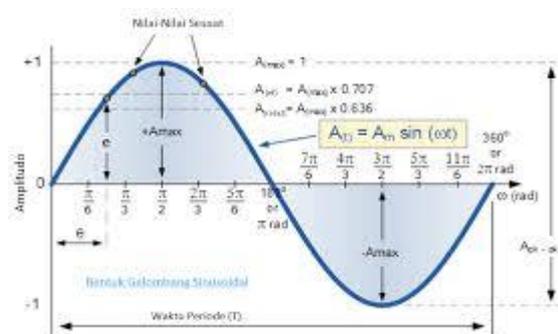
I = Arus listrik (A)

dq = Jumlah muatan (C)

dt = Waktu (detik)

2.5.3 Frekuensi

Tegangan dan arus listrik yang digunakan pada sistem kelistrikan merupakan listrik bolak-balik yang berbentuk sinusoidal.



Gambar. 2.1. Gelombang Sinusoidal.

Tegangan dan arus listrik sinusoidal merupakan gelombang yang berulang, sehingga gelombang sinusoidal mempunyai frekuensi. Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam selang waktu yang diberikan. Satuan frekuensi dinyatakan dalam **Hertz (Hz)** yaitu nama pakar fisika Jerman Heinrich Rudolf Hertz yang menemukan fenomena ini pertama kali. Frekuensi sebesar 1 *Hertz* menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali per detik, di mana frekuensi (f) sebagai hasil kebalikan dari periode (T), seperti dirumuskan di bawah ini :

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.12)$$

Keterangan :

f = Frekuensi (Hz)

T = Periode



Di setiap negara mempunyai tegangan listrik yang berbeda-beda. Frekuensi tegangan listrik yang berlaku di Indonesia adalah 50 Hz, sedangkan di negara Amerika berlaku frekuensi tegangan listrik sebesar 60 Hz.

2.6 Daya Listrik

Daya listrik adalah energi yang dibutuhkan peralatan listrik untuk dapat bekerja secara normal. Sedangkan kualitas daya listrik adalah : tingkat kualitas dan jaringan listrik dan tingkat efisiensi dan penggunaan energi. Alasan mengapa kualitas daya listrik (*power quality*) dan suatu sistem perlu mendapatkan perhatian khusus adalah karena *power quality* sama halnya dengan peduli terhadap penghematan uang (Muhammad Ali, 2011).

Daya listrik dibedakan menjadi 3 macam, antara lain :

2.6.1 Daya Aktif

Faktor daya aktif atau faktor daya 1 atau juga di sebut dengan daya nyata pada umumnya adalah daya yang digunakan oleh konsumen misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran pada motor listrik. Daya aktif atau daya nyata dihasilkan oleh beban-beban listrik yang bersifat resistif murni (Heinz Reiger, 1987). Satuan dari daya aktif dinyatakan dalam **watt (W)**. Daya aktif dapat dikonversikan dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$\text{Fasa dan Netral / 1 fasa } P = V \times I \times \text{Cos } \phi \quad (2.13)$$

$$\text{Fasa dan Fasa / 3 fasa } P = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \phi \quad (2.14)$$

Keterangan :

P = Daya aktif (*true power*)

V = Tegangan listrik (*volt*)

I = Arus listrik (*ampere*)

$\sqrt{3}$ = Aliran listrik 3 fasa

Cos ϕ = Faktor daya

2.6.2 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah daya listrik yang dihasilkan oleh beban-beban yang bersifat reaktansi. Terdapat dua jenis beban reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban-beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet, maka akan terbentuk suatu fluks magnetik. Contoh beban listrik yang bersifat

induktif (positif) antara lain : transformator (trafo), motor induksi satu fasa maupun tiga fasa yang biasa digunakan untuk menggerakkan kipas angin, motor induksi (AC), pompa air, lift, eskalator, kompresor, konveyor, lampu TL dan lain-lain. Beban-beban yang bersifat kapasitif (negatif) akan mengeluarkan daya reaktif untuk menghasilkan medan listrik. Contoh beban listrik yang bersifat kapasitif adalah : kapasitor (Heinz Reiger, 1987). Satuan daya reaktif dinyatakan dalam VAR (Volt Ampere Reaktan). Daya reaktif dapat dikonversikan menjadi persamaan seperti di bawah ini :

$$\text{line to netral / 1 fasa } Q = V \times I \times \sin \phi \quad (2.15)$$

$$\text{line to line / 3 fasa } Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi \quad (2.16)$$

Keterangan :

Q = Daya reaktif (*reactif power*)

V = Tegangan listrik (*volt*)

I = Arus listrik (*ampere*)

$\sqrt{3}$ = Aliran listrik 3 fasa

Atau :

$$Q = I^2 \cdot X \quad (2.17)$$

$$X = X_L - X_C \quad (2.18)$$

Keterangan :

Q = Daya reaktif (VAR)

X = Reaktansi total (Ohm)

X_L = Reaktansi induktif (Ohm)

X_C = Reaktansi kapasitif

2.6.3 Daya Komplek

Daya komplek adalah penjumlahan geometris (vektor) antara daya aktif dan daya reaktif. Daya komplek juga dapat disebut dengan daya semu. Daya komplek ini dinyatakan dalam satuan VA adalah hasil kali antara besarnya tegangan dan arus listrik yang mengalir pada beban (Sanjeev Sharma, 2007).

Daya komplek dapat dinyatakan dalam persamaan seperti di bawah ini :

$$\text{line to netral / 1 fasa } S = V \times I \quad (2.19)$$

$$\text{line to line / 3 fasa } S = \sqrt{3} \times V \times I \quad (2.20)$$

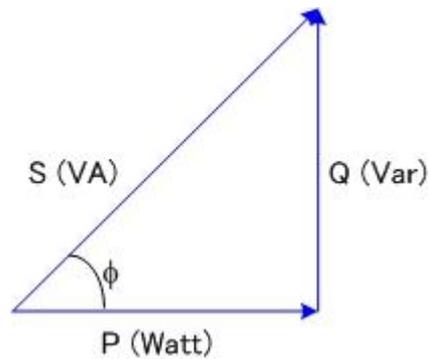
Keterangan :

S = Daya semu (*apparent power*)

P = Daya aktif (*true power*)

Q = Daya reaktif (*reactif power*)

Hubungan ketiga buah daya listrik yaitu **daya aktif (P)**, **daya reaktif (Q)** serta **daya komplek** atau **daya semu (S)**, dinyatakan dengan sebuah segi tiga yang di sebut segi tiga daya sebagai berikut (B. L. Theraja, 1984) :



Gambar. 2.2. Segi Tiga Daya.

Sesuai dengan penjelasan di atas, maka segi tiga daya dapat di tulis dengan persamaan sebagai berikut :

$$P = S \times \cos \phi \quad (\text{Watt}) \quad (2.21)$$

$$P = V \times I \times \cos \phi \quad (\text{Watt}) \quad (2.22)$$

$$Q = S \times \sin \phi \quad (\text{VAR}) \quad (2.23)$$

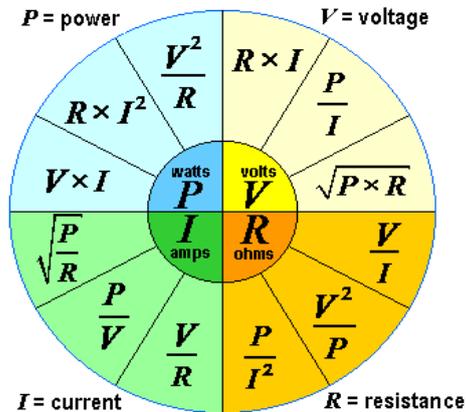
$$Q = V \times I \times \sin \phi \quad (\text{VAR}) \quad (2.24)$$

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (\text{VA}) \quad (2.25)$$

$$\cos \phi = pf = \frac{P}{S} \quad (2.26)$$



$\cos \phi$ adalah sudut antara daya aktif (P) dan daya kompleks atau semu (S), sehingga $\cos \phi$ didefinisikan sebagai faktor daya (*power factor, pf*). Untuk beban yang bersifat induktif, **pf lagging** di mana arusnya tertinggal dari tegangan nya. Dan untuk beban yang bersifat kapasitif, **pf leading** di mana arusnya mendahului tegangannya.



Gambar. 2.3. Hukum Ohm.

2.7 Kualitas Daya Listrik

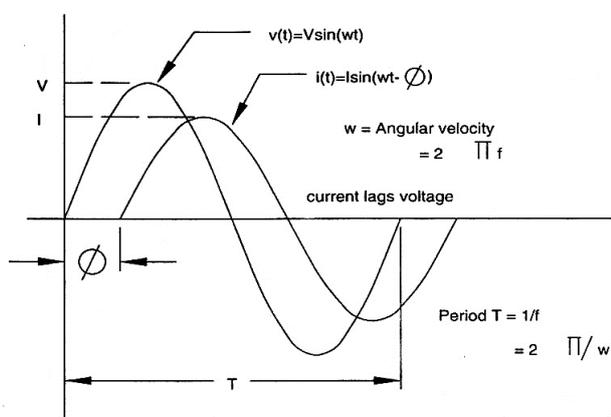
Kualitas daya listrik adalah masalah daya listrik yang berbentuk penyimpangan tegangan, arus dan frekuensi yang mengakibatkan kegagalan ataupun kesalahan operasi pada peralatan-peralatan yang terjadi pada konsumen energi listrik. Daya adalah suatu nilai dari energi listrik yang dikirimkan dan didistribusikan, di mana besarnya daya listrik tersebut sebanding dengan perkalian besarnya tegangan dan arus listriknya. Sistem suplai daya listrik dapat dikendalikan oleh kualitas dari tegangan dan tidak dapat dikendalikan oleh arus listrik karena arus listrik berada pada sisi beban yang bersifat sendiri (*individual*), sehingga pada dasarnya kualitas daya listrik adalah kualitas dari tegangan itu sendiri (Roger C. Dugan, 1996).

Beberapa komponen kualitas daya listrik antara lain :

2.7.1 Teori Harmonisa

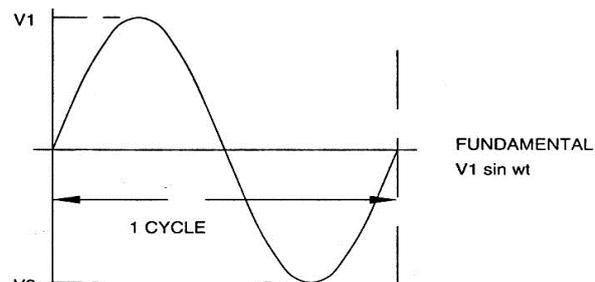
Dalam sistem tenaga listrik yang ideal, bentuk gelombang tegangan yang disalurkan ke peralatan konsumen dan bentuk gelombang arus yang dihasilkan adalah gelombang sinus murni. Harmonisa adalah gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini disebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya (C. Sankaran, 2002).

Harmonisa bisa muncul akibat adanya beban – beban non linier yang terhubung ke sistem distribusi. Beban non linier ini umumnya adalah peralatan elektronik yang di dalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, yang dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Beberapa contoh beban non linier antara lain : *variable speed drive*, komputer, printer, lampu *fluorescent* yang menggunakan *electronic ballast*.



Gambar. 2.4. Gelombang Sinus Arus dan Tegangan.

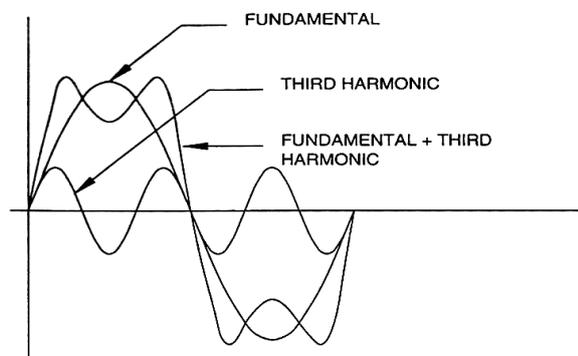
Gelombang non sinusoidal dapat terbentuk dengan menjumlahkan gelombang – gelombang sinusoidal, seperti terlihat pada gambar 2 (C. Sankaran, 2002).



Gambar. 2.5. Gelombang Fundamental.



Gambar. 2.6. Harmonisa Ketiga.



Gambar. 2.7. Gelombang Hasil Penjumlahan.

1. *Individual Harmonic Distortion* (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari harmonisa individual dan nilai RMS dari fundamental.
2. *Total Harmonic Distortion* (THD) adalah rasio antara nilai RMS dari komponen harmonisa dan nilai RMS dari fundamental. Hubungan antara THD dengan IHD dapat dilihat dari persamaan berikut (C. Sankaran, 2002) :

$$\mathbf{THD} = (\mathbf{IHD}_2^2 + \mathbf{IHD}_3^2 + \mathbf{IHD}_4^2 + \dots + \mathbf{IHD}_n^2)^{1/2} \quad (2.25)$$

Standar harmonisa berdasarkan standar IEEE 519. Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa. Yaitu batasan untuk harmonisa arus, dan batasan untuk harmonisa tegangan. Untuk standar harmonisa arus, ditentukan oleh rasio $\frac{I_{sc}}{I_L}$. I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan untuk standar harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai (James J. Burke, 1994).

Tabel 2.1 Standar harmonisa arus

$\frac{I_{sc}}{I_L}$	HARMONISA ORDER					Jumlah Distorsi Harmonisa
	<11	11 - 16	17 - 22	23 - 24	> 35	
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	5,0
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

Tabel 2.2 Standar harmonisa tegangan

Distorsi Maksimal (In%)	Sistem Tegangan		
	< 69 kV	69-138 kV	>138 kV
Harmonisa Individu	3,0	1,5	1,0
Harmonisa Total	5,0	2,5	1,5

2.7.2 Pembumian (*grounding*)

Pembumian atau biasa disebut dengan pentanahan adalah penghubungan suatu titik sirkit listrik atau suatu penghantar yang bukan bagian dari sirkit listrik, dengan bumi menurut cara tertentu. Istilah lain untuk pembumian adalah *grounding* dan *earthing*. Sistem pembumian merupakan proteksi atau perlindungan peralatan terhadap gangguan baik gangguan bumi maupun gangguan oleh kilat. Gangguan bumi adalah kegagalan isolasi antara penghantar dan bumi atau kerangka, serta gangguan yang disebabkan oleh penghantar yang terhubung ke bumi atau karena resistansi isolasi ke bumi menjadi lebih kecil daripada nilai tertentu.

Terdapat dua jenis pembumian pada sistem tenaga listrik, yaitu :

- a. Pembumian sistem.
- b. Pembumian peralatan.

Pembumian sistem adalah pembumian pada sistem tenaga listrik ke bumi dengan cara tertentu. Pembumian sistem ini dilakukan pada transformator pada gardu induk (GI) dan transformator pada gardu distribusi (GD) pada saluran distribusi. Umumnya pembumian sistem dilakukan pada titik netral sistem tenaga.

Adapun tujuan dari pembumian sistem adalah :

1. Pada sistem yang besar yang tidak dibumikan arus gangguan relatif besar ($> 5A$) sehingga busur listrik yang timbul tidak dapat padam sendiri yang akan menimbulkan busur tanah (*arching grounds*). Gejala busur tanah merupakan gejala pemutusan (*clearing*) dan pukul ulang (*restriking*) dari busur listrik secara berulang-ulang. Gejala ini sangat berbahaya karena dapat menimbulkan tegangan lebih transien yang tinggi yang dapat merusak peralatan. Pada sistem yang dibumikan gejala tersebut hampir tidak ada.

2. Untuk membatasi tegangan-tegangan pada fasa-fasa yang tidak terganggu (sehat). Pembumian peralatan berbeda dengan pembumian sistem. Pembumian peralatan adalah pembumian bagian konduktif terbuka (BKT) peralatan yang pada waktu normal tidak bertegangan.

Secara umum tujuan pembumian peralatan adalah :

1. Untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian yang tidak dilalui arus dan antara bagian-bagian ini dengan tanah sampai pada suatu harga yang aman (tidak membahayakan) untuk semua kondisi operasi normal atau tidak normal. Untuk mencapai tujuan ini, suatu sistem pembumian peralatan atau instalasi harus dilaksanakan. Sistem pembumian ini gunanya untuk memperoleh beda potensial yang merata (*uniform*) pada semua bagian peralatan. Selain itu juga untuk menjaga agar operator atau manusia yang berada di area tersebut berada pada beda potensial yang sama dan tidak berbahaya pada setiap waktu. Dengan dicapainya beda potensial yang merata pada semua titik dalam daerah sistem ini, kemungkinan timbulnya perbedaan beda potensial yang besar pada jarak yang

dapat dicapai oleh manusia sewaktu terjadi hubung singkat kawat ke tanah menjadi sangat kecil.

2. Untuk memperoleh impedansi yang rendah / kecil dari jalan balik arus hubung singkat ke tanah. Kecelakaan pada manusia terjadi pada saat hubung singkat ke tanah terjadi. Jadi bila arus hubung singkat ke tanah dipaksakan mengalir melalui impedansi tanah yang tinggi akan menimbulkan perbedaan potensial yang sangat besar dan berbahaya. Selain itu impedansi yang besar pada sambungan-sambungan pada instalasi pembumian dapat menimbulkan busur listrik dan pemanasan yang dapat menyebabkan material mudah terbakar (Hasrul, 2010).

Tahanan Jenis Tanah Dalam membuat suatu perencanaan pembumian gardu induk, perlu dilakukan peninjauan lapangan untuk mengetahui komposisi tanah pada tempat gardu induk tersebut akan dibangun, karena hal ini sangat berhubungan dengan harga tahanan pembumian peralatan tersebut. Beberapa faktor yang mempengaruhi harga tahanan pembumian, antara lain: sifat geologi tanah, komposisi zat kimia dalam tanah, kandungan air tanah, temperatur tanah, selain itu faktor perubahan musim juga mempengaruhinya. Sifat geologi tanah merupakan faktor utama yang menentukan tahanan jenis tanah. Bahan dasar dari tanah relatif bersifat bukan penghantar. Tanah liat umumnya mempunyai tahanan jenis terendah, sedang batu-batuan (*quartz*) bersifat sebagai insulator.

Tabel dibawah ini menunjukkan harga-harga tahanan jenis tanah (ρ) dari berbagai jenis tanah :

Tabel 2.3 Harga tahanan jenis tanah

No	Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah (Ohm Meter)
1	Rawa	30
2	Tanah liat	100
3	Pasir basah	200
4	Batu-batu kerikil basah	500
5	Pasir dan batu kerikil kering	1000
6	Batu	5000

Sumber PUIL : 2000 (Andi Syofian, 20013).

2.7.3 Tegangan Tidak Seimbang (*Unbalance Voltage*)

Beban dari fasa seimbang adalah beban dengan arus yang mengalir pada beban-beban simetris dan beban tersebut dihubungkan pada tegangan yang simetris pula. Dalam analisisnya sistem yang melayani beban-beban seperti ini biasanya diasumsikan dipasok oleh tegangan yang simetris. Dengan demikian analisisnya dapat dilakukan pada basis perfasa saja. Jadi dalam hal ini beban selalu diasumsikan seimbang pada setiap fasanya, sedangkan pada kenyataannya beban-beban tersebut tidak seimbang. Untuk hal seperti ini, penyelesaiannya menggunakan komponen simetris. Ketidakseimbangan dapat terjadi di pembangkit, jaringan dan beban ataupun ketiga-tiganya. Ketidakseimbangan beban antara fasa menyebabkan adanya arus yang mengalir pada titik netral (Nazaruddin, 2006).

Rumus *unbalance voltage* adalah seperti di bawah ini :

$$\% V \text{ Unbalance} = \frac{V_{\max} - (V_{\text{rata-rata}})}{V_{\text{rata-rata}}} \times 100\% \quad (2.26)$$

2.7.4 Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*)

Jatuh tegangan (*drop voltage*) adalah selisih antara tegangan ujung pengiriman dan tegangan ujung penerimaan. Jatuh tegangan disebabkan oleh hambatan dan arus. Pada saluran bolak-balik besarnya tergantung dari impedansi dan admintansi saluran serta pada beban dan faktor daya (Stevensen Jr, 1993).

Rugi tegangan dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\Delta V = I_s \times (R_s + jX_s) \quad (2.27)$$

$$= I \times Z \quad (2.28)$$

Keterangan :

I = Arus (A)

Z = Impedansi (Ω)

$$\Delta V = V_s - V_r \quad (2.29)$$

Keterangan :

ΔV = drop tegangan (V)

V_s = tegangan kirim (V)

V_r = tegangan terima (V)



Maka besar nilai persentase (%) rugi tegangan adalah :

$$\Delta V (\%) = \frac{\Delta V}{V} \times 100\% \quad (2.30)$$

Keterangan :

$\Delta V (\%)$ = Rugi Tegangan dalam % (V)

V = Tegangan kerja (V)

ΔV = Rugi Tegangan (V)

2.8 Pengaruh Harmonisa Pada Transformator

Transformator dirancang untuk menyalurkan daya yang dibutuhkan beban dengan rugi-rugi minimum pada frekuensi fundamentalnya. Arus harmonisa dan tegangan secara signifikan akan menyebabkan panas lebih. Ada 3 pengaruh yang menimbulkan panas lebih pada transformator ketika arus beban mengandung komponen harmonisa (J. Arrilaga, dkk, 2003) :

1. Arus rms adalah jika transformator kapasitasnya hanya untuk kVA yang dibutuhkan beban, arus harmonisa dapat mengakibatkan arus rms trafo menjadi lebih besar dari kapasitasnya. Meningkatnya arus rms menyebabkan rugi-rugi pada penghantar juga bertambah.
2. *Eddy-current loses* adalah arus induksi di dalam trafo yang disebabkan oleh fluks magnetik. Arus induksi ini mengalir di belitan, di inti, dan di badan penghantar lain yang terlingkupi oleh medan magnet dari transformator dan menyebabkan panas lebih. Komponen rugi-rugi trafo ini meningkat dengan kuadrat dari frekuensi arus penyebab *eddy current*. Oleh karena itu, ini menjadi

komponen yang sangat penting dari rugi-rugi trafo yang menyebabkan pemanasan oleh harmonisa.

3. Rugi Inti adalah peningkatan rugi inti yang disebabkan oleh harmonisa bergantung pada pengaruh harmonisa pada tegangan yang diberikan dan rancangan dari inti trafo. Semakin besar distorsi tegangan maka semakin tinggi pula *eddy current* di laminasi inti. Peningkatan rugi inti karena harmonisa tidak sekritis dua rugi-rugi di atas.

2.8.1 Teori Perhitungan *Load Loss* (P_{LL}) Trafo :

Untuk menghitung *load loss* trafo dalam per unit, dapat dicari dengan rumus sebagai berikut : (Roger C. Dugan, 1996).

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC-R} \quad (\text{p.u}) \quad (2.31)$$

dimana:

P_{EC-R} = faktor *eddy current loss*

h = angka harmonisa

I_h = arus harmonisa

2.9 Konsep Kualitas Daya Listrik

Permasalahan kualitas daya listrik disebabkan oleh gejala-gejala atau fenomena-fenomena elektromagnetik yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Gejala elektromagnetik yang menyebabkan permasalahan kualitas daya adalah : (Roger C. Dugan, 1996).

1. Gejala Peralihan (*Transient*), yaitu suatu gejala perubahan variabel (tegangan, arus dan lain-lain) yang terjadi selama masa transisi dari keadaan operasi tunak (*steady state*) menjadi keadaan yang lain.
2. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Pendek (*Short-Duration Variations*) yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan dalam waktu yang singkat yaitu kurang dari 1 (satu) menit.
3. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Panjang (*Long-Duration Variations*) yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan, dalam waktu yang lama yaitu lebih dari 1 (satu) menit.
4. Ketidakseimbangan tegangan adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta sudut fasanya.
5. Distorsi Gelombang adalah gejala penyimpangan dari suatu gelombang (tegangan dan arus) dari bentuk idealnya berupa gelombang sinusoidal.
6. Fluktuasi Tegangan adalah gejala perubahan besarnya tegangan secara sistematis.
7. Gejala Perubahan Frekuensi Daya yaitu gejala penyimpangan frekuensi daya listrik pada suatu sistem tenaga listrik.
8. Rugi daya karena harmonisa antara lain : Arus rms, *Eddy-current losses* dan Rugi inti.