

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Widhiatmaka, dan Muhamad Aman (2012) melakukan penelitian tentang pengujian harmonisa pada lampu hemat energi (LHE) menurut standar IEC 61000-3-2 kelas C, IEEE 512-1992, dan *power factor* PLN (studi kasus untuk LHE 5 Watt). Beberapa merk lampu hemat energi yang beredar di pasaran, belum ada satupun yang memenuhi standar, baik standar IEC 61000, IEEE 519-1992, maupun standar PLN.

Mutiari (2013) melakukan penelitian tentang pengukuran harmonisa yang ditimbulkan oleh beban non linier. Secara keseluruhan, beban non-linier seperti lampu hemat energi, laptop, TV, dan komputer, mempunyai nilai THD_I yang tinggi dan melebihi standar, yakni semuanya di atas 20% yang tidak sesuai dengan standar IEEE 519-1992.

Arfina Cahyani (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh harmonisa beban non-linier rumah tangga terhadap hasil penunjukkan kWh meter digital satu fasa. Nilai THD arus non-linier rumah tangga sangat besar dibandingkan THD arus beban linier. THD yang muncul pada beban linier diakibatkan karena adanya faktor eksternal, sehingga nilai THD yang muncul dapat diabaikan. Penjumlahan daya fundamental dan komponen harmonisa membuat pengukuran daya yang terukur selama kurun waktu (t) menjadi tidak sesuai dengan hasil penunjukan energi alat ukur kWh Meter Digital 1 Fasa.

Utomo Sandy Putra P., Sigit Yuwono, dan Ekki Kurniawan (2017) melakukan penelitian tentang implementasi dan perancangan filter harmonisa pada sistem penerangan lampu *tubelamp* (TL). Berkurangnya harmonisa pada lampu TL menyebabkan *power factor* meningkat dari 0,66 menjadi 0,96 dan daya nyata meningkat dari 23 watt menjadi 27 watt, serta berkurangnya Irms dari 157

mA menjadi 128 mA. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kualitas daya pada lampu TL.

Mustamam (2017) melakukan penelitian tentang penggunaan filter pasif *single tuned* untuk mereduksi harmonisa pada *juicer*. Pada *juicer*, filter *single tuned* dapat mereduksi arus harmonisa IHD₁ orde ke-3, berkurang dari 0,737 Ampere menjadi 0,0599 Ampere, tereduksi sebesar 0,6771 Ampere dengan prosentase 91,87%.

2.2 Landasan Teori

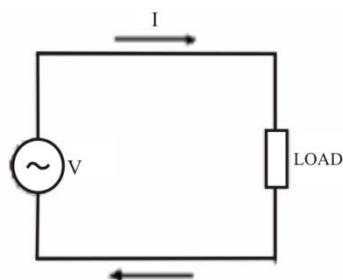
2.2.1 Daya Listrik

Daya listrik adalah aliran energi listrik pada satu titik jaringan listrik tiap satu satuan waktu. Menurut SI, daya listrik dinyatakan dalam satuan Watt atau Joule/s. Daya listrik merupakan hasil kali antara tegangan (V) dan arus (I), jika dituliskan ke dalam rumus, maka:

$$P = V \times I$$

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

$$P = \text{Watt}$$



Gambar 2.1 Aliran Arus Listrik

a. Daya Aktif

Daya aktif (*active power*) adalah daya yang dibutuhkan oleh beban resistif. Daya aktif menunjukkan adanya aliran energi listrik yang dapat dikonversikan ke dalam energi lain, seperti energi cahaya, panas, mekanik, dan lain-lain. Satuan dari daya aktif adalah Watt.

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

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \varphi$$

b. Daya Reaktif

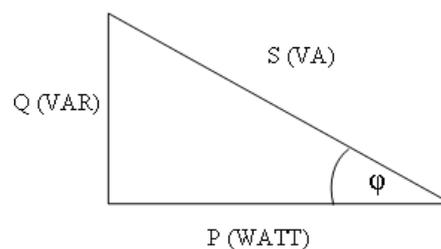
Daya reaktif (*reactive power*) adalah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet pada kumparan-kumparan induktif. Pembentukan medan magnet tersebut akan membentuk fluks medan magnet, seperti pada transformator, motor, dan lain-lain. Satuan dari daya reaktif adalah VAR (*Volt Ampere Reactive*).

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

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \varphi$$

c. Daya Semu

Daya semu (*apparent power*) adalah daya yang dihasilkan dari hasil perkalian antara tegangan efektif (*root mean square*) dengan arus efektif (*root mean square*), atau dapat disebut juga dengan daya dari hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif. Satuan dari daya semu adalah VA (*Volt Ampere*).



Gambar 2.2 Segitiga Trigonometri Daya

$S = P + jQ$, mempunyai nilai dan sudut

$$S = V \cdot I \cdot e^{j\varphi}$$

$$S = S \angle \varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \angle \varphi$$

Untuk mendapatkan daya semu satu phasa, maka dapat diturunkan persamaan sebagai berikut:

$$S = P + jQ$$

Dari gambar terlihat jika:

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

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

Maka:

$$S = V \cdot I \cdot \cos \varphi + j V \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$S = V \cdot I (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

$$S = V \cdot I \angle \varphi$$

$$S = V \cdot I$$

d. Faktor Daya

Faktor daya ($\cos \varphi$) merupakan perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya semu (VA), atau nilai cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu.

$$\text{Faktor Daya} = \frac{\text{Daya Aktif (P)}}{\text{Daya Semu (S)}}$$

$$\text{Faktor Daya} = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}}$$

$$\text{Faktor Daya} = \frac{V \cdot I \cdot \cos \varphi}{V \cdot I}$$

$$\text{Faktor Daya} = \cos \varphi$$

Faktor daya memiliki nilai antara 0 sampai 1, dan dapat juga dinyatakan dalam prosentase. Semakin besar nilai faktor daya, maka menunjukkan jika kualitas daya listrik semakin baik.

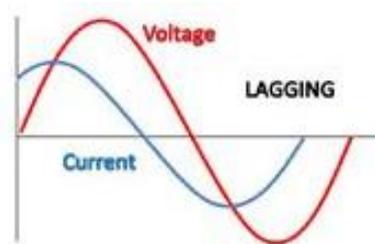
Komponen daya aktif umumnya bernilai kostan, tetapi komponen daya semu (VA) dan daya reaktif (VAR) berubah-ubah sesuai dengan nilai faktor daya, maka dapat ditulis persamaan berikut:

$$\text{Daya Reaktif (Q)} = \text{Daya Aktif (P)} \times \tan \varphi$$

Faktor daya ($\cos \varphi$) dibagi menjadi dua, yaitu faktor daya tertinggal (*lagging*) dan faktor daya mendahului (*leading*).

i. Faktor Daya Tertinggal (*Lagging*)

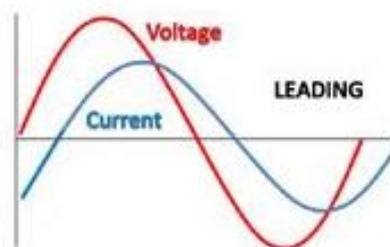
Faktor daya *lagging* menunjukkan bahwa beban bersifat induktif. Bentuk gelombang saat faktor daya *lagging* ditunjukkan dengan arus (I) yang tertinggal dari tegangan (V), dengan sudut ϕ . Berikut adalah gelombang sinus pada faktor daya *lagging*:



Gambar 2.3 Gelombang Faktor Daya *Lagging*

ii. Faktor Daya Mendahului (*Leading*)

Faktor daya *leading* menunjukkan bahwa beban bersifat kapasitif. Bentuk gelombang saat faktor daya *leading* ditunjukkan dengan arus (I) yang mendahului tegangan (V), sebesar sudut ϕ . Berikut adalah gelombang sinus pada faktor daya *leading* :



Gambar 2.4 Gelombang Faktor Daya *Leading*

2.2.2 Sifat Beban Listrik

Jaringan listrik AC memiliki tiga jenis beban, yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Ketiga jenis beban tersebut memiliki karakteristik yang berbeda-beda.

a. Beban Resistif

Beban resistif merupakan jenis beban yang bersifat murni tahanan (resistor). Beban resistif hanya menyerap daya aktif, dan tidak menyerap daya reaktif. Gelombang arus (I) dan tegangan (V) yang melewati beban resistif akan selalu se-fasa.

Secara sistematis, beban resistif dinyatakan dalam:

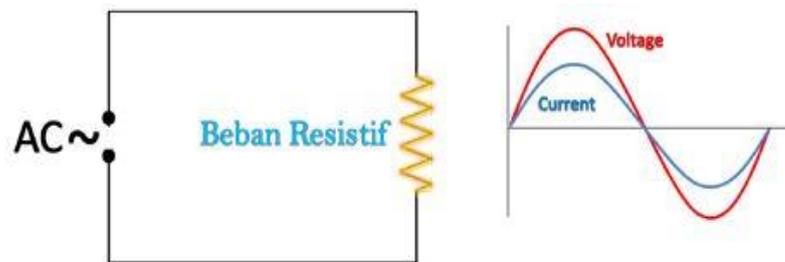
$$R = V / I$$

keterangan:

R = Hambatan (Ω)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)



Gambar 2.5 Arus dan Tegangan Beban Resistif

b. Beban Induktif

Beban induktif merupakan beban yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada sebuah besi. Beban induktif menyerap daya aktif dan daya reaktif, dengan faktor daya *lagging*, yaitu arus (I) tertinggal dari tegangan (V).

Secara sistematis, beban induktif dinyatakan dalam:

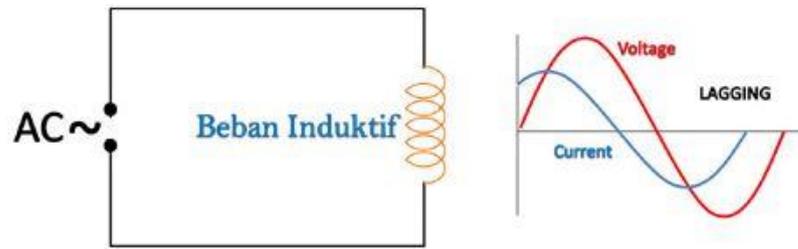
$$X_L = 2\pi f.L$$

keterangan:

X_L = Reaktansi Induktif (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

L = Induktansi (H)



Gambar 2.6 Arus dan Tegangan Beban Induktif

c. Beban Kapasitif

Beban kapasitif merupakan beban yang mengandung komponen pasif, yaitu kapasitor. Beban kapasitif menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif, dengan faktor daya *leading*, yaitu arus (I) mendahului tegangan (V). Secara sistematis, beban kapasitif dinyatakan dalam:

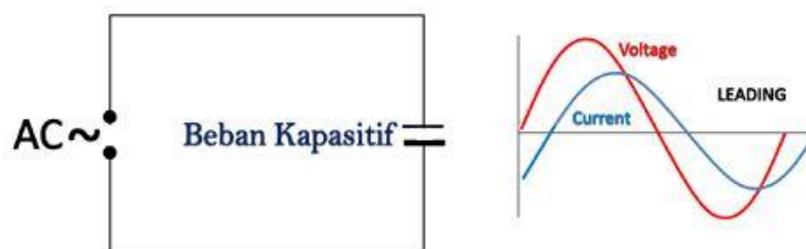
$$X_c = \frac{1}{2\pi f \cdot C}$$

keterangan:

X_c = Reaktansi Kapasitif (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

C = Kapasitas Kapasitor (F)



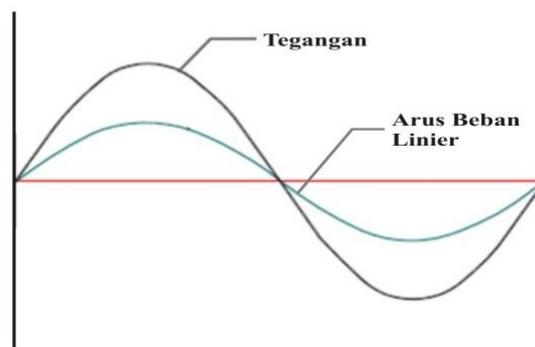
Gambar 2.7 Arus dan Tegangan Beban Kapasitif

2.2.3 Jenis Beban Listrik

Beban listrik pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi 2 jenis, yaitu beban linier dan beban non-linier.

a. Beban Linier

Beban linier adalah beban yang tidak mempengaruhi karakteristik tegangan dan arus, karena nilai impedansinya selalu konstan. Beban linier menghasilkan bentuk gelombang yang linier, dimana arus yang mengalir sebanding dengan tahanan dan perubahan tegangan, sehingga bentuk gelombang arus akan mengikuti bentuk gelombang tegangan yang ditimbulkannya (Arfinna, 2014).

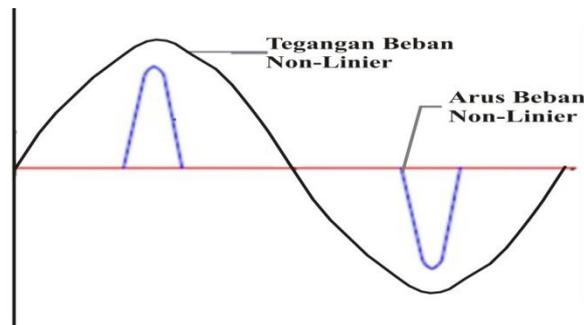


Gambar 2.8 Gelombang Akibat Beban Linier dengan Nilai $\text{Cos } \phi = 1$

Beberapa contoh beban listrik linier adalah elemen pemanas, lampu pijar, dan resistor.

b. Beban Non-Linier

Beban non-linier adalah beban yang mempengaruhi karakteristik tegangan dan arus, karena nilai impedansi dari beban non-linier tidak konstan. Beban non-linier menghasilkan gelombang yang bentuknya berubah menjadi gelombang cacat (terdistorsi), karena bentuk gelombang arus tidak berbanding lurus dengan bentuk gelombang tegangan yang diberikan. Penyebabnya adalah penggunaan komponen semikonduktor, seperti dioda, transistor, dan IC (*Integrated Circuit*) pada peralatan-peralatan yang tergolong ke dalam beban non-linier.



Gambar 2.9 Gelombang Akibat Beban Non-Linier

Beban non-linier terbagi menjadi 2 macam (Arfinna, 2014), yaitu:

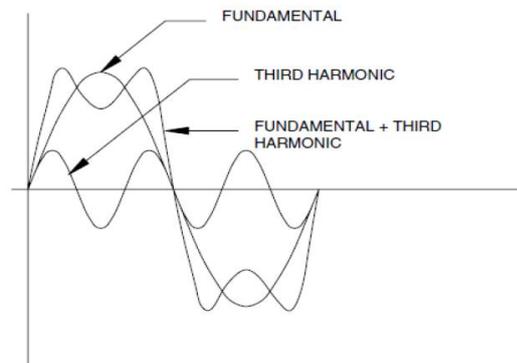
- i. Beban Non-Linier Industri
 - Konverter daya tiga fasa
 - *DC-drive*
 - *AC-drive*
- ii. Beban Non-Linier Umum
 - *Electronic ballast*
 - Lampu hemat energi
 - Komputer
 - Alat ukur
 - Alat-alat elektronik
 - *Air Conditioner (AC)*

Beban non linier merupakan peralatan yang menghasilkan distorsi gelombang dengan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi *fundamental*, gelombang dengan frekuensi tinggi inilah yang disebut sebagai harmonisa.

2.2.4 Harmonisa

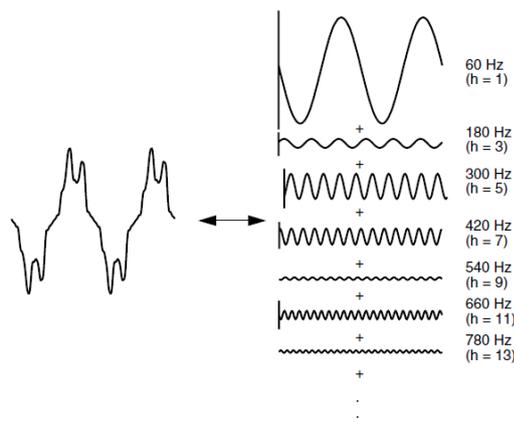
Harmonisa merupakan cara matematis untuk mendeskripsikan distorsi gelombang tegangan atau gelombang arus (Walcott, 2015). Harmonisa merujuk pada bentuk gelombang yang memiliki nilai kelipatan bilangan bulat dari frekuensi *fundamental*. Sistem tenaga listrik umumnya beroperasi pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz, yang disebut sebagai frekuensi *fundamental*.

Akibat dari perkembangan beban-beban listrik, terutama pada beban yang tergolong ke dalam beban non-linier, hal ini menyebabkan perubahan pada bentuk gelombang sinusoidalnya, menjadi kelipatan dari 50 Hz atau 60 Hz.



Gambar 2.10 Bentuk Gelombang Harmonisa

Gelombang-gelombang harmonisa menumpang pada gelombang murni, sehingga menyebabkan terbentuknya gelombang cacat yang merupakan penjumlahan antara gelombang murni dan gelombang harmonisa. Gelombang harmonisa menyebabkan perubahan frekuensi menjadi kelipatan dari frekuensi *fundamental*, misalnya frekuensi dasar sistem tenaga listrik 60 Hz, jika terdapat harmonisa ke-2 maka gelombang tersebut memiliki frekuensi 120 Hz, pada harmonisa ke-3 memiliki frekuensi 180 Hz, dan seterusnya.



Gambar 2.11 Penjumlahan Gelombang Harmonisa

Penjumlahan gelombang murni dan gelombang harmonisa, merupakan gelombang yang bersifat periodik (gelombang tersebut memiliki periode T jika $f(t)=f(t+T)$ untuk semua t), sehingga karakteristik harmonisa dapat diketahui melalui deret Fourier sebagai berikut:

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cdot \cos(h\omega_0 t) + b_h \cdot \sin(h\omega_0 t)\}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(h\omega_0 t) dt$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(h\omega_0 t) dt$$

Dimana h adalah orde harmonisa, yaitu bilangan 1, 2, 3, dan seterusnya.

Persamaan yang digunakan untuk mengetahui sudut fasa harmonisa:

$$\varphi_h = \tan^{-1}\left(\frac{b_h}{a_h}\right)$$

Selain itu, untuk mengetahui nilai amplitudo dari suatu gelombang harmonisa, dapat dicari dengan persamaan:

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$$

a. Orde Harmonisa

Orde harmonisa merupakan perbandingan frekuensi harmonisa dengan frekuensi *fundamental*, atau dapat dituliskan rumus sebagai berikut:

$$n = \frac{f_n}{f}$$

keterangan:

n = Orde Harmonisa

f_n = Frekuensi Harmonisa ke-n

f = Frekuensi *Fundamental*/Dasar

Frekuensi *fundamental* atau frekuensi dasar merupakan besar nilai frekuensi pada orde ke-1, sehingga yang dianggap sebagai harmonisa dimulai dari orde ke-2 sampai orde ke-n.

b. Harmonisa Ganjil dan Genap

Berdasarkan ordenya, harmonisa dikategorikan menjadi harmonisa ganjil dan harmonisa genap. Harmonisa ganjil adalah harmonisa ke-3, ke-5, ke-7, dan seterusnya, sedangkan untuk harmonisa genap dimulai dari harmonisa ke-2, ke-4, ke-6, dan seterusnya. Harmonisa ke-1 tidak termasuk ke dalam harmonisa ganjil, karena berperan sebagai frekuensi fundamental. Harmonisa dengan orde ganjil memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap sistem tenaga listrik, karena rms dari harmonisa dengan orde ganjil memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan harmonisa dengan orde genap. Penjumlahan antara frekuensi *fundamental* dan frekuensi harmonisa, akan menyebabkan bentuk gelombang menjadi terdistorsi, sehingga tidak lagi berbentuk sinusoidal murni.

c. RMS (*Root Mean Square*)

RMS (*Root Mean Square*) merupakan akar dari nilai rata-rata suatu fungsi yang dikuadratkan, sehingga *root mean square* dapat diartikan dengan persamaan berikut:

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Nilai *root mean square* untuk tegangan (V_{rms}) dapat dihitung dengan rumus:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}$$

atau

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}$$

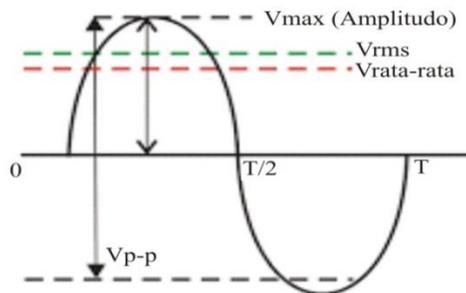
Nilai *root mean square* untuk arus (I_{rms}) dapat dihitung dengan rumus:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

Umumnya hasil penunjukkan nilai dari alat ukur yang digunakan dalam proses pengukuran besaran listrik menunjukkan nilai *root mean square*, baik itu tegangan rms atau arus rms. Nilai *root mean square* digunakan karena terdapat beberapa alat elektronik yang memiliki batas untuk menahan kalor/panas tertentu.

Sinyal AC memiliki nilai yang berubah-ubah secara periodik, sehingga pengukuran sinyal AC dilakukan dengan mencari nilai ekuivalen DCnya, karena sinyal DC memiliki nilai yang tetap. Nilai ekuivalen ini yang dikenal dengan nilai *root mean square* atau nilai efektif, karena nilai *root mean square* AC akan ekuivalen dengan DC *heating value*-nya.



Gambar 2.12 Gelombang Sinusoidal Tegangan

Pada sistem AC, bentuk gelombang arus dan tegangan berupa sinusoidal, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12, maka didapatkan persamaan untuk menghitung nilai tegangan *root mean square*, yaitu:

$$V_{\text{rms}}^2 \cdot T = \int_0^T V_{\text{max}}^2 \sin^2(\omega t) dt$$

$$V_{\text{rms}}^2 \cdot T = V_{\text{max}}^2 \int_0^T \frac{1}{2} (1 - \cos 2(\omega t)) dt$$

$$V_{\text{rms}}^2 \cdot T = V_{\text{max}}^2 \left(\int_0^T \frac{1}{2} dt - \int_0^T \frac{1}{2} \cos 2(\omega t) dt \right)$$

$$V_{\text{rms}}^2 \cdot T = V_{\text{max}}^2 \left(\frac{1}{2} t \Big|_0^T - \frac{1}{2} \frac{1}{2\omega} \sin 2(\omega t) \Big|_0^T \right)$$

$$V_{\text{rms}}^2 \cdot T = \frac{1}{2} V_{\text{max}}^2 \left((T - 0) - \frac{1}{2\omega} (\sin 2\left(\frac{2\pi}{T}\right) T - \sin 0) \right)$$

$$V_{\text{rms}}^2 \cdot T = \frac{1}{2} V_{\text{max}}^2 \cdot T$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

d. *Individual Harmonic Distortion* (IHD)

Individual Harmonic Distortion (IHD) merupakan perbandingan antara nilai *root mean square* dari harmonisa individual dengan nilai *root mean square* fundamental. *Individual Harmonic Distortion* (IHD) berlaku untuk nilai tegangan dan arus. Nilai IHD dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\text{IHD}_V = \frac{V_n}{V_1} \times 100\%$$

keterangan:

IHD_V = *Individual Harmonic Distortion* Tegangan (%)

V_n = Tegangan Harmonisa Orde ke-n (V)

V_1 = Tegangan *Fundamental* (V)

$$\text{IHD}_I = \frac{I_n}{I_1} \times 100\%$$

keterangan:

IHD_I = *Individual Harmonic Distortion* Arus (%)

I_n = Arus Harmonisa Orde ke-n (A)

I_1 = Arus *Fundamental* (A)

e. *Total Harmonic Distortion* (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan perbandingan antara nilai *root mean square* dari seluruh harmonisa dengan nilai *root mean square* fundamental. *Total Harmonic Distortion* (THD) berlaku untuk nilai tegangan dan arus. Nilai THD digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan harmonisa terhadap gelombang fundamentalnya. Gelombang sinusoidal sempurna, memiliki nilai THD 0%, sedangkan untuk nilai THD gelombang yang mengalami distorsi harmonisa digunakan persamaan:

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

keterangan:

$\text{THD}_V = \text{Total Harmonic Distortion}$ Tegangan (%)

V_n = Nilai Tegangan Harmonisa (V)

V_1 = Nilai Tegangan *Fundamental* (V)

n = Komponen Harmonisa Maksimum yang Diamati

dan

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

keterangan:

$\text{THD}_I = \text{Total Harmonic Distortion}$ Arus (%)

I_n = Nilai Arus Harmonisa (A)

I_1 = Nilai Arus *Fundamental* (A)

n = Komponen Harmonisa Maksimum yang Diamati

2.2.5 Standar Harmonisa

Standar harmonisa merupakan batasan nilai harmonisa untuk sistem kelistrikan, dengan tujuan untuk mengurangi dampak buruk yang diakibatkan oleh adanya harmonisa. Standar harmonisa, salah satunya ditentukan oleh IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). IEEE merupakan sebuah lembaga atau organisasi internasional di bidang teknik yang berwenang untuk melakukan pengembangan terhadap standar-standar yang dijadikan acuan dalam bidang kelistrikan dan elektronika, serta bertindak sebagai pihak yang mempercepat teknologi-teknologi baru dalam aspek industri dan rekayasa (*engineering*). Standar IEEE yang membahas mengenai batasan nilai harmonisa untuk gelombang tegangan dan arus, tercantum dalam standar IEEE 519-1992.

Berdasarkan IEEE 519-1992, untuk mengevaluasi standar harmonisa terdapat dua kriteria yang digunakan, yaitu batasan untuk harmonisa arus (THD_I) dan batasan untuk harmonisa tegangan (THD_V). Batasan untuk harmonisa arus (THD_I) ditentukan oleh perbandingan I_{SC}/I_L , dimana I_{SC} merupakan arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*), dan I_L merupakan arus beban fundamental nominal. Sedangkan untuk batasan harmonisa tegangan (THD_V) ditentukan oleh besarnya tegangan sistem yang terpasang.

Tabel 2.1 Batasan Harmonisa Arus

<i>Maximum Harmonic Current Distortion</i> (in % of fundamental)						
I_{SC}/I_L	<i>Harmonic Order</i>					<i>Total Harmonic Distortion (%)</i>
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
	<i>Individual Harmonic Distortion (%)</i>					
< 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	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

Tabel 2.2 Batasan Harmonisa Tegangan

<i>System Voltage</i>	<i>Individual Voltage Distortion (%)</i>	<i>Individual Voltage Distortion (%)</i>
≤ 69 kV	3.0	5.0
69.01 kV-161 kV	1.5	2.5
> 161 kV	1.0	1.5

2.2.6 Sumber Harmonisa

Sumber dari harmonisa adalah beban-beban listrik yang mempunyai karakteristik non-linier, karena beban-beban linier menggunakan penyearah-penyearah seperti dioda. Beberapa beban satu fasa yang tergolong sebagai sumber harmonisa adalah televisi, komputer, lampu hemat energi, mesin fotokopi, dan peralatan lain yang menggunakan komponen-komponen penyearah satu fasa. Penyearah satu fasa dapat membangkitkan harmonisa arus orde kelipatan tiga pada sistem tenaga listrik. Harmonisa yang ditimbulkan pada sistem tenaga listrik tiga fasa disebabkan penyearah tiga fasa enam pulsa yang umumnya sering digunakan. Penyearah-penyearah tiga fasa jenis ini dapat membangkitkan harmonisa arus orde ke-5 dan ke-7. Terdapat tiga macam urutan harmonisa, yaitu:

- Urutan fasa positif, dengan urutan fasa R-S-T yang antar fasanya terpisah 120° (misalnya $0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$).
Orde harmonisanya adalah $h = 1, 7, 13, \dots$
- Urutan fasa negatif, dengan urutan fasa yang antar fasanya terpisah 120° , tetapi memiliki urutan fasa yang berlawanan, yaitu R-T-S (misalnya $0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$).
Orde harmonisanya adalah $h = 5, 11, 17, \dots$
- Urutan nol, yang memiliki beda fasa sama dengan nol (satu fasa).
Orde harmonisanya adalah $h = 3, 9, 15, \dots$

2.2.7 Dampak Harmonisa

Harmonisa memiliki dampak buruk terhadap sistem tenaga listrik, diantaranya:

- Terjadi penurunan kualitas daya listrik.
- Meningkatkan rugi-rugi daya dan suhu pada *switchgear*, sehingga mengurangi kemampuan mengalirkan arus dan mempersingkat umur beberapa komponen isolator.
- Timbul getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat harmonisa arus frekuensi tinggi.

- Mengakibatkan putaran piringan kWh meter menjadi lebih cepat, sehingga terjadi kesalahan ukur pada kWh meter.
- *Triple* harmonisa pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonisa yang mengganggu sistem telekomunikasi.
- Pemutus beban dapat bekerja di bawah arus pengenalnya atau bahkan tidak bekerja pada arus pengenalnya.
- Mengakibatkan penurunan efisiensi pada motor listrik.
- Mengakibatkan penurunan efisiensi dan mengurangi umur transformator.
- Pada peralatan listrik dapat menyebabkan terjadinya *voltage zero crossing*, yang berakibat kesalahan operasi jika digunakan sebagai sinkronisasi kontrol.
- Meningkatkan pemanasan pada kabel penghantar, karena arus yang mengalir melebihi standar batasan kabel yang terpasang.

2.2.8 Reduksi Harmonisa

Harmonisa memiliki dampak yang buruk terhadap sistem tenaga listrik, meski begitu harmonisa tidak dapat dihilangkan, tetapi dapat diturunkan nilai harmonisanya. Cara yang digunakan untuk mengurangi nilai harmonisa adalah dengan cara melakukan perancangan ulang terhadap beban-beban yang telah terpasang, dan cara lainnya adalah dengan melakukan penambahan filter. Pemasangan filter digunakan untuk memisahkan sinyal berdasarkan frekuensinya. Filter akan melewatkan listrik dengan frekuensi tertentu, sehingga akan menghilangkan frekuensi dengan nilai yang berbeda. Secara garis besar, filter dibagi menjadi filter aktif dan filter pasif.

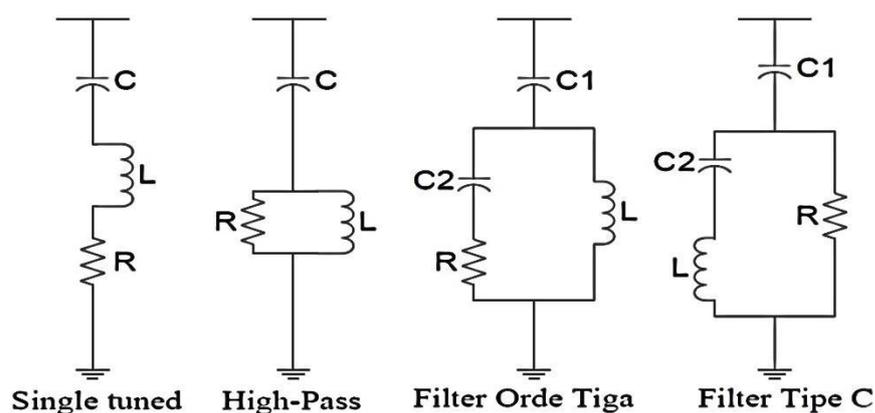
a. Filter Aktif

Filter aktif adalah rangkaian filter dengan menggunakan komponen-komponen elektronik aktif. Komponen penyusunnya terdiri dari op-amp, transistor, dan komponen lainnya. Keuntungan penggunaan filter aktif adalah dapat mengolah sinyal dengan amplitudo yang kecil, dapat diatur penguatan

outputnya, kualitas/respon yang lebih baik dari filter pasif, mempunyai impedansi input yang tinggi dan impedansi output yang rendah. Sedangkan kerugian dari penggunaan filter aktif adalah pada komponen dihasilkan panas, butuh sumber agar dapat bekerja, dan terdapat pembatasan frekuensi dari komponen yang digunakan sehingga pengaplikasian untuk frekuensi tinggi terbatas.

b. Filter Pasif

Filter pasif adalah rangkaian filter yang menggunakan komponen-komponen elektronik pasif, yaitu resistor, induktor, dan kapasitor. Keuntungan penggunaan filter pasif adalah tidak membutuhkan sumber agar dapat bekerja, tidak menghasilkan panas, tidak banyak noise karena tidak ada penguatan, tidak ada pembatasan frekuensi sehingga dapat diaplikasikan pada frekuensi tinggi. Sedangkan kerugian dari penggunaan filter pasif adalah tidak dapat menguatkan sinyal, sulit untuk merancang filter yang kualitas/responnya baik. Filter pasif banyak digunakan untuk mengurangi kerugian daya reaktif akibat adanya harmonisa. Beberapa jenis filter pasif yaitu *Single-tuned filter* atau *bandpass filter*, dan *high-pass filter*.



Gambar 2.13 Macam-Macam Filter Pasif

Jenis filter pasif yang umum digunakan adalah *single tuned filter*. Filter jenis ini biasa digunakan pada tegangan rendah. Perancangan *single tuned filter* harus memperhatikan orde harmonisa dimana terdapat nilai harmonisa yang paling tinggi. Nilai filter ini dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

a. Spesifikasi Resistor

$$R = \frac{V}{I_h}$$

keterangan:

R = Resistansi Resistor (Ω)

V = Tegangan (V)

I_h = Arus Harmonisa (A)

Untuk mengetahui nilai rating daya resistor, maka digunakan persamaan:

$$P = V \times I_h$$

keterangan:

P = Kapasitas Daya Resistor (W)

V = Tegangan (V)

I_h = Arus Harmonisa (A)

b. Nilai Q Faktor

$$X_L = X_C = X_n$$

$$Q = \frac{X_n}{R}$$

$$X_n = Q \times R$$

* X_n adalah nilai pengganti X_L , atau X_C

keterangan:

X_L = Reaktansi Induktif (Ω)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

Q = Faktor Kualitas Filter, dimana nilai Q antara 30-100

R = Resistansi Resistor (Ω)

c. Spesifikasi Induktor

$$X_L = 2\pi fL$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

keterangan:

L = Induktansi (H)

X_L = Reaktansi Induktif (Ω)

f = Frekuensi Harmonisa (Hz)

d. Spesifikasi Kapasitor

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$C = \frac{1}{2\pi fX_C}$$

keterangan:

C = Kapasitansi (F)

X_C = Reaktansi Induktif (Ω)

f = Frekuensi Harmonisa (Hz)