

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Elih Mulyana (2008) melakukan penelitian mengenai harmonik tegangan dan arus listrik di Gedung Direktorat TIK Universitas Pendidikan Indonesia (UPI). Kondisi beban yang tidak seimbang membuat nilai arus netral mengalir pada jaringan tenaga listrik jauh di atas normal, pada jam tertentu nilai arus netral bisa mendekati nilai arus fasa. Hal ini dapat memberikan rugi-rugi daya yang sangat besar. Bahkan muncul frekuensi harmonik pada urutan genap. Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa secara keseluruhan nilai  $THD_I$  dan  $THD_V$  melebihi standar yang telah diizinkan.

Hadi Sugiarto (2012) melakukan kajian harmonisa arus dan tegangan listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak. Terjadi harmonisa arus dan tegangan di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak yang nilainya masih di bawah yang ijin. Namun kondisi beban mengalami ketidakseimbangan yang cukup signifikan. Beban fasa T hampir dua kali beban fasa R. hal ini diakibatkan adanya arus netral rugi-rugi daya pada kawat netral.

Aris Suryadi (2016) melakukan studi harmonisa arus dan tegangan listrik pada kampus Politeknik Enjinereng Indorama. Harmonisa arus masih dalam ambang yang diizinkan, namun pada harmonisa tegangan melebihi batas ambang yang diizinkan. Kondisi beban listrik pada kampus Politeknik Enjinereng Indorama tidak terdistribusi merata pada masing-masing fasa, sehingga kawat netral mengalirkan arus yang dikhawatirkan dapat membahayakan sistem dan menimbulkan rugi-rugi.

Erwin Gunawan (2012) melakukan analisis pengaruh harmonisa terhadap kualitas daya listrik di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Selama penelitian, sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro terjadi harmonik tegangan yang masih dianggap aman dan harmonik arus

melampaui standar yang diizinkan. Nilai daya reaktif akibat adanya distorsi harmonisa yang melampaui standar IEEE 192.1992 mengakibatkan nilai faktor daya semakin memburuk, seperti saat berlangsungnya kegiatan praktikum pada beberapa ruangan di Laboratorium Teknik Elektro.

Slamet Supriyo Nugroho (2018) melakukan analisis harmonik arus dan tegangan pada Gedung AR Fakhruddin B Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Berdasarkan pengukuran, terjadi ketidakseimbangan beban pada Gedung AR Fakhruddin B yang dibuktikan dengan adanya perbedaan nilai arus antar fase yang signifikan. Nilai THDi melebihi batas yang diizinkan, namun nilai THDv masih dalam batas yang diizinkan. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan didapatkan perhitungan untuk menentukan filter aktif dengan spesifikasi  $X_c=2,13\Omega$  ;  $X_L=0,085\Omega$  ;  $R=0,0043\Omega$  ;  $L=0,5414 \times 10^{-4}H$  ;  $C=2,9903 \times 10^{-4}F$  ;  $Q_{\text{filter}}=78,2kVAr$ .

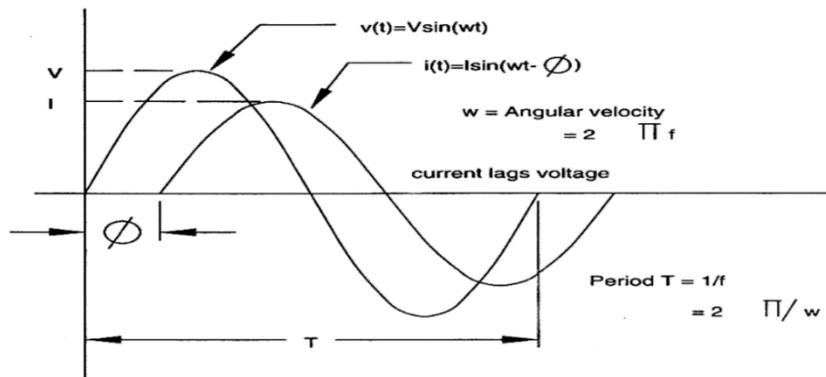
## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Beban Listrik**

Pada sistem tenaga listrik, jenis beban dibedakan menjadi dua yaitu:

#### **1. Beban Linier**

Beban yang arusnya berbanding lurus dengan tegangan setiap periode. Dimana pada hukum ohm menyebutkan bahwa arus berbanding lurus dengan tegangan, dengan begitu bentuk gelombang dari beban linier antara arus dan tegangan memiliki bentuk gelombang yang sama. Jika beban linier diberikan tegangan dan arus yang berbentuk sinusoidal, maka tegangan dan arus yang mengalir pada beban linier akan berbentuk sinus. Dapat dikatakan bahwa gelombang sinus tegangan dan arus yang diberikan ke beban linier tidak mengalami distorsi dan tidak menimbulkan harmonisa. Contoh beban linier yaitu elemen pasif (resistor), lampu pijar, pemanas, dan lain-lain.



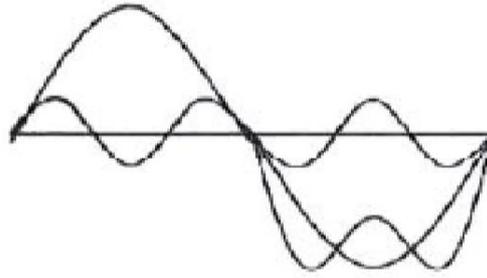
Gambar 2.1 Gelombang Sinus Arus dan Tegangan  
(Sumber: Hadi Sugiarto, 2012)

## 2. Beban Non-linier

Merupakan beban yang kebalikan dari beban linier. Memiliki impedansi yang tidak tetap pada tiap periode tegangan masukan sehingga menghasilkan arus yang tidak sebanding dengan tegangan yang diberikan. Sehingga, gelombang sinus pada beban non linier tidak berbanding lurus antara tegangan dan arusnya. Maka dari itu, beban non linier tidak sesuai dengan hukum ohm yang dimana arus berbanding lurus dengan tegangannya.

Tidak sesuainya beban non linier dengan hukum ohm, menghasilkan gelombang sinus yang tidak berbanding lurus antara gelombang arus dengan tegangannya. Adanya hal tersebut, akan mengakibatkan distorsi. Semakin ketidaksesuaian dengan hukum ohm, gelombang sinus akan semakin terdistorsi dan mendekati bentuk kotak.

Peralatan listrik yang termasuk ke dalam beban non-linier identik dengan adanya komponen elektronik. Adanya komponen elektronik akan menarik arus atau tegangan dengan bentuk non-sinus meskipun disuplai dengan arus atau tegangan sinus. Selain itu, peralatan listrik yang mempunyai bentuk sinus dengan frekuensi tinggi termasuk ke dalam beban non-linier. Bentuk gelombang yang non-sinus dan frekuensi yang tinggi itulah akan menyebabkan harmonisa yang berpengaruh pada sistem tenaga listrik.



Gambar 2.2 Gelombang Sinus Terdistorsi Harmonisa  
(Sumber: Surya, 2008)

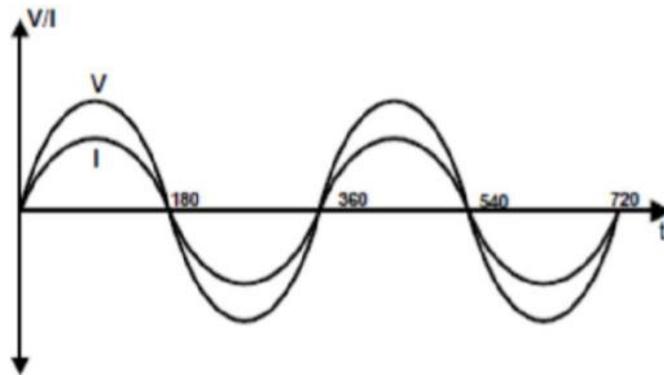
Beberapa beban non-linier yang biasa dipakai pada rumah tangga maupun industri yaitu:

1. Peralatan dengan Ferromagnetik
  - Transformator
  - Balast Magnetik
  - Motor Induksi dan lain-lain
2. Peralatan yang menggunakan busur api listrik
  - Mesin Las
  - *Electric Arc Furnace*
  - *Induction Furnace*
3. Konverter Elektronik
  - Penyearah (*Rectifier*)
  - *Charger*
  - Balast Elektronik

### 2.2.2 Sifat Beban Listrik

Beban listrik pada sumber arus mempunyai sifat yang dibedakan menjadi 3, yaitu:

1. Beban Resistif, beban yang mempunyai resistor murni seperti lampu pijar, pemanas, dan lain sebagainya. Beban resistif memiliki sifat yang pasif dan dapat menyerap daya aktif. Bila beban bersifat resistif murni, maka gelombang arus dan tegangan se-fase seperti gambar 2.3

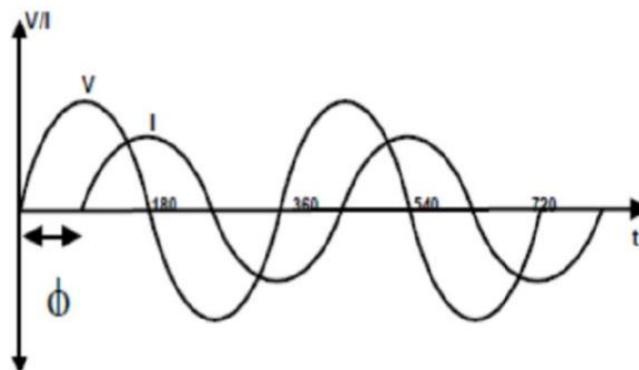


Gambar 2.3 Gelombang Resistif  
(Sumber: Onny Apriyahanda, 2015)

Secara perhitungan dinyatakan:

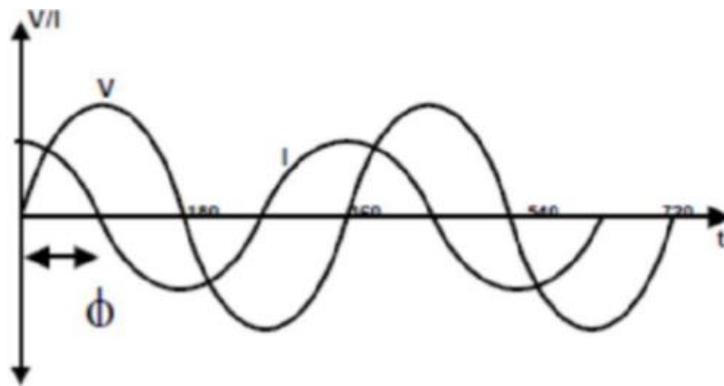
$$R = V / I$$

2. Beban Induktif, beban yang biasanya memiliki kumparan lilitan kawat pada sebuah inti besi lalu menyerap daya aktif dan reaktif contohnya motor listrik, transformator, dan lain sebagainya. Beban induktif dapat menggeser titik persilangan nol antara tegangan dan arus. Persilangan nol gelombang arus muncul setelah persilangan nol gelombang tegangan muncul, biasa disebut dengan *lagging*. Hal ini menyebabkan beban induktif juga mempunyai nilai faktor daya dari nol sampai satu. Bentuk gelombang seperti gambar 2.4



Gambar 2.4 Gelombang Induktif  
(Sumber: Onny Apriyahanda, 2015)

3. Beban Kapasitif, beban yang memuat rangkaian kapasitor pada sistem tenaga listrik AC. Seperti beban induktif, beban kapasitif juga dapat menggeser titik persilangan nol antara tegangan dan arus. Beban kapasitif kebalikan dari beban induktif, saat persilangan nol gelombang arus akan muncul sebelum persilangan nol gelombang tegangan, biasa disebut *leading*. Beban kapasitif juga mempunyai faktor daya yang nilainya berkisar antara nol sampai satu. Bentuk gelombang seperti gambar 2.5



Gambar 2.5 Gelombang Kapasitif  
(Sumber: Onny Apriyahanda, 2015)

### 2.2.3 Harmonisa

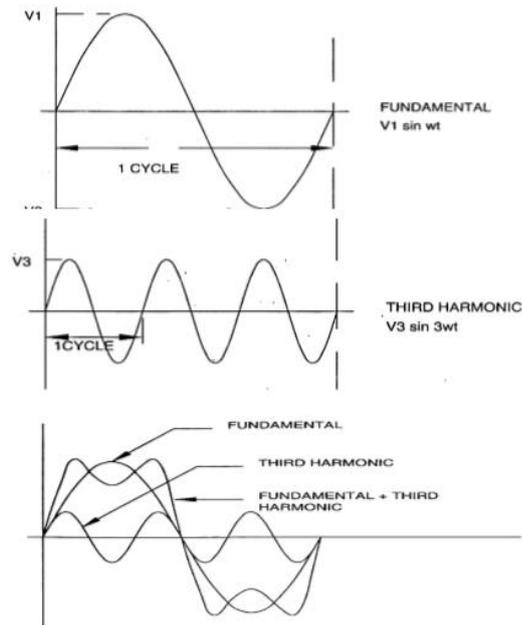
Idealnya gelombang tegangan dan arus yang ditransmisikan oleh sumber PLN memiliki gelombang sinus. Namun, pada saat sampai ke konsumen, terjadi gangguan bentuk gelombang sinus yang disebut dengan distorsi harmonik. Dr. Sudaryatno Sudirham mengatakan, “Penyediaan energi listrik pada umumnya dilakukan dengan menggunakan sumber tegangan berbentuk gelombang sinus. Arus yang mengalir diharapkan juga berbentuk gelombang sinus”.

Berdasarkan IEC (*International Electrotechnical Commission*) 6100-2-1-1990, harmonik didefinisikan dengan tegangan atau arus sinus yang memiliki kelipatan frekuensi pasokan sistem tenaga listriknya sebagaimana yang dirancang untuk beroperasi (50 Hz atau 60 Hz).

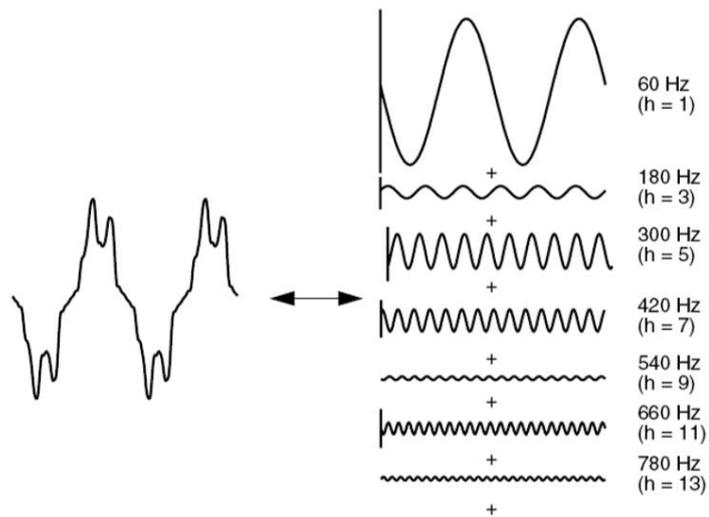
Menurut IEEE (*international of Electrical and Electronic Engineering*) Standar 1159-1995 mendefinisikan bahwa harmonik sebagai arus maupun tegangan sinus yang memiliki kelipatan dari frekuensi yang mana pasokan sistem tenaga listriknya dirancang untuk beroperasi frekuensi fundamental (50 Hz atau 60 Hz).

Jadi, bisa dikatakan bahwa harmonisa adalah pembentukan gelombang sinus tegangan maupun gelombang sinus arus yang frekuensi harmonisnya terbentuk dari hasil perkalian urutan harmonisa dengan frekuensi dasarnya. Ketika suatu gelombang harmonisa dengan gelombang fundamental mengalami superposisi, akan mempengaruhi bentuk gelombang sinus menjadi gelombang non-sinus. Fenomena ini disebut distorsi harmonik. Semakin bertambah gelombang harmonik maka semakin bertambah pula gelombang sinus yang mengalami distorsi sehingga bentuknya semakin menjauhi bentuk sinus, mendekati bentuk persegi. Nilai frekuensi yang berasal dari gelombang harmonik merupakan hasil kali antara frekuensi fundamental dengan bilangan harmoniknya. Bentuk gelombang yang terdistorsi merupakan hasil dari penjumlahan gelombang harmonik dengan gelombang fundamental pada frekuensi kelipatannya.

Harmonisa ada dua macam, harmonisa arus dan tegangan. Menurut orde urutan harmonisa, dibagi menjadi dua, harmonisa orde ganji (*odd*) seperti harmonisa ke-3, 5, 7, 9, dan seterusnya, lalu orde genap (*even*) seperti harmonisa ke-2, 4, 6, 8, dan seterusnya. Urutan harmonisa pertama atau kesatu, merupakan gelombang asli pada frekuensi fundamentalnya. Menurut urutan fasanya dibagi menjadi tiga yaitu harmonisa urutan negatif dimana mempunyai fasa yang berlawanan dengan gelombang asli frekuensi fundamentalnya. Harmonisa urutan nol tidak memiliki pengaruh pada putaran medan tetapi menghasilkan panas pada sistem dan komponen. Harmonisa urutan positif memiliki fasa yang sama dengan gelombang asli.



Gambar 2.6 Gelombang Fundamental, Harmonik Ketiga dan Hasil Penjumlahannya  
(Sumber: Hadi Sugiarto, 2012)



Gambar 2.7 Gelombang terdistorsi direpresentasikan dalam deret *Fourier*  
(Sumber: Wahri Sunanda dan Rika Favoria Gusa, 2012)

### 2.2.4 Orde Harmonik

Orde harmonik adalah perbandingan frekuensi harmonik dengan frekuensi dasar, dimana persamaan sebagai berikut:

$$n = \frac{f_n}{F} \dots\dots\dots (1)$$

- Keterangan: n = orde harmonik  
f<sub>n</sub> = frekuensi harmonik ke-n  
F = frekuensi dasar / fundamental

Frekuensi dasar / fundamental yaitu orde ke-1. Maka dari itu, orde ke-1 bukanlah termasuk harmonik. Harmonik dianggap mulai dari orde ke-2 hingga orde ke-n.

### 2.2.5 Total Harmonic Distortion

*Total Harmonic Distortion* (THD) adalah nilai total distorsi harmonik dari perbandingan antara arus / tegangan pada semua orde harmonik dengan arus / tegangan pada frekuensi fundamental yang dinyatakan dalam persen (%). Nilai THD dijadikan sebagai mengukur besarnya penyimpangan dari bentuk gelombang periodic yang mengandung harmonisa dari gelombang sinusoidal.

Nilai THD dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} X_n^2}}{X_1} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

- Keterangan:  
THD = *Total Harmonic Distortion*  
X<sub>n</sub> = Nilai RMS dari arus atau tegangan harmonisa ke-n  
X<sub>1</sub> = Nilai RMS dari arus atau tegangan pada frekuensi dasar (fundamental)

### 2.2.7 Total Demand Distortion

*Total Demand Distortion* adalah Perbedaan  $TDD_I$  dengan  $THD_I$  adalah permintaan distorsi arus harmonisa yang dihitung terhadap beban penuh sistem kelistrikan. TDD memberi kita wawasan yang lebih baik tentang seberapa besar dampak distorsi harmonik dalam sistem kita. Misalnya kita bisa memiliki THD yang sangat tinggi tetapi beban pada sistem kelistrikannya rendah. Contoh lain yaitu ketika *charge* laptop disambungkan ke kotak kontak namun tidak terhubung ke laptop, nilai  $THD_I$  tinggi tapi setelah dihubungkan ke laptop, nilai  $THD_I$  akan menurun. Oleh karena itu, pengukuran TDD lebih baik dari THD.

Nilai  $TDD_I$  dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_L} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

$TDD$  = *Total Demand Distortion*

$I_n$  = Nilai RMS dari arus ke-n

$I_L$  = Nilai arus beban maksimum

### 2.2.6 Standar Harmonik

Standar hamonik yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada standar harmonik yang dikeluarkan oleh IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 519-1992. Standar dari IEEE 519-1992 memuat batas *Total Harmonic Distortion Current* ( $THD_I$ ), *Total Demand Distortion* ( $TDD_I$ ) dan *Total Harmonic Distortion Voltage* ( $THD_V$ ).

Batas  $TDD_I$  memiliki batas berdasarkan nilai perbandingan dengan rumus  $\frac{I_{SC}}{I_L}$ , yaitu antara ( $I_{SC}$ ) arus hubung singkat pada PCC (*Point of Common Coupling*) dengan ( $I_L$ ) arus beban maksimum. Batas  $THD_I$  dilihat berdasarkan persentase orde  $THD_I$  yang berdasarkan IEEE 519-1992 ditunjukkan pada tabel 2.1:

Tabel 2.1 Standar IEEE 519-1992 THD<sub>i</sub> dan TDD<sub>i</sub>

$I_{sc}/I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<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%

Batas harmonisa tegangan ditentukan dari besarnya tegangan yang bekerja pada sistem. Batas distorsi tegangan yang diakibatkan harmonisa berdasarkan IEEE 519-1992 ditunjukkan pada tabel 2.2:

Tabel 2.2 Standar IEEE THD Tegangan

<i>Nominal Voltage</i>	<i>Individual Harmonic Order</i>	THD
$V \leq 69 \text{ kV}$	3,0 %	5,0 %
$69 \text{ kV} < V < 161 \text{ kV}$	1,5 %	2,5 %
$V \geq 161 \text{ kV}$	1,0 %	1,5 %

### 2.2.8 Dampak Harmonik

#### a. Jangka Pendek

- Tegangan harmonik dapat mengganggu peralatan kontrol yang terpasang pada sistem.
- Dapat menyebabkan kesalahan pada akurasi pengukuran pada alat ukur listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik.
- Dapat mengganggu alat proteksi dalam sistem tenaga listrik.
- Menyebabkan getaran dan suara bising pada mesin yang berputar seperti generator dan motor.
- Menyebabkan gangguan pada sistem telekomunikasi.

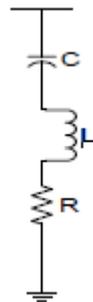
#### b. Jangka Panjang

- Kapasitor bank mengalami peningkatan suhu.
- Naiknya rugi inti belitan pada mesin-mesin listrik karena mengalami kenaikan suhu.

- Pada transformator akan mengakibatkan kerugian daya serta timbulnya resonansi parallel pada sistem karena mengalami kenaikan suhu.

### 2.2.9 Filter Harmonik

Filter harmonik dipergunakan untuk mereduksi atau memperkecil harmonisa yang muncul pada sistem kelistrikan. Salah satu filter harmonik adalah filter Pasif *Single-Tuned*. Mereduksi harmonisa arus atau tegangan pada orde frekuensi tertentu menggunakan filter pasif *Single Tuned*. Filter pasif *Single Tuned* berkerja dengan cara resonansi, maksudnya adalah dengan menurunkan impedansi sampai sekecil mungkin pada frekuensi yang dituju dan hanya ada satu orde saja yang akan dituju untuk diturunkannya impedansi tersebut.



Gambar 2.8 Filter Harmonisa Pasif *Single-Tuned*

Filter harmonisa ditambahkan pada sistem tenaga listrik yang mengandung harmonisa, dengan begitu harmonisa arus dan harmonisa tegangan dapat diperkecil penyebarannya ke jaringan listrik. Perhitungan untuk menentukan spesifikasi filter *Pasif Single-Tuned* dengan rumus sebagai berikut:

- Resistor

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

$V$  = Tegangan ideal antar fasa

$I$  = Arus hamonisa orde ke-n

$R$  = Resistor

- *Rating* daya resistor

$$P = V \times I \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

$P$  = Resistor

$V$  = Tegangan ideal antar fasa

$I$  = Arus harmonisa orde ke-n

- Q Faktor

$$X_L = X_C = X_n$$

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

$$X_n = Q \times R \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan :

$X_n$  = Reaktansi pada orde (n)

$X_L$  = Reaktansi Induktif

$X_L$  = Reaktansi Induktif

$Q$  = Faktor Kualitas Filter

- Induktansi Induktor Filter

$$X_L = \omega L$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi F} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan:

$L$  = Induktansi

$X_L$  = Reaktansi Induktif

$F$  = Frekuensi orde ke-n

- Kapasitansi Kapasitor Filter

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi F} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan :

$C$  = Kapasitansi

$X_C$  = Reaktansi Kapasitif

$F$  = Frekuensi orde ke-n