



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN SECOND ORDER DAMPED FILTER  
UNTUK MEREDUKSI MASALAH HARMONIK PADA BEBAN  
NON-LINEAR MENGGUNAKAN ETAP POWER STATION  
7.0.0**

**SKRIPSI**

**VELAYATI PUSPA PERTIWI**

**0806319236**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN SECOND ORDER DAMPED FILTER  
UNTUK MEREDUKSI MASALAH HARMONIK PADA BEBAN  
NON-LINEAR MENGGUNAKAN ETAP POWER STATION  
7.0.0**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**VELAYATI PUSPA PERTIWI**

**0806319236**


**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Velayati Puspa Pertiwi

NPM : 0806319236

Tanda Tangan:  .....

Tanggal : 5 Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Velayati Puspa Pertiwi  
NPM : 0806319236  
Program studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : PERANCANGAN SECOND ORDER  
DAMPED FILTER UNTUK MEREDUKSI  
MASALAH HARMONIK PADA BEBAN  
NON-LINEAR MENGGUNAKAN ETAP  
POWER STATION 7.0.0

Telah berhasil dipertahankan di depan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### Dewan Penguji

Pembimbing : Ir. Amien Rahardjo, M.T

()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA

()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M. K. M.T.

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 5 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya ucapkan kepada Allah SWT yang dengan rahmat-Nyalah penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Atas proses penulisan skripsi ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

- 1) Ir. Amien Rahardjo, M.T, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 2) Kedua orang tua, kakak dan adik penulis Agung Dwi Rahmanto, S.Pd., Nadzif Pujarini S, Pd., Luthfi Mustika Sekarina, SH., Aghni Wirdha Hutamingrum yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral, inspirasi, semangat, dan selalu memberikan motivasi dalam menyelesaikan skripsi dan kuliah penulis; dan
- 3) Ian Herahman dan teman-teman seperjuangan di Departemen Teknik Elektro angkatan 2008 yang telah banyak memberi dukungan sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh sebab itu, dengan segala kerendahan hati, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk melengkapi kekurangan yang ada dalam penulisan skripsi ini khususnya dan meningkatkan pengetahuan saya pada umumnya. Akhirnya penulis sangat berharap agar skripsi ini dapat berguna dan memberikan manfaat di kemudian hari.

Depok, 11 Juni 2012



Velayati Puspa Pertiwi

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Velayati Puspa Pertiwi  
NPM : 0806319236  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**PERANCANGAN SECOND ORDER DAMPED FILTER UNTUK  
MEREDUKSI MASALAH HARMONIK PADA BEBAN NON-LINEAR  
MENGUNAKAN ETAP POWER STATION 7.0.0**

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Kampus UI Depok

Pada tanggal : 11 Juni 2012

Yang menyatakan,



(Velayati Puspa Pertiwi)

## ABSTRAK

Nama : Velayati Puspa Pertiwi  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : **PERANCANGAN SECOND ORDER DAMPED FILTER UNTUK MEREDUKSI MASALAH HARMONIK PADA BEBAN NON-LINEAR MENGGUNAKAN ETAP POWER STATION 7.0.0**

Harmonik merupakan permasalahan yang terdapat pada sistem tenaga listrik. Harmonik dapat menyebabkan gelombang arus maupun tegangan menjadi tidak sinusoidal. Sumber harmonik berasal dari beban-beban non-linear, yang sering terdapat pada beban rumah tangga. Untuk mengatasi permasalahan harmonik dapat menggunakan sebuah filter pasif. Pada penelitian ini akan didesain suatu *second order damped filter* untuk mengurangi distorsi harmonik. Dengan melakukan pengukuran pada beban-beban rumah tangga, maka dapat diketahui karakteristik THD (*Total Harmonic Distortion*) arus dan tegangan tiap beban berbeda. Setelah mendapat data-data dari pengukuran, akan dilakukan perhitungan untuk menentukan spesifikasi dari filter yang kemudian akan disimulasikan pada program ETAP POWER STATION 7.0.0.

**Kata Kunci:** *Harmonik, beban non-linear, beban rumah tangga, filter pasif, second order damped filter*

## ABSTRACT

Nama : Velayati Puspa Pertiwi  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : **SECOND ORDER DAMPED FILTER DESIGN TO REDUCE HARMONIC PROBLEM ON NON-LINEAR LOAD USING ETAP POWER STATION 7.0.0**

Harmonics are a problem in Electrical Power Systems. It will causes the distortion both of current and voltage due to non linear load. To reduce the harmonics, it will need a passive filter. In this research a second order damped filter has designed to reduce the harmonic distortion in household load. By measuring households load, it can recognized the different characteristics of current and voltage THD (Total Harmonic Distortion). Based on the result data of measurement, calculations will be performed to determine the specifications of the filter which will then be simulated in the program ETAP POWER STATION 7.0.0.

**Key Words:** *Harmonic, non-linear load ,household load, passive filter, second order damped filter*

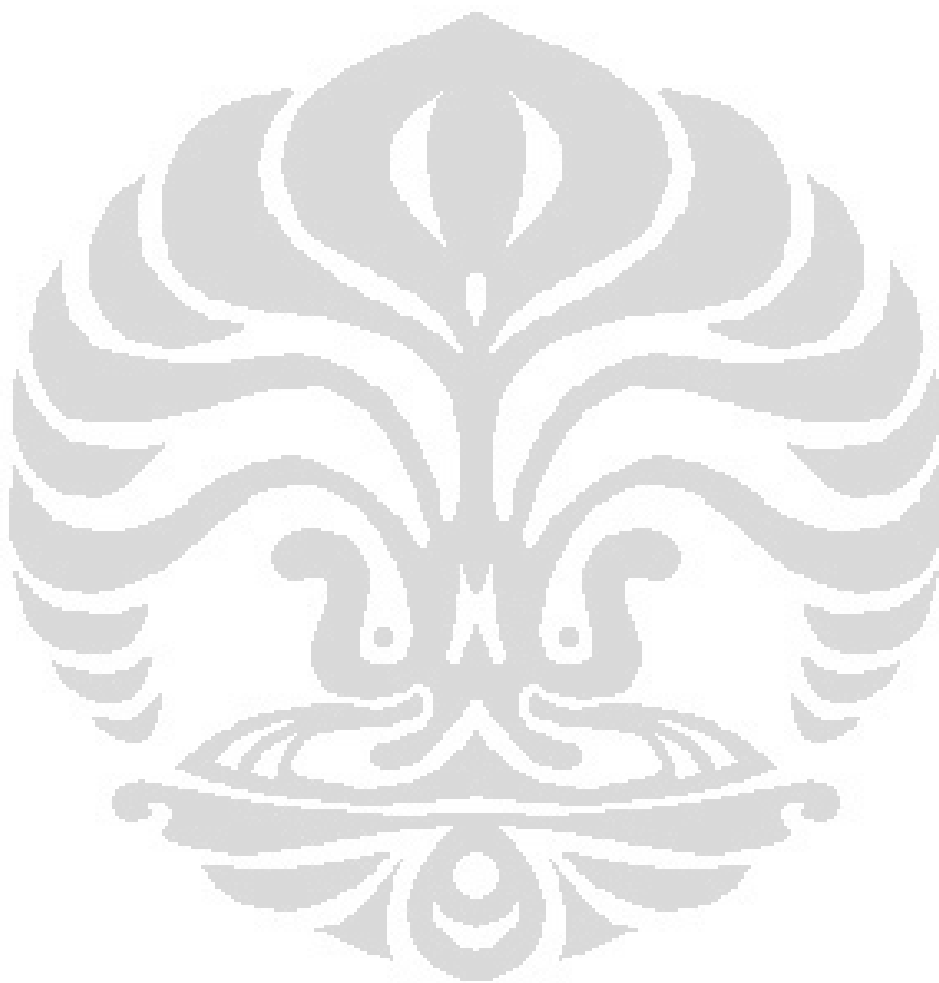


## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xii</b>
<b>BAB 1.....</b>	<b>1</b>
<b>PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	2
1.3. Pembatasan Masalah.....	2
1.4. Metodologi Penelitian.....	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB 2.....</b>	<b>4</b>
<b>DASAR TEORI.....</b>	<b>4</b>
2.1. Distorsi Harmonik.....	4
2.2. Istilah-Istilah Pada Harmonik.....	6
2.2.1. Komponen Harmonik.....	6
2.2.2. Orde Harmonik.....	6
2.2.3. Spektrum Harmonik.....	7
2.2.4. Individual Harmonic Distortion (IHD).....	7
2.2.5. Total Harmonic Distortion (THD).....	8
2.2.6. Total Demand Distortion (TDD).....	8
2.2.7. Nilai RMS.....	9
2.3. Kuantitas Listrik Pada Kondisi Non-Sinusoidal.....	9
2.4. Penyebab Harmonik.....	11
2.5. Akibat Yang Ditimbulkan Harmonik.....	13

2.5.1. Efek Khusus Harmonik Pada Sistem Tenaga Listrik.....	13
2.5.2. Triplen Harmonik .....	17
2.5.3. Urutan Fasa Harmonik.....	18
2.6. Dasar Pengontrolan Harmonik.....	20
2.7. Filter Harmonik.....	21
2.7.1. Identifikasi Harmonik.....	22
2.7.2. Desain Filter Harmonik .....	24
2.7.3. Kriteria Desain Filter .....	25
2.7.4. Desain Second Order Damped Filter .....	26
2.7.5. Batasan Komponen Filter .....	27
<b><u>BAB 3 .....</u></b>	<b><u>29</u></b>
<b><u>OBJEK DAN PROSEDUR PENGUKURAN.....</u></b>	<b><u>29</u></b>
3.1. Objek Pengukuran.....	29
3.2. Peralatan Pengukuran.....	30
3.3. Rangkaian Pengukuran .....	31
3.4. Prosedur Pengukuran .....	32
<b><u>BAB 4 .....</u></b>	<b><u>33</u></b>
<b><u>PERANCANGAN SECOND ORDER DAMPED FILTER.....</u></b>	<b><u>33</u></b>
4.1. Simulasi ETAP POWER STATION 7.0.0.....	33
4.2. Perancangan Second Order Damped Filter Untuk Masing-masing Beban .....	34
4.2.1. Spesifikasi Filter Untuk Beban Lampu LHE.....	40
4.2.2. Spesifikasi Filter Untuk Beban TV.....	46
4.2.3. Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas.....	49
4.2.4. Spesifikasi Filter Untuk Beban AC .....	55
4.2.5. Spesifikasi Filter Untuk Beban Dispenser.....	58
4.2.6. Spesifikasi Filter Untuk Beban Komputer.....	61
4.3. Pemasangan Second Order Damped Filter Untuk Masing-masing Beban .....	67
4.4. Analisa Arus dan Tegangan Harmonik Dari Simulasi.....	68
4.5. Arus dan Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan Filter .....	70
4.6. Analisa Kerja Filter Terhadap Hasil Simulasi .....	71

<b>BAB 5 .....</b>	<b>74</b>
<b>KESIMPULAN.....</b>	<b>74</b>
<b>DAFTAR ACUAN.....</b>	<b>75</b>
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>76</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>77</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gelombang frekuensi dasar, gelombang frekuensi harmonik ke 3,5,7 dan hasil distorsi harmonik .....	4
Gambar 2.2 Representasi deret Fourier dari gelombang yang terdistorsi .....	6
Gambar 2.3 Spektrum harmonik .....	7
Gambar 2.3 Hubungan Komponen Daya pada Kondisi Non-Sinusoidal .....	10
Gambar 2.5 Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Linier .....	11
Gambar 2.6 Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Non-Linier .....	11
Gambar 2.7 Pemodelan beban non-linier sebagai sumber harmonik .....	12
Gambar 2.7 (a) Model Gelombang Dasar .....	12
Gambar 2.7 (b) Model Gelombang Harmonik .....	12
Gambar 2.8 Arus netral pada sistem Wye-Grounded akibat Triplen Harmonik...	18
Gambar 2.9 Rangkaian Filter Beserta Konfigurasi dan Impedansinya .....	25
Gambar 2.10 (a). Rangkaian Second Order Damped Filter .....	26
Gambar 2.10 (b). Kurva Impedansi Terhadap Frekuensi .....	26
Gambar 3.2 Hioki Power Analyzer 3169-20 .....	31
Gambar 3.3 Rangkaian Pengukuran .....	31
Gambar 4.1 Flowchart simulasi .....	33
Gambar 4.2 Rangkaian pembebanan rumah tangga pada simulasi ETAP .....	34
Gambar 4.3 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban LHE .....	43
Gambar 4.4 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban TV .....	49
Gambar 4.5 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban Kulkas .....	52
Gambar 4.6 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban AC .....	58
Gambar 4.7 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban Dispenser .....	61
Gambar 4.8 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban Komputer .....	64
Gambar 4.9 Penempatan <i>second order damped filter</i> pada masing-masing beban .....	68
Gambar 4.10 THDi Sebelum dan Sesudah Pemakaian Filter .....	69
Gambar 4.11 THDv Sebelum dan Sesudah Pemakaian Filter .....	70
Gambar 4.12 Model Sistem Filter Dalam Simulasi .....	72

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Urutan Fasa Harmonik .....	18
Tabel 2.2 Akibat Dari Polaritas Komponen Harmonik.....	19
Tabel 2.3 Batas Distorsi Tegangan Maksimum .....	23
Tabel 2.3 Batas Distorsi Arus Harmonik Maksimum .....	23
Tabel 3.1 Spesifikasi Beban Objek Pengukuran .....	30
Tabel 4.1 Rata-rata Harmonik Tegangan Pada Tiap Beban.....	35
Tabel 4.2 Rata-rata Harmonik Arus Pada Tiap Beban.....	37
Tabel 4.3 Beban Total Lampu LHE .....	40
Tabel 4.4 Spesifikasi Filter Untuk Beban LHE.....	42
Tabel 4.5 Karakteristik <i>utility system</i> .....	44
Tabel 4.6 Perbandingan Batasan Kerja Filter.....	46
Tabel 4.7 Daya Beban Total TV.....	46
Tabel 4.8 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas .....	48
Tabel 4.9 Daya Beban Total Kulkas.....	49
Tabel 4.10 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas .....	51
Tabel 4.11 Karakteristik <i>utility system</i> .....	53
Tabel 4.12 Perbandingan Batasan Kerja Filter.....	55
Tabel 4.13 Daya Total Beban AC .....	55
Tabel 4.14 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas .....	57
Tabel 4.15 Daya Total Beban Dispenser.....	58
Tabel 4.16 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas .....	60
Tabel 4.17 Daya Total Beban Komputer.....	61
Tabel 4.18 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas .....	63
Tabel 4.19 Karakteristik <i>utility system</i> .....	65
Tabel 4.20 Perbandingan Batasan Kerja Filter.....	67
Tabel 4.21 Total Harmonic Distortion Arus dan Tegangan Sebelum dan Sesudah Filter .....	68
Tabel 4.22 Arus Fundamental dan RMS Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter .....	70
Tabel 4.23 Tegangan Fundamental dan RMS Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter .....	71

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kemajuan teknologi akhir-akhir ini telah memberi banyak pengaruh terhadap berbagai bidang, salah satunya pada sistem tenaga listrik. Dengan semakin berkembangnya teknologi saat ini, banyak memunculkan beban-beban listrik baru yang memiliki karakteristik listrik yang baru juga. Hal tersebut ternyata berpengaruh pada sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menyuplai energi listrik ke konsumen. Salah satu pengaruhnya adalah pada permasalahan kualitas daya listrik yang akan dihantarkan.

Kualitas daya listrik memiliki tiga penting, yaitu tegangan, arus, dan frekuensi listrik. Bentuk-bentuk penyimpangan nilai tegangan, arus, dan frekuensi listrik dapat memperburuk kualitas daya listrik yang dihantarkan ke konsumen. Kualitas daya yang buruk akan menimbulkan banyak kerugian bagi perusahaan penyedia listrik dan juga pada konsumen. Salah satu permasalahan kualitas daya listrik adalah permasalahan harmonik.

Dalam sistem tenaga listrik terdapat beban linear dan beban non-linear. Beban linear memiliki bentuk gelombang yang sinusoidal, sedangkan beban non-linear memiliki bentuk gelombang yang non-sinusoidal karena telah mengalami distorsi harmonik. Beban non-linear ini biasanya terdapat pada peralatan-peralatan seperti motor berputar, transformator, peralatan elektronika daya, ballast lampu penerangan, komputer, dan peralatan yang memiliki bahan semikonduktor lainnya. Selain itu, beban non-linear juga terdapat pada beban untuk industri yang memerlukan energi listrik yang besar, beban perkantoran, dan juga beban rumah tangga. Distorsi harmonik ini yang timbul akibat beban-beban non-linear yang terpasang pada jaringan listrik.

Harmonik merupakan suatu fenomena yang timbul akibat terdistorsinya gelombang sinusoidal secara periodik, yang disebabkan oleh pengoperasian beban-beban non-linear. Pada dasarnya, harmonik merupakan gejala pembentukan gelombang dengan frekuensi yang bukan frekuensi dasarnya. Frekuensi yang

terbentuk adalah perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Gelombang harmonik ini menumpang pada gelombang dasarnya sehingga terbentuk gelombang yang terdistorsi. Gelombang tegangan atau arus yang sinusoidal menjadi nonsinusoidal karena adanya distorsi harmonik ini.

Distorsi harmonik terutama harmonik arus merupakan salah satu permasalahan kualitas daya listrik yang memiliki pengaruh besar terhadap kinerja suatu sistem tenaga listrik. Permasalahan ini selain dapat merusak dan memperpendek umur peralatan juga dapat menyebabkan terjadinya pemborosan energi akibat komponen seperti daya, faktor daya, tegangan, dan arus yang menyimpang dari kondisi idealnya. Selain itu, distorsi harmonik dapat berpengaruh terhadap perhitungan alat ukur KWH meter yang menyebabkan kerugian pada konsumen.

Dengan semakin meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia dan otomatis akan membutuhkan energi listrik yang besar pula. Distorsi harmonik yang terjadi akan juga sangat besar. Oleh karena itu, perlu adanya identifikasi distorsi harmonik oleh penyedia jasa listrik sehingga dapat dianalisa dan dapat dicari solusi masalah harmonik ini dalam rangka menjaga kualitas daya listrik yang dihantarkan.

## **1.2. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk mengurangi atau mereduksi masalah harmonik, yaitu harmonik arus dan juga harmonik tegangan pada peralatan listrik dengan menggunakan filter pasif jenis *second order damped filter* pada ETAP POWER STATION 7.0.0.

## **1.3. Pembatasan Masalah**

Pada skripsi ini hanya akan dibahas tentang perancangan suatu filter pasif harmonik yang berupa *Second Order Damped Filter* untuk mengurangi atau mereduksi masalah harmonik pada beberapa peralatan listrik. Perancangan filter ini akan disimulasikan dan diuji kinerjanya dengan menggunakan suatu program ETAP POWER STATION 7.0.0

#### 1.4. Metodologi Penelitian

Metodologi penulisan skripsi ini pada awalnya ada mengidentifikasi distorsi harmonik yang terjadi. Dari identifikasi tersebut, dilakukan studi literatur untuk merancang filter pasif yang diinginkan sehingga bisa diuji kinerjanya dengan cara mensimulasikan pada suatu program ETAP POWER STATION 7.0.0.

#### 1.5. Sistematika Penulisan

Pada penulisan skripsi ini dibagi dalam lima bab. Bab Satu berisi tentang latar belakang, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan pada skripsi ini ; Bab Dua membahas mengenai pengertian, penyebab, akibat, dan sumber harmonik pada suatu sistem tenaga listrik serta perancangan filter pasif harmonik sebagai salah satu solusi untuk mengurangi permasalahan distorsi harmonik ; Bab Tiga berisi tentang alat, objek, dan prosedur pengukuran di laboratorium ; Bab Empat membahas mengenai perancangan filter pasif harmonik (*Second Order Damped Filter*) dan analisisnya terhadap beban-beban non-linear yang diuji ; Bab Lima merupakan kesimpulan dari skripsi ini.



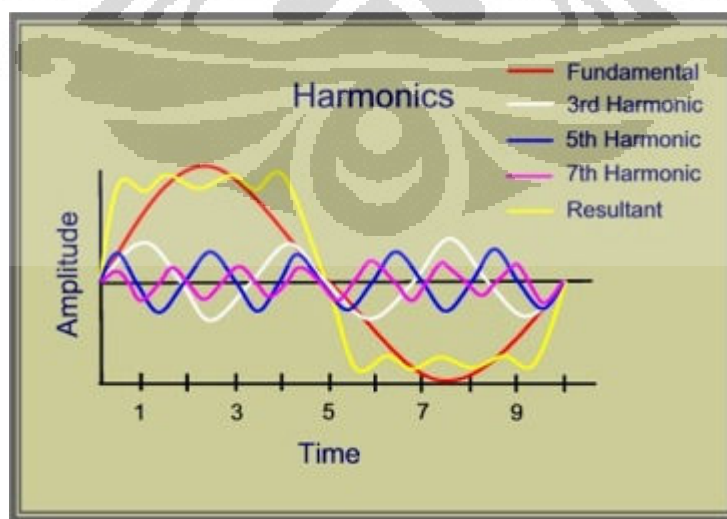
## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1. Distorsi Harmonik

Pada dasarnya, gelombang tegangan dan arus yang ditransmisikan dari sumber ke beban merupakan gelombang sinusoidal murni. Namun pada kenyataannya, selama proses transmisi dan distribusi tersebut terjadi berbagai gangguan yang menyebabkan bentuk gelombang menjadi tidak sinusoidal murni. Fenomena penyimpangan bentuk gelombang sinusoidal merupakan distorsi harmonik.

Menurut *Gary W. Chang*, Harmonik dapat dinyatakan sebagai suatu komponen sinusoidal dari gelombang berkala yang mempunyai suatu frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasarnya. Harmonik merupakan gejala pembentukan gelombang sinusoidal dengan frekuensi yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Bila terjadi superposisi antara gelombang frekuensi dasar dengan gelombang frekuensi harmonik maka akan terbentuk gelombang yang terdistorsi sehingga bentuk gelombang tidak lagi sinusoidal atau biasa kita sebut dengan distorsi harmonik.



Gambar 2.1 Gelombang frekuensi dasar, gelombang frekuensi harmonik ke 3,5,7 dan hasil distorsi harmonik

Penjumlahan dari gelombang-gelombang sinusoidal di atas dapat dianalisis dengan menggunakan deret Fourier. Fourier menyatakan bahwa setiap fungsi periodik yang berulang dalam interval waktu T dapat direpresentasikan sebagai penjumlahan dari komponen sinusoidal fundamental dengan komponen deret harmoniknya pada frekuensi yang merupakan hasil kali antara bilangan bulat (integer) dengan frekuensi fundamentalnya. Deret Fourier dapat dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n 2\pi ft - \varphi_n) \quad (2.1)$$

Dimana :

$Y_0$  = amplitudo dari komponen DC dimana biasanya dalam jaringan distribusi bernilai nol

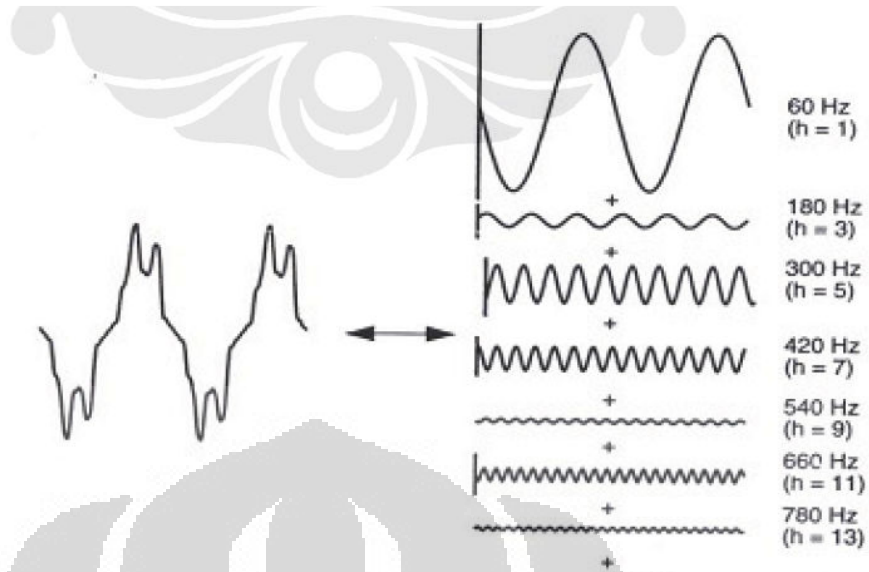
$Y_n$  = nilai rms dari harmonik komponen ke- $n$

$f$  = frekuensi dasar (50 Hz)

$\varphi_n$  = sudut fasa dari komponen harmonik ke- $n$

$n$  = orde harmonik

Persamaan deret Fourier di atas dapat digunakan untuk memecah gelombang yang telah terdistorsi menjadi gelombang dasar dan gelombang harmonik. Hal ini merupakan dasar dalam menganalisa harmonik pada sistem tenaga listrik. Bentuk gelombang tegangan dan arus yang terdistorsi dapat diperoleh dengan menjumlahkan secara aljabar gelombang dasar (yang dibangkitkan oleh pembangkit) dengan gelombang-gelombang harmonik yang mempunyai frekuensi, amplitudo, dan sudut fasa yang bervariasi. Analisis Fourier telah digunakan untuk menganalisis amplitudo dan frekuensi dari gelombang yang terdistorsi. Representasi deret Fourier dari suatu gelombang yang terdistorsi dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.2 Representasi deret Fourier dari gelombang yang terdistorsi

## 2.2. Istilah-Istilah Pada Harmonik

Berikut ini beberapa pengertian dan persamaan yang terdapat dalam analisis harmonik

### 2.2.1. Komponen Harmonik

Komponen Harmonik atau yang biasa disebut harmonik merupakan gelombang sinusoidal yang mempunyai frekuensi perkalian antara bilangan bulat dengan frekuensi dasar.

### 2.2.2. Orde Harmonik

Orde harmonik adalah perbandingan antara frekuensi harmonik dengan frekuensi dasar, dapat didefinisikan dengan persamaan berikut :

$$n = \frac{f_n}{F} \quad (2.2)$$

Dimana :

$n$  = orde harmonik

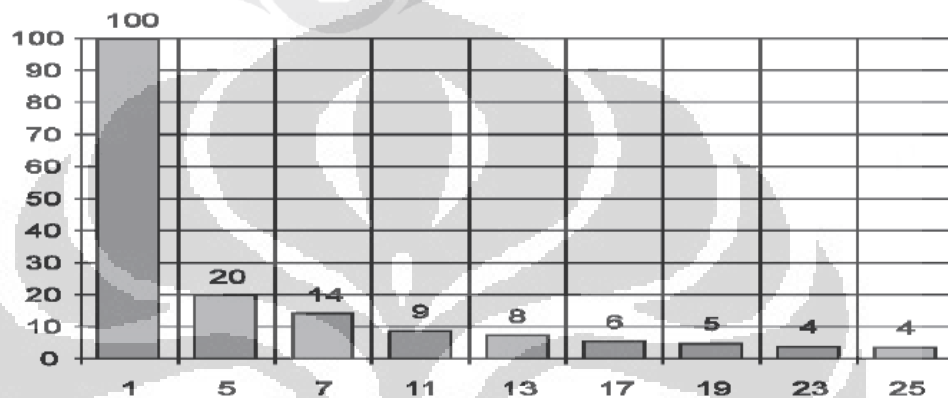
$f_n$  = frekuensi harmonik ke- $n$

$F$  = frekuensi dasar

Gelombang dengan frekuensi dasar tidak dianggap sebagai harmonik, yang dianggap sebagai harmonik adalah orde ke-2 sampai ke- $n$ .

### 2.2.3. Spektrum Harmonik

Spektrum harmonik merupakan distribusi dari semua amplitudo komponen harmonik sebagai fungsi dari orde harmoniknya, dan dapat diilustrasikan menggunakan histogram berikut :



Gambar 2.3 Spektrum harmonik

Dari gambar di atas, dapat dikatakan bahwa spektrum harmonik merupakan perbandingan arus atau tegangan frekuensi harmonik terhadap frekuensi dasar. Spektrum harmonik digunakan sebagai dasar perancangan filter yang akan digunakan untuk mereduksi harmonik.

### 2.2.4. Individual Harmonic Distortion (IHD)

*Individual Harmonic Distortion (IHD)* merupakan rasio tegangan atau arus antara nilai RMS harmonik dengan nilai RMS dasar (*fundamental*), dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$IHD_h = \sqrt{\frac{M_h^2}{M_1^2}} \quad (2.3)$$

Dimana :

$IHD_h$  = IHD orde harmonik ke- $h$  ( $h = 2,3,4,5,\dots,n$ )

$M_h$  = nilai RMS arus atau tegangan harmonik ke- $h$

$M_1$  = nilai RMS arus atau tegangan dasar

### 2.2.5. Total Harmonic Distortion (THD)

THD menyatakan besarnya distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonik, dan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_n^2}}{M_1} \quad (2.4)$$

Dimana :

THD = *Total Harmonic Distortion*

$M_n$  = nilai rms arus atau tegangan harmonik ke- $n$

$M_1$  = nilai rms arus atau tegangan pada frekuensi dasar

THD juga dapat dinyatakan sebagai suatu nilai potensi pemanasan harmonik relatif terhadap gelombang frekuensi dasar.

### 2.2.6. Total Demand Distortion (TDD)

Tingkat distorsi arus dapat dilihat berdasarkan nilai THD, namun hal tersebut bisa saja salah saat diinterpretasikan. Aliran arus yang kecil dapat memiliki nilai THD yang tinggi namun tidak menjadi ancaman yang dapat merusak sistem. Beberapa analisis mencoba untuk menghindari kesulitan seperti ini dengan melihat THD pada arus beban puncak frekuensi dasar dan bukan melihat sampel sesaat pada frekuensi dasar. Hal ini disebut *Total Demand Distortion (TDD)* atau *Distorsi Permintaan Total* dan masuk ke dalam standar IEEE 519-1991, tentang “*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*”. TDD dapat didefinisikan melalui persamaan berikut [1] :

$$TDD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{h_{\max}} I_n^2}{I_L}} \quad (2.5)$$

Dimana :

$I_n$  = arus harmonik orde ke- $n$

$I_L$  = arus beban puncak pada frekuensi dasar yang diukur pada PCC (*Point of Common Coupling*)

Terdapat dua cara untuk mengukur nilai  $I_L$ , pertama yaitu pada beban yang telah terpasang pada sistem lalu dihitung nilai rata-rata dari arus beban maksimum dari 12 bulan pengukuran. Sedangkan untuk sistem yang baru,  $I_L$  harus diperkirakan berdasarkan profil beban yang akan dipasang.

### 2.2.7. Nilai RMS

Nilai rms yang dihasilkan oleh gelombang arus atau tegangan yang terdistorsi harmonik dapat didefinisikan melalui persamaan berikut [1] :

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.6)$$

Dimana :  $M_h$  = nilai rms dari arus atau tegangan ke-h

### 2.3. Kuantitas Listrik Pada Kondisi Non-Sinusoidal

Distorsi harmonik dapat menghasilkan suatu gelombang non-sinusoidal hasil superposisi gelombang pada frekuensi dasar dengan gelombang harmoniknya. Oleh karena itu, kuantitas listrik seperti arus dan tegangan pada kondisi non-sinusoidal juga harus diperhitungkan komponen harmoniknya. Untuk nilai rms arus dan tegangan pada saat kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2} = \sqrt{Y_1^2 + Y_h^2} \quad (2.7)$$

Dimana :

$Y_{rms}$  = tegangan atau arus pada kondisi non-sinusoidal

$T$  = periode  $v(t)$  dan  $i(t)$

$Y_1$  = tegangan atau arus pada frekuensi dasar

Pada dasarnya, daya listrik yang ditransmisikan dari sumber ke beban adalah daya kompleks (S). Dalam daya kompleks tersebut terdapat komponen daya aktif (daya nyata/P) yang merupakan daya yang diserap oleh beban untuk melakukan kerja yang sesungguhnya dan juga daya reaktif (Q) yaitu daya yang

tidak terlihat sebagai kerja nyata dan biasanya dipengaruhi oleh komponen reaktif seperti induktor.

Daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan juga daya kompleks (S) pada kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \text{ Watt} \quad (2.8)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \text{ VAR} \quad (2.9)$$

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (2.10)$$

Dimana :

P = daya aktif pada kondisi non-sinusoidal (Watt)

Q = daya reaktif pada kondisi non-sinusoidal (VAR)

S = daya kompleks pada kondisi non-sinusoidal (VA)

P1 = daya aktif pada frekuensi dasar (Watt)

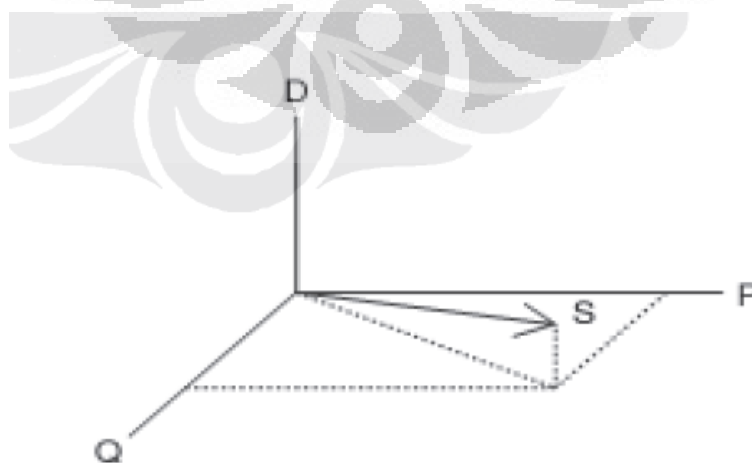
Q1 = daya reaktif pada frekuensi dasar (VAR)

D = distorsi daya akibat harmonik (VA)

Untuk faktor daya pada kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.11)$$

Untuk menunjukkan hubungan antara daya-daya pada kondisi non-sinusoidal tersebut, dapat digunakan diagram vektor tiga dimensi seperti pada gambar berikut :

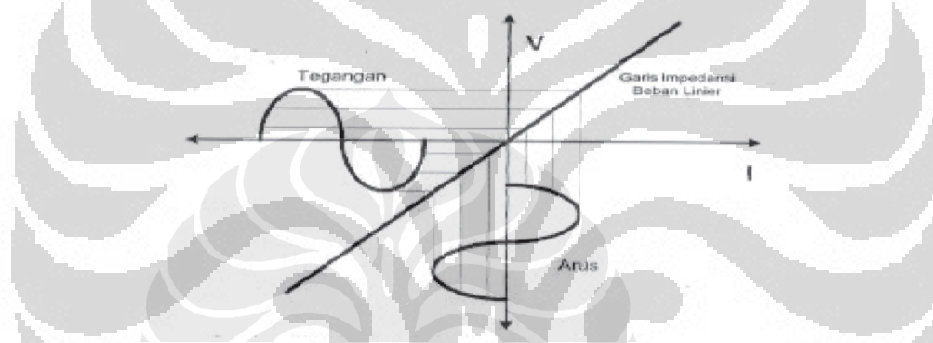


Gambar 2.3 Hubungan Komponen Daya pada Kondisi Non-Sinusoidal

P dan Q mewakili komponen S yang biasa terdapat pada kondisi sinusoidal murni, sedangkan D menunjukkan kontribusi tambahan terhadap daya kompleks akibat harmonik.

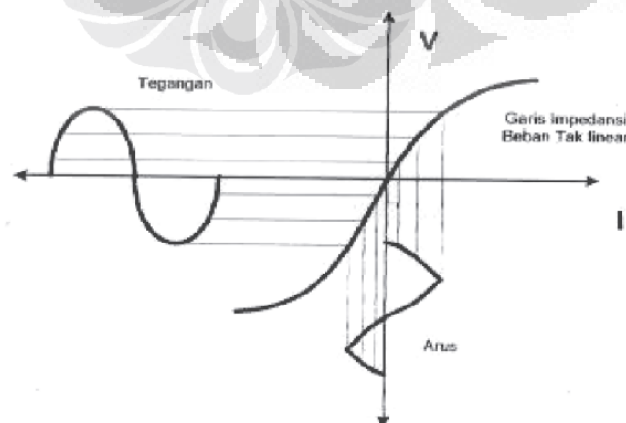
#### 2.4. Penyebab Harmonik

Seperti yang telah dijelaskan pada latar belakang, terdapat dua jenis beban pada sistem tenaga listrik, yaitu beban linier dan beban non linier. Pada beban linier, bentuk gelombang keluaran linier yang artinya bahwa arus yang mengalir sebanding dengan perubahan tegangan. Hal tersebut dapat dijelaskan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.5 Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Linier

Sedangkan beban non linier bentuk gelombang keluaran nya tidak linier, yaitu bentuk keluaran gelombang arus tidak sebanding dengan tegangan dasar sehingga gelombang arus ataupun tegangan tidak sama dengan gelombang masukannya. Hal ini dapat dijelaskan melalui gambar berikut:

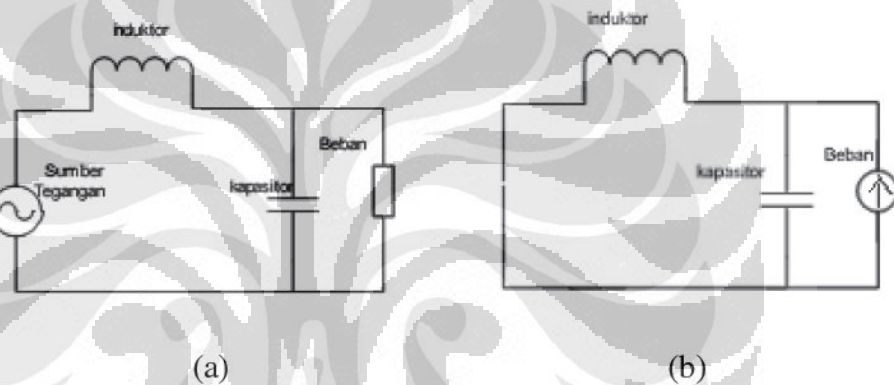


Gambar 2.6 Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Non-Linier



Beban non linier pada umumnya merupakan komponen semikonduktor yang pada proses kerjanya berlaku sebagai saklar (*switch*) yang bekerja pada setiap setengah siklus gelombang atau beban yang membutuhkan arus tidak tetap pada setiap periode waktunya. Proses kerjanya ini akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus atau tegangan yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter beban-beban non linier yang terpasang. Perubahan bentuk gelombang ini tidak berkaitan dengan sumber tegangannya.

Beban non linier dapat kita modelkan sebagai sumber arus harmonik seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.7 Pemodelan beban non-linier sebagai sumber harmonik

Gambar 2.7 (a) Model Gelombang Dasar

Gambar 2.7 (b) Model Gelombang Harmonik

Secara garis besar, sumber harmonik terdiri dari dua jenis peralatan yaitu peralatan yang memiliki kondisi saturasi dan peralatan elektronika daya (*Power Electronics*). Peralatan yang memiliki kondisi saturasi biasanya memiliki komponen yang bersifat magnetik seperti transformator, mesin-mesin listrik, tanur busur listrik, peralatan yang menggunakan *power supply*, dan *magnetic ballast*. Peralatan elektronika daya (*Power Electronics*) seperti tiristor, dioda, dan lain sebagainya. Contoh peralatan yang menggunakan komponen elektronika daya adalah konverter statik, konverter PWM, inverter, pengendali motor listrik, *electronic ballast*, dan sebagainya. Sedangkan pada rumah tangga, beban non linier terdapat pada peralatan seperti lampu hemat energi, televisi, video player, ac, komputer, kulkas, dan juga dispenser.

## 2.5. Akibat Yang Ditimbulkan Harmonik

Tegangan dan arus harmonik dapat menimbulkan efek yang berbeda-beda pada peralatan listrik yang terhubung pada jaringan listrik tergantung dari karakteristik listrik beban itu sendiri. Akan tetapi, secara umum pengaruh dari harmonik pada peralatan listrik ada tiga, yaitu :

1. Nilai rms arus atau tegangan menjadi lebih besar
2. Nilai puncak (*peak value*) tegangan dan arus lebih besar
3. Menurunnya frekuensi pada sistem

Masing-masing elemen membangkitkan distorsi harmonik yang spesifik. Nilai rms yang lebih besar dapat mengakibatkan pemanasan yang lebih tinggi pada konduktor. Nilai puncak lebih besar dapat mengganggu kerja dari alat ukur, sehingga dapat terjadi kesalahan pada pembacaan. Sedangkan frekuensi dapat mempengaruhi impedansi kabel, jika semakin tinggi frekuensi (biasanya di atas 400 Hz) maka semakin sering kabel menerima tegangan puncak sehingga akan semakin besar tegangan jatuh yang terjadi. Fenomena resonansi juga dapat terjadi pada frekuensi tertentu yang dapat mengakibatkan arus meningkat.

### 2.5.1. Efek Khusus Harmonik Pada Sistem Tenaga Listrik

Efek khusus yang ditimbulkan harmonik pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi :

#### 2.5.1.1. Efek Negatif Jangka Pendek

1. Tegangan harmonik dapat mengganggu kontrol yang digunakan pada sistem elektronik. Misalnya, harmonik mengganggu *controller* yang digunakan pada elektronika daya (*power electronics*), yang terganggu adalah saat kondisi putus hubungan dari tiristor.
2. Harmonik dapat menyebabkan kesalahan pada peralatan listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik. Misalnya, kesalahan dari alat ukur kelas 2 akan meningkat 0.3% sebagai akibat dari harmonik ke-5 dengan ratio tegangan dan arus 5 %.

Suatu alat ukur telah didesain dan disesuaikan untuk beroperasi pada rangkaian yang mempunyai frekuensi dan tegangan standar dengan sedikit atau tidak ada sama sekali distorsi gelombang.

Pengaruh harmonik terhadap akurasi alat ukur adalah:

- Alat ukur menjadi sensitif terhadap frekuensi.
  - Medan magnet dari koil tegangan dalam sebuah alat ukur non-linier dan mengandung beberapa komponen harmonik yang seharusnya dari kompensasi alat. Akan terbentuk torsi tambahan meskipun tidak ada tegangan dan arus harmonik pada jaringan distribusi.
  - Alat ukur tidak mengukur komponen energi DC yang seharusnya.
3. Harmonik dapat mengganggu alat-alat pengaman dalam sistem tenaga listrik seperti relay. Relay sangat sensitif terhadap perubahan arus dan frekuensi, jadi relay bisa salah beroperasi karena terjadi perubahan arus atau frekuensi meskipun tidak ada gangguan. Selain itu, harmonik juga dapat mengakibatkan perubahan impedansi, arus, dan tegangan dari sistem.
  4. Pada mesin-mesin berputar seperti generator dan motor, torsi mekanik yang diakibatkan oleh arus harmonik dapat menyebabkan getaran dan suara pada mesin-mesin tersebut. Torsi sesaat dihasilkan oleh interaksi antara fluks celah udara (sebagian besar komponen dasar) dan fluks yang dihasilkan oleh arus harmonik dalam rotor. Torsi ini juga dapat mempengaruhi bentuk kurva torsi-kecepatan pada motor.
  5. Bila ada sistem komunikasi yang dekat dengan sistem tenaga listrik maka sistem tersebut dapat terganggu oleh harmonik. Biasanya sistem kontrol dari sistem telekomunikasi yang terganggu oleh harmonik.

### 2.5.1.2. Efek Yang Bersifat Kontinyu

#### 1. Pemanasan Kapasitor

Kapasitor sangat sensitif terhadap perubahan beban. Jika terjadi harmonik menyebabkan rugi-rugi meningkat. Ketika harmonik terjadi, beban akan semakin reaktif sehingga kapasitor harus mencatu lebih banyak daya reaktif kepada sistem. Selain itu dapat juga terjadi resonansi. Saat terjadi resonansi, impedansi sistem hanya dilihat resistif yang sangat kecil, sehingga arus yang masuk akan sangat besar dan dapat menghasilkan kerusakan.

#### 2. Pemanasan pada mesin-mesin listrik

Tegangan non-sinusoidal yang diterapkan pada mesin listrik dapat menimbulkan masalah-masalah sebagai berikut:

- Meningkatnya rugi inti dan rugi belitan
- Pemanasan lebih

Tegangan atau arus harmonik meningkatkan rugi daya pada gulungan stator, rangkaian rotor, dan laminasi stator dan rotor. Rugi pada penghantar stator dan rotor lebih besar daripada resistansi DC-nya, karena adanya efek arus *eddy* dan efek kulit (*skin effect*). Rugi daya tambahan merupakan efek harmonik yang paling serius dalam mesin arus bolak-balik. Rugi-rugi ini tergantung pada spektrum frekuensi dari tegangan yang diterapkan.

Arus harmonik akan menimbulkan panas lebih. Bila mesin dioperasikan terus-menerus pada kondisi ini, maka umur mesin akan berkurang dan lebih jauh dapat menyebabkan kerusakan.

#### 3. Pemanasan pada Transformator

Transformator sangat rentan terhadap pengaruh harmonik. Transformator dirancang sesuai dengan frekuensi kerjanya. Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi dan pada akhirnya mengakibatkan rugi-rugi daya. Pengaruh utama harmonik pada transformator adalah :

- Panas lebih yang dibangkitkan oleh arus beban yang beban yang mengandung harmonik.
- Kemungkinan resonansi paralel transformator dengan kapasitansi sistem.

Transformator distribusi yang mencatu daya ke beban non linier menimbulkan arus harmonik kelipatan tiga ganjil. Harmonik ini dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa. Akibatnya akan terjadi peningkatan temperatur pada kawat netral. Sebagai dampak lanjutnya, akan terjadi sirkulasi arus urutan nol pada belitan delta transformator sehingga temperaturnya akan meningkat. Peningkatan temperatur ini akan menurunkan efisiensi transformator dan lebih jauh lagi dapat mengakibatkan kerusakan.

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator adalah rugi-rugi inti dan rugi-rugi belitan. Rugi-rugi ini karena fluks yang dibangkitkan di dalam inti bila transformator dieksitasi. Rugi-rugi belitan ini yang terdiri dari  $I^2R$  dan *stray losses* dibangkitkan oleh arus yang mengalir melalui transformator.

#### 4. Pemanasan pada kabel dan peralatan lainnya

Rugi-rugi kabel yang dilewati oleh arus harmonik akan semakin besar. Hal ini disebabkan meningkatnya resistansi dari tembaga akibat meningkatnya frekuensi (*skin effect*). Akibatnya akan terjadi pemanasan pada kawat penghantar.

Ada dua mekanisme dimana arus harmonik dapat menyebabkan pemanasan dalam penghantar yang lebih besar dari nilai arus rms yang diharapkan. Mekanisme pertama disebabkan distribusi arus dalam penghantar, termasuk efek kulit (*Skin Effect*) dan efek kedekatan (*Proximity Effect*). *Skin effect* disebabkan oleh distribusi arus dipermukaan lebih besar daripada di dalam penghantar sehingga resistansi efektif meningkat. *Skin effect* meningkat dengan kenaikan frekuensi dan diameter penghantar. Sedangkan *Proximity effect* disebabkan medan magnet

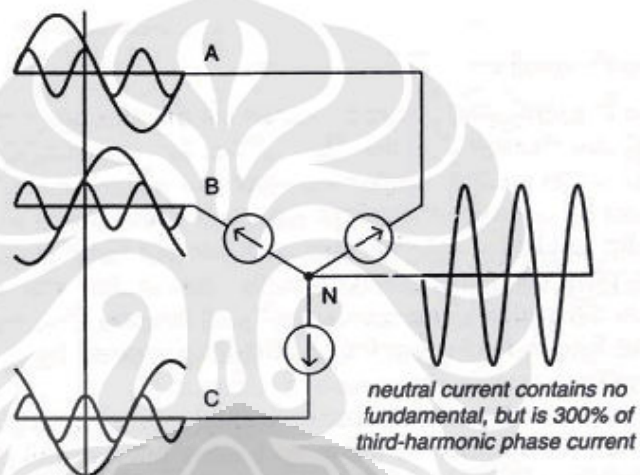
penghantar mengganggu distribusi arus pada penghantar-penghantar yang berdekatan.

Mekanisme kedua disebabkan adanya arus yang tinggi pada penghantar netral pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang menyuplai beban-beban satu fasa. Beberapa beban seperti *power supply switch mode* menghasilkan arus harmonik ketiga yang cukup berarti. Untuk beban konverter, arus harmonik ketiga dalam rangkaian tiga fasa menghasilkan arus netral yang lebih besar dari arus fasanya. Karena penghantar netral biasanya sama ukurannya dengan penghantar fasa, maka penghantar netral menjadi berbeban lebih dan akhirnya terjadi panas lebih. Cara yang paling umum untuk mengatasi hal ini adalah dengan memperbesar ukuran penghantar netral dua kali atau lebih besar dari penghantar fasanya.

### 2.5.2. Triplen Harmonik

Triplen harmonik merupakan kelipatan ganjil dari harmonik ketiga ( $h = 3, 9, 15, 21, \dots$ ). Triplen harmonik harus mendapat perhatian khusus, karena respon sistem yang terjadi saat triplen harmonik umumnya berbeda dengan respon dari orde harmonik yang lain. Triplen harmonik menjadi persoalan yang penting bagi sistem jaringan bintang yang ditanahkan (*Grounded Wye Systems*) dengan arus yang mengalir pada netral sistem tersebut. Arus pada netral menjadi *overload*, karena arus antar fasanya tidak saling menghilangkan melainkan saling menjumlahkan. Terkadang peralatan dapat salah beroperasi karena tegangan fasa yang terdistorsi cukup parah oleh triplen harmonik pada konduktor netral.

Untuk lebih memahami triplen harmonik, berikut adalah gambar arus yang mengalir pada netral sistem akibat triplen harmonik :



Gambar 2.8 Arus netral pada sistem Wye-Grounded akibat Triplen Harmonik

Sistem pada gambar di atas merupakan sistem yang seimbang, diasumsikan komponen harmonik ketiga hadir dalam sistem. Komponen arus fundamental dari setiap fasayang mengalir pada konduktor netral sistem akan saling menghilangkan, namun pada kenyataannya pada sistem ditemukan bahwa arus pada konduktor tidak netral, melainkan ada komponen arus triplen harmonik dari ketiga fasa yang saling menjumlahkan. Sehingga arus triplen harmonik yang mengalir pada konduktor netral adalah tiga kali dari arus triplen pada setiap fasanya. Hal ini disebabkan karena fasa dan waktu dari arus triplen yang sama dari setiap fasanya.

### 2.5.3. Urutan Fasa Harmonik

Komponen-komponen simetris dapat digunakan untuk memberikan gambaran perilaku sistem tiga fasa. Sistem tiga fasa dapat ditransformasikan menjadi tiga sistem satu fasa yang lebih sederhana untuk dapat dianalisis. metode komponen simetris dapat juga digunakan untuk analisis respon sistem terhadap arus harmonik. Berikut ini adalah tabel urutan fasa harmonik :

Tabel 2.1 Urutan Fasa Harmonik

Orde Harmonik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	....
Frekuensi (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	....

Urutan Fasa Harmonik	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	....
----------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	------

Harmonik pertama urutan polaritasnya adalah positif, harmonik kedua urutan polaritasnya adalah negatif dan harmonik ketiga polaritasnya adalah nol, harmonik keempat adalah positif (berulang berurutan sampai seterusnya).

Tabel 2.2 Akibat Dari Polaritas Komponen Harmonik

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

Akibat yang dapat ditimbulkan oleh urutan polaritas komponen harmonik antara lain tingginya arus netral pada sistem tiga fasa empat kawat (sisi sekunder transformator) karena arus urutan nol (*zero sequence*) dan arus ini akan terinduksi ke sisi primer transformator dan akan berputar pada sisi primer transformator yang biasanya memiliki belitan delta. Hal ini karena pada kawat netral tidak memiliki peralatan pemutus arus untuk proteksi tegangan atau arus lebih. Pengaruh harmonik pada transformator sering tanpa disadari dan diantisipasi keberadaannya sampai terjadi gangguan yang penyebabnya tidak jelas. Hal ini dapat juga terjadi bila perubahan konfigurasi atau jenis beban yang dipasang. Transformator dan peralatan induksi lainnya selalu terpengaruh oleh harmonik karena trafo itu sendiri dirancang sesuai dengan frekuensi kerjanya. Selain itu, transformator juga merupakan media utama antara pembangkit dengan beban. Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi rugi-rugi daya.



## 2.6. Dasar Pengontrolan Harmonik

Jika pada sebuah sistem tenaga listrik mengalami permasalahan distorsi harmonik, maka ada beberapa cara dasar untuk mengatasinya, yaitu dengan cara :

### 1. Mengurangi Arus Harmonik Pada Beban

Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi kuantitas harmonik yang dihasilkan pada peralatan beban yang ada. Misalnya pada transformator yang overeksitasi dapat dikembalikan kepadanya, sedangkan pada peralatan *arching* dan kebanyakan konverter elektronika daya sudah fix dengan kondisinya sesuai dengan karakteristik rancangannya. Akan berbeda dengan PWM drives yang men-charge dc bus kapasitor langsung dari line tanpa ada impedansi tambahan, menambahkan suatu reaktor pada line secara seri dapat secara signifikan mengurangi harmonik. Hubungan transformator dapat digunakan untuk mengurangi harmonik pada sistem tiga fasa, misalnya hubungan delta pada transformator dapat memblok aliran arus urutan nol harmonik (khususnya triplen harmonik) dari line.

### 2. Memfilter harmonik

Filter Shunt akan bekerja dengan cara men-*short circuit*kan arus harmonik sedekat mungkin kepada sumber distorsi secara praktis. Hal ini dilakukan untuk menjaga agar arus tetap jauh dari sistem. Ini merupakan tipe filter yang banyak diaplikasikan karena pertimbangan ekonomis dan juga karena filter cenderung memperhalus tegangan pada sisi beban sebaik cara memindahkan atau meredam arus harmonik.

Ada lagi pendekatan yang lain yaitu dengan memakai filter seri yang dapat memblok arus harmonik. Cara ini merupakan rangkaian *parallel-tuned* yang memberikan impedansi yang besar kepada arus harmonik. Namun filter ini jarang digunakan karena sulit untuk mengisolasinya dari jalur listrik dan tegangan pada sisi beban dapat sangat terdistorsi. Aplikasi yang umum adalah pada sisi netral kapasitor terhubung bintang yang ditanahkan yang dapat memblok aliran dari arus triplen harmonik.

### 3. Memodifikasi Respon Frekuensi Sistem

Respon sistem yang merugikan terhadap harmonik dapat dimodifikasi dengan beberapa cara, yaitu :

- Menambah filter *shunt*. Filter ini tidak hanya akan meredam arus harmonik namun juga seringkali akan merubah respon sistem.
- Menambah reaktor untuk memperbaiki sistem. Resonansi yang merugikan biasanya terjadi antara induktansi sistem dengan kapasitor yang digunakan sebagai perbaikan faktor daya sistem. Reaktor harus diletakkan diantara kapasitor dan sistem. Metoda untuk meletakkan reaktor secara seri dengan kapasitor dapat menghindari terjadinya resonansi sistem tanpa menyetel kapasitor untuk membuat filter.
- Mengubah ukuran kapasitor. Hal ini merupakan pilihan terakhir yang mahal bagi kedua sisi, baik penyedia jasa listrik maupun pelanggan listrik.
- Memindahkan kapasitor pada titik dengan impedansi hubung singkat yang berbeda atau pada titik dengan *losses* terbesar. Pagi penyedia listrik, tentu saja hal ini dapat menimbulkan masalah yaitu interferensi telepon walaupun hal ini dapat mengatasi masalah respon sistem.

#### 2.7. Filter Harmonik

Sebelum merancang suatu filter harmonik, perlu kita lakukan studi untuk menentukan kompensasi daya reaktif yang diperlukan oleh sistem. Filter harus didesain untuk menyediakan daya reaktif dalam jumlah yang tepat. Namun jika tidak diperlukan daya reaktif filter harus didesain minimum, artinya filter harus cukup menekan harmonik pada biaya yang paling rendah dan menyuplai beberapa daya reaktif tapi tidak semua yang diperlukan.

Besarnya daya reaktif yang disuplai oleh kapasitor ditentukan oleh :

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2} \quad (2.12)$$

Dimana :

$P_1$  = daya aktif sistem

$PF_0$  = faktor daya sebelum ada kompensasi daya reaktif

$PF$  = faktor daya setelah ada kompensansi daya reaktif

Prosedur umum yang biasanya dilakukan dalam menganalisa harmonik antara lain :

1. Mengidentifikasi kondisi harmonik.
2. Mendesain skema filter untuk menekan harmonik.
3. Menganalisis unjuk kerja filter.

Beberapa metode yang digunakan untuk mengatasi masalah harmonik adalah dengan cara kompensasi fluks magnetik (*magnetic flux compensation*), injeksi harmonik (*harmonic injection*), *shunt filter*, injeksi riak DC (*D.C. ripple injection*). Shunt filter memiliki keuntungan dibandingkan dengan metode yang lain, yaitu bahwa shunt filter juga menyediakan daya reaktif pada frekuensi dasar yang diperlukan oleh sumber harmonik dan beban-beban lain.

### 2.7.1. Identifikasi Harmonik

Untuk mengantisipasi harmonik, perlu dilakukan langkah-langkah pengidentifikasian masalah dengan peralatan ukur yang memadai. Ada dua cara untuk membentuk transformasi fourier dari gelombang tegangan dan arus pada sistem tenaga listrik. Cara pertama adalah dengan menggunakan penganalisis spektrum (*spectrum analyzer*) dan mengukur harmonik pada kondisi *on-line*. Namun cara ini tidak memberikan informasi sudut fasa harmonik. Metode lain adalah dengan mengukur contoh gelombang dan menyimpan gelombang tersebut dalam daerah waktu (*time domain*) sebagai data diskrit dan menghitung komponen harmonik secara digital dengan menggunakan mikroprosesor dalam kondisi *off-line*.

Selain itu, kita dapat mengidentifikasi harmonik dengan beberapa cara sederhana, yaitu:

1. Identifikasi jenis beban
2. Pemeriksaan arus sekunder transformator
3. Pemeriksaan tegangan netral-tanah

Bila banyak peralatan yang mempunyai komponen utama terbuat dari bahan semikonduktor seperti komputer, pengatur kecepatan motor, dan peralatan lain yang menggunakan arus searah, maka kemungkinan ada masalah harmonik di dalam peralatan tersebut.

Pengukuran arus sekunder transformator perlu dilakukan, baik fasa maupun netral. Bila arus netral lebih besar dari arus fasa, maka dapat diperkirakan adanya triplen harmonik dan kemungkinan turunnya efisiensi transformator.

Dengan melakukan pengukuran tegangan netral-tanah pada keadaan berbeban maka terjadinya arus lebih pada kawat netral (untuk sistem 3 fasa 4 kawat) dapat diketahui. Bila tegangan terukur lebih besar dari 2 Volt, maka terdapat indikasi adanya masalah harmonik pada beban.

Setelah dilakukan identifikasi berdasarkan metode-metode di atas, barulah ditentukan apakah besarnya harmonik pada sistem atau komponen tersebut perlu ditindaklanjuti atau tidak. Besarnya harmonik pada suatu sistem atau komponen listrik memiliki batasan ataupun standar tertentu dimana apabila besarnya melewati standar yang telah ditentukan maka perlu dilakukan suatu tindakan untuk meredamnya. Berikut ini adalah standar batas distorsitegangan harmonik maksimum berdasarkan standar IEEE 519-1992:

Tabel 2.3 Batas Distorsi Tegangan Maksimum

PCC VOLTAGE	INDIVIDUAL HARMONIC MAGNITUDE	THDv (%)
$\leq 69$ kV	3.0	5.0
69-161 kV	1.5	2.5
$\geq 161$ kV	1,0	1.5

dan berikut ini adalah batas distorsi arus harmonik maksimum :

Tabel 2.3 Batas Distorsi Arus Harmonik Maksimum

$I_{sc}/I_L$	Odd Harmonic Order in % of $I_L$					TDD
	$< 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 25$	$35 \geq h$	
$< 20$	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
> 10000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even order harmonics are limited to 25% of the odd order harmonics						

### 2.7.2. Desain Filter Harmonik

Ada dua jenis filter yang kita kenal, yaitu filter aktif dan filter pasif. Filter pasif banyak digunakan di industri, karena filter jenis ini sangat sederhana dan lebih murah dibandingkan dengan filter aktif. Namun, filter pasif memiliki kelemahan, terutama filter pasif tergantung pada impedansi sumber sistem tenaga, frekuensi sistem dan toleransi komponen. Lebih jauh lagi, filter ini menarik harmonik dari beban lain dalam sistem.

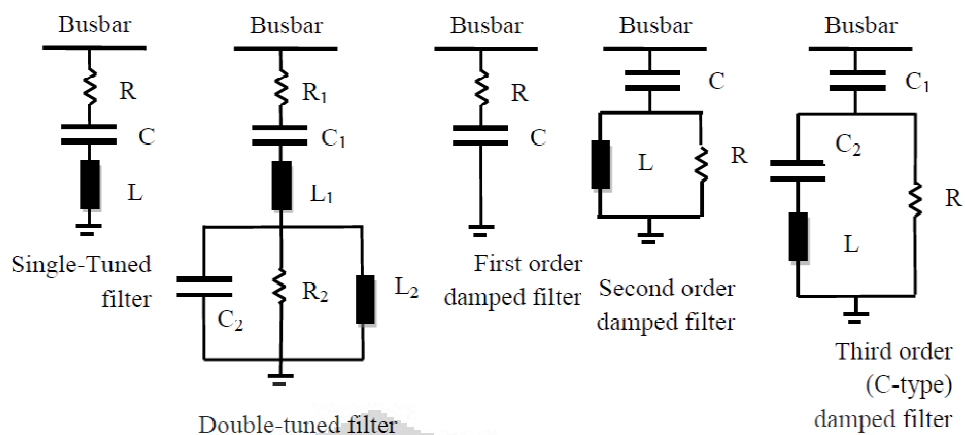
Ada dua tujuan pemasangan filter dalam suatu sistem tenaga listrik, yaitu:

1. Untuk mengurangi tegangan harmonik dan injeksi arus harmonik dalam jaringan AC sampai ke level yang dapat diterima.
2. Untuk menyediakan semua atau sebagian daya reaktif yang dikonsumsi oleh sumber harmonik atau yang dikonsumsi oleh beban-beban lainnya.

Ada dua jenis filter pasif, yaitu filter seri dan filter *shunt*. Filter seri harus didesain untuk arus maksimum dari rangkaian utama. Sedangkan filter *shunt* hanya membawa arus harmonik dan sebagian arus fundamental yang jauh lebih kecil dari arus di rangkaian utama. Oleh karena itu, filter *shunt* lebih murah daripada filter seri untuk efektifitas yang sama. Namun, filter *shunt* memiliki keuntungan lain yaitu dapat menyuplai daya reaktif pada frekuensi dasar. Dalam banyak aplikasi biasanya dipakai filter *shunt*.

Filter *shunt* yang paling umum digunakan adalah *single tuned filter* dan *damped filter second order*. Kedua jenis filter ini paling sederhana dalam desainnya dan murah untuk diimplementasikan.

Jenis-jenis filter pasif antara lain adalah *single tuned filter*, *double tuned filter*, *first order damped filter*, *second order damped filter*, *third order (C-type) damped filter*. Berikut rangkaian untuk masing-masing filter tersebut beserta konfigurasi dan impedansinya :



Gambar 2.9 Rangkaian Filter Beserta Konfigurasi dan Impedansinya

Filter pasif banyak digunakan untuk mengkompensasi kerugian daya reaktif akibat adanya harmonik di dalam sistem. Rangkaian filter pasif terdiri dari komponen R, L, dan C. Komponen utama yang terdapat pada filter pasif adalah kapasitor dan induktor. Kapasitor dihubungkan seri atau paralel untuk memperoleh sebuah total rating tegangan atau KVAR yang diinginkan. Sedangkan induktor digunakan dalam rangkaian filter untuk mampu menahan *skin effect* (Tanoto, 2005)

### 2.7.3. Kriteria Desain Filter

Ukuran filter didefinisikan sebagai daya reaktif yang disuplai oleh filter pada frekuensi dasar. Pada dasarnya sama dengan daya reaktif pada frekuensi dasar yang disuplai oleh kapasitor. Ukuran total dari semua cabang filter ditentukan oleh daya reaktif yang dibutuhkan oleh sumber harmonik dan oleh berapa banyak kebutuhan ini dapat disuplai dari jaringan AC.

Kriteria desain filter yang ideal adalah dapat mengeliminasi semua pengaruh buruk dari distorsi gelombang, termasuk interferensi telepon yang merupakan efek yang sulit dieliminasi secara utuh. Namun, kriteria ideal tersebut ternyata tidak realistis, baik dari segi teknis maupun ekonomis. Kriteria desain yang lebih praktis mengusulkan pengurangan masalah ke suatu level yang dapat diterima pada titik hubung bersama dengan konsumen lain, masalah tersebut dinyatakan dalam bentuk tegangan harmonik, arus harmonik atau keduanya.

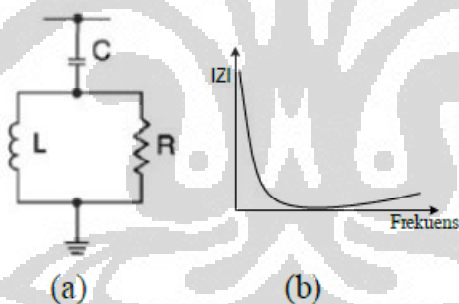
Kriteria yang didasarkan pada tegangan harmonik lebih tepat untuk desain filter, karena lebih mudah menjamin berada dalam batas tegangan yang layak daripada membatasi tingkat arus karena adanya perubahan impedansi jaringan AC.

Faktor-faktor yang perlu dilakukan ketika mendesain filter untuk mengatasi masalah-masalah harmonik antara lain:

1. Daya reaktif yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya.
2. Puncak resonansi paralel yang dihasilkan dari interaksi antara filter dan impedansi sumber.
3. Rating dan toleransi komponen-komponen filter
4. Rugi-rugi filter

#### 2.7.4. Desain Second Order Damped Filter

Rangkaian *second order damped filter* dan kurva impedansi terhadap frekuensi terlihat pada gambar berikut :



Gambar 2.10 (a). Rangkaian Second Order Damped Filter

Gambar 2.10 (b). Kurva Impedansi Terhadap Frekuensi

Impedansi *second order damped filter* diberikan oleh persamaan :

$$Z_f = \frac{jR_h X_L}{R + jR_h X_L} - j \frac{X_C}{h} \quad (2.13)$$

$$Z_f = \frac{R(hX_L)^2}{R^2 + (hX_L)^2} + j \left[ \frac{R^2 h X_L}{R^2 + (hX_L)^2} - \frac{X_C}{h} \right] \quad (2.14)$$

Sedangkan magnitude impedansi *second order damped filter* adalah :

$$|Z_f| = \sqrt{\frac{R(hX_L)^2}{R^2 + (hX_L)^2} + j \left[ \frac{R^2 h X_L}{R^2 + (hX_L)^2} - \frac{X_C}{h} \right]} \quad (2.15)$$

Filter pasif jenis *damped filter* memiliki beberapa keuntungan, yaitu

1. Pemanfaatan dan pembebanannya tidak begitu sensitif terhadap perubahan temperatur, perubahan frekuensi, toleransi komponen dari perusahaan, dan rugi-rugi kapasitor.
2. Memberikan impedansi yang rendah untuk spektrum frekuensi harmonisa yang lebar, tanpa memerlukan *subdivision* paralel.
3. Penggunaan filter jenis *damped filter* dapat menghasilkan resonansi paralel antara filter itu sendiri dengan admitansi dari sistem di frekuensi orde harmonik di bawah *tunning filter* yang lebih rendah. Pada sejumlah kasus, penggunaan satu atau lebih *damped filter* dapat menjadi alternatif yang dapat diterima.

Namun, filter jenis *damped filter* juga memiliki beberapa kerugian, yakni:

1. Dengan level filter yang sama, perancangan *damped filter* untuk VA rating yang besar (VA rating pada frekuensi fundamentalnya) akan mengalami kesulitan. Namun dalam hal ini, unjuk kerja yang baik dari suatu peralatan filter termasuk juga koreksi faktor daya.
2. Kerugian yang terjadi pada resistor dan reaktansi pada umumnya lebih besar, karena pada filter jenis *damped filter* memiliki nilai resistansi dan reaktansi yang cukup besar.

#### 2.7.5. Batasan Komponen Filter

##### 1. Kapasitor

Batas beban yang diperbolehkan berdasarkan standard ANSI/IEEE 18-1980 adalah sebagai berikut :

- kVAR = 135%
- tegangan efektif = 110%
- jumlah tegangan puncak = 120%
- arus efektif = 180%

Walaupun dalam standar batas arus efektif adalah 180%, namun dalam aplikasinya mungkin lebih rendah karena masing-masing unit kapasitor diproteksi pada 125 – 165% dari arus ratingnya. Dalam



mendesain filter, batas arus dan tegangan efektif dan jumlah tegangan puncak pada kapasitor bank sebaiknya berkisar 100% dari rating kondisi normal. Hal ini dilakukan agar kapasitor dapat mengkompensasi tegangan lebih sistem dan kondisi tidak seimbang pada kapasitor. Komponen harmonik meningkat secara signifikan untuk kondisi ketidakseimbangan kapasitor bank.

## 2. Induktor

Induktor yang digunakan untuk aplikasi filter biasanya dari tipe inti udara yang memberikan karakteristik linier berkenaan dengan frekuensi dan arus. Toleransi reaktansi  $\pm 5\%$  dapat diterima untuk aplikasi sistem tenaga di industri. Parameter-parameter yang dipakai untuk menentukan spesifikasi induktor adalah :

- Arus pada frekuensi dasar
- Spektrum arus harmonik
- Arus hubung singkat
- Rasio X/R
- Tegangan sistem
- BIL (*Basic Insulation Level*)

## BAB 3

### OBJEK DAN PROSEDUR PENGUKURAN

#### 3.1. Objek Pengukuran

Pada skripsi ini dibahas masalah distorsi harmonik pada beban sistem tenaga listrik yang berupa beban non-linier khususnya yang terdapat pada beban rumah tangga. Meskipun masalah distorsi harmonik pada beban rumah tangga tidak besar, namun beban perumahan di Indonesia sangat banyak maka masalah distorsi harmonik ini akan terakumulasi dan memiliki dampak yang cukup signifikan pada sistem tenaga listrik.

Telah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa penyebab timbulnya harmonik karena adanya beban-beban non-linier. Beban non-linier sendiri berasal dari peralatan-peralatan listrik yang memiliki nilai saturasi atau yang memiliki komponen elektronika daya. Identifikasi jenis beban dilakukan dengan mengenali peralatan listrik yang memiliki komponen seperti kumparan, mesin berputar (motor), *power supply*, dioda, tiristor, konverter, *ballast*, dan peralatan berbahan semikonduktor.

Setelah identifikasi beban, didapat peralatan listrik yang merupakan sumber harmonik. Peralatan tersebut kemudian diuji (diukur) untuk mengetahui karakteristik arus, tegangan, daya, *power factor*, dan juga harmonik. Spesifikasi beban disesuaikan dengan peralatan listrik yang ada di laboratorium.

Berikut ini adalah spesifikasi dari peralatan-peralatan listrik yang dijadikan objek pengukuran :

Tabel 3.1 Spesifikasi Beban Objek Pengukuran

No.	Peralatan	Jumlah	Daya (W)	Tegangan (V)	Frekuensi (Hz)
1.	Lampu Hemat Energi				
	A	1	8	170-250	50/60
	B	1	18	170-250	50/60
	C	1	20	170-250	50/60
2.	Televisi	1	65	180-270	50/60
3.	AC	1	1150	220	50/60
4.	Komputer	1			
	CPU	1	350	110/220	50/50
	Monitor		240	100-240	50/60
5.	Kulkas	1	77	220	50/60
6.	Dispenser	1	300	220	50

### 3.2. Peralatan Pengukuran

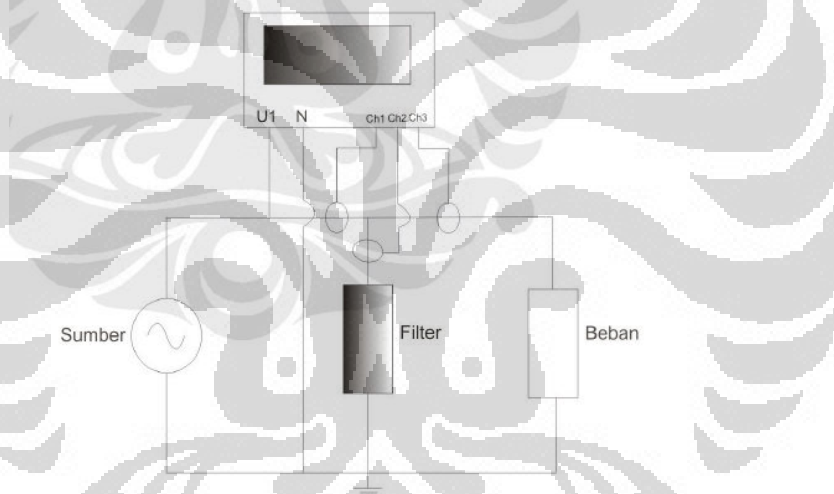
Peralatan pengukuran yang digunakan dalam pengambilan data ini adalah Power Analyzer bermerk Hioki dengan seri 3169-20. Peralatan ini mampu mengukur berbagai komponen listrik seperti tegangan (V), arus (I), frekuensi (f), daya kompleks (S), daya nyata (P), daya reaktif (Q), energi, dan juga faktor daya (PF). Selain itu, alat ini juga mampu mengukur komponen harmonik arus dan tegangan sampai dengan orde ke-40. Alat ini memiliki input 4 terminal tegangan (3 tegangan fasa dan 1 netral) dan 4 terminal arus sehingga alat ini mampu mengukur sistem dari *1 phase-2 wire* sampai *3 phase-4 wire*. Alat ini juga dilengkapi dengan *PC Card* sebagai memori penyimpanan data pengukuran, sehingga alat ini mampu menyimpan data hasil pengukuran secara otomatis.

Data hasil pengukuran dapat dengan mudah ditransfer dari *PCCard* ke komputer melalui *universal card reader*. Dengan bantuan program yang dimilikinya, hasil pengukuran dapat diamati dan dianalisis melalui komputer. Program yang digunakan adalah 9625 Power Measurement Support Software. Dari program ini kita bisa menyajikan data hasil pengukuran berupa ringkasan, grafik gelombang, dan juga spektrum untuk memudahkan dalam menganalisa. Berikut adalah gambar alat yang digunakan dalam pengukuran :



Gambar 3.2 Hioki Power Analyzer 3169-20

### 3.3. Rangkaian Pengukuran



Gambar 3.3 Rangkaian Pengukuran

Untuk mendapatkan karakteristik beban dalam hal ini peralatan listrik pada beban rumah tangga, digunakan rangkaian yang sederhana seperti gambar di atas. Prinsip dasar pemasangan *power analyzer* ini sama seperti pemasangan voltmeter dan amperemeter. Input tegangan dipasang paralel terhadap beban dan input arus menggunakan teknik *clamping* sehingga pengukuran secara seri tanpa melepas rangkaian.

### 3.4. Prosedur Pengukuran

Sebelum melakukan pengukuran, dilakukan langkah-langkah yang dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Memasang rangkaian seperti pada gambar rangkaian pengukuran di atas.
2. Mengaktifkan peralatan dan beban dengan memberikan tegangan sumber 220 Volt dan frekuensi 50 Hz.
3. Menyetel peralatan (*power analyzer*) sesuai kondisi yang diperlukan dalam pengukuran, yaitu :
  - a. Mengosongkan memori, untuk efisiensi pengukuran
  - b. Menyetel sistem jaringan listrik yang akan diukur dengan *1 phase-2 wire*
  - c. Menyetel frekuensi sistem yang akan diukur dengan frekuensi 50 Hz
  - d. Menyetel waktu pengukuran selama 20 menit dan interval pengambilan data tiap 1 menit
  - e. Menyetel rating arus input sampai 5 A dengan rasio CT 1
  - f. Menyetel rating tegangan sampai 300 V dengan rasio PT 1
  - g. Mengaktifkan semua parameter pengukuran dan harmonik sampai orde 40
  - h. Menyetel nama file data pengukuran dan tempat pada *PC card*
  - i. Memastikan sistem berjalan dengan baik
4. Mengaktifkan pencatatan pengukuran sehingga pencatatan berlangsung selama 20 menit
5. Setelah pengukuran selesai, peralatan di-nonaktifkan dari pencatatan pengukuran
6. Data hasil pengukuran ditransfer ke komputer untuk dianalisa

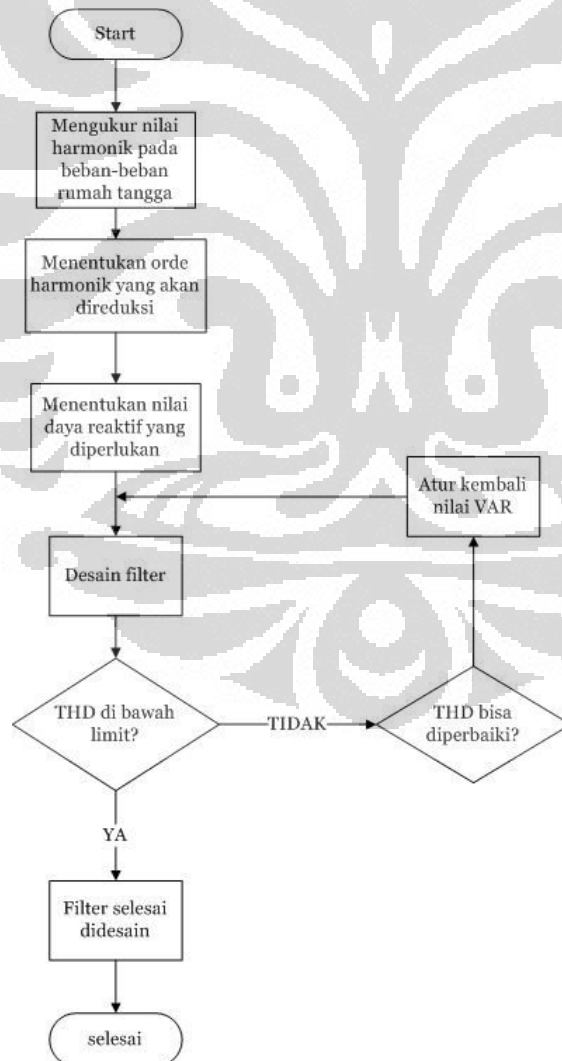
## BAB 4

### PERANCANGAN SECOND ORDER DAMPED FILTER

#### 4.1. Simulasi ETAP POWER STATION 7.0.0

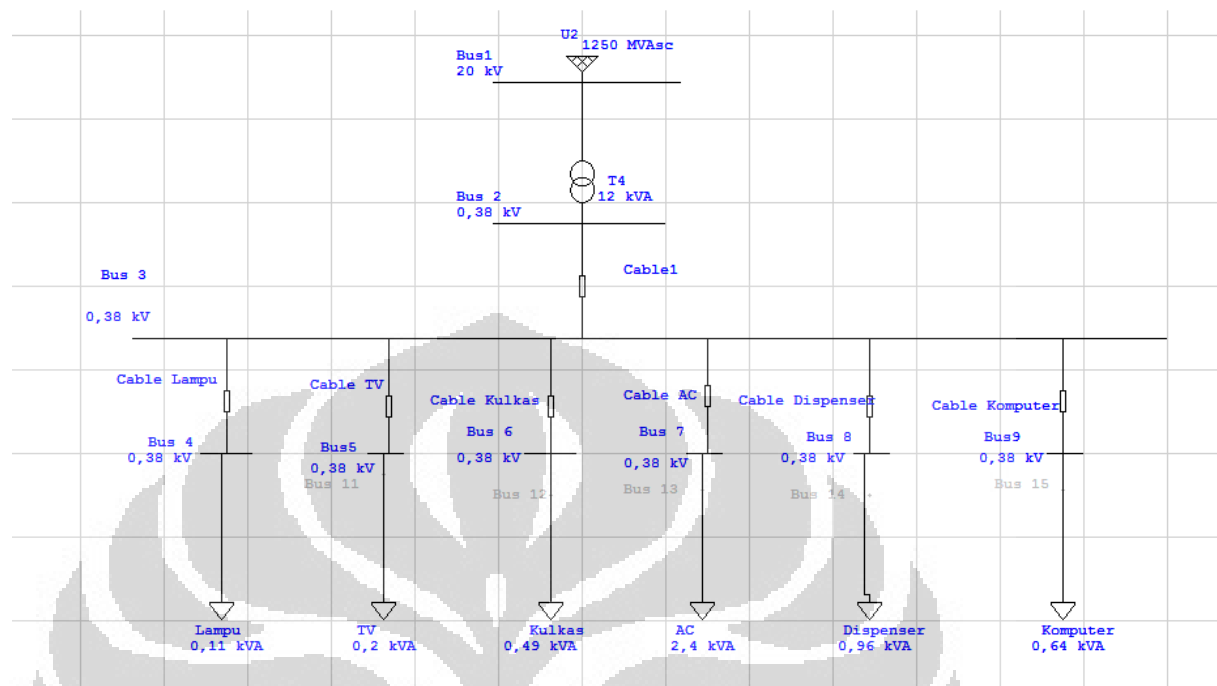
Proses perancangan dilakukan dengan menggunakan bantuan software ETAP Power Station 7.0.0 dengan menggunakan pendekatan pada kondisi sistem yang sebenarnya. Meskipun dalam proses simulasi ini sendiri terdapat sedikit perbedaan dengan kondisi sistem yang sebenarnya.

Simulasi untuk mendapatkan parameter-parameter filter dilakukan dengan beberapa tahapan. Adapun langkah-langkah desain filter dalam simulasi ini digambarkan secara umum dengan *flowchart* sebagai berikut :



Gambar 4.1 Flowchart simulasi

Rangkaian pembebanan rumah tangga pada simulasi ETAP disusun secara sederhana seperti pada gambar berikut ini :



Gambar 4.2 Rangkaian pembebanan rumah tangga pada simulasi ETAP

Pada gambar di atas, terlihat bahwa rangkaian simulasi terdiri dari beberapa komponen yaitu power grid, bus, transformator, kabel dan beban. Untuk kabel digunakan kabel tembaga (Cu) dengan nilai impedansi yang sangat kecil atau dapat diabaikan. Beban rumah tangga diasumsikan sebagai beban 3 fasa dengan menggunakan daya 3 fasa dan tegangan *phase to phase*, hal ini dilakukan untuk mempermudah simulasi.

#### 4.2. Perancangan Second Order Damped Filter Untuk Masing-masing Beban

Jenis perancangan filter yang digunakan dalam skripsi ini adalah filter pasif, yaitu *Second Order Damped Filter*. Filter jenis ini sering digunakan karena sederhana dan mudah untuk diaplikasikan. Selain itu, filter ini memberikan performa yang baik dalam mem-filter dan juga dapat mengurangi rugi-rugi energi pada frekuensi fundamental.

Parameter-parameter yang terdapat pada filter yang digunakan pada simulasi program ETAP Power Station 7.0.0 meliputi :

1. Nilai daya reaktif yang digunakan untuk perbaikan faktor daya

2. Nilai reaktansi kapasitif untuk kompensasi daya reaktif
3. Reaktansi induktif atau reaktor filter
4. Nilai faktor quality (Q factor), pada tipikal *high-pass filter* nilai Q berkisar antara 0,5 sampai 5.

Secara umum, keempat parameter di atas dapat kita tentukan menjadi 3 langkah kerja, yaitu :

1. Mengidentifikasi orde harmonik
2. Menentukan nilai QVAR
3. Menentukan nilai reaktansi dari kapasitor dan induktor

Dalam merancang sebuah filter, terlebih dahulu dilakukan proses identifikasi terhadap orde harmonik. Data harmonik tegangan terbesar digunakan untuk menentukan harmonik dari orde berapa yang akan difilter dari sistem. Kriteria yang didasarkan pada tegangan harmonik lebih tepat untuk desain filter. Hal ini disebabkan karena lebih mudah menjamin berada dalam batas tegangan yang layak daripada membatasi tingkat arus akibat adanya perubahan impedansi pada jaringan AC [1].

Dari hasil pengukuran, didapatkan data nilai harmonik tegangan terbesar pada orde ke 5. Sehingga pada simulasi perancangan filter ini akan di desain untuk mereduksi nilai harmonik tegangan dan arus pada orde ke 5. Berikut ini adalah data nilai harmonik tegangan dan arus dari pengukuran :

Tabel 4.1 Rata-rata Harmonik Tegangan Pada Tiap Beban

Orde	Rata-rata Harmonik Tegangan					
	LHE 8W//18W//20W	TV	Kulkas	AC	Dispenser	Komputer
2	0,11	0,13	0,12	0,18	0,1	0,17
3	0,73	1,06	0,62	0,26	0,22	1,03
4	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
5	1,07	1,15	1,31	0,92	1,28	1,28
6	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
7	0,42	0,43	0,59	0,53	0,48	0,54



8	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03
9	0,68	0,58	0,75	0,53	0,75	0,42
10	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
11	0,25	0,19	0,27	0,19	0,24	0,12
12	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
13	0,16	0,14	0,08	0,21	0,1	0,14
14	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
15	0,32	0,24	0,29	0,15	0,24	0,19
16	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01
17	0,18	0,13	0,16	0,1	0,12	0,06
18	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,01
19	0,11	0,07	0,1	0,16	0,22	0,07
20	0,02	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02
21	0,19	0,2	0,19	0,03	0,26	0,12
22	0,02	0,01	0,03	0,03	0,04	0,02
23	0,16	0,03	0,2	0,11	0,23	0,04
24	0,02	0,02	0,04	0,03	0,05	0,02
25	0,09	0,08	0,18	0,2	0,12	0,06
26	0,02	0,02	0,06	0,04	0,06	0,01
27	0,26	0,8	0,3	0,04	0,26	0,07
28	0,02	0,02	0,05	0,03	0,08	0,02
29	0,09	0,04	0,27	0,15	0,04	0,05
30	0,03	0,01	0,08	0,03	0,08	0,01
31	0,06	0,07	0,22	0,12	0,08	0,05
32	0,02	0,02	0,07	0,05	0,1	0,02

33	0,11	0,09	0,26	0,07	0,14	0,03
34	0,02	0,02	0,07	0,05	0,1	0,01
35	0,07	0,06	0,14	0,1	0,2	0,05
36	0,03	0,03	0,07	0,05	0,13	0,016
37	0,09	0,07	0,14	0,08	0,12	0,03
38	0,03	0,03	0,06	0,05	0,08	0,01
39	0,07	0,09	0,11	0,09	0,17	0,02
40	0,02	0,03	0,06	0,06	0,08	0,01

Tabel 4.2 Rata-rata Harmonik Arus Pada Tiap Beban

Orde	Rata-rata Harmonik Arus (%)					
	LHE 8W//18W//20W	TV	Kulkas	AC	Dispenser	Komputer
2	0,37	4,61	13,79	11,68	8,68	2,92
3	68,29	88,26	22,07	3,35	6,16	79,59
4	0,26	3,99	22,81	2,2	4,83	2,28
5	36,83	69,05	21,83	7,68	2,6	46,83
6	0,41	2,98	16,13	0,82	3,33	1,92
7	32,37	46,92	14,89	1,41	1,69	16,57
8	0,43	1,89	19,57	1,04	1,5	2,07
9	25,96	24,75	11,08	0,98	1,47	16,59
10	0,35	1,39	10,99	0,2	1,08	2,03
11	12,16	7,08	10,58	0,44	1,03	25,57
12	0,29	1,22	26,79	0,14	1,38	1,77
13	8,3	7,17	16,52	0,37	1,06	22,07
14	0,24	1,22	11,08	0,53	1,02	1,8

15	7,46	11,91	16,26	0,28	1,24	13,14
16	0,23	1	23,66	0,06	1,48	1,83
17	3,19	11,11	13,26	0,16	1,07	9,69
18	0,26	0,77	13,52	0,04	1,15	1,61
19	3,37	6,88	11,88	0,13	1,04	11,79
20	0,28	0,79	22,86	0,05	1,34	1,28
21	3,87	2,81	11,58	0,08	1,58	10,24
22	0,32	0,79	15,17	0,04	1,21	1,19
23	1,91	3,5	19,06	0,1	1,06	6,07
24	0,32	0,8	23,15	0,04	1,23	1,16
25	1,4	5,14	13,03	0,13	1,19	4,71
26	0,33	0,64	15,74	0,04	0,96	0,96
27	1,32	4,78	15	0,04	1,48	5,91
28	0,33	0,56	25,26	0,03	1,28	0,8
29	2,92	2,94	16,04	0,1	1,25	4,93
30	0,32	0,55	13,16	0,03	1,29	0,78
31	4,37	2,01	15,79	0,07	1,14	2,87
32	0,37	0,57	24,73	0,03	1,41	0,75
33	4,37	2,74	14,03	0,04	1,12	2,39
34	0,44	0,52	15,68	0,02	1,18	0,64
35	5,59	3,17	13,38	0,04	1,57	2,6
36	0,44	0,42	26,29	0,03	1,47	0,62
37	5,3	2,68	10,84	0,03	1,02	2,22
38	0,33	0,42	14,34	0,02	1,26	0,55
39	3,38	1,81	13,99	0,02	1,52	1,9

40	0,28	0,45	29,08	0,02	1,49	0,48
----	------	------	-------	------	------	------

Dari data di atas terlihat bahwa nilai harmonik tegangan terbesar adalah pada orde ke 5, sedangkan untuk nilai harmonik arus terbesar pada masing-masing beban bervariasi. Sehingga filter pasif akan didesain untuk mereduksi arus dan tegangan harmonik pada orde ke 5.

Setelah menentukan orde kerja filter, langkah selanjutnya adalah menentukan besarnya daya reaktif yang disuplai ke sistem untuk memperbaiki faktor daya. Untuk mencari besarnya faktor daya pada beban total, maka diperlukan data beban dari masing-masing beban. Dari persamaan (2.11), faktor daya dapat dicari menggunakan persamaan

$$PF = \frac{P}{S}$$

Setelah didapat nilai faktor daya dari masing-masing beban, langkah selanjutnya adalah menghitung besarnya daya reaktif yang dibutuhkan oleh masing-masing beban. Besarnya daya reaktif ini digunakan untuk memperbaiki faktor daya dari masing-masing beban. Untuk menghitung besarnya daya reaktif dapat menggunakan persamaan sebagai berikut (2.12):

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2}$$

Setelah mendapatkan nilai daya reaktif yang dibutuhkan, kemudian untuk menentukan reaktansi dari kapasitor melalui persamaan berikut :

$$X_C = \frac{kV^2_{rated}}{M var_{rated}} \quad (4.1)$$

Besar nilai kapasitor dapat dihitung dengan persamaan :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (4.2)$$

Dengan: f = frekuensi fundamental 50 Hz

Kemudian besar impedansi reaktor filter ditentukan dengan persamaan :

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (4.3)$$

Dengan : n = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit di bawah ordenya)

Pada simulasi ini, orde harmonik yang akan di filter adalah pada orde ke 5, sehingga penyetelan akan diturunkan sedikit di bawahnya, yaitu 4,9. Hal ini dilakukan sebagai toleransi komponen filter untuk mencegah adanya resonansi yang terjadi dalam sistem pada frekuensi yang mengganggu [2]. Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (4.4)$$

Kemudian langkah selanjutnya adalah menghitung karakteristik reaktansi untuk menentukan besarnya nilai resistansi yang dibutuhkan. Menghitung karakteristik reaktansi dapat dilakukan melalui persamaan berikut :

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.5)$$

Dari nilai karakteristik reaktansi yang didapat, maka besarnya resistansi filter dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$R = X_n Q \quad (4.6)$$

Pada perancangan filter kali ini, nilai Q yang digunakan adalah sebesar 5. Nilai faktor kualitas (Q) merupakan ukuran ketajaman penyetelan filter dalam mereduksi harmonik, maka dalam hal ini digunakan nilai tertinggi yaitu 5.

#### 4.2.1. Spesifikasi Filter Untuk Beban Lampu LHE

Untuk menghitung spesifikasi filter yang digunakan pada beban lampu LHE, dibutuhkan data beban total pada lampu LHE tersebut. Berikut ini adalah tabel beban total pada lampu LHE.

Tabel 4.3 Beban Total Lampu LHE

Daya	Maksimum	Minimum	Rata-rata
P (W)	33,1	31,6	32,08
Q (VAR)	-15,8	-17,2	-16,33
S (VA)	37,3	35,3	33,59

Berdasarkan data di atas, maka langkah pertama adalah menghitung besarnya faktor daya pada beban lampu LHE, menggunakan persamaan (2.11) :

$$PF = \frac{P}{S}$$

Dari perhitungan menggunakan persamaan di atas, besarnya faktor daya pada beban lampu LHE adalah sebesar 0,89. Jika kita ingin memperbaiki faktor daya sebesar 0,98, maka besarnya daya reaktif yang dibutuhkan adalah sebesar (2.12) :

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2}$$

Dari perhitungan di atas besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban LHE untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,98 adalah sebesar 10,23 VAR.

Setelah mendapatkan nilai daya reaktif yang dibutuhkan, kemudian untuk menentukan reaktansi dari kapasitor melalui persamaan berikut (4.1):

$$X_C = \frac{kV^2_{rated}}{M var_{rated}}$$

Dengan rating tegangan sebesar 220 Volt dan besar daya reaktif yaitu 10,23 VAR, maka nilai reaktansi kapasitor adalah sebesar 4.731Ω. Besar nilai kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (4.2) :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

Dengan: f = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari persamaan di atas didapat besar nilai kapasitor filter adalah 0,67μF. Kemudian besar impedansi reaktor filter ditentukan dengan persamaan (4.3):

$$X_L = \frac{X_C}{n^2}$$

Dengan : n = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit di bawah ordenya)

Pada simulasi ini, orde harmonik yang akan di filter adalah pada orde ke 5, sehingga penyetulan akan diturunkan sedikit di bawahnya, yaitu 4,9. Hal ini dilakukan sebagai toleransi komponen filter untuk mencegah adanya resonansi yang terjadi dalam sistem pada frekuensi yang mengganggu [2]. Dengan menggunakan persamaan di atas, besar reaktansi induktor pada filter adalah 197 Ω. Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut (4.4):

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

Dari persamaan di atas diperoleh besarnya induktor adalah 627,4 mH. Kemudian langkah selanjutnya adalah menghitung karakteristik reaktansi untuk menentukan besarnya nilai resistansi yang dibutuhkan. Menghitung karakteristik reaktansi dapat dilakukan melalui persamaan berikut (4.5):

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Besarnya karakteristik reaktansi adalah 968  $\Omega$ . Dari nilai karakteristik reaktansi yang didapat, maka besarnya resistansi filter dapat dihitung dengan persamaan berikut ini (4.6):

$$R = X_n Q$$

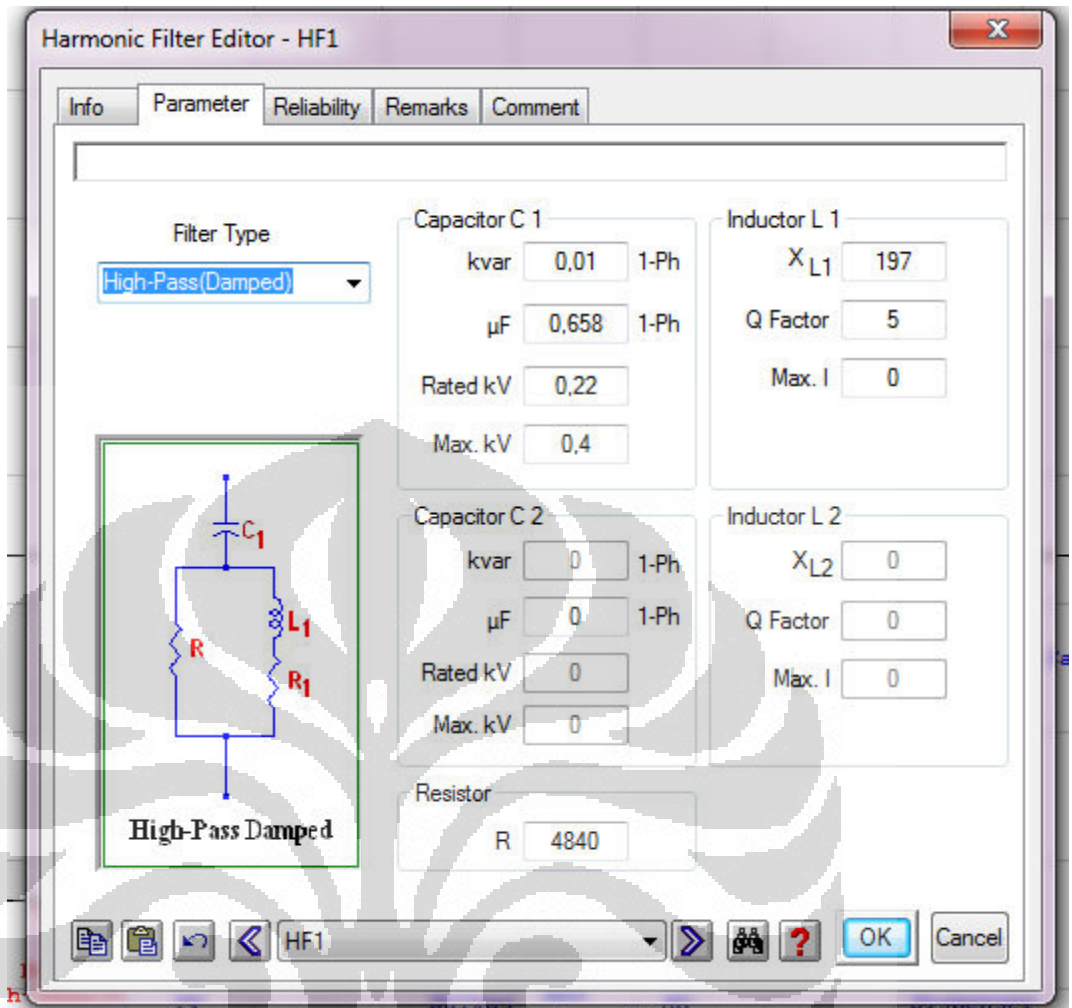
Pada perancangan filter kali ini, nilai Q yang digunakan adalah sebesar 5. Nilai faktor kualitas (Q) merupakan ukuran ketajaman penyetelan filter dalam mereduksi harmonik, maka dalam hal ini digunakan nilai tertinggi yaitu 5. Dari persamaan di atas nilai resistansi resistor adalah sebesar 4840 $\Omega$ .

Dari perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan spesifikasi filter sebagai berikut :

Tabel 4.4 Spesifikasi Filter Untuk Beban LHE

Spesifikasi	Nilai
L	627,4 mH
$X_L$	197 $\Omega$
C	0,67 $\mu$ F
$X_C$	4.731 $\Omega$
R	4.840 $\Omega$
QVAR	10,23 VAR
Rating Tegangan	220 Volt
Q Factor	5

Nilai-nilai spesifikasi di atas akan digunakan sebagai parameter nilai dalam perancangan filter pada simulasi ETAP. Berikut ini gambar parameter spesifikasi filter pada simulasi ETAP



Gambar 4.3 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban LHE

Untuk menentukan rating kerja dari filter, dilakukan beberapa tahapan langkah perhitungan sebagai berikut :

a. Perhitungan Kerja Fundamental Filter

Kelengkapan kerja fundamental filter terdiri dari untuk tegangan *phase to phase* dan daya 1 phasa :

- Impedansi fundamental :

$$X_{fund} = |X_L - X_C| \quad (4.7)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 4.534  $\Omega$

- Arus fundamental :

$$I_{fund} = \frac{V_{actual}}{X_{fund}} \quad (4.8)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 0,05 A



- Tegangan kapasitor

$$V_C = I_{fund} \times X_C \quad (4.9)$$

Dari perhitungan sebesar 236,55 V

- Rating kapasitor

$$VAR_{fund} = I_{fund} \times V_{rated} \quad (4.10)$$

Dari perhitungan sebesar 12,5 VAR.

#### b. Perhitungan Kerja Harmonik Filter

Ada dua macam arus harmonik pada sistem, yaitu harmonik dari sumber dan harmonik dari beban.

##### i. Arus harmonik yang dihasilkan oleh beban

- Arus harmonik total filter

Arus harmonik total hanya berasal dari beban saja. Dari data awal yang didapatkan bahwa arus harmonik terbesar pada orde ke 3 sebesar 68,29 %, maka besar arus harmonik yang dihasilkan beban dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$I_h = I_h (pu) \times \frac{VA}{V_{actual}} \quad (4.11)$$

Dari perhitungan didapat besar arus harmonik adalah 0,12 A

- Tegangan harmonik kapasitor

$$V_{Ch} = I_h \times X_C \div h \quad (4.12)$$

Dari perhitungan diperoleh 113,5 Volt

##### ii. Arus harmonik yang dihasilkan sisi sumber

Pada skripsi ini digunakan trafo yang memiliki karakteristik sebagai berikut :

Tabel 4.5 Karakteristik *utility system*

Karakteristik <i>Utility System 3φ</i>	
Daya	12 KVA
Primer	20 kV
Sekunder	0,38 kV
X/R	2.47 Ω
% Z	4

- Impedansi fundamental *service transformer*

$$X_T = Z_T(\%) \frac{kV^2_{rated}}{MVA_{rated}} \quad (4.13)$$

Dari perhitungan diperoleh 1,6  $\Omega$

- Impedansi harmonik dari *service transformer*

$$X_h = hX_T \quad (4.14)$$

Dari perhitungan diperoleh 8  $\Omega$

- Impedansi harmonik reaktor

$$X_C(harm) = \frac{X_C}{h} \quad (4.15)$$

Dari perhitungan diperoleh 69,88  $\Omega$

- Impedansi Harmonik reaktor

$$X_L(harm) = hX_L \quad (4.16)$$

Dari perhitungan diperoleh 72.75  $\Omega$

- Arus harmonik *utility*

$$I_{hU} = \frac{V_{h(utility)}(pu) \times V_{rated}}{(X_h - X_C + X_L)} \quad (4.17)$$

Dengan menggunakan simulasi pada ETAP, nilai THDv pada sisi utilisasi atau  $V_{h(utilisasi)}$  adalah 6,18 %. Dari persamaan diperoleh arus harmonik sisi utilisasi sebesar 0,13 A.

### c. Perhitungan Kerja Total Filter

- Arus rms total

$$I_{rms} = \sqrt{I^2_{fund} + I^2_{hU}} \quad (4.18)$$

Dari perhitungan diperoleh 0,14 A

- Tegangan puncak

$$V = V_C + V_{Ch} \quad (4.19)$$

Dari perhitungan diperoleh 350,05 Volt

- Tegangan rms [1]

$$V_{rms} = \sqrt{V^2_C + V^2_{Ch}} \quad (4.2)$$

Dari perhitungan diperoleh 262,4 V

- VAR total [1]

$$VAR_{total} = I_{rms} \times V_{rms} \quad (4.21)$$

Dari perhitungan diperoleh 36,74 VAR

Dari perhitungan-perhitungan di atas, maka dapat kita buat tabel perbandingan batasan kerja filter terhadap nilai aktual dari kerja filter tersebut.

Tabel 4.6 Perbandingan Batasan Kerja Filter

Kerja	Definisi	Batasan (%)	Nilai Aktual	Nilai Aktual (%)
Tegangan Puncak	V / V rated	120	350,05 /250	140,02
Tegangan RMS	V rms/V rated	110	262,4 /250	104,96
Arus RMS	I rms/ I fund	180	0,14 /0,05	280
VAR	VAR total/VAR fund	135	194,7/165	293,92

Dari tabel di atas, terlihat bahwa nilai tegangan puncak, arus RMS dan juga VAR dari filter sedikit melampaui dari batasan komponen filter yang diperbolehkan, akan tetapi, karena filter yang digunakan hanya untuk menyuplai daya yang kecil pada sistem dengan tegangan rendah dan arus yang kecil juga, maka filter ini masih mampu untuk menangani sistem pada beban rumah tangga yang terdapat pada simulasi.

#### 4.2.2. Spesifikasi Filter Untuk Beban TV

Sama seperti pada beban lampu LHE, dibutuhkan data beban total pada lampu TV tersebut. Berikut ini adalah tabel beban total pada lampu TV.

Tabel 4.7 Daya Beban Total TV

Daya	Maksimum	Minimum	Rata-rata
P (W)	70,2	52,9	61,57
Q (VAR)	-0,4	-1,9	-0,96
S (VA)	70,2	52,9	61,57

Dari data di atas, maka langkah selanjutnya adalah menghitung besarnya faktor daya pada beban TV, menggunakan persamaan (2.11) :

$$PF = \frac{P}{S}$$

Dari perhitungan di atas, nilai faktor daya pada beban TV adalah 1. Karena pada beban TV memiliki faktor daya yang sudah sangat baik, maka seharusnya di dalam analisa tidak diperhitungkan. Namun karena kita ingin melihat adanya pengaruh setelah adanya penambahan filter pada sistem, maka pada beban ini juga akan di filter dan filter untuk beban TV akan dibuat hampir menyerupai pada beban kulkas. Perhitungan untuk komponen filter pada beban TV dapat dilihat sebagai berikut.

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2}$$

Dari perhitungan di atas besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban kulkas untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,98 adalah sebesar 100 VAR.

Setelah mendapatkan nilai daya reaktif yang dibutuhkan, kemudian untuk menentukan reaktansi dari kapasitor melalui persamaan berikut (4.1):

$$X_C = \frac{kV^2_{rated}}{M var_{rated}}$$

Dengan rating tegangan sebesar 220 Volt dan besar daya reaktif yaitu 100 VAR, maka nilai reaktansi kapasitor adalah sebesar 484  $\Omega$ . Besar nilai kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (4.2) :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

Dengan: f = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari persamaan di atas didapat besar nilai kapasitor filter adalah 6,58  $\mu$ F. Kemudian besar impedansi reaktor filter ditentukan dengan persamaan (4.3):

$$X_L = \frac{X_C}{n^2}$$

Dengan : n = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit di bawah ordenya)

Dengan menggunakan persamaan di atas, besar reaktansi induktor pada filter adalah 20,16  $\Omega$ . Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut (4.4):

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

Dari persamaan di atas diperoleh besarnya induktor adalah 64,2 mH. Kemudian langkah selanjutnya adalah menghitung karakteristik reaktansi untuk menentukan besarnya nilai resistansi yang dibutuhkan. Menghitung karakteristik reaktansi dapat dilakukan melalui persamaan berikut (4.5):

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Besarnya karakteristik reaktansi adalah 98,78  $\Omega$ . Dari nilai karakteristik reaktansi yang didapat, maka besarnya resistansi filter dapat dihitung dengan persamaan berikut ini (4.6):

$$R = X_n Q$$

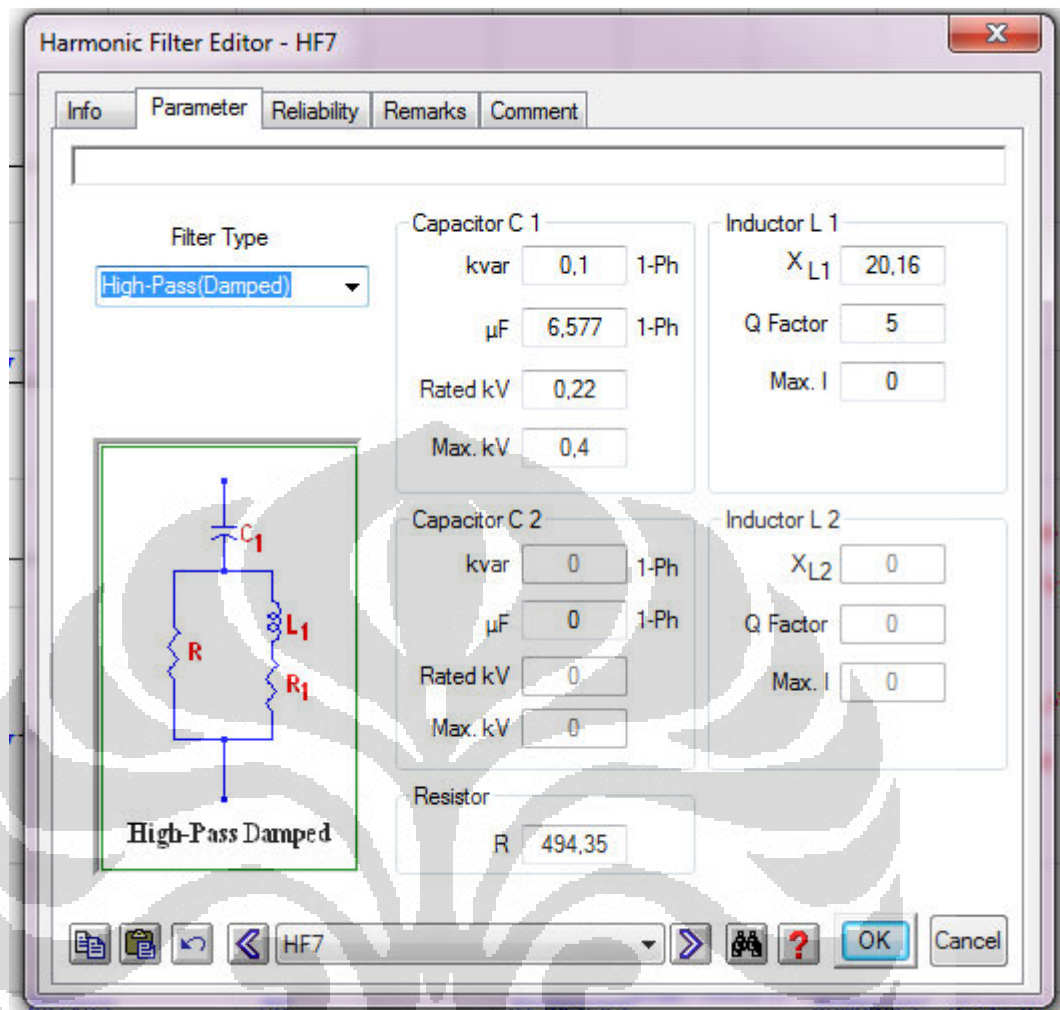
Dari persamaan di atas, nilai resistansi resistor adalah sebesar 494,35  $\Omega$ .

Dari perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan spesifikasi filter sebagai berikut :

Tabel 4.8 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas

Spesifikasi	Nilai
L	64,2 mH
$X_L$	20,16 $\Omega$
C	6,58 $\mu$ F
$X_C$	484 $\Omega$
R	494,35 $\Omega$
QVAR	100 VAR
Rating Tegangan	220 Volt
Q Factor	5

Nilai-nilai spesifikasi di atas akan digunakan sebagai parameter nilai dalam perancangan filter pada simulasi ETAP. Berikut ini gambar parameter spesifikasi filter pada simulasi ETAP



Gambar 4.4 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban TV

### 4.2.3. Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas

Sama seperti pada sebelumnya, hal pertama yang dibutuhkan adalah beban total dari masing-masing beban. berikut ini adalah data beban total untuk beban kulkas

Tabel 4.9 Daya Beban Total Kulkas

Daya	Maksimum	Minimum	Rata-rata
P (W)	116,9	0,02	39,59
Q (VAR)	119,32	-0,02	-45,06
S (VA)	166,41	0,02	60

Dari tabel diatas, besarnya faktor daya beban kulkas dihitung menggunakan persamaan (2.11) :

$$PF = \frac{P}{S}$$

Dari perhitungan menggunakan persamaan di atas, besarnya faktor daya pada beban kulkas adalah sebesar 0,7. Jika kita ingin memperbaiki faktor daya sebesar 0,98, maka besarnya daya reaktif yang dibutuhkan adalah sebesar (2.12) :

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2}$$

Dari perhitungan di atas besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban kulkas untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,98 adalah sebesar 95,52 VAR.

Setelah mendapatkan nilai daya reaktif yang dibutuhkan, kemudian untuk menentukan reaktansi dari kapasitor melalui persamaan berikut (4.1):

$$X_C = \frac{kV^2_{rated}}{M var_{rated}}$$

Dengan rating tegangan sebesar 220 Volt dan besar daya reaktif yaitu 95,52 VAR, maka nilai reaktansi kapasitor adalah sebesar 506,7  $\Omega$ . Besar nilai kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (4.2) :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

Dengan: f = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari persamaan di atas didapat besar nilai kapasitor filter adalah 6,3  $\mu F$ . Kemudian besar impedansi reaktor filter ditentukan dengan persamaan (4.3):

$$X_L = \frac{X_C}{n^2}$$

Dengan : n = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit di bawah ordenya)

Dengan menggunakan persamaan di atas, besar reaktansi induktor pada filter adalah 21,1  $\Omega$ . Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut (4.4):

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

Dari persamaan di atas diperoleh besarnya induktor adalah 67,2 mH. Kemudian langkah selanjutnya adalah menghitung karakteristik reaktansi untuk menentukan besarnya nilai resistansi yang dibutuhkan. Menghitung karakteristik reaktansi dapat dilakukan melalui persamaan berikut (4.5):

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Besarnya karakteristik reaktansi adalah 103,3  $\Omega$ . Dari nilai karakteristik reaktansi yang didapat, maka besarnya resistansi filter dapat dihitung dengan persamaan berikut ini (4.6):

$$R = X_n Q$$

Dari persamaan di atas, nilai resistansi resistor adalah sebesar 516,5  $\Omega$ .

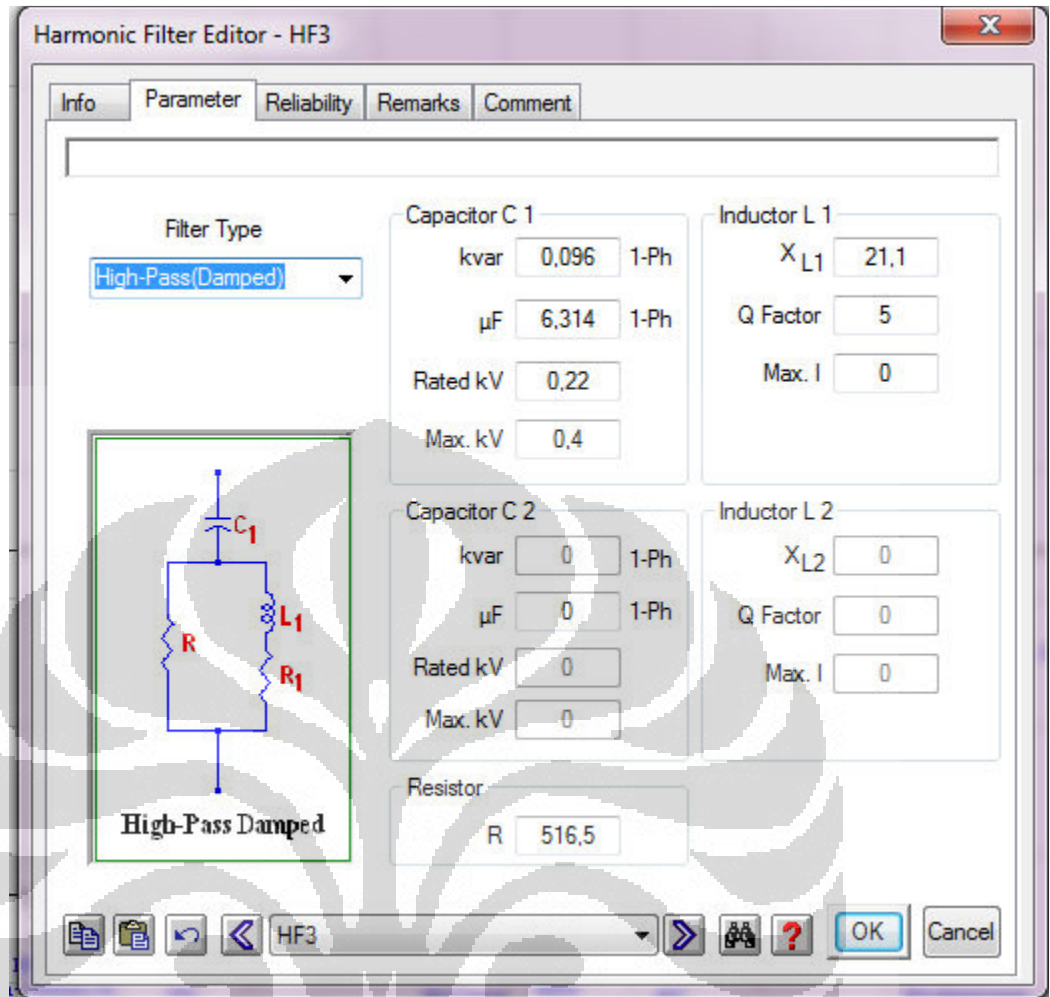
Dari perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan spesifikasi filter sebagai berikut :

Tabel 4.10 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas

Spesifikasi	Nilai
L	67,2 mH
$X_L$	21,1 $\Omega$
C	6,3 $\mu\text{F}$
$X_C$	506,7 $\Omega$
R	516,5 $\Omega$
QVAR	95,52 VAR
Rating Tegangan	220 Volt
Q Factor	5

Nilai-nilai spesifikasi di atas akan digunakan sebagai parameter nilai dalam perancangan filter pada simulasi ETAP. Berikut ini gambar parameter spesifikasi filter pada simulasi ETAP





Gambar 4.5 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban Kulkas

Untuk menentukan rating kerja dari filter, dilakukan beberapa tahapan langkah perhitungan sebagai berikut :

a. Perhitungan Kerja Fundamental Filter

Kelengkapan kerja fundamental filter terdiri dari untuk tegangan *phase to phase* dan daya 1 phasa :

- Impedansi fundamental :

$$X_{fund} = |X_L - X_C|$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 485,6 Ω

- Arus fundamental :

$$I_{fund} = \frac{V_{actual}}{X_{fund}}$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 0,45 A

- Tegangan kapasitor

$$V_C = I_{fund} \times X_C$$

Dari perhitungan sebesar 228 V

- Rating kapasitor

$$VAR_{fund} = I_{fund} \times V_{rated}$$

Dari perhitungan sebesar 112,5 VAR

#### b. Perhitungan Kerja Harmonik Filter

Ada dua macam arus harmonik pada sistem, yaitu harmonik dari sumber dan harmonik dari beban.

##### i. Arus harmonik yang dihasilkan oleh beban

- Arus harmonik total filter

Arus harmonik total hanya berasal dari beban saja. Dari data awal yang didapatkan bahwa arus harmonik terbesar pada orde ke 4 sebesar 21,83 %, maka besar arus harmonik yang dihasilkan beban dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$I_h = I_h (pu) \times \frac{VA}{V_{actual}}$$

Dari perhitungan didapat besar arus harmonik adalah 0,165 A

- Tegangan harmonik kapasitor

$$V_{ch} = I_h \times X_C \div h$$

Dari perhitungan diperoleh 20,9 Volt

##### ii. Arus harmonik yang dihasilkan sisi sumber

Pada skripsi ini digunakan trafo yang memiliki karakteristik sebagai berikut :

Tabel 4.11 Karakteristik *utility system*

Karakteristik <i>Utility System 3φ</i>	
Daya	12 KVA
Primer	20 kV
Sekunder	0,38 kV
X/R	2.47 Ω
% Z	4

- Impedansi fundamental *service transformer*

$$X_T = Z_T(\%) \frac{kV^2_{rated}}{MVA_{rated}} \quad (4.13)$$

Dari perhitungan diperoleh 1,6  $\Omega$

- Impedansi harmonik dari *service transformer*

$$X_h = hX_T \quad (4.14)$$

Dari perhitungan diperoleh 8  $\Omega$

- Impedansi harmonik reaktor

$$X_C(harm) = \frac{X_C}{h} \quad (4.15)$$

Dari perhitungan diperoleh 69,88  $\Omega$

- Impedansi Harmonik reaktor

$$X_L(harm) = hX_L \quad (4.16)$$

Dari perhitungan diperoleh 72.75  $\Omega$

- Arus harmonik *utility*

$$I_{hU} = \frac{V_{h(utility)}(pu) \times V_{rated}}{(X_h - X_C + X_L)} \quad (4.17)$$

Dengan menggunakan simulasi pada ETAP, nilai THDv pada sisi utilisasi atau  $V_{h(utlisasi)}$  adalah 6,18 %. Dari persamaan diperoleh arus harmonik sisi utilisasi sebesar 0,13 A.

### c. Perhitungan Kerja Total Filter

- Arus rms total

$$I_{rms} = \sqrt{I^2_{fund} + I^2_{hU}} \quad (4.18)$$

Dari perhitungan diperoleh 0,47 A

- Tegangan puncak

$$V = V_C + V_{Ch} \quad (4.19)$$

Dari perhitungan diperoleh 248,9 Volt

- Tegangan rms [1]

$$V_{rms} = \sqrt{V^2_C + V^2_{Ch}} \quad (4.2)$$

Dari perhitungan diperoleh 228,9 V

- VAR total [1]

$$VAR_{total} = I_{rms} \times V_{rms} \quad (4.21)$$

Dari perhitungan diperoleh 107,6 VAR

Dari perhitungan-perhitungan di atas, maka dapat kita buat tabel perbandingan batasan kerja filter terhadap nilai aktual dari kerja filter tersebut.

Tabel 4.12 Perbandingan Batasan Kerja Filter

Kerja	Definisi	Batasan (%)	Nilai Aktual	Nilai Aktual (%)
Tegangan Puncak	V / V rated	120	248,9/250	99,56
Tegangan RMS	V rms/V rated	110	228,9 /250	91,56
Arus RMS	I rms/ I fund	180	0,47/0,45	104,4
VAR	VAR total/VAR fund	135	107,6 /112,5	95,64

Dari tabel di atas, terlihat semua batasan kerja filter berada di bawah batasan komponen filter. Hal ini menunjukkan bahwa filter pada beban kulkas sudah sesuai dengan standar dan dapat bekerja untuk mengurangi arus dan tegangan harmonik pada beban kulkas tersebut.

#### 4.2.4. Spesifikasi Filter Untuk Beban AC

Berikut ini adalah data beban total pada beban AC

Tabel 4.13 Daya Total Beban AC

Daya	Maksimum	Minimum	Rata-rata
P (W)	804	696	780,69
Q (VAR)	-85,3	-103,9	-93,94
S (VA)	809,2	703,1	749,11

Besarnya faktor daya untuk beban AC dapat dihitung menggunakan persamaan (2.11) :

$$PF = \frac{P}{S}$$

Dari perhitungan di atas, nilai faktor daya pada beban TV adalah 1. Karena pada beban TV memiliki faktor daya yang sudah sangat baik, maka seharusnya di dalam analisa tidak diperhitungkan. Namun karena kita ingin melihat adanya pengaruh setelah adanya penambahan filter pada sistem, maka pada beban ini juga akan di filter dan filter untuk beban TV akan dibuat hampir menyerupai pada beban kulkas. Perhitungan untuk komponen filter pada beban TV dapat dilihat sebagai berikut.

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2}$$

Dari perhitungan di atas besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban kulkas untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,98 adalah sebesar 95,52 VAR.

Setelah mendapatkan nilai daya reaktif yang dibutuhkan, kemudian untuk menentukan reaktansi dari kapasitor melalui persamaan berikut (4.1):

$$X_C = \frac{kV^2_{rated}}{M var_{rated}}$$

Dengan rating tegangan sebesar 220 Volt dan besar daya reaktif yaitu 95,52 VAR, maka nilai reaktansi kapasitor adalah sebesar 506,7  $\Omega$ . Besar nilai kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (4.2) :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

Dengan: f = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari persamaan di atas didapat besar nilai kapasitor filter adalah 6,3  $\mu$ F. Kemudian besar impedansi reaktor filter ditentukan dengan persamaan (4.3):

$$X_L = \frac{X_C}{n^2}$$

Dengan : n = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit di bawah ordenya)

Dengan menggunakan persamaan di atas, besar reaktansi induktor pada filter adalah 21,1  $\Omega$ . Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut (4.4):

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

Dari persamaan di atas diperoleh besarnya induktor adalah 67,2 mH. Kemudian langkah selanjutnya adalah menghitung karakteristik reaktansi untuk menentukan besarnya nilai resistansi yang dibutuhkan. Menghitung karakteristik reaktansi dapat dilakukan melalui persamaan berikut (4.5):

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Besarnya karakteristik reaktansi adalah 103,3  $\Omega$ . Dari nilai karakteristik reaktansi yang didapat, maka besarnya resistansi filter dapat dihitung dengan persamaan berikut ini (4.6):

$$R = X_n Q$$

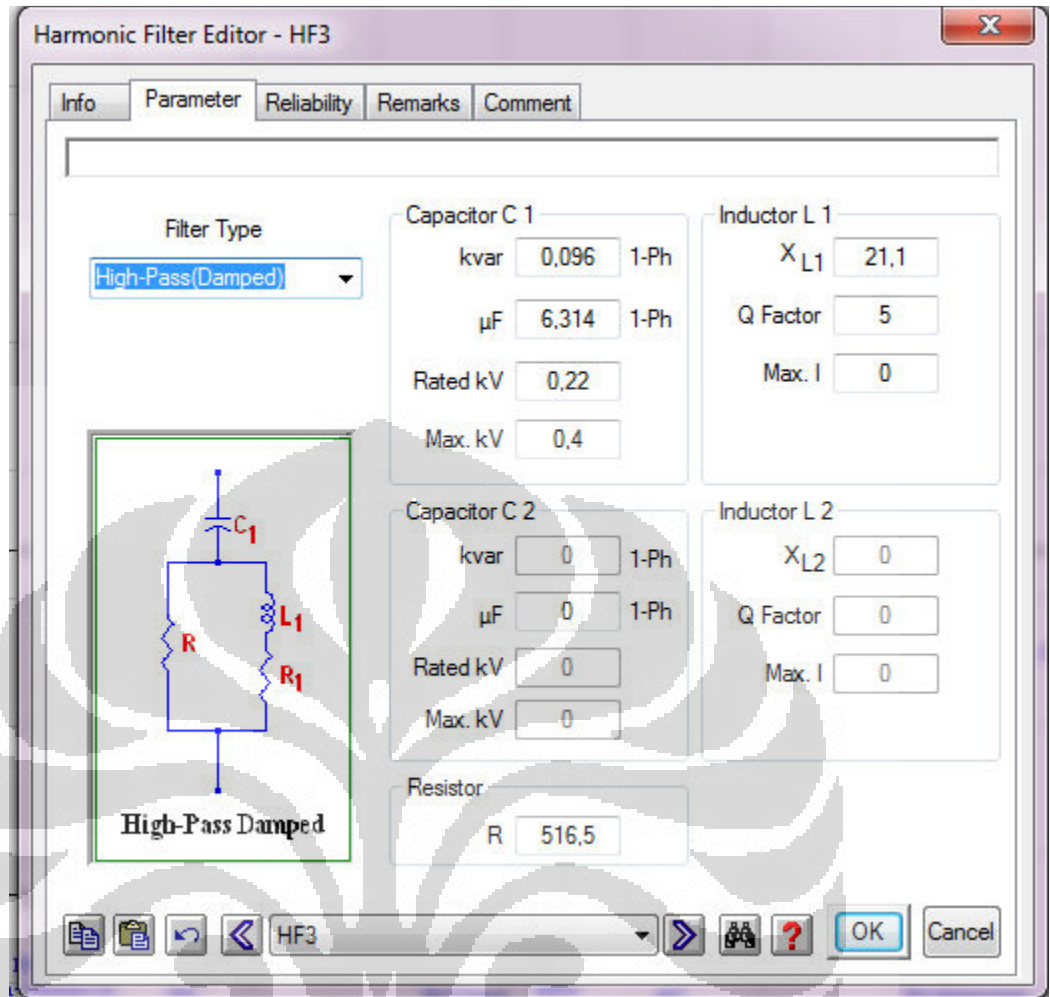
Dari persamaan di atas, nilai resistansi resistor adalah sebesar 516,5  $\Omega$ .

Dari perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan spesifikasi filter sebagai berikut :

Tabel 4.14 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas

Spesifikasi	Nilai
L	67,2 mH
$X_L$	21,1 $\Omega$
C	6,3 $\mu\text{F}$
$X_C$	506,7 $\Omega$
R	516,5 $\Omega$
QVAR	95,52 VAR
Rating Tegangan	220 Volt
Q Factor	5

Nilai-nilai spesifikasi di atas akan digunakan sebagai parameter nilai dalam perancangan filter pada simulasi ETAP. Berikut ini gambar parameter spesifikasi filter pada simulasi ETAP



Gambar 4.6 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban AC

#### 4.2.5. Spesifikasi Filter Untuk Beban Dispenser

Berikut ini adalah data beban total pada beban dispenser :

Tabel 4.15 Daya Total Beban Dispenser

Daya	Maksimum	Minimum	Rata-rata
P (W)	318,8	0,7	91,4
Q (VAR)	-0,1	-7	-2,06
S (VA)	318,8	0,7	91,4

Besarnya faktor daya untuk beban dispenser dapat dihitung menggunakan persamaan (2.11) :

$$PF = \frac{P}{S}$$

Dari perhitungan di atas, nilai faktor daya pada beban TV adalah 1. Karena pada beban TV memiliki faktor daya yang sudah sangat baik, maka seharusnya di dalam analisa tidak diperhitungkan. Namun karena kita ingin melihat adanya pengaruh setelah adanya penambahan filter pada sistem, maka pada beban ini juga akan di filter dan filter untuk beban TV akan dibuat hampir menyerupai pada beban kulkas. Perhitungan untuk komponen filter pada beban TV dapat dilihat sebagai berikut.

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2}$$

Dari perhitungan di atas besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban kulkas untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,98 adalah sebesar 95,52 VAR.

Setelah mendapatkan nilai daya reaktif yang dibutuhkan, kemudian untuk menentukan reaktansi dari kapasitor melalui persamaan berikut (4.1):

$$X_C = \frac{kV^2_{rated}}{M var_{rated}}$$

Dengan rating tegangan sebesar 220 Volt dan besar daya reaktif yaitu 95,52 VAR, maka nilai reaktansi kapasitor adalah sebesar 506,7  $\Omega$ . Besar nilai kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (4.2) :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

Dengan: f = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari persamaan di atas didapat besar nilai kapasitor filter adalah 6,3  $\mu$ F. Kemudian besar impedansi reaktor filter ditentukan dengan persamaan (4.3):

$$X_L = \frac{X_C}{n^2}$$

Dengan : n = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit di bawah ordenya)

Dengan menggunakan persamaan di atas, besar reaktansi induktor pada filter adalah 21,1  $\Omega$ . Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut (4.4):



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

Dari persamaan di atas diperoleh besarnya induktor adalah 67,2 mH. Kemudian langkah selanjutnya adalah menghitung karakteristik reaktansi untuk menentukan besarnya nilai resistansi yang dibutuhkan. Menghitung karakteristik reaktansi dapat dilakukan melalui persamaan berikut (4.5):

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Besarnya karakteristik reaktansi adalah 103,3  $\Omega$ . Dari nilai karakteristik reaktansi yang didapat, maka besarnya resistansi filter dapat dihitung dengan persamaan berikut ini (4.6):

$$R = X_n Q$$

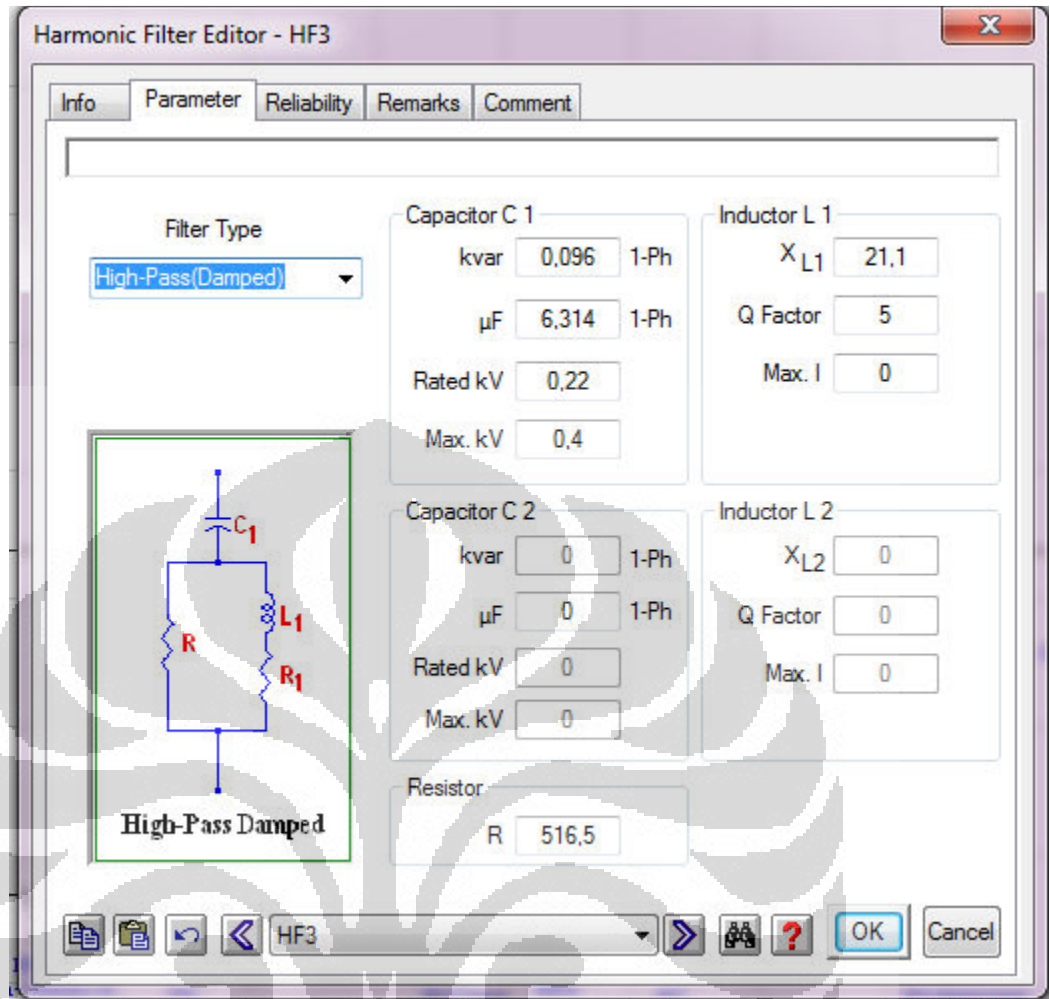
Dari persamaan di atas, nilai resistansi resistor adalah sebesar 516,5  $\Omega$ .

Dari perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan spesifikasi filter sebagai berikut :

Tabel 4.16 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas

Spesifikasi	Nilai
L	67,2 mH
$X_L$	21,1 $\Omega$
C	6,3 $\mu\text{F}$
$X_C$	506,7 $\Omega$
R	516,5 $\Omega$
QVAR	95,52 VAR
Rating Tegangan	220 Volt
Q Factor	5

Nilai-nilai spesifikasi di atas akan digunakan sebagai parameter nilai dalam perancangan filter pada simulasi ETAP. Berikut ini gambar parameter spesifikasi filter pada simulasi ETAP



Gambar 4.7 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban Dispenser

#### 4.2.6. Spesifikasi Filter Untuk Beban Komputer

Berikut ini adalah data beban total untuk beban komputer :

Tabel 4.17 Daya Total Beban Komputer

Daya	Maksimum	Minimum	Rata-rata
P (W)	206,6	139	169,4
Q (VAR)	-19,9	-50,4	-33,55
S (VA)	212,6	140,4	173

Dari data beban total komputer di atas, maka besarnya faktor daya untuk beban komputer dapat dihitung menggunakan persamaan (2.11) :

$$PF = \frac{P}{S}$$

Dari persamaan di atas, besarnya faktor daya pada beban komputer adalah sebesar 0,97. Jika filter ini digunakan untuk memperbaiki faktor daya sebesar 0,98, maka besarnya daya reaktif yang dibutuhkan adalah sebesar (2.12) :

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2}$$

Dari perhitungan di atas besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban kulkas untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,98 adalah sebesar 9,83 VAR.

Setelah mendapatkan nilai daya reaktif yang dibutuhkan, kemudian untuk menentukan reaktansi dari kapasitor melalui persamaan berikut (4.1):

$$X_C = \frac{kV^2_{rated}}{M var_{rated}}$$

Dengan rating tegangan sebesar 220 Volt dan besar daya reaktif yaitu 9,83 VAR, maka nilai reaktansi kapasitor adalah sebesar 4923,7  $\Omega$ . Besar nilai kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (4.2) :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

Dengan: f = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari persamaan di atas didapat besar nilai kapasitor filter adalah 0,658  $\mu$ F. Kemudian besar impedansi reaktor filter ditentukan dengan persamaan (4.3):

$$X_L = \frac{X_C}{n^2}$$

Dengan : n = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit di bawah ordenya)

Dengan menggunakan persamaan di atas, besar reaktansi induktor pada filter adalah 205  $\Omega$ . Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut (4.4):

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

Dari persamaan di atas diperoleh besarnya induktor adalah 653 mH. Kemudian langkah selanjutnya adalah menghitung karakteristik reaktansi untuk menentukan besarnya nilai resistansi yang dibutuhkan. Menghitung karakteristik reaktansi dapat dilakukan melalui persamaan berikut (4.5):

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Besarnya karakteristik reaktansi adalah 996,2  $\Omega$ . Dari nilai karakteristik reaktansi yang didapat, maka besarnya resistansi filter dapat dihitung dengan persamaan berikut ini (4.6):

$$R = X_n Q$$

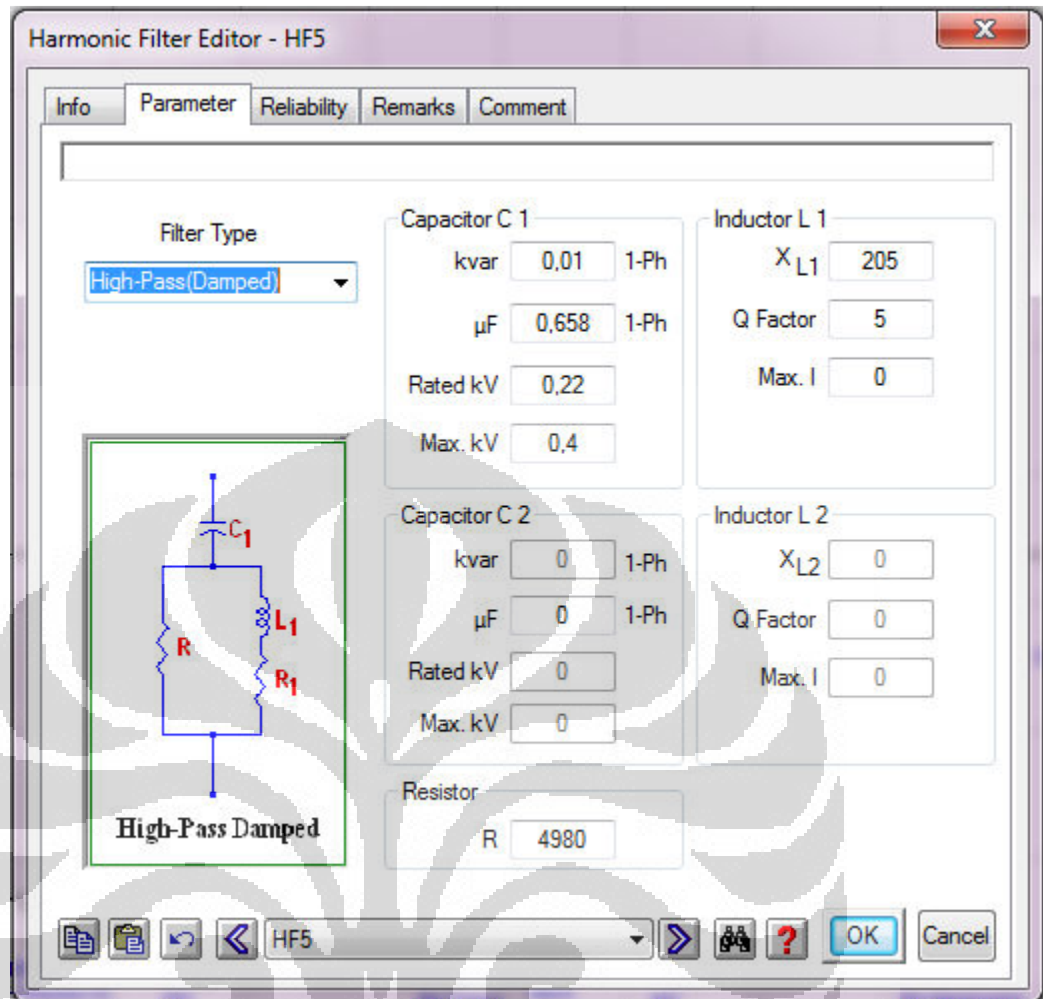
Dari persamaan di atas, nilai resistansi resistor adalah sebesar 4980  $\Omega$ .

Dari perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan spesifikasi filter sebagai berikut :

Tabel 4.18 Spesifikasi Filter Untuk Beban Kulkas

Spesifikasi	Nilai
L	653 mH
$X_L$	205 $\Omega$
C	0,658 $\mu$ F
$X_C$	4923,7 $\Omega$
R	4980 $\Omega$
QVAR	9,83 VAR
Rating Tegangan	220 Volt
Q Factor	5

Nilai-nilai spesifikasi di atas akan digunakan sebagai parameter nilai dalam perancangan filter pada simulasi ETAP. Berikut ini gambar parameter spesifikasi filter pada simulasi ETAP



Gambar 4.8 Parameter Spesifikasi Filter pada ETAP untuk beban Komputer

Untuk menentukan rating kerja dari filter, dilakukan beberapa tahapan langkah perhitungan sebagai berikut :

a. Perhitungan Kerja Fundamental Filter

Kelengkapan kerja fundamental filter terdiri dari untuk tegangan *phase to phase* dan daya 1 phasa :

- Impedansi fundamental :

$$X_{fund} = |X_L - X_C|$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 4.718,7  $\Omega$

- Arus fundamental :

$$I_{fund} = \frac{V_{actual}}{X_{fund}}$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 0,05A

- Tegangan kapasitor

$$V_C = I_{fund} \times X_C$$

Dari perhitungan sebesar 246,2 V

- Rating kapasitor

$$VAR_{fund} = I_{fund} \times V_{rated}$$

Dari perhitungan sebesar 12,5 VAR

b. Perhitungan Kerja Harmonik Filter

Ada dua macam arus harmonik pada sistem, yaitu harmonik dari sumber dan harmonik dari beban.

1. Arus harmonik yang dihasilkan oleh beban

- Arus harmonik total filter

Arus harmonik total hanya berasal dari beban saja. Dari data awal yang didapatkan bahwa arus harmonik terbesar pada orde ke 3 sebesar 79,59 %, maka besar arus harmonik yang dihasilkan beban dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$I_h = I_h (pu) \times \frac{VA}{V_{actual}}$$

Dari perhitungan didapat besar arus harmonik adalah 0,77 A

- Tegangan harmonik kapasitor

$$V_{Ch} = I_h \times X_C \div h$$

Dari perhitungan diperoleh 758 Volt

2. Arus harmonik yang dihasilkan sisi sumber

Pada skripsi ini digunakan trafo yang memiliki karakteristik sebagai berikut :

Tabel 4.19 Karakteristik *utility system*

Karakteristik <i>Utility System 3φ</i>	
Daya	12 KVA
Primer	20 kV
Sekunder	0,38 kV
X/R	2.47 Ω
% Z	4

- Impedansi fundamental *service transformer*

$$X_T = Z_T(\%) \frac{kV^2_{rated}}{MVA_{rated}} \quad (4.13)$$

Dari perhitungan diperoleh 1,6  $\Omega$

- Impedansi harmonik dari *service transformer*

$$X_h = hX_T \quad (4.14)$$

Dari perhitungan diperoleh 8  $\Omega$

- Impedansi harmonik reaktor

$$X_C(harm) = \frac{X_C}{h} \quad (4.15)$$

Dari perhitungan diperoleh 69,88  $\Omega$

- Impedansi Harmonik reaktor

$$X_L(harm) = hX_L \quad (4.16)$$

Dari perhitungan diperoleh 72.75  $\Omega$

- Arus harmonik *utility*

$$I_{hU} = \frac{V_{h(utility)}(pu) \times V_{rated}}{(X_h - X_C + X_L)} \quad (4.17)$$

Dengan menggunakan simulasi pada ETAP, nilai THDv pada sisi utilisasi atau  $V_{h(utilisasi)}$  adalah 6,18 %. Dari persamaan diperoleh arus harmonik sisi utilisasi sebesar 0,13 A.

### c. Perhitungan Kerja Total Filter

- Arus rms total

$$I_{rms} = \sqrt{I^2_{fund} + I^2_{hU}} \quad (4.18)$$

Dari perhitungan diperoleh 0,14 A

- Tegangan puncak

$$V = V_C + V_{Ch} \quad (4.19)$$

Dari perhitungan diperoleh 1.004 Volt

- Tegangan rms [1]

$$V_{rms} = \sqrt{V^2_C + V^2_{Ch}} \quad (4.2)$$

Dari perhitungan diperoleh 797 V

- VAR total [1]

$$VAR_{total} = I_{rms} \times V_{rms} \quad (4.21)$$

Dari perhitungan diperoleh 111,6 VAR

Dari perhitungan-perhitungan di atas, maka dapat kita buat tabel perbandingan batasan kerja filter terhadap nilai aktual dari kerja filter tersebut.

Tabel 4.20 Perbandingan Batasan Kerja Filter

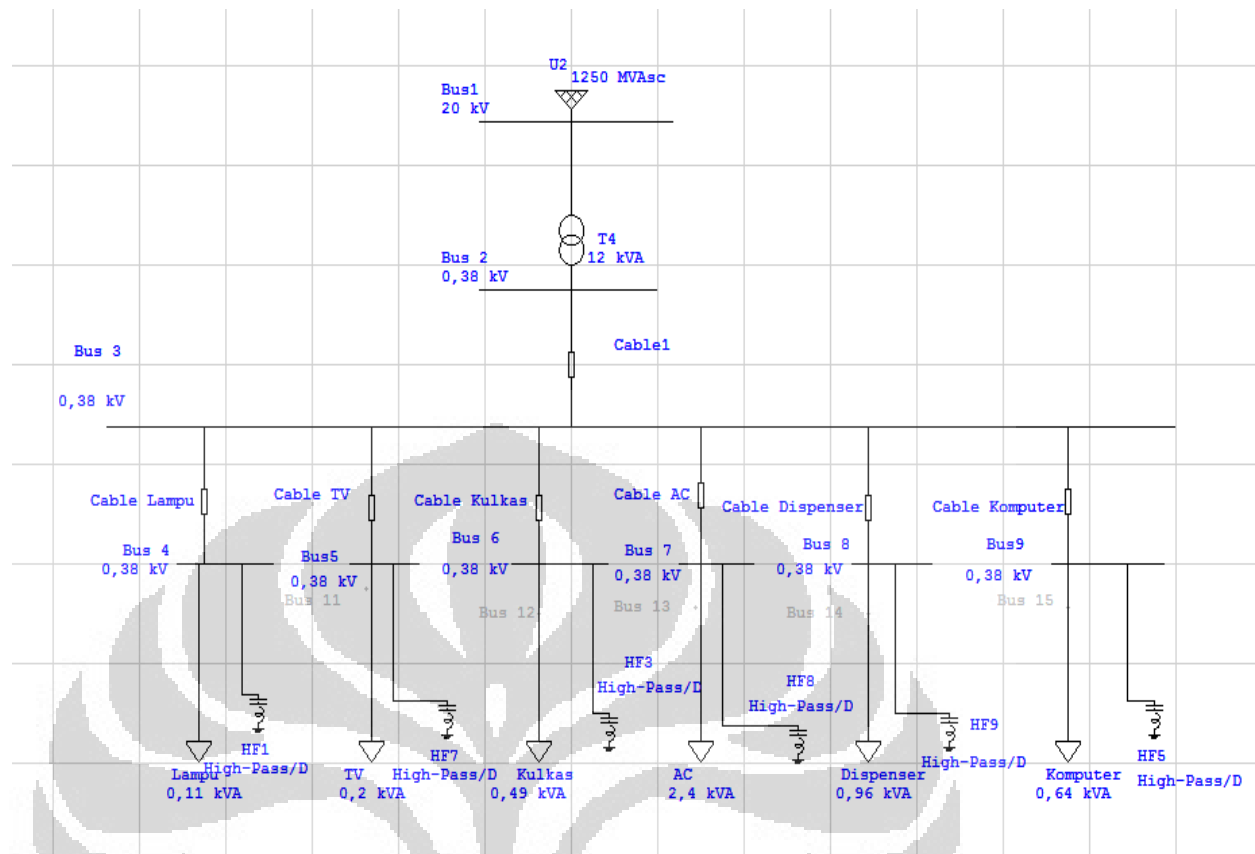
Kerja	Definisi	Batasan (%)	Nilai Aktual	Nilai Aktual (%)
Tegangan Puncak	V / V rated	120	1.004 /250	401,6
Tegangan RMS	V rms/V rated	110	797/250	318,8
Arus RMS	I rms/ I fund	180	0,14/0,05	280
VAR	VAR total/VAR fund	135	111,6/12,5	8.928

Dari tabel di atas, semua nilai batasan kerja filter melampaui dari batasan komponen filter yang diperbolehkan, akan tetapi karena filter yang digunakan hanya untuk menyuplai daya yang kecil pada sistem dengan tegangan rendah dan arus yang kecil juga, maka filter ini masih mampu untuk menangani sistem pada beban komputer yang terdapat pada simulasi.

#### 4.3. Pemasangan Second Order Damped Filter Untuk Masing-masing Beban

Pemasangan filter pada tiap beban cenderung lebih efektif jika dibandingkan dengan pemasangan pada beban total. Namun jika dilihat dari segi ekonomis, penggunaan filter pada tiap beban justru tidak ekonomis. Hal ini disebabkan karena akan membutuhkan banyak filter pada setiap beban dan otomatis membutuhkan biaya yang lebih besar pula. Berikut ini adalah gambar penempatan *second order damped filter* pada masing-masing beban:





Gambar 4.9 Penempatan *second order damped filter* pada masing-masing beban

#### 4.4. Analisa Arus dan Tegangan Harmonik Dari Simulasi

Pada simulasi yang dilakukan, beban TV, AC, dan Dispenser dalam keadaan *out of service* atau tidak dalam keadaan terpasang. Hal ini dikarenakan pada beban-beban tersebut tidak dipasang filter.

Berikut ini adalah tabel perbandingan dari harmonik arus dan harmonik tegangan pada masing-masing beban sebelum dan sesudah pemasangan filter

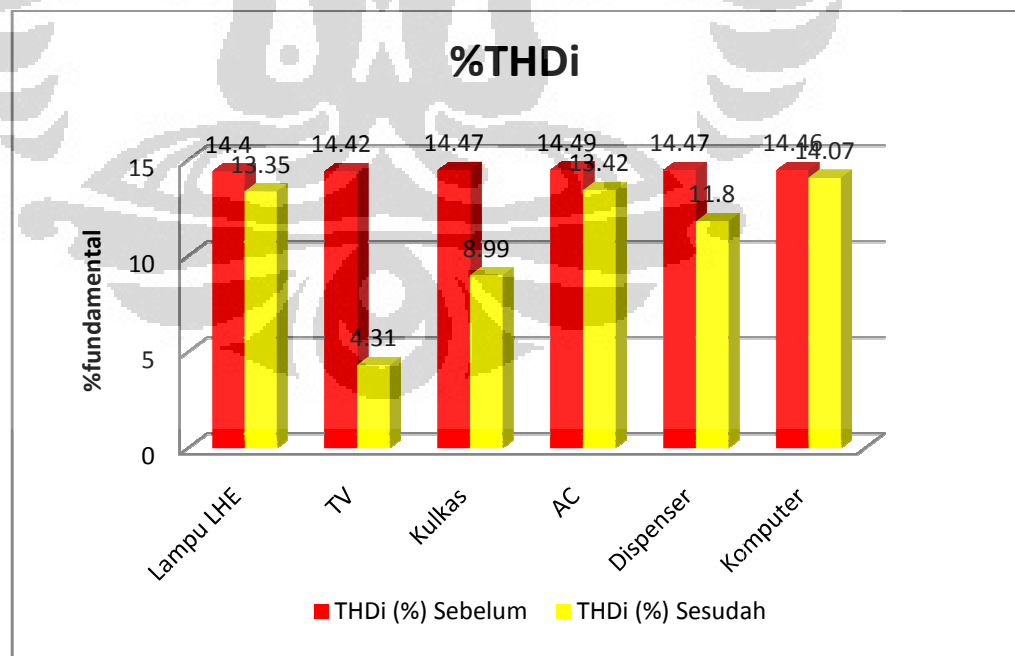
Tabel 4.21 Total Harmonic Distortion Arus dan Tegangan Sebelum dan Sesudah Filter

Beban	THDi (%)		THDv (%)	
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
Lampu LHE	14,40	13,35	5,73	3,87
TV	14,42	4,31	5,73	3,87
Kulkas	14,47	8,99	5,73	3,87
AC	14,49	13,42	5,75	3,89
Dispenser	14,47	11,80	5,73	3,87
Komputer	14,46	14,07	5,73	3,87

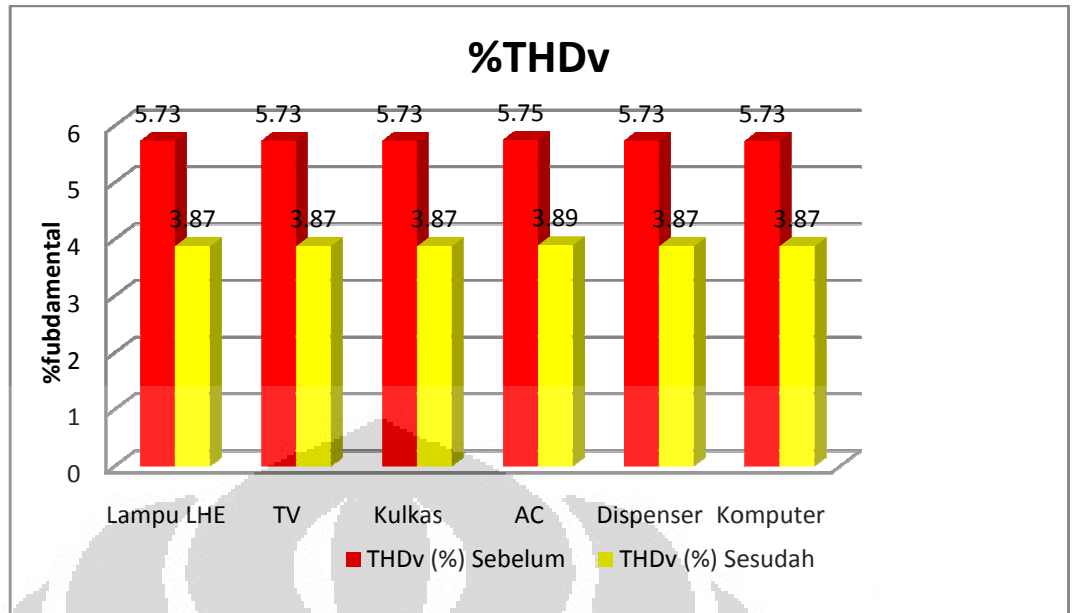
Dari tabel di atas terlihat bahwa baik nilai THDi dan THDv sebelum dan sesudah pemasangan filter mengalami penurunan. Harmonik tegangan terjadi karena adanya arus harmonik pada sistem yang mengakibatkan drop tegangan pada tiap orde, sehingga terbentuklah gelombang sinusoidal pada orde harmonik. Jadi, besarnya harmonik tegangan sangat dipengaruhi oleh besarnya arus harmonik pada sistem. Dengan penggunaan filter, arus harmonik pada sistem akan berkurang sehingga drop tegangan yang terjadi pada setiap orde berkurang dan harmonik tegangan ikut berkurang.

Selain itu, filter ini juga dihitung sebagai beban yang didalamnya terdapat komponen harmonik dan juga nilai harmonik sendiri, maka komponen harmonik dalam sistem merupakan penjumlahan dari harmonik yang bersal dari beban dan juga harmonik dari filter itu sendiri. Namun karena harmonik yang dihasilkan oleh filter relatif kecil, maka tidak akan terlalu menghalangi tugas utama dari filter tersebut.

Untuk lebih jelasnya lagi, berikut ini merupakan grafik dari THDi dan THDv sebelum dan sesudah penggunaan filter.



Gambar 4.10 THDi Sebelum dan Sesudah Pemakaian Filter



Gambar 4.11 THDv Sebelum dan Sesudah Pemakaian Filter

#### 4.5. Arus dan Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan Filter

Selain berfungsi untuk mengurangi nilai THDi dan THDv, filter pada simulasi ini juga ternyata dapat menyebabkan arus dan tegangan fundamental maupun arus dan tegangan RMS pada masing-masing beban meningkat. Berikut ini adalah tabel arus dan tegangan baik fundamental maupun RMS sebelum dan setelah pemasangan filter dari simulasi adalah sebagai berikut:

Tabel 4.22 Arus Fundamental dan RMS Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter

Beban	Arus Fundamental (%)		Arus RMS (%)	
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
Lampu LHE	0,17	0,19	0,17	0,20
TV	0,30	0,60	0,31	0,60
Kulkas	0,74	1,12	0,75	1,12
AC	3,67	3,81	3,71	3,81
Dispenser	1,45	1,63	1,47	1,63
Komputer	0,97	1	0,98	1

Tabel 4.23 Tegangan Fundamental dan RMS Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter

Beban	Tegangan Fundamental (%)		Tegangan RMS (%)	
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
Lampu LHE	99,52	99,9	99,68	99,97
TV	99,51	99,89	99,67	99,97
Kulkas	99,50	99,89	99,67	99,96
AC	99,40	99,78	99,56	99,85
Dispenser	99,47	99,86	99,64	99,93
Komputer	99,49	99,87	99,65	99,95

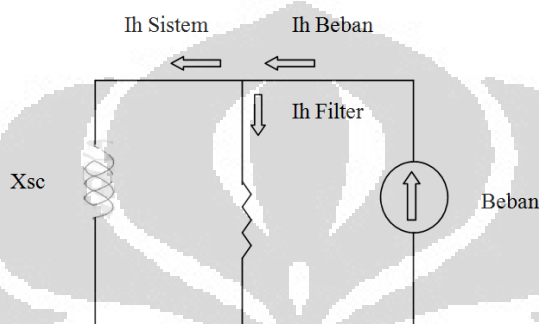
Dari tabel di atas, terlihat bahwa penggunaan filter ini mampu menyebabkan arus dan tegangan baik fundamental maupun RMS bertambah. Kenaikan nilai tersebut tidak terlalu besar, sehingga tidak ada perubahan yang signifikan pada sistem tersebut dan juga tidak mengganggu. Adanya kenaikan pada arus fundamental dan RMS menandakan penurunan THDi yang cukup besar ini bukan merupakan indikasi arus harmonik pada sistem yang banyak tereduksi, melainkan disebabkan karena adanya tambahan arus fundamental dan RMS tambahan dari filter yang sangat besar bila dibandingkan dengan arus fundamental dan RMS beban.

#### 4.6. Analisa Kerja Filter Terhadap Hasil Simulasi

Seperti yang telah dijelaskan pada sebelumnya, filter pasif tipikal *second order damped filter* ini mampu menurunkan nilai THDi dan juga THDv beban rumah tangga pada hasil pengukuran. Dari pengukuran yang didapat, pada harmonik tegangan orde ke 5 memiliki nilai terbesar dan menjadi acuan dalam simulasi perancangan filter pasif. Karena kriteria yang didasarkan pada tegangan harmonik lebih tepat untuk desain filter. Hal ini disebabkan karena lebih mudah menjamin berada dalam batas tegangan yang layak daripada membatasi tingkat arus akibat adanya perubahan impedansi pada jaringan AC [1].

Beban-beban yang diukur adalah beban-beban yang menghasilkan distorsi harmonik, jadi untuk beban-beban yang tidak difilter tidak perlu dalam keadaan *in service* karena dapat menyebabkan penambahan distorsi harmonik pada sistem.

Filter ini sendiri bisa dikatakan adalah sebuah beban dan tentunya memiliki impedansi. Besarnya nilai-nilai pada suatu komponen filter dapat mempengaruhi dari kinerja filter tersebut.



Gambar 4.12 Model Sistem Filter Dalam Simulasi

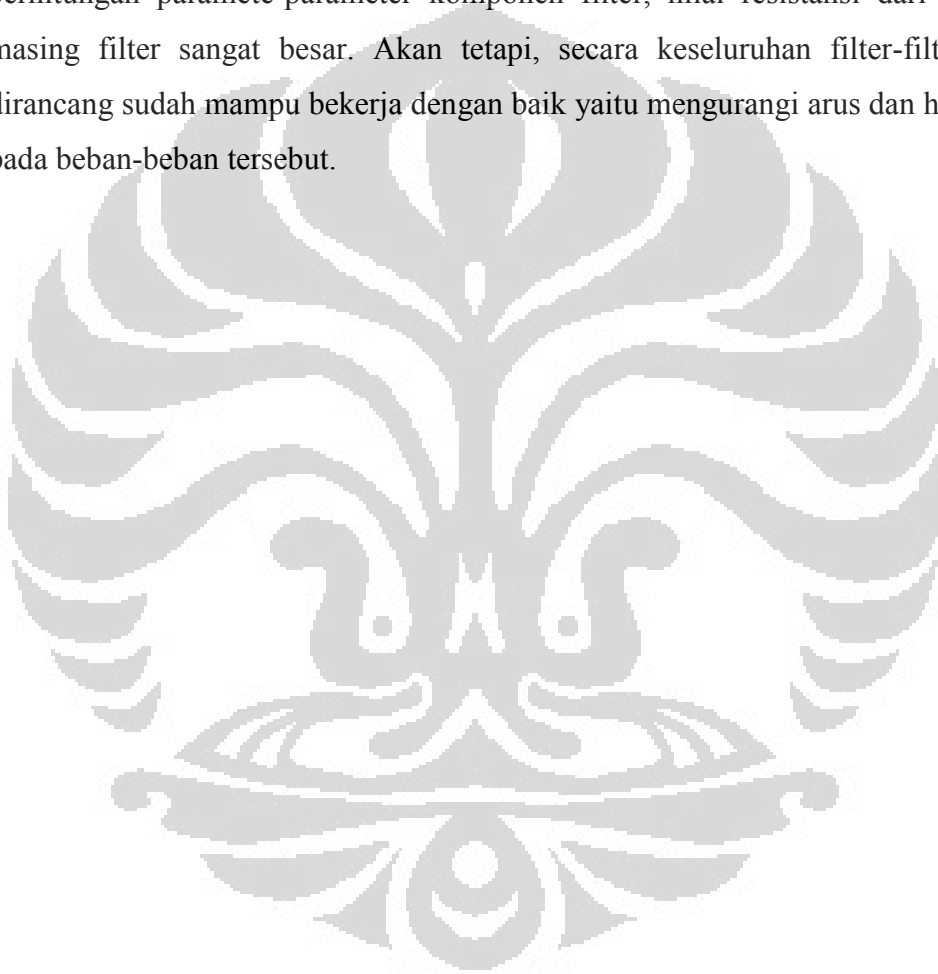
Dari gambar di atas terlihat bahwa filter ini sendiri memiliki impedansi. Sebagian arus harmonik yang berasal dari beban non-linear akan melewati filter dan sebagiannya akan masuk ke dalam sistem ( $X_{sc}$ ). Jika impedansi filter semakin besar atau lebih besar dari impedansi sistem, maka semakin kecil arus harmonik yang akan melewati filter dan arus harmonik yang masuk ke sistem akan semakin besar pula. Demikian pula sebaliknya.

Oleh karena itu, impedansi filter harus dibuat sedemikian kecil (jauh lebih kecil dari impedansi sistem).

Dari nilai-nilai batasan kerja filter pada beban lampu LHE, kulkas dan komputer, ternyata pada beban LHE dan juga komputer memiliki nilai yang melampaui dari batasan komponen filter yang diperbolehkan. Namun, hal tersebut tidak mempengaruhi dari kinerja filter setelah dilakukan simulasi.

Dari hasil simulasi yang dilakukan, terlihat bahwa masing-masing filter sudah bekerja dengan baik untuk mengurangi arus dan juga tegangan harmonik pada masing-masing beban. Besarnya penurunan nilai arus dan tegangan harmonik dari masing-masing beban tergantung pada karakteristik beban tersebut dan juga impedansi dari filter yang dipasang.

Selain impedansi, besarnya nilai *quality factor* (faktor kualitas) dari filter juga berpengaruh pada kerja filter. Jika resistansi pada filter semakin besar, maka besarnya faktor kualitas  $Q$  dari filter semakin kecil. Dengan kecilnya nilai  $Q$ , maka arus harmonik yang melewati filter akan semakin kecil dan arus harmonik yang ke sistem semakin besar. Namun, besar kecilnya nilai  $Q$  adalah tergantung dari jenis filter yang digunakan. Pada filter pasif jenis *second order damped filter*, besarnya nilai faktor kualitas  $Q$  yang terbesar adalah 5. Hal ini terlihat pada saat perhitungan parameter-parameter komponen filter, nilai resistansi dari masing-masing filter sangat besar. Akan tetapi, secara keseluruhan filter-filter yang dirancang sudah mampu bekerja dengan baik yaitu mengurangi arus dan harmonik pada beban-beban tersebut.



## BAB 5

### KESIMPULAN

1. Pemasangan filter untuk setiap beban lebih efektif untuk mereduksi harmonik tegangan dan harmonik arus karena masing-masing filter dapat bekerja untuk masing-masing beban yang akan difilter.
2. Pada simulasi, filter pasif *second order damped filter* ternyata lebih baik kinerjanya saat memfilter beban kulkas, yaitu mengurangi THDi sebesar 9,95 % dan THDv sebesar 1,85 %.
3. Karena filter pasif jenis *second order damped filter* memiliki nilai reaktansi dan resistansi yang cukup besar, maka akan menyebabkan dalam proses perancangan filter dalam keadaan real akan membutuhkan biaya yang cukup besar dan tidak semua konsumen listrik akan mau untuk menggunakan filter jenis ini. Oleh karena itu, diharapkan dari konsumen listrik dapat menggunakan beban-beban pada rumah tangga yang tidak memberikan kontribusi harmonik yang besar pada sistem.

**DAFTAR ACUAN**

- [1] Roger C. Dugan, et al., *Electrical Power Systems Quality* (New York : McGraw Hill, 2002), hal 233-252
- [2] Rifky Cahyadi. “Upaya Penghematan Energi Listrik Dengan Cara Mereduksi Distorsi Harmonik Menggunakan *Single Tuned Notch Filter*,” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal 28-36
- [3] Aris Pramnanto. “Analisis Penggunaan *Single Tuned Filter* Sebagai Salah Satu Solusi Masalah Harmonik Pada Beban Rumah Tangga.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal 6-26
- [4] Bestion Alzari. ”Rancang Bangun *Single Tuned Filter* Sebagai Alat Pereduksi Distorsi Harmonik Untuk Karakteristik Beban Rumah Tangga 2200 VA. ” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal 70-73
- [5] Endi Sopyandi. ”Perancangan *Single Tuned Filter* Untuk Mereduksi Harmonik Arus Dengan Simulasi Program ETAP POWER STATION 5.0.3.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal 26-45
- [6] PSH-6, *Mitigation Of Power System Harmonics*, 6.9-6.11



## DAFTAR REFERENSI

- Roger C. Dugan, et al., *Electrical Power Systems Quality* (New York : McGraw Hill, 2002), hal 233-252
- Rifky Cahyadi. “Upaya Penghematan Energi Listrik Dengan Cara Mereduksi Distorsi Harmonik Menggunakan *Single Tuned Notch Filter*,” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal 28-36
- Aris Pramnanto. “Analisis Penggunaan *Single Tuned Filter* Sebagai Salah Satu Solusi Masalah Harmonik Pada Beban Rumah Tangga.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal 6-26
- Bestion Alzari. ”Rancang Bangun *Single Tuned Filter* Sebagai Alat Pereduksi Distorsi Harmonik Untuk Karakteristik Beban Rumah Tangga 2200 VA. ” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal 70-73
- Endi Sopyandi. ”Perancangan *Single Tuned Filter* Untuk Mereduksi Harmonik Arus Dengan Simulasi Program ETAP POWER STATION 5.0.3.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal 26-45
- PSH-6, *Mitigation Of Power System Harmonics*, 6.9-6.11
- IEEE Std. 519-1992 –Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems

## LAMPIRAN

### 1. Daya Beban (sebelum filter)

T	Lampu			
	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	PF
1	0,0329	-0,0172	0,0371	-0,8861
2	0,0331	-0,0172	0,0373	-0,8872
3	0,0328	-0,0171	0,0369	-0,887
4	0,0329	-0,0169	0,037	-0,8892
5	0,0327	-0,0168	0,0368	-0,8897
6	0,0325	-0,0167	0,0365	-0,8899
7	0,0322	-0,0165	0,0362	-0,89
8	0,0321	-0,0163	0,036	-0,8911
9	0,032	-0,0163	0,0359	-0,8911
10	0,0319	-0,0161	0,0358	-0,8926
11	0,0317	-0,016	0,0355	-0,8934
12	0,0316	-0,0158	0,0353	-0,8938
13	0,0317	-0,0159	0,0355	-0,8937
14	0,032	-0,0161	0,0358	-0,893
15	0,0317	-0,0162	0,0356	-0,8905
16	0,0317	-0,016	0,0355	-0,8924
17	0,0317	-0,016	0,0355	-0,8933
18	0,0316	-0,016	0,0354	-0,8928
19	0,0316	-0,0159	0,0353	-0,8934
20	0,0316	-0,016	0,0354	-0,8918
21	0,0318	-0,0159	0,0355	-0,8936
Total	0,6738	-0,3429	0,7558	-18,7156
Rata-rata	0,032086	-0,01633	0,03599	-0,89122
Max	0,0331	-0,0158	0,0373	-0,8861
Min	0,0316	-0,0172	0,0353	-0,8938

t	TV			
	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	PF
1	0,0623	-0,0008	0,0623	-0,9999
2	0,0615	-0,0009	0,0615	-0,9999
3	0,0624	-0,0009	0,0624	-0,9999
4	0,0571	-0,0005	0,0571	-1
5	0,0632	-0,0012	0,0632	-0,9998

6	0,0583	-0,0007	0,0583	-0,9999
7	0,0574	-0,0005	0,0574	-1
8	0,069	-0,0015	0,069	-0,9997
9	0,0651	-0,0012	0,0651	-0,9998
10	0,0581	-0,0009	0,0581	-0,9999
11	0,0529	-0,0005	0,0529	-0,9999
12	0,0588	-0,001	0,0588	-0,9999
13	0,0553	-0,0006	0,0553	-0,9999
14	0,0639	-0,0012	0,0639	-0,9998
15	0,0554	-0,0004	0,0554	-1
16	0,0617	-0,0009	0,0617	-0,9999
17	0,0626	-0,0011	0,0626	-0,9999
18	0,0628	-0,001	0,0628	-0,9999
19	0,0702	-0,0019	0,0702	-0,9996
20	0,0678	-0,0015	0,0678	-0,9998
21	0,0672	-0,0009	0,0672	-0,9999
Total	1,293	-0,0201	1,293	-20,9973
Rata-rata	0,061571	-0,00096	0,061571	-0,99987
Max	0,0702	-0,0004	0,0702	-0,9996
Min	0,0529	-0,0019	0,0529	-1

t	Kulkas			
	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	PF
1	0,00002	0	0,00002	-0,9926
2	0,00003	-0,00001	0,00003	-0,9335
3	0,00003	0	0,00003	0,9838
4	0,00002	-0,00001	0,00003	-0,8543
5	0,00002	-0,00001	0,00002	-0,9015
6	0,00003	-0,00002	0,00003	-0,891
7	0,1169	0,11844	0,16641	0,7025
8	0,10954	0,11608	0,1596	0,6863
9	0,10488	0,11772	0,15766	0,6652
10	0,10309	0,11814	0,1568	0,6575
11	0,10204	0,11861	0,15646	0,6522
12	0,09952	0,11932	0,15537	0,6405
13	0,09809	0,11885	0,1541	0,6365
14	0,09698	0,11928	0,15373	0,6308
15	0,00003	-0,00001	0,00003	-0,9247
16	0,00003	-0,00001	0,00003	-0,9652

17	0,00003	-0,00001	0,00003	-0,9718
18	0,00003	-0,00001	0,00003	-0,9597
19	0,00003	0	0,00003	0,9994
20	0,00002	-0,00001	0,00002	-0,935
21	0,00002	-0,00001	0,00003	-0,8944
Total	0,83138	0,94633	1,26049	-2,969
Rata-rata	0,03959	0,045063	0,060023	-0,14138
Max	0,1169	0,11932	0,16641	0,9994
Min	0,00002	-0,00002	0,00002	-0,9926

t	AC			
	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	PF
1	0,696	-0,0995	0,7031	-0,9899
2	0,7175	-0,0921	0,7234	-0,9919
3	0,7541	-0,0923	0,7598	-0,9926
4	0,7741	-0,092	0,7795	-0,993
5	0,7797	-0,091	0,785	-0,9933
6	0,7899	-0,0853	0,7945	-0,9942
7	0,7929	-0,099	0,7991	-0,9923
8	0,7863	-0,0963	0,7921	-0,9926
9	0,7924	-0,0962	0,7982	-0,9927
10	0,7895	-0,0915	0,7947	-0,9933
11	0,7766	-0,0889	0,7817	-0,9935
12	0,804	-0,0914	0,8092	-0,9936
13	0,7908	-0,0881	0,7957	-0,9938
14	0,797	-0,1039	0,8037	-0,9916
15	0,7901	-0,0944	0,7957	-0,9929
16	0,8018	-0,1005	0,808	-0,9922
17	0,7954	-0,0956	0,8011	-0,9929
18	0,794	-0,0945	0,7996	-0,993
19	0,7851	-0,0871	0,79	-0,9939
20	0,7878	-0,0914	0,7931	-0,9933
21	0,7995	-0,1018	0,8059	-0,992
Total	16,3945	-1,9728	15,7314	-20,8485
Rata-rata	0,78069	-0,09394	0,749114	-0,99279
Max	0,804	-0,0853	0,8092	-0,9899
Min	0,696	-0,1039	0,7031	-0,9942

t	Dispenser			
	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	PF
1	0,3178	-0,0069	0,3179	-0,9998
2	0,3177	-0,007	0,3177	-0,9998
3	0,3185	-0,0069	0,3186	-0,9998
4	0,318	-0,0069	0,318	-0,9998
5	0,3188	-0,0069	0,3188	-0,9998
6	0,3186	-0,0069	0,3186	-0,9998
7	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9797
8	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9783
9	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9817
10	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,981
11	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,98
12	0,0007	-0,0002	0,0007	-0,978
13	0,0007	-0,0002	0,0007	-0,9774
14	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9811
15	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9787
16	0,0007	-0,0002	0,0007	-0,9779
17	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9802
18	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9838
19	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9816
20	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,9819
21	0,0007	-0,0001	0,0007	-0,981
Total	1,9199	-0,0433	1,9201	-20,7011
Rata-rata	0,091424	-0,00206	0,091433	-0,98577
Max	0,3188	-0,0001	0,3188	-0,9774
Min	0,0007	-0,007	0,0007	-0,9998

t	Komputer			
	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	PF
1	0,1464	-0,0263	0,1487	-0,9842
2	0,139	-0,0206	0,1406	-0,9892
3	0,139	-0,0199	0,1404	-0,9899
4	0,1435	-0,0213	0,1451	-0,9891
5	0,1877	-0,0413	0,1922	-0,9766
6	0,1819	-0,0398	0,1862	-0,9768

7	0,1942	-0,0473	0,1999	-0,9716
8	0,2066	-0,0504	0,2126	-0,9715
9	0,1802	-0,0413	0,1848	-0,9747
10	0,1745	-0,0363	0,1782	-0,9791
11	0,1424	-0,0216	0,144	-0,9887
12	0,1996	-0,0468	0,205	-0,9735
13	0,1558	-0,0258	0,1579	-0,9866
14	0,1438	-0,0217	0,1455	-0,9888
15	0,1442	-0,022	0,1459	-0,9886
16	0,1932	-0,0431	0,1979	-0,976
17	0,1446	-0,0206	0,1461	-0,99
18	0,1954	-0,0441	0,2003	-0,9755
19	0,2006	-0,0464	0,2059	-0,9743
20	0,2002	-0,0461	0,2054	-0,9745
21	0,144	-0,0219	0,1457	-0,9886
Total	3,5568	-0,7046	3,6283	-20,6078
Rata-rata	0,169371	-0,03355	0,172776	-0,98132
Max	0,2066	-0,0199	0,2126	-0,9715
Min	0,139	-0,0504	0,1404	-0,99