



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS PENGGUNAAN SINGLE TUNNED FILTER  
SEBAGAI SALAH SATU SOLUSI MASALAH HARMONIK  
PADA BEBAN RUMAH TANGGA**

**SKRIPSI**

ARIS PRAMNAMTO  
0404030156

FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
DESEMBER 2008



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS PENGGUNAAN SINGLE TUNED FILTER  
SEBAGAI SALAH SATU SOLUSI MASALAH HARMONIK  
PADA BEBAN RUMAH TANGGA**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ARIS PRAMNAMTO

0404030156

FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
DESEMBER 2008

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

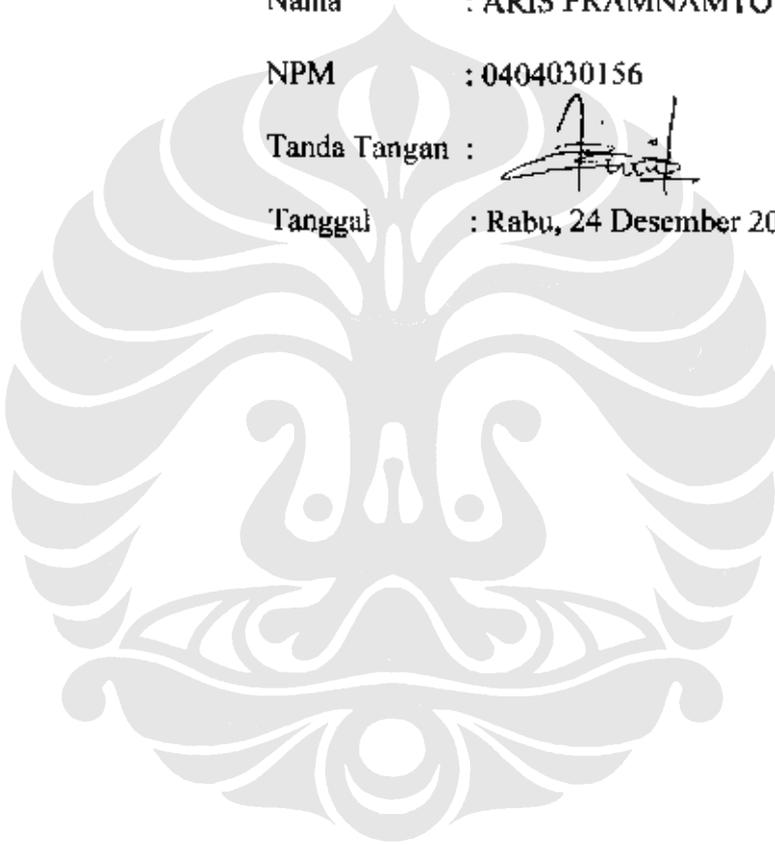
Nama : ARIS PRAMNAMTO

NPM : 0404030156

Tanda Tangan :



Tanggal : Rabu, 24 Desember 2008



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Aris Pramnamto  
NPM : 0404030156  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisis Penggunaan Single Tuned Filter Sebagai  
Salah Satu Solusi Masalah Harmonik Pada Beban  
Rumah Tangga

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : DR. Ir. Iwa Garniwa M K, MT. (  )  
Penguji : DR. Ir. Rudy Setiabudy (  )  
Penguji : Budi Sudiarto, ST. MT. (  )

Ditetapkan di : Kampus UI Depok  
Tanggal : 30 Desember 2008

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

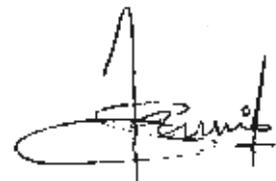
Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) DR. Ir. Iwa Garniwa M K, MT. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) pihak Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik Departemen Teknik Elektro FTUI yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (3) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (4) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 24 Desember 2008

Penulis



Aris Pramnamto

NPM. 0404030156

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

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

Nama : Aris Pramnamto  
NPM : 0404030156  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**ANALISIS PENGGUNAAN SINGLE TUNNED FILTER  
SEBAGAI SALAH SATU SOLUSI MASALAH HARMONIK  
PADA BEBAN RUMAH TANGGA**

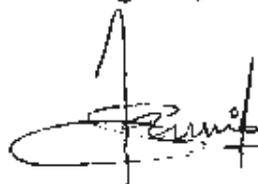
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 24 Desember 2008

Yang menyatakan



( Aris Pramnamto )

ANALISIS PENGGUNAAN SINGLE TUNNED FILTER  
SEBAGAI SALAH SATU SOLUSI MASALAH HARMONIK  
PADA BEBAN RUMAH TANGGA

**ABSTRAK**

Meningkatnya jumlah beban non-linier menyebabkan tingkat distorsi harmonik pada sistem tenaga listrik semakin tinggi. Beban rumah tangga ternyata memiliki kontribusi besar terhadap masalah harmonik ini. Sebuah filter harmonik diharapkan mampu mengurangi masalah harmonik pada sistem dengan beban rumah tangga. Pada penelitian ini, didesain sebuah *single tuned filter* untuk mengatasi distorsi harmonik pada beban rumah tangga yang memiliki distorsi harmonik arus dan tegangan terbesar pada orde 3. Dari hasil pengujian, terbukti bahwa filter ini mampu mengurangi arus harmonik yang mengalir pada sistem sehingga efek negatif akibat distorsi harmonik dapat dikurangi dan memberikan kualitas daya yang lebih baik pada beban.

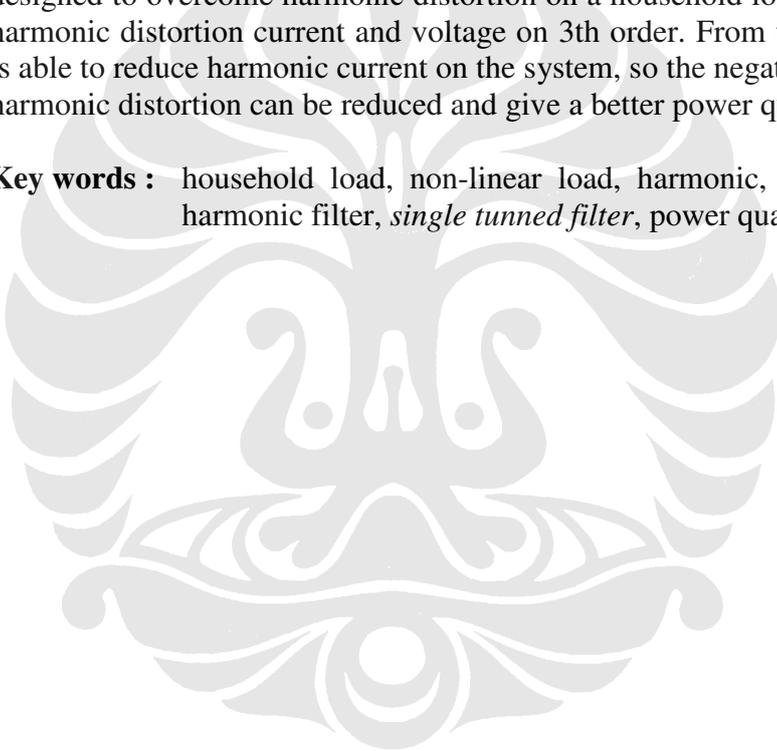
**Kata kunci :** beban non-linier, beban rumah tangga, distorsi harmonik, harmonik, filter harmonik, *single tuned filter*, kualitas daya

ANALYSIS OF SINGLE TUNNED FILTER APPLICATION  
AS ONE OF THE HARMONIC'S PROBLEM SOLUTION  
ON A HOUSEHOLD LOAD

**ABSTRACT**

Increasing number of non-linear load cause higher harmonic distortion level on the power system. A household load have a large contribution to this harmonic's problem. A harmonic filter expected to reduce the harmonic's problem on the system with the household load. In this research, a *single tuned filter* will be designed to overcome harmonic distortion on a household load that have a largest harmonic distortion current and voltage on 3th order. From test results, this filter is able to reduce harmonic current on the system, so the negative effects caused by harmonic distortion can be reduced and give a better power quality on a load.

**Key words :** household load, non-linear load, harmonic, harmonic distortion, harmonic filter, *single tuned filter*, power quality.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Tujuan Penulisan .....	2
1.3. Pembatasan Masalah.....	2
1.4. Metodologi Penulisan .....	3
1.5. Sistematika Penulisan .....	3
<b>2. DASAR TEORI .....</b>	<b>4</b>
2.1. Distorsi Harmonik .....	4
2.2. Istilah-Istilah Harmonik .....	6
2.2.1 Komponen Harmonik .....	6
2.2.2 Orde Harmonik.....	6
2.2.3 Spektrum .....	6
2.2.4. Total Harmonic Distortion (THD) .....	7
2.2.5. Total Demand Distortion (TDD) .....	7
2.2.6. Nilai rms .....	8
2.3. Kuantitas Listrik Pada Kondisi Non-Sinusoidal .....	8
2.4. Penyebab Timbulnya Harmonik .....	10
2.5. Akibat Yang Ditimbulkan Harmonik.....	12
2.5.1. Efek Khusus Harmonik Pada Sistem Tenaga Listrik.....	12
2.5.1.1. Efek Negatif Jangka Pendek .....	12
2.5.1.2. Efek Yang Bersifat Kontinu .....	13
2.5.2. Triplen Harmonik .....	15
2.5.3. Urutan Fasa Harmonik .....	17
2.6. Dasar Pengontrolan Harmonik .....	17
2.6.1. Mengurangi Arus Harmonik Pada Beban .....	17
2.6.2. Memfilter Harmonik .....	18
2.6.3. Memodifikasi Respon Frekuensi Sistem .....	18
2.7. Filter Harmonik .....	19
2.7.1. Identifikasi Harmonik .....	19
2.7.2. Desain Filter .....	20
2.7.3. Kriteria Desain Filter.....	21

2.7.4. Desain Single Tuned Filter .....	22
2.7.5. Batasan Komponen Filter .....	24
<b>3. OBJEK DAN PROSEDUR PENGUKURAN .....</b>	<b>26</b>
3.1. Objek Pengukuran .....	26
3.2. Peralatan Pengukuran .....	27
3.3. Rangkaian Percobaan .....	28
3.4. Prosedur Pengukuran .....	29
<b>4. DESAIN DAN ANALISA KERJA FILTER.....</b>	<b>30</b>
4.1. Desain Single Tuned Filter .....	30
4.1.1. Perhitungan Kerja Fundamental Filter .....	34
4.1.2. Perhitungan Kerja Harmonik Filter .....	34
4.1.3. Evaluasi Arus RMS dan Tegangan Puncak .....	35
4.2. Hasil Pengujian Filter Tanpa Beban .....	36
4.2.1. Tegangan dan Arus .....	36
4.2.2. <i>Total Harmonic Distortion (THD)</i> .....	37
4.2.3. Daya dan Faktor Daya .....	37
4.3. Harmonik Tegangan Setelah Penggunaan Filter .....	38
4.4. Harmonik Arus Setelah Penggunaan Filter.....	43
4.4.1. Beban Lampu Hemat Energi (LHE) 8 W .....	43
4.4.2. Beban Lampu Hemat Energi (LHE) 14 W .....	45
4.4.3. Beban Lampu Hemat Energi (LHE) 18 W .....	47
4.4.4. Beban Televisi .....	49
4.4.5. Beban <i>Air Conditioner (AC)</i> .....	51
4.4.6. Beban Komputer .....	53
4.4.7. Beban Kulkas .....	55
4.4.8. Beban Dispenser .....	57
4.4.9. Beban Total .....	59
4.5. Daya dan Faktor Daya Setelah Penggunaan Filter .....	61
4.6. Evaluasi Kerja Filter .....	62
<b>5. KESIMPULAN .....</b>	<b>67</b>
<b>DAFTAR ACUAN .....</b>	<b>69</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>70</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>71</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Urutan Fasa Harmonik .....	17
Tabel 3.1.	Spesifikasi Beban Objek Pengukuran .....	27
Tabel 4.1.	Harmonik Tegangan pada Setiap Beban .....	31
Tabel 4.2.	Harmonik Arus pada Beban Total.....	31
Tabel 4.3.	Daya Beban Total Rumah Tangga.....	32
Tabel 4.4.	Spesifikasi Induktansi dan Kapasitansi Filter .....	33
Tabel 4.5.	Perbandingan Batasan Kerja Filter .....	35
Tabel 4.6.	Tegangan dan Arus Filter.....	36
Tabel 4.7.	Harmonik Tegangan dan Arus Filter.....	37
Tabel 4.8.	Daya dan Faktor daya Filter .....	37
Tabel 4.9.	THD Tegangan Sebelum dan Setelah Filter .....	38
Tabel 4.10.	THD Arus LHE 8 W .....	43
Tabel 4.11.	Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban LHE 8 W .....	44
Tabel 4.12.	THD Arus LHE 14 W.....	45
Tabel 4.13.	Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban LHE 14 W.....	46
Tabel 4.14.	THD Arus LHE 18 W.....	47
Tabel 4.15.	Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban LHE 18W .....	48
Tabel 4.16.	THD Arus TV.....	49
Tabel 4.17.	Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban TV.....	50
Tabel 4.18.	THD Arus AC .....	51
Tabel 4.19.	Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban AC .....	52
Tabel 4.20.	THD Arus Komputer. ....	53
Tabel 4.21.	Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban Komputer.....	54
Tabel 4.22.	THD Arus Kulkas.....	55
Tabel 4.23.	Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban Kulkas .....	56
Tabel 4.24.	THD Arus Dispenser.....	57
Tabel 4.25.	Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban Dispenser.....	58
Tabel 4.26.	Arus rms Tiap Beban dan Beban Total.....	60
Tabel 4.27.	Daya Beban Total Sebelum Filter .....	61
Tabel 4.28.	Daya Beban Total Setelah Filter.....	61
Tabel 4.29.	Impedansi Filter Hasil Perhitungan dan Pengujian .....	65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Bentuk Gelombang Hasil Distorsi Harmonik .....	4
Gambar 2.2. Representasi Deret Fourier dari Gelombang yang Terdistorsi.....	5
Gambar 2.3. Bentuk Spektrum Harmonik .....	6
Gambar 2.4. Hubungan Komponen Daya Pada Kondisi Non-sinusoidal.....	9
Gambar 2.5. Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Linier .....	10
Gambar 2.6. Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Non-linier.....	10
Gambar 2.7. (a) Model Gelombang Dasar .....	11
Gambar 2.7. (b) Model Gelombang Harmonik .....	11
Gambar 2.8. Arus Netral Pada Sistem Wye-Grounded Akibat Triplen Harmonik	16
Gambar 2.9. (a) Rangkaian Single Tunned Filter .....	22
Gambar 2.9. (b) Kurva Impedansi Terhadap Frekuensi .....	22
Gambar 3.1. Hioki Power Analyzer 3169-20 .....	28
Gambar 3.2. Rangkaian Pengukuran .....	28
Gambar 4.1. Rangkaian Single Tunned Filter pada Sistem Tenaga Listrik .....	30
Gambar 4.2. Grafik Harmonik Tegangan LHE 8 W.....	39
Gambar 4.3. Grafik Harmonik Tegangan LHE 14 W.....	39
Gambar 4.4. Grafik Harmonik Tegangan LHE 18 W.....	40
Gambar 4.5. Grafik Harmonik Tegangan TV.....	40
Gambar 4.6. Grafik Harmonik Tegangan AC.....	41
Gambar 4.7. Grafik Harmonik Tegangan Komputer.....	41
Gambar 4.8. Grafik Harmonik Tegangan Kulkas .....	42
Gambar 4.9. Grafik Harmonik Tegangan Dispenser.....	42
Gambar 4.10. Grafik Harmonik Arus LHE 8 W .....	43
Gambar 4.11. Grafik Fasa Arus Beban LHE 8 W.....	44
Gambar 4.12. Grafik Harmonik Arus LHE 14 W .....	45
Gambar 4.13. Grafik Fasa Arus Beban LHE 14 W.....	46
Gambar 4.14. Grafik Harmonik Arus LHE 18 W .....	47
Gambar 4.15. Grafik Fasa Arus Beban LHE 18 W.....	48
Gambar 4.16. Grafik Harmonik Arus TV.....	49
Gambar 4.17. Grafik Fasa Arus Beban TV.....	50
Gambar 4.18. Grafik Harmonik Arus AC .....	51
Gambar 4.19. Grafik Fasa Arus Beban AC .....	52
Gambar 4.20. Grafik Harmonik Arus Komputer.....	53
Gambar 4.21. Grafik Fasa Arus Beban Komputer.....	54
Gambar 4.22. Grafik Harmonik Arus Kulkas .....	55
Gambar 4.23. Grafik Fasa Arus Beban Kulkas .....	56
Gambar 4.24. Grafik Harmonik Arus Dispenser.....	57
Gambar 4.25. Grafik Fasa Arus Beban Dispenser.....	58
Gambar 4.26. Grafik Harmonik arus Beban Total .....	59
Gambar 4.27. Grafik Fasa Arus Beban Total .....	60
Gambar 4.28. Kurva Impedansi Single Tunned Filter .....	62
Gambar 4.29. Model Sistem Filter Pada Frekuensi 145 Hz .....	63
Gambar 4.30. Model Sistem Filter Dengan Faktor Kualitas (Q) .....	64
Gambar 4.31. Model Sistem Filter Sebagai Beban .....	66

## DAFTAR LAMPIRAN

1. Arus Harmonik Beban Sebelum Filter (1) .....	71
2. Arus Harmonik Beban Sebelum Filter (2) .....	72
3. Arus Harmonik Beban Total Sebelum Filter .....	73
4. Persen Fundamental Harmonik Arus Sebelum Filter .....	74
5. Persen Fundamental Harmonik Tegangan Sebelum Filter .....	75
6. Daya Beban Sebelum Filter .....	76
7. Arus Harmonik Beban Setelah Filter (1) .....	77
8. Arus Harmonik Beban Setelah Filter (2) .....	78
9. Arus Harmonik Filter .....	79
10. Arus Harmonik Beban Total Setelah Filter .....	80
11. Persen Fundamental Harmonik Arus Setelah Filter .....	81
12. Persen Fundamental Harmonik Tegangan Setelah Filter .....	82
13. Daya Beban Setelah Filter .....	83
14. Spesifikasi Hioki Power Analyzer 3169-20 .....	84



# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Energi listrik merupakan energi utama yang digunakan hampir diseluruh sisi kehidupan. Seiring kemajuan zaman, permintaan akan energi listrik di seluruh dunia semakin meningkat. Di lain sisi, perkembangan teknologi yang terjadi mulai memunculkan beban listrik baru yang memiliki karakteristik elektris yang baru pula. Kedua hal ini ternyata mempengaruhi sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menyuplai energi listrik ke konsumen. Salah satu pengaruhnya adalah pada permasalahan kualitas daya listrik yang dihantarkan. Penyedia jasa listrik, dalam hal ini PLN harus bisa menyesuaikan sistem tenaga listrik yang digunakan dengan tetap memperhatikan kualitas daya listrik yang dihantarkan ke konsumen.

Kualitas daya listrik memiliki tiga parameter penting yaitu tegangan, arus, dan frekuensi listrik. Segala penyimpangan nilai tegangan, arus, dan frekuensi listrik dapat memperburuk kualitas daya listrik yang dihantarkan. Buruknya kualitas daya listrik dapat menyebabkan kegagalan atau salah operasi beban listrik pada konsumen. PLN sebagai penyedia jasa listrik selalu berusaha menjaga kualitas daya listrik yang dihantarkan dari mulai proses transmisi sampai distribusi ke konsumen. Akan tetapi, terkadang masalah kualitas daya listrik berasal dari beban listrik konsumen itu sendiri. Hal inilah yang menyebabkan PLN sulit untuk menjaga kualitas daya listriknya.

Salah satu masalah kualitas daya listrik yang berasal dari dari beban listrik konsumen adalah adanya distorsi harmonik. Pada dasarnya, harmonik adalah gejala pembentukan gelombang dengan frekuensi yang bukan frekuensi dasarnya. Umumnya, 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 dapat menjadi non-sinusoidal karena adanya distorsi harmonik ini. Hal ini tentu dapat memperburuk kualitas daya listrik pada konsumen.

Distorsi harmonik ini disebabkan oleh beban non-linier yaitu beban yang memiliki karakteristik arus yang tidak proporsional dengan tegangannya. Beban non-linier ini ada pada peralatan-peralatan seperti motor berputar, transformator, peralatan elektronika daya, ballast lampu penerangan, komputer, dan peralatan yang memiliki bahan semikonduktor lainnya. Beban non-linier ini sebagian besar ada pada beban untuk industri yang membutuhkan energi listrik yang besar, tapi pada beban untuk perkantoran dan rumah tangga juga ada meskipun dengan level energi yang tidak sebesar untuk industri.

Indonesia dengan jumlah penduduk yang sangat banyak membutuhkan energi listrik untuk kebutuhan rumah tangga yang sangat besar. Distorsi harmonik yang terjadi bila diakumulasi juga akan sangat besar. Oleh karena itu, perlu adanya identifikasi distorsi harmonik untuk kebutuhan rumah tangga di Indonesia sehingga PLN sebagai penyedia jasa listrik dapat mengidentifikasi, menganalisa, dan mencari solusi masalah ini dalam rangka menjaga kualitas daya listrik yang dihantarkan.

## **1.2. Tujuan Penulisan**

Tujuan dari penulisan skripsi ini secara umum adalah untuk membahas pengertian, penyebab, dan akibat dari distorsi harmonik pada sistem tenaga listrik. Secara khusus, skripsi ini bertujuan untuk merancang filter pasif harmonik (*Single Tunned Filter*) untuk beban rumah tangga sebagai salah satu solusi masalah distorsi harmonik, kemudian diuji kinerjanya dalam mereduksi distorsi harmonik dan pengaruhnya dalam penghematan energi.

## **1.3. Pembatasan Masalah**

Pada skripsi ini hanya dibahas perancangan filter pasif harmonik yang berupa *Single Tunned Filter* pada beban rumah tangga. Hasil perancangan filter ini kemudian diuji kinerjanya dengan menggunakan model filter yang memiliki spesifikasi filter sesuai rancangan. Kinerja filter yang diuji adalah kemampuannya mereduksi harmonik tegangan dan arus, kemudian pengaruhnya terhadap daya dan faktor daya sistem, juga pengaruhnya terhadap penghematan energi.

#### 1.4. Metodologi Penulisan

Metode penulisan pada skripsi ini diawali dengan identifikasi distorsi harmonik yang terjadi di rumah tangga. Dari identifikasi tersebut, dilakukan studi literatur untuk merancang filter pasif sehingga bisa diuji kinerjanya di laboratorium dalam mereduksi arus harmonik pada beban di rumah tangga. Data pengukuran didapat dengan menggunakan alat *power analyzer*.

#### 1.5. Sistematika Penulisan

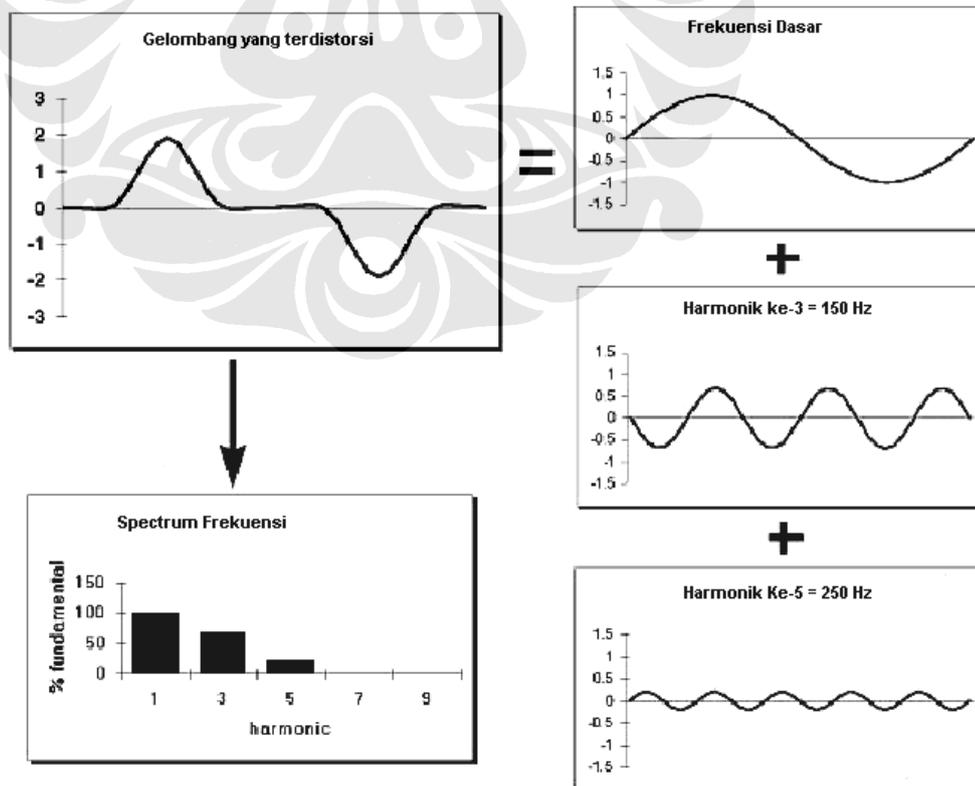
Penulisan skripsi ini dibagi dalam lima bab. Bab satu membahas mengenai latar belakang, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan skripsi ini. Bab dua membahas mengenai pengertian, penyebab, akibat, dan sumber harmonik pada sistem tenaga listrik serta perancangan filter pasif harmonik sebagai solusi permasalahan distorsi harmonik. Bab tiga membahas mengenai alat, objek, dan prosedur pengukuran di laboratorium. Bab empat membahas mengenai perancangan filter pasif harmonik (*Single Tunned Filter*) dan analisa penerapannya pada beban rumah tangga. Bab lima merupakan kesimpulan dari skripsi ini.

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1. Distorsi Harmonik

Pada dasarnya, gelombang tegangan dan arus yang ditransmisikan dan didistribusikan dari sumber ke beban berupa gelombang sinusoidal murni. Akan tetapi, pada proses transmisi dan distribusi ini terjadi berbagai macam gangguan sehingga bentuk gelombang tidak lagi sinusoidal murni. Salah satu fenomena penyimpangan bentuk gelombang sinusoidal ini adalah distorsi harmonik.

Harmonik adalah 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 terbentuklah gelombang yang terdistorsi sehingga bentuk gelombang tidak lagi sinusoidal. Fenomena ini disebut dengan distorsi harmonik. Pembentukan gelombang non-sinusoidal hasil distorsi harmonik dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.1. Bentuk Gelombang Hasil Distorsi Harmonik [2]

Penjumlahan gelombang-gelombang sinusoidal tersebut menjadi gelombang non-sinusoidal dapat dianalisis menggunakan konsep deret fourier, dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

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

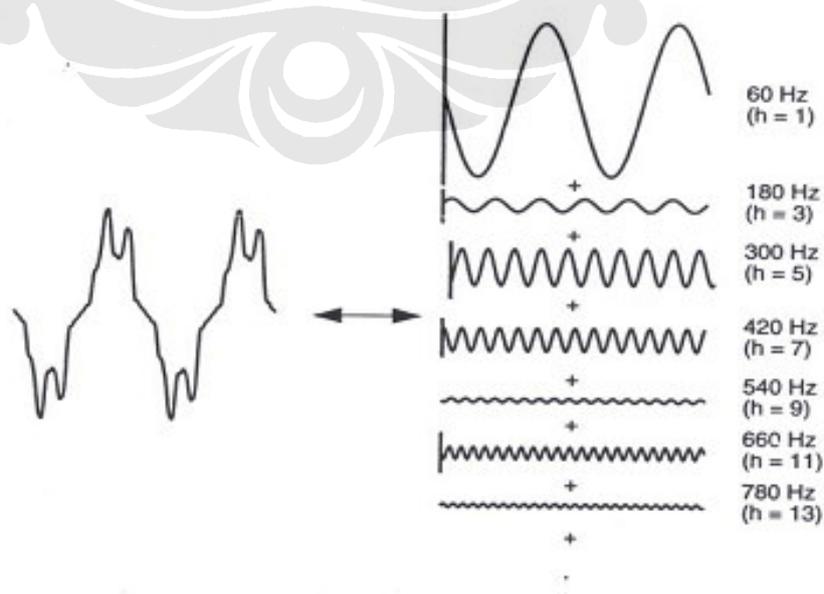
Keterangan:  $Y_0$  = amplitudo dari komponen DC dimana biasanya dalam jaringan distribusi bernilai nol

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

$f$  = frekuensi dasar (50 Hz)

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

Persamaan Fourier di atas dapat digunakan untuk memecah gelombang yang telah terdistorsi menjadi gelombang dasar dan gelombang harmonik. Hal ini menjadi dasar dalam menganalisis harmonik pada sistem tenaga listrik. Bentuk 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 [1]

## 2.2. Istilah-Istilah Harmonik

Berikut ini adalah beberapa pengertian dan persamaan yang terdapat dalam analisis harmonik.

### 2.2.1. Komponen Harmonik

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

### 2.2.2. Orde Harmonik

Orde harmonik adalah perbandingan frekuensi harmonik dengan frekuensi dasar, dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

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

keterangan : n = orde harmonik

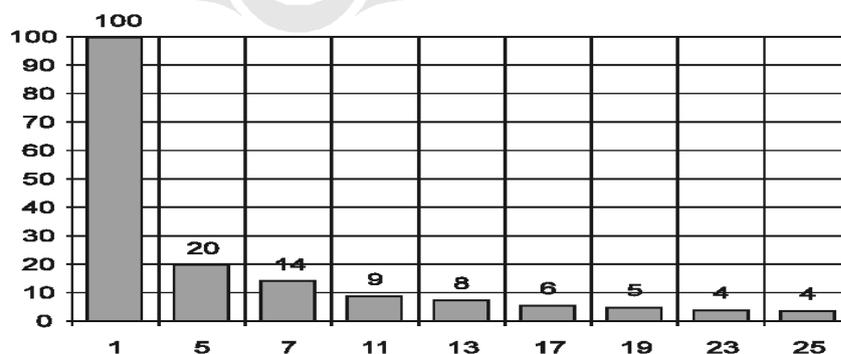
$f_n$  = frekuensi harmonik ke-n

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

Spektrum adalah distribusi dari semua amplitudo komponen harmonik sebagai fungsi dari orde harmoniknya, dan diilustrasikan menggunakan histogram.



Gambar 2.3. Bentuk spektrum harmonik [2]

Dari gambar tersebut dapat dikatakan bahwa spektrum merupakan perbandingan arus atau tegangan frekuensi harmonik terhadap arus atau tegangan

frekuensi dasar. Spektrum digunakan sebagai dasar merencanakan filter yang akan digunakan untuk mereduksi harmonik.

#### 2.2.4. Total Harmonic Distortion (THD)

THD menyatakan besarnya distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonik, dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_n^2}}{M_1} \quad (2.3)$$

keterangan: 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 dapat dinyatakan sebagai suatu nilai potensi pemanasan akibat harmonik relatif terhadap gelombang frekuensi dasar.

#### 2.2.5. Total Demand Distortion (TDD)

Tingkat distorsi arus dapat dilihat dari nilai THD, namun hal tersebut dapat 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 atau distorsi permintaan total (TDD) dan masuk dalam Standar IEEE 519-1992, tentang "*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*". TDD dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$TDD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{h_{\max}} I_n^2}{I_L}} \quad (2.4)$$

keterangan:  $I_n$  = 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  $I_L$ , 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.

### 2.2.6. Nilai rms

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

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.5)$$

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

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

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, bahwa distorsi harmonik dapat menghasilkan 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 saat kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2} = \sqrt{Y_1^2 + Y_h^2} \quad (2.6)$$

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

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

$Y_1$  = tegangan atau arus rms pada frekuensi dasar

Pada dasarnya, daya listrik yang dikirimkan dari sumber ke beban adalah daya kompleks. Dalam daya kompleks itu terdapat komponen daya aktif (daya nyata) yaitu daya yang diserap oleh beban untuk melakukan kerja yang sesungguhnya dan daya reaktif yaitu daya yang tidak terlihat sebagai kerja nyata dan biasanya dipengaruhi oleh komponen reaktif seperti induktor.

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

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \text{ Watt} \quad (2.7)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \text{ VAR} \quad (2.8)$$

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (2.9)$$

keterangan: 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)

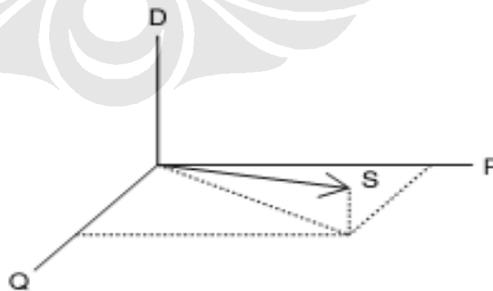
Q1= daya reaktif pada frekuensi dasar (VAR)

D = distorsi daya akibat harmonik (VA)

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

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.10)$$

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

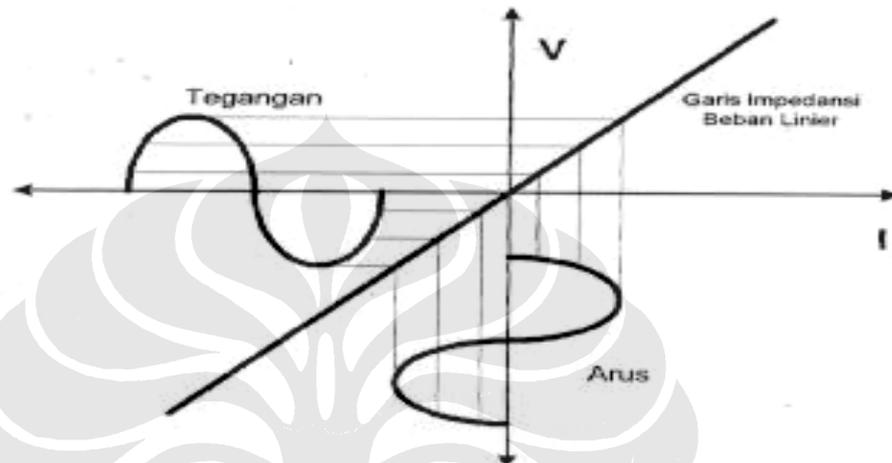


Gambar 2.4. Hubungan Komponen Daya pada Kondisi Non-sinusoidal [1]

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

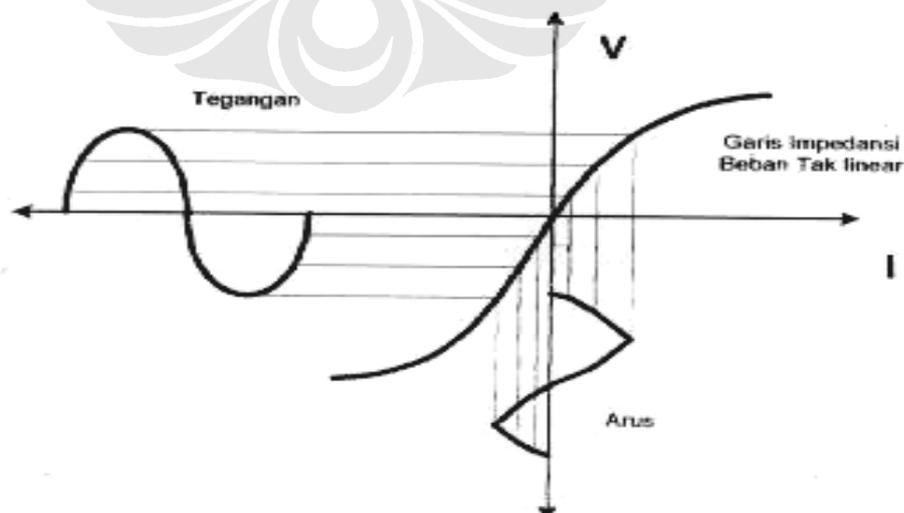
#### 2.4. Penyebab Timbulnya Harmonik

Pada sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier memberikan bentuk gelombang keluaran linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan perubahan tegangan. Hal ini dapat dijelaskan pada gambar berikut:



Gambar 2.5. Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Linier [2]

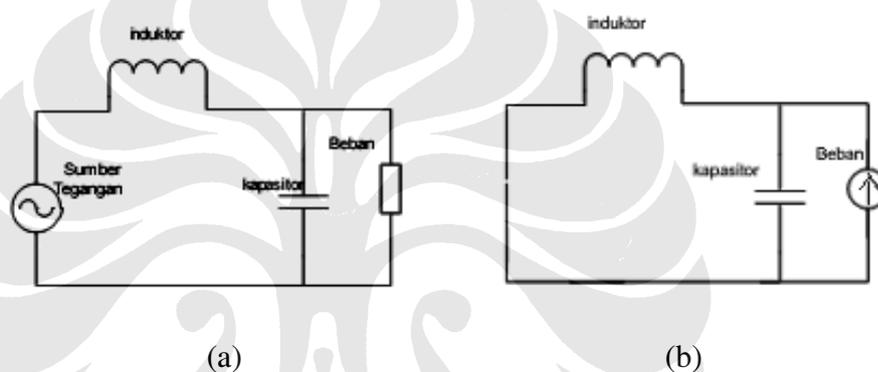
Sedangkan beban non-linier memberikan bentuk gelombang keluaran arus yang tidak sebanding dengan tegangan dasar sehingga gelombang arus maupun tegangannya tidak sama dengan gelombang masukannya. Hal ini dapat dijelaskan pada gambar berikut:



Gambar 2.6. Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Non linier [2]

Beban non-linier umumnya merupakan komponen semikonduktor yang pada proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap setengah siklus gelombang atau beban yang membutuhkan arus yang tidak tetap pada setiap periode waktunya. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan/distorsi gelombang arus 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 dimodelkan sebagai sumber arus harmonik seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.7. Permodelan beban non-linier sebagai sumber harmonik [2]

(a). Model gelombang dasar

(b). Model gelombang harmonik

Sumber harmonik secara garis besar terdiri dari 2 jenis yaitu peralatan yang memiliki kondisi saturasi dan peralatan elektronika daya. 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 biasanya menggunakan komponen-komponen elektronika daya seperti tiristor, dioda, dan lain-lain. Contoh peralatan yang menggunakan komponen elektronika daya adalah konverter statik, konverter PWM, inverter, pengendali motor listrik, *electronic ballast*, dan sebagainya. Pada rumah tangga, beban non-linier terdapat pada peralatan seperti lampu hemat energi, televisi, video player, ac, komputer, dan kulkas/dispenser.

## 2.5. Akibat Yang Ditimbulkan Harmonik.

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

1. Nilai rms baik tegangan dan arus lebih besar
2. Nilai puncak (*peak value*) tegangan dan arus lebih besar
3. Frekuensi sistem turun.

Masing-masing elemen membangkitkan distorsi yang spesifik. Nilai rms lebih besar dapat menyebabkan pemanasan yang lebih tinggi pada konduktor. Nilai puncak lebih besar dapat mengganggu kerja alat ukur sehingga terjadi kesalahan pembacaan. Sedangkan frekuensi mempengaruhi impedansi kabel dimana semakin tinggi frekuensi (biasanya pada frekuensi diatas 400 Hz) berarti semakin sering kabel menerima tegangan puncak sehingga semakin besar tegangan jatuh yang terjadi. Fenomena resonansi dapat terjadi pada frekuensi tertentu dan dapat menyebabkan arus meningkat.

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

Secara khusus, efek yang ditimbulkan oleh 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. Sebagai contoh, harmonik mengganggu *controller* yang digunakan pada elektronika daya. Yang terganggu adalah pada saat kondisi putus hubungan dari tiristor.
2. Harmonik dapat menyebabkan kesalahan pada peralatan pengukuran listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik. Sebagai contoh, kesalahan dari alat ukur kelas 2 akan meningkat 0.3% sebagai akibat dari harmonik ke-5 dengan ratio tegangan dan arus 5 %. Sebuah alat ukur didesain dan disesuaikan untuk beroperasi pada rangkaian yang mempunyai frekuensi dan tegangan standar dengan sedikit atau tidak ada distorsi bentuk 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. Diyakini bahwa torsi tambahan akan terbentuk, meskipun tidak ada tegangan dan arus harmonik pada jaringan distribusi.
  - Alat ukur tidak mengukur komponen energi DC yang seharusnya.
3. Harmonik juga dapat mengganggu alat-alat pengaman dalam sistem tenaga listrik seperti relay. Karena sifat relay yang sensitif terhadap perubahan arus dan frekuensi maka relay bisa salah beroperasi karena terjadi perubahan frekuensi ataupun arus walaupun tidak ada gangguan. Selain itu, harmonik dapat menyebabkan perubahan impedansi, arus dan tegangan dari sistem. Sedangkan relay jarak bekerja berdasarkan prinsip impedansi dan arus.
  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 didalam rotor. Torsi ini 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 Kontinu**

Efek yang bersifat kontinu ini dapat menyebabkan pemanasan pada peralatan listrik.

##### **1. Pemanasan kapasitor**

Kapasitor sangat sensitif terhadap perubahan beban. Jika terjadi harmonik maka rugi-rugi meningkat. Ketika harmonik terjadi, beban akan semakin reaktif sehingga kapasitor harus mencatu lebih banyak daya reaktif kepada sistem. Dan satu lagi yang harus diperhatikan adalah terjadinya resonansi. Saat terjadi resonansi, impedansi sistem hanya dilihat resistif yang sangat kecil.

Sehingga arus yang masuk akan sangat besar dan dapat mengakibatkan kerusakan.

## 2. Pemanasan pada mesin-mesin listrik

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

- Meningkatkan 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. 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 menimbulkan panas lebih. Bila mesin dioperasikan terus-menerus pada kondisi ini, maka umur mesin akan berkurang dan lebih jauh dapat mengakibatkan 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 kerugian daya.

Pengaruh utama harmonik pada transformator adalah :

- Panas lebih yang dibangkitkan oleh arus 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 terjadi peningkatan temperatur pada kawat netral. Sebagai dampak lanjutnya, akan terjadi sirkulasi arus urutan nol pada belitan delta transformator sehingga temperturnya 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 inti karena fluks yang dibangkitkan didalam inti bila transformator dieksitasi. Rugi-rugi belitan yang terdiri dari  $I^2 R$  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 (efek kulit). 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 distribusi arus dipermukaan lebih besar daripada didalam penghantar, sehingga resistansi efektif meningkat. Skin efek meningkat dengan kenaikan frekuensi dan diameter penghantar. Sedangkan *Proximity effect* disebabkan medan magnet penghantar mengganggu distribusi arus pada penghantar-penghantar yang berdekatan.

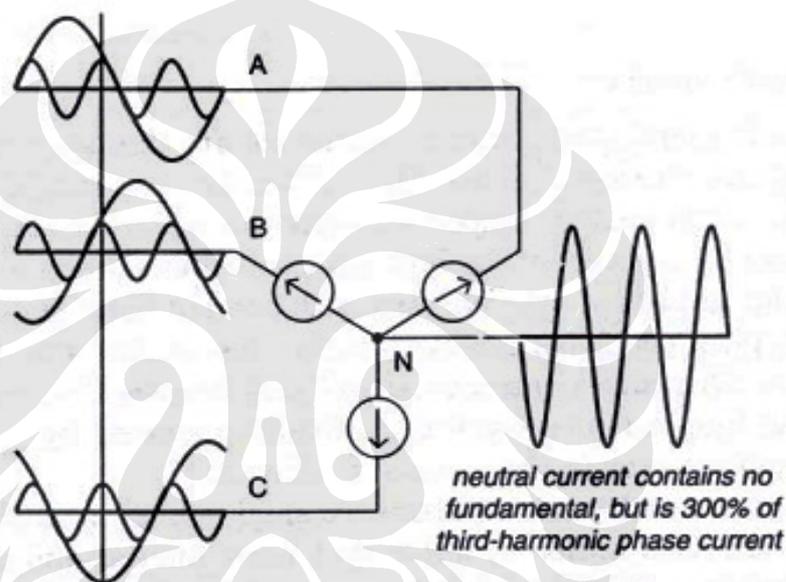
Mekanisme kedua disebabkan arus yang tinggi pada penghantar netral pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang menyuplai beban-beban satu fasa. Beberapa beban seperti *power suplai switch mode* menghasilkan arus harmonik ketiga yang cukup berarti. Untuk beban konverter, arus harmonik ketiga dalam 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 [1]

Sistem pada gambar ini merupakan sistem yang seimbang, diasumsikan komponen harmonik ketiga hadir dalam sistem. Komponen arus fundamental dari setiap fasa yang mengalir pada konduktor netral sistem akan saling menghilangkan, namun ternyata pada sistem ditemukan bahwa arus pada konduktor netral tidak nol, 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 di transformasikan 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 adalah tabel urutan fasa harmonik:

Tabel 2.1. Urutan Fasa Harmonik [3]

Orde Harmonik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
Urutan Fasa Harmonik	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	...

## 2.6. Dasar Pengontrolan Harmonik

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

1. Mengurangi arus harmonik yang dihasilkan oleh beban.
2. Menambah filter untuk mengalihkan arus harmonik dari sistem, memblokir arus yang memasuki sistem, atau melokalisasi arus harmonik.
3. Merubah respon frekuensi dengan menggunakan filter, induktor, dan kapasitor.

### 2.6.1. Mengurangi Arus Harmonik Pada Beban

Sedikit sekali yang dapat dilakukan terhadap peralatan beban yang ada untuk mengurangi kuantitas harmonik yang dihasilkan. Suatu transformator yang overeksitasi dapat dikembalikan kepada kondisi normal dengan menurunkan tegangan yang diberikan kepadanya, sedangkan peralatan arcing dan kebanyakan konverter elektronika daya sudah fix kondisinya sesuai dengan karakteristik rancangannya. 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. Hubungan delta pada transformator dapat memblokir aliran arus urutan nol harmonik (khususnya triplen harmonik) dari line.

### 2.6.2. Memfilter Harmonik

Filter Shunt bekerja dengan menshort-circuitkan arus harmonik sedekat mungkin kepada sumber distorsi secara praktis. Hal ini menjaga arus agar 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/meredam arus harmonik.

Pendekatan lain adalah dengan memakai filter seri yang dapat memblok arus harmonik. Cara semacam ini merupakan rangkaian parallel-tuned yang memberikan impedansi yang besar kepada arus harmonik. Filter semacam 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.

### 2.6.3. Memodifikasi Respon Frekuensi Sistem

Respon sistem yang merugikan terhadap harmonik dapat dimodifikasi dengan beberapa metoda :

- Menambah filter shunt. Filter ini tidak hanya meredam arus harmonik, tetapi juga seringkali 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 menyatel kapasitor untuk membuat filter.
- Mengubah ukuran dari kapasitor. Hal ini merupakan pilihan terakhir yang mahal bagi kedua sisi, penyedia listrik dan pelanggan industri.
- Memindahkan kapasitor pada titik dengan impedansi hubung singkat yang berbeda atau pada titik dengan losses terbesar. Bagi penyedia listrik hal ini dapat menimbulkan masalah yakni menimbulkan interferensi telepon walaupun hal ini dapat mengatasi masalah respon sistem.

## 2.7 Filter Harmonik

Didalam merancang suatu filter, perlu dilakukan studi untuk menentukan kompensasi daya reaktif yang diperlukan oleh sistem. Filter harus didesain untuk menyediakan daya reaktif dalam jumlah yang tepat. Jika tidak diperlukan daya reaktif, filter harus didesain minimum, artinya filter harus cukup menekan harmonik pada biaya yang paling rendah dan mensuplai beberapa daya reaktif, tapi tidak semua yang diperlukan.

Besarnya daya reaktif yang disuplai oleh kapasitor ditentukan oleh [2]:

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2} \quad (2.11)$$

keterangan:  $P_1$  = daya aktif sistem  
 $PF_0$  = faktor daya sebelum ada kompensasi daya reaktif  
 $PF$  = faktor daya setelah ada kompensasi daya reaktif

Prosedur umum dalam menganalisis harmonik adalah sebagai berikut :

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 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 mikroprocessor dalam kondisi off-line.

Selain cara-cara lain di atas, keberadaan harmonik dapat diidentifikasi dengan 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 diperkirakan masalah harmonik ada di instalasi itu.

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 system 3 fasa 4 kawat) dapat diketahui. Bila tegangan terukur lebih besar dari dua volt, maka terdapat indikasi adanya masalah harmonik pada beban.

### **2.7.2. Desain Filter**

Ada dua jenis filter, yaitu filter aktif dan filter pasif. Filter pasif banyak digunakan di industri. Namun, filter ini memiliki beberapa kelemahan, terutama filter pasif tergantung pada impedansi sumber sistem tenaga, frekuensi sistem dan toleransi komponen. Lebih jauh, filter ini menarik harmonik dari beban lain dalam sistem.

Pemasangan filter memiliki dua tujuan, 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 rektif 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. Karena itu filter shunt lebih murah daripada filter seri untuk efektifitas yang sama. Filter shunt memiliki keuntungan lain daripada filter seri, yaitu filter shunt dapat mensuplai 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 orde kedua*. Kedua jenis filter ini adalah paling sederhana dalam desainnya dan paling murah untuk diimplementasikan.

### 2.7.3. Kriteria Desain Filter

Ukuran Filter didefinisikan sebagai daya reaktif yang disuplai oleh filter pada frekuensi dasar. Pada pokoknya 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 yang disebabkan oleh distorsi gelombang, termasuk interferensi telepon yang merupakan efek yang sulit dieliminasi secara lengkap. Namun, kriteria ideal tersebut tidak realistis, baik dari alasan 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.

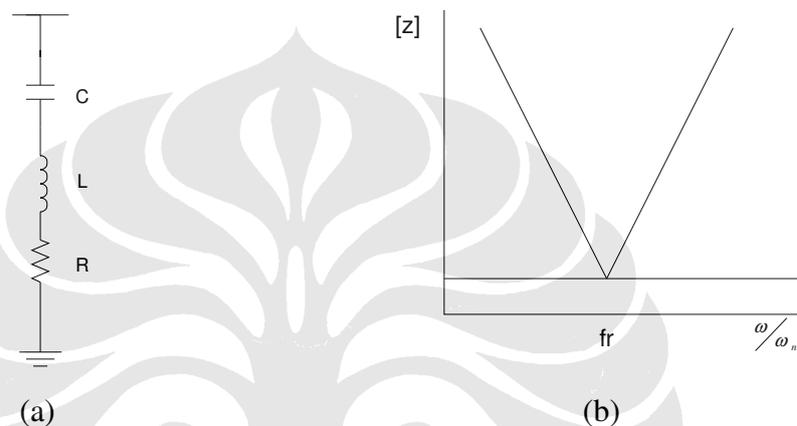
Faktor-faktor yang perlu diperhatikan ketika mendesain filter untuk mengatasi masalah-masalah harmonik adalah :

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 Single Tuned Filter

Rangkaian single tuned filter dan kurva impedansi terhadap frekuensi terlihat pada gambar berikut [2]:



Gambar 2.9. (a). Rangkaian Single Tuned Filter  
(b). Kurva Impedansi terhadap Frekuensi

Impedansi single tuned filter diberikan oleh persamaan [2]:

$$Z_f = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.12)$$

Sedangkan magnitudo impedansi single tuned filter adalah [2]:

$$|Z_f| = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (2.13)$$

Resonansi terjadi pada saat nilai reaktansi sama dengan kapasitansi. Filter disetel pada frekuensi  $f_r$ , yang menghasilkan resonansi seri. Frekuensi ini diberikan oleh persamaan [2]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.14)$$

Pada frekuensi  $f_r$ , single tuned filter memiliki impedansi minimum, sebesar nilai resistansi  $R$  dari induktor. Oleh karena itu, filter ini menyerap semua arus harmonik yang dekat dengan frekuensi  $F_r$  yang diinjeksikan, dengan distorsi tegangan harmonik yang rendah pada frekuensi ini.

Pada prinsipnya, sebuah single tuned filter dipasang untuk setiap harmonik yang akan dihilangkan. Filter-filter ini dihubungkan pada busbar dimana pengurangan tegangan harmonik ditentukan. Bersama-sama, filter-filter ini membentuk filter bank.

Ada dua parameter yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan nilai  $R$ ,  $L$  dan  $C$ , yaitu :

1. faktor kualitas ( *Quality factor, Q* )
2. Penyimpangan frekuensi relatif ( *Relative Frequency Deviation,  $\delta$*  )

Kualitas dari sebuah filter ( $Q$ ) adalah ukuran ketajaman penyetelan filter tersebut dalam mengeliminasi harmonik. Filter dengan  $Q$  tinggi disetel pada frekuensi rendah (misalnya harmonik kelima), dan nilainya biasanya terletak antara 30 dan 60 . Dalam single tuned filter, faktor kualitas  $Q$  didefinisikan sebagai perbandingan antara induktansi atau kapasitansi pada frekuensi resonansi terhadap resistansi. Faktor kualitas ditentukan dengan persamaan berikut [1]:

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (2.15)$$

Filter yang efektif harus memiliki induktor dengan faktor kualitas yang besar, oleh karena itu  $R \ll X_0$  pada frekuensi resonansi. Perkiraan nilai  $Q$  untuk reaktor inti udara (*air core reactors*) adalah 75 dan lebih besar 75 untuk reaktor inti besi (*iron-core reactors*)[1].

Penyimpangan frekuensi relatif ( $\delta$ ), disebut juga faktor de-tuning, menyatakan perubahan frekuensi dari frekuensi nominal penyetelannya, yang dinyatakan oleh [2]:

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega} \quad (2.16)$$

Faktor  $\delta$  dipengaruhi oleh :

1. Variasi frekuensi dasar

2. Variasi kapasitansi dan induksi dari filter karena pengaruh suhu dan penuaan
3. Initial off-tuning yang disebabkan oleh toleransi pabrik dan batas ukuran langkah penyetelan

Selain itu, perubahan nilai L dan C juga mempengaruhi frekuensi, sehingga faktor de-tuning juga dinyatakan [2]:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \left( \frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (2.17)$$

Dengan menganggap bahwa nilai  $\delta$  relatif kecil bila dibandingkan dengan satu, impedansi filter dapat dinyatakan dalam Q dan  $\delta$  dalam persamaan berikut ini [2]:

$$Z_f \approx R(1 + j2\delta Q) = X_o(Q^{-1} + j2\delta) \quad (2.18)$$

$$|Z_f| = R\sqrt{1 + 4\delta^2 Q^2} \quad (2.19)$$

Nilai Q optimum yang menghasilkan tegangan harmonik terendah, yaitu [2]:

$$Q = \frac{1 + \cos \phi_{sn}}{2\delta \sin \phi_{sn}} \quad (2.20)$$

Untuk nilai tegangan harmonik [2]:

$$|V_n| = I_n \delta \omega_n L \left[ \frac{4}{1 + \cos \phi_{sn}} \right] = \frac{2I_n R}{\sin \phi_{sn}} \quad (2.21)$$

### 2.7.5. Batasan Komponen Filter

#### 1. Kapasitor

Batas beban yang diperbolehkan berdasarkan standard ANSI/IEEE 18-1980 adalah sebagai berikut [2]:

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

Walaupun dalam standar batas arus efektif adalah 180 %, namun aplikasinya mungkin lebih rendah karena masing-masing unit kapasitor diproteksi pada 125-165 % dari rating arusnya. 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 linear 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 seminar ini dibahas masalah distorsi harmonik yang terjadi pada sisi beban sistem tenaga listrik khususnya beban rumah tangga. Meskipun masalah distorsi harmonik yang terjadi di setiap rumah tidak besar, akan tetapi dengan banyaknya beban perumahan di Indonesia maka masalah distorsi harmonik ini akan terakumulasi dan memiliki dampak yang signifikan pada sistem tenaga listrik.

Pada bab sebelumnya telah dijelaskan sebab dari timbulnya distorsi harmonik yaitu karena adanya beban non-linier. Beban non-linier umumnya berasal dari 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, power supply, dioda, tiristor inverter, konverter, ballast, dan berbahan semikonduktor. Peralatan listrik dalam rumah tangga inilah yang menjadi objek pengukuran dalam seminar ini.

Setelah identifikasi beban, didapat peralatan listrik yang diduga sebagai sumber harmonik. Peralatan listrik ini kemudian diuji di laboratorium untuk mengetahui berbagai karakteristik seperti arus, tegangan, daya, dan harmonik. Spesifikasi beban disesuaikan dengan peralatan listrik yang ada di laboratorium.

Berikut adalah spesifikasi 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	4	8	170-250	50/60
	B	4	14	170-250	50/60
	C	4	18	170-250	50/60
2	Televisi	1	65	180-270	50/60
3	AC	1	1150	220	50/60
4	Komputer:				
	CPU	1	350	110/220	50/60
	Monitor	1	240	100-240	50/60
	Speaker	1	10	220	50
5	Kulkas	1	77	220	50/60
6	Dispenser	1	300	220	50

### 3.2. Peralatan Pengukuran

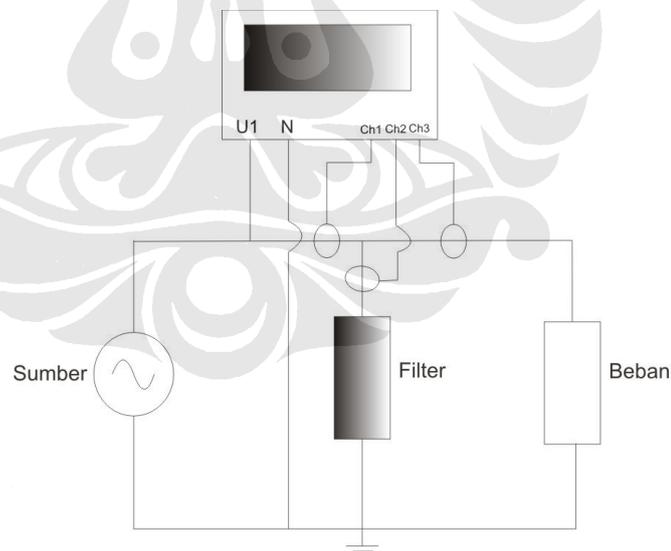
Peralatan pengukuran yang digunakan dalam pengambilan data ini ialah Power Analyzer bermerk Hioki dengan seri 3169-20. Peralatan ini mampu mengukur berbagai komponen listrik seperti tegangan (V), arus (I), frekuensi (f), daya kompleks (S), daya nyata (P), daya reaktif (Q), energy, dan faktor daya(PF). 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*. Dilengkapi dengan *PC card* sebagai memori penyimpanan data pengukuran, sehingga alat ini mampu menyimpan data pengukuran secara otomatis.

Data hasil pengukuran dapat dengan mudah ditransfer dari *PC card* 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 spektrum untuk lebih memudahkan analisa. Berikut adalah gambar alat yang digunakan dalam pengukuran:



Gambar 3.1. Hioki Power Analyzer 3169-20

### 3.3. Rangkaian Pengukuran



Gambar 3.2. Rangkaian Pengukuran

Untuk mendapatkan karakteristik beban dalam hal ini peralatan listrik rumah tangga, digunakan rangkaian sederhana diatas. Prinsip dasar pemasangan *power analyzer* sama seperti pemasangan voltmeter dan amperemeter. Input

tegangan dipasang paralel terhadap beban dan input arus menggunakan teknik *clamping* sehingga memungkinkan pengukuran secara seri tanpa melepas rangkaian.

### 3.4. Prosedur Pengukuran

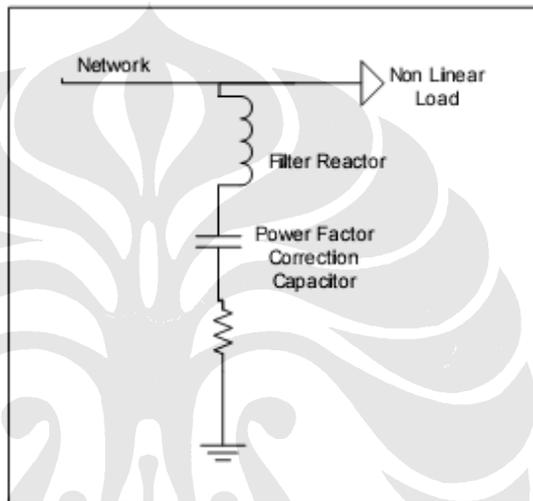
Sebelum melakukan pengukuran dilakukan langkah-langkah yang dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Memasang rangkaian seperti pada rangkaian pengukuran diatas.
2. Mengaktifkan peralatan dan beban dengan memberikan tegangan sumber 220 Volt dan frekuensi 50 Hz pada sistem.
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 1 jam dan interval pengambilan data tiap 1 menit.
  - e. Menyetel rating arus input sampai 5 A dengan rasio CT 1
  - f. Menyetel rating tegangan input 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 penyimpanan pada *PC card*
  - i. Memastikan sistem berjalan dengan baik
4. Mengaktifkan pencatatan pengukuran sehingga pencatatan berlangsung selama 1 jam
5. Setelah pengukuran selesai, peralatan di-nonaktifkan dari pencatatan pengukuran ke memorinya.
6. Data hasil pengukuran ditransfer ke komputer untuk dianalisa.

## BAB 4 DESAIN DAN ANALISA KERJA FILTER

### 4.1. Desain Single Tunned Filter

Perancangan filter pasif harmonik yang diterapkan pada skripsi ini berupa '*Single Tunned Filter*'. *Single Tunned Filter* adalah filter pasif harmonik yang sangat sederhana dan paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Berikut adalah gambar rangkaian filter pada sistem tenaga listrik:



Gambar 4.1. Rangkaian Single Tunned Filter Pada Sistem Tenaga Listrik [3].

Filter ini terdiri dari 2 komponen sederhana yaitu kapasitor yang berfungsi memberi kompensasi daya reaktif pada sistem untuk memperbaiki faktor daya dan komponen induktor sebagai reaktor filter. Untuk komponen resistor pada gambar rangkaian hanya merepresentasikan resistansi yang menimbulkan rugi-rugi pada rangkaian saja, sedangkan dalam prakteknya komponen resistor ini tidak digunakan.

Untuk merancang filter ini dibutuhkan data distorsi harmonik tegangan (THD V) dan harmonik arus (THD I) yang terbesar pada sistem, dapat dilihat pada tabel 4.1. dan 4.2. Data harmonik tegangan terbesar digunakan untuk menentukan arus 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 jaringan AC [3].

Tabel 4.1. Harmonik Tegangan Pada Setiap Beban

Orde	THD V (%)							
	LHE 18W	LHE 14W	LHE 8W	TV	PC	AC	Kulkas	Dispenser
2	0.20	0.17	0.18	0.20	0.24	0.67	0.27	0.23
3	2.67	2.25	2.34	1.95	2.38	1.23	1.39	1.60
4	0.06	0.06	0.06	0.08	0.10	0.19	0.06	0.05
5	1.50	1.31	1.40	1.52	1.39	1.19	1.30	1.45
6	0.07	0.05	0.05	0.05	0.07	0.13	0.07	0.05
7	1.01	1.03	1.06	1.05	1.00	0.93	1.12	1.11
8	0.04	0.06	0.04	0.06	0.07	0.10	0.05	0.05
9	0.41	0.61	0.53	0.51	0.67	0.69	0.59	0.57
10	0.06	0.04	0.05	0.05	0.07	0.08	0.05	0.07
11	0.40	0.30	0.33	0.33	0.46	0.26	0.26	0.27
12	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.03
13	0.26	0.21	0.20	0.16	0.29	0.18	0.17	0.20
14	0.03	0.04	0.04	0.04	0.08	0.06	0.06	0.04
15	0.40	0.50	0.42	0.44	0.38	0.49	0.59	0.56
16	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03
17	0.20	0.26	0.27	0.20	0.34	0.18	0.29	0.35
18	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04
19	0.24	0.22	0.18	0.22	0.11	0.13	0.14	0.15
20	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.05
21	0.33	0.31	0.35	0.18	0.25	0.28	0.21	0.27
22	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06
23	0.17	0.18	0.15	0.15	0.22	0.11	0.22	0.19
24	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04
25	0.22	0.16	0.18	0.12	0.14	0.17	0.13	0.10
26	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03
27	0.22	0.25	0.26	0.14	0.19	0.17	0.19	0.14
28	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05
29	0.15	0.14	0.13	0.11	0.13	0.07	0.20	0.16
30	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05

Tabel 4.2. Harmonik Arus Pada Beban Total

orde	THD I(%)	orde	THD I(%)	orde	THD I(%)
1	100	11	1.28	21	1.41
2	8.29	12	5.30	22	0.47
3	12.92	13	1.73	23	0.52
4	3.34	14	0.89	24	0.49
5	3.17	15	2.84	25	0.71
6	1.93	16	0.58	26	0.43
7	4.72	17	1.71	27	0.45
8	1.71	18	0.56	28	0.41
9	5.06	19	0.80	29	0.86
10	1.34	20	0.51	30	0.37

Berdasarkan data diatas, harmonik tegangan terbesar ada pada orde 3, sehingga filter pasif akan didesain untuk mereduksi arus harmonik orde 3.

Setelah menentukan orde kerja filter, langkah selanjutnya adalah menentukan besarnya daya reaktif yang harus disuplai ke sistem untuk memperbaiki faktor daya.

Untuk mencari faktor daya beban total diperlukan data daya beban total sebagai berikut:

Tabel 4.3. Daya Beban Total Rumah Tangga

Daya	rata-rata	maksimum	minimum
P (W)	1444	1702.5	1297.3
Q (VAR)	72.1	97.6	43.2
S (VA)	1541.7	1777.8	1404

Faktor daya dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.10):

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

Dari persamaan diatas, didapatkan faktor daya pada kondisi maksimum sebesar 0.9576. Pendekatan pada kondisi maksimum diambil untuk mengantisipasi besarnya daya reaktif yang dibutuhkan dalam sistem.

Bila filter didesain untuk memperbaiki faktor daya sampai 0.98, daya reaktif yang dibutuhkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.11):

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2} \quad (2.11)$$

Hasil perhitungan didapat bahwa untuk memperbaiki faktor daya dari 0.9576 menjadi 0.98 dibutuhkan daya reaktif sebesar 166.5 VAR.

Dari besarnya daya reaktif yang dibutuhkan kemudian ditentukan impedansi dari kapasitor dengan persamaan berikut [1]:

$$X_C = \frac{kV_{rated}^2}{M \text{ var}_{rated}} \quad (4.1)$$

Dengan besar rating tegangan adalah 220 V dan rating VAR adalah 166.5 VAR, didapatkan impedansi kapasitor sebesar 290.7  $\Omega$ . Besar kapasitansi kapasitor dapat dihitung dengan persamaan berikut [1]:

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

Dengan :  $f$  = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari perhitungan didapatkan kapasitansi sebesar 11  $\mu\text{F}$ .

Setelah itu ditentukan besar impedansi reaktor filter dengan persamaan berikut [1]:

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

dengan :  $n$  = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit dibawah ordenya)

Telah disebutkan sebelumnya bahwa orde harmonik yang akan difilter adalah orde 3, sehingga penyetulan diturunkan sedikit dibawahnya yakni sebesar 2.9. Hal ini perlu dilakukan sebagai toleransi komponen filter untuk mencegah resonansi yang terjadi dalam sistem pada frekuensi yang mengganggu [2]. Berdasarkan perhitungan didapatkan impedansi reaktor filter sebesar 34.57  $\Omega$ . Besar induktansi inductor dapat dihitung dengan persamaan berikut [1]:

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

Dari perhitungan didapatkan induktansi sebesar 110 mH.

Setelah desain selesai, digunakan model filter untuk pengujian dengan spesifikasi yang sedikit berbeda dengan spesifikasi desain awal. Berikut adalah spesifikasi induktansi dan kapasitansi desain awal dan model pengujian filter:

Tabel 4.4. Spesifikasi Induktansi dan Kapasitansi Filter

	Desain	Model
L	110 mH	100 mH
$X_L$	34.5	31.4
C	11 $\mu\text{F}$	12 $\mu\text{F}$
$X_C$	289.5	265.4

Pada perhitungan dan analisa lebih lanjut akan menggunakan spesifikasi model filter yang akan diuji.

#### 4.1.1. Perhitungan Kerja Fundamental Filter

Kelengkapan kerja fundamental filter terdiri dari :

- Impedansi fundamental [1]:

$$X_{fund} = |X_L - X_C| \quad (4.5.)$$

Dari perhitungan sebesar 234  $\Omega$

- Arus fundamental [1]:

$$I_{fund} = \frac{V_{actual}}{X_{fund}} \quad (4.6.)$$

Dari perhitungan sebesar 0.94 A

- Tegangan kapasitor [1]:

$$V_C = I_{fund} \times X_C \quad (4.7.)$$

Dari perhitungan sebesar 249,5 V

- Rating kapasitor [1]:

$$VAR_{fund} = I_{fund} \times V_{rated} \quad (4.8.)$$

Dari perhitungan sebesar 235 VAR

#### 4.1.2. Perhitungan Kerja Harmonik Filter

Ada 2 macam arus harmonik pada sistem, yaitu harmonik dari sumber dan harmonik dari beban. Pada skripsi ini dilakukan asumsi harmonik yang berasal dari sumber sangat kecil, sehingga tidak diperhitungkan.

- Arus harmonik total filter

Arus harmonik total hanya berasal dari beban saja. Dari data awal didapatkan bahwa arus harmonik terbesar pada orde 3 sebesar 12.92 %, maka besar arus harmonik yang dihasilkan beban dapat dihitung dengan persamaan berikut [1]:

$$I_h = I_h(pu) \times \frac{VA}{V_{actual}} \quad (4.9.)$$

Dari perhitungan sebesar 1.04 A

- Tegangan harmonik kapasitor [1]:

$$V_{Ch} = I_h \times X_C \div h \quad (4.10.)$$

Dari perhitungan sebesar 92 V

#### 4.1.3. Perhitungan Kerja Total Filter

- Arus rms total [1]:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_h^2} \quad (4.11.)$$

Dari perhitungan sebesar 1.4 A

- Tegangan puncak [1]:

$$V = V_C + V_{Ch} \quad (4.12.)$$

Dari perhitungan sebesar 341.5 V

- Tegangan rms [1]:

$$V_{rms} = \sqrt{V_C^2 + V_{Ch}^2} \quad (4.13.)$$

Dari perhitungan sebesar 265.9 V

- VAR total [1]:

$$VAR_{total} = I_{rms} \times V_{rms} \quad (4.14.)$$

Dari perhitungan sebesar 372.3 VAR

Dari semua spesifikasi itu, bisa didapatkan tabel perbandingan untuk mengevaluasi batasan kerja filter. Berikut adalah tabel perbandingan batasan kerja filter:

Tabel 4.5. Perbandingan Batasan Kerja Filter [1]

Kerja	Definisi	Batasan (%)	Nilai aktual	Nilai aktual (%)
Tegangan puncak	V / V rated	120	341.5/250	136.6
Tegangan RMS	V rms / V rated	110	265.9/250	106.4
Arus RMS	I rms / I fund.	180	1.4/0.94	148.9
VAR	VAR total/VAR fund.	135	372.3/235	158.4

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa spesifikasi filter sedikit melewati batasan komponen filter yang diperbolehkan. Akan tetapi, karena filter yang digunakan hanya 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 ini.

Seperti telah dijelaskan pada bab 2, karakteristik penyetelan filter digambarkan oleh faktor kualitas ( $Q$ ). Kualitas dari sebuah filter adalah ukuran ketajaman penyetelan filter dalam mereduksi harmonik. Sehingga diharapkan nilai  $Q$  setinggi mungkin. Nilai  $Q$  yang tinggi didapatkan dengan memberikan nilai  $R$  yang kecil. Pada desain filter yang telah dilakukan, nilai  $R$  hanya merupakan nilai resistansi dari reaktor sehingga dalam perancangannya tidak perlu menambahkan resistor pada filter. Dalam desain yang telah dilakukan, nilai  $Q$  yang digunakan adalah 80. Reaktor diasumsikan berinti besi yang berarti nilai dari  $Q$  di atas 75 [1]

#### 4.2. Hasil Pengujian Filter Tanpa Beban

Filter yang digunakan pada sistem dapat dikatakan sebagai beban karena filter ini juga menyerap pada sistem. Daya kompleks ( $S$ ) yang diserap dari sistem digunakan untuk menyuplai daya reaktif ( $Q$ ) ke sistem untuk memperbaiki faktor daya pada sistem. Filter yang memiliki komponen induktor dan kapasitor ini berfungsi untuk mengurangi arus harmonik pada sistem, meskipun filter ini sebenarnya juga merupakan sumber harmonik. Berikut adalah gambaran hasil pengujian filter sebagai salah satu beban sumber harmonik.

##### 4.2.1. Tegangan dan Arus

Tabel 4.6. Tegangan dan Arus Filter

	rata-rata	maksimum	Minimum
Tegangan (V)	214.44	215.55	213.15
Arus (A)	1.0158	1.0226	1.0085

Data diatas adalah tegangan rms dan arus rms yang diukur tanpa ada beban lain. Pada perhitungan kerja fundamental filter pada bagian sebelumnya didapatkan bahwa arus fundamental sebesar 0.94 A, sedangkan dari hasil pengukuran filter didapat arus rms mencapai 1.0226 A. Perbedaan nilai arus

fundamental dan arus rms ini merupakan indikasi adanya arus harmonik pada filter. Filter ini diukur pada sistem dengan rating tegangan sumber 220 volt, akan tetapi tegangan aktual yang terukur hanya mencapai 215.55 volt. Drop tegangan ini terjadi pada sisi sumber dan tidak akan mempengaruhi kerja filter.

#### 4.2.2. Total Harmonic Distortion (THD)

Tabel 4.7. Harmonik Tegangan dan Arus Filter

	rata-rata	maksimum	Minimum
THD V (%)	1.88	2.12	1.73
THD I (%)	5.31	5.90	4.95

Berdasarkan data, filter juga memiliki komponen harmonik sendiri. Bahkan untuk THD arus bisa mencapai 5.90 % dengan arus rms mencapai 1.0226 A. Untuk THD tegangan masih sangat kecil hanya sampai level 2.12 %. Harmonik arus yang kecil itu mempengaruhi terbentuknya harmonik tegangan yang kecil pula. Dengan adanya komponen harmonik pada filter ini, maka komponen harmonik pada sistem merupakan penjumlahan dari komponen harmonik beban dan filter.

#### 4.2.3. Daya dan Faktor Daya

Tabel 4.8. Daya dan Faktor Daya Filter.

	rata-rata	maksimum	minimum
P (W)	3.6	3.8	3.4
Q (VAR)	-217.5	-214.7	-219.8
S (VA)	217.6	219.8	214.8
PF	0.0166	0.0175	0.0157

Daya kompleks (S) yang dibutuhkan filter sebagian besar merupakan daya reaktif (Q) sedangkan daya aktif (P) sangat sedikit sekali. Hal ini karena komposisi filter yang sebagian besar berupa impedansi kapasitif (dari kapasitor) dan sebagian kecil lainnya berupa impedansi induktif (dari induktor). Sedangkan impedansi resistif pada prakteknya tidak digunakan (dari rugi-rugi filter). Daya reaktif yang bernilai negatif menunjukkan bahwa filter tidak menyerap daya reaktif pada sistem, melainkan menyuplai daya reaktif ke sistem. Hal ini juga

menunjukkan bahwa filter bersifat kapasitif. Karena sebagian besar daya digunakan untuk menyuplai daya reaktif ke sistem, faktor daya filter sangat buruk yaitu hanya mencapai 0.0175, tetapi hal ini membuat konsumsi energi oleh filter sangat kecil.

### 4.3. Harmonik Tegangan Setelah Penggunaan Filter

Bila dibandingkan, setiap beban ada yang mengalami peningkatan dan penurunan harmonik tegangan pada setiap ordenya. Akan tetapi secara keseluruhan besar *Total Harmonic Distortion (THD)* tegangan pada setiap beban berkurang setelah penggunaan filter. Berikut adalah tabel perbandingan THD tegangan setiap beban, pada saat sebelum dan setelah penggunaan filter harmonik.

Tabel 4.9. THD Tegangan Sebelum dan Setelah Filter

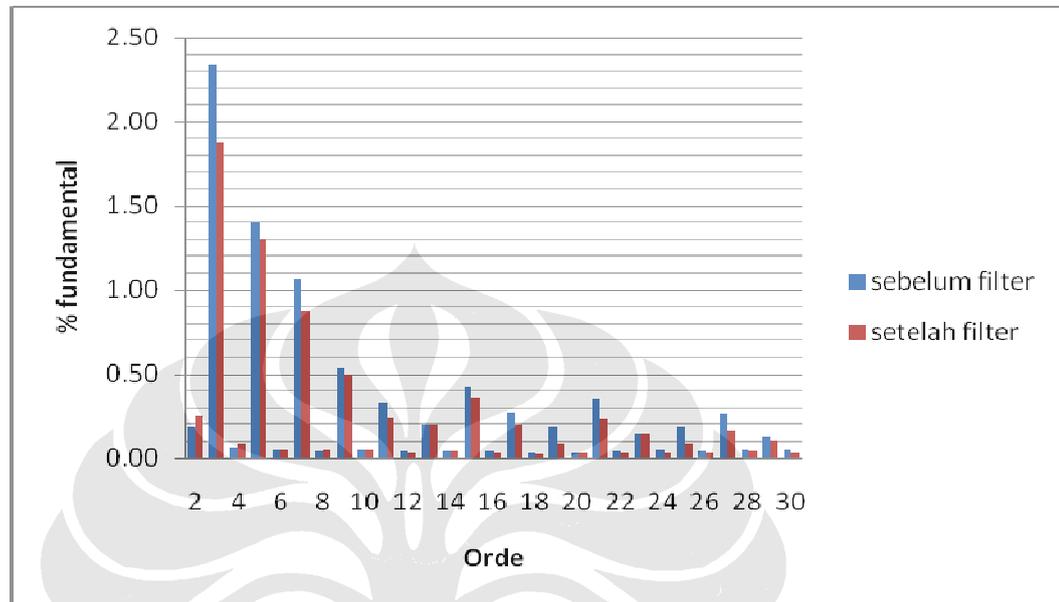
Beban	THD V maximum (%)	
	Sebelum Filter	Setelah Filter
LHE 8 W	2.94	2.47
LHE 14 W	2.85	2.46
LHE 18 W	3.22	2.06
TV	2.82	2.67
AC	2.52	2.63
Komputer	3	2.84
Kulkas	2.29	2.24
Dispenser	2.49	2.48

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa semua beban kecuali Air Conditioner (AC) mengalami penurunan THD tegangan. Hal ini terjadi karena perbedaan karakteristik harmonik antara AC dan beban yang lainnya. Pada beban selain AC, arus harmonik terbesar ada pada orde 3. Sedangkan untuk beban AC arus harmonik terbesar ada pada orde 2.

Harmonik tegangan terjadi karena adanya arus harmonik pada sistem yang mengakibatkan terjadinya drop tegangan pada tiap orde, sehingga terbentuklah gelombang tegangan sinusoidal pada orde harmonik. Jadi, besarnya harmonik tegangan sangat dipengaruhi oleh harmonik arus pada sistem. Beban identik yang berada pada sistem yang berbeda akan memiliki harmonik tegangan yang berbeda pula. Dengan penggunaan filter, arus harmonik pada sistem akan berkurang sehingga drop tegangan yang terjadi pada setiap orde berkurang, dan akhirnya

harmonik tegangan yang terjadi pun berkurang. Untuk dapat melihat pengaruh penggunaan filter pada setiap beban, berikut adalah grafik harmonik tegangan untuk setiap beban:

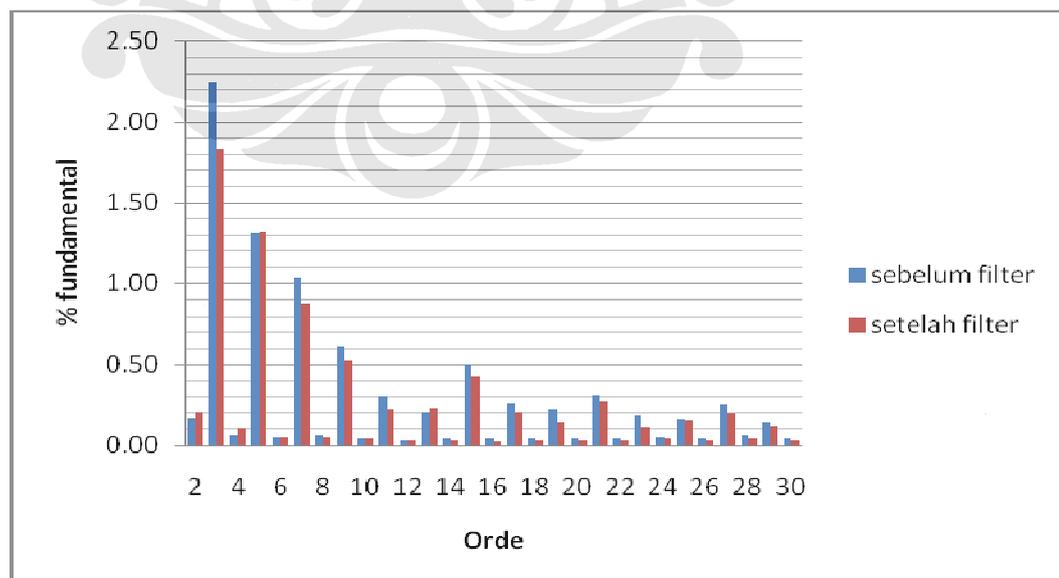
1. Lampu Hemat Energi 8 W (LHE 8 W)



Gambar 4.2. Grafik Harmonik Tegangan LHE 8 W

Pada lampu hemat energi 8 W terlihat hampir semua orde mengalami penurunan harmonik tegangan. Penurunan paling drastis terdapat pada orde 3 dimana harmonik tegangan berkurang dari 2.34% menjadi 1.88% .

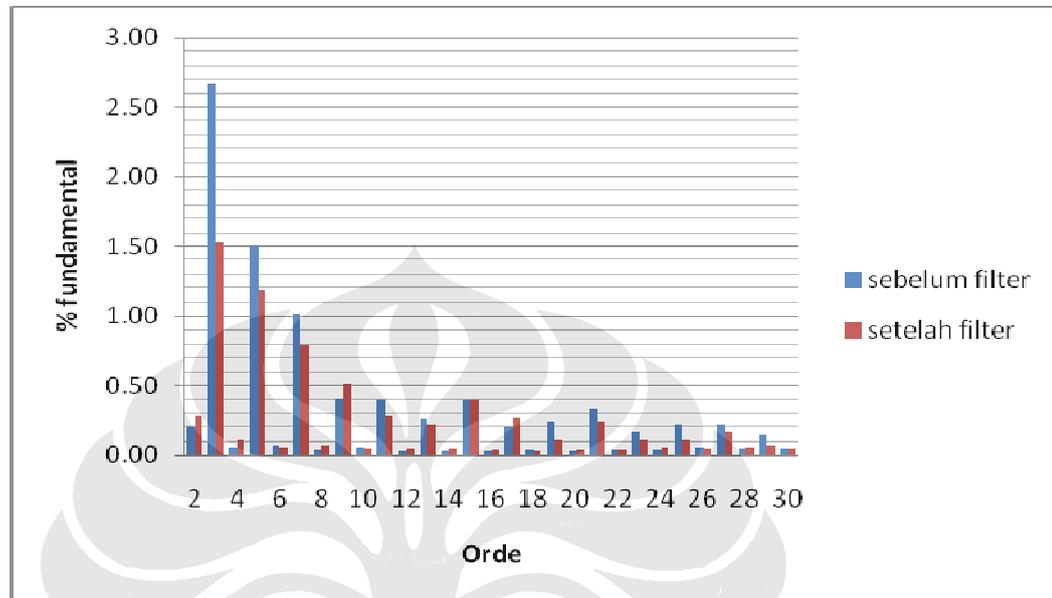
2. Lampu Hemat Energi 14 W (LHE 14 W)



Gambar 4.3. Grafik Harmonik Tegangan LHE 14 W

Pada lampu hemat energi 14 W terlihat hampir semua orde mengalami penurunan harmonik tegangan. Penurunan paling drastis terdapat pada orde 3 dimana harmonik tegangan berkurang dari 2.25% menjadi 1.83% .

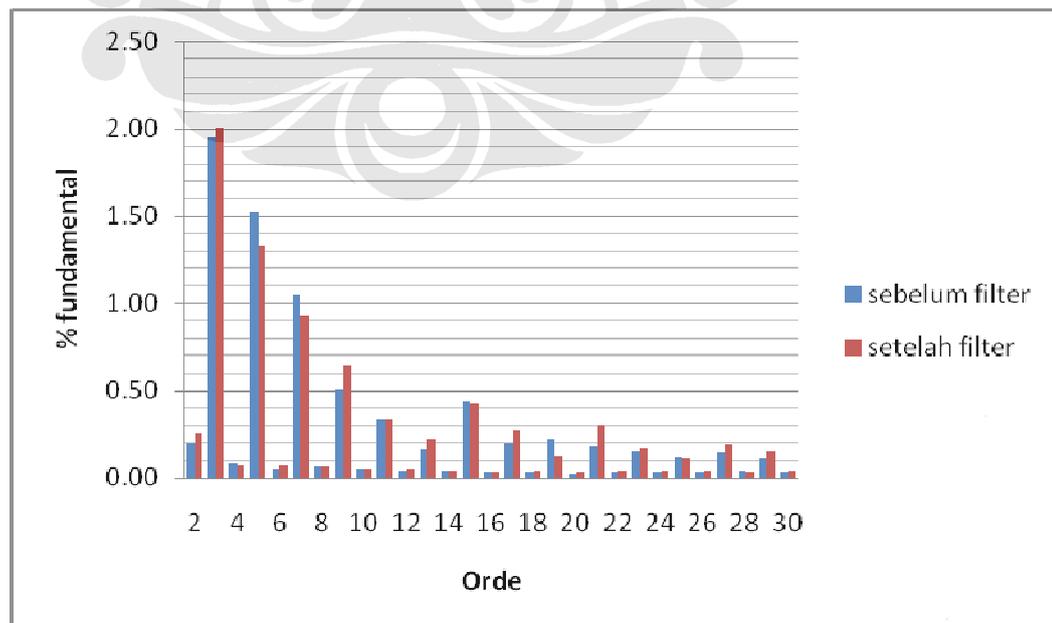
### 3. Lampu Hemat Energi 18 W (LHE 18 W)



Gambar 4.4. Grafik Harmonik Tegangan LHE 18 W

Pada lampu hemat energi 18 W terlihat hampir semua orde mengalami penurunan harmonik tegangan. Penurunan paling drastis terdapat pada orde 3 dimana harmonik tegangan berkurang dari 2.67% menjadi 1.53%.

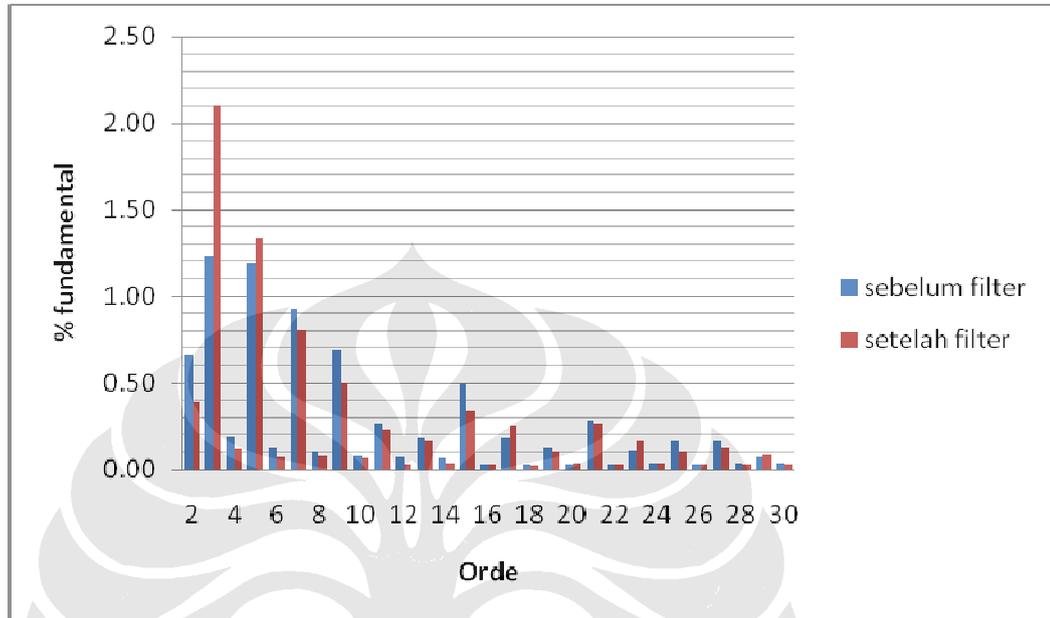
### 4. Televisi (TV)



Gambar 4.5. Grafik Harmonik Tegangan Televisi

Pada TV, terjadi peningkatan dan penurunan harmonik tegangan yang sangat bervariasi. Penurunan harmonik paling besar terjadi pada orde 5 dimana harmonik tegangan sebesar 1.52% berubah menjadi 1.33%.

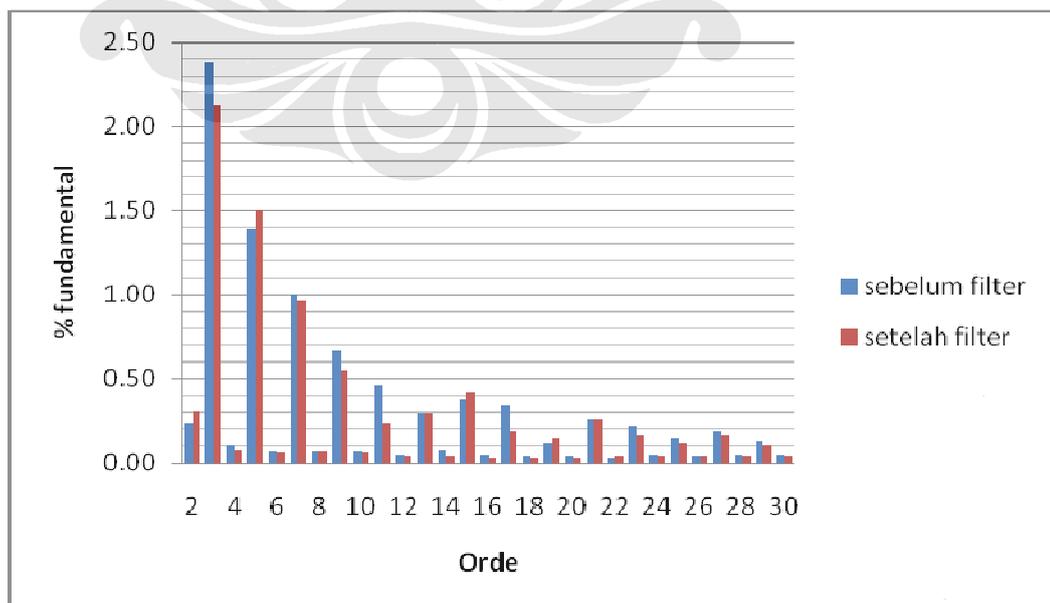
#### 5. Air Conditioner (AC)



Gambar 4.6. Grafik Harmonik Tegangan AC

Pada AC, terjadi peningkatan harmonik tegangan yang sangat besar pada orde 3 dari sebesar 1.23% menjadi 2.1%. Sedangkan penurunan terbesar pada orde 2 dari sebesar 0.67% menjadi 0.39%.

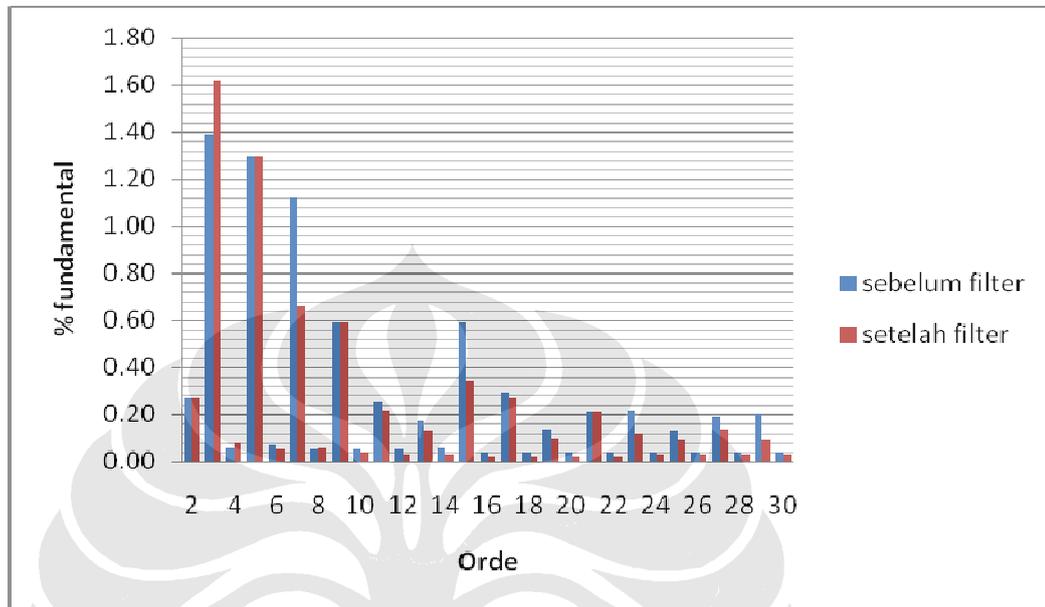
#### 6. Komputer



Gambar 4.7. Grafik Harmonik Tegangan Komputer

Pada komputer terlihat hampir semua orde mengalami penurunan harmonik tegangan. Penurunan paling drastis terdapat pada orde 3 dimana harmonik tegangan berkurang dari 2.38% menjadi 2.13%.

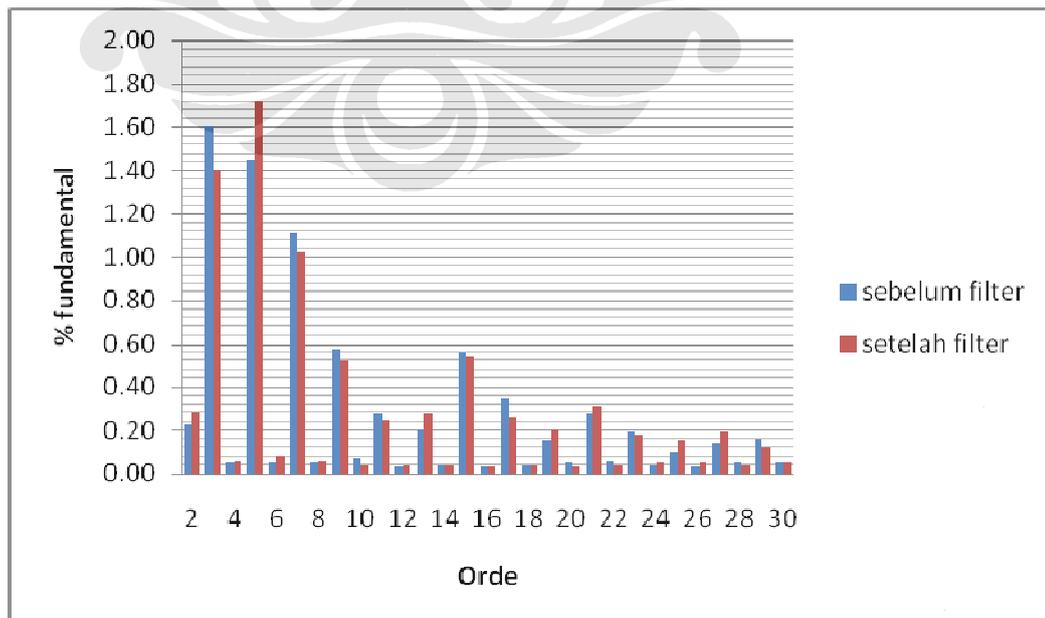
#### 7. Kulkas



Gambar 4.8. Grafik Harmonik Tegangan Kulkas

Pada kulkas, sebagian besar orde mengalami penurunan harmonik tegangan. Penurunan terbesar terdapat pada orde 7 yaitu harmonik tegangan sebesar 1.12% menjadi 0.66%.

#### 8. Dispenser



Gambar 4.9. Grafik Harmonik Tegangan Dispenser

Pada dispenser, sebagian besar orde mengalami penurunan harmonik tegangan. Penurunan terbesar terdapat pada orde 3 yaitu harmonik tegangan sebesar 1.60% menjadi 1.40%.

#### 4.4. Harmonik Arus Setelah Penggunaan Filter

Inti dari penggunaan *Single Tunned Filter* ini adalah mengurangi arus harmonik yang mengalir pada sistem. Arus harmonik pada sistem akan dilewatkan pada filter untuk kemudian di-groundkan. Pada skripsi ini dilakukan analisis arus harmonik pada beban rumah tangga dengan dua cara, yaitu analisis per beban dan analisis beban total.

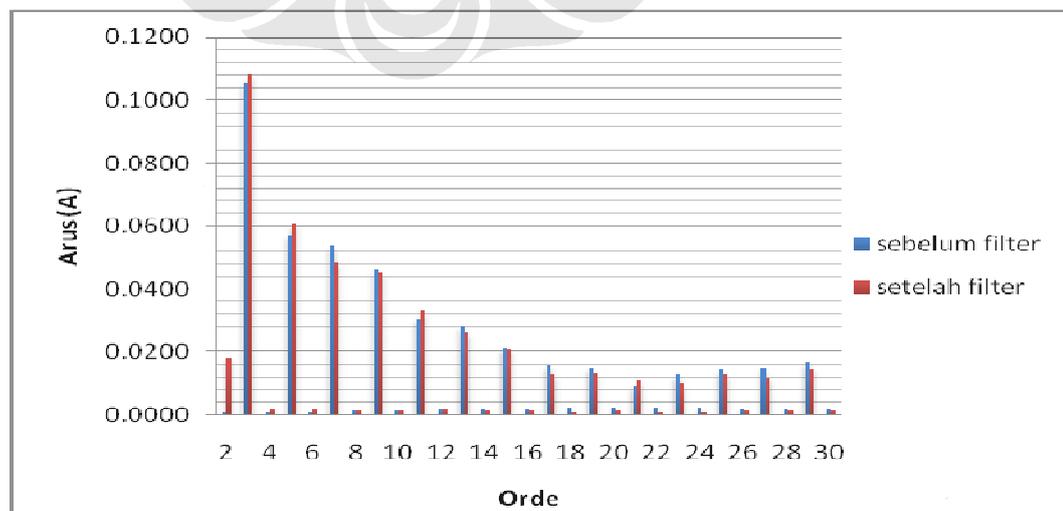
##### 4.4.1. Beban Lampu Hemat Energi (LHE) 8 W

Pemasangan *Single Tunned Filter* secara parallel terhadap beban mempengaruhi nilai THD arus seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.10. THD Arus LHE 8 W

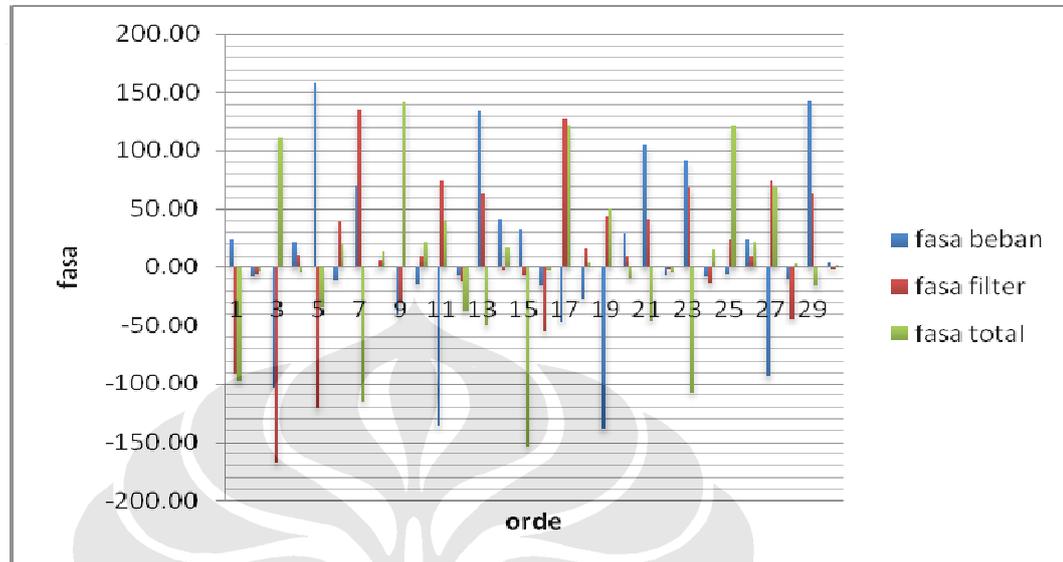
	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	69.85	70.56	69.3
Setelah filter	13.46	13.84	13.03

Penurunan THD arus yang sangat besar ini bukan merupakan indikasi arus harmonik pada sistem banyak yang tereduksi, akan tetapi lebih disebabkan adanya arus fundamental tambahan dari filter yang sangat besar bila dibandingkan arus fundamental beban. Bahkan untuk beberapa orde seperti orde 2 dan orde 5 terjadi peningkatan arus harmonik yang cukup besar. Dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.10. Grafik Harmonik Arus LHE 8 W

Arus harmonik pada sistem merupakan penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar fasa arus harmonik pada beban, filter, dan sistem.



Gambar 4.11. Grafik Fasa Arus Beban LHE 8 W

Arus harmonik pada sebagian besar orde mengalami penurunan, tetapi pada beberapa orde juga mengalami peningkatan. Pada dasarnya, filter harmonik bekerja pada semua orde harmonik dengan orde 3 sebagai orde kerja efektif filter. Jadi, seharusnya arus harmonik pada sistem akan berkurang. Peningkatan arus harmonik pada beberapa orde terjadi karena pengukuran beban sebelum dan setelah penggunaan filter dilakukan pada kondisi sistem yang berbeda dan waktu yang berbeda pula. Pada saat pengukuran, sulit menjaga agar kondisi sistem yang digunakan identik. Berikut adalah kondisi tegangan rms pada sistem sebelum dan setelah penggunaan filter:

Tabel 4.11. Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban LHE 8 W

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	210.51	212.84	208.35
Setelah filter	210.59	213.97	209.46

Dari kondisi diatas, tegangan sistem setelah penggunaan filter lebih besar dari sebelum penggunaan filter. Hal ini menyebabkan arus harmonik yang mengalir pada filter dan beban setelah penggunaan filter lebih besar dari sebelum penggunaan filter. Meski dengan kondisi sistem seperti ini, masih terjadi

penurunan arus harmonik di sebagian besar orde. Ini menunjukkan bahwa pada dasarnya arus harmonik tiap orde berkurang.

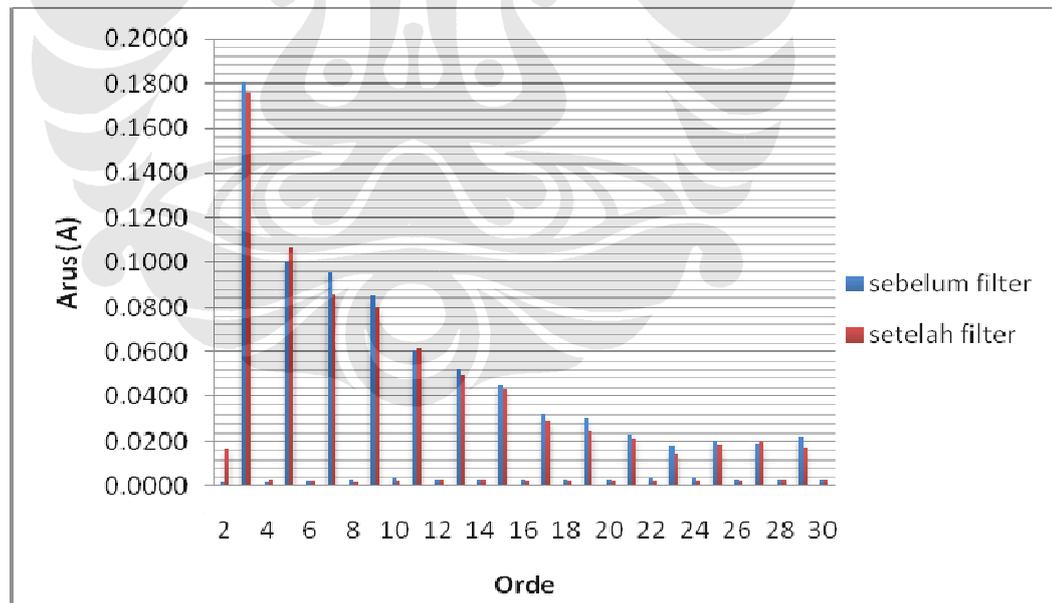
#### 4.4.2. Beban Lampu Hemat Energi (LHE) 14 W

Pemasangan *Single Tunned Filter* secara parallel terhadap beban mempengaruhi nilai THD arus seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.12. THD Arus LHE 14 W

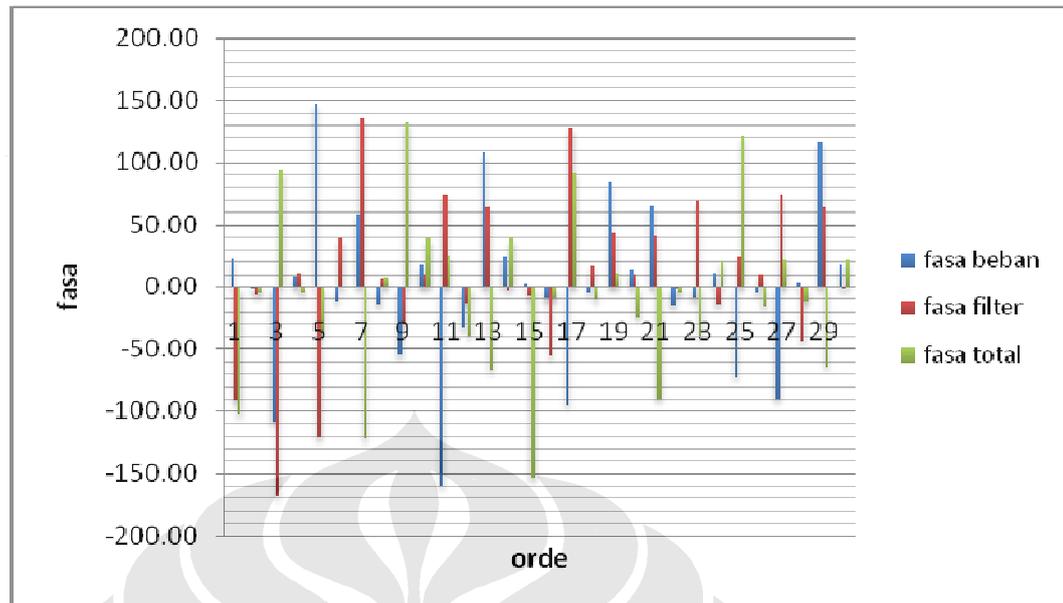
	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	82.67	83.36	80.97
Setelah filter	21.75	22.12	21.45

Penurunan THD arus yang sangat besar ini bukan merupakan indikasi arus harmonik pada sistem banyak yang tereduksi, akan tetapi lebih disebabkan adanya arus fundamental tambahan dari filter yang sangat besar bila dibandingkan arus fundamental beban. Bahkan untuk beberapa orde seperti orde 2 dan orde 5 terjadi peningkatan arus harmonik yang cukup besar. Dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.12. Grafik Harmonik Arus LHE 14 W

Arus harmonik pada sistem merupakan penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar fasa arus harmonik pada beban, filter, dan sistem.



Gambar 4.13. Grafik Fasa Arus Beban LHE 14 W

Arus harmonik pada sebagian besar orde mengalami penurunan, tetapi pada beberapa orde juga mengalami peningkatan. Pada dasarnya, filter harmonik bekerja pada semua orde harmonik dengan orde 3 sebagai orde kerja efektif filter. Jadi, seharusnya arus harmonik pada sistem akan berkurang. Peningkatan arus harmonik pada beberapa orde terjadi karena penjumlahan arus harmonik pada filter dan beban dengan memperhitungkan fasanya memiliki efek saling menguatkan. Pengukuran beban sebelum dan setelah penggunaan filter dilakukan pada kondisi sistem yang berbeda dan waktu yang berbeda pula. Pada saat pengukuran, sulit menjaga agar kondisi sistem yang digunakan identik. Berikut adalah kondisi tegangan rms pada sistem sebelum dan setelah penggunaan filter:

Tabel 4.13. Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban LHE 14 W

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	212.11	213.79	211.02
Setelah filter	210.12	210.86	209.16

Dari data didapatkan bahwa hanya arus orde 2 dan 5 saja yang mengalami peningkatan arus harmonik. Secara umum filter mampu menyerap arus harmonik yang mengalir pada sistem.

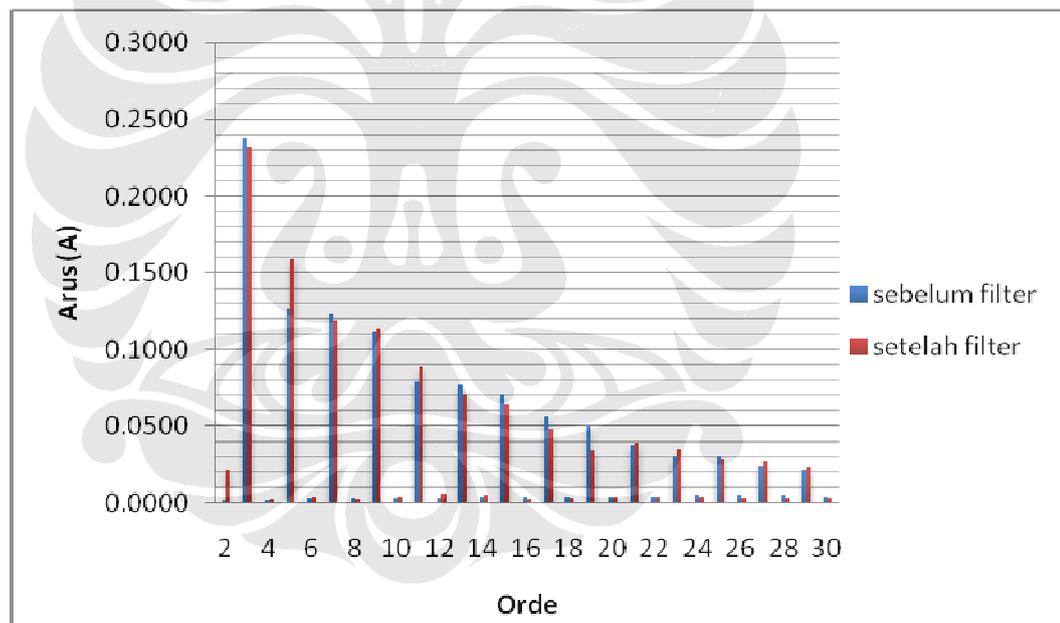
#### 4.4.3. Beban Lampu Hemat Energi (LHE) 18 W

Pemasangan *Single Tuned Filter* secara parallel terhadap beban mempengaruhi nilai THD arus seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.14. THD Arus LHE 18 W

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	71.58	72.34	69.93
Setelah filter	27.96	28.57	27.56

Penurunan THD arus yang sangat besar ini bukan merupakan indikasi arus harmonik pada sistem banyak yang tereduksi, akan tetapi lebih disebabkan adanya arus fundamental tambahan dari filter yang sangat besar bila dibandingkan arus fundamental beban. Untuk beberapa orde seperti orde 2, 5, 11, 21, dan 23 terjadi peningkatan arus harmonik. Dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.14. Grafik Harmonik Arus LHE 18 W

Arus harmonik pada sistem merupakan penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar fasa arus harmonik pada beban, filter, dan sistem.



Gambar 4.15. Grafik Fasa Arus Beban LHE 18 W

Arus harmonik pada sebagian besar orde mengalami penurunan, tetapi pada beberapa orde juga mengalami peningkatan. Pada dasarnya, filter harmonik bekerja pada semua orde harmonik dengan orde 3 sebagai orde kerja efektif filter. Jadi, seharusnya arus harmonik pada sistem akan berkurang. Peningkatan arus harmonik pada beberapa orde terjadi karena penjumlahan arus harmonik pada filter dan beban dengan memperhitungkan fasanya memiliki efek saling menguatkan. Pengukuran beban sebelum dan setelah penggunaan filter dilakukan pada kondisi sistem yang berbeda dan waktu yang berbeda pula. Pada saat pengukuran, sulit menjaga agar kondisi sistem yang digunakan identik. Berikut adalah kondisi tegangan rms pada sistem sebelum dan setelah penggunaan filter:

Tabel 4.15. Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban LHE 18 W

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	208.85	211.51	205.97
Setelah filter	211.57	213.77	210.19

Dari kondisi diatas, tegangan sistem setelah penggunaan filter lebih besar dari sebelum penggunaan filter. Hal ini menyebabkan arus harmonik yang mengalir pada filter dan beban setelah penggunaan filter lebih besar dari sebelum penggunaan filter. Meski dengan kondisi sistem seperti ini, masih terjadi

penurunan arus harmonik di sebagian besar orde. Ini menunjukkan bahwa pada dasarnya arus harmonik tiap orde berkurang.

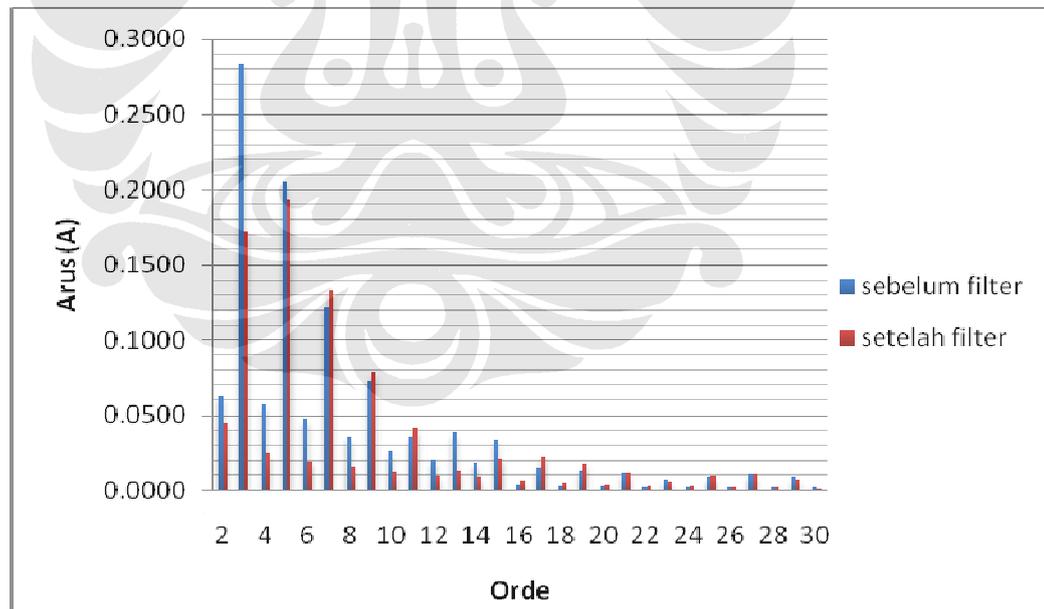
#### 4.4.4. Beban Televisi (TV)

Pemasangan *Single Tunned Filter* secara parallel terhadap beban mempengaruhi nilai THD arus seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.16. THD Arus TV

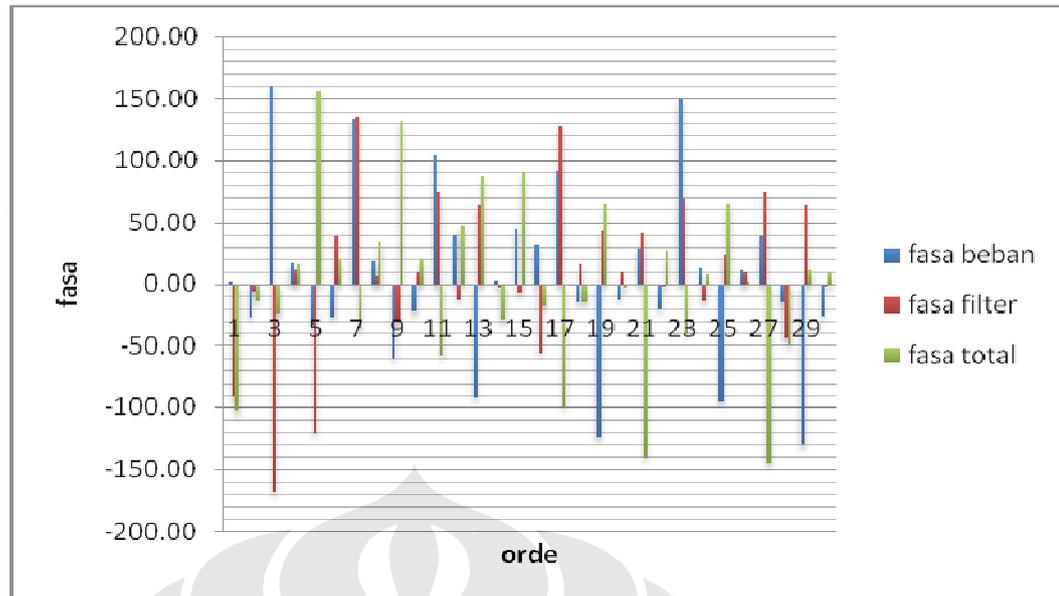
	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	70.59	71.7	69.83
Setelah filter	24.36	27.66	21.99

Penurunan THD arus yang sangat besar ini bukanlah indikasi arus harmonik beban banyak yang tereduksi, akan tetapi ini disebabkan adanya arus tambahan pada frekuensi fundamental yang cukup besar dari filter harmonik. Bahkan bila dilihat secara langsung terdapat peningkatan arus harmonik yang cukup besar pada orde 7, 9, dan 11 karena terjadi penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter. Hal ini bisa dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.16. Grafik Harmonik Arus TV

Arus harmonik pada sistem merupakan penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar fasa arus harmonik pada beban, filter, dan sistem:



Gambar 4.17. Grafik Fasa arus Beban TV

Arus harmonik pada sebagian besar orde mengalami penurunan, tetapi pada beberapa orde seperti 7, 9, dan 11 mengalami peningkatan. Pada dasarnya, filter harmonik bekerja pada semua orde harmonik dengan orde 3 sebagai orde kerja efektif filter. Jadi, seharusnya arus harmonik pada sistem akan berkurang. Peningkatan arus harmonik pada beberapa orde terjadi karena penjumlahan arus harmonik pada filter dan beban dengan memperhitungkan fasanya memiliki efek saling menguatkan. Selain itu, pengukuran beban sebelum dan setelah penggunaan filter dilakukan pada kondisi sistem yang berbeda dan waktu yang berbeda pula. Pada saat pengukuran, sulit menjaga agar kondisi sistem yang digunakan identik. Berikut adalah kondisi tegangan rms pada sistem sebelum dan setelah penggunaan filter:

Tabel 4.17. Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban TV

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	211.46	214.16	208.56
Setelah filter	214.5	215.92	213.11

Dari kondisi diatas, tegangan sistem setelah penggunaan filter lebih besar dari sebelum penggunaan filter. Hal ini menyebabkan arus harmonik yang mengalir pada filter dan beban setelah penggunaan filter lebih besar dari sebelum penggunaan filter. Meski dengan kondisi sistem seperti ini, masih terjadi

penurunan arus harmonik di sebagian besar orde. Ini menunjukkan bahwa pada dasarnya arus harmonik tiap orde berkurang.

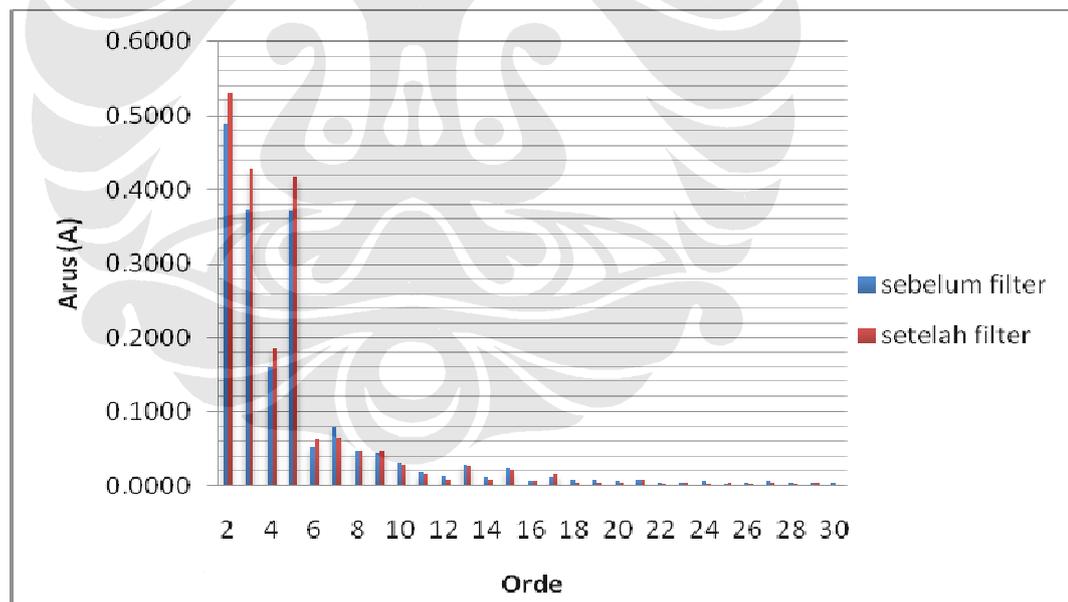
#### 4.4.5. Beban *Air Conditioner* (AC)

Pemasangan *Single Tunned Filter* secara parallel terhadap beban mempengaruhi nilai THD arus seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.18. THD Arus AC

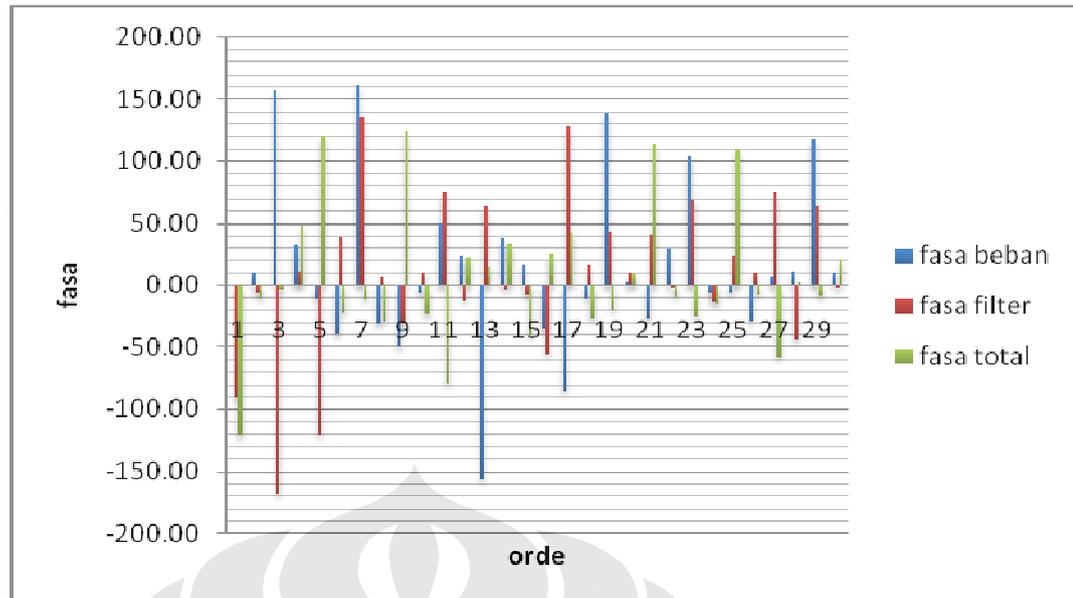
	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	15.04	16.91	12.91
Setelah filter	16.05	17.75	13.73

Pemasangan filter yang bertujuan untuk mengurangi arus harmonik dan THD arus pada sistem ternyata tidak terealisasi disini. Besar THD arus setelah penggunaan filter malah meningkat bila dibandingkan dengan THD arus sebelum penggunaan filter. Besarnya peningkatan arus harmonik pada tiap orde dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.18. Grafik Harmonik Arus AC

Arus harmonik pada sistem ini merupakan penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar fasa arus harmonik pada beban, filter, dan sistem:



Gambar 4.19. Grafik Fasa Arus Beban AC

Peningkatan arus harmonik pada beberapa orde terjadi karena penjumlahan arus harmonik pada filter dan beban dengan memperhitungkan fasanya memiliki efek saling menguatkan. Selain itu, pengukuran beban sebelum dan setelah penggunaan filter dilakukan pada kondisi sistem yang berbeda dan waktu yang berbeda pula. Pada saat pengukuran, sulit menjaga agar kondisi sistem yang digunakan identik. Berikut adalah kondisi tegangan rms pada sistem sebelum dan setelah penggunaan filter:

Tabel 4.19. Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban AC

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	204.98	205.97	204.09
Setelah filter	208.31	209.28	206.75

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan tegangan sistem yang cukup besar sampai sekitar 4 volt. Kenaikkan tegangan ini dapat menyebabkan kenaikan arus harmonik yang lebih besar lagi. Dengan kata lain, kenaikan tegangan pada sistem tidak sebanding dengan kenaikan arus harmonik pada sistem. Sedikit kenaikan tegangan sistem dapat menghasilkan kenaikan arus harmonik yang cukup besar bahkan berlipat ganda dan dapat merubah bentuk gelombang. Ini merupakan sumber masalah utama harmonik pada sistem tenaga listrik [1].

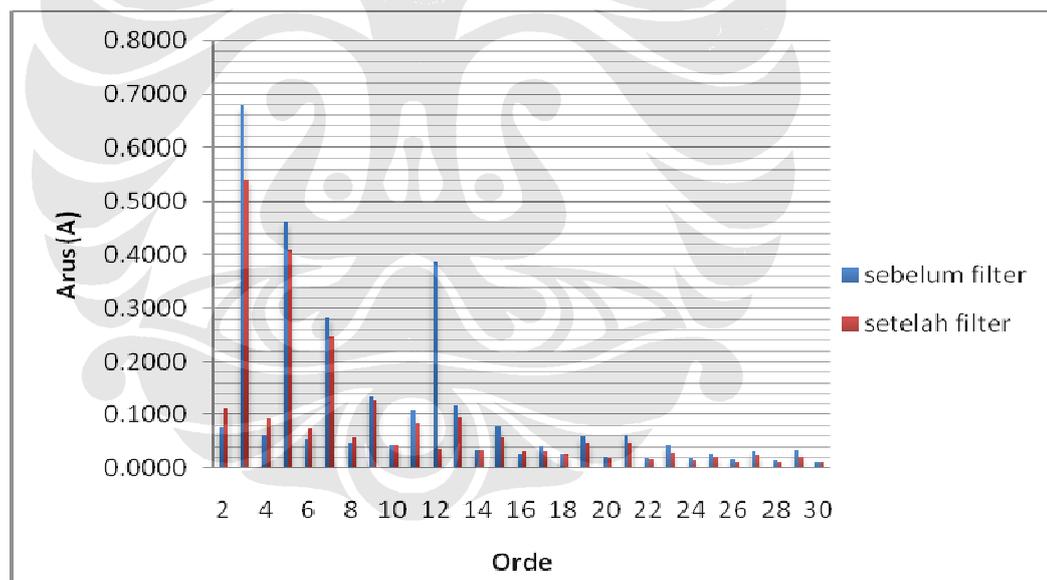
#### 4.4.6. Beban Komputer

Pemasangan *Single Tunned Filter* secara parallel terhadap beban mempengaruhi nilai THD arus seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.20. THD Arus Komputer

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	74.4	76.49	72.29
Setelah filter	46.68	49.10	30.79

Penurunan THD arus yang sangat besar ini bukanlah indikasi arus harmonik beban banyak yang tereduksi, akan tetapi ini disebabkan adanya arus tambahan pada frekuensi fundamental yang cukup besar dari filter harmonik. Terdapat peningkatan arus harmonik pada orde 2, 4, 6, dan 8 karena terjadi penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter. Hal ini bisa dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.20. Grafik Harmonik Arus Komputer

Dari grafik diatas terlihat bahwa sebagian besar orde mengalami penurunan arus harmonik. Penurunan yang paling besar terdapat pada orde 12 dan orde 3. Pada dasarnya, filter harmonik bekerja pada semua orde harmonik dengan orde 3 sebagai orde kerja efektif filter. Jadi, seharusnya arus harmonik pada sistem akan berkurang. Peningkatan arus harmonik pada beberapa orde terjadi karena penjumlahan arus harmonik pada filter dan beban dengan

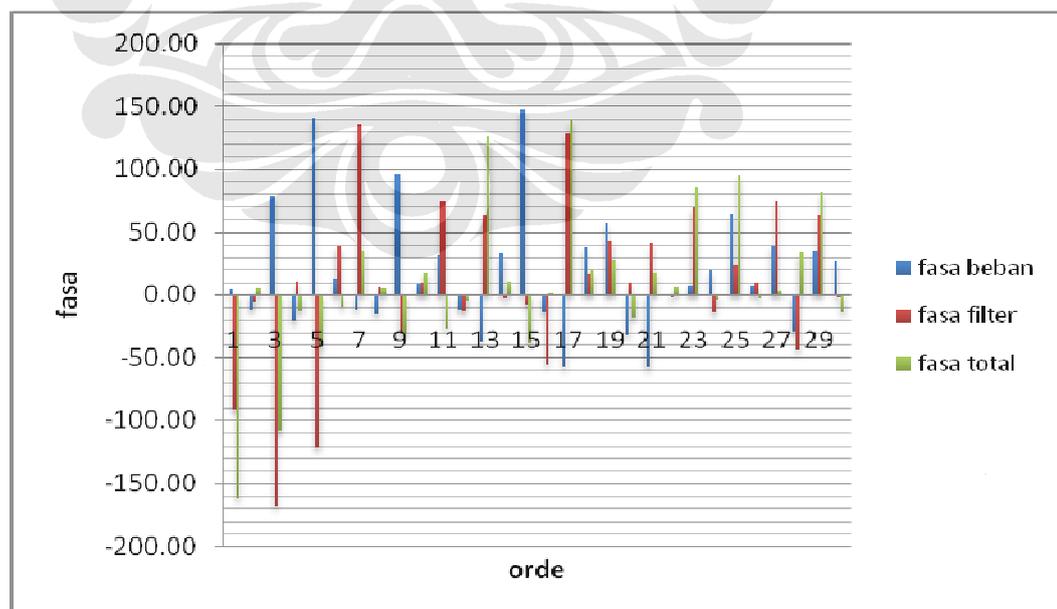
memperhitungkan fasanya memiliki efek saling menguatkan. Selain itu, pengukuran beban sebelum dan setelah penggunaan filter dilakukan pada kondisi sistem yang berbeda dan waktu yang berbeda pula. Pada saat pengukuran, sulit menjaga agar kondisi sistem yang digunakan identik. Berikut adalah kondisi tegangan rms pada sistem sebelum dan setelah penggunaan filter:

Tabel 4.21. Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban Komputer

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	213.21	215.2	211.43
Setelah filter	212.55	213.48	211.89

Dari kondisi diatas, tegangan sistem setelah penggunaan filter lebih besar dari sebelum penggunaan filter. Hal ini menyebabkan arus harmonik yang mengalir pada filter dan beban setelah penggunaan filter lebih besar dari sebelum penggunaan filter. Meski dengan kondisi sistem seperti ini, masih terjadi penurunan arus harmonik di sebagian besar orde. Ini menunjukkan bahwa pada dasarnya arus harmonik tiap orde berkurang.

Arus harmonik pada sistem merupakan penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar fasa arus harmonik pada beban, filter, dan sistem:



Gambar 4.21. Grafik Fasa Arus Beban Komputer, Filter, dan Sistem

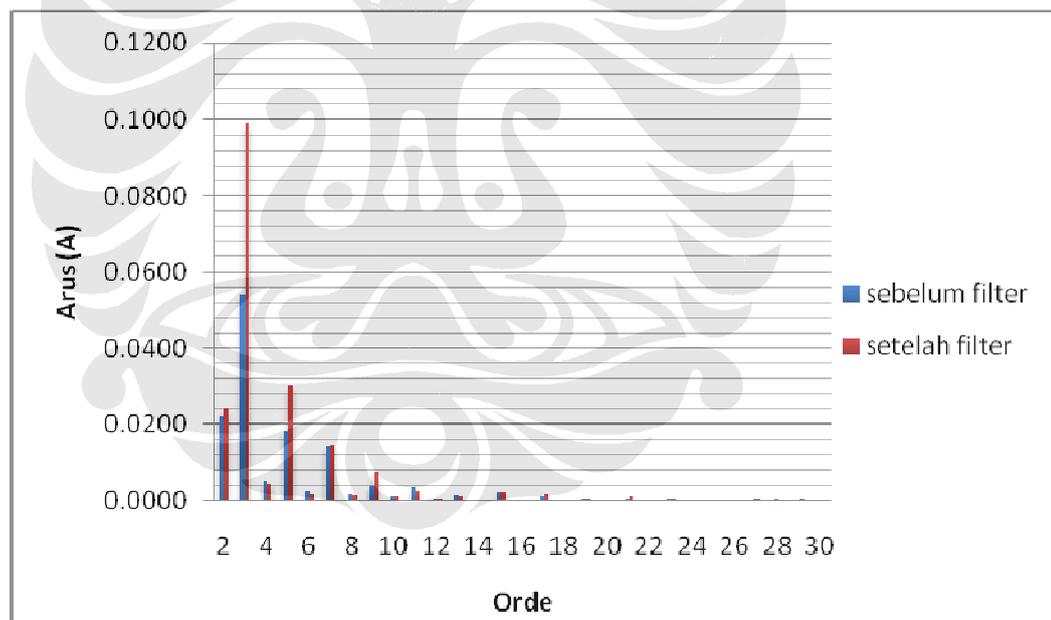
#### 4.4.7. Beban Kulkas

Pemasangan *Single Tunned Filter* secara parallel terhadap beban mempengaruhi nilai THD arus seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.22. THD Arus Kulkas

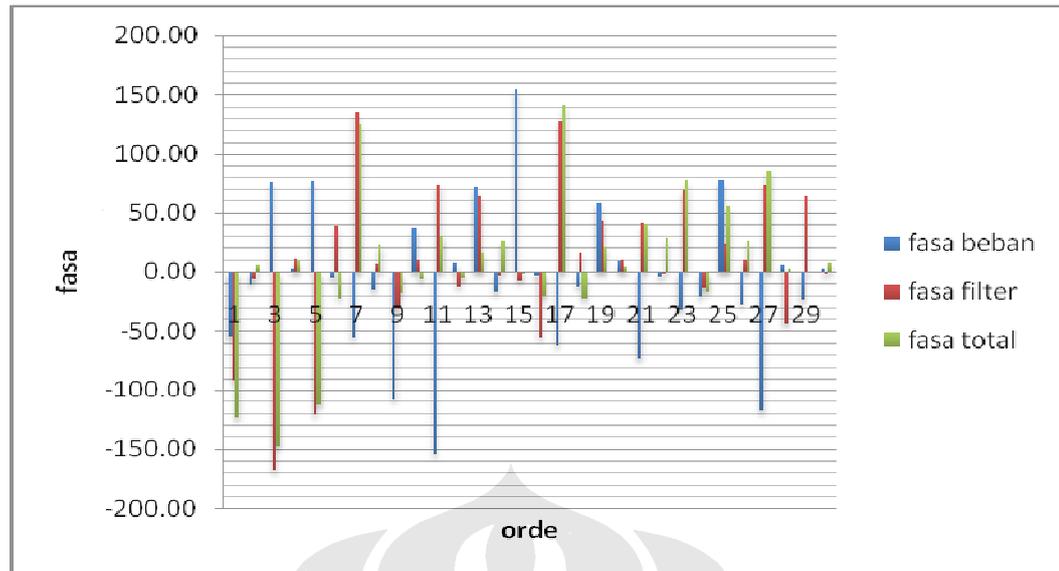
	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	8.59	9.3	8.1
Setelah filter	16.17	17.33	15.10

Pemasangan filter yang bertujuan untuk mengurangi arus harmonik dan THD arus pada sistem ternyata tidak terealisasi disini. Besar THD arus setelah penggunaan filter malah meningkat bila dibandingkan dengan THD arus sebelum penggunaan filter. Besarnya peningkatan arus harmonik pada tiap orde dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.22. Grafik Harmonik Arus Kulkas

Arus harmonik pada sistem ini merupakan penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar fasa arus harmonik pada beban, filter, dan sistem:



Gambar 4.23. Grafik Fasa Arus Beban Kulkas

Pada beban ini filter harmonik memberi kompensasi daya reaktif yang besar kepada beban, hasilnya adalah arus fundamental beban berkurang. Peningkatan arus harmonik pada beberapa orde terjadi karena penjumlahan arus harmonik pada filter dan beban dengan memperhitungkan fasanya memiliki efek saling menguatkan. Selain itu, pengukuran beban sebelum dan setelah penggunaan filter dilakukan pada kondisi sistem yang berbeda dan waktu yang berbeda pula. Pada saat pengukuran, sulit menjaga agar kondisi sistem yang digunakan identik. Berikut adalah kondisi tegangan rms pada sistem sebelum dan setelah penggunaan filter:

Tabel 4.23. Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban Kulkas

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	210.09	212.19	207.8
Setelah filter	214.86	217.21	213.41

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan tegangan sistem yang cukup besar sampai sekitar 4 volt. Kenaikkan tegangan ini dapat menyebabkan kenaikan arus harmonik yang lebih besar lagi. Dengan kata lain, kenaikan tegangan pada sistem tidak sebanding dengan kenaikan arus harmonik pada sistem. Sedikit kenaikan tegangan sistem dapat menghasilkan kenaikan arus harmonik yang cukup besar bahkan berlipat ganda. Ini merupakan sumber masalah utama harmonik pada sistem tenaga listrik [1].

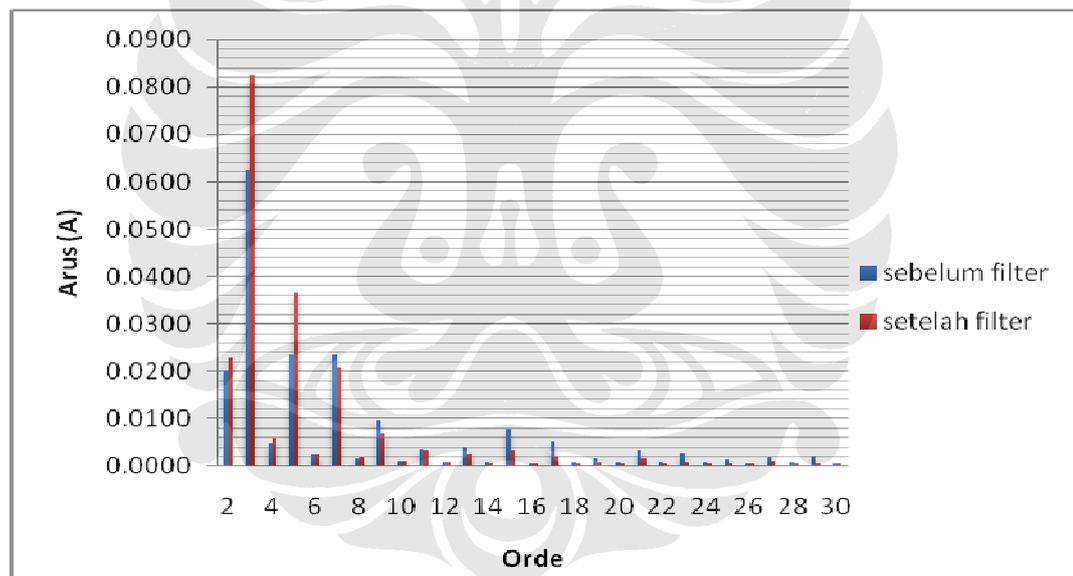
#### 4.4.8. Beban Dispenser

Pemasangan *Single Tuned Filter* secara parallel terhadap beban mempengaruhi nilai THD arus seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.24. THD Arus Dispenser

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	6.18	8.55	3.26
Setelah filter	7.04	12.83	4.12

Pemasangan filter yang bertujuan untuk mengurangi arus harmonik dan THD arus pada sistem ternyata tidak terealisasi disini. Besar THD arus setelah penggunaan filter malah meningkat bila dibandingkan dengan THD arus sebelum penggunaan filter. Besarnya peningkatan arus harmonik pada tiap orde dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.24. Grafik Harmonik Arus Dispenser

Arus harmonik pada sistem ini merupakan penjumlahan arus harmonik pada beban dan filter dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar fasa arus harmonik pada beban, filter, dan sistem:



Gambar 4.25. Grafik Fasa Arus Beban Dispenser

Pada beban ini filter harmonik memberi kompensasi daya reaktif yang besar kepada beban, hasilnya adalah arus fundamental beban berkurang. Peningkatan arus harmonik pada beberapa orde terjadi karena penjumlahan arus harmonik pada filter dan beban dengan memperhitungkan fasanya memiliki efek saling menguatkan. Selain itu, pengukuran beban sebelum dan setelah penggunaan filter dilakukan pada kondisi sistem yang berbeda dan waktu yang berbeda pula. Pada saat pengukuran, sulit menjaga agar kondisi sistem yang digunakan identik. Kondisi sistem pengukuran dapat dilihat pada tabel berikut:

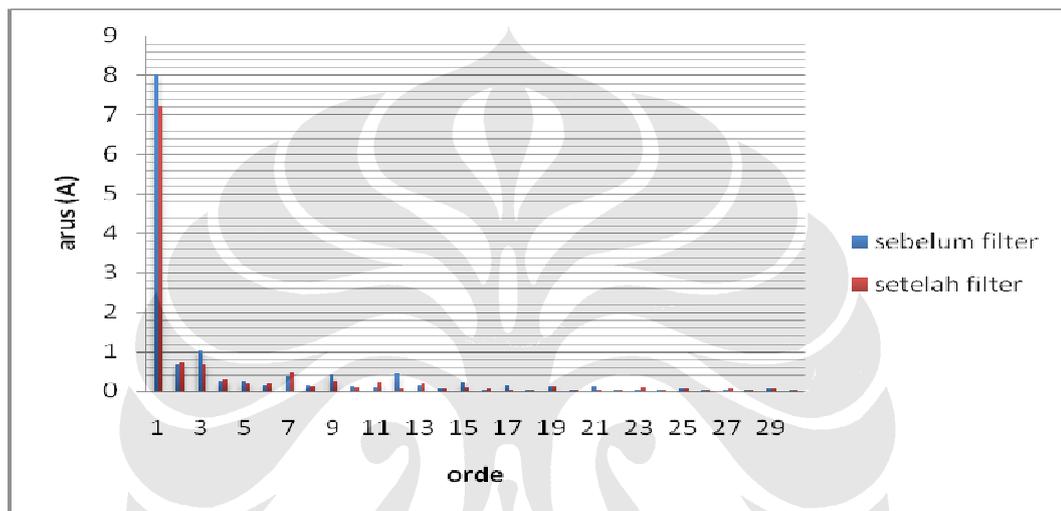
Tabel 4.25. Tegangan RMS Sistem Pengukuran Beban Dispenser

	rata-rata	maksimum	minimum
Sebelum filter	208.41	213.13	205.62
Setelah filter	209.56	212.12	207.38

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan tegangan sistem yang cukup besar sampai sekitar 4 volt. Kenaikkan tegangan ini dapat menyebabkan kenaikan arus harmonik yang lebih besar lagi. Dengan kata lain, kenaikan tegangan pada sistem tidak sebanding dengan kenaikan arus harmonik pada sistem. Sedikit kenaikan tegangan sistem dapat menghasilkan kenaikan arus harmonik yang cukup besar bahkan berlipat ganda. Ini merupakan sumber masalah utama harmonik pada sistem tenaga listrik [1].

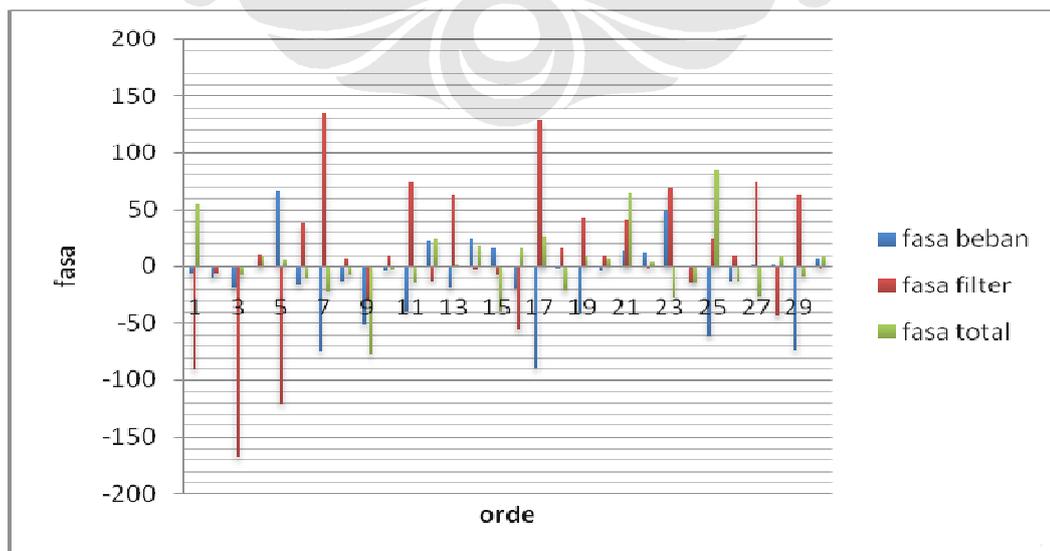
#### 4.4.9. Beban Total

Pada saat beban total kita bisa melihat bahwa filter mulai terlihat efektif digunakan karena memang didesain untuk mengkompensasi daya reaktif dan mereduksi filter pada arus maksimum beban total. Karena tidak digunakan pengukuran beban total secara langsung, maka untuk mendapatkan data beban total dilakukan perhitungan manual semua arus (fundamental dan harmonik) dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah grafik harmonik arus beban total pada saat sebelum dan setelah penggunaan filter:



Gambar 4.26. Grafik Harmonik Arus Beban Total

Perhitungan arus pada sistem dengan menjumlahkan arus filter dan arus beban total dengan memperhitungkan fasanya. Berikut adalah gambar grafik fasa arus beban total, filter, dan sistem:



Gambar 4.27. Grafik Fasa Arus Beban Total

Sebelum penggunaan filter, didapatkan besar THD arus maksimum adalah 19.07 % dengan arus rms sebesar 8.1913 A. Sedangkan setelah penggunaan filter didapatkan besar THD arus maksimum adalah 17.79 % dengan arus rms sebesar 7.3120 A. Berikut adalah tabel ringkasan perbandingan arus rms pada tiap beban:

Tabel 4.26. Arus rms Tiap Beban dan Beban Total (A)

Beban	Sebelum filter	Setelah filter
LHE 18 W	0.4985	1.2569
LHE 14 W	0.3761	1.1697
LHE 8 W	0.2156	1.1086
TV	0.5202	1.1229
PC	1.2903	1.5067
AC	4.2626	4.4361
Kulkas	0.6762	0.6215
Dispenser	1.8556	0.7422
<b>Total</b>	<b>8.1913</b>	<b>7.3120</b>

Dari perbandingan kedua data tersebut berarti filter dapat mereduksi arus harmonik pada beban total sekaligus memberi kompensasi daya reaktif yang dibutuhkan sistem. Arus beban total yang bersifat induktif ditambahkan dengan beban filter yang bersifat kapasitif sehingga saat dijumlahkan terjadi efek yang saling melemahkan. Hasilnya, arus fundamental dan harmonik akan berkurang.

Dari data juga dapat dilihat bahwa arus harmonik pada orde ganjil sebagian besar berkurang. Sedangkan arus harmonik orde genap malah terjadi penambahan meskipun tidak sebanding dengan arus harmonik orde ganjil yang berkurang. Peningkatan arus harmonik orde ganji meskipun mempengaruhi besar THD tetapi tidak terlalu berpengaruh pada bentuk gelombang yang dihasilkan. Berdasarkan transformasi fourier yang dilakukan dalam menganalisa harmonik, arus pada orde genap memiliki efek saling menghilangkan sehingga seringkali tidak digunakan dalam perhitungan harmonik.

Dari desain filter pada beban rumah tangga yang ditentukan untuk mereduksi arus harmonik pada orde 3 ternyata memang arus harmonik pada orde inilah yang paling banyak berkurang. Arus harmonik pada orde 3 ini berkurang dari 12.92 % menjadi 9.45 % dengan besar arus harmonik yang berkurang dari 1.0397 A menjadi 0.6800 A.

#### 4.5. Daya dan Faktor Daya Setelah Penggunaan Filter

Adanya kompensasi daya reaktif oleh filter dapat merubah daya kompleks, daya aktif, dan daya reaktif pada sistem. Bila sebelum menggunakan filter didapatkan daya seperti berikut:

Tabel 4.27. Daya Beban Total Sebelum Filter

Beban	P			Q			S		
	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN
LHE 8W	27.7	29.2	27.3	-12.6	-13.7	-12.2	30.4	32.3	29.9
LHE14W	47.8	50.6	47.1	-20.6	-22.3	-20.2	52.1	55.3	51.3
LHE18W	63.5	67.5	61.4	-24.8	-27.4	-23.4	68.1	72.7	65.7
TV	52.2	61.4	48.8	-1.7	-2.5	-1	52.3	61.5	48.9
PC	148.2	172.4	131.7	1.1	5.6	-3.9	148.3	172.4	131.8
AC	832.5	857.8	813	-67.7	-77.9	-56.6	835.3	860.4	815.8
Kulkas	76.7	90.5	71.8	108.2	110.7	105.8	132.7	140	127.9
Dispenser	195.4	373.1	96.2	90.2	94.7	85.1	222.5	383.2	132.7
Total	1444	1702.5	1297.3	72.1	67.2	73.6	1541.7	1777.8	1404

Dari data diatas diketahui beban total bersifat induktif dimana besar daya reaktif (Q) bernilai positif yang berarti beban menyerap daya reaktif dari sistem. Untuk nilai faktor daya pada kondisi maksimum didapat sebesar 0.9576. Inilah dasar awal perancangan *Single Tunned Filter* ini.

Setelah penggunaan filter, karakteristik daya pada beban dan sistem akan berubah. Berikut adalah daya beban setelah menggunakan filter:

Tabel 4.28. Daya Beban Total Setelah Filter

Beban	P			Q			S		
	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN
LHE 8W	27.5	28.8	26.9	-12.9	-13.8	-12.5	30.4	31.9	29.7
LHE14W	47.6	49.6	47.1	-21.4	-22.9	-21	52.2	54.7	51.7
LHE18W	64.5	66.8	63.8	-27.1	-28.5	-26.6	70	72.6	69.2
TV2	47.9	56	42.3	-1.6	-2.7	-1	48	56	42.4
PC	125.1	155.9	66.4	1.7	5.8	-4.6	125.1	156	66.4
AC	847.3	860.3	830.2	-71.9	-85.3	-62.2	850.4	864.1	833.1
Kulkas	67.1	69.3	66.1	113.1	115.9	110.8	131.5	134.3	129.4
Dispenser	97.2	100	94	92.9	96	90.1	134.5	138.6	130.6
Filter	3.3	4.2	0	-204.7	-224.4	0	204.7	224.4	0
Total	1327.5	1390.9	1236.8	-131.9	-145.1	-151.9	1646.8	1732.6	1352.5

Dari data diatas dapat dilihat bahwa daya aktif yang digunakan berkurang, hal ini karena adanya kompensasi oleh filter yang membuat arus rms beban total berkurang. Selain itu sistem kini bersifat kapasitif yang dapat dilihat dari nilai daya reaktif yang negatif. Saat ini sistem mampu menghasilkan daya reaktif sendiri sehingga bila ada beban induktif tambahan pada sistem daya reaktif beban tambahan itu dapat langsung disuplai oleh sistem.

Pada keadaan maksimum bisa dicari besar faktor dayanya yaitu sebesar 0.8028. Faktor daya ini menjadi buruk karena tidak sesuai dengan yang diinginkan yaitu 0.98. Hal ini terjadi karena filter mengkompensasi daya reaktif secara berlebihan sehingga sistem bersifat kapasitif dan faktor daya menjadi lebih buruk.

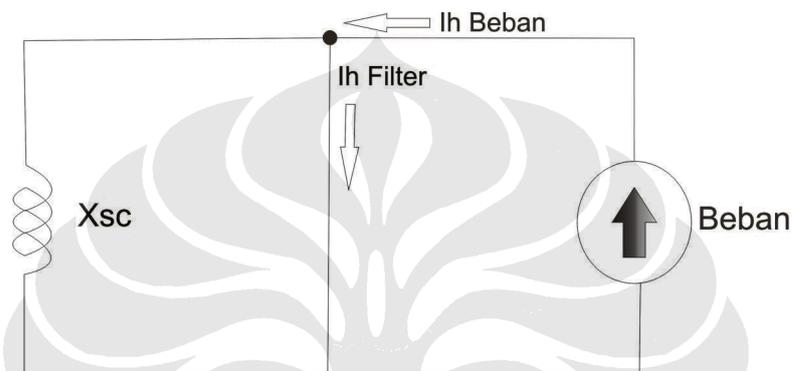
#### 4.6. Evaluasi Kerja Filter

Pada dasarnya, sebuah single tuned filter dirancang untuk mengurangi arus harmonik pada satu orde yang ditentukan saja. Orde harmonik ini ditentukan dari orde dengan harmonik tegangan terbesar pada beban. Pada penelitian ini didapatkan bahwa pada beban rumah tangga, harmonik tegangan terbesar berada pada orde 3. Penyetelan orde single tuned filter diturunkan sedikit dibawahnya yakni sebesar 2.9. Hal ini perlu dilakukan sebagai toleransi komponen filter untuk mencegah resonansi yang terjadi dalam sistem pada frekuensi yang mengganggu [2]. Prinsip kerja single tuned filter dapat ditentukan oleh kurva impedansi filter. Dari hasil perancangan single tuned filter, didapatkan kurva impedansi sebagai berikut:



Gambar 4.28. Kurva Impedansi Single Tuned Filter

Impedansi pada filter minimum pada saat frekuensi  $f_r$  atau frekuensi resonansi yaitu frekuensi orde harmonik yang ditentukan dalam hal ini  $f_r$  adalah 145 Hz. Karena pada rangkaian filter tidak terdapat komponen resistor, idealnya pada frekuensi 145 Hz besar impedansi filter  $Z$  adalah  $0 \Omega$  atau filter dalam keadaan *short circuit*. Pada frekuensi ini, diharapkan semua arus harmonik akan melalui filter dan tidak masuk ke dalam sistem. Prinsip kerja filter saat frekuensi 145 Hz pada kondisi ideal dapat dijelaskan pada gambar berikut:



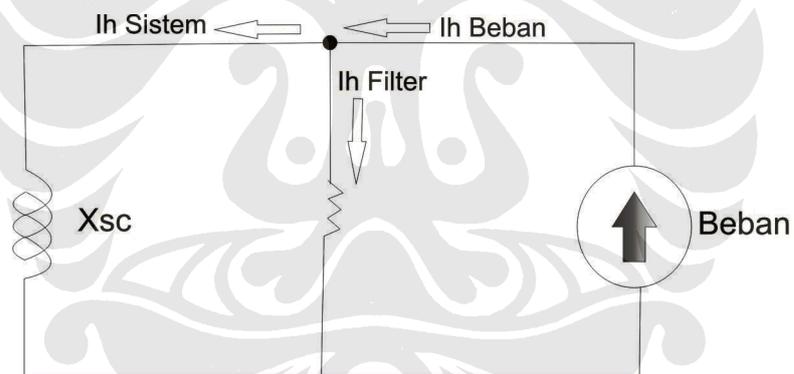
Gambar 4.29. Model Sistem Filter Pada Frekuensi 145 Hz

Dari model beban non-linier diatas, beban merupakan sumber arus harmonik pada sistem, filter dalam keadaan *short circuit*, dan  $X_{sc}$  merupakan reaktansi *short circuit* dari busbar atau sumber pada sistem. Pada kondisi ideal, semua arus harmonik dari beban lebih memilih melalui filter karena impedansinya 0 sehingga tidak ada arus harmonik yang mengalir ke sistem. Dari pernyataan ini, bisa dihitung besar arus harmonik yang mengalir pada filter sama dengan besar arus harmonik yang dihasilkan beban total dengan menggunakan persamaan 4.9. berikut [1]:

$$I_h = I_h(pu) \times \frac{VA}{V_{actual}} \quad (4.9)$$

Dari data awal didapatkan bahwa arus harmonik terbesar pada orde 3 sebesar 12.92 % sehingga  $I_h(pu)$  adalah 0.1292 dengan besar VA maksimum beban total 1777.8 VA dan V actual 220 V tanpa memperhitungkan drop tegangan, maka besar arus harmonik pada beban dan filter hasil perhitungan sebesar 1.04 A. Arus harmonik yang mengalir pada sistem 0 A.

Akan tetapi dari hasil pengujian didapatkan data bahwa arus harmonik pada sistem setelah penggunaan single tuned filter adalah 0.68 A dengan persentase terhadap arus fundamental 9.45 %. Hal ini menunjukkan bahwa arus harmonik tidak seluruhnya melewati filter. Hal ini disebabkan adanya resistansi pada filter yang membuat impedansi filter pada orde yang diinginkan tidak 0 ohm. Inilah yang disebut dengan faktor kualitas  $Q$  dari single tuned filter. Faktor Kualitas ( $Q$ ) dari sebuah filter ( $Q$ ) adalah ukuran ketajaman penyetelan filter tersebut dalam mengeliminasi harmonik. Dalam single tuned filter, faktor kualitas  $Q$  didefinisikan sebagai perbandingan antara induktansi atau kapasitansi pada frekuensi resonansi terhadap resistansi. Filter yang efektif harus memiliki induktor dengan faktor kualitas yang besar, oleh karena itu resistansi harus jauh lebih kecil daripada induktansi pada frekuensi resonansi. Perkiraan nilai  $Q$  untuk reaktor inti udara adalah 75 dan lebih besar 75 untuk reaktor inti besi [1]. Berikut adalah model filter dengan faktor kualitas ( $Q$ ):



Gambar 4.30. Model Sistem Filter Dengan Faktor Kualitas ( $Q$ )

Karena adanya resistansi pada filter, sebagian arus harmonik melewati filter dan sebagian lainnya masuk ke sistem. Resistansi filter sangat mempengaruhi faktor kualitas filter. Semakin kecil resistansi filter, semakin besar faktor kualitas filter, dan semakin besar pula arus harmonik yang dilewatkan ke filter atau semakin kecil arus harmonik yang masuk ke sistem.

Untuk membuktikan adanya resistansi pada rangkaian filter, impedansi filter untuk setiap orde harmonik harus diketahui. Dari hasil pengujian didapat tegangan dan arus harmonik yang mengalir pada single tuned filter. Dari data

tersebut dapat dicari impedansi filter untuk setiap orde dengan persamaan:

$$Z_h = \frac{V_h}{I_h} \quad (4.15)$$

Impedansi filter hasil perhitungan didapat dari perhitungan berdasarkan persamaan 2.13 :

$$|Z_f| = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (2.13)$$

Dengan asumsi pada kondisi ideal tidak terdapat resistansi pada filter ( $R = 0 \Omega$ ), kapasitansi dan induktansi dari model pengujian filter, dan frekuensi dasar 50 Hz.

Perbandingan antara impedansi filter hasil perhitungan dan hasil pengujian dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.29. Impedansi Filter Hasil Perhitungan dan Pengujian

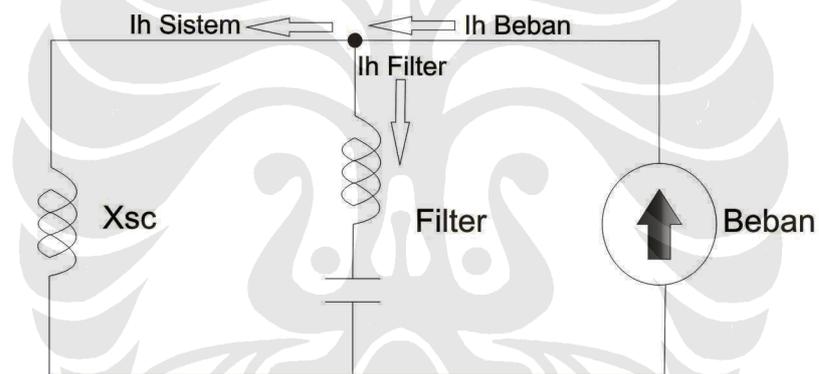
Orde	Impedansi Filter (ohm)	
	Perhitungan	Pengujian
1	233,99	211,36
3	5,74	54,17
5	103,92	200,00
7	181,89	272,50
9	253,11	421,74
11	321,27	600,00
13	387,79	533,33
15	453,31	683,33
17	518,19	700,00
19	582,63	750,00
21	646,76	833,33
27	837,97	900,00
29	901,45	1300,00
31	964,84	1100,00

Dari tabel diatas terlihat bahwa pada sebagian besar orde (kecuali pada frekuensi dasar), impedansi filter hasil pengujian lebih besar dari impedansi filter hasil perhitungan. Ini membuktikan bahwa ada rugi-rugi daya pada filter yang disebabkan resistansi filter meskipun tidak ada komponen resistor secara nyata.

Pada orde harmonik selain orde 3, filter berperan sebagai beban. Sehingga

filter juga memiliki impedansi yang besarnya tergantung pada frekuensi orde harmonik itu sendiri. Idealnya, saat filter sebagai beban, arus harmonik dari beban akan masuk kedalam sistem karena impedansi sistem yang sangat kecil (hanya terdiri dari impedansi kabel saja).

Akan tetapi dari hasil pengujian ternyata hampir semua orde mengalami penurunan arus harmonik. Hal ini terjadi karena meskipun impedansi kabel sangat kecil, tetapi masih memiliki nilai, dengan kata lain impedansi  $Z \neq 0 \Omega$ . Impedansi kabel ini direpresentasikan dengan reaktansi *short circuit* dari busbar. Pada beban rumah tangga dengan kapasitas daya yang relatif kecil, busbar memiliki impedansi yang cukup untuk memungkinkan pembagian arus harmonik (*current divider*) dari beban sebagai sumber harmonik ke filter dan ke sistem. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.31. Model Sistem Filter Sebagai Beban

Besar arus harmonik yang melewati sistem didapat dengan persamaan berikut:

$$I_{h_{sistem}} = \frac{Z_{filter}}{Z_{filter} + X_{sc}} \times I_{h_{beban}} \quad (4.16)$$

Arus harmonik dari beban terbagi ke dalam 2 jalur, ada yang melewati filter dan ada yang masuk ke sistem. Karena reaktansi *short-circuit* busbar lebih kecil dari impedansi filter, maka sebagian besar arus harmonik akan masuk ke dalam sistem dan hanya sedikit yang melewati filter.

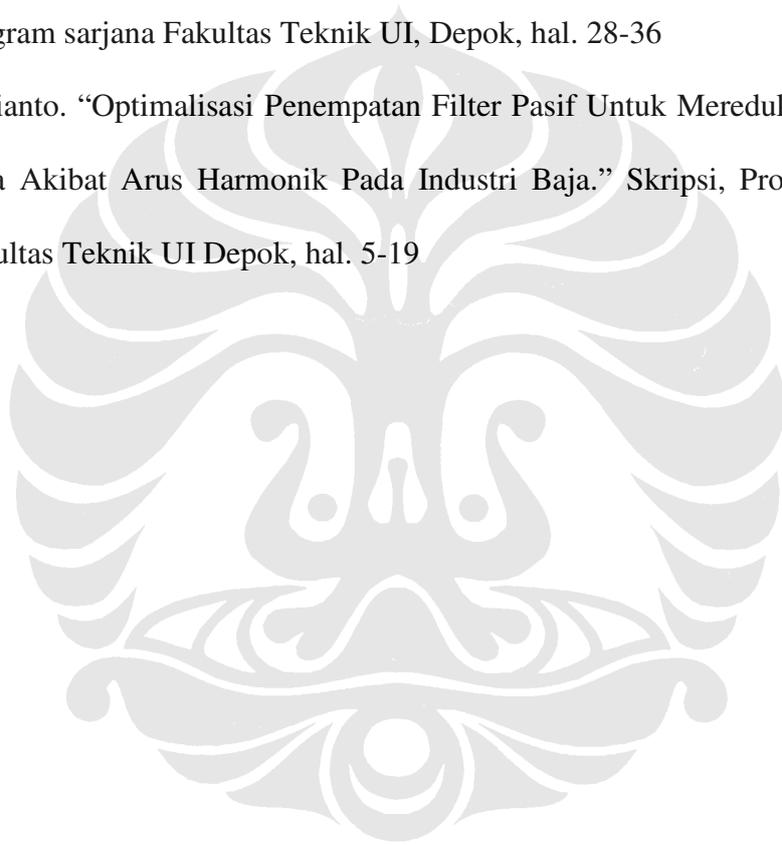
## BAB 5 KESIMPULAN

- *Single Tunned Filter* adalah sebuah filter harmonik yang digunakan untuk mereduksi arus harmonik dalam sistem tenaga listrik pada satu orde saja.
- Meskipun dirancang untuk bekerja pada 1 orde saja, *Single Tunned Filter* ini ternyata mampu mengurangi arus harmonik pada orde lain meskipun tidak sebesar pada orde aslinya.
- Jenis filter ini merupakan filter yang paling banyak digunakan pada industri karena rangkaiannya yang sederhana dan harga yang relatif lebih murah dibandingkan filter jenis lain.
- Perancangan *Single Tunned Filter* diawali dengan identifikasi harmonik pada sisi beban. Kriteria harmonik tegangan paling sesuai untuk menentukan orde harmonik yang akan difilter karena lebih mudah untuk menjaga sistem pada level tegangan yang diinginkan daripada menjaga sistem pada level arus yang sangat mudah berubah karena perubahan impedansi sistem.
- Untuk setiap beban pada rumah tangga, harmonik tegangan terbesar terjadi pada orde 3 dengan besar persentase terhadap tegangan fundamental yang bervariasi antara 1.23 % sampai 2.67 % . Atas dasar ini, akan didesain *Single Tunned Filter* untuk mengurangi arus harmonik pada orde 3.
- Untuk menghindari adanya frekuensi resonansi yang tidak diinginkan pada sistem, *Single Tunned Filter* diset untuk bekerja pada orde 2.9 atau pada frekuensi 145 Hz.
- Penentuan impedansi kapasitif pada filter dilakukan dengan mengatur besarnya VAR yang dibutuhkan sistem untuk memperbaiki faktor daya pada level yang diinginkan.
- Impedansi induktif sebagai reaktor filter disesuaikan dengan impedansi kapasitif sehingga terjadi impedansi minimum pada orde filter yang ditentukan yaitu 2.9.
- Filter hasil perancangan memiliki arus rms total 1.4 A, tegangan puncak 341.5 V, tegangan rms 265.9 V dan VAR total 372.3 VAR.

- THD tegangan setiap beban setelah penggunaan filter berkurang kecuali untuk AC yang mengalami kenaikan THD tegangan. Hal ini karena orde harmonik tegangan terbesar AC berada pada orde 2 bukan orde 3.
- THD arus maksimum pada beban LHE 8 W berkurang dari 70.56% menjadi 13.84%.
- THD arus maksimum pada beban LHE 14 W berkurang dari 83.36% menjadi 22.12%.
- THD arus maksimum pada beban LHE 18 W berkurang dari 72.34% menjadi 28.57%.
- THD arus maksimum pada beban TV berkurang dari 71.7% menjadi 27.66%.
- THD arus maksimum pada beban AC bertambah dari 16.91% menjadi 17.75%.
- THD arus maksimum pada beban Komputer berkurang dari 76.49% menjadi 49.1%.
- THD arus maksimum pada beban Kulkas bertambah dari 9.3% menjadi 17.33%.
- THD arus maksimum pada beban Dispenser bertambah dari 8.5% menjadi 12.83%.
- THD arus maksimum pada beban Total berkurang dari 19.07% menjadi 17.79% dengan penurunan terbesar pada orde 3 yaitu dari 12.92% menjadi 9.45%.
- Daya aktif total maksimum setelah penggunaan filter berkurang dari 1702.5 W menjadi 1390.9 W karena terjadinya penurunan arus rms beban total. Hal ini menyebabkan konsumsi energi pada sistem lebih sedikit.
- Faktor daya maksimum berubah dari 0.9576 menjadi 0.8028 dengan sistem yang semula bersifat induktif berubah menjadi kapasitif. Hal ini terjadi karena filter menyuplai VAR yang terlalu banyak 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 Tunned Notch Filter*.” Skripsi, Program sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, hal. 28-36
- [3] Adrianto. “Optimalisasi Penempatan Filter Pasif Untuk Mereduksi Rugi-Rugi daya Akibat Arus Harmonik Pada Industri Baja.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI Depok, hal. 5-19



## DAFTAR PUSTAKA

- Roger C. Dugan, et al., *Electrical Power Systems Quality* (New York: McGraw Hill, 2002), hal. 233-252
- Weedy, B.M., Corry, B.J., *Electrical Power System* (London: John Wiley & Sons Ltd, 2001), hal. 139
- Rudy Setiabudi, Aji Nur W., "The Design of Passive Filter To Overcome Harmonic Distortion.", *IJSS Proceedings*, 2006, hal. 317
- Kun-Ping Lin, Ming-Hoon Lin, Tung-Pong Lin., "An Advanced Code for Single Tuned Harmonic filter Design", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Agustus 1998, hal. 640
- Achmad, Reza."Pengaruh Harmonik Pada Power Factor." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2003
- Prihadi, Toni."Simulasi dan Analisa Desain filter Pasif Untuk Mengurangi Distorsi Harmoni Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2005
- Hermawanto, Bambang."Fenomena Harmonik Di Sistem Distribusi Tenaga Listrik." *Energi dan Listrik Vol. IV*, Juni 1996, hal. 9-14

## LAMPIRAN

### 1. Arus Harmonik Beban Sebelum Filter (1):

Orde	LHE 18W		LHE 14W		LHE 8W		TV1	
	I max	Fasa	I max	Fasa	I max	Fasa	I max	Fasa
	(A)	( $^{\circ}$ )	(A)	( $^{\circ}$ )	(A)	( $^{\circ}$ )	(A)	( $^{\circ}$ )
1	0.3475	21.09	0.2641	23.03	0.1530	24.09	0.3330	2.41
2	0.0021	-0.91	0.0017	-2.39	0.0010	-8.77	0.0624	-26.97
3	0.2383	-113.84	0.1803	-108.14	0.1053	-104.07	0.2834	160.81
4	0.0019	32.53	0.0016	9.31	0.0009	21.85	0.0571	17.94
5	0.1263	140.40	0.1005	147.13	0.0572	158.39	0.2052	-32.73
6	0.0031	11.87	0.0022	-11.95	0.0012	-11.28	0.0478	-26.53
7	0.1229	51.12	0.0958	58.12	0.0538	70.50	0.1221	133.78
8	0.0037	-34.34	0.0030	-13.20	0.0014	0.58	0.0362	18.69
9	0.1110	-63.42	0.0852	-54.63	0.0461	-40.50	0.0723	-59.79
10	0.0038	20.25	0.0034	17.10	0.0015	-14.28	0.0260	-21.80
11	0.0790	-164.74	0.0604	-159.55	0.0304	-135.85	0.0361	104.80
12	0.0035	6.63	0.0032	-32.61	0.0016	-7.71	0.0210	40.48
13	0.0776	100.51	0.0520	108.20	0.0284	134.90	0.0387	-91.94
14	0.0041	-25.88	0.0032	23.89	0.0020	40.99	0.0191	3.23
15	0.0712	-9.66	0.0452	2.00	0.0215	32.27	0.0343	43.95
16	0.0043	1.05	0.0032	-9.73	0.0022	-15.62	0.0047	31.46
17	0.0561	-109.23	0.0322	-95.09	0.0159	-47.39	0.0156	91.86
18	0.0042	-1.25	0.0031	-5.62	0.0024	-27.68	0.0032	-14.50
19	0.0505	148.46	0.0307	83.77	0.0150	-137.83	0.0137	-124.16
20	0.0040	-15.42	0.0031	13.03	0.0024	29.10	0.0034	-12.25
21	0.0375	38.05	0.0236	64.28	0.0094	104.61	0.0119	28.82
22	0.0046	2.85	0.0036	-14.92	0.0025	-7.01	0.0026	-19.95
23	0.0302	-51.44	0.0180	-9.10	0.0130	91.09	0.0083	150.07
24	0.0054	-6.96	0.0035	11.35	0.0025	-8.38	0.0026	12.99
25	0.0307	-135.24	0.0202	-72.99	0.0144	-6.50	0.0088	-95.46
26	0.0055	-12.64	0.0031	-5.08	0.0023	23.66	0.0029	11.54
27	0.0238	109.10	0.0189	-89.74	0.0150	-93.07	0.0104	39.45
28	0.0050	9.85	0.0031	3.23	0.0022	-10.79	0.0028	-14.87
29	0.0214	31.44	0.0223	115.93	0.0170	143.18	0.0087	-129.63
30	0.0041	-14.16	0.0032	17.15	0.0023	4.29	0.0028	-25.74

Universitas Indonesia

## 2. Arus Harmonik Beban Sebelum Filter (2):

Orde	PC		AC		Kulkas		Dispenser	
	I max	Fasa	I max	Fasa	I max	Fasa	I max	Fasa
	(A)	(°)	(A)	(°)	(A)	(°)	(A)	(°)
1	0.8236	0.16	4.1964	4.77	0.6732	-54.72	1.8541	-32.55
2	0.0770	10.45	0.4890	-11.04	0.0224	-10.69	0.0201	9.25
3	0.6775	157.48	0.3736	78.65	0.0541	76.39	0.0626	86.67
4	0.0612	32.19	0.1594	-21.14	0.0053	2.66	0.0049	24.93
5	0.4618	-10.63	0.3726	141.24	0.0182	78.16	0.0234	98.80
6	0.0545	-39.11	0.0532	11.96	0.0024	-5.32	0.0024	-17.04
7	0.2831	161.22	0.0794	-11.71	0.0144	-55.10	0.0233	-34.02
8	0.0484	-30.85	0.0492	-15.27	0.0018	-14.34	0.0017	-18.17
9	0.1337	-50.23	0.0445	95.76	0.0041	-108.50	0.0098	50.01
10	0.0434	-6.17	0.0303	8.79	0.0012	36.50	0.0010	-3.65
11	0.1083	49.77	0.0173	31.25	0.0034	-154.29	0.0035	56.68
12	0.3870	23.91	0.0135	-11.62	0.0008	7.61	0.0009	14.86
13	0.1168	-156.05	0.0282	-37.05	0.0015	72.32	0.0039	18.19
14	0.0333	37.89	0.0126	32.19	0.0004	-17.14	0.0009	-5.95
15	0.0790	16.57	0.0240	147.33	0.0021	154.90	0.0078	20.98
16	0.0273	-35.51	0.0073	-13.35	0.0003	-2.48	0.0006	-9.06
17	0.0402	-86.18	0.0124	-58.01	0.0012	-62.19	0.0050	-61.34
18	0.0254	-10.82	0.0085	38.03	0.0002	-12.87	0.0007	28.52
19	0.0599	138.61	0.0089	56.78	0.0006	58.80	0.0017	-4.39
20	0.0214	2.66	0.0074	-32.29	0.0002	9.38	0.0007	-16.64
21	0.0614	-26.12	0.0083	-57.43	0.0006	-73.29	0.0033	49.09
22	0.0197	28.93	0.0058	0.05	0.0003	-3.89	0.0008	-1.09
23	0.0427	103.92	0.0058	7.68	0.0007	-32.21	0.0026	-33.31
24	0.0181	-5.78	0.0070	19.92	0.0003	-21.40	0.0008	-14.03
25	0.0270	-6.07	0.0042	65.21	0.0004	78.52	0.0014	-3.12
26	0.0162	-28.80	0.0051	7.59	0.0003	-27.73	0.0006	-7.55
27	0.0316	7.26	0.0063	38.98	0.0006	-118.12	0.0019	-68.17
28	0.0146	11.04	0.0049	-28.23	0.0006	5.82	0.0008	14.17
29	0.0335	118.65	0.0061	34.54	0.0005	-23.19	0.0021	-19.83
30	0.0129	10.33	0.0051	27.02	0.0003	2.18	0.0005	14.92

## 3. Arus Harmonik Beban Total Sebelum Filter:

Orde	I maksimum		
	I max	Fasa	% THD
1	8.0463	-6.36	100.00
2	0.6669	-9.42	8.29
3	1.0397	-19.24	12.92
4	0.2686	-0.72	3.34
5	0.2551	66.63	3.17
6	0.1550	-17.14	1.93
7	0.3799	-74.50	4.72
8	0.1373	-12.58	1.71
9	0.4070	-50.94	5.06
10	0.1077	-3.78	1.34
11	0.1032	-38.98	1.28
12	0.4263	23.00	5.30
13	0.1394	-18.99	1.73
14	0.0715	23.80	0.89
15	0.2283	16.30	2.84
16	0.0467	-20.36	0.58
17	0.1372	-89.53	1.71
18	0.0450	-1.98	0.56
19	0.1273	-40.66	1.58
20	0.0409	-4.27	0.51
21	0.1131	13.87	1.41
22	0.0379	11.58	0.47
23	0.0414	48.62	0.52
24	0.0394	0.75	0.49
25	0.0572	-61.07	0.71
26	0.0343	-12.33	0.43
27	0.0362	1.40	0.45
28	0.0329	1.10	0.41
29	0.0694	-73.89	0.86
30	0.0301	7.00	0.37

## 4. Persen Fundamental Harmonik Arus Sebelum Filter:

Orde	% Fundamental							
	LHE 18W	LHE 14W	LHE 8W	TV	PC	AC	Kulkas	Dispenser
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	0.63	0.70	0.64	21.72	11.42	11.62	3.41	3.14
3	69.98	71.79	69.01	89.38	85.89	54.73	8.03	7.14
4	0.55	0.67	0.62	19.89	8.76	3.17	0.82	0.76
5	37.84	40.53	37.85	73.03	65.41	26.29	2.76	3.65
6	0.93	0.88	0.79	16.64	7.81	1.20	0.35	0.38
7	35.42	37.22	36.82	54.15	40.86	8.19	2.28	2.13
8	1.14	1.21	0.97	12.60	6.93	1.38	0.27	0.26
9	32.36	34.93	31.46	34.68	19.30	7.01	0.65	0.61
10	1.17	1.38	1.06	9.06	6.22	1.01	0.19	0.15
11	23.19	24.78	21.03	17.52	13.90	4.53	0.52	0.27
12	1.05	1.32	1.11	7.30	5.54	0.62	0.12	0.13
13	23.04	21.32	19.56	11.90	15.30	3.80	0.24	0.26
14	1.24	1.29	1.36	6.64	4.76	0.43	0.07	0.12
15	21.08	18.48	14.80	10.85	10.34	4.45	0.34	0.42
16	1.34	1.31	1.49	1.88	3.92	0.18	0.05	0.09
17	16.62	13.18	11.01	5.23	4.88	0.31	0.19	0.30
18	1.28	1.25	1.63	1.30	3.77	0.21	0.04	0.08
19	14.96	12.26	10.34	5.31	7.36	0.22	0.10	0.09
20	1.24	1.25	1.68	1.34	3.14	0.18	0.03	0.05
21	11.23	9.62	6.51	4.88	7.46	0.20	0.10	0.18
22	1.32	1.47	1.73	1.02	2.83	0.14	0.04	0.06
23	9.24	6.83	8.63	3.41	5.90	0.14	0.11	0.14
24	1.56	1.41	1.73	0.98	2.60	0.17	0.05	0.08
25	9.33	7.64	9.61	2.94	3.90	0.10	0.06	0.07
26	1.58	1.26	1.56	1.19	2.39	0.13	0.04	0.07
27	7.26	7.16	9.96	3.70	3.88	0.16	0.09	0.10
28	1.44	1.24	1.54	1.09	2.09	0.12	0.09	0.08
29	6.49	8.46	11.26	3.39	4.06	0.15	0.08	0.12
30	1.24	1.31	1.62	1.10	1.84	0.13	0.05	0.06

## 5. Persen Fundamental Harmonik Tegangan Sebelum Filter:

Orde	% Fundamental							
	LHE 18W	LHE 14W	LHE 8W	TV	PC	AC	Kulkas	Dispenser
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	0.20	0.17	0.18	0.20	0.24	0.67	0.27	0.23
3	2.67	2.25	2.34	1.95	2.38	1.23	1.39	1.60
4	0.06	0.06	0.06	0.08	0.10	0.19	0.06	0.05
5	1.50	1.31	1.40	1.52	1.39	1.19	1.30	1.45
6	0.07	0.05	0.05	0.05	0.07	0.13	0.07	0.05
7	1.01	1.03	1.06	1.05	1.00	0.93	1.12	1.11
8	0.04	0.06	0.04	0.06	0.07	0.10	0.05	0.05
9	0.41	0.61	0.53	0.51	0.67	0.69	0.59	0.57
10	0.06	0.04	0.05	0.05	0.07	0.08	0.05	0.07
11	0.40	0.30	0.33	0.33	0.46	0.26	0.26	0.27
12	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.03
13	0.26	0.21	0.20	0.16	0.29	0.18	0.17	0.20
14	0.03	0.04	0.04	0.04	0.08	0.06	0.06	0.04
15	0.40	0.50	0.42	0.44	0.38	0.49	0.59	0.56
16	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03
17	0.20	0.26	0.27	0.20	0.34	0.18	0.29	0.35
18	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04
19	0.24	0.22	0.18	0.22	0.11	0.13	0.14	0.15
20	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.05
21	0.33	0.31	0.35	0.18	0.25	0.28	0.21	0.27
22	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06
23	0.17	0.18	0.15	0.15	0.22	0.11	0.22	0.19
24	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04
25	0.22	0.16	0.18	0.12	0.14	0.17	0.13	0.10
26	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03
27	0.22	0.25	0.26	0.14	0.19	0.17	0.19	0.14
28	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05
29	0.15	0.14	0.13	0.11	0.13	0.07	0.20	0.16
30	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05

## 6. Daya Beban Sebelum Filter:

Beban	P			Q			S		
	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN
LHE 8W	27.7	29.2	27.3	-12.6	-13.7	-12.2	30.4	32.3	29.9
LHE 14W	47.8	50.6	47.1	-20.6	-22.3	-20.2	52.1	55.3	51.3
LHE 18W	63.5	67.5	61.4	-24.8	-27.4	-23.4	68.1	72.7	65.7
TV2	52.2	61.4	48.8	-1.7	-2.5	-1	52.3	61.5	48.9
PC	148.2	172.4	131.7	1.1	5.6	-3.9	148.3	172.4	131.8
AC	832.5	857.8	813	-67.7	-77.9	-56.6	835.3	860.4	815.8
Kulkas	76.7	90.5	71.8	108.2	110.7	105.8	132.7	140	127.9
Dispenser	195.4	373.1	96.2	90.2	94.7	85.1	222.5	383.2	132.7
Total	1444	1702.5	1297.3	72.1	67.2	73.6	1541.7	1777.8	1404



## 7. Arus Harmonik Beban Setelah Filter (1):

Orde	LHE 18W		LHE 14W		LHE 8W		TV1	
	I max	Fasa	I max	Fasa	I max	Fasa	I max	Fasa
	(A)	(°)	(A)	(°)	(A)	(°)	(A)	(°)
1	1.2030	74.07	1.1402	-102.56	1.0980	-97.97	1.0782	-103.18
2	0.0218	-34.93	0.0167	-4.99	0.0183	-3.58	0.0450	-13.89
3	0.2320	-98.86	0.1759	93.66	0.1081	112.39	0.1725	-23.61
4	0.0024	1.15	0.0028	-4.72	0.0016	-4.65	0.0252	16.01
5	0.1593	131.84	0.1074	-37.57	0.0608	-34.51	0.1930	156.26
6	0.0041	42.91	0.0025	-1.29	0.0017	19.35	0.0199	20.78
7	0.1188	39.66	0.0856	-122.43	0.0485	-115.88	0.1330	-36.59
8	0.0030	-13.92	0.0020	7.86	0.0013	14.73	0.0162	33.57
9	0.1138	-67.35	0.0804	132.14	0.0454	141.78	0.0793	132.05
10	0.0040	28.37	0.0026	38.52	0.0013	22.26	0.0127	21.21
11	0.0892	-90.11	0.0619	25.30	0.0329	39.35	0.0415	-57.98
12	0.0060	-40.88	0.0031	-39.89	0.0016	-37.06	0.0095	47.22
13	0.0709	82.15	0.0495	-67.66	0.0263	-49.96	0.0132	87.07
14	0.0053	14.61	0.0028	38.71	0.0013	17.87	0.0088	-28.87
15	0.0638	-24.87	0.0436	-153.18	0.0212	-152.84	0.0211	90.98
16	0.0029	-10.88	0.0024	-9.62	0.0014	-2.41	0.0067	-17.73
17	0.0487	-134.74	0.0295	91.09	0.0129	121.96	0.0236	-99.99
18	0.0037	34.83	0.0024	-10.85	0.0011	3.01	0.0056	-15.10
19	0.0337	141.21	0.0248	11.50	0.0132	49.65	0.0179	64.67
20	0.0048	-15.71	0.0021	-24.49	0.0013	-9.48	0.0045	-3.35
21	0.0395	48.09	0.0218	-89.58	0.0110	-46.36	0.0115	-140.95
22	0.0047	14.69	0.0022	-5.44	0.0011	-4.71	0.0037	27.22
23	0.0354	-62.12	0.0146	-39.69	0.0101	-107.95	0.0063	-40.21
24	0.0044	8.41	0.0025	20.29	0.0012	15.85	0.0039	7.55
25	0.0287	-144.67	0.0187	121.32	0.0129	121.96	0.0102	65.23
26	0.0036	13.01	0.0025	-15.48	0.0013	22.26	0.0028	2.17
27	0.0278	106.27	0.0199	21.82	0.0119	68.56	0.0109	-144.84
28	0.0031	7.44	0.0027	-11.68	0.0014	2.42	0.0026	-49.94
29	0.0234	-0.09	0.0176	-64.65	0.0147	-16.18	0.0081	10.84
30	0.0033	7.09	0.0029	21.71	0.0013	1.48	0.0020	9.46

## 8. Arus Harmonik Beban Setelah Filter (2):

Orde	PC		AC		Kulkas		Dispenser	
	I max	Fasa	I max	Fasa	I max	Fasa	I max	Fasa
	(A)	( <sup>o</sup> )	(A)	( <sup>o</sup> )	(A)	( <sup>o</sup> )	(A)	( <sup>o</sup> )
1	1.2918	-121.27	4.3577	-161.87	0.6121	-123.53	0.7359	47.41
2	0.1116	-10.34	0.5309	5.25	0.0243	5.79	0.0229	10.81
3	0.5410	-3.15	0.4296	-108.13	0.0987	-147.73	0.0826	48.34
4	0.0921	48.67	0.1843	-13.03	0.0047	9.40	0.0059	12.30
5	0.4101	120.71	0.4167	-41.12	0.0302	-113.03	0.0366	92.17
6	0.0749	-22.44	0.0634	-8.94	0.0017	-22.68	0.0024	-6.45
7	0.2456	-11.45	0.0641	35.14	0.0147	124.72	0.0207	-51.89
8	0.0578	-28.83	0.0475	5.94	0.0015	22.48	0.0018	11.81
9	0.1277	123.86	0.0486	-30.87	0.0076	-18.46	0.0069	152.36
10	0.0421	-22.93	0.0279	17.59	0.0009	-6.17	0.0010	-8.47
11	0.0836	-79.56	0.0167	-26.88	0.0026	29.40	0.0031	124.74
12	0.0356	22.96	0.0091	-4.59	0.0006	-4.59	0.0008	-5.41
13	0.0948	15.45	0.0266	126.25	0.0012	16.23	0.0025	-6.85
14	0.0338	33.54	0.0095	10.80	0.0005	26.55	0.0006	-15.93
15	0.0582	-40.76	0.0210	-38.43	0.0022	-2.08	0.0031	-134.48
16	0.0304	25.47	0.0067	1.58	0.0003	-19.86	0.0006	13.78
17	0.0310	42.61	0.0152	139.18	0.0017	141.48	0.0021	-71.10
18	0.0261	-26.19	0.0059	19.88	0.0002	-21.85	0.0005	24.24
19	0.0467	-20.53	0.0057	28.29	0.0007	20.67	0.0009	51.60
20	0.0196	8.44	0.0044	-18.31	0.0003	4.61	0.0004	-21.20
21	0.0471	114.44	0.0080	18.01	0.0009	40.32	0.0015	-111.53
22	0.0171	-9.78	0.0037	7.16	0.0004	28.24	0.0004	-1.31
23	0.0286	-24.99	0.0048	86.02	0.0006	79.18	0.0009	-31.62
24	0.0139	-14.67	0.0030	-3.89	0.0003	-16.63	0.0005	-29.83
25	0.0202	108.54	0.0048	94.39	0.0005	55.16	0.0006	55.31
26	0.0127	-7.67	0.0039	-3.23	0.0002	25.67	0.0005	4.75
27	0.0247	-57.20	0.0056	3.91	0.0006	86.54	0.0010	-128.72
28	0.0112	2.80	0.0033	33.63	0.0004	2.05	0.0005	-18.94
29	0.0211	-8.83	0.0045	81.70	0.0006	0.51	0.0005	-13.81
30	0.0109	20.88	0.0024	-13.41	0.0004	7.31	0.0004	6.26

## 9. Arus Harmonik Filter:

Orde	Filter	
	I max	Fasa
	(A)	(°)
1	1.0213	-90.93
2	0.0184	-6.44
3	0.0571	-168.10
4	0.0013	11.27
5	0.0130	-120.90
6	0.0005	38.68
7	0.0049	135.86
8	0.0006	7.16
9	0.0027	-30.34
10	0.0003	10.38
11	0.0013	74.15
12	0.0002	-12.51
13	0.0006	63.18
14	0.0002	-2.41
15	0.0010	-7.33
16	0.0002	-55.53
17	0.0007	128.57
18	0.0002	16.91
19	0.0004	43.45
20	0.0002	10.28
21	0.0005	41.08
22	0.0001	-2.36
23	0.0002	69.11
24	0.0002	-14.14
25	0.0002	23.87
26	0.0001	9.98
27	0.0004	74.66
28	0.0002	-43.49
29	0.0002	63.73
30	0.0002	-2.01

## 10. Arus Harmonik Beban Total Setelah Filter:

Orde	I maksimum		
	I max	Fasa	% THD
1	7.1990	55.12	100.00
2	0.7484	0.49	10.40
3	0.6800	-7.61	9.45
4	0.2801	7.74	3.89
5	0.2044	6.17	2.84
6	0.1638	-10.11	2.28
7	0.4871	-21.83	6.77
8	0.1201	-7.22	1.67
9	0.2520	-76.58	3.50
10	0.0792	-2.77	1.10
11	0.2273	-13.67	3.16
12	0.0565	23.82	0.78
13	0.1860	0.98	2.58
14	0.0580	18.52	0.81
15	0.0849	-39.25	1.18
16	0.0479	16.47	0.67
17	0.0436	26.28	0.61
18	0.0407	-21.45	0.57
19	0.1256	8.76	1.75
20	0.0289	7.15	0.40
21	0.0380	65.06	0.53
22	0.0315	3.87	0.44
23	0.0839	-27.47	1.17
24	0.0270	-13.74	0.37
25	0.0750	84.78	1.04
26	0.0242	-13.04	0.34
27	0.0596	-26.48	0.83
28	0.0211	7.67	0.29
29	0.0757	-8.72	1.05
30	0.0225	8.85	0.31

## 11. Persen Fundamental Harmonik Arus Setelah Filter:

Orde	% Fundamental							
	LHE 18W	LHE 14W	LHE 8W	TV	PC	AC	Kulkas	Dispenser
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	1.81	1.46	1.67	4.17	8.64	12.18	3.97	3.11
3	19.29	15.43	9.85	16.00	41.88	9.86	16.12	11.22
4	0.20	0.25	0.15	2.34	7.13	4.23	0.77	0.80
5	13.24	9.42	5.54	17.90	31.75	9.56	4.93	4.97
6	0.34	0.22	0.15	1.85	5.80	1.45	0.28	0.33
7	9.88	7.51	4.42	12.34	19.01	1.47	2.40	2.81
8	0.25	0.18	0.12	1.50	4.47	1.09	0.25	0.24
9	9.46	7.05	4.13	7.35	9.89	1.12	1.24	0.94
10	0.33	0.23	0.12	1.18	3.26	0.64	0.15	0.14
11	7.41	5.43	3.00	3.85	6.47	0.38	0.42	0.42
12	0.50	0.27	0.15	0.88	2.76	0.21	0.10	0.11
13	5.89	4.34	2.40	1.22	7.34	0.61	0.20	0.34
14	0.44	0.25	0.12	0.82	2.62	0.22	0.08	0.08
15	5.30	3.82	1.93	1.96	4.51	0.48	0.36	0.42
16	0.24	0.21	0.13	0.62	2.35	0.15	0.05	0.08
17	4.05	2.59	1.17	2.19	2.40	0.35	0.28	0.29
18	0.31	0.21	0.10	0.52	2.02	0.14	0.03	0.07
19	2.80	2.18	1.20	1.66	3.62	0.13	0.11	0.12
20	0.40	0.18	0.12	0.42	1.52	0.10	0.05	0.05
21	3.28	1.91	1.00	1.07	3.65	0.18	0.15	0.20
22	0.39	0.19	0.10	0.34	1.32	0.08	0.07	0.05
23	2.94	1.28	0.92	0.58	2.21	0.11	0.10	0.12
24	0.37	0.22	0.11	0.36	1.08	0.07	0.05	0.07
25	2.39	1.64	1.17	0.95	1.56	0.11	0.08	0.08
26	0.30	0.22	0.12	0.26	0.98	0.09	0.03	0.07
27	2.31	1.75	1.08	1.01	1.91	0.13	0.10	0.14
28	0.26	0.24	0.13	0.24	0.87	0.08	0.07	0.07
29	1.95	1.54	1.34	0.75	1.63	0.10	0.10	0.07
30	0.27	0.25	0.12	0.19	0.84	0.06	0.07	0.05

## 12. Persen Fundamental Harmonik Tegangan Setelah Filter:

Orde	% Fundamental							
	LHE 18W	LHE 14W	LHE 8W	TV	PC	AC	Kulkas	Dispenser
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	0.29	0.21	0.25	0.25	0.30	0.39	0.27	0.28
3	1.53	1.83	1.88	2.01	2.13	2.10	1.62	1.40
4	0.11	0.10	0.09	0.07	0.08	0.12	0.08	0.06
5	1.18	1.32	1.30	1.33	1.50	1.33	1.30	1.72
6	0.06	0.05	0.05	0.07	0.06	0.07	0.05	0.08
7	0.79	0.88	0.87	0.93	0.96	0.80	0.66	1.02
8	0.07	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.06	0.06
9	0.51	0.52	0.50	0.64	0.55	0.50	0.59	0.52
10	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.04
11	0.29	0.22	0.24	0.33	0.24	0.23	0.22	0.25
12	0.05	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04
13	0.22	0.23	0.20	0.22	0.29	0.17	0.13	0.27
14	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04
15	0.40	0.43	0.36	0.42	0.42	0.34	0.34	0.54
16	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03
17	0.27	0.21	0.20	0.27	0.19	0.25	0.27	0.26
18	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04
19	0.11	0.14	0.09	0.13	0.14	0.10	0.10	0.20
20	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03
21	0.24	0.27	0.23	0.30	0.25	0.26	0.21	0.31
22	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.04
23	0.11	0.11	0.15	0.17	0.17	0.17	0.12	0.18
24	0.06	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05
25	0.11	0.15	0.09	0.11	0.11	0.10	0.09	0.15
26	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05
27	0.17	0.20	0.17	0.19	0.17	0.13	0.14	0.19
28	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04
29	0.07	0.12	0.10	0.15	0.10	0.09	0.09	0.12
30	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05

## 13. Daya Beban Setelah Filter:

Beban	P			Q			S		
	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN
LHE 8W	27.5	28.8	26.9	-12.9	-13.8	-12.5	30.4	31.9	29.7
LHE14W	47.6	49.6	47.1	-21.4	-22.9	-21	52.2	54.7	51.7
LHE18W	64.5	66.8	63.8	-27.1	-28.5	-26.6	70	72.6	69.2
TV2	47.9	56	42.3	-1.6	-2.7	-1	48	56	42.4
PC	125.1	155.9	66.4	1.7	5.8	-4.6	125.1	156	66.4
AC	847.3	860.3	830.2	-71.9	-85.3	-62.2	850.4	864.1	833.1
Kulkas	67.1	69.3	66.1	113.1	115.9	110.8	131.5	134.3	129.4
Dispenser	97.2	100	94	92.9	96	90.1	134.5	138.6	130.6
Filter	3.3	4.2	0	-204.7	-224.4	0	204.7	224.4	0
Total	1327.5	1390.9	1236.8	-131.9	-145.1	-151.9	1646.8	1732.6	1352.5



## 14. Spesifikasi Hioki Power Analyzer 3169-20

Tipe line pengukuran	single-phase 2-wire (1P2W), single-phase 3-wire (1P3W), three-phase 3-wire (3P3W), dan three-phase 4-wire (3P4W) pada frekuensi 50/60 Hz
Jumlah sistem yang dapat diukur	1P2W : 4 sistem 1P3W : 2 sistem 3P3W2M (mengukur tegangan dan arus untuk 2 line) : 2 sistem 3P3W3M (mengukur tegangan dan arus untuk 3 line) : 1 sistem 3P4W (mengukur tegangan dan arus untuk 3 line) : 1 sistem 3P4W4I (mengukur tegangan 3 line dan arus 4 line) : 1 sistem
Item pengukuran	tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya kompleks, faktor daya, frekuensi, harmonik, nilai terintegrasi
Range pengukuran	tegangan : 150 V sampai 600 V, 3 range arus (9660) : 5 A sampai 100 A, 4 range arus (9661) : 5 A sampai 500 A, 5 range arus (9669) : 100 A sampai 1 kA, 3 range arus (9667) : 500 A sampai 5 kA, 2 range arus (9694) : 0.5 A sampai 5 A, 3 range daya : 75 W sampai 9 MW, 108 pola kombinasi
Akurasi dasar	$\pm 0.2\%$ rdg. $\pm 0.1\%$ f.s. + akurasi clamp-on sensor (daya aktif, pada 45-66 Hz)
Akurasi clamp sensor	9660 (untuk rating 100 A) : $\pm 0.3\%$ rdg. $\pm 0.02\%$ f.s. 9661 (untuk rating 500 A) : $\pm 0.3\%$ rdg. $\pm 0.01\%$ f.s. 9669 (untuk rating 1000 A) : $\pm 1.0\%$ rdg. $\pm 0.01\%$ f.s.

	<p>9667 (untuk rating 5000 A) : <math>\pm 2.0\%</math> rdg. <math>\pm 1.5</math> mV</p> <p>9694 (untuk rating 5 A) : <math>\pm 0.3\%</math> rdg. <math>\pm 0.02\%</math> f.s.</p> <p>* f.s. adalah nilai rating arus primer</p>
Karakteristik frekuensi	Gelombang fundamental (45-66 Hz) sampai orde 50 $\pm 3\%$ f.s. + akurasi pengukuran
Fungsi lain	<p>* PC card (1 slot, PC Card Standard-compliant Type II, Flash ATA card type), (9727/ 9728 PC card, 256MB sampai 512MB),</p> <p>* RS-232C (koneksi Printer/PC ke interface RS-232C),</p> <p>* D/A output (hanya 3169-21, 4 channel),</p> <p>* Eksternal I/O</p>
Rate update display	setiap 0.5 detik (kecuali saat menggunakan PC card selagi mengakses memori internal, atau saat melakukan komunikasi RS-232C)
Rating tegangan power supply	100 sampai 240 V AC, 50/60 Hz
Dimensi dan berat	210W $\times$ 160H $\times$ 60D mm $\pm 5$ mm, 1.2 kg $\pm 100$ g (3169-20, 3169-21)
Aksesoris	set cord tegangan 9438-03 (1) (1 cord masing-masing hitam, merah, kuning, dan biru), cord tegangan (1), cord daya (1), label cord input (1), manual operasi (2) (Advanced edition dan Quick Start Guide), CD-R (1) (Advanced edition dan RS-232C interface operating manuals), kabel koneksi 9441 (1) (untuk 3169-21)