



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN SINGLE TUNED FILTER UNTUK
MEREDUKSI HARMONIK ARUS DENGAN SIMULASI
PROGRAM ETAP POWER STATION 5.0.3**

SKRIPSI

ENDI SOPYANDI

04 04 03 03 77

**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN SINGLE TUNED FILTER UNTUK
MEREDUKSI HARMONIK ARUS DENGAN SIMULASI
PROGRAM ETAP POWER STATION 5.0.3**

SKRIPSI

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

ENDI SOPYANDI

04 04 03 03 77

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2009**

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Endi Sopyandi

NPM : 0404030377

Tanda Tangan : 

Tanggal : 16 Juni 2009

PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Endi Sopyandi
NPM : 0404030377
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Perancangan *Single Tuned Filter* Untuk Mereduksi Harmonik Arus dengan Simulasi Program ETAP POWERSTATION 5.03

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Amien Rahardjo, MT

Penguji : Ir. Agus R. Utomo, MT

Penguji : Ir. I Made Adirta Y, MT



Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 30 Juni 2009

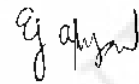
KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan berkat dan rahman-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan 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 menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ir. Amien Rahardjo MT, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan dukungan material maupun moral; dan
- (3) 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, Juni 2009



Endi Sopyandi

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

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

Nama : Endi Sopyandi

NPM : 0404030377

Program Studi : Elektro

Departemen : 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:

**“PERANCANGAN SINGLE TUNED FILTER UNTUK MEREDUKSI
HARMONIK ARUS DENGAN SIMULASI PROGRAM ETAP POWER
STATION 5.0.3”**

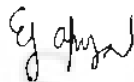
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: Juni 2009

Yang menyatakan



Endi Sopyandi

ABSTRAK

Nama : Endi Sopyandi
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Perancangan Single Tuned Filter untuk Mereduksi Harmonik Arus dengan Simulasi Program ETAP Power Station 5.0.3

Pemakaian peralatan elektronik pada pelanggan rumah tangga semakin bervariasi. Terdapat beban nonlinear yang dapat mengakibatkan turunnya kualitas daya. Beban non linear dapat menyebabkan gelombang keluaran arus dan tegangan memiliki karakteristik yang berbeda dengan gelombang arus dan tegangan masukannya pada setiap siklusnya. Hal ini yang disebut distorsi harmonik. Distorsi harmonik memiliki efek negatif terhadap kinerja peralatan listrik. Salah satunya contohnya adalah kesalahan ukur dari alat KWH meter.

Dengan melakukan pengukuran pada beban rumah tangga penghasil harmonik, maka dapat diketahui karakteristik arus dan THD (Total Harmonic Distortion) pada setiap beban yang berbeda-beda. Lampu Hemat Energi (LHE) merupakan salah satu beban non linear yang sering digunakan pada pelanggan rumah tangga, dan beban ini penyebab munculnya harmonik pada beban rumah tangga.

Berdasarkan data-data hasil pengukuran, dilakukan analisis untuk kemudian dirancang filter yang tepat untuk mereduksi harmonik arus. Selanjutnya, hasil dari perancangan filter disimulasi pada program ETAP Power Station 5.0.3.

Kata Kunci: Distorsi harmonik, THD, Filter, beban rumah tangga

ABSTRACT

Name : Endi Sopyandi
Study Program : Electrical Engineering
Title : Single Tuned Filter Design to Reduce Harmonic Current Using ETAP Power Station 5.0.3 Simulation Program

The usage of electronic devices by household customer becomes more varied. There are nonlinear loads that can reduce power quality. Nonlinear loads can cause the current and voltage output wave to have different characteristics with the respective current and voltage input wave on its each cycle. This is called harmonic distortion. Harmonic distortion has some negatif effect to electric devices. The one of examples is measurement error from KWH meters.

By measuring household loads that produce harmonic, current and THD (Total Harmonic Distortion) characteristics can be recognized on every different load. Lampu Hemat Energi (LHE) is one of nonlinear loads which often used by household customers, and this load is the source of harmonic on household loads.

Based on the result data of measurement, analysis is made for further accurate filter design in order to reduce harmonic current. Furthermore, result of Filter design is simulated by using ETAP Power Station 5.0.3 simulation software.

Key words: Harmonic distortion, THD, filter, household load

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 TUJUAN PENULISAN	1
1.3 PEMBatasan MASALAH.....	2
1.4 METODOLOGI PENULISAN.....	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	2
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	3
2.1 HARMONIK	3
2.1.1 Istilah-istilah pada Harmonik.....	5
2.1.1.1 Orde Harmonik.....	5
2.1.1.2 Spektrum	6
2.1.1.3 Distorsi Harmonik Individu (Individual Harmonic Distortion).....	6
2.1.1.4 Distorsi Harmonik Total (Total Harmonic Distortion).....	6
2.1.1.5 Persamaan Fourier	7
2.1.1.6 Nilai RMS	9
2.1.2 Komponen Harmonik	9
2.1.2.1 Daya dan Faktor Daya	9
2.1.2.2 Urutan Fasa Harmonik.....	10
2.1.2.3 Tripen Harmonik	10
2.1.3 Standar Batasan Harmonik	11
2.1.4 Penyebab Timbulnya Harmonik.....	12
2.1.5 Akibat yang Ditimbulkan Harmonik.....	13
2.1.6 Dasar-dasar Pengontrolan Harmonik	15
2.2 PERANCANGAN FILTER HARMONIK	15
2.2.1 Kriteria Desain Filter.....	16
2.2.2 Single Tuned Filter.....	17
2.2.3 Rating Komponen Filter	20
2.2.3.1 Rating pada Kapasitor.....	20
2.2.3.2 Rating pada Induktor	21

BAB 3 OBJEK PENGAMBILAN DATA	22
3.1 SKENARIO BEBAN RUMAH TANGGA.....	22
3.2 METODE PENGAMBILAN DATA	22
3.3 DATA YANG DIGUNAKAN PADA SIMULASI.....	24
BAB 4 PERANCANGAN SINGLE TUNED HARMONIK.....	26
4.1 SIMULASI ETAP POWER STATION 5.0.3	26
4.2 PERANCANGAN SINGLE TUNED FILTER	28
4.3 PERHITUNGAN RATING KERJA FILTER.....	32
4.3.1 Perhitungan Kerja Fundamental Filter [1].....	32
4.3.2 Perhitungan Kerja Harmonik Filter [1]	33
4.3.3 Perhitungan Kerja Total Filter [1].....	34
4.4 ANALISIS HARMONIK ARUS HASIL DARI SIMULASI.....	35
4.4.1 Pemasangan Single Tuned Filter untuk Beban Total	36
4.4.2 Pemasangan Single Tuned Filter pada Setiap Beban	39
4.4.2.1 Beban TL 8.....	40
4.4.2.2 Beban TL 14.....	42
4.4.2.3 Beban TL 18.....	45
4.4.2.4 Beban AC	47
4.4.2.5 Beban PC.....	49
4.4.2.6 Beban TV	52
4.4.2.7 Beban Kulkas	54
BAB 5 KESIMPULAN	57
DAFTAR ACUAN	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	60

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Bentuk gelombang sinusoidal murni	3
Gambar 2.2 Bentuk gelombang tegangan dasar dan harmonik ke-3[2]	4
Gambar 2.3 Bentuk gelombang tegangan yang terdistorsi harmonik[2]	5
Gambar 2.4 Bentuk spektrum harmonik	6
Gambar 2.5 Vektor hubungan komponen daya pada kondisi non sinusoidal[1] ..	10
Gambar 2.6 Arus netral tinggi akibat tripenn harmonik[1]	11
Gambar 2.7 Karakteristik gelombang arus pada beban linier[3].....	12
Gambar 2.8 Karakteristik gelombang arus pada beban non linier[3].....	13
Gambar 2.9 a. Rangkaian <i>Single Tuned Filter</i>	18
b. Kurva impedansi terhadap frekuensi.....	18
Gambar 3.1 Hioki power analyzer 3169-20.....	23
Gambar 3.2 Penempatan alat ukur.....	23
Gambar 4.1 Diagram alir simulasi.....	26
Gambar 4.2 Rangkaian pembebanan rumah tangga pada simulasi ETAP.....	27
Gambar 4.3 parameter spesifikasi filter pada simulasi ETAP.....	32
Gambar 4.4 Lokasi pemasangan <i>single tuned filter</i> untuk beban total.....	36
Gambar 4.5 (a) Bentuk gelombang arus beban total sebelum filter terpasang	37
(b) Bentuk gelombang arus beban total sesudah filter terpasang.....	37
Gambar 4.6 (a) Bentuk spektrum arus beban total sebelum filter terpasang	38
(b) Bentuk spektrum arus beban total sesudah filter terpasang.....	38
Gambar 4.7 Lokasi pemasangan <i>single tuned filter</i> untuk setiap beban.....	39
Gambar 4.8 (a) Bentuk gelombang arus beban TL 8 sebelum filter terpasang.....	40
(b) Bentuk gelombang arus beban TL 8 sesudah filter terpasang.....	41
Gambar 4.9 (a) Bentuk spektrum arus beban TL 8 sebelum filter terpasang.....	41
(b) Bentuk spektrum arus beban TL 8 sesudah filter terpasang.....	42
Gambar 4.10 (a) Bentuk gelombang arus beban TL 14 sebelum filter terpasang ..	43
(b) Bentuk gelombang arus beban TL 14 sesudah filter terpasang....	43
Gambar 4.11 (a) Bentuk spektrum arus beban TL 14 sebelum filter terpasang.....	44
(b) Bentuk spektrum arus beban TL 14 sesudah filter terpasang.....	44
Gambar 4.12 (a) Bentuk gelombang arus beban TL 18 sebelum filter terpasang. 45	
(b) Bentuk gelombang arus beban TL 18 sesudah filter terpasang.. 45	
Gambar 4.13 (a) Bentuk spektrum arus beban TL 18 sebelum filter terpasang	46
(b) Bentuk spektrum arus beban TL 18 sesudah filter terpasang....	46
Gambar 4.14 (a) Bentuk gelombang arus beban AC sebelum filter terpasang	47
(b) Bentuk gelombang arus beban AC sesudah filter terpasang	48
Gambar 4.15 (a) Bentuk spektrum arus beban AC sebelum filter terpasang	48
(b) Bentuk spektrum arus beban AC sesudah filter terpasang	49
Gambar 4.16 (a) Bentuk gelombang arus beban PC sebelum filter terpasang.....	50
(b) Bentuk gelombang arus beban PC sesudah filter terpasang.....	50
Gambar 4.17 (a) Bentuk spektrum arus beban PC sebelum filter terpasang.....	51
(b) Bentuk spektrum arus PC total sesudah filter terpasang.....	51
Gambar 4.18 (a) Bentuk gelombang arus beban TV sebelum filter terpasang	52
(b) Bentuk gelombang arus beban TV sesudah filter terpasang.....	52

Gambar 4.19 (a) Bentuk spektrum arus beban TV sebelum filter terpasang 53
(b) Bentuk spektrum arus beban TV sesudah filter terpasang.....53
Gambar 4.20 (a) Bentuk gelombang arus beban kulkas sebelum filter terpasang 54
(b) Bentuk gelombang arus beban kulkas sesudah filter terpasang..54
Gambar 4.21 (a) Bentuk spektrum arus beban kulkas sebelum filter terpasang 55
(b) Bentuk spektrum arus beban kulkas sesudah filter terpasang....55



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Batasan – batasan Distorsi Tegangan Harmonik (THD).....	7
Tabel 2.2 Urutan Orde	10
Tabel 2.3 Standar IEC 61000-3-4.....	11
Tabel 2.4 Standar IEC 61000-3-6.....	12
Tabel 2.5 Rating pada Kapasitor	20
Tabel 3.1 Karakteristik Beban.....	24
Tabel 3.2 THDi pada saat Daya (S) maksimum.....	25
Tabel 4.1 THDi dari hasil pengukuran	27
Tabel 4.2 THDi untuk beban total	29
Tabel 4.3 Daya setiap beban pada simulasi	29
Tabel 4.4 Tegangan dan arus pada saat daya maksimum	29
Tabel 4.5 Spesifikasi filter:	31
Tabel 4.6 Karakteristik <i>utility system</i>	34
Tabel 4.7 Perbandingan Batasan Kerja Filter.....	35
Tabel 4.8 THDi beban total.....	36
Tabel 4.9 THDi pada setiap beban	40
Tabel 4.10 Arus pada bus sebelum dan sesudah pemasangan filter.....	56

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Level harmonik arus hasil pengukuran alat.....	60
a. Beban TL 8.....	60
b. Beban TL 14.....	60
c. Beban TL 18.....	61
d. Beban AC.....	61
e. Beban PC.....	62
f. Beban TV.....	62
g. Beban Kulkas.....	63
h. Beban Dispenser.....	63
Lampiran 2: Level harmonik arus hasil perhitungan manual pada beban total sebelum filter terpasang.....	64

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Kemajuan teknologi akhir-akhir ini telah memberikan banyak pengaruh terhadap beberapa bidang, salah satunya dalam bidang ketenagalistrikan. Pada suatu sistem tenaga listrik, bentuk gelombang tegangan dan arus yang umum digunakan adalah sinusoidal. Alat-alat listrik umumnya dirancang bekerja pada tegangan dan arus dalam bentuk gelombang sinusoidal.

Seiring dengan bertambahnya beban-beban yang menghasilkan harmonik pada sistem tenaga listrik, bentuk gelombang arus dan tegangan yang sinusoidal ini semakin sulit untuk diwujudkan. Beban-beban penghasil harmonik ini menghasilkan arus dan tegangan dengan bentuk gelombang yang terdistorsi. Distorsi gelombang frekuensi ini dikenal dengan istilah distorsi harmonik.

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

1.2 TUJUAN PENULISAN

Tujuan penulisan dari skripsi ini adalah secara umum membahas tentang pengertian, penyebab, dan akibat yang ditimbulkan oleh harmonik. Dan secara khusus membahas tentang perancangan *single tuned filter* dalam upaya untuk mereduksi harmonik arus.

1.3 PEMBATASAN MASALAH

Skripsi ini memiliki batasan masalah mengenai perancangan suatu filter pasif yaitu *single tuned-filter* yang digunakan untuk mereduksi harmonik arus pada suatu beban rumah tangga. Hasil dari perancangan filter tersebut disimulasikan pada program ETAP Power Station 5.0.3, untuk selanjutnya dilakukan analisis harmonik arus setiap beban sebelum dan sesudah penggunaan filter.

1.4 METODOLOGI PENULISAN

Metodologi yang digunakan dalam penulisan skripsi ini bersifat studi kasus pada beban rumah tangga dan perancangan filter pasif harmonik. Data diambil dengan menggunakan peralatan pengukuran harmonik dan energi, kemudian menganalisisnya untuk mendapatkan perancangan filter pasif yang sesuai. Hasil rancangan dari filter disimulasikan pada program ETAP Power Station 5.0.3.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

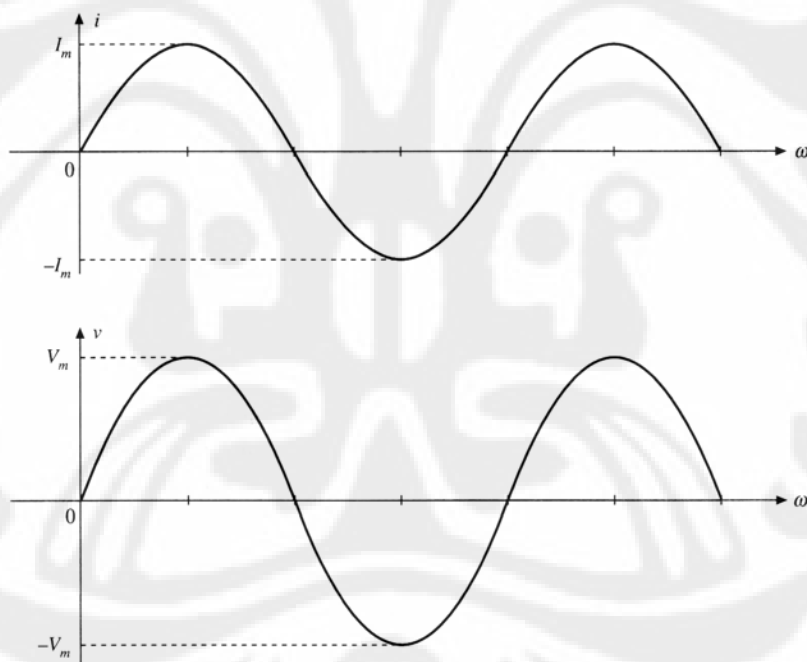
Penulisan skripsi ini terbagi dalam lima bab, bab satu membahas mengenai latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan skripsi ini, bab dua membahas mengenai pengertian, penyebab dan sumber harmonik pada sistem tenaga listrik serta perancangan filter pasif harmonik, bab tiga membahas mengenai objek dan skenario pengambilan data, bab empat berisi mengenai rancangan, simulasi filter, dan hasil yang diperoleh dari simulasi, dan bab lima berisi kesimpulan dari skripsi ini.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 HARMONIK

Pada suatu sistem tenaga listrik, idealnya listrik ditransmisikan dan didistribusikan dengan menggunakan tegangan tiga fasa sinusoidal murni (Gambar 2.1). Namun, seiring bertambahnya pemakaian beban-beban maka bentuk gelombang arus dan tegangan yang sinusoidal murni ini sulit untuk diwujudkan.



Gambar 2.1 Bentuk gelombang sinusoidal murni

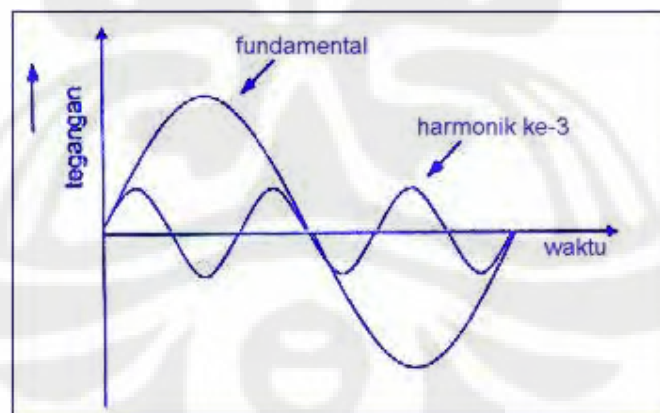
Pembangkit tenaga listrik menyalurkan sejumlah gelombang sinus dimana gelombang yang satu dengan yang lainnya mempunyai frekuensi yang berbeda, yang di dalamnya termasuk frekuensi dasar. Bila gelombang tersebut terdistorsi, maka akan terjadi suatu fenomena yang disebut dengan distorsi harmonik, dimana gelombang yang ditransmisikan atau didistribusikan terdiri atas superposisi

gelombang frekuensi dasar dengan gelombang frekuensi harmonik sehingga gelombang tersebut tidak lagi berbentuk sinusoidal.

Harmonik merupakan suatu fenomena yang timbul akibat terdistorsinya gelombang sinusoidal secara periodik, yang disebabkan oleh pengoperasian beban listrik yang bersifat nonlinier.

Pada dasarnya, gelombang yang mengandung harmonik, dapat dianggap sebagai penjumlahan beberapa gelombang sinusoidal dengan frekuensi-frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasarnya. Frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar ini disebut dengan frekuensi harmonik. Bilangan bulat pengali frekuensi dasar tersebut disebut dengan angka urutan harmonik.

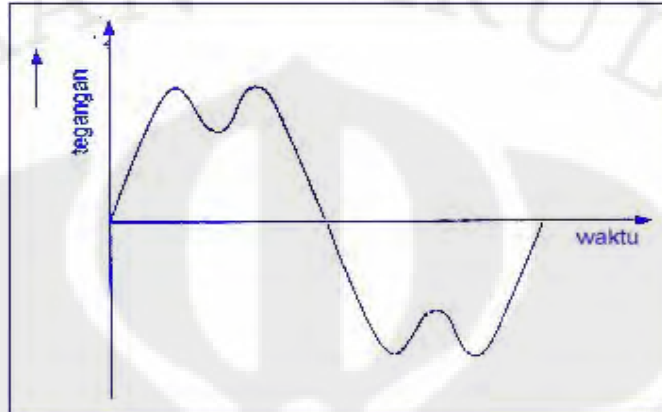
Sebagai contoh jika frekuensi dasar suatu sistem tenaga adalah 50 Hz, maka urutan harmonik keduanya adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 100 Hz (2×50 Hz), harmonik ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz (3×50 Hz), dan seterusnya. Gelombang harmonik ini akan berkombinasi dengan gelombang murni atau aslinya, sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan penjumlahan antara gelombang murni (dasar) dengan gelombang harmoniknya. Sebagai contoh pada Gambar 2.2. adalah gelombang dasar dan gelombang harmonik ke 3.



Gambar 2.2 Bentuk gelombang tegangan dasar dan harmonik ke-3[2]

Bila kedua gelombang tersebut dijumlahkan, maka bentuk gelombang yang dihasilkan adalah seperti Gambar 2.3, bentuk distorsi gelombang akan lebih kompleks lagi bila semua gelombang harmonik yang terjadi dijumlahkan dengan

gelombang frekuensi dasar. Besar amplitudo harmonik biasanya hanya beberapa persen dari amplitudo gelombang dasar.



Gambar 2.3 Bentuk gelombang tegangan yang terdistorsi harmonik[2]

2.1.1 Istilah-istilah pada Harmonik

Sebelum membahas lebih lanjut, maka terlebih dahulu perlu diketahui mengenai beberapa istilah penting dalam harmonik. Berikut ini adalah beberapa istilah-istilah dan persamaan yang terdapat dalam analisis harmonik.

2.1.1.1 Orde Harmonik

Orde dari harmonik merupakan perbandingan frekuensi harmonik dengan frekuensi dasar, dimana :

$$n = \frac{f_n}{F} \quad (2.1)$$

dengan :

n = Orde harmonik

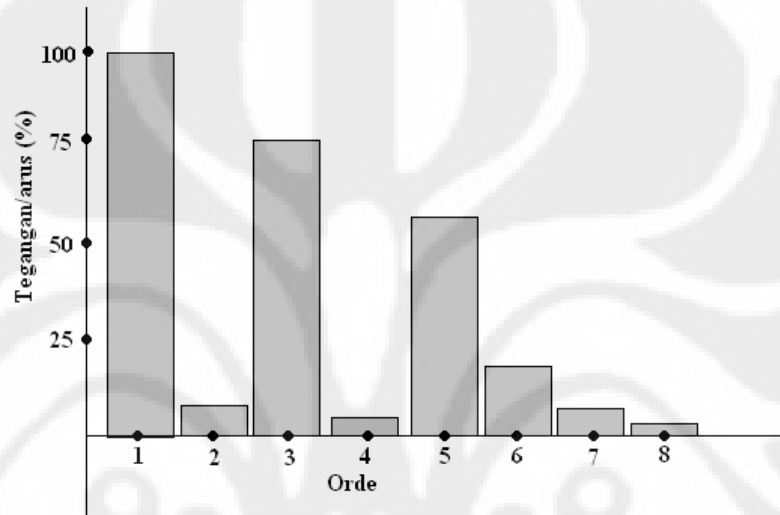
f_n = Frekuensi harmonik ke- n

F = Frekuensi dasar / fundamental

Sesuai dengan definisi diatas maka orde harmonik frekuensi dasar (F) adalah 1. Artinya orde ke-1 bukan merupakan harmonik, sehingga yang dianggap sebagai harmonik dimulai dari orde ke-2 hingga orde ke- n .

2.1.1.2 Spektrum

Spektrum merupakan perbandingan arus maupun tegangan antara frekuensi dasar dengan frekuensi harmoniknya. Spektrum biasanya ditampilkan dalam bentuk histogram. Spektrum dapat digunakan sebagai dasar merencanakan filter yang akan digunakan untuk mereduksi harmonik, terutama bila yang akan digunakan filter pasif. Berikut ini merupakan contoh dari spektrum:



Gambar 2.4 Bentuk spektrum harmonik

2.1.1.3 Distorsi Harmonik Individu (Individual Harmonic Distortion)

Distorsi Harmonik Individu (IHD) merupakan rasio tegangan atau arus antara nilai RMS harmonik dengan nilai RMS dasar (*fundamental*).

$$IHD_h = \sqrt{\frac{M_h^2}{M_1^2}} \quad (2.2)$$

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

M_h = Nilai RMS arus atau tegangan harmonik ke-h

M_1 = Nilai RMS arus atau tegangan dasar (*fundamental*)

2.1.1.4 Distorsi Harmonik Total (Total Harmonic Distortion)

Total Distorsi Harmonik (THD) merupakan rasio nilai rms dari komponen harmonisa dengan nilai RMS dari komponen dasar yang biasanya dinyatakan dalam persen (%) [4].

Nilai THD dijadikan batasan tegangan atau arus harmonik yang masih dapat ditoleransi dalam suatu sistem tenaga listrik. Dengan parameter ini, dapat diketahui apakah distorsi yang terjadi berada pada tingkat yang dapat diterima atau pada tingkat yang merugikan. Nilai ini dapat dihitung untuk tegangan maupun arus [1]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\max} M_h^2}}{M_1} \quad (2.3)$$

Atau

$$THD = (IHD_2^2 + IHD_3^2 + IHD_4^2 + \dots)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

dengan :

THD = *Total Harmonik Distortion*

M_h = Nilai RMS dari arus atau tegangan dari komponen harmonik ke-h

M_1 = Nilai RMS dari arus atau tegangan dari frekuensi dasar.

Besarnya pengaruh harmonik pada sistem tenaga ditentukan oleh besarnya THD yang dihasilkan. Batasan-batasan THD yang diijinkan untuk beberapa sistem tegangan berdasarkan standar IEEE 519-1992 dan PLN diperlihatkan pada berikut[2] :

Tabel 2.1 Batasan – batasan Distorsi Tegangan Harmonik (THD)

Standar IEEE Sistem Tegangan (kV)	Total Harmonik Distortion (%)	Standard PLN Sistem Tegangan (kV)	Total Harmonik Distortion (%)
$V_n < 69$	5 %	20	5 %
$69 < V_n < 161$	2.5 %	> 70	3 %
$V_n > 161$	1.5 %		

2.1.1.5 Persamaan Fourier

Teori yang digunakan untuk memahami gelombang harmonik adalah Teori dari deret fourier. Dalam metode fourier series dapat menunjukkan komponen

yang genap dan ganjil. Bentuk umum dari persamaan fourier series dapat ditunjukkan ke dalam rumus sebagai berikut [4]:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega_0 t + B_n \sin n\omega_0 t) \quad (2.5)$$

Dimana:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2.6)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} f(t) \cos n\omega_0 t dt$$

= 2 × nilai rata-rata $f(t) \cos n$ untuk satu periode gelombang (2.7)

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} f(t) \sin n\omega_0 t dt$$

= 2 × nilai rata-rata $f(t) \sin n$ untuk satu periode gelombang (2.8)

Ket: A_0 = nilai rata-rata dari fungsi $x(t)$

A_n dan B_n = koefisien deret

n = orde harmonik

Rumus di atas diperuntukkan untuk gelombang yang berperiode kontinyu yang mana didalam teori fourier menyatakan hal-hal yang mengacu pada persamaan yaitu A_0 , A_n , dan B_n ketiga koefisien tersebut.

Berdasarkan persamaan diatas, secara umum harmonik tegangan dan arus dinyatakan dalam deret fourier [4]:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} A_n \cos(h\omega_0 t + \phi_h) dt \quad (2.9)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} B_n \sin(h\omega_0 t + \theta_h) dt \quad (2.10)$$

Dimana: h = orde harmonik (1,2,3,...)

Persamaan Fourier ini dapat digunakan untuk memecah gelombang yang telah terdistorsi menjadi gelombang dasar dan gelombang harmonik. Hal ini menjadi dasar dalam menganalisa harmonik pada sistem tenaga listrik.

2.1.1.6 Nilai RMS

Nilai RMS yang dihasilkan oleh gelombang arus/tegangan yang terdistorsi harmonik dapat dinyatakan dengan [1] :

$$rms = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.11)$$

dimana : M_h = Nilai RMS dari arus atau tegangan ke-h

2.1.2 Komponen Harmonik

Berikut ini merupakan beberapa komponen-komponen yang terdapat dalam harmonik:

2.1.2.1 Daya dan Faktor Daya

Daya aktif (daya nyata) adalah daya yang diserap oleh beban untuk melakukan kerja yang sesungguhnya. Daya reaktif adalah daya yang tidak terlihat sebagai kerja nyata dan biasanya dipengaruhi oleh komponen reaktif seperti induktor. Berikut adalah persamaan daya aktif (P) dan reaktif (Q) rata-rata pada kondisi non sinusoidal [5]:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \text{ Watt} \quad (2.12)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \text{ var} \quad (2.13)$$

Secara umum, daya kompleks (S) dapat dinyatakan dengan:

$$S = V \times I \quad \text{VA} \quad (2.14)$$

Dalam kondisi non sinusodal, daya kompleks dapat dinyatakan dengan:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad \text{VA} \quad (2.15)$$

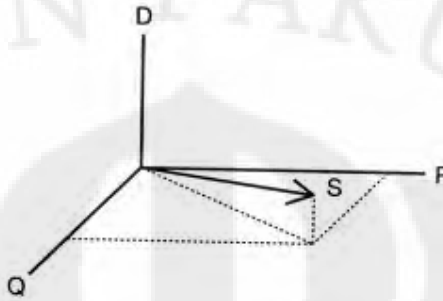
Keterangan: S = daya kompleks pada kondisi non sinusoidal (VA)

P_1 = daya aktif pada frekuensi dasar (Watt)

Q_1 = daya reaktif pada frekuensi dasar (var)

D = distorsi daya akibat harmonik (VA)

Berikut ini gambar diagram vektor tiga dimensi yang menunjukkan hubungan antara P, Q dan D [1]:



Gambar 2.5 Vektor hubungan komponen daya pada kondisi non sinusoidal[1]

2.1.2.2 Urutan Fasa Harmonik

Studi harmonik dalam sistem tiga fasa mengidentifikasi bahwa tidak semua komponen harmonik mempunyai urutan fasa seperti phasor sebenarnya. Menurut teori komponen simetris dapat diidentifikasi menjadi tiga buah kelompok, yaitu : urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol. Ketiga urutan tersebut dapat dilihat pada Table 2.2 berikut ini [5]:

Tabel 2.2 Urutan Orde

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

Pola urutan fasa setiap orde harmonik dapat dinyatakan sebagai berikut:

Urutan fasa positif (positif sequence) = $3h+1$

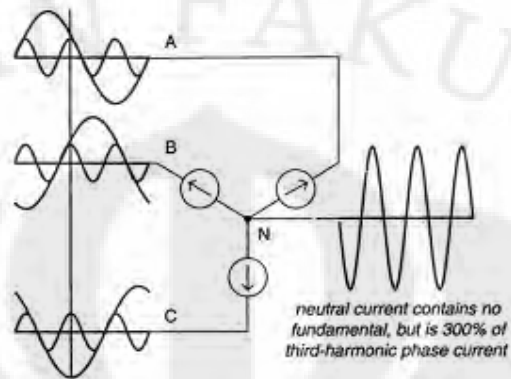
Urutan fasa negatif (negative sequence) = $3h-1$

Urutan fasa nol (zero sequence) = $3h$

2.1.2.3 Tripin Harmonik

Tripin harmonik merupakan kelipatan ganjil dari harmonik ketiga ($h=3, 9, 15, 21, \dots$). Pada sistem 3 fasa 4 kawat seimbang (Gambar 2.6), arus urutan nol dan arus tripin harmonik akan tetap ada dan mengalir melalui kawat netral. Hal ini disebabkan tripin harmonik memiliki fasa dan waktu yang sama antara ketiga

fasanya sehingga pada kawat netral akan ditemukan arus harmonik urutan nol yang besarnya tiga kali lipat dari arus harmonik urutan nol pada salah satu fasa.



Gambar 2.6 Arus netral tinggi akibat tripen harmonik[1]

2.1.3 Standar Batasan Harmonik

Beberapa standar batasan harmonik pada sistem tenaga listrik telah dipublikasikan diantaranya adalah standar IEEE std. 519-1992, IEC 61000-3-4, IEC61000-3-6, dan lain-lain. IEC biasanya digunakan untuk daerah Eropa dan standar ANSI banyak digunakan di Amerika. Berikut adalah standar yang digunakan dalam skripsi ini[5] :

Tabel 2.3 Standar IEC 61000-3-4

Orde	Maksimum arus harmonik yang diizinkan*	Orde	Maksimum arus harmonik yang diizinkan*
3	21.6	19	1.1
5	10.7	21	0.6
7	7.2	23	0.9
9	3.8	25	0.8
11	3.1	27	0.6
13	2	29	0.7
15	0.7	31	0.7
17	1.2	33	0.6

Ket: * % dari arus fundamental masukan

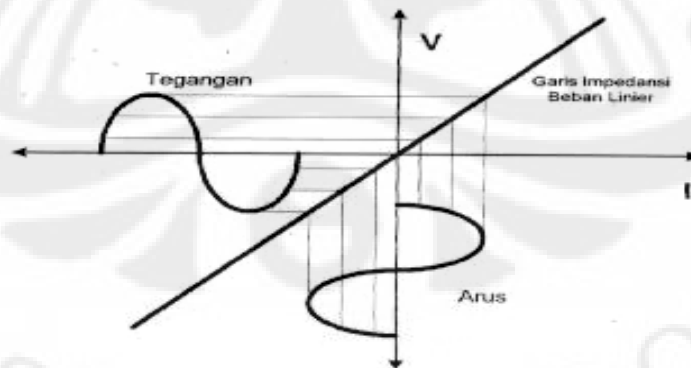
Tabel 2.4 Standar IEC 61000-3-6

Harmonik ganjil				Harmonik genap	
Bukan kelipatan 3		Kelipatan 3			
Orde	Tegangan harmonik (%)	Orde	Tegangan harmonik (%)	Orde	Tegangan harmonik (%)
5	6	3	3	2	2
7	5	9	9	4	1
11	3.5	15	15	6	0.5
13	3	21	21	8	0.5
17	2	>21	1	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2 + 1.3 \times 25/h$				

* Batasan untuk THD sebesar 8 %

2.1.4 Penyebab Timbulnya Harmonik

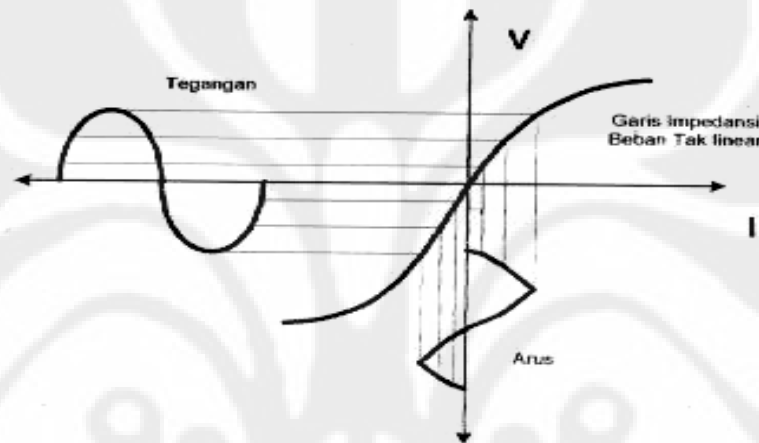
Pada sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier memberikan bentuk gelombang keluaran linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan perubahan tegangan. Sedangkan beban non-linier memberikan bentuk gelombang keluaran arus yang tidak sebanding dengan tegangan dasar setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangannya tidak sama dengan gelombang masukannya.



Gambar 2.7 Karakteristik gelombang arus pada beban linier[3]

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.



Gambar 2.8 Karakteristik gelombang arus pada beban non linier[3]

Beban-beban rumah tangga penyebab harmonik biasanya terdapat pada peralatan listrik seperti komputer, kulkas, televisi, lampu fluorescent yang menggunakan elektronik ballast, motor listrik berpengaturan kecepatan, dan peralatan-peralatan elektronika daya lainnya.

2.1.5 Akibat yang Ditimbulkan Harmonik

Tegangan dan arus harmonik dapat menimbulkan efek pada peralatan listrik yang terhubung dengan jaringan listrik. Efek yang ditimbulkan berbeda-beda tergantung dari karakteristik peralatan listrik tersebut. Secara umum, pengaruh harmonik pada peralatan tenaga listrik ada tiga, yaitu :

- a. Nilai RMS baik tegangan dan arus lebih besar.
- b. Nilai puncak (peak value) tegangan dan arus lebih besar.

c. Frekuensi sistem turun.

Secara khusus efek yang ditimbulkan oleh harmonik pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi :

A. Efek negatif jangka pendek

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.

- a. Harmonik menyebabkan kesalahan pada peralatan pengukuran listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik.
- b. Harmonik juga dapat mengganggu alat-alat pengaman dalam sistem tenaga listrik seperti relay dan fuse.
- c. Pada mesin-mesin berputar seperti generator dan motor, torsi mekanik yang diakibatkan oleh arus harmonik, dapat menyebabkan getaran dan suara pada mesin-mesin tersebut.
- d. Interferensi frekuensi pada sistem telekomunikasi karena biasanya kabel untuk keperluan telekomunikasi ditempatkan berdekatan dengan kawat netral. *Triplen harmonic* pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonik yang mengganggu sistem telekomunikasi.

B. Efek yang bersifat kontinu yang dapat mengakibatkan pemanasan.

a. Pemanasan kapasitor

Karena sifat kapasitor yang sensitif terhadap perubahan beban maka ketika terjadi harmonik, akan menyebabkan rugi-rugi meningkat. Karena 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. Karena bila terjadi resonansi, maka impedansi sistem hanya dilihat resistif oleh arus. Bila hal ini terjadi maka arus akan sangat besar dan dapat mengakibatkan kerusakan.

b. Pemanasan pada mesin-mesin listrik dan transformator.

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

- a. Meningkatkan rugi inti dan rugi belitan
- b. Pemanasan lebih.

2.1.6 Dasar-dasar Pengontrolan Harmonik

Pada dasarnya, harmonik dapat menjadi suatu masalah jika :

- a. Sumber dari arus yang mengandung harmonik sangat besar.
- b. Jalur yang dilalui arus secara elektris sangat panjang, sehingga menyebabkan distorsi tegangan yang besar.
- c. Respon dari sistem yang menimbulkan satu atau lebih harmonik.

Saat suatu permasalahan ditimbulkan oleh harmonik, cara dasar untuk mengatasinya adalah sebagai berikut :

- a. Mengurangi arus harmonik yang dihasilkan oleh beban.
- b. Menambah filter untuk mengalihkan arus harmonik dari sistem, memblokir arus yang memasuki sistem, atau melokalisasi arus harmonik.
- c. Merubah respon frekuensi dengan menggunakan filter, induktor, dan kapasitor.

2.2 PERANCANGAN FILTER HARMONIK

Sebelum melakukan suatu perancangan 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[3] :

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2} \quad (2.16)$$

dengan : P_1 = daya aktif sistem (Watt)

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 :

- a. Mengidentifikasi kondisi harmonik
- b. Mendesain skema filter untuk menekan harmonik
- c. Menganalisis unjuk kerja 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 :

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

Ada dua jenis filter pasif, yaitu filter seri dan filter shunt. Filter seri harus didesain untuk arus maksimum dari rangkaian utama. Sedangkan filter *shunt* hanya membawa arus harmonik dan sebagian arus *fundamental* yang jauh lebih kecil dari arus di rangkaian utama. 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.

2.2.1 Kriteria Desain Filter

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

Kriteria desain filter yang ideal adalah dapat mengeliminasi semua pengaruh buruk 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. Dari segi teknis, sangat sulit untuk memperkirakan sebelumnya distribusi harmonik melalui jaringan AC. Dari segi ekonomis, pengurangan interferensi telepon secara normal dapat dicapai dengan lebih ekonomis dengan melakukan beberapa pengukuran preventif dalam sistem telepon dan pengukuran lainnya dalam sistem tenaga.

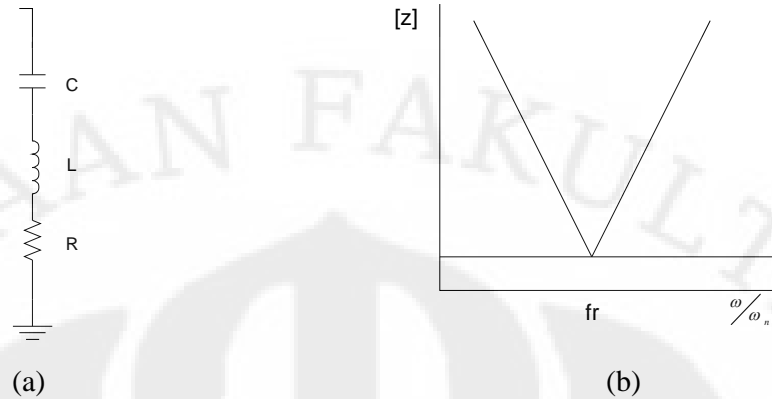
Kriteria desain yang lebih praktis mengusulkan pengurangan masalah ke suatu level yang dapat diterima pada titik hubung bersama dengan konsumen lain, masalah tersebut dinyatakan dalam bentuk tegangan harmonik, arus harmonik atau keduanya. Kriteria yang didasarkan pada tegangan harmonik lebih tepat untuk 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 :

- a. Daya reaktif yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya
- b. Puncak resonansi paralel yang dihasilkan dari interaksi antara filter dan impedansi sumber
- c. Rating dan toleransi komponen-komponen filter
- d. Rugi-rugi filter

2.2.2 Single Tuned Filter

Rangkaian *single tuned filter* dan kurva impedansi terhadap frekuensi terlihat pada gambar 2.9[5]:



Gambar 2.9 a. *Rangkaian Single Tuned Filter*
b. Kurva impedansi terhadap frekuensi

Impedansi *single tuned filter* diberikan oleh persamaan :

$$Z_f = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.17)$$

Sedangkan magnitude impedansi *single tuned filter* adalah :

$$|Z_f| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (2.18)$$

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

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.19)$$

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 :

- a. Faktor kualitas (*Quality factor-Q*)
- b. Penyimpangan frekuensi relatif (*Relative Frequency Deviation – δ*)

Faktor kualitas dari sebuah filter (Q) adalah ukuran ketajaman penyetelan filter tersebut dalam mengeliminasi harmonik[1]. 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.

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (2.20)$$

$$\text{Dimana } X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.21)$$

Keterangan: X_0 = impedansi filter

R = tahanan reaktor

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 (δ), disebut juga faktor *de-tuning*, menyatakan perubahan frekuensi dari frekuensi nominal penyetelannya, yang dinyatakan oleh :

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega} \quad (2.22)$$

Faktor δ dipengaruhi oleh :

- a. Variasi frekuensi dasar

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

2.2.3 Rating Komponen Filter

Rating komponen filter merupakan suatu standar batasan dari suatu komponen filter tersebut dapat bekerja. Berikut ini beberapa komponen dan ratingnya:

2.2.3.1 Rating pada Kapasitor

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

Tabel 2.5 Rating pada Kapasitor

	Nilai rating
kVAR	135 %
Tegangan efektif	110 %
Jumlah tegangan puncak	120 %
Arus efektif	180 %

Meskipun berdasarkan standard, batas arus yang diperbolehkan adalah 180 %, tapi 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 ratingnya pada 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.

Besarnya kompensasi daya reaktif yang diberikan oleh kapasitor pada frekuensi dasar (QVAR) atau disebut juga ukuran filter (S), dinyatakan oleh persamaan[3] :

$$S = \frac{V_s^2}{X_C - X_L} \quad (2.23)$$

Untuk harmonik ke n, ukuran filter dapat dinyatakan :

$$S = \left(\frac{V_s^2}{X_C} \right) \left[\frac{n^2}{(n^2 - 1)} \right] \quad (2.24)$$

2.2.3.2 Rating pada Induktor

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

- a. Arus pada frekuensi dasar
- b. Spektrum arus harmonik
- c. Arus hubung singkat
- d. Rasio X/R
- e. Tegangan sistem

BAB 3

OBJEK PENGAMBILAN DATA

3.1 SKENARIO BEBAN RUMAH TANGGA

Beban yang digunakan dalam studi kasus ini adalah beban rumah tangga penghasil harmonik. Beban yang digunakan umumnya banyak terdapat pada rumah tangga.

Adapun skenario jenis beban pada studi kasus ini terdiri dari Kulkas, TV, PC (*Packet Computer*), AC (*Air Conditioner*), lampu fluorescent terdiri dari 8 watt berjumlah empat buah, 14 watt berjumlah empat buah dan 18 watt berjumlah empat buah, kulkas, dan dispenser (*pemanas air*).

3.2 METODE PENGAMBILAN DATA

Untuk mengetahui karakteristik distorsi harmonik beban rumah tangga, dilakukan pengambilan data berupa komponen tegangan (V), arus (I), daya (S, P, Q), faktor daya (PF), dan THD. Data-data tersebut nantinya akan digunakan sebagai parameter-parameter dalam mendesain filter.

Data diambil untuk setiap masing-masing beban rumah tangga, dan pengukuran dimulai pada saat beban beroperasi selama kurun waktu satu jam. Hal ini dilakukan agar dapat mewakili karakteristik kerja dari masing-masing beban.

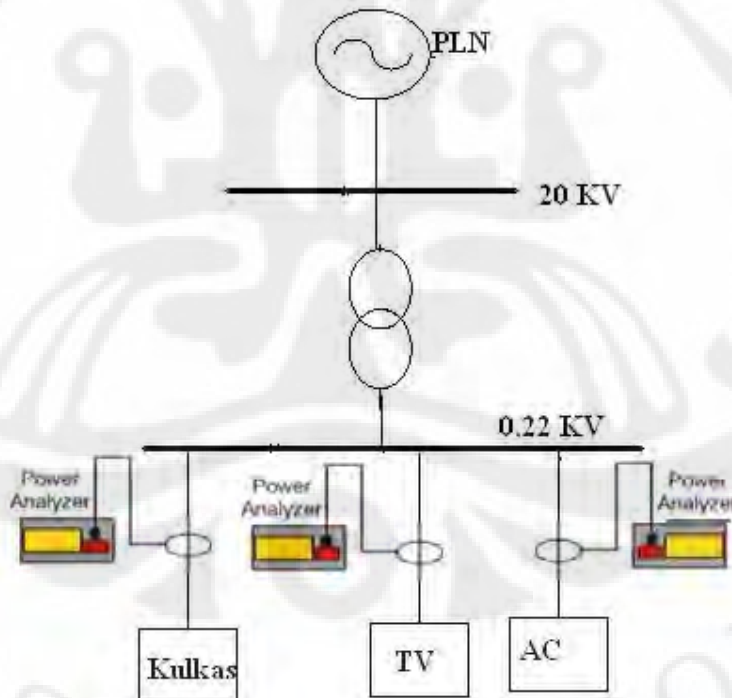
Data diperoleh dengan melakukan pengukuran dengan menggunakan alat ukur Power Analyzer bermerk Hioki tipe 3169-20. Alat ini dapat mengukur komponen listrik seperti tegangan (V) per fasa maupun *phase to phase*, arus (I) per line, daya kompleks (S), daya nyata (P), dan daya reaktif (Q), faktor daya (PF), serta dapat pula mengukur nilai THD untuk tegangan maupun arus.

Hasil pengukuran dapat dilihat melalui program komputer yang dimiliki alat ini. Berikut adalah gambar alat yang digunakan dalam pengukuran:



Gambar 3.1 Hioki power analyzer 3169-20

Pengambilan data dilakukan dengan cara pengukuran pada setiap beban-beban rumah tangga penghasil harmonik (gambar 3.2). Dalam kasus ini, jenis beban rumah tangganya adalah TV, lampu fluorescent (8, 14, dan 18 watt) masing-masing empat buah untuk setiap jenisnya, kulkas, televisi, dispenser (pemanas air).



Gambar 3.2 Penempatan alat ukur

Setiap beban yang diukur memiliki karakteristik daya, arus maupun tegangan yang berbeda-beda. Berikut ini adalah tabel perbandingan karakteristik beban yang digunakan dalam pengukuran:

Tabel 3.1 Karakteristik Beban

No.	Peralatan	Jumlah	Daya (W)	Tegangan (V)	Frekuensi (Hz)
1	Flourescent Tube Lamp				
	TL 8	4	8	170-250	50/60
	TL 14	4	14	170-250	50/60
	TL 18	4	18	170-250	50/60
2	Televisi (TV)	1	65	180-270	50/60
3	AC (<i>Air Conditiner</i>)	1	1150	220	50/60
4	PC (<i>Packet Computer</i>)				
	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

Data hasil pengukuran digunakan sebagai bahan analisis dengan melihat parameter-parameter nilai arus setiap ordenya untuk kemudian dilakukan perancangan filter yang tepat. Perancangan filter dilakukan untuk menekan seminimal mungkin gangguan harmonik.

3.3 DATA YANG DIGUNAKAN PADA SIMULASI

Dari data hasil pengukuran, hanya beberapa beban rumah tangga yang memiliki nilai THDi yang melebihi batas toleransi yang diperbolehkan. Beban beban tersebut terdiri dari beban AC, PC, TV, dan flourescent tube lamp (8, 14, dan 18 watt) yang berjumlah 4 buah untuk masing-masing dayanya.

Pada simulasi digunakan nilai-nilai parameter arus, THDi, dan faktor daya pada saat daya kompleks (S) mencapai nilai daya maksimum. Hal ini disebabkan pada kondisi tersebut beban bekerja pada kondisi maksimal yang diikuti oleh nilai rugi-rugi yang tinggi juga.

Berikut ini adalah data dari masing-masing beban yang diperoleh dari pengukuran dengan menggunakan alat ukur *Hioki Power Analyzer*:

Tabel 3.2 THDi pada saat Daya (S) maksimum

	S (KVA)	I_{fund}(A)	PF	THDi (%)
TL 8 W	0.03	0.15	-0.90	69.78
TL 14 W	0.05	0.26	-0.91	69.93
TL 18 W	0.07	0.35	-0.92	70.91
AC	1.08	5.55	0.98	13.21
TV	0.07	0.33	-0.99	74.95
PC	0.17	0.83	-0.99	72.72
Kulkas	0.14	0.67	0.67	9.05
Dispenser	0.38	1.85	0.97	3.59

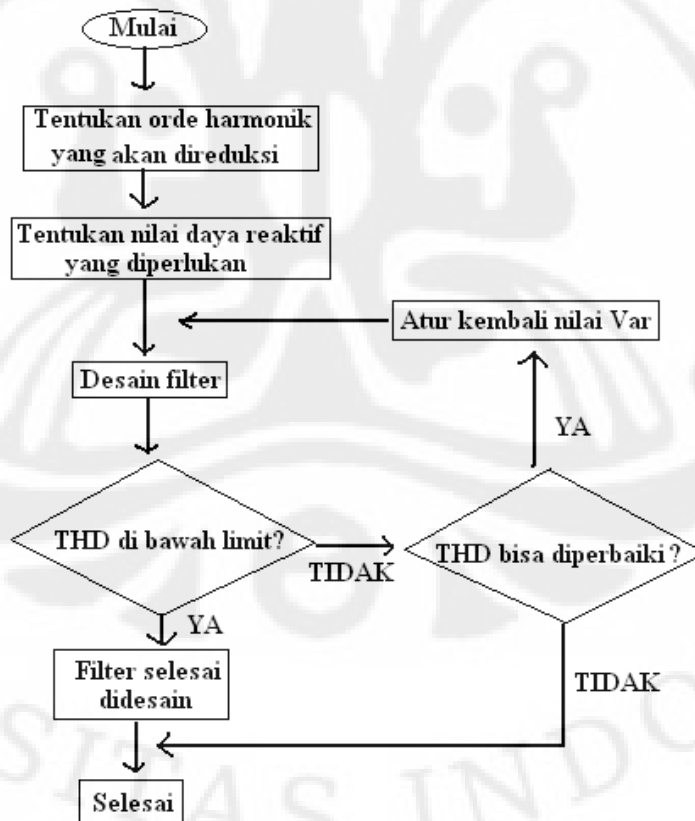
BAB 4

PERANCANGAN SINGLE TUNED FILTER HARMONIK

4.1 SIMULASI ETAP POWER STATION 5.0.3

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan kondisi sistem yang sebenarnya. Walaupun dalam proses simulasi terdapat sedikit perbedaan dengan keadaan sistem yang sebenarnya. Simulasi dengan bantuan *software* ETAP Power Station 5.0.3 membantu mempermudah analisis dari kinerja suatu filter yang telah dirancang.

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



Gambar 4.1 Diagram alir simulasi

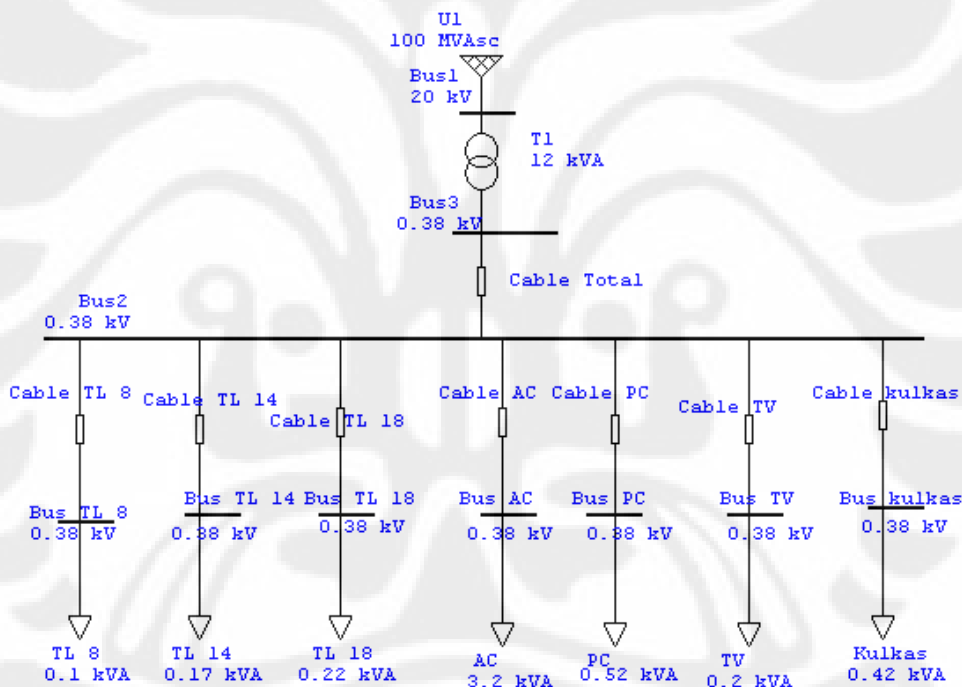
Berikut ini adalah tabel THDi pada data hasil pengukuran untuk tiap-tiap beban:

Tabel 4.1 THDi dari hasil pengukuran

	TL 8	TL 14	TL 18	AC	PC	TV	Kulkas	Dispenser
THDi (%)	69.78	69.93	70.91	13.21	72.72	74.95	9.05	3.59

Dari tabel data di atas, nilai THDi untuk beban dispenser tergolong kecil, yaitu bernilai 3 %. Sehingga pada skripsi ini, beban dispenser tidak diikutsertakan dalam proses simulasi untuk mereduksi harmonik arus.

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



Gambar 4.2 Rangkaian pembebanan rumah tangga pada simulasi ETAP

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

4.2 PERANCANGAN SINGLE TUNNED FILTER

Jenis perancangan filter yang akan digunakan pada skripsi ini adalah filter pasif yaitu *single-tuned filter*. Filter ini selain dapat mereduksi harmonik, dapat juga memperbaiki faktor daya karena terdapat kapasitor. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *single tuned filter* merupakan filter yang terdiri dari komponen reaktor dan kapasitor yang disusun secara seri. Filter ini di pasang secara paralel pada beban.

Parameter-parameter yang terdapat pada filter yang digunakan pada simulasi program ETAP Power Station 5.0.3 meliputi:

- a. Nilai daya reaktif yang digunakan untuk perbaikan faktor daya
- b. Nilai reaktansi kapasitif untuk kompensasi daya reaktif
- c. Reaktansi induktif atau reaktor filter
- d. Nilai faktor quality (Q factor), dalam skripsi ini menggunakan nilai 80.

Secara umum, keempat parameter di atas dapat ditentukan dengan 3 langkah kerja:

1. Identifikasi orde harmonik;
2. Menentukan QVAR; dan
3. Menentukan nilai reaktansi kapasitor dan induktor.

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

Pada data pengukuran, diketahui nilai harmonik tegangan terbesar berada pada orde ke 3. Sehingga pada simulasi perancangan filter, harmonik arus yang akan dieliminasi terdapat pada orde 3. Untuk menentukan nilai IHDi pada orde 3 dilakukan perhitungan secara manual. Nilai IHDi beban total tertinggi terdapat pada orde 3 yaitu bernilai 16.45 % dan dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 4.2 THDi untuk beban total

orde	THD I(%)
1	100
2	7.2805
3	16.4570
4	1.9662
5	5.7617

Untuk mempermudah proses simulasi, daya satu fasa untuk beban rumah tangga diubah menjadi 3 fasa. Berikut ini adalah tabel daya untuk masing-masing beban:

Tabel 4.3 Daya setiap beban pada simulasi

	$S_{1\phi}$ (KVA)	$S_{3\phi}$ (KVA)	$P_{3\phi}$ (KWatt)	$Q_{3\phi}$ (KVAR)	PF (%)
TL 8	0.032	0.097	0.087	-0.042	-0.9
TL 14	0.055	0.165	0.150	-0.068	-0.91
TL 18	0.073	0.218	0.201	-0.085	-0.92
AC	1.080	3.24	3.175	0.645	0.98
PC	0.172	0.517	0.512	-0.073	-0.99
TV	0.069	0.205	0.203	-0.029	-0.99
Kulkas	0.140	0.42	0.269	0.323	0.64
TOTAL	1.527	4.582	4.418	0.448	

Pada tabel di atas, secara umum terlihat beban-beban yang digunakan dalam simulasi merupakan beban kapasitif. Sehingga kualitas faktor daya sudah cukup baik. Seperti telah dijelaskan pada sebelumnya, nilai tegangan dan arus diambil pada saat kondisi daya (S) maksimum. Berikut ini adalah tabel tegangan dan arus untuk tiap-tiap beban:

Tabel 4.4 Tegangan dan arus pada saat daya maksimum

	V_{P-P} actual (Volt)	I (A)
TL 8	0.368	0.15
TL 14	0.365	0.26
TL 18	0.366	0.34
AC	0.340	5.5

PC	0.370	0.81
TV	0.360	0.33
Kulkas	0.359	0.67

Setelah melakukan proses identifikasi terhadap orde yang akan dilakukan eliminasi, langkah selanjutnya adalah menentukan nilai faktor daya (PF). Nilai faktor daya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (4.1)$$

Dari persamaan (4-1) diperoleh nilai faktor daya pada saat kondisi daya (S) maksimum adalah sebesar 0.96. 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 (2.16):

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

Dibutuhkan nilai daya reaktif (Qvar) tiga fasa sebesar 391.5 VAR atau untuk daya reaktif satu fasa bernilai 130.5 VAR.

Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai impedansi kapasitor dengan menggunakan persamaan berikut:

$$X_C = \frac{kV_{rated}^2}{M \text{ var}_{rated}} \quad (4.2)$$

Nilai rating tegangan yang digunakan sebesar 0.22 KV dan rating VAR sebesar 130.5 VAR, diperoleh nilai impedansi kapasitor sebesar 370.88 Ω . Sedangkan untuk nilai kapasitansi kapasitor diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (4.3)$$

Dengan : f = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari persamaan (4-3) didapatkan nilai kapasitansi sebesar 8.6 μF .

Setelah itu, langkah selanjutnya adalah menentukan nilai reaktor filter dengan menggunakan persamaan berikut:

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (4.4)$$

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

Pada proses identifikasi sebelumnya telah ditentukan nilai orde harmonik yang akan difilter yaitu orde 3 dan penyetelan diturunkan sedikit dibawahnya menjadi 2.8. Hal ini perlu dilakukan sebagai toleransi komponen filter untuk mencegah resonansi yang terjadi dalam sistem pada frekuensi yang mengganggu [1]. Dari persamaan (4-4) diperoleh nilai reaktor filter sebesar 47.3 Ω . Sedangkan nilai induktansi induktor diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (4.5)$$

Dengan : f = frekuensi fundamental 50 Hz

Dari persamaan di atas didapat nilai induktansi induktor sebesar 150.6 mH.

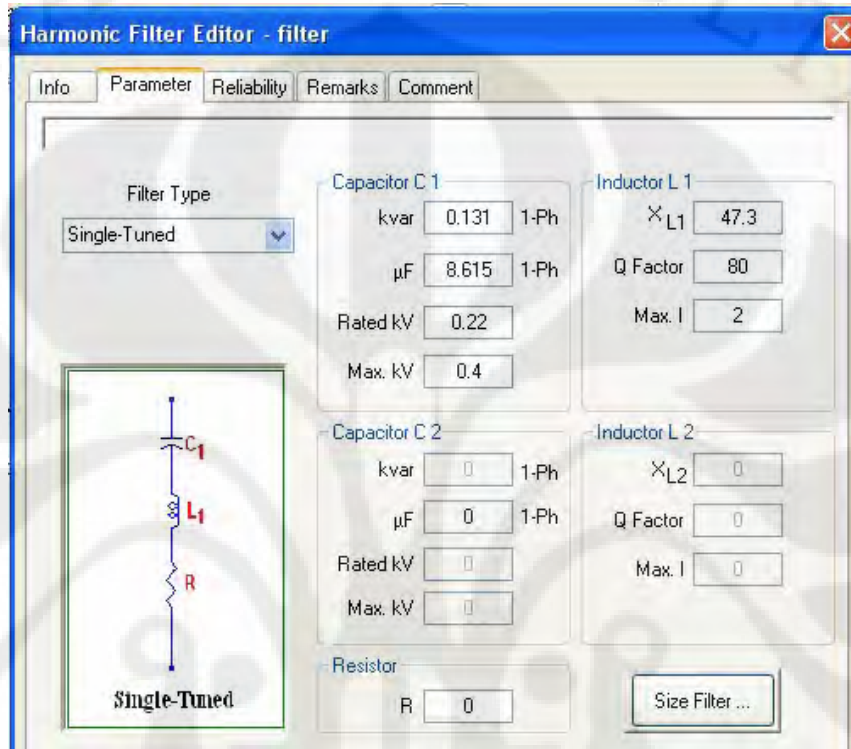
Dari perhitungan-perhitungan tersebut maka diperoleh desain filter yang akan digunakan pada proses simulasi. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, untuk nilai faktor kualitas (Q) merupakan ukuran ketajaman penyetelan filter dalam mereduksi harmonik. Sehingga diharapkan nilai Q setinggi mungkin. Nilai Q yang tinggi didapatkan dengan memberikan nilai R yang kecil.

Pada perhitungan komponen filter yang telah dilakukan, nilai R hanya merupakan nilai resistansi dari reaktor sehingga dalam perancangannya tidak perlu menambahkan resistor pada filter. Dalam simulasi yang akan dilakukan, nilai Q yang digunakan adalah 80. Reaktor diasumsikan berinti besi yang berarti nilai dari Q di atas 75 [1]. Berikut ini adalah tabel spesifikasi dari filter:

Tabel 4.5 Spesifikasi filter:

Spesifikasi	Nilai
L	150.6 mH
X_L	47.3 Ω
C	8.6 μ F
X_C	370.88 Ω
QVAR	130.5 VAR
Rating tegangan	0.22 KV
Q factor	80

Nilai-nilai spesifikasi yang telah ditentukan, selanjutnya akan digunakan sebagai parameter nilai untuk perancangan filter. Berikut ini adalah gambar parameter spesifikasi filter yang terdapat pada simulasi ETAP:



Gambar 4.3 parameter spesifikasi filter pada simulasi ETAP

4.3 PERHITUNGAN RATING KERJA FILTER

Dalam menentukan rating kerja dari filter dilakukan melalui beberapa tahap langkah perhitungan sebagai berikut:

4.3.1 Perhitungan Kerja Fundamental Filter [1]

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

- Impedansi fundamental:

$$X_{fund} = |X_L - X_C| \quad (4.6)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 323.58 Ω

- Arus fundamental:

$$I_{fund} = \frac{V_{actual}}{X_{fund}} \quad (4.7)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 0.679 A

- Tegangan kapasitor:

$$V_C = I_{fund} \times X_C \quad (4.8)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 252.1 Volt

- Rating kapasitor [1]:

$$VAR_{fund} = I_{fund} \times V_{rated} \quad (4.9)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 149.38 VAR

4.3.2 Perhitungan Kerja Harmonik Filter [1]

Ada 2 macam arus harmonik pada sistem, yaitu harmonik dari sisi sumber (*utility*) dan harmonik dari sisi beban.

- a. Arus harmonik yang dihasilkan oleh beban:

- Arus harmonik total filter

Arus harmonik total hanya berasal dari beban saja. Dari data awal didapatkan bahwa arus harmonik terbesar pada orde n, maka besar arus harmonik yang dihasilkan beban dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$I_h = I_h(pu) \times \frac{VA}{V_{actual}} \quad (4.10)$$

Untuk nilai harmonik beban total $I_h(pu)$ pada orde 3 bernilai 16.45 %.

Maka dari persamaan (4-10) diperoleh nilai I_h sebesar 1.14 A

- Tegangan harmonik kapasitor:

$$V_{Ch} = I_h \times X_C \div h \quad (4.11)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 141.12 Volt

- b. Arus harmonik yang dihasilkan oleh sisi sumber

Pada skripsi ini, digunakan trafo yang memiliki karakteristik sebagai berikut:

Tabel 4.6 Karakteristik *utility system*

Karakteristik <i>Utility System</i> (3Ø)	
Daya	12 KVA
Primer	20 KV
Sekunder	0.38 KV
X/R	3.04 Ohm
% Z	4 %

- Impedansi fundamental *service transformer*:

$$X_T = Z_T (\%) \frac{kV_{rated}^2}{MVA_{rated}} \quad (4.12)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 1.27 Ω

- Impedansi harmonik dari *service transformer*:

$$X_h = hX_T \quad (4.13)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 3.81 Ω

- Impedansi harmonik kapasitor:

$$X_{C(harm)} = \frac{X_c}{h} \quad (4.14)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 123.63 Ω

- Impedansi harmonik reaktor:

$$X_{L(harm)} = hX_L \quad (4.15)$$

- Arus harmonik *utility*:

$$I_{hU} = \frac{V_{h(utility)} (\text{pu}) \times V_{rated}}{(X_h - X_C + X_L)} \quad (4.16)$$

Pada simulasi nilai THDv pada sisi utilisasi atau nilai $V_{h(utlisasi)}$ adalah 2.26 %.

Dengan menggunakan persamaan (4-16) diperoleh nilai arus harmonik sisi utilisasi (I_{hU}) sebesar 0.19 A.

4.3.3 Perhitungan Kerja Total Filter [1]

- Arus rms total:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_{hU}^2} \quad (4.17)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 0.705 A

- Tegangan puncak:

$$V = V_C + V_{Ch} \quad (4.18)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 393.2 Volt

- Tegangan rms [1]:

$$V_{rms} = \sqrt{V_C^2 + V_{Ch}^2} \quad (4.19)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 288.8 Volt

- VAR total [1]:

$$VAR_{total} = I_{rms} \times V_{rms} \quad (4.20)$$

Dari perhitungan diperoleh nilai 201.1 VAR

Tabel 4.7 Perbandingan Batasan Kerja Filter

Kerja	Definisi	Batasan (%)	Nilai aktual	Nilai aktual (%)
Tegangan puncak	V / V rated	120	393.2/250	157.26
Tegangan RMS	V rms / V rated	110	285.3/250	114.12
Arus RMS	I rms / I fund.	180	0.7/0.67	104.47
VAR	VAR total/VAR fund.	135	201.1/149	134.9

Dari tabel 4.7, terlihat untuk nilai tegangan puncak dan tegangan RMS nilainya 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.

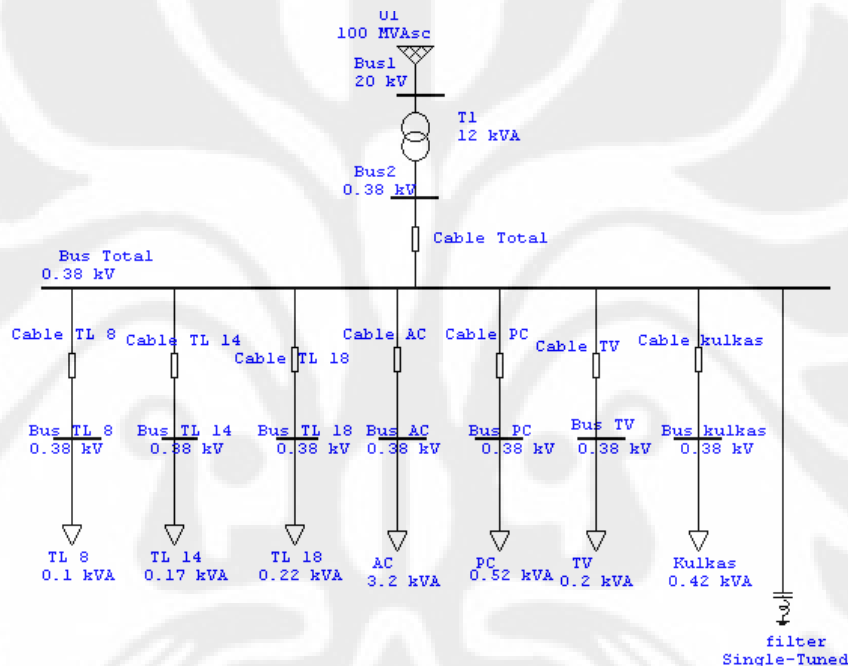
4.4 ANALISIS HARMONIK ARUS HASIL DARI SIMULASI

Fungsi utama dari penggunaan *Single Tunned Filter* adalah mengurangi arus harmonik yang mengalir pada sistem. Arus harmonik pada sistem akan dilewatkan pada filter untuk kemudian ditanahkan (*grounding*). Pada skripsi ini

analisis arus harmonik pada beban rumah tangga dilakukan dengan dua cara, yaitu analisis beban total dan analisis per beban.

4.4.1 Pemasangan Single Tuned Filter untuk Beban Total

Pemasangan filter untuk beban total dilakukan pada saat kondisi seluruh beban beroperasi. Pada simulasi, filter dipasang pada bus 3 dan dipasang secara paralel terhadap seluruh beban. Berikut ini adalah gambar simulasi dari lokasi penempatan *single tuned filter* untuk beban total :



Gambar 4.4 Lokasi pemasangan *single tuned filter* untuk baban total

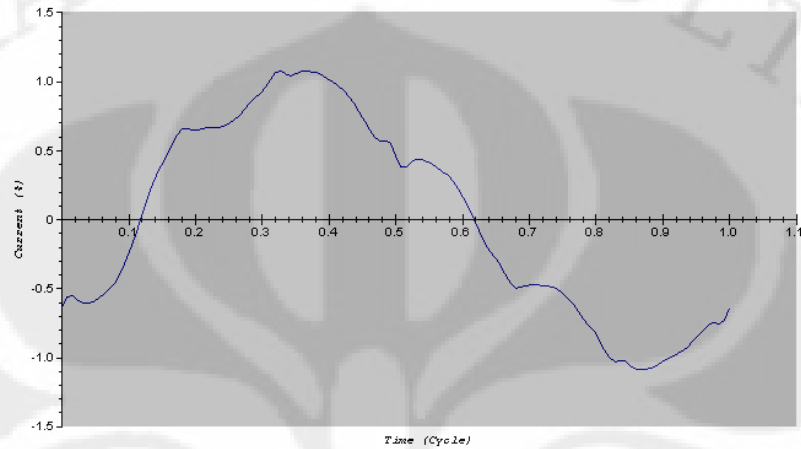
Pada hasil simulasi diperoleh perbandingan nilai THDi sebelum dan sesudah filter terpasang. Berikut ini adalah tabel THDi pada beban total:

Tabel 4.8 THDi beban total

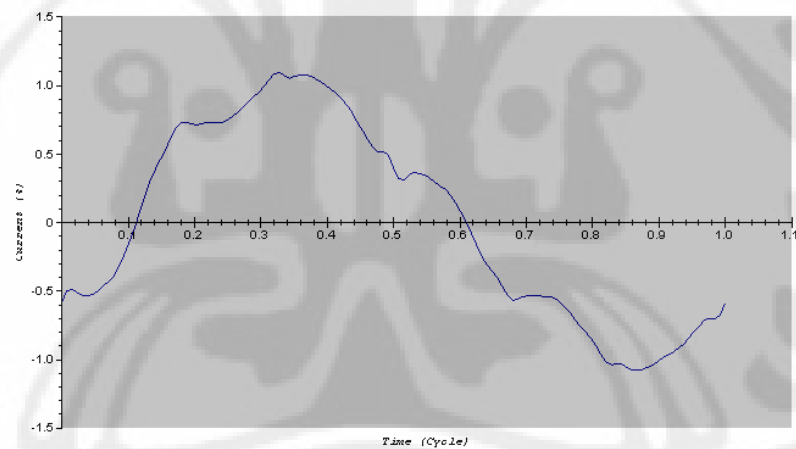
Beban	THDi (%)	
	Sebelum Filter	Setelah Filter
Beban Total	16.30	16.35

Pada tabel di atas, terlihat nilai THDi untuk beban total sebelum dan setelah pemasangan filter. Nilai THDi filter terpasang nilainya mengalami

kenaikan apabila dibandingkan pada saat tanpa filter. Tetapi kenaikan nilai THD masih relatif kecil, sehingga tidak terlalu berpengaruh terhadap bentuk dari gelombang arus. Berikut ini adalah gambar gelombang harmonik arus sebelum dan setelah pemasangan filter:



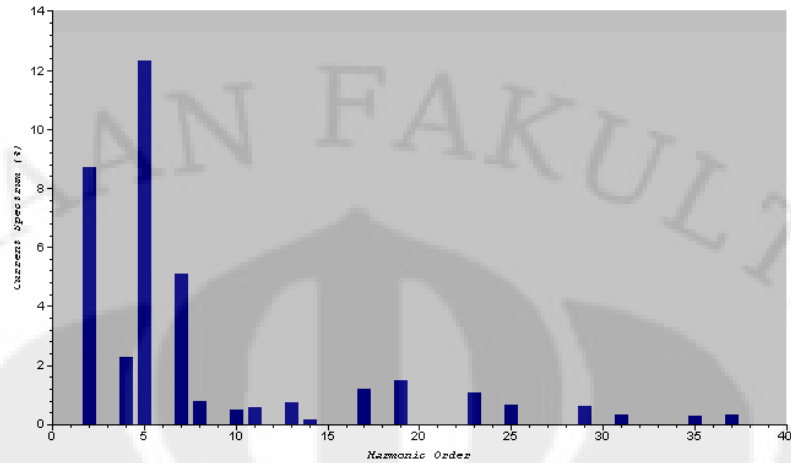
(a)



(b)

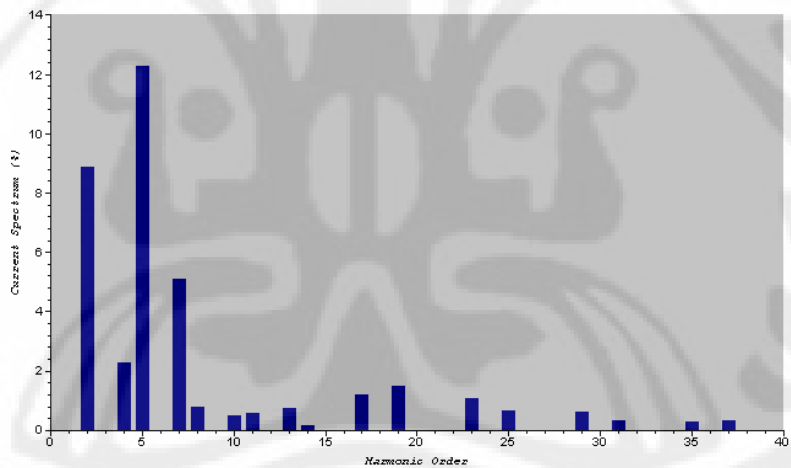
Gambar 4.5 (a) Bentuk gelombang arus beban total sebelum filter terpasang
(b) Bentuk gelombang arus beban total sesudah filter terpasang

Sebelum penggunaan filter, nilai arus fundamental dan arus RMS untuk beban total adalah 8.40 A dan 8.51 A. Sedangkan setelah filter terpasang, nilai arus fundamental dan arus RMS mengalami penurunan sebesar 8.32 A dan 8.43 A. Berikut ini adalah gambar spektrum harmonik arus pada beban total:



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	8.69	0.00	2.28	12.30	0.00	5.10	0.79	0.00	0.49	0.55	0.00	0.76	0.14	0.00	1.20	1.18	1.06
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental = 8.40 A								
% IHDi	0.65	0.60	0.31	0.26	0.34	0.00	0.00	0.00	IRMS = 8.51 A								

(a)



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	8.86	0.00	2.26	12.25	0.00	5.09	0.79	0.00	0.49	0.55	0.00	0.76	0.14	0.00	1.20	1.18	1.06
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 8.32 A								
% IHDi	0.65	0.60	0.31	0.26	0.34	0.00	0.00	0.00	(I)RMS = 8.43 A								

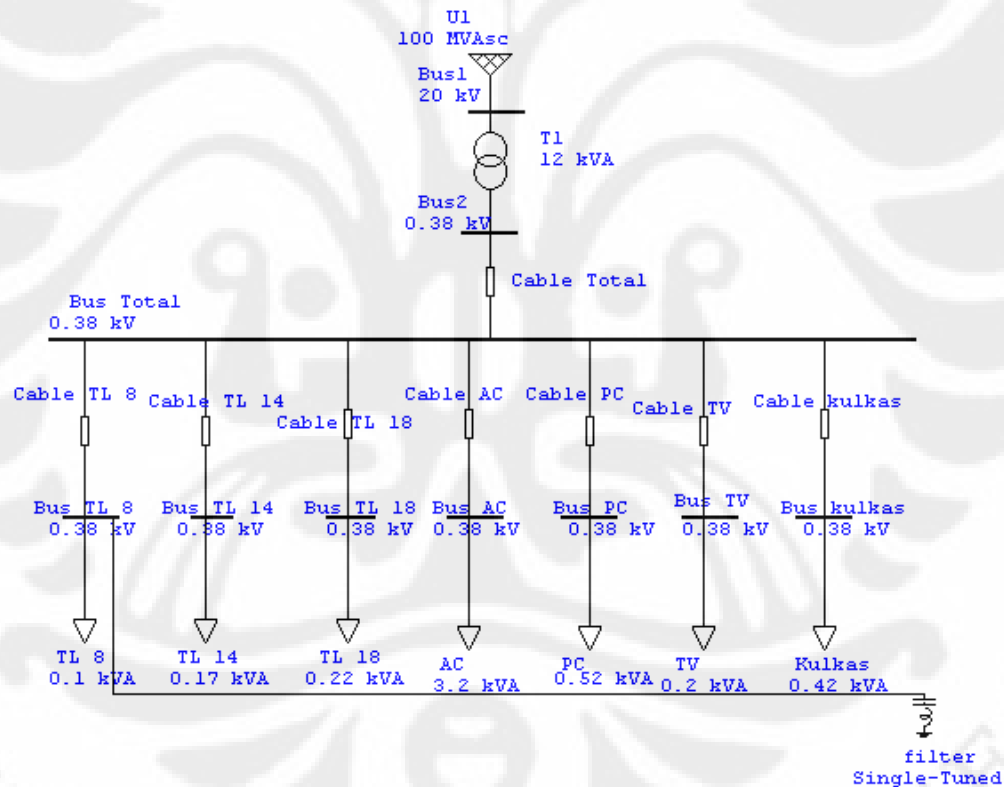
(b)

Gambar 4.6 (a) Bentuk spektrum arus beban total sebelum filter terpasang
(b) Bentuk spektrum arus beban total setelah filter terpasang

Pada gambar 4.6, terlihat kenaikan nilai IHDi pada orde-orde rendah. Tetapi secara keseluruhan penambahan IHDi tidak terlalu mempengaruhi perubahan nilai THDi.

4.4.2 Pemasangan Single Tuned Filter pada Setiap Beban

Penggunaan filter pada setiap beban cenderung lebih efektif apabila dibandingkan dengan pemasangan filter pada beban total. Namun apabila dilihat dari sisi ekonomis, penggunaan filter pada setiap beban sangat kurang ekonomis. Hal ini disebabkan penggunaan banyak filter untuk setiap bebannya, dapat menyebabkan pemborosan daya listrik. Berikut ini adalah gambar lokasi pemasangan *single tuned filter* pada setiap beban:



Gambar 4.7 Lokasi pemasangan *single tuned filter* untuk setiap beban

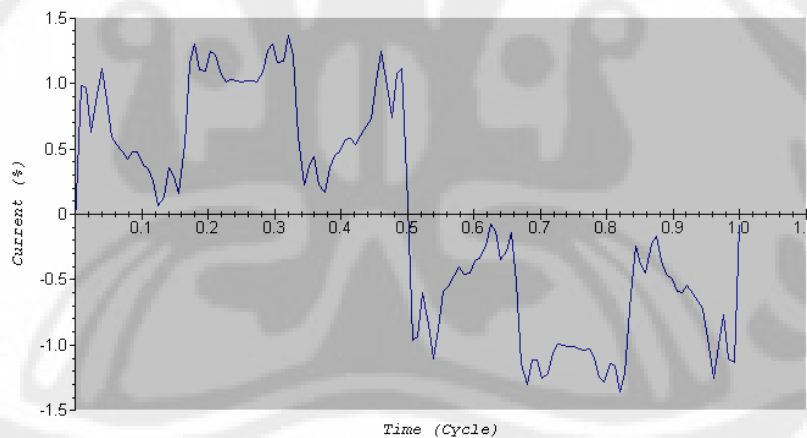
Gambar di atas merupakan lokasi pemasangan *single tuned filter* untuk beban TL 18. Pada simulasi, *single tuned filter* akan di pasang pada tiap beban. Berikut ini adalah tabel THDi dari masing-masing beban sebelum dan setelah pemasangan filter:

Tabel 4.9 THDi pada setiap beban

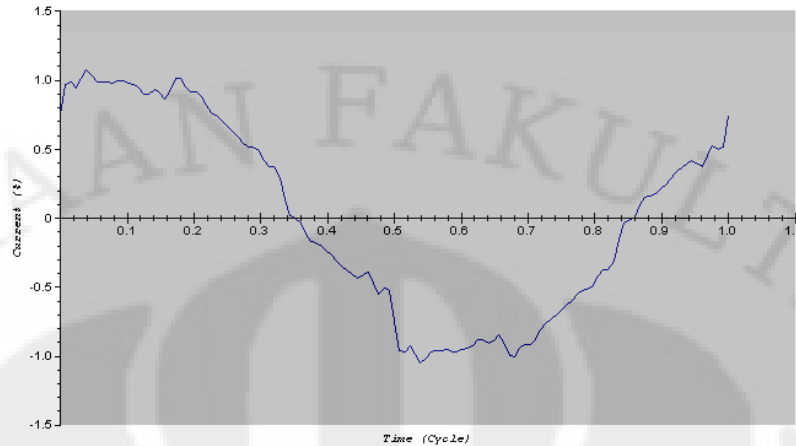
Beban	THDi (%)	
	Sebelum Filter	Setelah Filter
TL 8 W	62.61	11.90
TL 14 W	66.04	20.53
TL 18 W	65.9	36.04
AC	12.79	13.00
TV	77.31	32.01
PC	67.68	48.04
Kulkas	4.5	10.07

4.4.2.1 Beban TL 8

Nilai harmonik pada orde-orde ganjil yang sangat dominan menyebabkan terdistorsinya gelombang arus, sehingga gelombang arus tidak berbentuk sinusoidal. Berikut ini adalah gambar dari harmonik arus sebelum dan sesudah pemasangan filter:



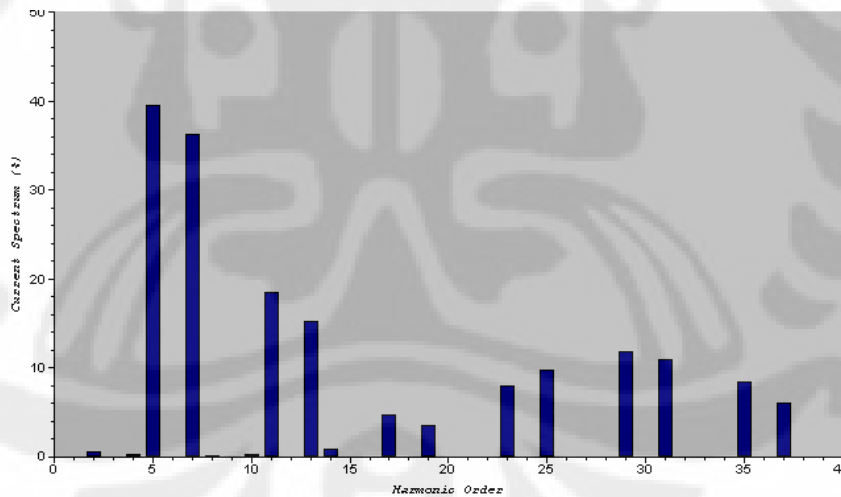
(a)



(b)

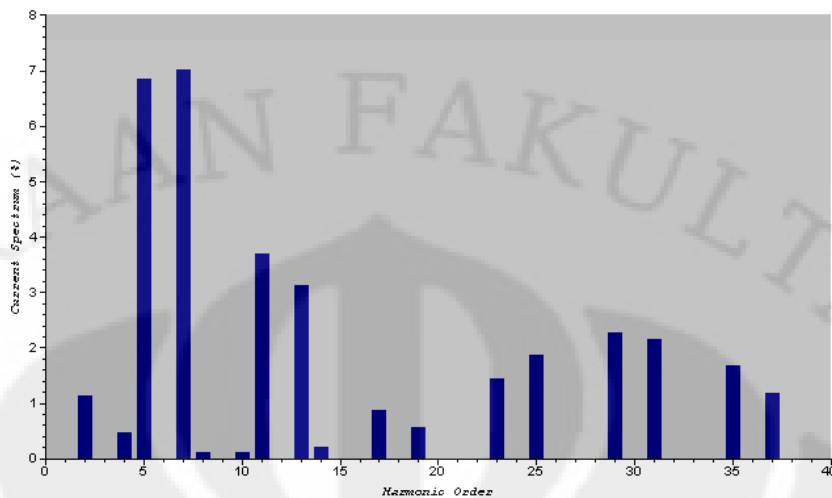
Gambar 4.8 (a) Bentuk gelombang arus beban TL 8 sebelum filter terpasang
(b) Bentuk gelombang arus beban TL 8 sesudah filter terpasang

Pada gambar di atas, terlihat perubahan bentuk gelombang arus setelah pemasangan filter yang mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Nilai I_{HDI} arus pada orde ganjil mengalami penurunan yang cukup signifikan. Berikut ini adalah gambar spektrum arus sebelum dan sesudah pemasangan filter:



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% I	0.48	0.00	0.27	39.07	0.00	35.87	0.08	0.00	0.31	18.24	0.00	14.99	0.85	0.00	4.71	3.54	7.93
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.16 A								
% I	9.68	11.62	10.76	8.38	5.96	0.00	0.00	0.00									

(a)



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23	
% IHDi	1.14	0.00	0.46	6.84	0.00	7.02	0.11	0.00	0.11	3.68	0.00	3.13	0.20	0.00	0.87	0.57	1.43	
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.75 A									
% IHDi	1.86	2.27	2.1	5	1.67	1.18	0.00	0.00	0.00									

(b)

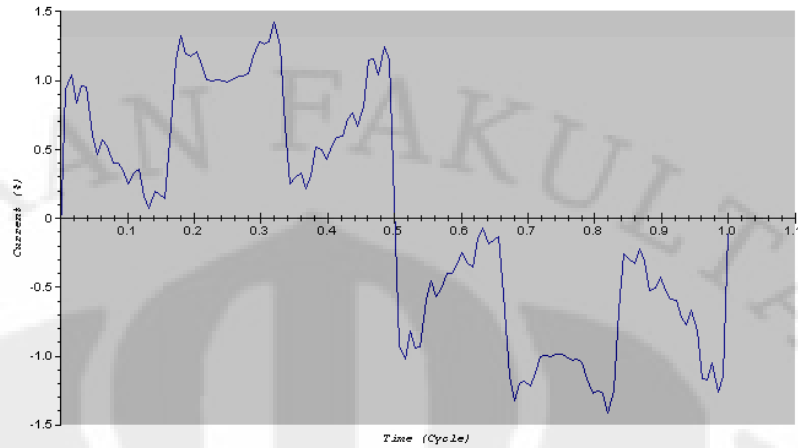
Gambar 4.9 (a) Bentuk spektrum arus beban TL 8 sebelum filter terpasang
(b) Bentuk spektrum arus beban TL 8 sesudah filter terpasang

Pada gambar 4.9, terlihat 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.

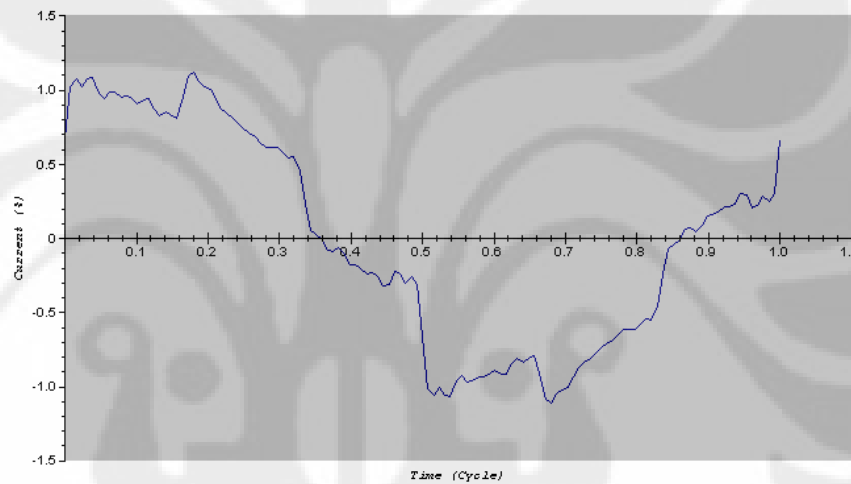
Apabila dilihat dari nilai arus fundamental, penggunaan filter menyebabkan arus fundamental menjadi bertambah. Hal ini menandakan, penurunan nilai THD arus yang sangat besar ini disebabkan oleh injeksi arus yang dilakukan oleh filter.

4.4.2.2 Beban TL 14

Nilai THD arus yang cukup besar berpengaruh terhadap bentuk gelombang arus. Nilai harmonik orde ganjil yang cukup besar menyebabkan gelombang arus mengalami distorsi. Berikut ini adalah gambar gelombang arus sebelum dan sesudah pemasangan filter:



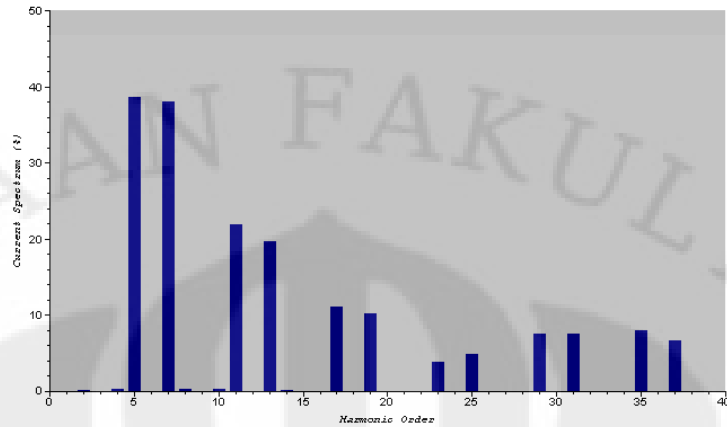
(a)



(b)

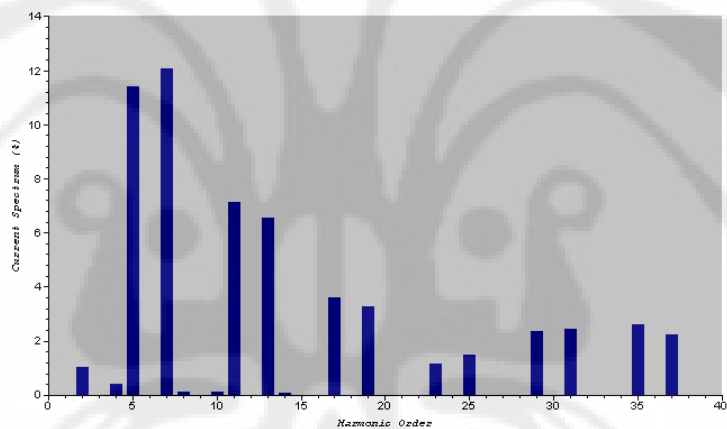
Gambar 4.10 (a) Bentuk gelombang arus beban TL 14 sebelum filter terpasang
 (b) Bentuk gelombang arus beban TL 14 sesudah filter terpasang

Pada gambar 4.10, terlihat pemasangan filter pada beban mampu memperbaiki bentuk gelombang arus. Selain itu, berkurangnya nilai IHD pada orde-orde ganjil yang cukup signifikan menyebabkan nilai THD arus menjadi lebih kecil. Berikut ini adalah gambar spektrum arus untuk beban TL 14 sebelum dan sesudah pemasangan filter:



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	0.19	0.00	0.25	39.68	0.00	38.31	0.33	0.00	0.20	22.02	0.00	19.81	0.14	0.00	11.11	10.25	3.92
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.27 A								
% IHDi	4.87	7.64	7.63	8.02	6.69	0.00	0.00	0.00									

(a)



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	1.02	0.00	0.39	11.41	0.00	12.08	0.13	0.00	0.10	7.13	0.00	6.54	0.06	0.00	3.60	3.28	1.15
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.82 A								
% IHDi	1.50	2.37	2.43	2.62	2.22	0.00	0.00	0.00									

(b)

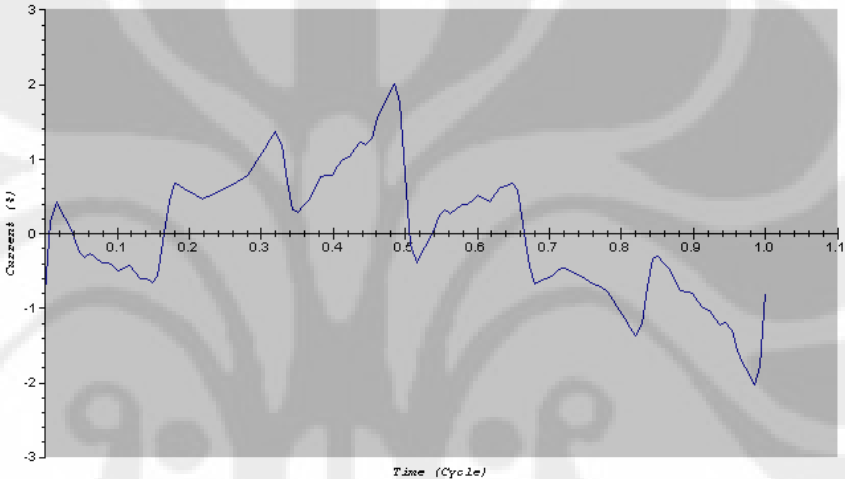
Gambar 4.11 (a) Bentuk spektrum arus beban TL 14 sebelum filter terpasang
(b) Bentuk spektrum arus beban TL 14 sesudah filter terpasang

Pada gambar 4.11, terlihat penurunan nilai IHD pada orde-orde ganjil mengalami penurunan yang cukup besar. Tetapi pada beberapa orde seperti pada orde 2 dan 25 nilai IHD sedikit mengalami kenaikan, namun secara umum

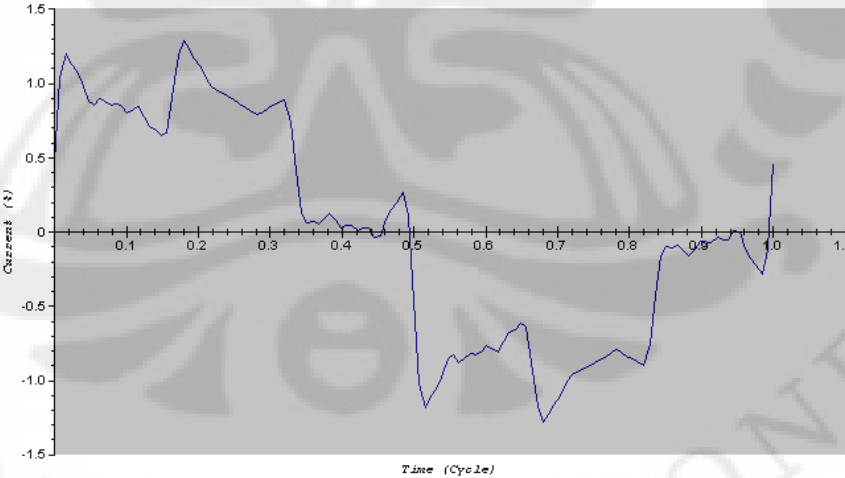
pemasangan filter dengan seting kerja pada orde 3 mampu mereduksi harmonik arus dengan baik.

4.4.2.3 Beban TL 18

Nilai THD arus yang cukup besar berpengaruh terhadap bentuk gelombang arus. Nilai harmonik orde ganjil yang cukup besar menyebabkan gelombang arus mengalami distorsi. Berikut ini adalah gambar gelombang arus sebelum dan sesudah pemasangan filter:



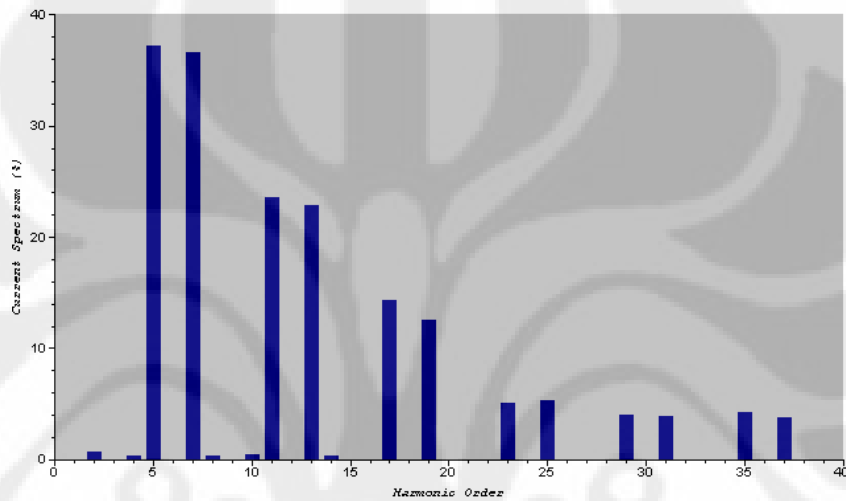
(a)



(b)

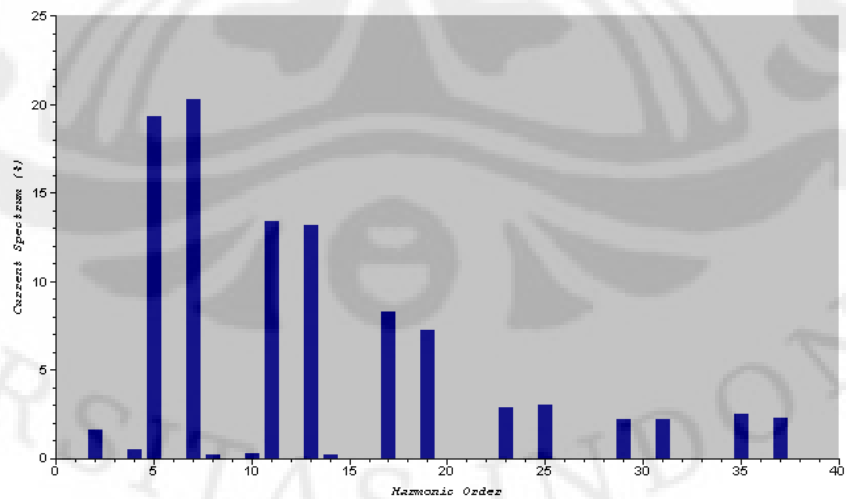
Gambar 4.12 (a) Bentuk gelombang arus beban TL 18 sebelum filter terpasang
(b) Bentuk gelombang arus beban TL 18 sesudah filter terpasang

Pada gambar 4.12, penggunaan filter mampu mengurangi distorsi dari gelombang arus. Selain itu, berkurangnya nilai IHD pada orde-orde ganjil yang cukup signifikan menyebabkan nilai THD arus menjadi lebih kecil. Berikut ini adalah gambar spektrum arus untuk beban TL 18 sebelum dan sesudah pemasangan filter:



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	0.64	0.00	0.27	37.46	0.00	36.85	0.33	0.00	0.43	23.71	0.00	22.98	0.37	0.00	14.46	12.61	5.15
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.36 A								
% IHDi	5.35	4.00	3.96	4.29	3.84	0.00	0.00	0.00									

(a)



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	1.61	0.00	0.47	19.30	0.00	20.28	0.19	0.00	0.25	13.39	0.00	13.18	0.24	0.00	8.28	7.21	2.89

Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.63 A
% THDi	3.01	2.14	2.21	2.50	2.29	0.00	0.00	0.00	

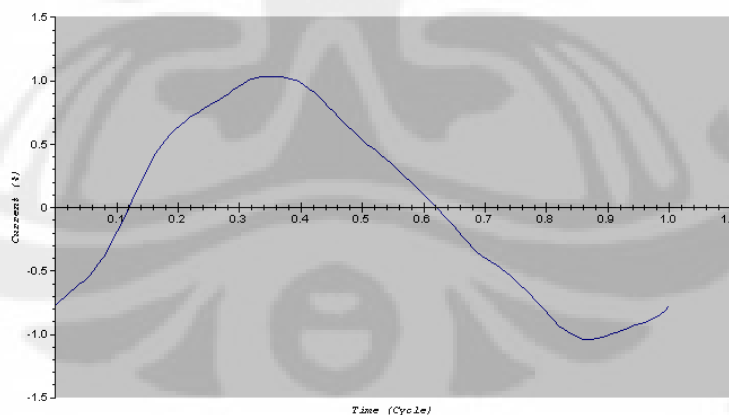
(b)

Gambar 4.13 (a) Bentuk spektrum arus beban TL 18 sebelum filter terpasang
(b) Bentuk spektrum arus beban TL 18 sesudah filter terpasang

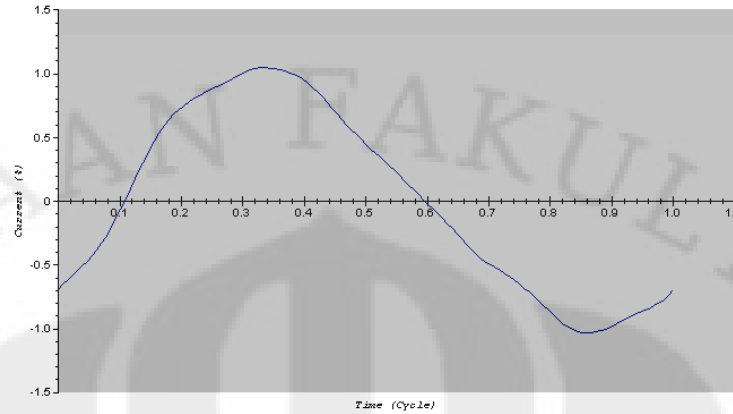
Pada gambar 4.13, secara umum penggunaan filter mampu mengurangi nilai distorsi harmonik. Apabila dilihat dari nilai arus fundamental, penggunaan filter menyebabkan arus fundamental menjadi bertambah. Hal ini menandakan, penurunan THD arus yang sangat besar ini bukan merupakan indikasi arus harmonik pada sistem banyak yang tereduksi, akan tetapi lebih disebabkan adanya arus fundamental tambahan dari filter yang sangat besar bila dibandingkan arus fundamental beban.

4.4.2.4 Beban AC

Sebelum pemasangan filter, beban AC memiliki THDi 12.79 %. Namun setelah filter terpasang, nilai THDi menjadi sedikit bertambah. Secara umum bentuk gelombang arus pada beban AC tidak begitu mengalami perubahan yang cukup signifikan. Berikut ini adalah gambar gelombang arus beban AC sebelum dan sesudah pemasangan filter:



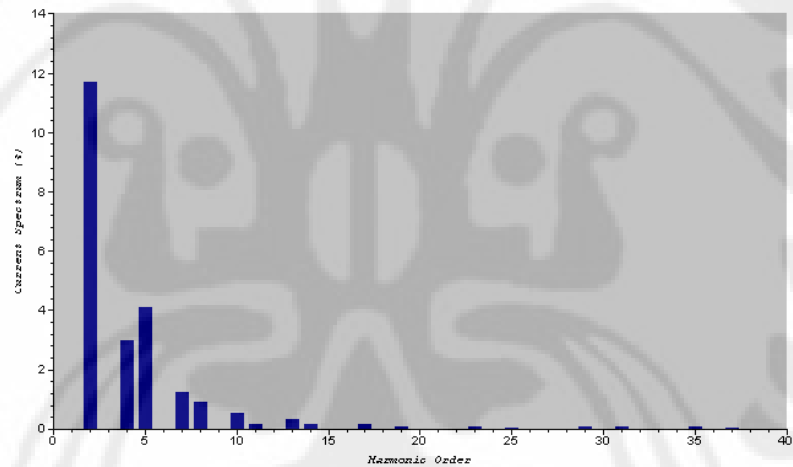
(a)



(b)

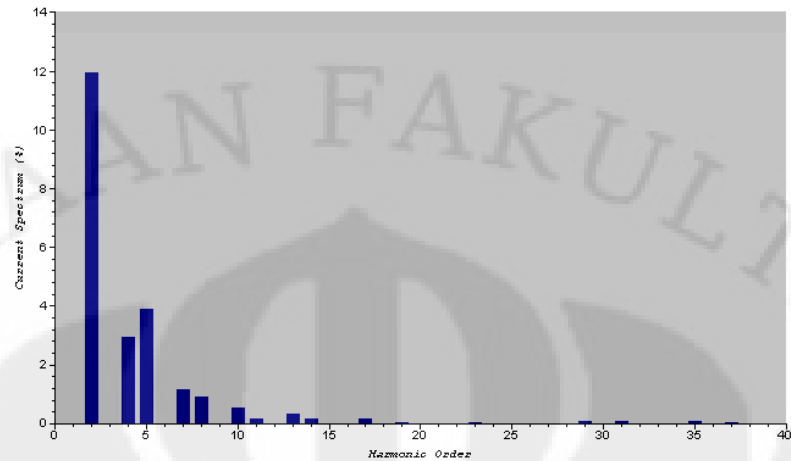
Gambar 4.14 (a) Bentuk gelombang arus beban AC sebelum filter terpasang
 (b) Bentuk gelombang arus beban AC sesudah filter terpasang

Berikut ini adalah gambar spektrum harmonik arus beban AC sebelum dan sesudah penggunaan filter:



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	11.63	0.00	2.97	4.08	0.00	1.22	0.89	0.00	0.53	0.15	0.00	0.32	0.16	0.00	0.15	0.06	0.07
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 6.09 A								
% IHDi	0.01	0.08	0.06	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00									

(a)



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	11.93	0.00	2.95	3.90	0.00	1.17	0.89	0.00	0.53	0.16	0.00	0.31	0.16	0.00	0.14	0.04	0.04
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 6.00 A								
% IHDi	0.01	0.07	0.05	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00									

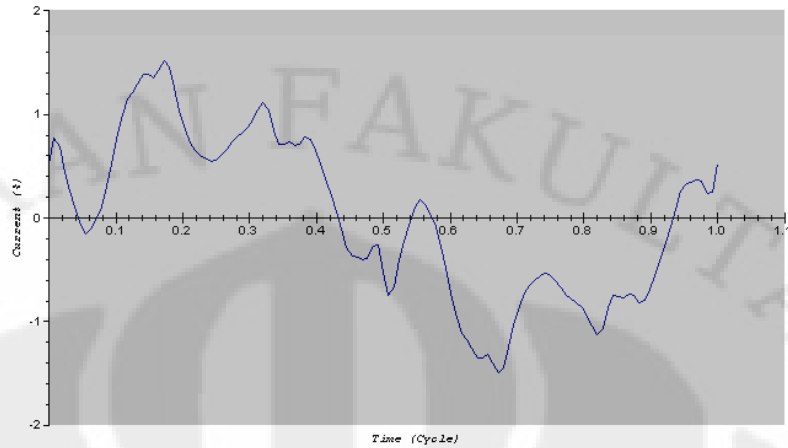
(b)

Gambar 4.15 (a) Bentuk spektrum arus beban AC sebelum filter terpasang
 (b) Bentuk spektrum arus beban AC sesudah filter terpasang

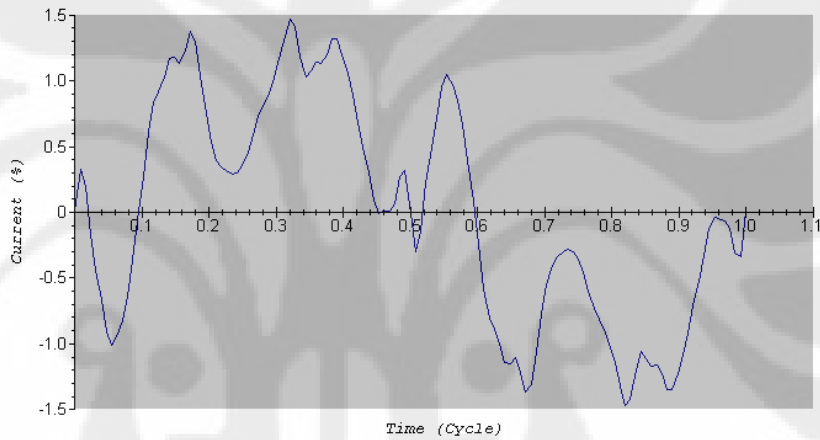
Pada gambar 4.15, terlihat nilai arus fundamental pada saat penggunaan filter mengalami penurunan. Hal ini menandakan kenaikan THD arus terjadi akibat filter hanya mampu memberikan arus fundamental yang kecil sehingga arus fundamental beban mengalami penurunan.

4.4.2.5 Beban PC

Nilai THD arus yang cukup besar berpengaruh terhadap bentuk gelombang arus. Nilai harmonik orde ganjil yang cukup besar menyebabkan gelombang arus mengalami distorsi. Berikut ini adalah gambar gelombang arus sebelum dan sesudah pemasangan filter:



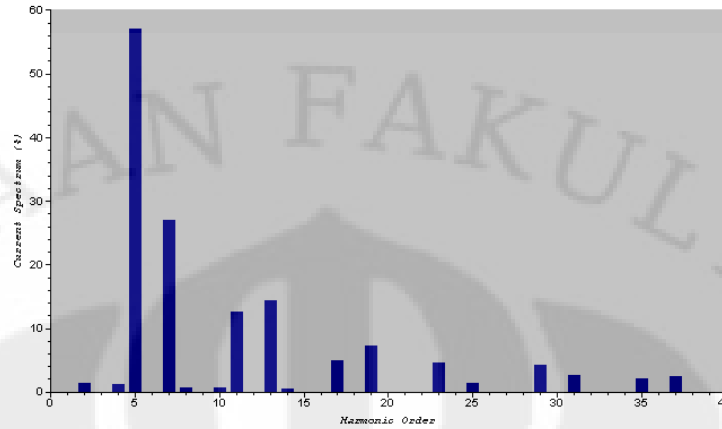
(a)



(b)

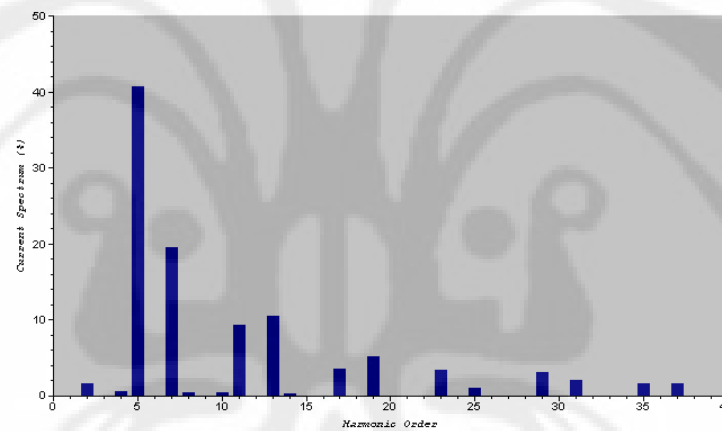
Gambar 4.16 (a) Bentuk gelombang arus beban PC sebelum filter terpasang
(b) Bentuk gelombang arus beban PC sesudah filter terpasang

Pada gambar 4.16, penggunaan penggunaan filter mampu mengurangi distorsi dari gelombang arus. Selain itu, berkurangnya nilai IHD pada orde-orde ganjil yang cukup signifikan menyebabkan nilai THD arus menjadi lebih kecil. Berikut ini adalah gambar spektrum arus untuk beban PC sebelum dan sesudah pemasangan filter:



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	1.36	0.00	1.12	57.63	0.00	27.31	0.73	0.00	0.59	12.68	0.00	14.55	0.41	0.00	5.06	7.28	4.71
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.82 A								
% IHDi	1.44	4.21	2.62	2.20	2.38	0.00	0.00	0.00									

(a)



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	1.64	0.00	0.56	40.70	0.00	19.59	0.48	0.00	0.41	9.23	0.00	10.46	0.29	0.00	3.53	5.11	3.34
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 1.13 A								
% IHDi	1.05	3.10	1.96	1.57	1.66	0.00	0.00	0.00									

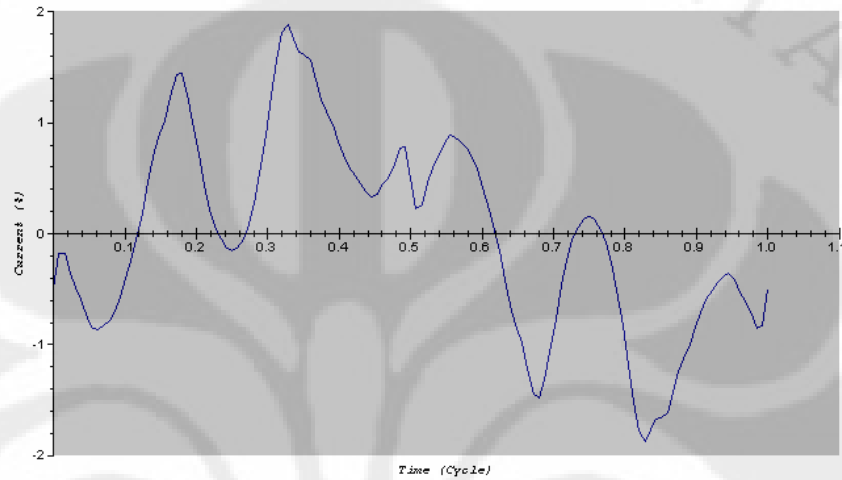
(b)

Gambar 4.17 (a) Bentuk spektrum arus beban PC sebelum filter terpasang
(b) Bentuk spektrum arus beban PC sesudah filter terpasang

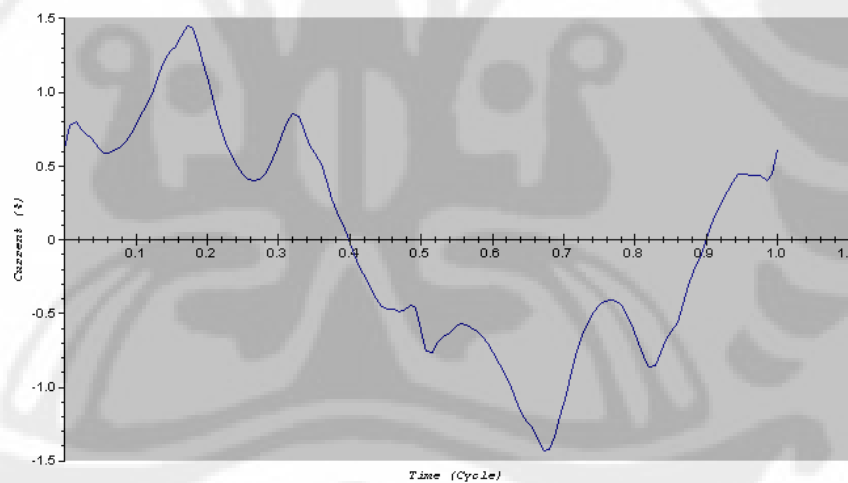
Pada gambar 4.17, secara umum penggunaan filter mampu mengurangi nilai distorsi harmonik. Apabila dilihat dari nilai arus fundamental, penggunaan filter menyebabkan arus fundamental menjadi bertambah. Hal ini menandakan, penurunan nilai THD arus yang sangat besar ini disebabkan oleh injeksi arus yang dilakukan oleh filter.

4.4.2.6 Beban TV

Nilai harmonik pada orde-orde ganjil yang sangat dominan menyebabkan terdistorsinya gelombang arus, sehingga gelombang arus tidak berbentuk sinusoidal. Berikut ini adalah gambar dari harmonik arus sebelum dan sesudah pemasangan filter:



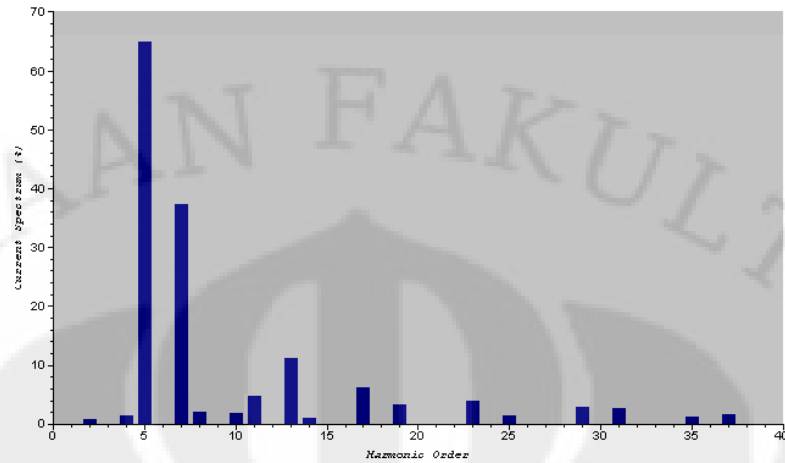
(a)



(b)

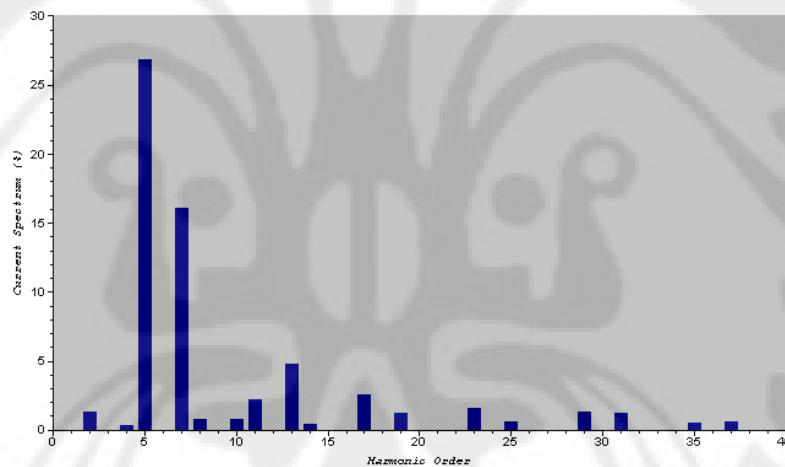
Gambar 4.18 (a) Bentuk gelombang arus beban TV sebelum filter terpasang
(b) Bentuk gelombang arus beban TV sesudah filter terpasang

Pada gambar 4.18, terlihat perubahan bentuk gelombang arus setelah pemasangan filter yang mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Nilai I_{HDI} arus pada orde ganjil mengalami penurunan yang cukup signifikan. Berikut ini adalah gambar spektrum arus sebelum dan sesudah pemasangan filter:



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	0.85	0.00	1.48	65.53	0.00	37.82	1.957	0.00	1.82	4.82	0.00	11.34	0.93	0.00	6.30	3.38	3.95
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.34 A								
% IHDi	1.38	2.90	5.69	1.23	1.60	0.00	0.00	0.00									

(a)



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	1.33	0.00	0.34	26.85	0.00	16.08	0.79	0.00	0.75	2.15	0.00	4.79	0.39	0.00	2.53	1.23	1.62
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.80 A								
% IHDi	0.61	1.33	1.23	0.51	0.60	0.00	0.00	0.00									

(b)

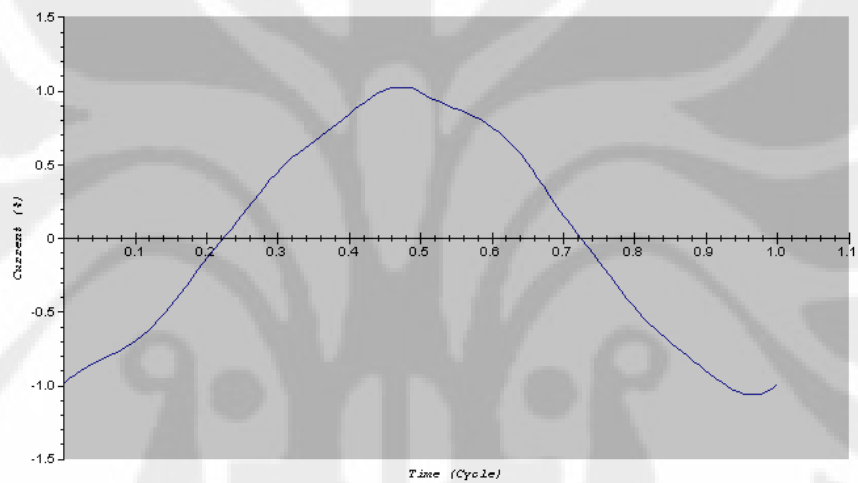
Gambar 4.19 (a) Bentuk spektrum arus beban TV sebelum filter terpasang
(b) Bentuk spektrum arus beban TV sesudah filter terpasang

Pada gambar 4.19, secara umum penggunaan filter mampu mengurangi nilai distorsi harmonik. Apabila dilihat dari nilai arus fundamental, penggunaan filter menyebabkan arus fundamental menjadi bertambah. Hal ini menandakan

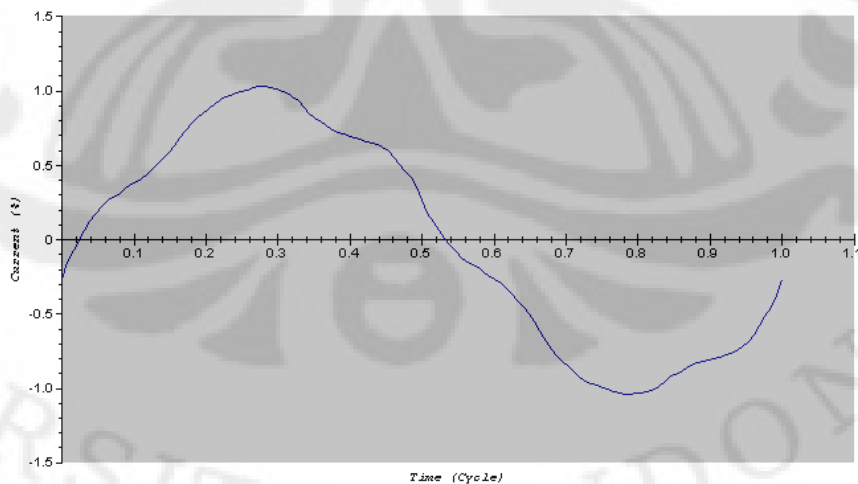
penurunan THD arus yang sangat besar ini bukan merupakan indikasi arus harmonik pada sistem banyak yang tereduksi, akan tetapi lebih disebabkan adanya arus fundamental tambahan dari filter yang sangat besar bila dibandingkan arus fundamental beban.

4.4.2.7 Beban Kulkas

Pemasangan filter yang bertujuan untuk mengurangi THD arus tidak terealisasi untuk beban kulkas. Pemasangan filter menyebabkan gelombang arus mengalami distorsi seperti pada gambar berikut:



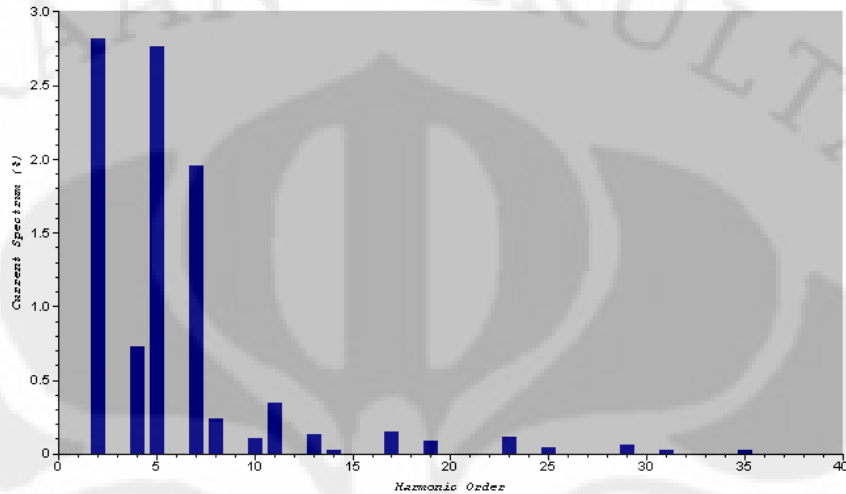
(a)



(b)

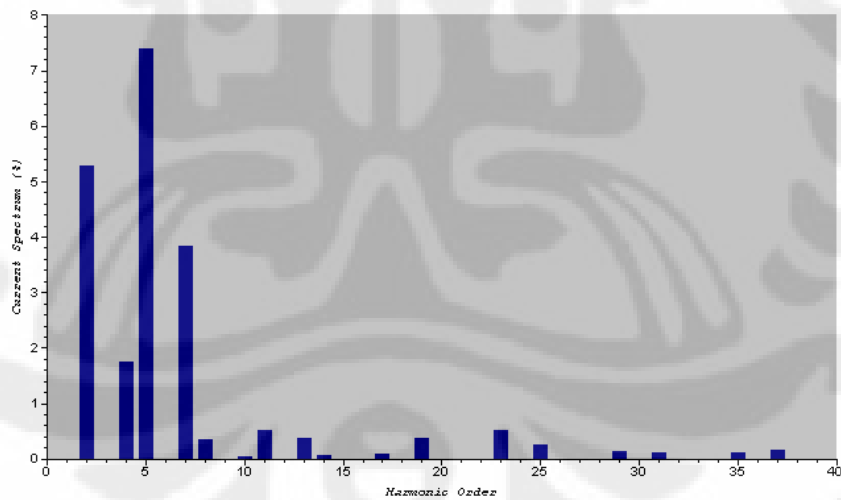
Gambar 4.20 (a) Bentuk gelombang arus beban kulkas sebelum filter terpasang
(b) Bentuk gelombang arus beban kulkas sesudah filter terpasang

Berikut ini adalah gambar spektrum arus beban kulkas sebelum dan sesudah pemasangan filter:



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	2.82	0.00	0.72	2.27	0.00	1.96	0.23	0.00	0.11	0.34	0.00	0.13	0.02	0.00	0.15	0.09	0.12
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.71 A								
% IHDi	0.04	0.06	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00									

(a)



Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
% IHDi	5.28	0.00	1.75	7.39	0.00	3.83	0.35	0.00	0.05	0.51	0.00	0.36	0.07	0.00	0.09	0.37	0.51
Orde	25	29	31	35	37	41	43	47	Nilai arus (I) fundamental= 0.47 A								
% IHDi	0.25	0.13	0.11	0.12	0.15	0.00	0.00	0.00									

(b)

Gambar 4.21 (a) Bentuk spektum arus beban kulkas sebelum filter terpasang
(b) Bentuk spektum arus beban kulkas sesudah filter terpasang

Pada gambar di atas, terlihat pemasangan filter yang bertujuan untuk mengurangi arus harmonik dan THD arus pada sistem ternyata tidak terealisasi disini. Besar THD arus setelah penggunaan filter nilainya meningkat bila dibandingkan dengan THD arus sebelum penggunaan filter.

Secara umum, pemasangan filter pada beban penghasil harmonik telah berhasil mengurangi distorsi harmonik arus. Pada simulasi pengurangan nilai THD tidak diikuti dengan pengurangan arus RMS. Hal ini menandakan, terjadinya penurunan nilai IHD arus pada tiap ordenya. Berikut ini adalah tabel arus pada saat sebelum dan sesudah pemasangan filter:

Tabel 4.10 Arus pada bus sebelum dan sesudah pemasangan filter

Beban	Sebelum		Sesudah	
	I_{fund} (ampere)	I_{RMS} (ampere)	I_{fund} (ampere)	I_{RMS} (ampere)
TL 8 W	0.16	0.18	0.76	0.77
TL 14 W	0.27	0.32	0.83	0.85
TL 18 W	0.35	0.42	0.63	0.67
AC	6.09	6.14	5.99	6.04
TV	0.35	0.44	0.80	0.84
PC	0.82	0.99	1.14	1.26
Kulkas	0.70	0.70	0.47	0.47
Beban Total	8.40	8.51	8.32	8.43

BAB 5

KESIMPULAN

1. Pemasangan filter pada setiap beban lebih efektif mereduksi harmonik arus apabila dibandingkan dengan pemasangan filter untuk beban total.
2. pemasangan filter pada peralatan listrik rumah tangga mempengaruhi nilai arus RMS, terjadi kenaikan nilai arus RMS pada beban TL 8 sebesar 0.59 A, TL 14 sebesar 0.53 A, TL 18 sebesar 0.2 A, beban TV sebesar 0.4 A, beban PC sebesar 0.27 A, dan terjadi penurunan nilai arus untuk beban AC sebesar 0.1, beban kulkas sebesar 0.23 dan untuk beban total sebesar 0.08 A.
3. Pada pemasangan filter untuk beban total, terjadi kenaikan nilai THDi sebesar 0.05 % dan terjadi penurunan arus fundamental.
4. Pada pemasangan filter untuk setiap beban, sebagian besar beban mengalami penurunan THDi, beban TL 8 sebesar 50.71 %, beban TL 14 sebesar 45.51 %, beban TL 14 sebesar 29.86 %, beban TV sebesar 45.3 %, dan beban PC sebesar 19.64 %. Sedangkan beban yang mengalami kenaikan THDi, beban AC sebesar 0.21 % dan beban kulkas sebesar 5.57 %.

DAFTAR ACUAN

[1] Dugan, Roger.C and McGranaghan, Mark.F. Electrical Power Systems Quality. New York : McGraw-Hill. 2003, hal 93-120.

[2] Retno Aita Diantari. "Perbaikan Daya pada Beban Non Linear". Skripsi, Program Sarjana Jurusan Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknik PLN, Jakarta, 2008, hal 19-32.

[3] Rifki Cahyadi. 'Studi Kasus Peluang Penghematan Energi dengan Mereduksi Distorsi Harmonik Menggunakan Filter Pasif'. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2003, hal 1-36.

[4] Rohi, Daniel, Dkk. " Evaluasi Harmonisa di Sisi Pelanggan Sektor Domestik yang Menggunakan Daya 250 VA<daya<2200 VA". Diakses pada 21 November 2008. <http://www.peter.petra.ac.id>

[5]Adrianto. "Optimalisasi Penempatan Filter Pasif untuk Mereduksi Rugi-rugi Daya Akibat Arus Harmonik Pada Industri Baja". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2007, hal1-14

DAFTAR PUSTAKA

Dugan, Roger.C and McGranaghan, Mark.F. Electrical Power Systems Quality. New York : McGraw-Hill. 2003.

Adrianto. "Optimalisasi Penempatan Filter Pasif untuk Mereduksi Rugi-rugi Daya Akibat Arus Harmonik Pada Industri Baja". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2007.

Retno Aita Diantari. "Perbaikan Daya pada Beban Non Linear". Skripsi, Program Sarjana Jurusan Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknik PLN, Jakarta, 2008.

Rifki Cahyadi. "Studi Kasus Peluang Penghematan Energi dengan Mereduksi Distorsi Harmonik Menggunakan Filter Pasif". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2003.

Aris Pramnamto. "Analisis Penggunaan Single Tuned Filter sebagai salah satu Masalah Harmonik pada Beban Rumah Tangga". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2008.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Level harmonik arus hasil pengukuran alat

a. Beban TL 8

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	0.1530	100.00	24.79	21	0.0047	3.10	-140.47
2	0.0007	0.46	101.33	22	0.0012	0.79	150.06
3	0.1053	68.83	-102.62	23	0.0116	7.59	135.71
4	0.0004	0.26	-69.86	24	0.0010	0.66	44.29
5	0.0572	37.39	157.51	25	0.0142	9.26	28.72
6	0.0001	0.08	79.09	26	0.0008	0.51	-64.04
7	0.0525	34.33	71.08	27	0.0150	9.77	-66.33
8	0.0001	0.08	-92.36	28	0.0006	0.39	-170.62
9	0.0445	29.10	-39.25	29	0.0170	11.12	-167.58
10	0.0005	0.30	170.26	30	0.0006	0.38	118.00
11	0.0267	17.46	-137.34	31	0.0158	10.30	86.09
12	0.0010	0.66	37.18	32	0.0009	0.59	10.37
13	0.0220	14.35	137.72	33	0.0137	8.96	-12.81
14	0.0012	0.81	-92.05	34	0.0011	0.69	-102.05
15	0.0156	10.20	32.58	35	0.0123	8.02	-115.93
16	0.0014	0.91	157.18	36	0.0013	0.83	151.87
17	0.0069	4.51	-42.72	37	0.0087	5.70	136.69
18	0.0016	1.07	35.70	38	0.0015	0.98	29.84
19	0.0061	3.99	-107.11	39	0.0052	3.42	42.52
20	0.0016	1.05	-90.65	40	0.0017	1.09	-94.27
TOTAL	0.2136						
THDi		69.78					

b. Beban 14

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	0.2641	100.00	23.51	21	0.0155	5.87	128.10
2	0.0008	0.29	158.12	22	0.0021	0.78	-51.49
3	0.1803	68.28	-106.08	23	0.0180	6.83	60.51
4	0.0008	0.29	90.55	24	0.0019	0.71	-162.06
5	0.0987	37.39	153.42	25	0.0202	7.64	-39.62
6	0.0009	0.33	-4.53	26	0.0016	0.62	85.67
7	0.0943	35.69	63.88	27	0.0189	7.16	-127.94
8	0.0007	0.28	-116.74	28	0.0014	0.53	-29.30
9	0.0797	30.20	-49.13	29	0.0223	8.46	135.16
10	0.0005	0.18	157.32	30	0.0009	0.36	-155.99
11	0.0487	18.46	-147.61	31	0.0205	7.78	28.73
12	0.0003	0.10	113.78	32	0.0006	0.23	82.14
13	0.0416	15.75	125.80	33	0.0176	6.66	-66.11
14	0.0010	0.36	52.25	34	0.0004	0.14	-57.34
15	0.0309	11.72	24.87	35	0.0170	6.45	-167.69
16	0.0017	0.66	-63.82	36	0.0005	0.19	164.58
17	0.0223	8.44	-50.74	37	0.0125	4.75	86.52
18	0.0022	0.82	174.99	38	0.0007	0.28	22.33
19	0.0233	8.83	-142.93	39	0.0091	3.44	-1.21
20	0.0021	0.81	59.19	40	0.0006	0.23	-103.05
TOTAL	0.3694						
THDi		69.93					

c. Beban 18

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	0.3470	100.00	21.87	21	0.0280	8.08	46.61
2	0.0021	0.61	137.15	22	0.0016	0.47	5.87
3	0.2358	67.94	-111.12	23	0.0172	4.95	-30.14
4	0.0009	0.26	68.04	24	0.0023	0.66	-113.25
5	0.1249	35.98	146.30	25	0.0179	5.14	-121.42
6	0.0015	0.44	-13.70	26	0.0025	0.73	134.14
7	0.1229	35.42	57.67	27	0.0117	3.38	147.75
8	0.0011	0.32	-112.80	28	0.0026	0.74	26.41
9	0.1110	31.98	-55.86	29	0.0133	3.84	75.72
10	0.0014	0.41	175.68	30	0.0025	0.72	-83.00
11	0.0790	22.77	-156.20	31	0.0132	3.80	-27.07
12	0.0018	0.52	62.33	32	0.0023	0.66	169.99
13	0.0766	22.07	107.59	33	0.0114	3.30	-108.75
14	0.0012	0.36	-43.24	34	0.0021	0.59	54.10
15	0.0661	19.04	-3.23	35	0.0143	4.12	155.18
16	0.0013	0.38	-116.30	36	0.0013	0.38	-61.31
17	0.0482	13.89	-103.73	37	0.0128	3.69	51.33
18	0.0014	0.39	127.26	38	0.0009	0.26	-174.01
19	0.0420	12.11	155.22	39	0.0129	3.71	-37.44
20	0.0005	0.14	70.05	40	0.0005	0.15	65.58
TOTAL	0.4921						
THDi		70.91					

d. Beban AC

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	5.5023	100.00	-11.09	21	0.0057	0.10	-169.26
2	0.5668	10.30	-17.18	22	0.0064	0.12	170.52
3	0.3769	6.85	115.45	23	0.0033	0.06	-69.74
4	0.1450	2.63	-124.89	24	0.0007	0.01	103.64
5	0.1987	3.61	122.27	25	0.0070	0.13	-154.89
6	0.0616	1.12	-176.38	26	0.0015	0.03	24.02
7	0.0594	1.08	-9.65	27	0.0051	0.09	134.28
8	0.0432	0.79	108.12	28	0.0020	0.04	-159.59
9	0.0534	0.97	154.11	29	0.0036	0.07	25.17
10	0.0258	0.47	56.15	30	0.0027	0.05	140.31
11	0.0070	0.13	90.97	31	0.0029	0.05	-85.34
12	0.0138	0.25	30.59	32	0.0027	0.05	74.06
13	0.0152	0.28	-0.16	33	0.0036	0.07	-157.66
14	0.0079	0.14	26.17	34	0.0025	0.05	-10.77
15	0.0042	0.08	102.56	35	0.0029	0.05	116.84
16	0.0060	0.11	-7.32	36	0.0021	0.04	-91.56
17	0.0070	0.13	-68.03	37	0.0006	0.01	56.88
18	0.0079	0.14	-47.16	38	0.0020	0.04	-177.26
19	0.0027	0.05	-46.44	39	0.0015	0.03	-55.02
20	0.0047	0.09	-92.29	40	0.0020	0.04	96.07
TOTAL	5.5510						
THDi		13.21					

e. Beban PC

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	0.8236	100.00	1.95	21	0.0614	7.46	4.74
2	0.0108	1.31	98.85	22	0.0022	0.27	165.56
3	0.6775	82.26	-178.85	23	0.0374	4.54	-158.78
4	0.0089	1.08	-76.25	24	0.0014	0.17	-0.19
5	0.4579	55.60	-0.54	25	0.0115	1.39	101.84
6	0.0075	0.92	101.30	26	0.0005	0.07	-86.65
7	0.2170	26.35	174.89	27	0.0285	3.46	-3.72
8	0.0058	0.70	-88.34	28	0.0009	0.11	147.68
9	0.0493	5.99	-59.86	29	0.0335	4.06	-169.05
10	0.0047	0.57	71.51	30	0.0015	0.18	-19.97
11	0.1007	12.23	36.59	31	0.0210	2.55	27.81
12	0.0041	0.50	-122.74	32	0.0008	0.10	162.62
13	0.1156	14.04	-145.13	33	0.0084	1.02	-68.48
14	0.0033	0.40	57.08	34	0.0001	0.02	35.13
15	0.0751	9.11	49.95	35	0.0175	2.12	174.44
16	0.0024	0.29	-99.95	36	0.0003	0.04	-26.93
17	0.0402	4.88	-68.57	37	0.0189	2.30	12.43
18	0.0023	0.28	121.07	38	0.0004	0.05	139.84
19	0.0578	7.02	165.95	39	0.0105	1.28	-137.40
20	0.0026	0.31	-29.14	40	0.0001	0.01	-75.26
TOTAL	1.1998						
THDi		72.72					

f. Beban TV

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	0.3330	100.00	4.76	21	0.0141	4.23	-26.37
2	0.0027	0.80	27.72	22	0.0023	0.70	10.33
3	0.2834	85.09	-179.21	23	0.0124	3.71	167.21
4	0.0046	1.39	-144.56	24	0.0025	0.75	-146.56
5	0.2052	61.61	0.53	25	0.0043	1.30	-7.97
6	0.0058	1.75	49.77	26	0.0027	0.80	57.30
7	0.1184	35.56	179.21	27	0.0044	1.31	7.75
8	0.0062	1.85	-115.17	28	0.0022	0.65	-99.23
9	0.0423	12.69	-8.28	29	0.0091	2.73	-171.81
10	0.0056	1.70	82.44	30	0.0020	0.59	103.13
11	0.0151	4.53	44.26	31	0.0084	2.53	16.67
12	0.0045	1.36	-79.25	32	0.0014	0.43	-55.16
13	0.0355	10.66	-156.30	33	0.0045	1.35	-135.51
14	0.0029	0.87	121.19	34	0.0008	0.23	138.13
15	0.0338	10.14	26.46	35	0.0039	1.16	125.19
16	0.0014	0.42	-41.08	36	0.0001	0.04	-22.30
17	0.0197	5.92	-135.96	37	0.0050	1.50	-16.39
18	0.0002	0.05	-53.68	38	0.0005	0.14	30.50
19	0.0106	3.18	107.65	39	0.0045	1.36	176.81
20	0.0014	0.42	167.52	40	0.0006	0.19	-143.84
TOTAL	0.5031						
THDi		74.95					

g. Beban Kulkas

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	0.6732	100.00	-49.76	21	0.0006	0.08	171.70
2	0.0178	2.65	55.60	22	0.0003	0.04	90.63
3	0.0541	8.03	85.29	23	0.0007	0.11	-27.13
4	0.0046	0.68	135.39	24	0.0003	0.05	69.10
5	0.0175	2.60	73.64	25	0.0003	0.04	33.63
6	0.0024	0.35	79.95	26	0.0002	0.03	61.84
7	0.0124	1.84	-49.44	27	0.0001	0.02	-144.30
8	0.0015	0.22	39.40	28	0.0005	0.07	99.63
9	0.0014	0.21	-156.82	29	0.0004	0.06	-21.28
10	0.0007	0.10	-11.48	30	0.0001	0.02	104.46
11	0.0022	0.32	-123.72	31	0.0001	0.02	63.73
12	0.0004	0.06	-59.48	32	0.0001	0.02	79.07
13	0.0008	0.12	107.98	33	0.0001	0.01	-117.49
14	0.0001	0.02	-159.42	34	0.0005	0.08	-77.38
15	0.0015	0.23	169.50	35	0.0001	0.02	43.55
16	0.0001	0.02	59.93	36	0.0005	0.08	117.43
17	0.0009	0.14	-57.45	37	0.0000	0.00	103.62
18	0.0002	0.02	19.87	38	0.0004	0.06	19.96
19	0.0006	0.08	65.37	39	0.0001	0.01	-72.49
20	0.0002	0.03	69.01	40	0.0003	0.04	-58.29
TOTAL	0.6760						
THDi		9.05					

h. Beban Dispenser

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	1.8541	100.00	-13.17	21	0.0024	0.13	-123.69
2	0.0123	0.66	-1.54	22	0.0005	0.02	-178.99
3	0.0559	3.01	88.54	23	0.0019	0.10	-5.14
4	0.0032	0.17	-177.03	24	0.0002	0.01	69.77
5	0.0221	1.19	123.78	25	0.0006	0.04	-140.63
6	0.0020	0.11	69.26	26	0.0003	0.02	-66.93
7	0.0226	1.22	-11.11	27	0.0007	0.04	-81.17
8	0.0010	0.05	-11.24	28	0.0005	0.03	136.83
9	0.0089	0.48	-155.85	29	0.0014	0.07	37.94
10	0.0005	0.03	-97.56	30	0.0004	0.02	-109.32
11	0.0026	0.14	-98.24	31	0.0006	0.03	162.39
12	0.0003	0.02	21.93	32	0.0004	0.02	-138.49
13	0.0022	0.12	32.10	33	0.0005	0.03	-75.16
14	0.0003	0.02	107.40	34	0.0002	0.01	-67.96
15	0.0040	0.22	-126.79	35	0.0006	0.03	35.22
16	0.0005	0.03	100.41	36	0.0003	0.01	-128.40
17	0.0039	0.21	-14.91	37	0.0003	0.02	77.57
18	0.0003	0.01	-38.63	38	0.0002	0.01	163.59
19	0.0004	0.02	105.77	39	0.0006	0.03	13.66
20	0.0007	0.04	-147.95	40	0.0001	0.01	-31.64
TOTAL	1.8552						
THDi		3.59					

Lampiran 2:

Level harmonik arus hasil perhitungan manual pada beban total sebelum filter terpasang

Orde	Level harmonik		
	I max	Fasa	% THD
1	7.7883	-9.00	100
2	0.5670	-14.13	7.2805
3	1.2817	5.34	16.4570
4	0.1531	55.21	1.9662
5	0.4487	45.08	5.7617
6	0.0573	-9.98	0.7354
7	0.2795	-59.07	3.5887
8	0.0328	-61.78	0.4206
9	0.2649	-51.14	3.4010
10	0.0350	64.76	0.4497
11	0.0427	0.44	0.5484
12	0.0123	5.99	0.1577
13	0.1811	-13.39	2.3250
14	0.0115	40.54	0.1475
15	0.2085	28.45	2.6777