

**PERANCANGAN FILTER LCL UNTUK APLIKASI PADA INVERTER  
SATU FASA KELUARAN *PHOTOVOLTAIC***

**TUGAS AKHIR**

Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program Strata-1

Pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Andalas

Oleh :

**AVIYUDI**

**BP. 1010952001**

Pembimbing :

**Ir.Refdinal Nazir, Ph.D**

**NIP. 19580928 198603 1 001**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS ANDALAS  
PADANG  
2014**

## **ABSTRACT**

*The using of an inverter as an equipment of converting the DC power generated from photovoltaic into AC power for household load cause side effects on the system, i.e. the emergence of harmonics. Harmonic that arises is dominated in the third orde. In this study, it's carried out the design of the LCL filter that used to reduce harmonic generated by the inverter using the incandescent lamp load. From the using of this reducing harmonic equipment such as LCL filter can reduce the Total Harmonic Distortion of voltage (THD<sub>v</sub>) up to 5.8% and Total Harmonic Distortion of the current (THD<sub>i</sub>) up to 6.8% among all of the load conditions.*

*Keyword : One phase inverter, photovoltaic, harmonic, Total Harmonic Distortion, LCL Filter.*

## **ABSTRAK**

*Penggunaan inverter sebagai alat pengkonversi listrik DC yang dihasilkan dari photovoltaic menjadi listrik AC untuk beban rumah tangga menimbulkan efek samping pada sistem yang digunakan yaitu timbulnya harmonisa. Harmonisa yang timbul didominasi pada orde ke ? 3. Pada penelitian ini, dilakukan perancangan filter LCL yang digunakan untuk mereduksi harmonisa yang ditimbulkan oleh inverter tersebut dengan menggunakan beban lampu pijar. Dari penggunaan alat pereduksi harmonisa berupa filter LCL dapat mengurangi Total Harmonic Distortion of voltage (THDv) sampai 5.8 % dan Total Harmonic Distortion of current (THDi) sampai 6.8% di antara seluruh kondisi beban .*

*Kata Kunci : Inverter satu fasa, photovoltaic, harmonisa, total harmonic distortion, filter LCL.*

**LEMBAR PENGESAHAN**

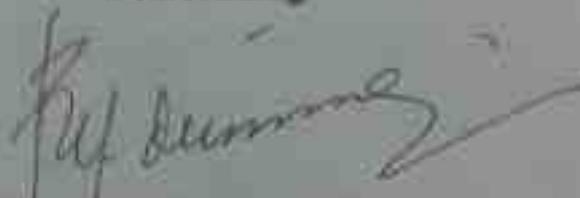
**PERANCANGAN FILTER LCL UNTUK APLIKASI PADA *INVERTER*  
SATU FASA KELUARAN *PHOTOVOLTAIC***

**Lulus Sidang Tugas Akhir**

**27 Oktober 2014**

**Disetujui Oleh:**

**Pembimbing**



**REFDINAL NAZIR, Ph.D**

**NIP. 195809281986031001**

**Mengetahui:**

**Ketua Jurusan Teknik Elektro**



**Ariadi Hazmi, Dr.Eng**

**NIP.197503141999031003**

## *Alhamdulillahirobbil'alamiin*

*Puji dan Syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia – Nya serta shalawat dan salam kepada junjungan umat, Nabi Muhammad SAW.*



Kupersembahkan sebuah karya kecil ini kepada :

Keluarga Tersayang

Alm. Mama, Afridayeti? terima kasih atas kasih sayang yang engkau berikan selama ini mama, dalam setiap tawa dan tangisku selalu merindukanmu, semoga engkau bahagia di sisi ? Nya di sana? *you are an amazing woman that had been present in my entire life?* . Papa, Ardiyanto? terima kasih atas segala daya dan upaya engkau berikan sehingga anakmu ini telah berhasil hingga sampai saat ini? terima kasih papa? *you are my hero in my life?* kakak, uni Thesya, terima kasih atas kasih sayang, nasihat, perhatian dan semangat yang tak henti-hentinya diberikan, sekarang adikmu telah menjadi Sarjana Teknik ☺

For my lovely, *Devi Syani*, special thanks to you, for your love, care, support, time, and your pray so I can finish this study ☺

**Untuk sahabat dan keluargaku:**

LKEE3 Team

Risman dan Dayat, kita telah sama ? sama menempuh perjuangan ini. Sist Isra, semoga dapat menyeimbangkan jadwal akademik dan keluarga, salam utk Haadziq juga, Sist Rahmi (amoy), tetap semangat dan berjuang untuk menyelesaikan studi, insyaAllah sedikit lagi bisa tercapai. Terima kasih kepada Icad, Rara, Rudi, Fani atas supportnya, lanjutkan perjuangan untuk menjalankan LKEE menjadi lebih baik. Terima kasih pula kepada Ando, Randa, Rahmat (Amaik), dan Inop, amanah yang diberikan semoga dapat diemban dengan baik.

Thanks for All of You

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbi'lāmiin, Puji syukur kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **?PERANCANGAN FILTER LCL UNTUK APLIKASI PADA INVERTER SATU FASA KELUARAN *PHOTOVOLTAIC*?.** Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada baginda nabi Muhammad SAW yang menjadi suri tauladan yang terbaik yang selalu menginspirasi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan perkuliahan Strata 1 ( S1 ) di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas. Dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr.Eng.Ariadi Hazmi, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas Padang.
2. Bapak Refdinal Nazir, Ph.D selaku pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberikan ilmu, arahan dan masukan bagi penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Rekan ? rekan di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Risman, Dayat, Ami, Isra, Icad, Rara, Rudi, Fani, Ando, Randa, Amaik, dan Inop yang telah memberi motivasi dan semangat selama pelaksanaan tugas akhir ini.
4. Semua pihak yang telah membantu memberikan dukungan moril maupun materil yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu .

Usaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini tidak luput dari kekurangan karena keterbatasan pengetahuan dan kekhilafan penulis. Oleh karena itu penulis mengharapkan masukan, saran, dan kritik yang membangun dari pembaca untuk kesempurnaan tugas akhir ini yang dapat disampaikan ke *herosky@rocketmail.com*.

Akhir kata penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat serta wawasan kita semua. Mudah-mudahan Allah SWT memberkati usaha yang telah kita lakukan, aamiin.

Padang, Oktober 2014

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Harmonisa .....	6
2.2.1 Pengertian Harmonisa.....	6
2.2.2 Sumber Harmonisa .....	7
2.2.3 Jenis Harmonisa.....	9
2.2.4 Indeks Harmonisa .....	10
2.2.5 Efek Harmonisa .....	12

2.2.6	Standar Harmonisa.....	14
2.2.7	Pengukuran Harmonisa.....	16
2.2.7.1	Penentuan <i>Point of Common Coupling</i> (PCC) .....	16
2.2.7.2	Alat Ukur Kualitas Daya CA.8220.....	17
2.2	Karakteristik Beban Nonlinier .....	17
2.3	Pengurangan Harmonisa pada Sistem yang Ada .....	19
2.3.1	Filter Harmonisa .....	19
2.3.2	Filter Pasif.....	22
2.3.3	Filter Aktif .....	24
2.3.4	Filter LCL .....	26
2.3.4.1	Perancangan Filter LCL .....	27

### **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1	Tinjauan Umum.....	31
3.2	Spesifikasi Peralatan yang Digunakan .....	33
3.3	Perancangan Sistem.....	34
3.4	Skema Rangkaian Pengujian Harmonisa dari <i>Inverter</i> SPWM .....	36
3.5	Simulasi Perancangan Alat.....	37

### **BAB IV HASIL DAN ANALISA**

4.1	Hasil Pengujian.....	44
-----	----------------------	----

4.1.1	Pengukuran <i>Total harmonic Distorsion</i> (THD) pada Sistem .....	44
4.1.2	Analisis Perancangan Alat Pereduksi Harmonisa .....	50
4.2	Analisa.....	51
 <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
5.1	Kesimpulan.....	54
5.2	Saran.....	55
DAFTAR KEPUSTAKAAN .....		56
 <b>LAMPIRAN A PERHITUNGAN KOMPONEN FILTER LCL</b>		
<b>LAMPIRAN B GELOMBANG, DAFTAR HARMONISA, SPEKTRUM DAN DAYA</b>		

## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
$V_{RMS}$	Tegangan <i>Output Inverter</i>	Volt
Pn	Daya Aktif yang dihasilkan	Watt
$f_g$	Frekuensi <i>Grid</i> referensi pada inverter	Hertz
$f_{sw}$	Frekuensi <i>Switching</i> di <i>inverter</i>	Hertz
x	Persentase variasi faktor daya	%
a	Persentase <i>ripple</i> pada arus <i>rating</i>	%
Ka	Persentase redaman yang digunakan	%
m	Indeks modulasi <i>inverter</i>	-
r	Rasio perbandingan antara induktansi di sisi <i>grid</i> dan induktansi di sisi <i>inverter</i>	-
Zb	Impedansi <i>base</i>	
Cb	Kapasitansi <i>base</i>	uF
Cf	Kapasitor yang digunakan pada filter	uF
$L_1$	Induktor pada filter yang terhubung ke sisi <i>inverter</i>	mH
$L_2$	Induktor pada filter yang terhubung ke sisi transformator	mH
Rf	Resistor yang terhubung seri dengan kapasitor pada filter	

## DAFTAR SINGKATAN

<b>Singkatan</b>	<b>Kepanjangan</b>
IHD	<i>Individual Harmonic Distortion</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Akibat Dari Polaritas Komponen Harmonik .....	13
Tabel 2.2.	Batas Harmonik Tegangan Berdasarkan IEEE-519.....	15
Tabel 2.3.	Batas Harmonik Arus Berdasarkan IEEE-519.....	15

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Bentuk Gelombang Arus Terdistorsi .....	6
Gambar 2.2.	Bentuk gelombang arus dan tegangan.....	7
Gambar 2.3.	Spektrum urutan orde harmonisa .....	9
Gambar 2.4.	Pemilihan PCC dimana Konsumen Lain Bisa Dilayani.....	16
Gambar 2.5.	Skema pemasangan CA 8220 pada sistem satu fasa ( kiri ), sistem tiga fasa seimbang ( kanan ).....	17
Gambar 2.6.	Rangkaian Pengganti untuk Beban Nonlinier .....	18
Gambar 2.7.	Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Beban Nonlinier.....	18
Gambar 2.8.	Rangkaian Filter Beban Nonlinear .....	20
Gambar 2.9.	(a) <i>shunt filter</i> (b) <i>double tuned shunt filter</i> (c) <i>second order shunt filter</i> .....	23
Gambar 2.10.	<i>Boost Regulator</i> .....	24
Gambar 2.11.	<i>Active power filter topologies implemented with PWM-VSI (a) shunt active power filter (b) series active power filter (c) Hybrid active power filter</i> .....	25
Gambar 2.12	Filter LCL .....	26
Gambar 3.1.	Flowchart metode penelitian .....	32
Gambar 3.2.	Rangkaian ekivalen filter LCL.....	33
Gambar 3.3.	Skema Rangkaian Penelitian.....	36
Gambar 3.4.	Rangkaian Pengujian Sebelum Menggunakan Filter .....	38

Gambar 3.5.	Gelombang <i>Output</i> dan Spektrum Harmonisa Gelombang Arus Sebelum Menggunakan Filter .....	39
Gambar 3.6.	Gelombang <i>Output</i> dan Spektrum Harmonisa Gelombang Tegangan Sebelum Menggunakan Filter .....	40
Gambar 3.7.	Rangkaian Pengujian setelah Dipasang Filter Harmonisa .....	41
Gambar 3.8.	Gelombang <i>Output</i> dan Spektrum Harmonisa Gelombang Arus Setelah Menggunakan Filter .....	42
Gambar 3.9.	Gelombang <i>Output</i> dan Spektrum Harmonisa Gelombang Tegangan Setelah Menggunakan Filter.....	43
Gambar 4.1.	Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 20 W.....	45
Gambar 4.2.	Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 40 W.....	46
Gambar 4.3.	Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 60 W.....	47
Gambar 4.4.	Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 75 W.....	48

Gambar 4.5. Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 125 W..... 49

Gambar 4.6. Rangkaian ekivalen filter LCL..... 51

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pada masa sekarang ini, energi listrik menjadi suatu kebutuhan utama bagi kehidupan manusia. Hampir di seluruh aspek kehidupan manusia membutuhkan energi listrik. Semakin maju teknologi yang digunakan oleh manusia, maka energi listrik yang dibutuhkan juga semakin besar.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik yang dikonsumsi oleh manusia, tidak memiliki jumlah yang sebanding dengan jumlah energi listrik yang tersedia. Hal ini disebabkan sebagian besar sumber yang digunakan oleh produsen listrik ( PLN ) untuk menghasilkan energi listrik memiliki jumlah yang terbatas atau tidak dapat diperbaharui.

Untuk mengatasi masalah tersebut, saat ini manusia mulai menggunakan sumber energi yang dapat diperbaharui agar energi yang tersedia dapat mencukupi jumlah energi listrik yang dikonsumsi oleh manusia. Sumber – sumber energi listrik yang dapat diperbaharui tersebut berupa air, angin, tenaga surya, panas bumi, dan lain – lain.

Salah satu energi yang dapat diperbaharui yang biasa digunakan oleh manusia adalah dengan menggunakan sel surya. Sel surya adalah suatu teknologi yang dapat mengubah energi sinar matahari secara langsung menjadi energi listrik. Sel surya ini banyak digunakan untuk penyediaan tenaga listrik bagi penerangan, pompa air, telekomunikasi, dan lain sebagainya. Pemanfaatan sistem

sel surya sebagai pembangkit tenaga listrik telah banyak diterapkan, baik yang menghasilkan daya rendah maupun yang berdaya tinggi[1].

Untuk penggunaan sel surya pada rumah tangga, diperlukan adanya suatu alat yang dinamakan *inverter* untuk mengubah listrik DC ( *direct current* ) yang keluar dari panel surya menjadi listrik AC ( *alternate current* ). Hal ini disebabkan karena penggunaan alat – alat elektronik yang ada di rumah tangga dominan beroperasi dengan energi listrik AC ( *alternate current* ) sehingga dibutuhkan adanya *inverter*.

*Inverter* berfungsi untuk mengubah gelombang DC menjadi gelombang AC. Masukan dari *inverter* adalah gelombang DC, yang juga dapat berasal selain dari *solar cell*, seperti baterai, rectifier, serta sumber DC yang lainnya. Selain pada beban rumah tangga, *inverter* juga digunakan pada motor AC, UPS, regulator tegangan dan frekuensi[2].

Pada prinsipnya, penggunaan *inverter* sebagai pengubah energi listrik DC menjadi listrik AC sangat diperlukan dalam sistem pembangkitan listrik dari sumber listrik searah. Namun, penggunaan *inverter* juga masih memiliki kekurangan. Hal ini disebabkan *inverter* termasuk salah satu peralatan elektronika daya yang bisa menghasilkan harmonisa. Timbulnya harmonisa ini dapat menyebabkan pemanasan, turunnya efisiensi dari sistem yang digunakan, yang juga menyebabkan nilai  $\cos \phi$  semakin kecil karena besarnya *losses* yang terjadi.

Oleh karena itu, diperlukan adanya perancangan filter terhadap keluaran dari *inverter* tersebut, supaya *ripple* gelombang keluaran dari *inverter* dapat diminimalisir sehingga lebih mendekati sinyal sinusoidal.

Filter harmonisa yang biasa digunakan pada sistem *photovoltaic* yang terkoneksi dengan grid dengan *inverter* SPWM sebagai sumber harmonisanya adalah filter berupa komponen L ( induktor ), filter LC, dan filter LCL. Pada penelitian kali ini, penulis akan membahas mengenai filter LCL yang digunakan sebagai pereduksi harmonisa yang dihasilkan oleh *inverter* SPWM.

Alasan penulis untuk memilih filter LCL ini yaitu pada filter LCL ini, induktor yang dirancang terdapat pada dua sisi, yaitu pada sisi *inverter* dan pada sisi beban. Penggunaan dua buah induktor ini memiliki keuntungan yaitu disamping mereduksi harmonisa yang dihasilkan oleh *inverter* SPWM, induktor yang berada pada sisi beban juga berfungsi untuk mereduksi harmonisa yang ditimbulkan oleh beban yang digunakan.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan pada poin di atas, maka permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana merancang filter pasif yang sesuai untuk meminimalisir harmonisa dari keluaran *inverter* SPWM.

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam pelaksanaan tugas akhir ini adalah :

1. Beban yang digunakan adalah beban resistif berupa lampu pijar.
2. Tidak membahas kondisi saat terhubung ke *grid*.
3. Tidak membahas tentang *inverter* SPWM satu fasa.
4. Tidak membahas tentang *photovoltaic*.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini yaitu perancangan dan pengujian sistem yang telah menggunakan filter pasif sebagai pereduksi *ripple* gelombang keluaran dari *inverter* satu fasa.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini yaitu untuk meminimalisir banyaknya harmonisa yang keluar dari *inverter* satu fasa dengan menggunakan filter pasif berupa komponen LCL. Dengan adanya filter harmonisa ini, listrik yang berasal dari *photovoltaic* dan terhubung ke *inverter* yang digunakan baik terhadap beban maupun dihubungkan ke grid, akan memiliki harmonisa yang minimal sehingga kualitas daya dari listrik yang digunakan juga akan semakin baik.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Dalam penulisan laporan ini tugas akhir ini, penulis menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut :

#### **BAB I           Pendahuluan**

Bab ini terdiri dari sub bab latar belakang, perumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

#### **BAB II          Dasar Teori**

Bab ini membahas mengenai konsep teori-teori pendukung tentang pengertian, sumber, jenis, dan efek dari harmonisa, karakteristik beban non linier, dan filter harmonisa.

#### **BAB III        Metodologi Penelitian**

Bab ini berisikan langkah - langkah penelitian yang akan dilakukan, rangkaian dan komponen – komponen untuk pengujian serta parameter - parameter komponen yang digunakan dalam penelitian.

#### BAB IV Pengujian dan Analisa

Bab ini berisi hasil pengujian yang dilakukan dan juga analisa dari hasil pengujian tersebut.

#### BAB V Penutup

Bab penutup ini terdiri dari kesimpulan dan saran.

LAMPIRAN Lampiran berisikan data - data yang didapatkan dari hasil simulasi dan pengujian laboratorium.

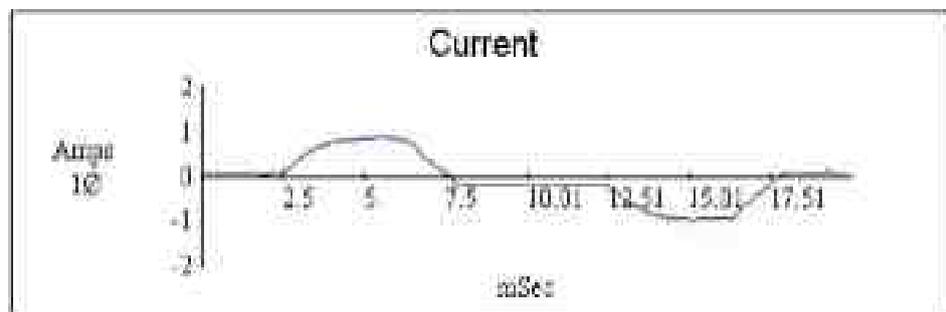
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Harmonisa

##### 2.2.1 Pengertian Harmonisa

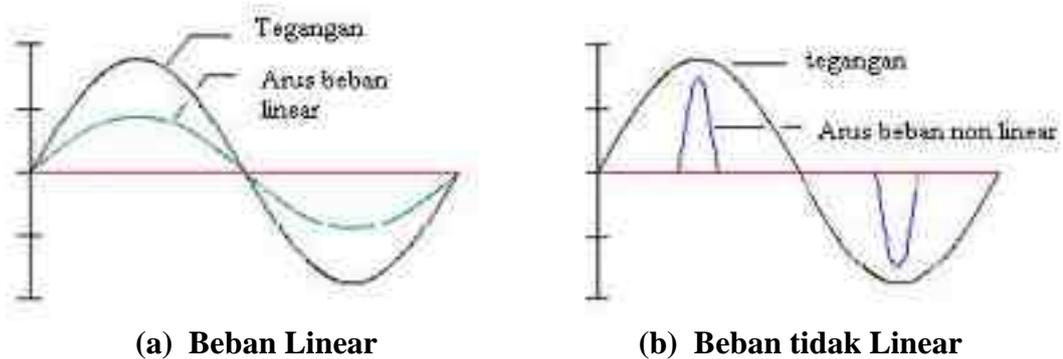
Harmonisa didefinisikan sebagai cacat gelombang sinus yang terjadi disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem dengan gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Gelombang-gelombang ini menumpang pada gelombang aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang asli dengan gelombang harmoniknya[3].



**Gambar 2.1 Bentuk Gelombang Arus Terdistorsi**

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban tidak linier. Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan, sehingga gelombangnya bersih dan tidak terdistorsi. Tidak semua beban yang terpasang merupakan beban linier bahkan dewasa ini sebagian besar beban yang terpasang merupakan beban tidak linier. Pada beban tidak linier beban tidak lagi menggambarkan bentuk gelombang arus dan tegangan yang

proporsional. Pemakaian beban tidak linier akan menghasilkan bentuk gelombang arus dan tegangan yang tidak sinusoidal. Akibatnya akan terbentuk gelombang terdistorsi yang akan menghasilkan harmonisa. Perbedaan bentuk gelombang yang dihasilkan oleh beban linier dan beban tidak linier dapat dilihat pada gambar 2.2.[5]



**Gambar 2.2 Bentuk gelombang arus dan tegangan[5]**

Gambar 2.2 memperlihatkan perbedaan bentuk gelombang yang dihasilkan oleh beban linier dan beban tidak linier. Bentuk gelombang yang tidak sinusoidal ini merupakan gabungan dari bentuk gelombang fundamental dan gelombang yang mengandung sejumlah komponen harmonisa. Jadi harmonisa adalah gelombang arus atau tegangan sinusoidal yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Misalnya bila frekuensi fundamentalnya 50 Hz maka harmonisa ke-2 adalah gelombang sinusoidal dengan frekuensi 100 Hz, harmonisa ke-3 gelombang sinusoidal dengan frekuensi 150 Hz dan seterusnya.

### 2.2.2 Sumber Harmonisa

Sumber utama harmonisa adalah beban non linier. Beban - beban non linier adalah jenis beban yang memiliki bentuk gelombang yang keluarannya tidak

sebanding dengan masukannya, artinya bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan bentuk gelombang masukannya. Beban non linier menyebabkan arus menjadi pulsa yang tidak beraturan dan tegangan menjadi terdistorsi sehingga menimbulkan arus harmonisa pada peralatan.

Beberapa peralatan elektronik yang dapat menyebabkan timbulnya harmonisa adalah :[6]

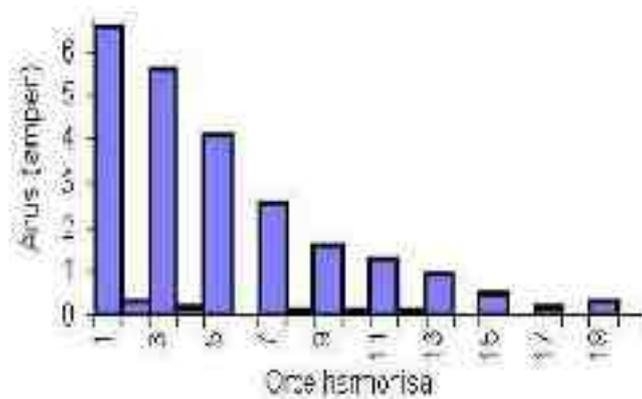
1. *rectifier*,
2. *variable speed drives*,
3. komputer,
4. *uninteruptible power supplies* (UPS),
5. lampu *esensial*,
6. motor listrik,
7. mesin las,
8. dapur busur listrik,
9. *electroplating*
10. dan lain-lain.

Peralatan tersebut dirancang untuk menggunakan arus listrik secara hemat dan efisien karena arus listrik hanya dapat melalui komponen semikonduktornya selama periode pengaturan yang telah ditentukan. Namun disisi lain hal ini menyebabkan gelombang arus dan tegangan mengalami gangguan yang pada akhirnya kembali ke bagian lain sistem. Hal inilah yang akan menyebabkan timbulnya harmonisa pada sistem.

### 2.2.3 Jenis Harmonisa

#### 1. Harmonisa ganjil dan genap [7]

Harmonisa berdasarkan urutan ordenya dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu harmonisa ganjil dan harmonisa genap. Sesuai dengan namanya, harmonisa ganjil adalah harmonisa ke 3, 5, 7, 9, dan seterusnya Sedangkan harmonisa genap adalah harmonisa ke 2, 4, 6, 8, dan seterusnya. Harmonisa pertama merupakan komponen frekuensi fundamental dari gelombang periodik.



**Gambar 2.3 Spektrum urutan orde harmonisa**

#### 2. Harmonisa urutan positif, negatif dan nol

Berdasarkan urutan fasanya, harmonisa dapat dibedakan menjadi tiga macam, yaitu :

##### 1) Harmonisa urutan positif

Harmonisa urutan positif merupakan harmonisa yang mempunyai urutan fasa yang sama dengan harmonisa dasarnya.

Harmonisa tersebut dapat menyebabkan penambahan panas di konduktor, *Circuit Breaker*, dan panel-panel lainnya.

2) Harmonisa urutan negatif.

Harmonisa urutan negatif merupakan harmonisa yang mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan harmonisa dasarnya. Harmonisa urutan negatif dapat menimbulkan panas dan menyebabkan masalah pada motor induksi sehingga menyebabkan perlambatan pada motor tersebut.

3) Harmonisa urutan nol.

Harmonisa urutan nol tidak memproduksi perputaran medan di kedua arah, sehingga menghasilkan panas yang lebih dibandingkan urutan positif dan urutan negatif. Harmonisa ini tidak dapat dihilangkan. Bahaya yang terjadi dari harmonisa urutan nol adalah arus normal yang lebih besar, sehingga arus tersebut dapat menyebabkan kebakaran. Selain itu harmonisa ini tidak menghilangkan arus netral tetapi dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa.

#### **2.2.4 Indeks Harmonisa[3]**

Ada beberapa istilah yang biasa digunakan dalam pengukuran dan perhitungan harmonisa, yaitu :

1. IHD ( *Individual Harmonic Distortion* )

*Individual Harmonic Distortion (IHD)* adalah perbandingan antara nilai rms harmonisa individual terhadap nilai rms fundamentalnya. Misalnya nilai rms harmonisa ketiga adalah 25A dan harmonisa kelimanya 20A, sedangkan nilai rms harmonisa fundamentalnya 60A,

maka:

IHD ketiga adalah

$$IHD_3 = 25A/60A = 0.4167 \text{ atau } 41.67 \%$$

IHD kelima adalah

$$IHD_5 = 20A/60A = 0.3333 \text{ atau } 33.33 \%$$

## 2. THD ( *Total Harmonic Distortion* )

*Total Harmonic Distortion* adalah rasio nilai rms dari komponen harmonisa ke nilai rms dari komponen dasar yang biasanya dinyatakan dalam persen (%). Indeks tersebut digunakan untuk mengukur deviasi dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa dari gelombang sinus sempurna.

Berikut merupakan rumus THD untuk tegangan dan arus yaitu:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.1)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.2)$$

Dimana :

$V_n$  = Nilai Tegangan harmonisa

$I_n$  = Nilai Arus harmonisa

$V_1$  = Nilai tegangan fundamental

$I_1$  = Nilai arus fundamental

$n$  = Komponen harmonisa yang diamati

### 3. RMS ( *Root Mean Square* )

Intensitas dari sebuah sinyal memiliki waktu yang tidak konstan, sehingga untuk menentukannya diperlukan adanya intensitas rata – rata dari sinyal tersebut. RMS ( *Root Mean Square* ) didefinisikan sebagai akar kuadrat dari rata-rata kuadrat fungsi tersebut pada satu periode, maksudnya yaitu :

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (2.3)$$

Sedangkan, untuk perhitungan terhadap parameter tegangan dan arus, yaitu :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2.4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.5)$$

#### 2.2.5 Efek Harmonisa

Efek harmonisa yang timbul pada sistem tenaga listrik tergantung pada sumber harmonisa, letak sumber harmonisa, dan karakteristik jaringan listrik. Harmonisa menimbulkan pengaruh seperti: *over voltage*, interferensi sinyal, isolasi rnenjadi panas, menjadikan peralatan menjadi lebih panas[3].

Urutan	Pengaruh pada motor	Pengaruh pada sistem distribusi
Positif (+)	Menimbulkan medan magnet putar arah maju (forward)	panas
Negatif (-)	Menimbulkan medan magnet putar arah mundur (reverse)	Panas, Arah putaran motor berubah
Nol (0)	-	Panas, Menimbulkan (menambah) arus pada kawat netral

**Tabel 2.1 Akibat Dari Polaritas Komponen Harmonik[7]**

Berikut ini beberapa efek yang ditimbulkan oleh harmonisa terhadap beberapa peralatan listrik, yaitu antara lain[7] :

1. Konduktor

Arus harmonisa dapat menyebabkan penambahan rugi-rugi dan panas pada konduktor. Panas tersebut semakin lama akan mengurangi daya hantarnya dapat meningkatkan rugi-rugi daya dan menurunkan efisiensi.

2. Transformator

Penginduksian terjadi dimana bila arus harmonisa mengalir melewati kumparannya, maka fluks magnetik pada kumparan transformatornya akan menghasilkan rugi-rugi *histerisis* dan *Eddy current*. Gabungan dari rugi-rugi tembaga dan inti besi akan

menyebabkan transformator menjadi *overheat*, dan panas tersebut akan membuat kemampuan isolasi menjadi berkurang.

### 3. CB

Harmonisa berpengaruh pada *CB* yang menggunakan panas untuk mentriapkan bimetal yang ada dalam *CB* jika ada arus yang melebihi ratingnya. Jika ada arus yang tidak normal, *CB* akan menganggap arus yang melewatinya tinggi, dan akan trip karena *CB* mencapai arus *peak*-nya.

### 4. Motor / Generator

Harmonisa pada motor akan menambah rugi-rugi energy pada kumparan dan inti besi stator maupun rotor. pada mesin induksi arus harmonisa akan mnyebabkan bertambah besarnya beda fasa arus dan tegangan pada mesin yang menyebabkan kerusakan mesin.

### 5. Peralatan Konsumen

Harmonisa dapat mempengaruhi tegangan puncak konsumen, menyebabkan interferensi frekuensi pada sistem telekomunikasi dan kualitas gambar pada televisi.

## 2.2.6 Standar Harmonisa

Rekomendasi tingkat *Total Harmonic Distorsion (THD)* untuk arus dan tegangan dicantumkan pada *IEEE-519* tahun 1992. Semua rekomendasi pada *IEEE-519-1992* ditampilkan untuk level tegangan yang berbeda, diantaranya pada 69 kV dan di bawahnya, antara 69,001 sampai 161 kV dan di atas 161 kV[8].

Tegangan di PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
- 69kV	3.0	5.0
69kV – 161kV	1.5	2.5
161kV	1.0	1.5

**Tabel 2.2 Batas Harmonik Tegangan Berdasarkan IEEE-519[9]**

Mengenai distorsi harmonik arus, *IEEE-519* mendefinisikan batas fungsi dari rasio antara arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) pada *PCC* dengan arus fundamental rata-rata berdasarkan kebutuhan maksimum selama 12 bulan ( $I_L$ ). Rangkuman rekomendasi ini terdapat pada Tabel 2.2.

$I_{sc}$  adalah arus hubung singkat pada *point of common coupling (PCC)*. Secara umum, kondisi sistem normal adalah hasil dari kapasitas minimum hubung singkat pada *PCC*. Sehingga perbandingan antara  $I_{sc}/I_L$  digunakan sebagai seberapa besar pengaruh arus saluran terhadap arus maksimum saat hubung singkat.

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)						
$I_{sc}/I_L$	<11	11 h<17	17 h<23	23 h<35	35 h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

**Tabel 2.3 Batas Harmonik Arus Berdasarkan IEEE-519<sup>[9]</sup>**

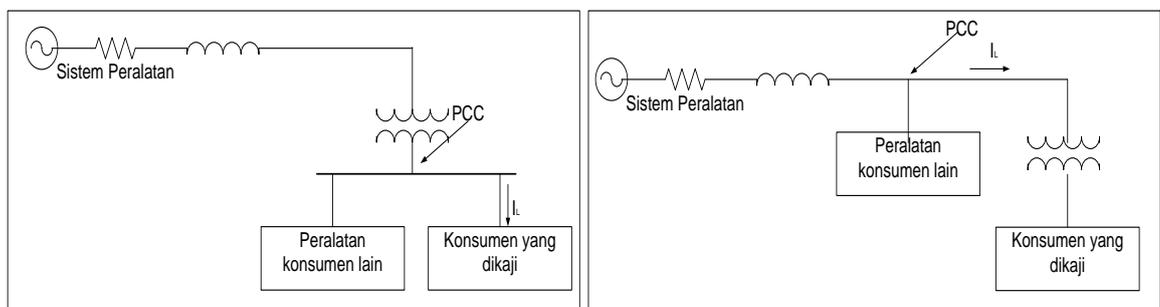
Dengan catatan bahwa:

1. Dengan mengabaikan ratio  $I_{SC} / I_l$  pada *PCC*, semua peralatan pembangkit daya. Harus memenuhi nilai yang diberikan untuk  $I_{SC} / I_l$  ratio  $< 20$ .
2. Harmonisa genap dibatasi 25% dari batas harmonisa ganjil.
3. Distorsi arus yang dihasilkan dalam *DC* tidak diizinkan.
4. *THD* diekspresikan dalam *TDD* yang didasarkan permintaan elektrik selama 15-30 menit.

## 2.2.7 Pengukuran Harmonisa

### 2.2.7.1 Penentuan *Point of Common Coupling (PCC)*[10]

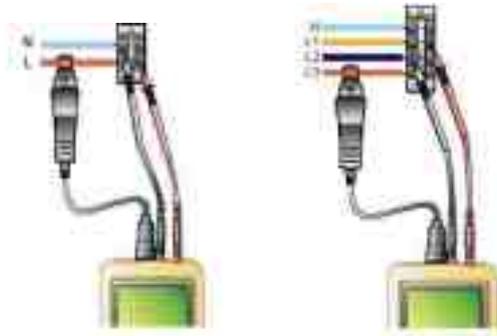
Batas arus paada IEEE-512-1992 diaplikasikan pada *PCC* antara peralatan sistem dan berbagai konsumen. Dengan kata lain *PCC* adalah tempat dimana konsumen lain bisa dilayani sistem. Standar ini mengizinkan untuk prosedur yang sama untuk diaplikasikan pada konsumen pada tempat lain dalam sebuah sistem, hanya nilai batas arus akan berbeda. Asumsinya, *PCC* adalah tempat di sistem yang dapat melayani konsumen lain. *PCC* bisa diletakkan pada transformator sisi primer dan sekunder dari trafo daya, tergantung pada ada atau tidak konsumen yang disuplai oleh trafo tersebut. Seperti gambar 2.4.



**Gambar 2.4 Pemilihan PCC dimana Konsumen Lain Bisa Dilayani**

### 2.2.7.2 Alat Ukur Kualitas Daya CA.8220[11]

CA 8220 adalah alat ukur yang dapat menganalisa daya AC + DC 600 V yang dilengkapi dengan LCD dan juga dapat dikoneksikan dengan PC. Alat ini dapat mengukur nilai efektif, daya, distorsi daya, dan user dapat melihat bentuk dari karakteristik daya satu fasa ( tegangan, arus, daya, harmonik arus atau tegangan, dll ). Akurasi lebih baik dari 1% ( tidak termasuk eror karena sensor arus ).



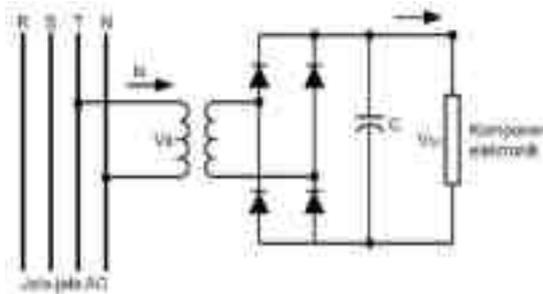
**Gambar 2.5 Skema pemasangan CA 8220 pada sistem satu fasa ( kiri ), sistem tiga fasa seimbang ( kanan ) [11]**

## 2.2 Karakteristik Beban Nonlinier[12]

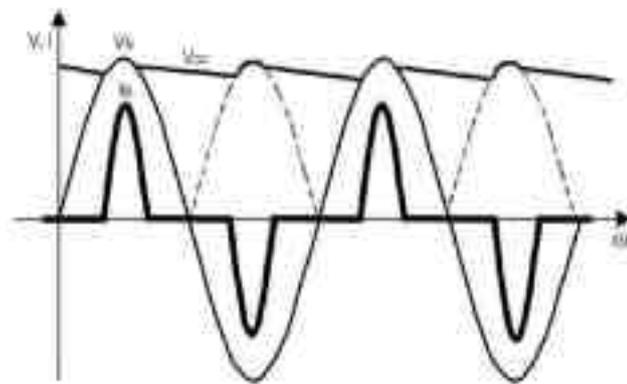
Beban nonlinier adalah beban yang bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya. Beban nonlinier menarik arus dengan bentuk nonsinusoidal, walaupun disuplai dari sumber tegangan sinusoidal.

Untuk mengetahui karakteristik beban nonlinier satu fasa dapat diambil suatu pendekatan dengan menggunakan rangkaian penyearah satu fasa gelombang penuh yang dilengkapi dengan kapasitor perata tegangan DC seperti pada Gambar

2.5. Adanya kapasitor C ini dimaksudkan untuk mendapatkan tegangan DC yang relatif murni yang dikehendaki untuk operasi komponen elektronik. Namun akibatnya arus pada jala-jala sistem  $I_s$  hanya akan mengalir pada saat terjadi pengisian muatan kapasitor C, yaitu di daerah puncak gelombang tegangan jala-jala, sehingga bentuk gelombang arus  $I_s$  tidak proporsional lagi terhadap tegangannya (nonlinier) dan mengalami distorsi (nonsinusoidal), seperti terlihat pada gambar 2.6



**Gambar 2.6 Rangkaian Pengganti untuk Beban Nonlinier**



**Gambar 2.7 Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Beban Nonlinier**

. Dengan demikian arus dari beban elektronik satu fasa akan terdiri dari arus fundamental  $I_F$  yang sama dengan  $I_{s1}$  dan sejumlah komponen arus harmonisa  $I_{Sh}$ . Karena arus jala-jala  $I_s$  berbentuk gelombang bolak-balik yang simetris, maka hanya komponen arus harmonisa orde ganjil (harmonisa orde ke 3, 5, 7,...) saja yang dibangkitkannya.

### **2.3 Pengurangan Harmonisa pada Sistem yang Ada**

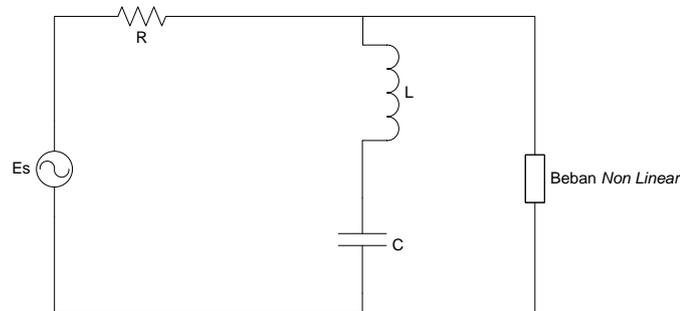
Filter adalah sebuah rangkaian penyeleksi frekuensi yang melewatkan frekuensi yang diinginkan dari masukan ke keluaran dan menahan atau mengeliminasi frekuensi yang tidak diinginkan. Tujuan utama dari filter harmonisa adalah untuk mengurangi amplitudo satu frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber-sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruhan jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem. Banyak sekali cara yang digunakan untuk memperbaiki sistem khususnya meredam harmonisa yang sudah dikembangkan saat ini. Secara garis besar ada beberapa cara untuk meredam harmonisa yang ditimbulkan oleh beban tidak linier yaitu[5] :

- a. Penggunaan filter pasif pada tempat yang tepat, terutama pada daerah yang dekat dengan sumber pembangkit harmonisa sehingga arus harmonisa terjatuh di sumber dan mengurangi penyebaran arusnya.
- b. Penggunaan filter aktif.
- c. Kombinasi filter aktif dan pasif.
- d. Konverter dengan reaktor antar fasa, dan lain-lain.

#### **2.3.1 Filter Harmonisa[3]**

Filter harmonisa dipasang secara paralel dengan peralatan yang merupakan beban nonlinier dan sumber harmonisa. Salah satu jenis filter yang dapat digunakan untuk meredam harmonisa adalah filter pasif. Filter pasif terdiri

dari komponen seperti induktor, kapasitor dan resistor yang dirangkai dengan komponen harmonisa untuk meminimalkan arus harmonisa.



**Gambar 2.8 Rangkaian Filter Beban Nonlinear**

Rangkaian di atas dapat ditulis dengan menggunakan teknik analisis rangkaian. Menggunakan *modern network theory* dapat dipecahkan dengan menggunakan fungsi transfer dengan konsep *zero* dan *pole*. Respon frekuensi dari rangkaian filter di atas dapat dituliskan dengan menggunakan rasio dua polynomial dalam  $s$ , dimana  $s = j\omega$  dan  $\omega = 2\pi f$  sehingga fungsi transfernya dapat dituliskan:

$$T(s) = \frac{E_L}{E_S} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.6)$$

Dimana :

$T(s)$ : Fungsi Transfer

$E_L$ : Tegangan di Beban

$E_S$ : Tegangan di Sumber

$N(s)$  : *Numerator polynomial* sebagai *zero*

$D(s)$  : *Denominator polynomial* sebagai *pole*

Persamaan untuk daya reaktif yang akan dikompensasi yaitu :

$$X_c = \frac{V^2}{Q} \quad (2.7)$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.8)$$

Dari persamaan tersebut, dapat diperoleh nilai kapasitor, yaitu :

$$C = \frac{1}{2\pi fX_c} \quad (2.9)$$

Maka besar induktansi dapat diketahui :

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (2.10)$$

Dan juga untuk menentukan karakteristik impedansi :

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.11)$$

Dimana :

$X_0$  : Impedansi Filter

Karakteristik faktor kualitas :

$$q = \frac{X_0}{r} \quad (2.12)$$

Dimana :

$q$  : Faktor kualitas.

$X_0$  : Impedansi Filter.

$r$  : Tahanan reaktor.

Kualitas dari sebuah filter adalah ukuran ketajaman penalaan filter tersebut dalam mengeliminasi harmonik. Filter dengan  $q$  tinggi ditala pada

frekuensi rendah (misalnya orde kelima), dan nilainya biasanya terletak antara 30 - 60. Perkiraan nilai  $q$  untuk reaktor inti udara adalah 75 dan  $>75$  untuk inti besi.

### 2.3.2 Filter Pasif

Filter pasif banyak digunakan untuk mengkompensasi kerugian daya reaktif akibat adanya harmonisa pada sistem instalasi. Rangkaian filter pasif terdiri dari komponen  $R$ ,  $L$ , dan  $C$ .

Filter Pasif tersusun dari kapasitor dan induktor dengan satu frekuensi yang diatur pada frekuensi tegangan harmonisa yang akan dihilangkan.[7]

$$f_r = 1/2 LC \quad (2.13)$$

Dimana :

$f_r$  : Frekuensi setting.

$L$  : Induktansi.

$C$  : Kapasitansi.

Untuk karakteristik susunan frekuensi setting filter, yaitu :

$$n_r = \frac{f_r}{f_l} \quad (2.14)$$

$n_r$  : Orde dari resonansi.

$f_r$  : Frekuensi setting.

$f_l$  : Frekuensi fundamental.

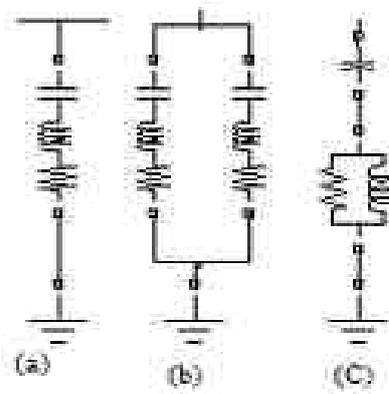
Jenis filter harmonisa ada 2, yaitu [7]:

a) *Resonant shunt filter*

*Resonant shunt filter* tersusun dari komponen kapasitor dan inductor yang disetting pada satu frekuensi harmonisa yang akan dihilangkan (penalaan), seperti pada gambar 2.10

b) *Damped filter*

Pada *arc furnace*, *resonant shunt* harus diredam karena spektrum *arc furnace* terus menerus dapat meningkatkan kemungkinan masuknya arus dengan frekuensi sama dengan frekuensi anti *resonant*. Untuk mengurangi anti *resonant* harus diredam. selain itu pemasangan resonant shunt dalam jumlah yang besar membutuhkan biaya yang besar. *Damped filter* tersusun atas *resonant shunt* dengan sebuah resistor peredam yang ditambahkan pada terminal induktor.



**Gambar 2.9 (a) shunt filter (b) double tuned shunt filter (c) Second order damped shunt filter[14]**

Beberapa batasan filter pasif dalam mengurangi harmonisa arus dan tegangan, yaitu [15] :

- a) Filter pasif hanya akan memfilter frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya.
- b) Operasinya terbatas pada beban tertentu.
- c) Dapat menyebabkan resonansi pada sistem tenaga.
- d) Memiliki karakteristik filter *LC* yang sangat dipengaruhi oleh impedansi sistem yang sulit diketahui secara pasti karena selalu berubah terhadap konfigurasi jaringan.

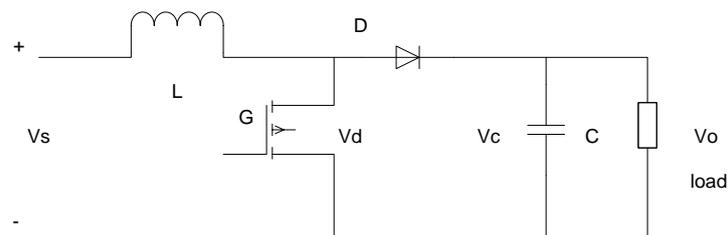
- e) Memiliki desain ukuran dan berat induktor  $L$  dan  $C$  yang cukup besar untuk memfilter arus harmonisa pada orde frekuensi rendah.
- f) Memerlukan sejumlah filter  $LC$  dengan ukuran yang berbeda untuk memfilter sejumlah arus harmonisa dengan masing-masing ordenya.

Beberapa keuntungan filter pasif adalah [16] :

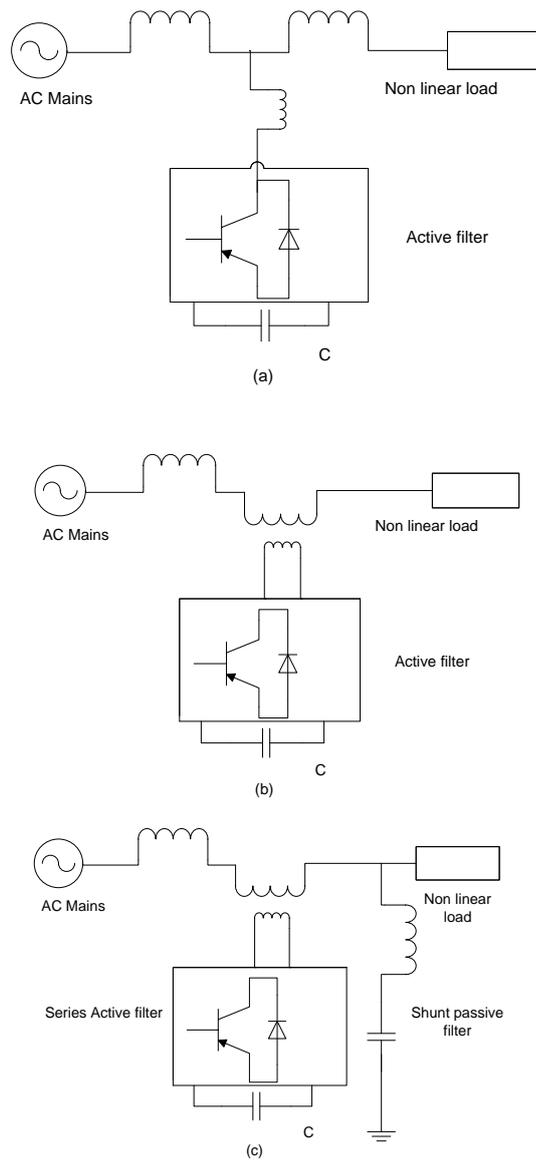
- a) Operasi dapat dipercaya
- b) Prosedur desain yang mudah
- c) Bertidak sebagai *compensators* daya reaktif
- d) Konfigurasi yang murah untuk tiap orde harmonik

### 2.3.3 Filter Aktif

Filter aktif adalah filter yang secara aktif mengkompensasi arus harmonic pada sistem tenaga. Keuntungan filter aktif dibanding filter pasif bahwa filter aktif bisa merespon perubahan beban dan kondisi harmonic, seperti penggunaan *Boost PFC* dan *inverter PWM* sumber arus. Filter aktif tidak harus memberikan perhatian khusus hal tersebut. Bagaimanapun filter aktif mahal dan tidak cocok untuk aplikasi peralatan kecil.[16]



**Gambar 2.10 Boost Regulator[17]**



**Gambar 2.11 Active power filter topologies implemented with PWM-VSI (a) shunt active power filter (b) series active power filter (c) Hybrid active power filter<sup>[18]</sup>**

Beberapa keuntungan filter aktif adalah :

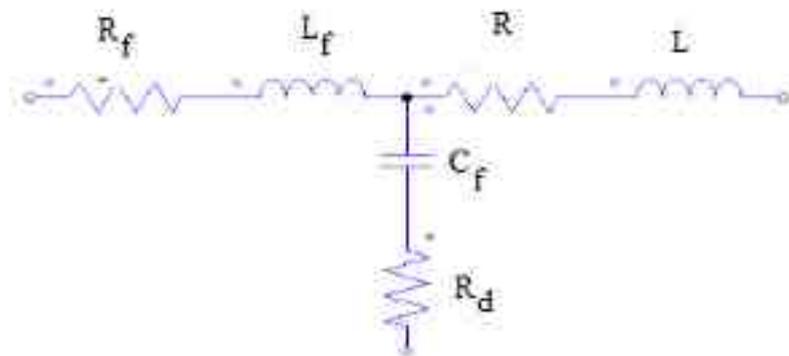
- a) Frekuensi switching lebih rendah
- b) ukuran komponen lebih kecil
- c) solusi paling murah
- d) dasar pengembangan untuk akan datang

Beberapa batasan filter aktif adalah :

- a) Frekuensi switching tracking tinggi pada zero crossing
- b) kapasitor penyimpanan yang besar
- c) kesulitan dalam menjaga tegangan konstan pada kapasitor DC link

#### 2.3.4 Filter LCL[5]

Filter LCL adalah filter pasif yang terdiri dari komponen-komponen pasif R, L dan C, seperti pada gambar 2.13.



**Gambar 2.12 Filter LCL**

Dari gambar di atas tampak bahwa sebuah filter LCL terbuat dari resistor ( $R_f$ ) dan induktor ( $L_f$ ) pada sisi *inverter*, resistor ( $R$ ) dan induktor ( $L$ ) pada sisi jaringan, dan kapasitor  $C_f$  (teredam dengan resistor  $R_d$ ).

Filter LCL dapat mereduksi harmonisa arus karena arus harmonisa akan mengalir pada reaktansi yang lebih rendah. Dengan pemasangan C, arus dengan frekuensi tinggi akan mengalir melalui kapasitor karena kapasitor memiliki impedansi yang rendah pada frekuensi tinggi. Agar tegangan beban bebas harmonisa, dipasang filter C yang paralel dengan beban. Dengan menggunakan filter C ini semua riak arus dengan frekuensi tinggi akan mengalir melewati kapasitor bukan ke beban. Filter L biasanya dipasang secara seri terhadap beban.

Dengan menggunakan filter L, arus yang mengalir melalui L akan sulit berubah berbanding lurus dengan besarnya L.

Filter LCL bertujuan untuk mengurangi harmonisa orde tinggi pada sisi jaringan, tetapi desain filter yang buruk dapat menyebabkan redaman yang lebih rendah dibandingkan dengan apa yang diharapkan. Penyearah arus harmonisa dapat menyebabkan kejenuhan induktor atau resonansi filter. Oleh karena itu, induktor harus benar dirancang dengan mempertimbangkan arus ripple, dan filter harus teredam untuk menghindari resonansi. Namun, tingkat redaman dibatasi oleh biaya, nilai dari induktor, kerugian dari kinerja filter.

#### **2.3.4.1 Perancangan Filter Harmonisa LCL[19]**

Filter harmonisa LCL ini terdiri atas tiga buah komponen nonlinear, yaitu berupa dua buah komponen induktor dan satu buah komponen kapasitor, dan juga satu buah komponen resistor sebagai *damping*.

Untuk penentuan nilai dari masing – masing komponen, terlebih dahulu perlu diperhatikan parameter – parameter berikut ini, yaitu :

1.  $V_{RMS}$  ( Tegangan Keluaran *Inverter* )

Nilai tegangan RMS yang diperoleh merupakan tegangan keluaran dari *inverter*.

2.  $P_n$  ( Daya Aktif )

Daya aktif ini merupakan daya aktif yang dihasilkan oleh panel surya.

3.  $V_{DC}$  ( Tegangan DC )

Nilai tegangan DC yang dihasilkan oleh merupakan tegangan *photovoltaic*.

4.  $f_g$  ( Frekuensi Grid )

Frekuensi grid yang digunakan adalah frekuensi yang terdapat pada grid yang terhubung dengan *inverter* SPWM kombinasi dengan filter LCL.

5.  $f_{sw}$  ( Frekuensi *Switching* )

Frekuensi *switching* merupakan frekuensi yang digunakan untuk pengontrolan pada *inverter*.

6. Persentase variasi faktor daya (  $x$  )

7. Persentase *ripple* pada arus *rating* (  $a$  )

8. Persentase redaman yang digunakan (  $ka$  )

9. Indeks modulasi *inverter* (  $m$  )

10. Rasio perbandingan antara induktansi di sisi grid dan induktansi di sisi *inverter* (  $r$  )

Pertama, perlu ditentukan nilai dari impedansi *base* dan kapasitansi *base* yang dapat ditentukan dari persamaan ( 2.16 ) dan ( 2.17 ) berikut :

$$Z_b = \frac{V_{RMS}^2}{P_n} \quad ( 2.16 )$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_g Z_b} \quad ( 2.17 )$$

Kemudian, untuk mendapatkan nilai kapasitor yang nantinya akan digunakan sebagai salah satu komponen filter, maka dapat ditentukan dengan persamaan :

$$C_f = x \cdot C_b \quad ( 2.18 )$$

Untuk nilai maksimum arus *ripple* keluaran dari *inverter*, dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta I_{L_{max}} = \frac{2V_{DC}}{3L_1} (1 - m) m T_{sw} \quad ( 2.19 )$$

Dari persamaan di atas, dapat diketahui bahwa nilai arus *ripple* maksimum untuk  $m = 0,9$  yaitu :

$$\Delta I_{L_{\max}} = \frac{0.18V_{DC}}{3f_{sw}L_1} \quad (2.20)$$

Dan untuk mengetahui nilai  $L_1$  yang merupakan nilai induktor pada sisi *inverter*, dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$L_1 = \frac{0.18V_{DC}}{3f_{sw}\Delta I_{L_{\max}}} \quad (2.21)$$

Nilai  $\Delta I_{L_{\max}}$  dapat ditentukan dengan :

$$\Delta I_{L_{\max}} = a \cdot I_{\max} \quad (2.22)$$

Dan

$$I_{\max} = \frac{P_n \sqrt{2}}{3V_{RMS}} \quad (2.23)$$

Selanjutnya, untuk memperoleh nilai  $L_2$  ( induktansi pada sisi grid ), perlu diketahui dahulu nilai  $r$ , yaitu diperoleh dari :

$$\frac{i_g(h)}{i_i(h)} = k_a = \frac{1}{|1 + r(1 - L_1 C_b \omega_{sw}^2 x)|} \quad (2.24)$$

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{ka^2} + 1}}{C_f \cdot \omega_{sw}^2} \quad (2.25)$$

Untuk menentukan nilai dari resistor *damping*, terlebih dahulu perlu dihitung nilai  $f_{res}$ . Persamaan yang dapat digunakan untuk menentukan frekuensi resonansi adalah :

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot C_f}} \quad ( 2.26 )$$

Syarat dari nilai frekuensi resonansi ini adalah :

$$10f_g < f_{res} < 0.5 f_{sw} \quad ( 2.27 )$$

Kemudian, untuk menentukan nilai dari resistor *damping*, dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$R_f = \frac{1}{3\omega_{res} C_f} \quad ( 2.28 )$$

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Tinjauan Umum

Proses penelitian tentang ?Perancangan Filter LCL untuk Aplikasi Pada *Inverter* Satu Fasa Keluaran *Photovoltaic*?dilakukan dengan beberapa tahapan.

Adapun tahapan ? tahapan yang dilakukan tersebut, yaitu :

1. Melakukan pengujian dengan menggunakan *inverter* SPWM hasil dari *photovoltaic* terhadap beban berupa lampu pijar.
2. Mengobservasi perbandingan harmonisa yang dihasilkan oleh *inverter* SPWM dengan beban lampu hemat energi berupa lampu pijar.
3. Melakukan perancangan sistem pengurangan ( pereduksi ) harmonisa
4. Melakukan pengujian sistem di laboratorium untuk pengukuran THD setelah pemasangan alat hasil rancangan di sisi sumber harmonisa.
5. Menganalisis harmonisa sistem setelah menggunakan alat pereduksi harmonisa.

Berikut ini merupakan *flowchart* dalam pengerjaan tugas akhir :



Gambar 3.1 *flowchart* metode penelitian

### 3.2 Spesifikasi Peralatan yang Digunakan

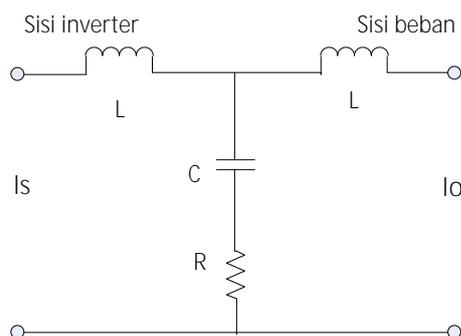
Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

#### 1. Beban Resistif

Beban resistif yang digunakan adalah lampu pijar dengan berbagai variasi daya.

#### 2. Filter Harmonisa LCL

Filter yang digunakan adalah tiga buah komponen non - linear, yaitu komponen induktor yang dipasang baik pada sisi keluaran dari *inverter* maupun induktor yang terpasang ke sisi beban. Di antara kedua induktor tersebut terdapat sebuah komponen kapasitor yang terpasang secara *shunt* di antara dua buah induktor tersebut. Komponen kapasitor ini terhubung ke sisi netral keluaran dari *inverter* tersebut. Untuk rangkaian ekivalen dari filter tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen filter LCL**

### 3. *Inverter* SPWM Satu Fasa

*Inverter* yang digunakan pada sistem adalah *inverter Sinus Pulse Width Modulation* ( SPWM ) satu fasa yang menggunakan MOSFET IRF460 sebagai komponen *switching*-nya.

### 4. Alat ukur

Alat ukur yang digunakan pada penelitian ini adalah *Power Analyser CA 8220*.

## 3.3 Perancangan Sistem

Perancangan filter harmonisa LCL ini terdiri atas tiga buah komponen nonlinear, yaitu berupa dua buah komponen induktor dan satu buah komponen kapasitor, dan juga satu buah komponen resistor sebagai *damping*.

Untuk penentuan nilai dari masing ? masing komponen, terlebih dahulu perlu diperhatikan parameter ? parameter berikut ini, yaitu :

#### 1. $V_{RMS}$ ( Tegangan Keluaran *Inverter* )

Pada sistem yang telah dilakukan pengukuran sebelumnya, didapatkan nilai tegangan RMS yang diperoleh hasil keluaran dari *inverter* adalah 60 V.

#### 2. $P_n$ ( Daya Aktif )

Daya aktif yang dihasilkan oleh panel surya yaitu sebesar 300 W.

#### 3. $V_{DC}$ ( Tegangan DC )

Nilai tegangan DC yang dihasilkan oleh *photovoltaic* yaitu sebesar 90  $V_{DC}$ .

4.  $f_g$  ( Frekuensi Grid )

Frekuensi grid yang akan dihubungkan dengan *inverter* SPWM yang dikombinasikan dengan filter LCL adalah 50 Hz.

5.  $f_{sw}$  ( Frekuensi *Switching* )

Frekuensi *switching* yang digunakan untuk pengontrolan pada *inverter* yaitu 10 kHz.

6. Persentase variasi faktor daya (  $x$  )

Persen variasi faktor daya yang digunakan adalah 10 % ( 0.1 ).

7. Persentase *ripple* pada arus *rating* (  $a$  )

Persentase *ripple* pada arus *rating* yang digunakan adalah sebesar 10 % ( 0.1 ).

8. Persentase redaman yang digunakan (  $ka$  )

Persentase redaman yang digunakan adalah sebesar 10 % ( 0.1 ).

9. Indeks modulasi *inverter* (  $m$  )

Indeks modulasi dari *inverter* SPWM yang digunakan adalah 0,9.

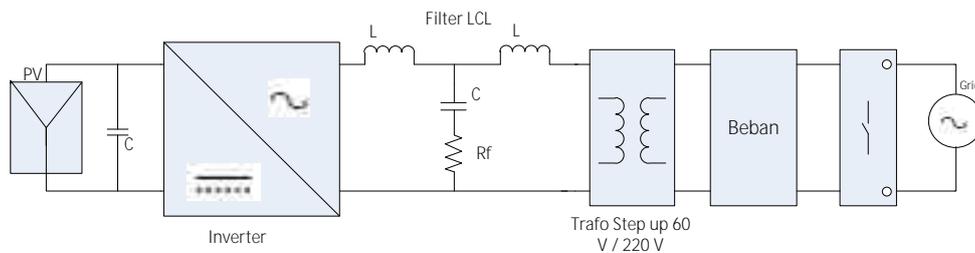
10. Rasio perbandingan antara induktansi di sisi grid dan induktansi di sisi *inverter* (  $r$  )

Berdasarkan persamaan (2.16) dan (2.17), diperoleh nilai dari  $Z_b$  dan  $C_b$  adalah **12** dan **265 uF**. Untuk mendapatkan nilai kapasitor yang nantinya akan digunakan sebagai salah satu komponen filter, dapat ditentukan dengan persamaan (2.18) sehingga didapatkan nilai  $C_f$  yang akan digunakan yaitu sebesar **26,5 uF**. Setelah nilai dari  $C_f$  didapatkan, langkah selanjutnya yaitu menentukan nilai  $L_1$  (induktor pada sisi *inverter*). Nilai  $L_1$  dapat ditentukan dari persamaan (2.21)

setelah sebelumnya ditentukan nilai arus *ripple* maksimumnya, yaitu sebesar 0,24 A. Nilai  $L_1$  yang diperoleh yaitu bernilai **2,25 mH**. Tahap selanjutnya, untuk memperoleh nilai  $L_2$  (induktor yang dipasang pada sisi transformator), perlu diketahui nilai  $r$  (rasio perbandingan antara induktansi di sisi grid dan induktansi di sisi inverter) terlebih dahulu berdasarkan persamaan (2.24). Setelah diperoleh nilai  $r$  sebesar 0.038, maka didapatkan nilai  $L_2$  yaitu sebesar **0.107 mH**.

Untuk menentukan nilai dari resistor *damping*, terlebih dahulu perlu dihitung nilai  $f_{res}$  berdasarkan persamaan (2.26) dan harus memenuhi syarat pada persamaan (2.27). Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan nilai dari frekuensi resonansinya sebesar 3089,8 Hz. Hal ini sesuai dengan *range* antara sepuluh kali frekuensi grid dan setengah dari frekuensi *switching*. Kemudian, untuk menentukan nilai dari resistor *damping*, dapat ditentukan dengan persamaan (2.28) sehingga didapatkan nilai dari resistor *damping*-nya yaitu **0,66** .

### 3.4 Skema Rangkaian Pengujian Harmonisa dari *Inverter* SPWM



### 3.3 Skema Rangkaian Penelitian

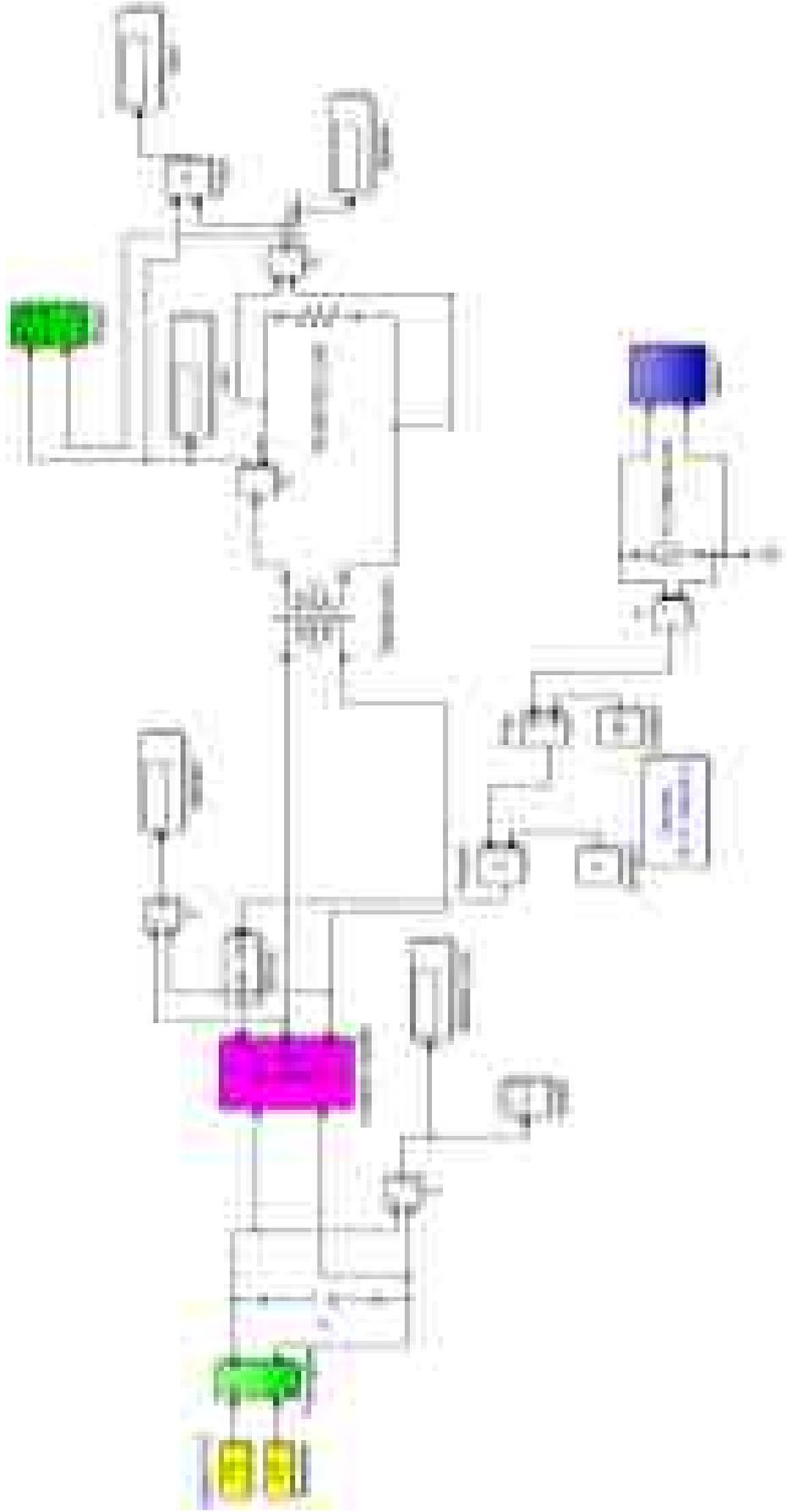
Pada rangkaian di atas, sumber listrik DC yang dihasilkan oleh *photovoltaic* nantinya akan masuk sebagai input dari *inverter* yang nantinya akan menghasilkan listrik tegangan AC.

*Inverter* itu sendiri merupakan sumber harmonisa yang nantinya akan mempengaruhi sistem, sehingga diperlukan adanya suatu filter harmonisa untuk mereduksi harmonisa yang terukur. Penempatan filter tersebut berada di posisi antara *inverter* dan beban.

### **3.5 Simulasi Perancangan Alat**

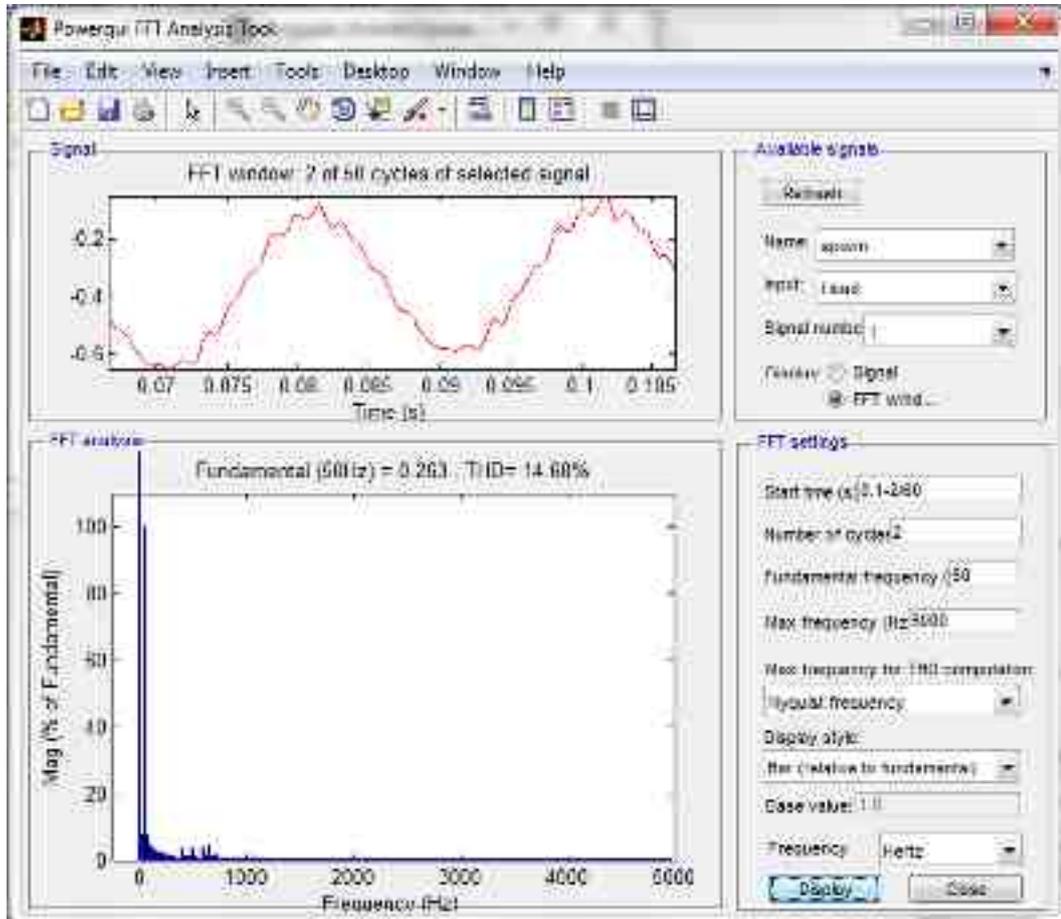
Untuk pengujian terhadap alat yang telah dirancang, terlebih dahulu dilakukan pengujian menggunakan aplikasi MATLAB untuk melihat bagaimana gelombang yang dihasilkan pada saat sebelum dan setelah menggunakan filter harmonisa LCL keluaran dari *inverter*.

Rangkaian pengujian sebelum dipasang filter yaitu :



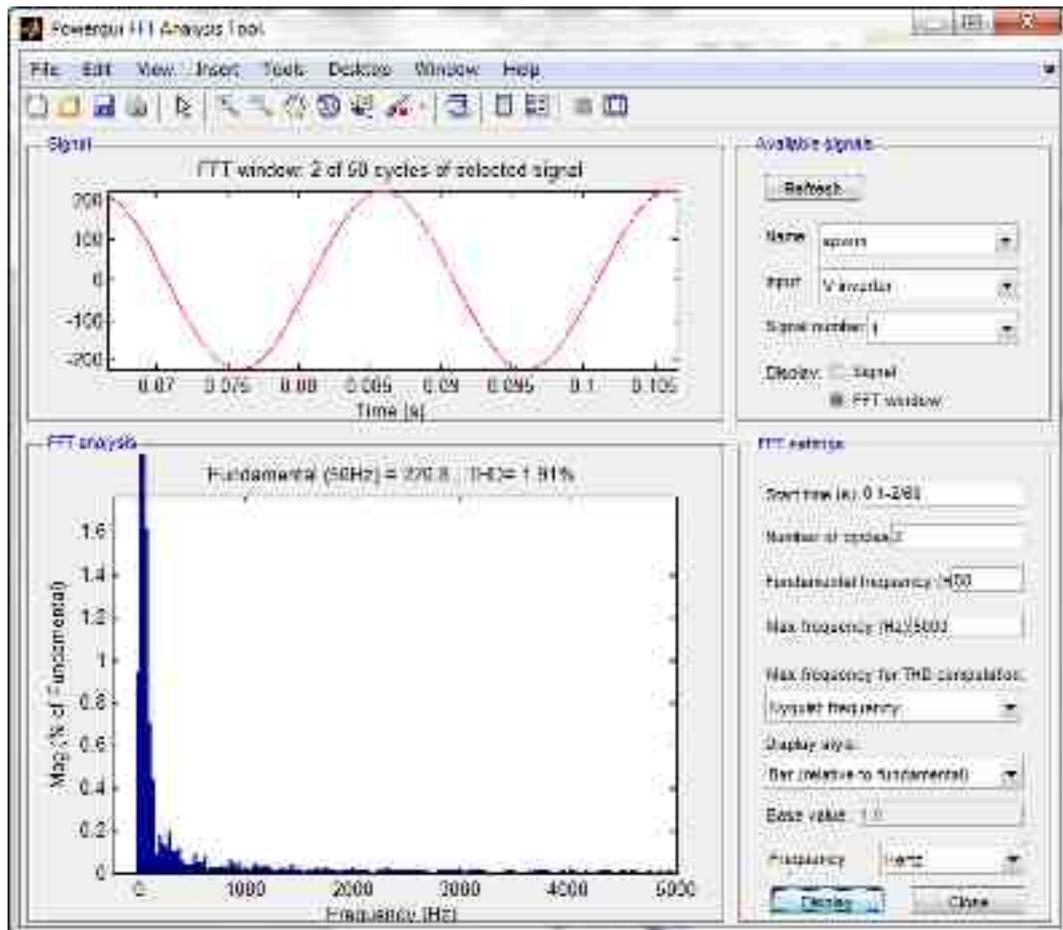
**Gambar 3.6 Rangkaian Pengujian Sebelum Dipasang Filter Harmonisa**

Dari rangkaian pengujian di atas, didapatkan bentuk gelombang arus keluarannya dan spektrum harmonisa yang dihasilkan adalah sebagai berikut.



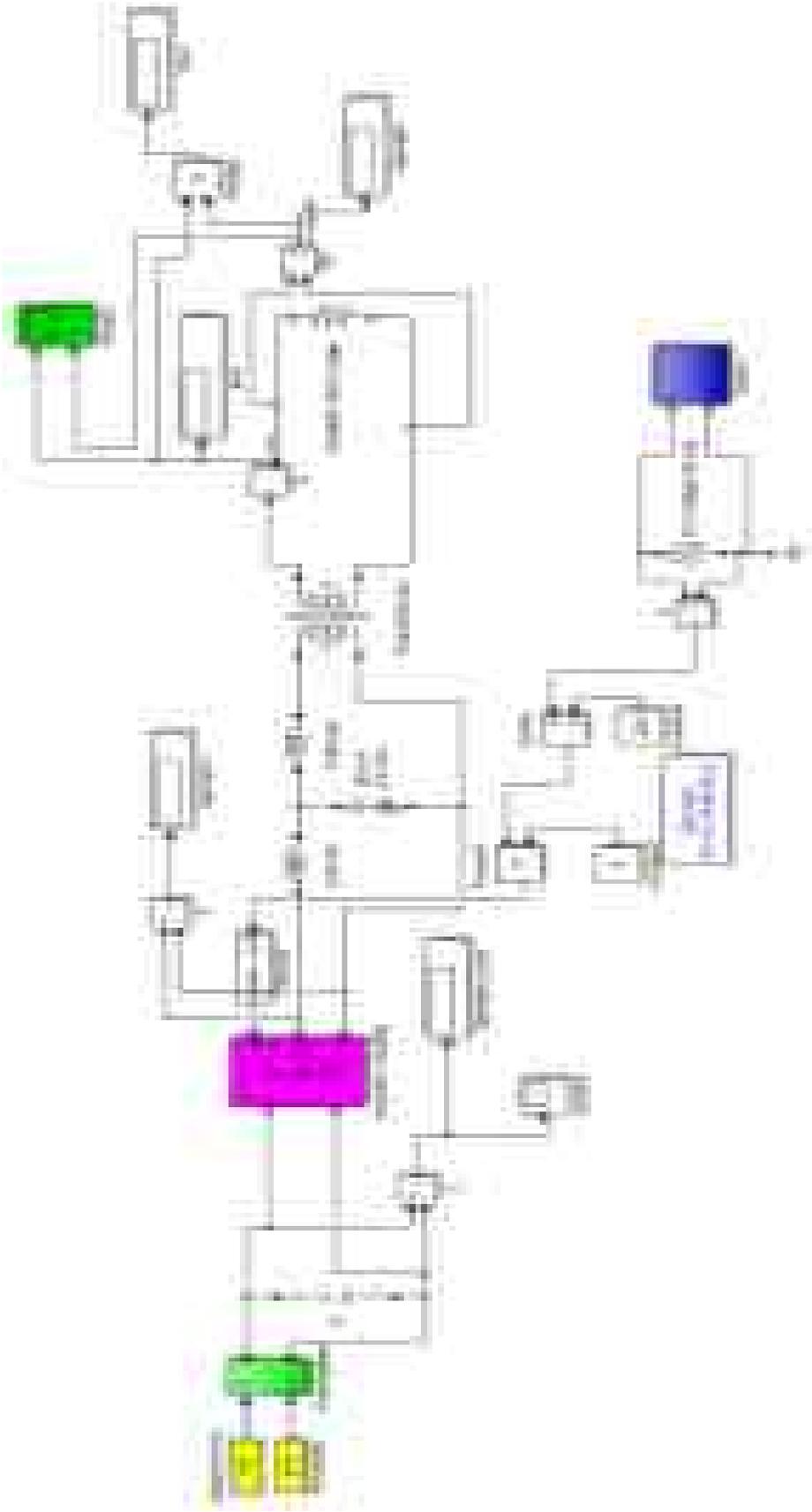
**Gambar 3.5 Gelombang *Output* dan Spektrum Harmonisa Gelombang Arus Sebelum Menggunakan Filter**

Dan untuk gelombang tegangannya, yaitu :



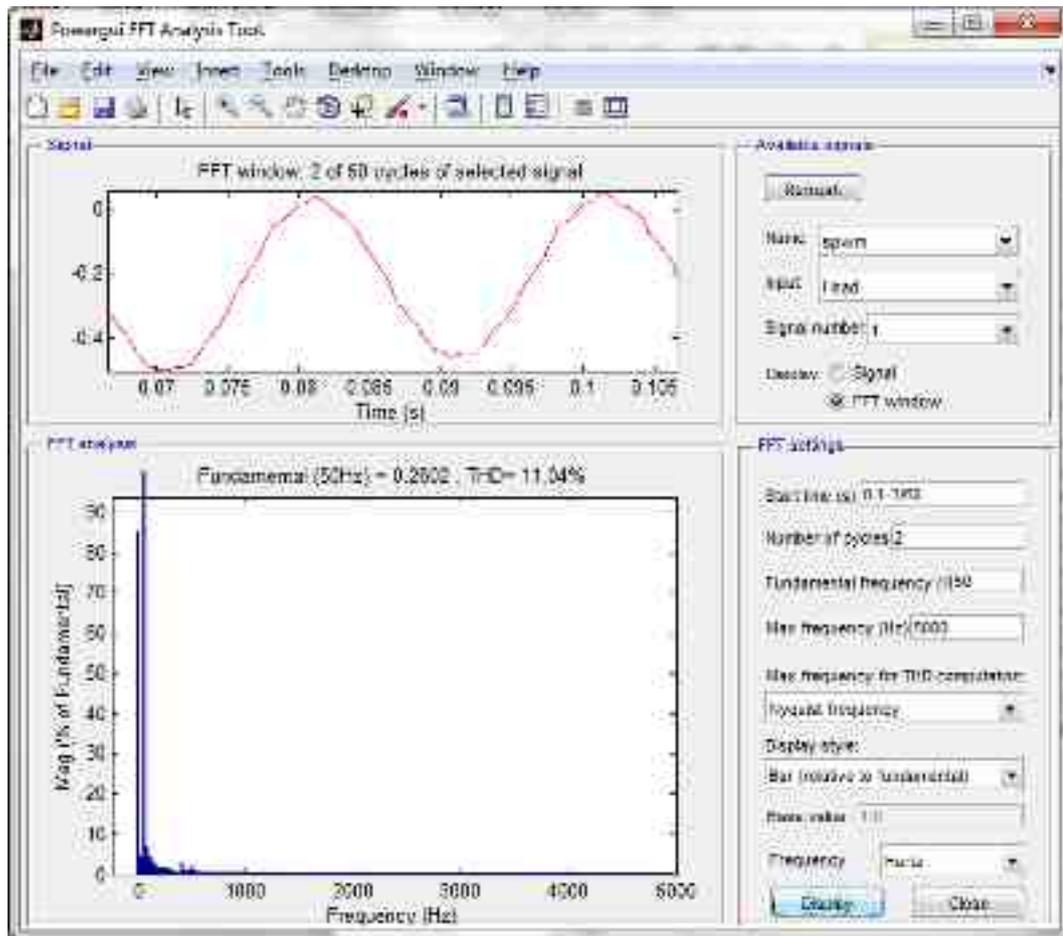
**Gambar 3.6 Gelombang *Output* dan Spektrum Harmonisa Gelombang Tegangan Sebelum Menggunakan Filter**

Setelah sistem ditambahkan dengan filter harmonisa LCL, bentuk rangkaiannya menjadi :



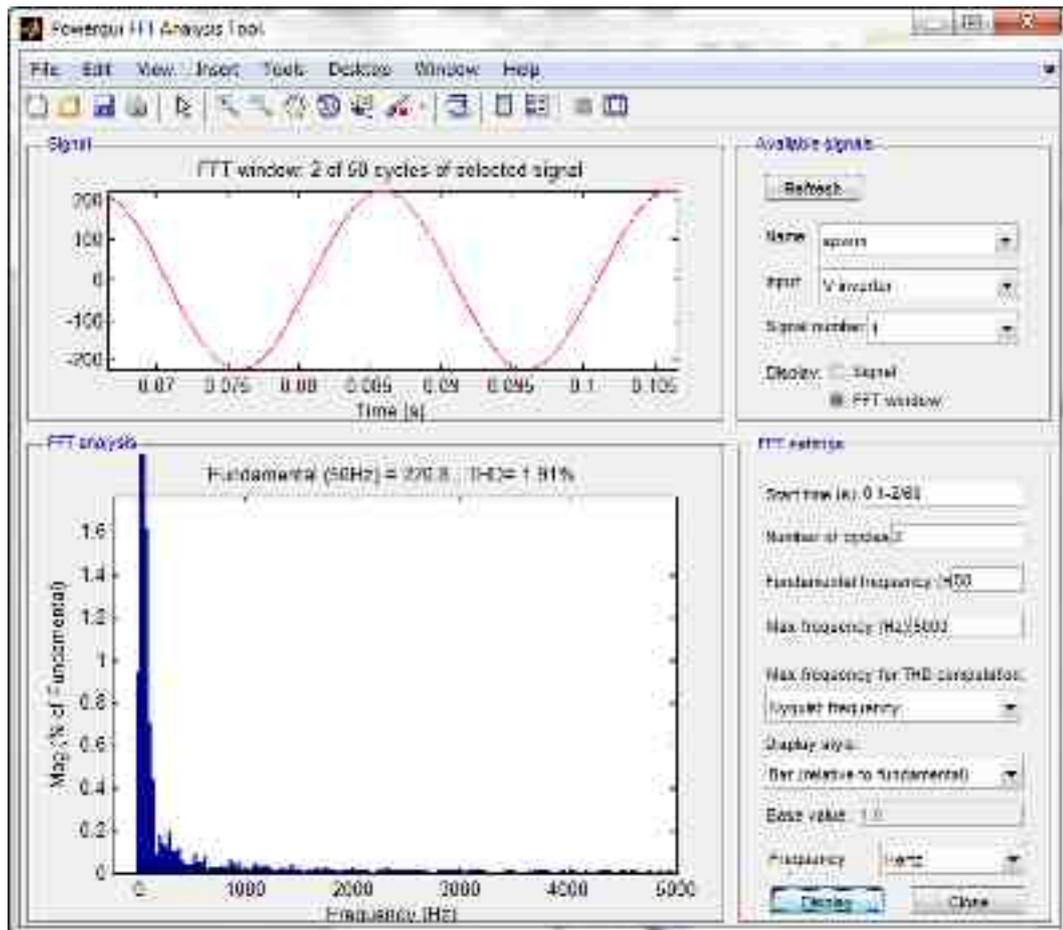
Gambar 3.7 Rangkaian Pengujian Setelah Dipasang Filter Harmonisa

Dan gelombang keluaran arus yang dihasilkan oleh *inverter* adalah :



**Gambar 3.8 Gelombang *Output* dan Spektrum Harmonisa Gelombang Arus Setelah Menggunakan Filter**

Sedangkan untuk gelombang tegangannya :



**Gambar 3.9 Gelombang *Output* dan Spektrum Harmonisa Gelombang Tegangan Setelah Menggunakan Filter**

## **BAB IV**

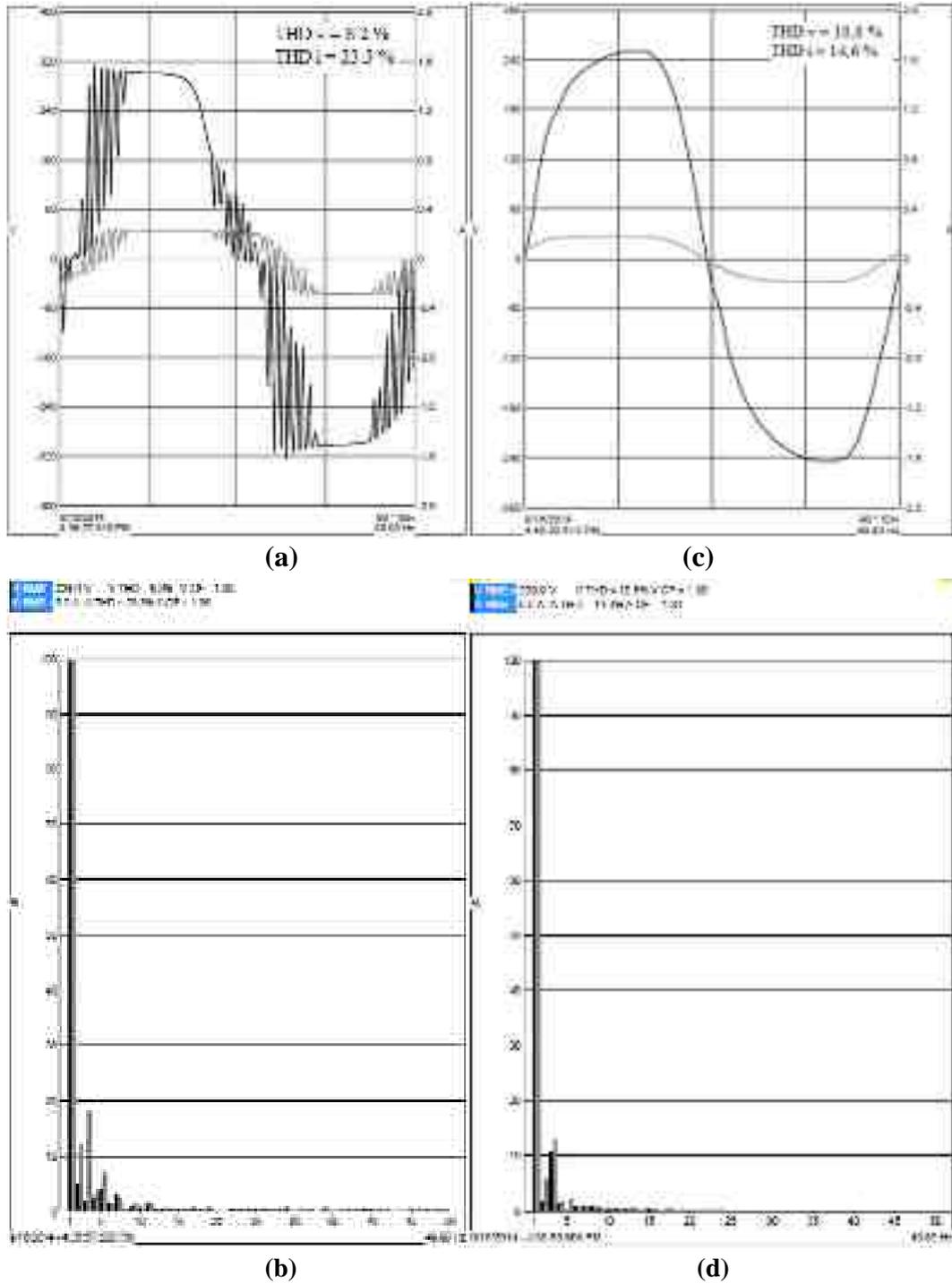
### **HASIL DAN ANALISA**

Bab ini berisi hasil dan analisis dari penelitian yang dilakukan dengan pengujian di laboratorium, serta menggunakan aplikasi Simulink MATLAB sebagai penunjang. Pengujian ini dilakukan untuk melihat bagaimana hasil harmonisa dan *ripple* yang ditimbulkan oleh *inverter* satu fasa pada saat kondisi *stand - alone* dan terhubung dengan grid PLN, baik setelah menggunakan filter harmonisa maupun sebelum menggunakan filter harmonisa.

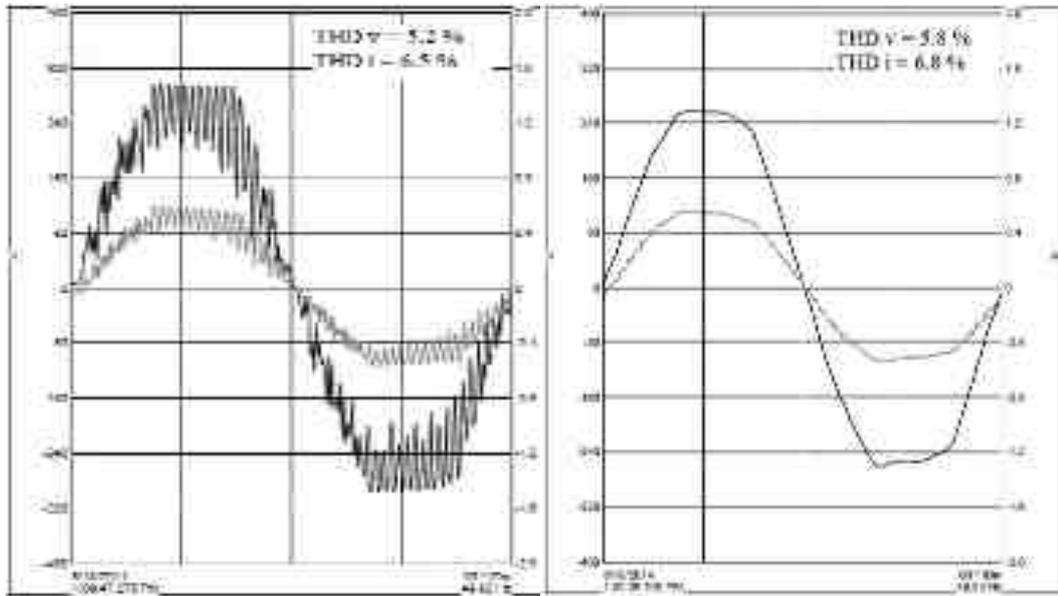
#### **4.1 Hasil Pengujian**

##### **4.1.1 Pengukuran *Total harmonic Distorsion* (THD) pada Sistem**

Pengujian harmonisa pada *output inverter* SPWM satu fasa yang dikombinasikan dengan transformator berdasarkan pada gambar 3.3 menggunakan alat ukur *Power Analyser CA 8220*. *Power Analyser* tersebut dapat mengukur parameter ? parameter yang ingin diketahui, seperti arus, tegangan, daya aktif, daya reaktif, dan parameter ? parameter yang diperlukan dalam penentuan harmonisa. Bentuk gelombang yang dihasilkan oleh *inverter* ini dengan menggunakan beban berupa lampu pijar berdaya 20, 40, 60, 75, dan 125 W ditunjukkan pada gambar 4.1 sampai dengan 4.5 di bawah ini.

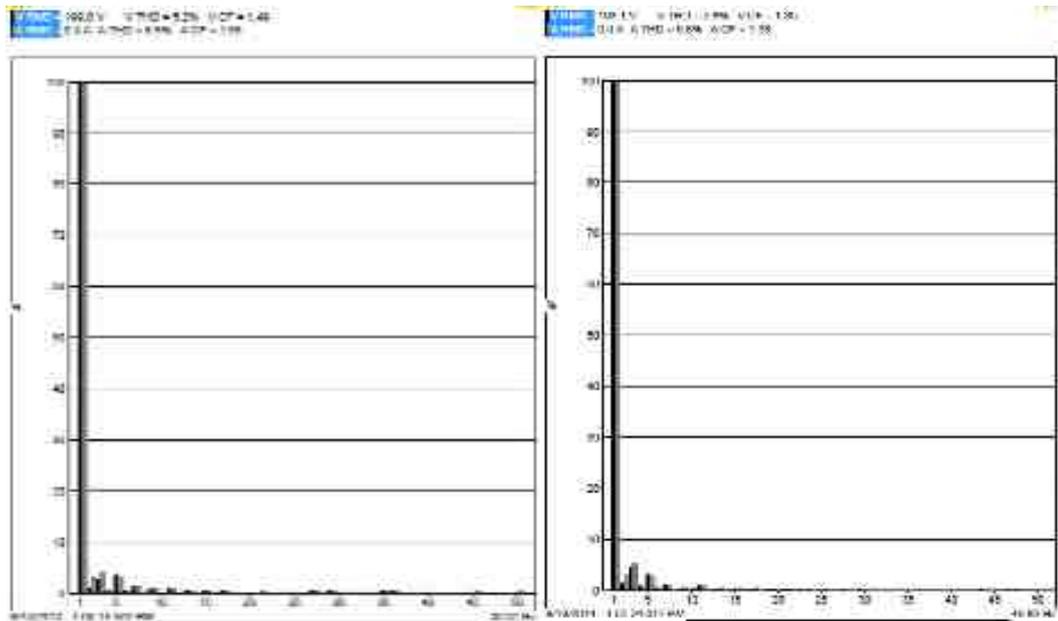


**Gambar 4.1 Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 20 W**



(a)

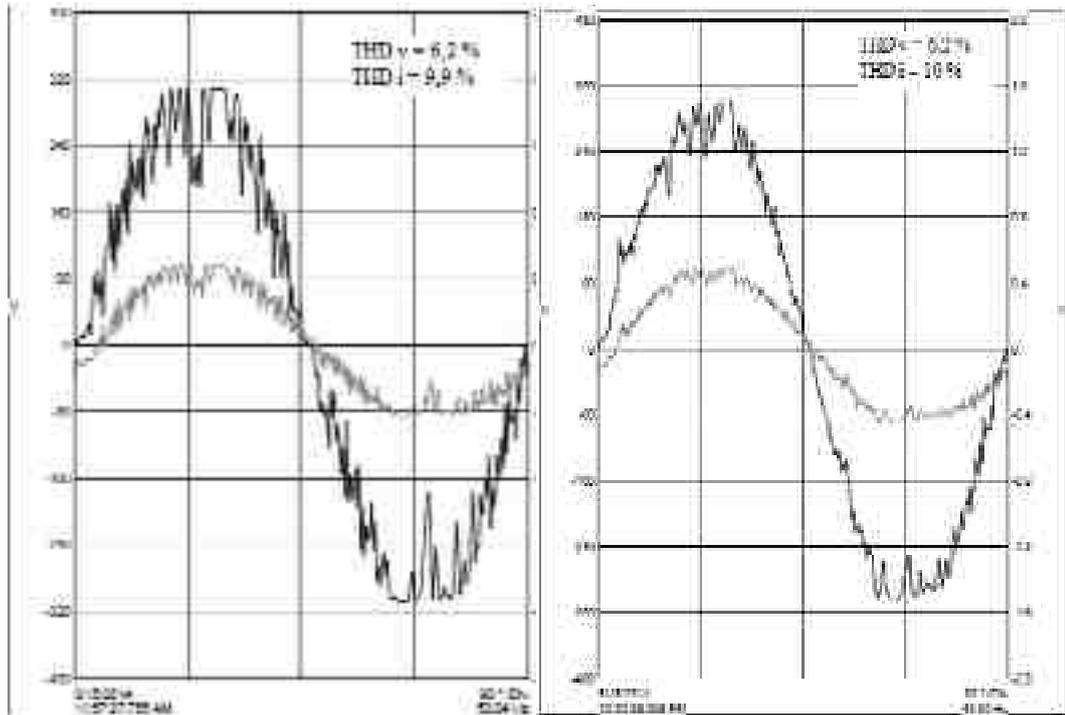
(c)



(b)

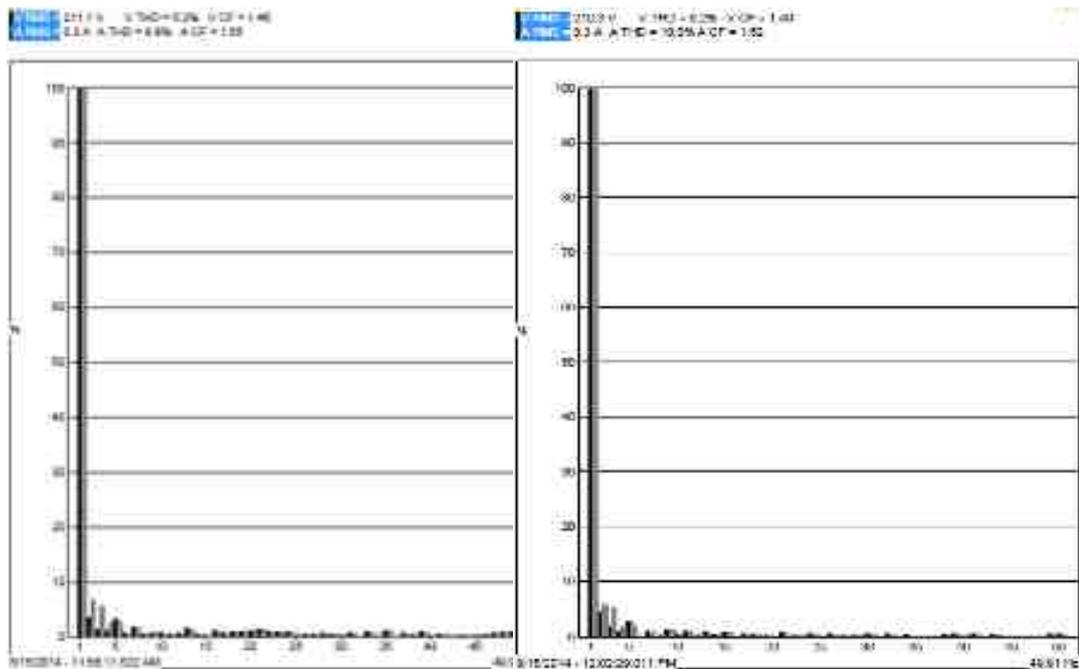
(d)

**Gambar 4.2 Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 40 W**



(a)

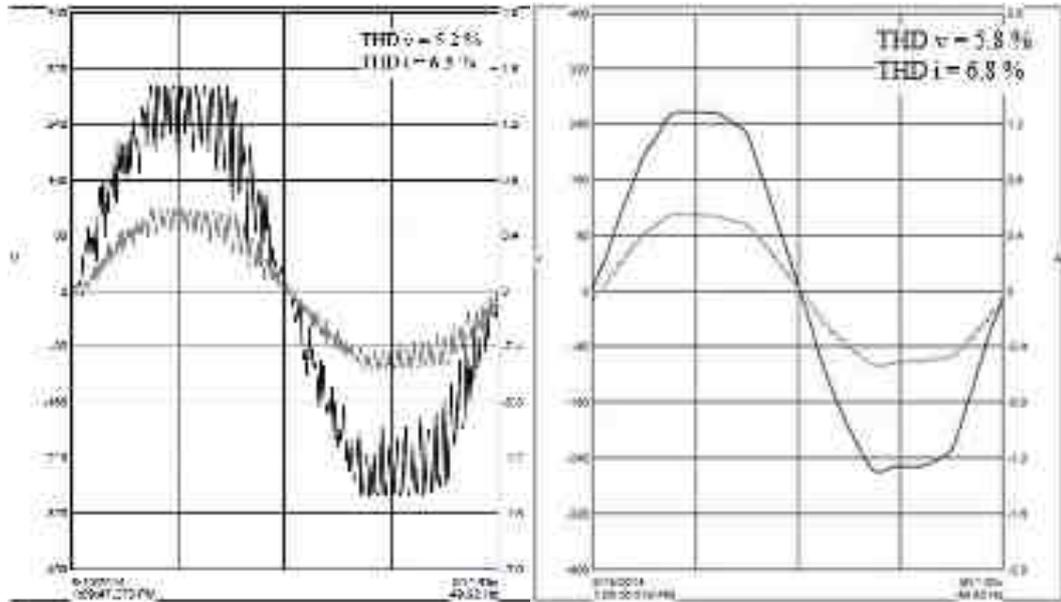
(c)



(b)

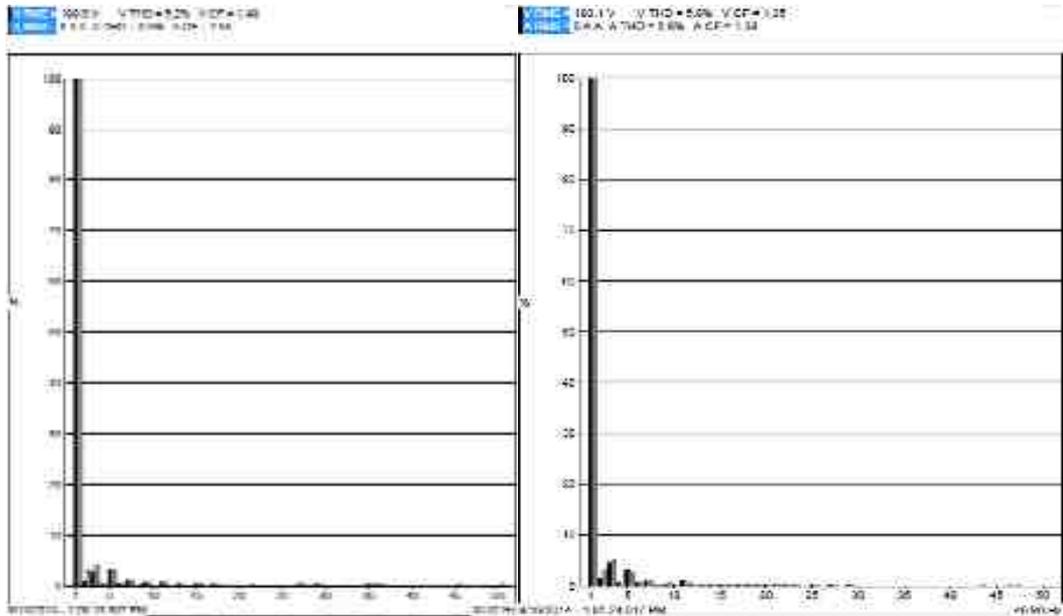
(d)

**Gambar 4.3 Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 60 W**



(a)

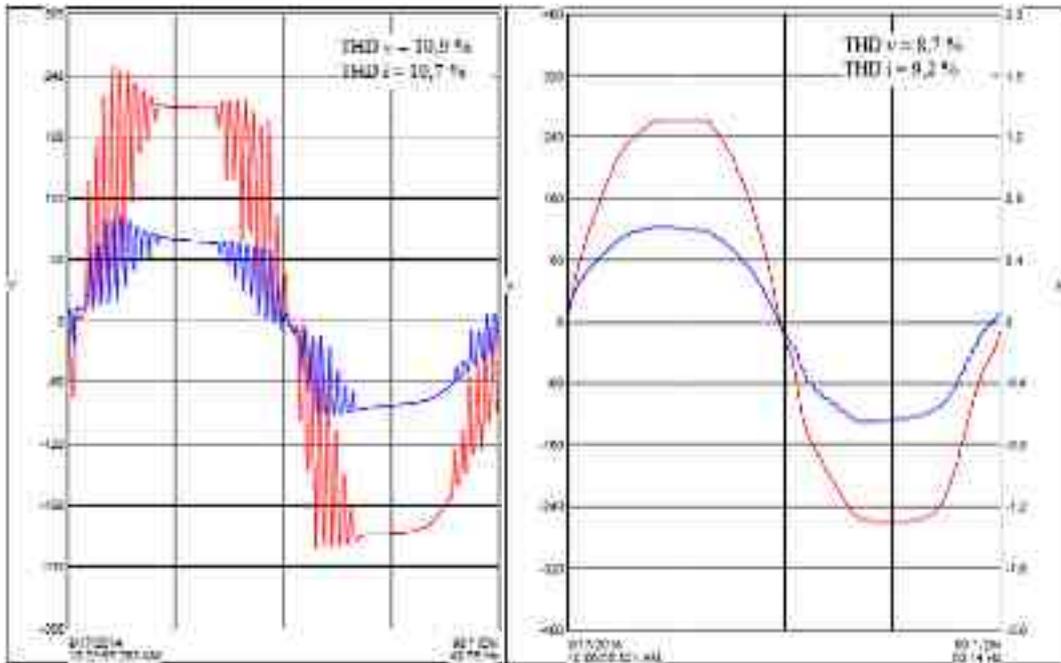
(c)



(b)

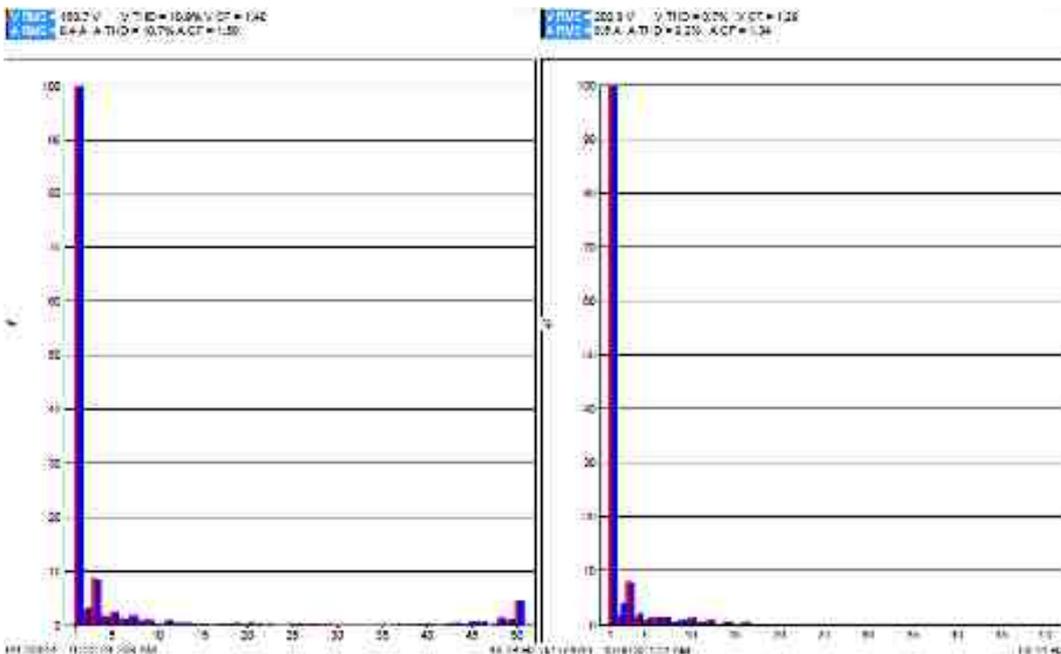
(d)

**Gambar 4.4 Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 75 W**



(a)

(c)



(b)

(d)

**Gambar 4.5 Gelombang (a) dan spektrum harmonisa (b) sebelum menggunakan filter, gelombang (c) dan spektrum harmonisa (d) setelah menggunakan filter pada beban 125 W**

Berdasarkan beberapa gambar gelombang dan gambar spektrum di atas, dapat dilihat bahwa bentuk gelombang yang dihasilkan oleh *inverter* telah memiliki bentuk dasar dari sinusoidal. Akan tetapi, bentuk sinus dari gelombang tersebut masih memiliki riak ? riak gelombang (*ripple*) yang cukup banyak.

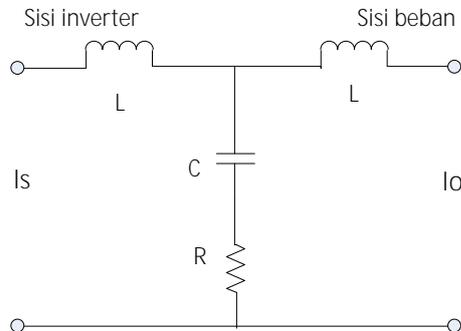
Berdasarkan gambar ? gambar di atas, pada sisi kiri setiap gambar merupakan keluaran dari sistem dengan kondisi sebelum menggunakan filter harmonisa. Hal ini dapat dilihat pada gelombang keluaran dari masing ? masing kondisi beban. Gelombang yang muncul telah memiliki bentuk dasar sinusoidal, namun masih disertai dengan timbulnya riak (*ripple*) pada masing ? masing gelombang.

Untuk sisi kanan, kondisi yang digunakan pada sistem merupakan kondisi setelah menggunakan alat pereduksi harmonisa (filter harmonisa). Dapat dilihat pada gambar di atas, gelombang yang dihasilkan lebih bersih dan memiliki sedikit riak gelombang (*ripple*). Gambar gelombang tersebut memiliki bentuk yang lebih mendekati sinusoidal dibandingkan dengan gambar gelombang pada sisi sebelah kiri. Tetapi pada sisi distribusi harmonisanya, nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) yang dihasilkan sistem yang menggunakan filter maupun sistem tanpa menggunakan filter harmonisa memiliki perubahan yang tidak signifikan.

#### **4.1.2 Analisis Perancangan Alat Pereduksi Harmonisa**

Berdasarkan hasil pengujian sistem serta karakteristik dari *inverter* yang menggunakan SPWM sebagai pembentuk gelombang *output*-nya, maka filter yang digunakan adalah filter LCL yang terdiri atas tiga komponen non-linear. Alasan digunakannya filter LCL ini yaitu karakteristik dari alat pereduksi harmonisa ini mereduksi harmonisa yang memiliki frekuensi resonansi yang

cukup tinggi, tergantung kepada frekuensi *switching* yang digunakan pada SPWM.



**Gambar 4.6 Rangkaian ekivalen filter LCL**

*Inverter* SPWM tersebut dioperasikan dengan menggunakan filter harmonisa yang diposisikan sebelum transformator. Dua buah induktor dihubungkan masing ? masingnya ke sisi *inverter* dan ke sisi transformator. Di antara dua induktor tersebut, dipasang sebuah kapasitor secara paralel serta sebuah resistor *damping* yang terhubung seri dengan kapasitor tersebut.

## 4.2 Analisa

Penggunaan *inverter* yang merupakan salah satu peralatan yang menggunakan sistem elektronika dapat menimbulkan harmonisa pada suatu sistem atau dengan kata lain bisa dikatakan sebagai sumber harmonisa. Pada sistem ini, pola distribusi harmonisa yang dihasilkan oleh *inverter* didominasi pada orde ke ? 3 dengan nilai yang berubah ? ubah terhadap variasi beban.

Berdasarkan bentuk gelombang dan spektrum pada sisi kiri gambar 4.1 sampai 4.5 di atas, dapat dianalisis bahwa bentuk gelombang yang dihasilkan oleh *inverter* telah memiliki bentuk dasar dari sinusoidal. Hal ini disebabkan oleh

pengontrolan yang digunakan pada *inverter* SPWM, seperti pada parameter ? parameter amplitudo modulasi yang digunakan, serta frekuensi *switching* yang digunakan juga membuat gelombang keluaran dari *inverter* lebih mengarah ke sinusoidal.

Akan tetapi, walaupun telah berbentuk sinusoidal, *ripple* yang dihasilkan pada gelombang di sisi kiri masing ? masing gambar tersebut masih terbilang cukup banyak. *Ripple* tersebut mengganggu bentuk gelombang sinus hasil *output* dari *inverter* sehingga tidak berbentuk sinusoidal yang bersih. Timbulnya *ripple* tersebut tidak lepas dari peralatan elektronika yang digunakan, yaitu *inverter*, yang merupakan sebuah sumber harmonisa.

Pada kondisi setelah digunakannya filter harmonisa, dapat dilihat pada gambar 4.1 sampai 4.5 di sisi kanan bahwa riak gelombang (*ripple*) yang terdapat pada gelombang tegangan maupun gelombang arus telah berhasil diminimalisir. Akan tetapi nilai *Total Harmonic Distortion* yang dihasilkan pada sistem secara dominan tidak mengalami perbaikan, baik nilai *THD* tegangan maupun nilai *THD* arus. Hal ini disebabkan oleh perhitungan parameter komponen pada filter LCL yang menghasilkan nilai frekuensi resonansi yang cukup besar, yaitu bernilai 3089 Hz. Sedangkan berdasarkan pola distribusi harmonisa pada sistem, orde yang menimbulkan harmonisa didominasi pada orde 3 yang memiliki nilai frekuensi resonansi sebesar 150 Hz sehingga pengaruh fungsi dari filter LCL tidak langsung berdampak pada berkurangnya nilai *Total Harmonic Distortion* arus dan *Total Harmonic Distortion* tegangan yang dihasilkan pada sistem, tetapi hanya berpengaruh pada bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan. Pada sistem, gelombang *output* ? nya menjadi lebih halus.

Hal ini berdasarkan karakteristik dari filter LCL yang digunakan. Penggunaan tiga buah komponen non ? linear, yaitu berupa induktor yang dipasang pada sisi inverter dan induktor yang dipasang pada sisi transformator yang akan terhubung ke beban. Di antara kedua induktor tersebut, terdapat sebuah kapasitor yang terhubung parallel dan diserikan dengan sebuah resistor *damping* sebagai pencegahan terhadap terjadinya osilasi[19].

## Bab V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan pengujian dan analisis mengenai harmonisa yang ditimbulkan oleh *inverter* SPWM dengan variasi beban linear berupa lampu pijar, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada sistem, nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dan nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan pada masing ? masing variasi beban sebelum dan setelah menggunakan filter LCL ini mengalami perbaikan dilihat dari bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan.
2. Perubahan beban tidak mengubah pola distribusi harmonisa pada sistem tapi hanya mengubah nilai THD yang dihasilkan. Harmonisa yang timbul didominasi oleh orde 3.
3. *THD* tegangan maksimum yang terukur di sisi beban pada kondisi sebelum menggunakan filter yaitu sebesar 10.9% dan setelah menggunakan filter, nilai THD tegangan maksimum yang terukur pada sisi beban yaitu 10.8% dilihat dari keseluruhan variasi beban.
4. *THD* arus maksimum yang terukur di sisi beban pada kondisi sebelum menggunakan filter yaitu sebesar 23.3% dan setelah menggunakan filter, nilai THD arus maksimum yang terukur pada sisi beban yaitu 14% dilihat dari keseluruhan variasi beban.

## 5.2 Saran

1. Untuk penelitian kedepannya, diharapkan perancangan filter LCL ini dilakukan lebih teliti agar diperoleh nilai THD arus maupun THD tegangan yang lebih baik pada sistem.
2. Untuk pengembangan sistem, filter LCL ini sebaiknya juga diaplikasikan untuk sistem yang menggunakan beban non ? linear.
3. Penggunaan filter LCL ini sebaiknya perlu dilanjutkan pada sistem untuk kondisi terkoneksi ke *grid*.

## DAFTAR KEPUSTAKAAN

- [1] Effendi, Asnal. 2012. ?Pembangkit Listrik Sel Surya Pada Daerah Pedesaan? Institut Teknologi Padang. ( diakses tanggal 5 Mei 2014 )  
[ejournal.itp.ac.id/index.php/telektro/article/download/3/3](http://ejournal.itp.ac.id/index.php/telektro/article/download/3/3)
- [2] Setiari, Dano. 2011. *Pengaruh Variasi Beban dan Tegangan Input DC pada Performansi Inverter SPWM Satu Fasa Unipolar*. Tugas Akhir Sarjana. Teknik Elektro Universitas Andalas : Padang.
- [3] Putra, Wahyudi. 2013. *Analisis Dan Upaya Pengurangan Efek Harmonisa Pada Generator Set (Genset) Dengan Pembebanan Non Linear*. Tugas Akhir Sarjana. Teknik Elektro Universitas Andalas : Padang.
- [4] Purwanto, Setyo Adi dkk. *Penggunaan Inverter sebagai Filter Daya Aktif Paralel untuk Kompensasi Harmonisa Akibat Beban Non Linier*. Politeknik Elektronika Negeri Surabaya : Surabaya.
- [5] Lastya, Hari Anna. 2012. *Analisa Perbandingan Perancangan Filter LCL Pada Penyearah Terkendali Satu Fasa Full Converter dengan Penyearah PWM Satu Fasa Full Bridge*. Tugas Akhir Magister. Teknik Elektro FT Universitas Sumatera Utara.
- [6] IEEE PES T&D committee (1996). *Guide for applying harmonic limits on power systems*. IEEE standart deparment. New York USA from  
[http://prof.usb.ve/robert/Archivos\\_Compartidos/Material%20Tecnico/Material%20CSE/IEEE%20519%20-%20P519AD5%20-%201996.pdf](http://prof.usb.ve/robert/Archivos_Compartidos/Material%20Tecnico/Material%20CSE/IEEE%20519%20-%20P519AD5%20-%201996.pdf)
- [7] Kananda, Kiki. 2011. *Analisa dan Upaya Pengurangan Harmonisa pada Sistem Pengisian Baterai untuk Penyeimbang Daya Beban Generator*. Tugas Akhir Sarjana. Teknik Elektro Universitas Andalas : Padang.
- [8] Defi, Ermaliza. 2013. *Analisa Perambatan Arus Harmonisa pada Generator Induksi Penguatan Sendiri dengan Peralatan Kontrol Elektronik*. Tugas Akhir Sarjana. Teknik Elektro Universitas Andalas : Padang.
- [9] Ellis, P. Eng, Robert G (\_\_\_). *Power System Harmonics*. Rockwell Automation Medium voltage business from  
[http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/mvb-wp011\\_-en-p.pdf](http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/mvb-wp011_-en-p.pdf).
- [10] Budiman, Refki. 2012. *Perbandingan Efek Pembebanan Beban Non Linear pada Generator Sinkron dan Generator Induksi Eksitasi Sendiri*. Tugas Akhir Sarjana. Teknik Elektro Universitas Andalas : Padang.
- [11] Operating Instruction Power Analyzer CA8220. Chauvin Arnoux

- [12] Dra. Tuti Suartini, M.Pd. 2010. *Perencanaan Filter Pasif Untuk Meningkatkan Kualitas Daya Listrik Di Gedung Direktorat TIK UPI*. UPI Bandung : Bandung.
- [13] Yana, Syiska (2006). *Perancangan dan Analisa Filter Pasif Jenis LC Untuk Mereduksi Harmonisa Pada Sisi Input UPS*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Univeristas Andalas.
- [14] [Http://jiunkpe/s1/elkt/2007/jiunkpe-ns-s1-2007-23402117-5226-filter\\_pasif-chapter4.pdf](http://jiunkpe/s1/elkt/2007/jiunkpe-ns-s1-2007-23402117-5226-filter_pasif-chapter4.pdf). 25 Mei 2014.
- [15] [Http://jiunkpe/s1/elkt/2009/jiunkpe-ns-s1-2009-23404057-11528-synchronous-chapter2.pdf](http://jiunkpe/s1/elkt/2009/jiunkpe-ns-s1-2009-23404057-11528-synchronous-chapter2.pdf). 25 Mei 2014
- [16] Darwish, Dr.Mohamed. *Trends In Active Power Filter*. Brunel University . 27 Mei 2014.
- [17] Wahjono, Endro (\_\_\_). *Perbaikan Total Harmonic Distortion Arus Jala-Jala Akibat Beban Rectifier Tiga Fasa Menggunakan Boost PFC* . Program Pascasarjana Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [18] Rashid, Muhammad H (2001). *Power Electronic Handbook*. Academic Press: London.
- [19] A. Reznik, M.G. Simoes, A. Al ? durra, and S. M. Muyeen. *LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems*. Colorado School of Mines, EECS Dept. Golden, CO. USA.

## LAMPIRAN A

### PERHITUNGAN KOMPONEN FILTER LCL

$$V_{RMS} = 60 \text{ V}$$

$$P_n = 300 \text{ W}$$

$$V_{DC} = 90 \text{ V}_{DC}$$

$$f_g = 50 \text{ Hz}$$

$$f_{sw} = 10 \text{ kHz}$$

$$x = 10 \% (0.1)$$

$$a = 10 \% (0.1)$$

$$ka = 10 \% (0.1)$$

$$m = 0.9$$

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{V_{RMS}^2}{P_n} \\ &= \frac{60^2}{300} \\ &= 12 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_b &= \frac{1}{\omega_g Z_b} \\ &= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 12} \\ &= 265 \text{ uF} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_f &= x \cdot C_b \\
&= 0.1 \times 265 \text{ uF} \\
&= 26.5 \text{ uF}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta I_{L \max} &= \frac{2V_{DC}}{3L_1} (1-m) m T_{sw} \\
&= \frac{2V_{DC}}{3L_1} (1-0.9) 0.9 \left( \frac{1}{f_{sw}} \right) \\
&= \frac{2V_{DC}}{3L_1} (0.1)(0.9) \left( \frac{1}{f_{sw}} \right) \\
&= \frac{0.18V_{DC}}{3f_{sw}L_1} \\
L_1 &= \frac{0.18V_{DC}}{3f_{sw}\Delta I_{L \max}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{\max} &= \frac{P_n \sqrt{2}}{3V_{RMS}} \\
&= \frac{300\sqrt{2}}{3.60} \\
&= 2.357 \text{ A} \\
&= 2.4 \text{ A}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta I_{L \max} &= a \cdot I_{\max} \\
&= 0.1 \cdot 2.4 \text{ A} \\
&= 0.24 \text{ A}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_1 &= \frac{0.18V_{DC}}{3f_{sw}\Delta I_{L \max}} \\
&= \frac{0.18 \cdot 90}{3 \cdot 10000 \cdot 0.24} \\
&= 2.25 \text{ mH}
\end{aligned}$$

$$k_a = \frac{1}{\left|1 + r(1 - L_1 C_b \omega_{sw}^2 x)\right|}$$

$$0.1 = \frac{1}{\left|1 + r(1 - 2.25 \times 10^{-3} \cdot 265 \times 10^{-6} \cdot (2 \times 3.14 \times 10000)^2 \cdot 0.1)\right|}$$

$$r = 0.038$$

$$\begin{aligned} L_2 &= \frac{\sqrt{\frac{1}{ka^2} + 1}}{C_f \cdot \omega_{sw}^2} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{(0.1)^2} + 1}}{26.5 \cdot 10^{-6} \times (2 \cdot 3.14 \cdot 10000)^2} \\ &= 0.107 \text{ mH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{res} &= \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot C_f}} \\ &= \sqrt{\frac{2.25 \times 10^{-3} + 0.107 \times 10^{-3}}{2.25 \times 10^{-3} \cdot 0.107 \times 10^{-3} \cdot 26.5 \times 10^{-6}}} \\ &= 1.94 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{res} &= \frac{1.94 \times 10^4}{3.14 \times 2} \\ &= 3089.8 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$500 \text{ Hz} < 3089.8 \text{ Hz} < 5000 \text{ Hz}$$

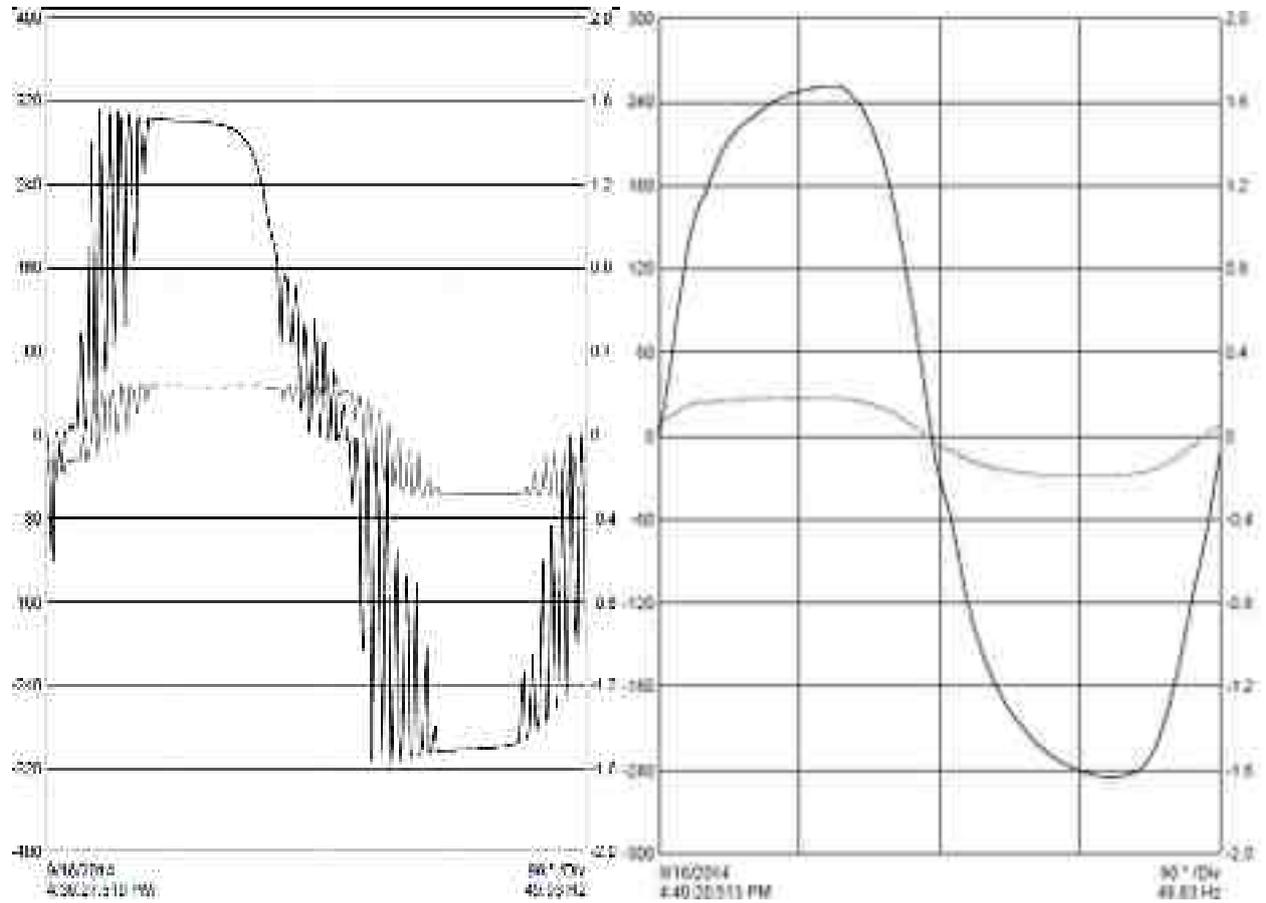
$$\begin{aligned} R_f &= \frac{1}{3\omega_{res} C_f} \\ &= \frac{1}{3 \times 21500 \times 26.5} \\ &= 0.66 \Omega \end{aligned}$$

## LAMPIRAN B

### GELOMBANG, DAFTAR HARMONISA, SPEKTRUM DAN DAYA

#### B.1 Gelombang

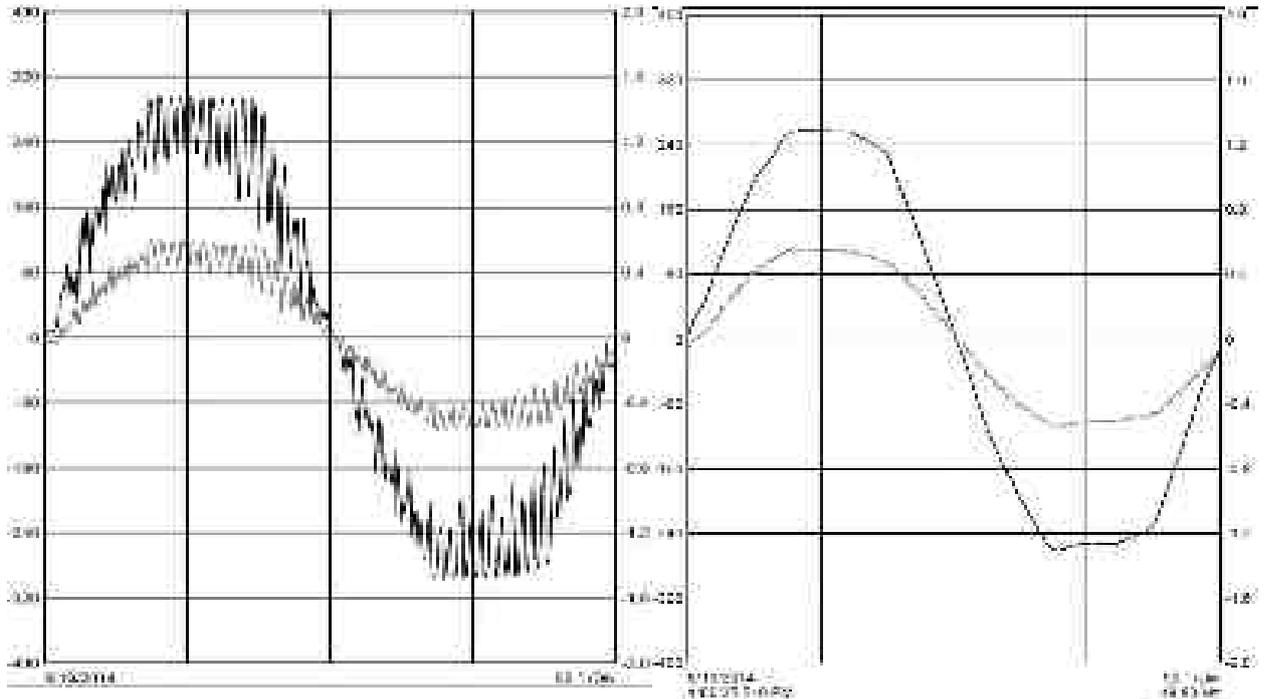
##### 1. Beban 20 W



Sebelum Menggunakan Filter

Setelah Menggunakan Filter

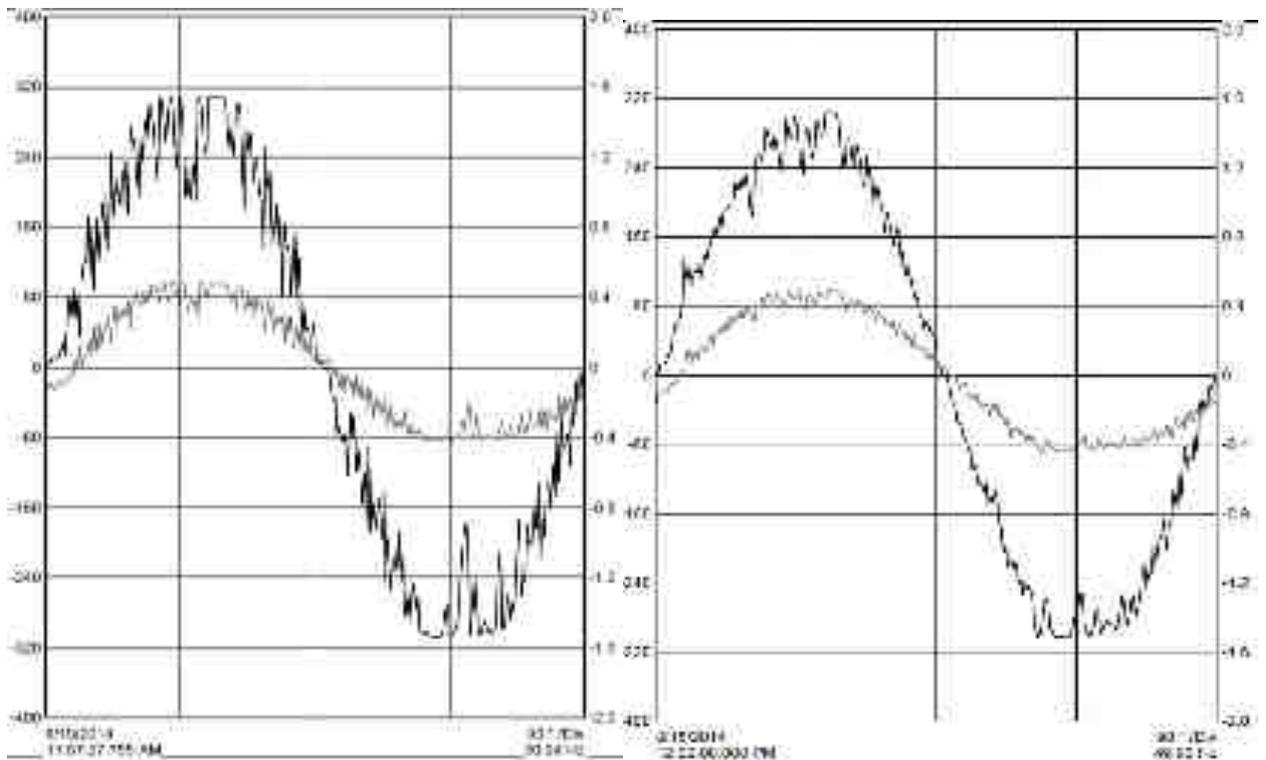
**2. Beban 40 W**



**Sebelum Menggunakan Filter**

**Setelah Menggunakan Filter**

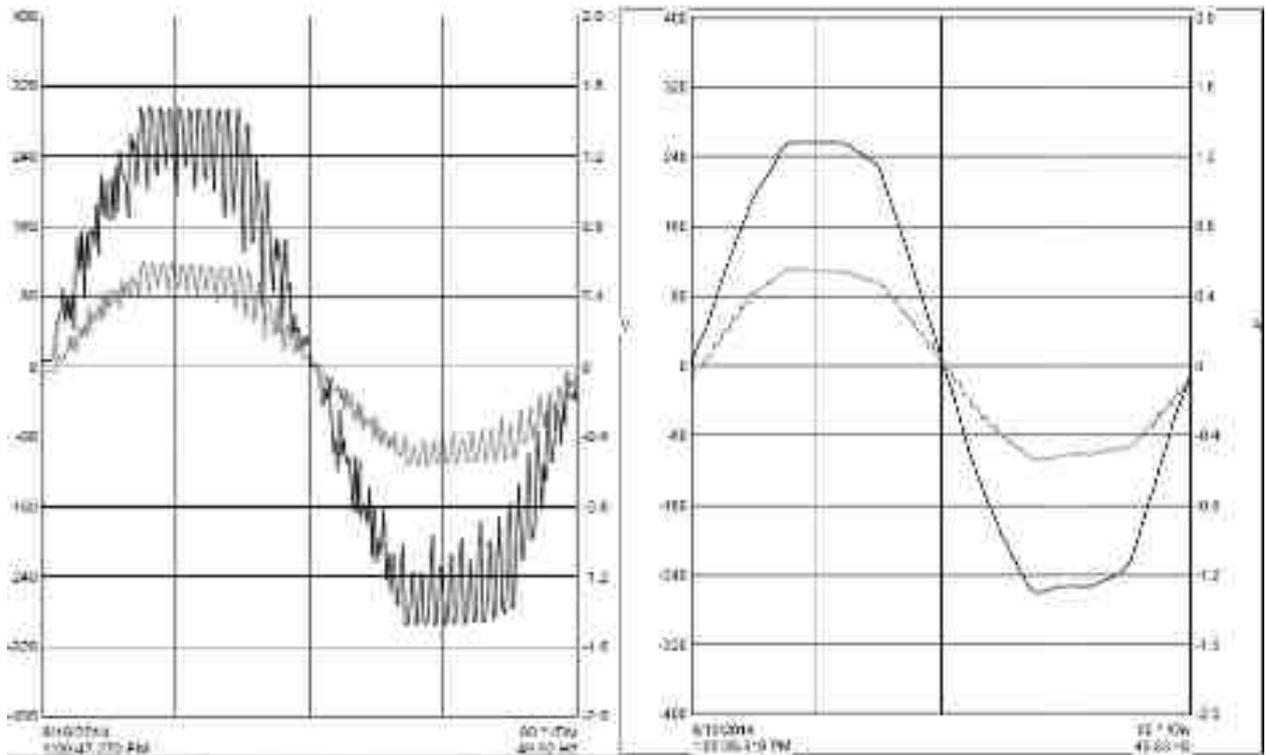
**3. Beban 60 W**



**Sebelum Menggunakan Filter**

**Setelah Menggunakan Filter**

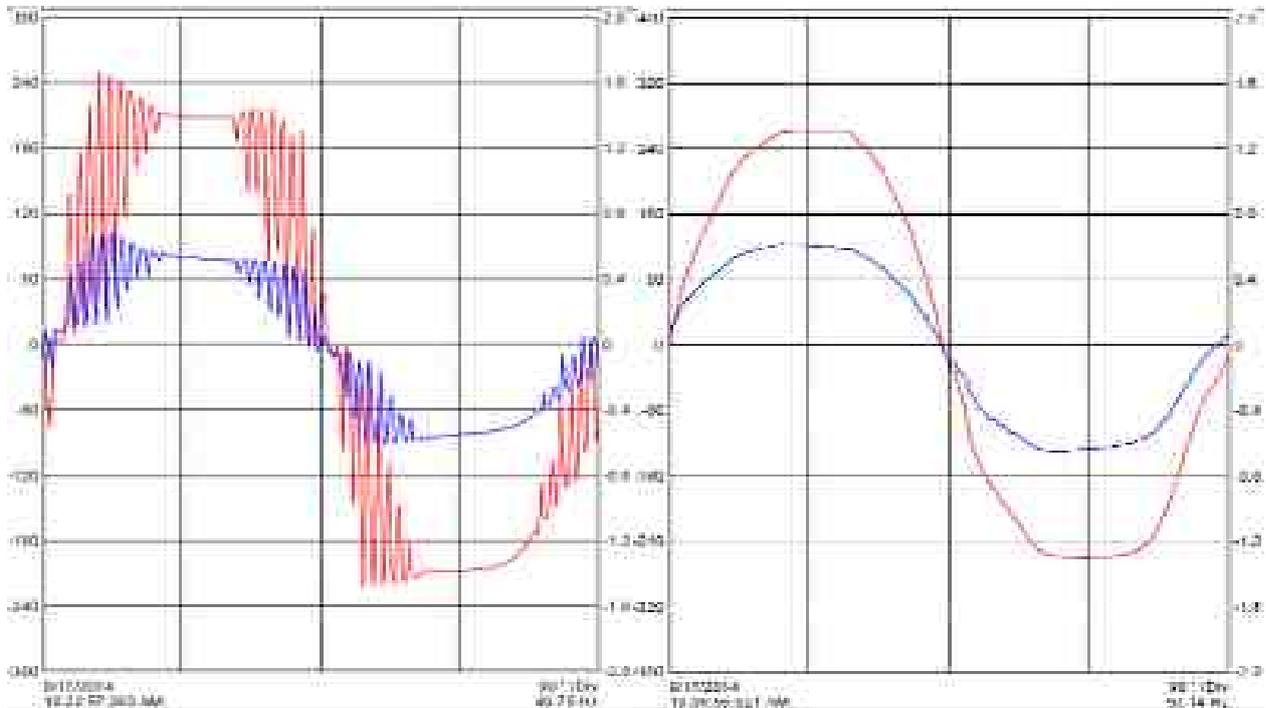
**4. Beban 75 W**



**Sebelum Menggunakan Filter**

**Setelah Menggunakan Filter**

**5. Beban 125 W**



**Sebelum Menggunakan Filter**

**Setelah Menggunakan Filter**

## B.2 Daftar Harmonisa

### 1. Beban 20 W



V RMS = 230.5 V V THD = 7.9% V CF = 1.39  
 A RMS = 0.2 A A THD = 23.4% A CF = 1.40

Harmonic	Vh	Ah	Ah <sup>2</sup>
0	0.0 %	0°	0.0 %
1	100.0 %	0°	100.0 %
2	4.7 %	-3°	11.5 %
3	1.8 %	-52°	18.5 %
4	2.2 %	5°	3.1 %
5	4.4 %	-140°	7.3 %
6	1.4 %	85°	0.9 %
7	2.8 %	-60°	2.7 %
8	0.6 %	81°	0.6 %
9	0.0 %	-135°	1.4 %
10	0.6 %	-138°	0.3 %
11	1.0 %	-178°	1.2 %
12	0.6 %	84°	0.4 %
13	0.6 %	-157°	0.7 %
14	0.6 %	55°	0.4 %
15	0.3 %	151°	0.6 %
16	0.4 %	148°	0.3 %
17	0.2 %	127°	0.3 %
18	0.3 %	57°	0.2 %
19	0.2 %	154°	0.4 %
20	0.4 %	15°	0.3 %
21	0.1 %	135°	0.3 %
22	0.2 %	71°	0.2 %
23	0.1 %	-30°	0.2 %
24	0.2 %	19°	0.2 %
25	0.0 %	0°	0.4 %
26	0.6 %	-52°	0.6 %
27	0.1 %	163°	0.1 %
28	0.3 %	-84°	0.3 %
29	0.2 %	168°	0.2 %
30	0.1 %	-135°	0.1 %
31	0.0 %	0°	0.2 %
32	0.0 %	0°	0.2 %
33	0.2 %	-46°	0.2 %
34	0.0 %	0°	0.0 %
35	0.1 %	-152°	0.1 %
36	0.0 %	0°	0.1 %
37	0.0 %	0°	0.1 %
38	0.2 %	-92°	0.6 %
39	0.2 %	-30°	0.2 %
40	0.4 %	-160°	0.6 %
41	0.1 %	-47°	0.2 %
42	0.4 %	107°	0.4 %
43	0.0 %	0°	0.2 %
44	0.0 %	0°	0.0 %
45	0.0 %	0°	0.0 %
46	0.0 %	0°	0.0 %
47	0.0 %	0°	0.0 %
48	0.0 %	0°	0.0 %
49	0.0 %	0°	0.0 %
50	0.0 %	0°	0.0 %

Sebelum Menggunakan Filter



V RMS = 228.4 V V THD = 8.8% V CF = 1.30  
 A RMS = 0.2 A A THD = 32.0% A CF = 1.48

Harmonic	Vh	Ah	Ah <sup>2</sup>
0	0.0 %	0°	0.0 %
1	100.0 %	0°	100.0 %
2	0.6 %	53°	22.4 %
3	6.3 %	23°	21.1 %
4	0.4 %	30°	6.6 %
5	1.0 %	108°	4.8 %
6	0.0 %	36°	0.8 %
7	1.6 %	-117°	1.8 %
8	1.0 %	65°	1.0 %
9	0.8 %	-137°	1.3 %
10	0.6 %	83°	0.6 %
11	0.7 %	-163°	1.1 %
12	0.6 %	58°	0.7 %
13	0.6 %	172°	0.6 %
14	0.6 %	-44°	0.6 %
15	0.6 %	132°	0.6 %
16	0.3 %	68°	0.2 %
17	0.3 %	115°	0.3 %
18	0.2 %	59°	0.1 %
19	0.2 %	103°	0.2 %
20	0.2 %	45°	0.1 %
21	0.1 %	103°	0.1 %
22	0.1 %	73°	0.1 %
23	0.0 %	0°	0.1 %
24	0.1 %	29°	0.0 %
25	0.0 %	0°	0.0 %
26	0.0 %	0°	0.0 %
27	0.0 %	0°	0.0 %
28	0.0 %	0°	0.0 %
29	0.0 %	0°	0.0 %
30	0.0 %	0°	0.0 %
31	0.0 %	0°	0.0 %
32	0.0 %	0°	0.0 %
33	0.0 %	0°	0.0 %
34	0.0 %	0°	0.0 %
35	0.0 %	0°	0.0 %
36	0.0 %	0°	0.0 %
37	0.0 %	0°	0.0 %
38	0.0 %	0°	0.0 %
39	0.0 %	0°	0.0 %
40	0.0 %	0°	0.0 %
41	0.0 %	0°	0.0 %
42	0.0 %	0°	0.1 %
43	0.0 %	0°	0.2 %
44	0.0 %	0°	0.0 %
45	0.0 %	0°	0.0 %
46	0.0 %	0°	0.0 %
47	0.0 %	0°	0.0 %
48	0.0 %	0°	0.0 %
49	0.0 %	0°	0.0 %
50	0.0 %	0°	0.0 %

Setelah Menggunakan Filter

## 2. Beban 40 W



V RMS = 187.8 V V THD = 5.2% V CF = 1.49  
 A RMS = 0.4 A A THD = 0.4% A CF = 1.53

Harmonic	Vh	Ah	Ah <sup>2</sup>
0	0.0 %	0°	0.0 %
1	100.0 %	0°	100.0 %
2	1.0 %	-173°	3.2 %
3	3.2 %	8°	4.1 %
4	0.5 %	91°	0.3 %
5	2.4 %	164°	3.3 %
6	0.0 %	-90°	0.0 %
7	1.1 %	-63°	1.1 %
8	0.3 %	157°	0.1 %
9	0.7 %	-126°	0.7 %
10	0.2 %	-12°	0.3 %
11	0.7 %	100°	0.7 %
12	0.1 %	121°	0.2 %
13	0.5 %	-132°	0.5 %
14	0.2 %	68°	0.0 %
15	0.4 %	-131°	0.3 %
16	0.4 %	117°	0.1 %
17	0.3 %	134°	0.3 %
18	0.1 %	-54°	0.2 %
19	0.2 %	91°	0.2 %
20	0.1 %	-11°	0.1 %
21	0.4 %	-158°	0.5 %
22	0.1 %	79°	0.1 %
23	0.3 %	140°	0.2 %
24	0.2 %	151°	0.1 %
25	0.3 %	-176°	0.2 %
26	0.2 %	-124°	0.2 %
27	0.2 %	153°	0.3 %
28	0.2 %	146°	0.3 %
29	0.2 %	165°	0.1 %
30	0.2 %	18°	0.2 %
31	0.3 %	91°	0.2 %
32	0.2 %	151°	0.2 %
33	0.2 %	-113°	0.2 %
34	0.2 %	-30°	0.2 %
35	0.2 %	134°	0.3 %
36	0.1 %	53°	0.2 %
37	0.1 %	27°	0.1 %
38	0.2 %	30°	0.1 %
39	0.3 %	71°	0.2 %
40	0.3 %	137°	0.2 %
41	0.2 %	-103°	0.2 %
42	0.2 %	-8°	0.3 %
43	0.2 %	-40°	0.2 %
44	0.1 %	-31°	0.1 %
45	0.4 %	-43°	0.3 %
46	0.2 %	62°	0.1 %
47	0.4 %	116°	0.3 %
48	0.2 %	180°	0.2 %
49	0.3 %	-137°	0.2 %
50	0.2 %	-62°	0.2 %

Sebelum Menggunakan Filter



V RMS = 185.2 V V THD = 5.8% V CF = 1.33  
 A RMS = 0.4 A A THD = 7.1% A CF = 1.38

Harmonic	Vh	Ah	Ah <sup>2</sup>
0	0.0 %	0°	0.0 %
1	100.0 %	0°	100.0 %
2	1.4 %	173°	3.4 %
3	4.5 %	12°	5.4 %
4	0.9 %	121°	0.3 %
5	3.1 %	-155°	2.7 %
6	0.5 %	-150°	0.5 %
7	1.0 %	-85°	1.0 %
8	0.2 %	160°	0.2 %
9	0.6 %	-102°	0.7 %
10	0.3 %	25°	0.3 %
11	0.7 %	97°	0.6 %
12	0.0 %	0°	0.0 %
13	0.3 %	-179°	0.3 %
14	0.1 %	85°	0.1 %
15	0.4 %	-173°	0.4 %
16	0.1 %	60°	0.1 %
17	0.3 %	65°	0.3 %
18	0.1 %	0°	0.1 %
19	0.3 %	60°	0.2 %
20	0.0 %	0°	0.0 %
21	0.2 %	116°	0.2 %
22	0.0 %	0°	0.1 %
23	0.1 %	107°	0.1 %
24	0.0 %	0°	0.0 %
25	0.1 %	32°	0.1 %
26	0.0 %	0°	0.1 %
27	0.1 %	37°	0.1 %
28	0.0 %	0°	0.0 %
29	0.1 %	116°	0.0 %
30	0.0 %	0°	0.1 %
31	0.0 %	0°	0.0 %
32	0.0 %	0°	0.1 %
33	0.0 %	0°	0.0 %
34	0.0 %	0°	0.1 %
35	0.0 %	0°	0.0 %
36	0.0 %	0°	0.1 %
37	0.0 %	0°	0.0 %
38	0.0 %	0°	0.1 %
39	0.0 %	0°	0.0 %
40	0.0 %	0°	0.0 %
41	0.0 %	0°	0.0 %
42	0.0 %	0°	0.1 %
43	0.0 %	0°	0.1 %
44	0.0 %	0°	0.1 %
45	0.1 %	26°	0.1 %
46	0.0 %	0°	0.1 %
47	0.0 %	0°	0.1 %
48	0.0 %	0°	0.0 %
49	0.0 %	0°	0.0 %
50	0.0 %	0°	0.0 %

Setelah Menggunakan Filter

### 3. Beban 60 W



Harmonic Graph

V RMS = 213.6 V V THD = 6.6% V CF = 1.47  
 A RMS = 0.3 A A THD = 15.1% A CF = 1.57

Harmonic	Vh	Vh%	Ah	Ah%
0	0.0%	0°	0.0%	0°
1	100.0%	0°	100.0%	0°
2	3.2%	119°	7.6%	-72°
3	1.5%	71°	5.4%	-45°
4	1.5%	-120°	3.0%	-58°
5	3.0%	166°	2.6%	-148°
6	0.6%	-83°	0.8%	-50°
7	1.3%	-74°	1.3%	-36°
8	0.3%	-37°	0.1%	-9°
9	0.9%	-184°	0.9%	-100°
10	0.5%	-105°	0.6%	-34°
11	0.7%	153°	0.6%	-150°
12	0.4%	-90°	0.2%	6°
13	0.8%	-129°	0.8%	-45°
14	0.6%	145°	0.6%	-131°
15	0.3%	38°	0.3%	144°
16	0.4%	-71°	0.3%	27°
17	1.4%	-156°	1.1%	-45°
18	0.2%	-70°	0.0%	0°
19	0.3%	22°	0.1%	153°
20	0.7%	-174°	0.4%	-83°
21	0.6%	103°	0.6%	-112°
22	0.3%	-67°	0.2%	94°
23	0.6%	-67°	0.7%	69°
24	0.0%	0°	0.3%	-57°
25	0.6%	141°	0.7%	-56°
26	1.0%	37°	0.7%	130°
27	0.3%	-104°	0.4%	136°
28	2.2%	40°	1.0%	153°
29	0.7%	43°	0.5%	-136°
30	1.3%	14°	0.8%	-160°
31	0.5%	-42°	0.4%	160°
32	1.7%	-164°	1.3%	0°
33	0.1%	101°	0.1%	26°
34	1.8%	-4°	1.4%	174°
35	0.7%	-40°	0.3%	-146°
36	0.6%	-141°	0.4%	63°
37	0.3%	117°	0.2%	14°
38	2.3%	-170°	1.5%	30°
39	0.2%	0°	0.2%	-114°
40	1.2%	-170°	0.4%	6°
41	0.1%	69°	0.2%	-144°
42	0.2%	162°	0.2%	84°
43	0.1%	72°	0.1%	41°
44	0.3%	151°	0.1%	130°
45	0.3%	4°	0.3%	-32°
46	0.2%	34°	0.2%	-58°
47	0.5%	-130°	0.5%	-143°
48	0.0%	0°	0.0%	0°
49	0.5%	63°	0.3%	12°
50	0.2%	-12°	0.2%	-44°

Sebelum Menggunakan Filter



Harmonic Graph

V RMS = 207.2 V V THD = 0.1% V CF = 1.44  
 A RMS = 0.3 A A THD = 8.8% A CF = 1.53

Harmonic	Vh	Vh%	Ah	Ah%
0	0.0%	0°	0.0%	0°
1	100.0%	0°	100.0%	0°
2	4.2%	122°	5.0%	-84°
3	1.7%	35°	5.7%	-39°
4	1.0%	164°	1.2%	-82°
5	2.5%	141°	1.8%	172°
6	0.6%	-83°	0.4%	-27°
7	1.0%	-51°	1.0%	-29°
8	0.6%	45°	0.6%	72°
9	0.3%	142°	0.2%	-170°
10	0.6%	-121°	0.5%	-82°
11	0.6%	144°	0.6%	-158°
12	0.6%	-34°	0.6%	36°
13	1.5%	-117°	1.5%	-39°
14	0.6%	156°	0.7%	-127°
15	1.3%	89°	1.4%	178°
16	0.8%	-29°	0.8%	66°
17	0.9%	-69°	0.8%	-6°
18	0.2%	121°	0.2%	-144°
19	0.2%	52°	0.2%	165°
20	0.5%	-0°	0.4%	104°
21	0.5%	-64°	0.5%	33°
22	0.5%	12°	0.4%	141°
23	0.2%	-68°	0.2%	50°
24	0.4%	-83°	0.4%	63°
25	0.4%	41°	0.2%	-178°
26	0.3%	73°	0.3%	-152°
27	0.3%	85°	0.1%	171°
28	0.3%	66°	0.2%	-170°
29	0.2%	96°	0.1%	105°
30	0.3%	66°	0.2%	-168°
31	0.5%	149°	0.3%	-29°
32	0.4%	160°	0.4%	-7°
33	0.4%	170°	0.3%	-6°
34	0.2%	-35°	0.1%	-177°
35	0.0%	0°	0.2%	76°
36	0.5%	-162°	0.4%	66°
37	0.2%	164°	0.3%	-7°
38	0.2%	160°	0.2%	60°
39	0.5%	-116°	0.2%	123°
40	0.2%	-18°	0.2%	-66°
41	0.4%	-140°	0.3%	64°
42	0.4%	-133°	0.4%	114°
43	0.3%	-119°	0.5%	121°
44	0.4%	-40°	0.4%	-148°
45	0.2%	-170°	0.3%	101°
46	0.1%	-157°	0.1%	153°
47	0.1%	0°	0.1%	-38°
48	0.3%	-57°	0.3%	-134°
49	0.3%	48°	0.2%	-32°
50	0.3%	49°	0.3%	3°

Setelah Menggunakan Filter

#### 4. Beban 75 W



V RMS = 167.6 V V THD = 0.2% V CF = 1.48  
 A RMS = 0.4 A A THD = 0.4% A CF = 1.53

Harmonic	Vh	Vh°	Ah	Ah°
0	0.0 %	0°	0.0 %	0°
1	100.0 %	0°	100.0 %	0°
2	1.0 %	-173°	3.2 %	-69°
3	3.2 %	8°	4.1 %	-27°
4	0.8 %	81°	0.3 %	11°
5	3.4 %	164°	3.3 %	173°
6	0.6 %	-90°	0.6 %	-99°
7	1.1 %	-63°	1.1 %	-69°
8	0.2 %	157°	0.1 %	-158°
9	0.7 %	-126°	0.7 %	-116°
10	0.2 %	-12°	0.3 %	-21°
11	0.7 %	100°	0.7 %	101°
12	0.1 %	121°	0.2 %	141°
13	0.5 %	-132°	0.5 %	-133°
14	0.2 %	60°	0.0 %	0°
15	0.4 %	-131°	0.3 %	-126°
16	0.4 %	117°	0.1 %	150°
17	0.3 %	134°	0.3 %	110°
18	0.1 %	-54°	0.2 %	-16°
19	0.2 %	91°	0.2 %	100°
20	0.1 %	-11°	0.1 %	64°
21	0.4 %	-159°	0.6 %	-158°
22	0.1 %	79°	0.1 %	22°
23	0.3 %	140°	0.2 %	147°
24	0.2 %	151°	0.1 %	144°
25	0.5 %	-178°	0.2 %	-161°
26	0.2 %	-124°	0.2 %	-74°
27	0.2 %	153°	0.3 %	134°
28	0.2 %	149°	0.3 %	134°
29	0.2 %	165°	0.1 %	169°
30	0.2 %	16°	0.2 %	62°
31	0.3 %	81°	0.2 %	87°
32	0.2 %	151°	0.2 %	166°
33	0.2 %	-113°	0.2 %	-127°
34	0.2 %	-20°	0.2 %	-12°
35	0.2 %	134°	0.2 %	83°
36	0.1 %	53°	0.2 %	105°
37	0.1 %	27°	0.1 %	-133°
38	0.2 %	35°	0.1 %	47°
39	0.3 %	71°	0.2 %	130°
40	0.3 %	137°	0.2 %	173°
41	0.2 %	-103°	0.2 %	-64°
42	0.2 %	-9°	0.3 %	12°
43	0.2 %	-40°	0.2 %	-3°
44	0.1 %	-31°	0.1 %	39°
45	0.4 %	-43°	0.3 %	-25°
46	0.2 %	42°	0.1 %	94°
47	0.4 %	116°	0.3 %	161°
48	0.2 %	180°	0.2 %	-144°
49	0.3 %	-137°	0.2 %	-86°
50	0.2 %	-60°	0.2 %	-16°

Sebelum Menggunakan Filter



V RMS = 165.2 V V THD = 5.8% V CF = 1.33  
 A RMS = 0.4 A A THD = 7.1% A CF = 1.36

Harmonic	Vh	Vh°	Ah	Ah°
0	0.0 %	0°	0.0 %	0°
1	100.0 %	0°	100.0 %	0°
2	1.4 %	170°	3.4 %	-104°
3	4.5 %	12°	5.4 %	-17°
4	0.9 %	121°	0.3 %	-125°
5	3.1 %	155°	2.7 %	164°
6	0.5 %	-150°	0.5 %	-140°
7	1.0 %	-65°	1.0 %	-88°
8	0.2 %	160°	0.2 %	170°
9	0.6 %	-102°	0.7 %	-100°
10	0.3 %	25°	0.3 %	27°
11	0.7 %	97°	0.6 %	104°
12	0.0 %	0°	0.0 %	0°
13	0.3 %	-179°	0.3 %	-171°
14	0.1 %	85°	0.1 %	91°
15	0.4 %	-173°	0.4 %	-184°
16	0.1 %	60°	0.1 %	73°
17	0.3 %	65°	0.3 %	73°
18	0.1 %	9°	0.1 %	11°
19	0.3 %	80°	0.2 %	70°
20	0.0 %	0°	0.0 %	0°
21	0.2 %	118°	0.2 %	127°
22	0.0 %	0°	0.1 %	71°
23	0.1 %	107°	0.1 %	123°
24	0.0 %	0°	0.0 %	0°
25	0.1 %	32°	0.1 %	45°
26	0.0 %	0°	0.1 %	-107°
27	0.1 %	37°	0.1 %	62°
28	0.0 %	0°	0.0 %	0°
29	0.1 %	116°	0.0 %	0°
30	0.0 %	0°	0.1 %	65°
31	0.0 %	0°	0.0 %	0°
32	0.0 %	0°	0.1 %	64°
33	0.0 %	0°	0.0 %	0°
34	0.0 %	0°	0.1 %	-79°
35	0.0 %	0°	0.0 %	0°
36	0.0 %	0°	0.1 %	65°
37	0.0 %	0°	0.0 %	0°
38	0.0 %	0°	0.1 %	-64°
39	0.0 %	0°	0.0 %	0°
40	0.0 %	0°	0.0 %	0°
41	0.0 %	0°	0.0 %	0°
42	0.0 %	0°	0.1 %	-5°
43	0.0 %	0°	0.1 %	35°
44	0.0 %	0°	0.1 %	52°
45	0.1 %	28°	0.1 %	88°
46	0.0 %	0°	0.1 %	123°
47	0.0 %	0°	0.1 %	94°
48	0.0 %	0°	0.0 %	0°
49	0.0 %	0°	0.0 %	0°
50	0.0 %	0°	0.0 %	0°

Setelah Menggunakan Filter

## 5. Beban 125 W



V RMS = 184.3 V V THD = 11.6% V CF = 1.53  
 A RMS = 0.4 A A THD = 11.8% A CF = 1.81

Harmonic	Vh	Vh%	Ah	Ah%
0	0.0 %	0°	0.0 %	0°
1	100.0 %	0°	100.0 %	0°
2	2.5 %	-192°	2.6 %	141°
3	6.0 %	-14°	6.9 %	-24°
4	1.4 %	-135°	1.2 %	-170°
5	2.2 %	-112°	2.2 %	-137°
6	1.4 %	-98°	1.2 %	-127°
7	1.8 %	-68°	1.7 %	-100°
8	1.2 %	-110°	1.0 %	-148°
9	1.1 %	-81°	1.1 %	-120°
10	0.4 %	-48°	0.3 %	-103°
11	0.7 %	-133°	0.7 %	171°
12	0.6 %	-51°	0.6 %	-123°
13	0.6 %	-150°	0.6 %	133°
14	0.6 %	-102°	0.6 %	-188°
15	0.4 %	180°	0.5 %	64°
16	0.6 %	-68°	0.5 %	-171°
17	0.3 %	178°	0.4 %	64°
18	0.5 %	-70°	0.4 %	-175°
19	0.3 %	-165°	0.3 %	69°
20	0.3 %	-50°	0.3 %	171°
21	0.2 %	-154°	0.3 %	61°
22	0.0 %	-15°	0.4 %	-172°
23	0.4 %	-100°	0.2 %	82°
24	0.4 %	-10°	0.3 %	160°
25	0.4 %	-108°	0.1 %	101°
26	0.6 %	148°	0.2 %	12°
27	0.2 %	50°	0.1 %	-133°
28	0.3 %	148°	0.2 %	-21°
29	0.2 %	90°	0.1 %	179°
30	0.3 %	-50°	0.1 %	132°
31	0.5 %	-142°	0.2 %	70°
32	0.1 %	-53°	0.1 %	140°
33	0.2 %	-104°	0.2 %	74°
34	0.1 %	-159°	0.1 %	108°
35	0.3 %	21°	0.0 %	0°
36	0.3 %	-103°	0.3 %	68°
37	0.1 %	180°	0.2 %	-58°
38	0.4 %	-118°	0.3 %	76°
39	0.2 %	123°	0.1 %	-26°
40	0.3 %	-137°	0.3 %	60°
41	0.2 %	66°	0.1 %	-63°
42	0.3 %	-145°	0.3 %	30°

Harmonic	Vh	Vh%	Ah	Ah%
43	0.0 %	-176°	0.0 %	-53°
44	0.4 %	135°	0.1 %	-43°
45	1.0 %	164°	0.0 %	-38°
46	0.6 %	150°	0.4 %	-62°
47	0.3 %	5°	0.3 %	62°
48	1.5 %	169°	1.5 %	-67°
49	0.0 %	-135°	1.4 %	-3°
50	5.4 %	62°	5.4 %	-143°

Sebelum Menggunakan Filter



V RMS = 203.9 V V THD = 8.8% V CF = 1.28  
 A RMS = 0.5 A A THD = 9.3% A CF = 1.33

Harmonic	Vh	Vh%	Ah	Ah%
0	0.0 %	0°	0.0 %	0°
1	100.0 %	0°	100.0 %	0°
2	1.8 %	-174°	3.8 %	113°
3	6.1 %	0°	7.0 %	1°
4	1.5 %	-176°	1.6 %	131°
5	1.0 %	-171°	1.1 %	152°
6	1.4 %	-149°	1.3 %	171°
7	1.4 %	-62°	1.3 %	-122°
8	0.7 %	-66°	0.6 %	-138°
9	0.6 %	-58°	0.6 %	-138°
10	1.1 %	-34°	1.1 %	-81°
11	0.5 %	-105°	0.5 %	-160°
12	0.8 %	-63°	0.8 %	-132°
13	0.2 %	-147°	0.2 %	125°
14	0.0 %	-64°	0.0 %	-173°
15	0.3 %	159°	0.3 %	64°
16	0.4 %	-77°	0.4 %	-175°
17	0.2 %	116°	0.2 %	11°
18	0.3 %	-67°	0.3 %	158°
19	0.2 %	87°	0.3 %	-40°
20	0.2 %	-108°	0.2 %	120°
21	0.1 %	68°	0.2 %	-74°
22	0.2 %	-117°	0.2 %	111°
23	0.0 %	0°	0.0 %	0°
24	0.1 %	-156°	0.1 %	67°
25	0.0 %	0°	0.0 %	0°
26	0.0 %	0°	0.1 %	6°
27	0.0 %	0°	0.1 %	38°
28	0.0 %	0°	0.1 %	-18°
29	0.0 %	0°	0.0 %	0°
30	0.0 %	0°	0.1 %	-58°
31	0.0 %	0°	0.0 %	0°
32	0.0 %	0°	0.0 %	0°
33	0.0 %	0°	0.0 %	0°
34	0.0 %	0°	0.0 %	0°
35	0.0 %	0°	0.0 %	0°
36	0.0 %	0°	0.0 %	0°
37	0.0 %	0°	0.0 %	0°
38	0.0 %	0°	0.0 %	0°
39	0.0 %	0°	0.0 %	0°
40	0.0 %	0°	0.1 %	6°
41	0.0 %	0°	0.1 %	-120°
42	0.0 %	0°	0.0 %	0°

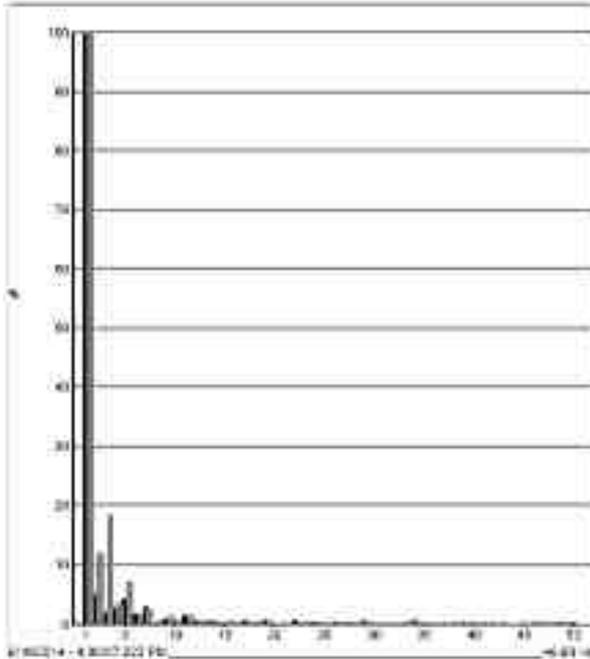
Harmonic	Vh	Vh%	Ah	Ah%
43	0.0 %	0°	0.0 %	0°
44	0.0 %	0°	0.0 %	0°
45	0.0 %	0°	0.0 %	0°
46	0.0 %	0°	0.0 %	0°
47	0.0 %	0°	0.0 %	0°
48	0.0 %	0°	0.0 %	0°
49	0.0 %	0°	0.0 %	0°
50	0.0 %	0°	0.1 %	-65°

Setelah Menggunakan Filter

## B.3 Spektrum Harmonisa

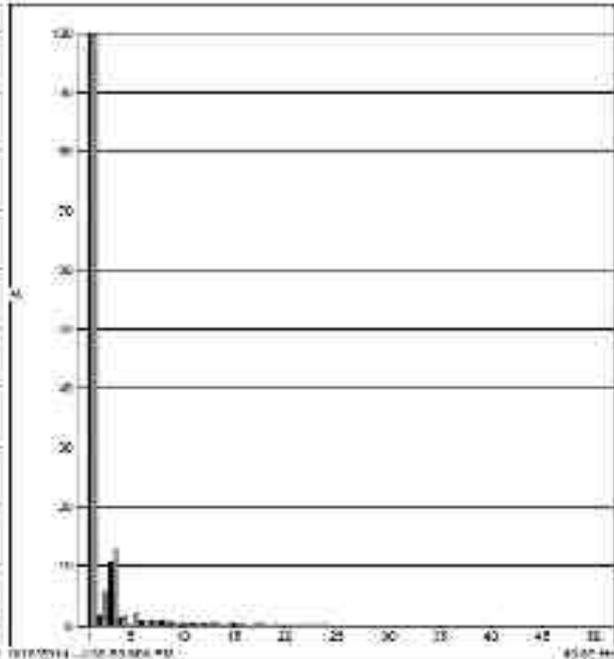
### 1. Beban 20 W

220.0 V THD=1.2% VCF=1.00  
2.2 A THD=2.3% WCF=1.00



Sebelum Menggunakan Filter

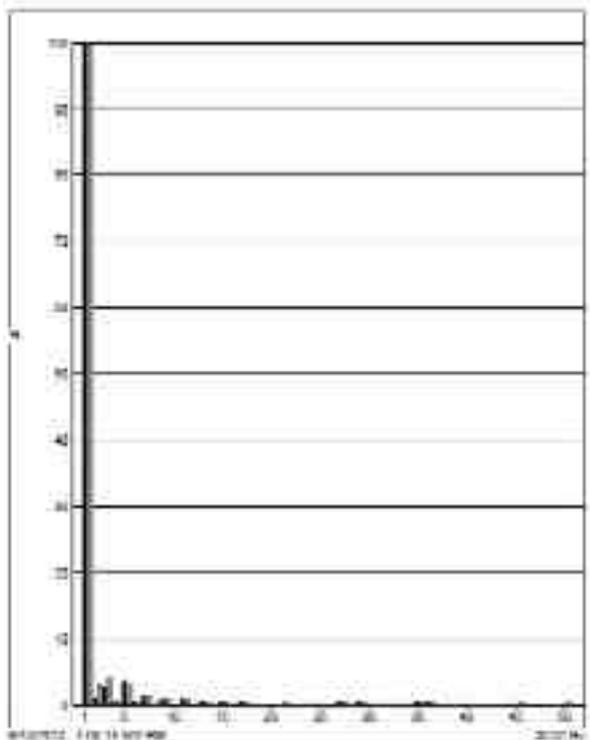
220.0 V THD=0.12% VCF=1.00  
2.2 A THD=0.12% WCF=1.00



Setelah Menggunakan Filter

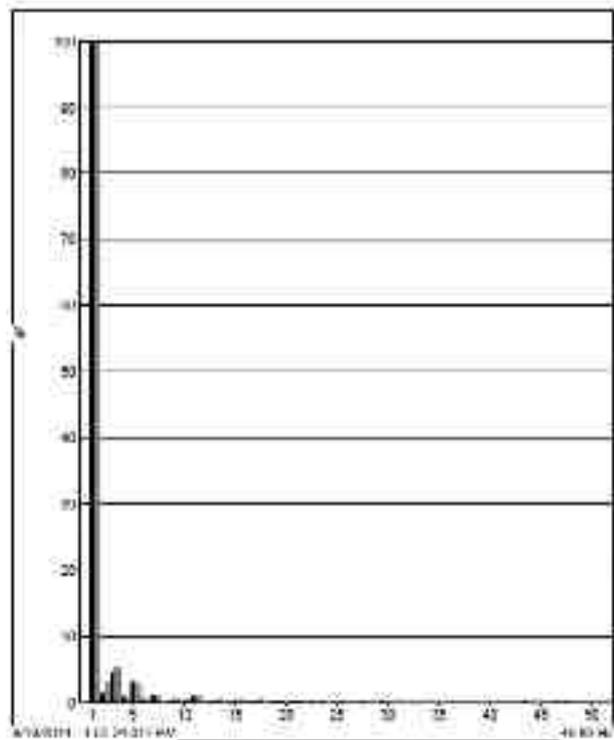
### 2. Beban 40 W

220.0 V THD=1.2% VCF=1.00  
2.2 A THD=2.3% WCF=1.00



Sebelum Menggunakan Filter

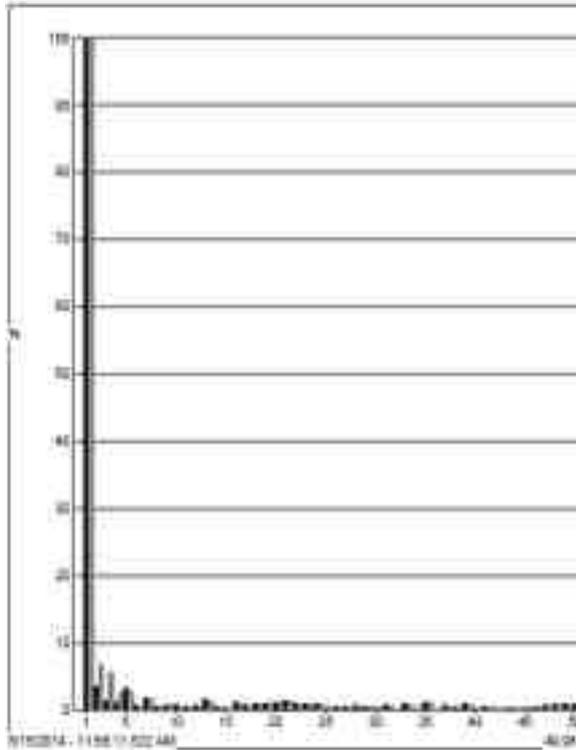
220.0 V THD=0.12% VCF=1.00  
2.2 A THD=0.12% WCF=1.00



Setelah Menggunakan Filter

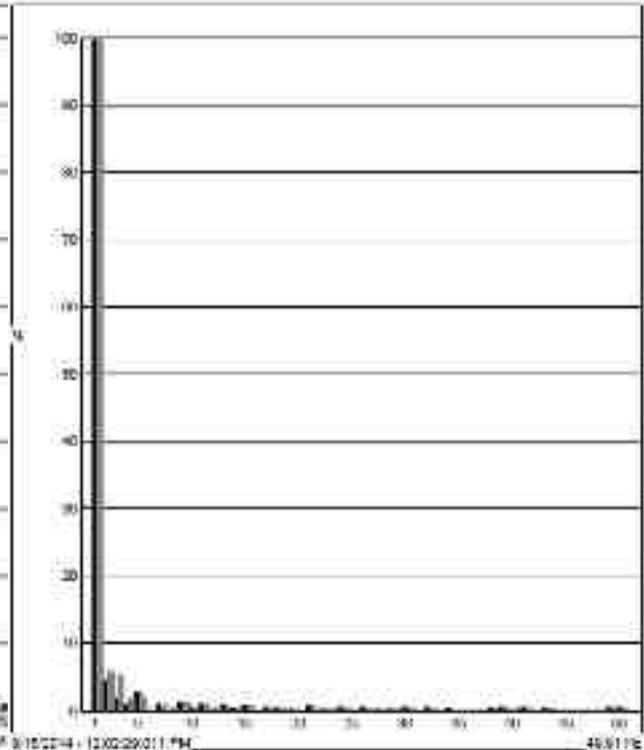
### 3. Beban 60 W

211.9 V, V THD = 6.2% V CF = 1.44  
I LA = 7.42 A THD = 6.6% A CF = 1.52



Sebelum Menggunakan Filter

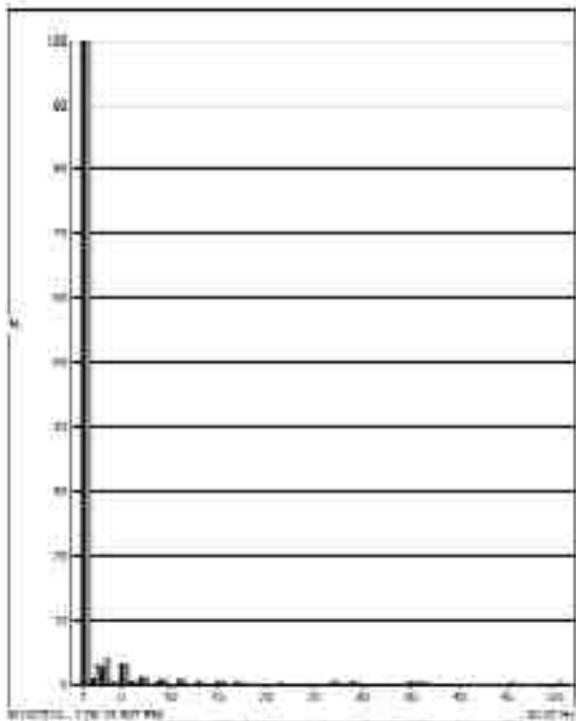
210.9 V, V THD = 0.2% V CF = 1.44  
I LA = 7.3 A THD = 0.2% A CF = 1.52



Setelah Menggunakan Filter

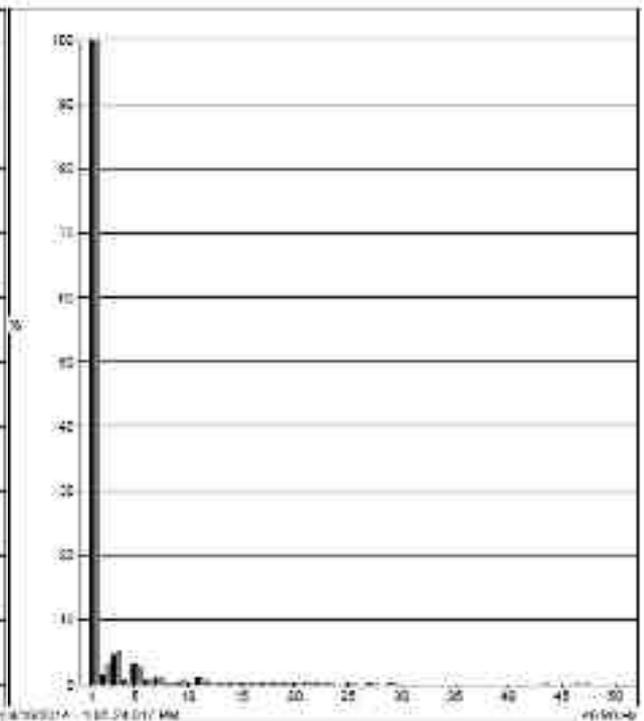
### 4. Beban 75 W

160.9 V, V THD = 5.2% V CF = 1.24  
I LA = 4.64 A THD = 5.6% A CF = 1.32



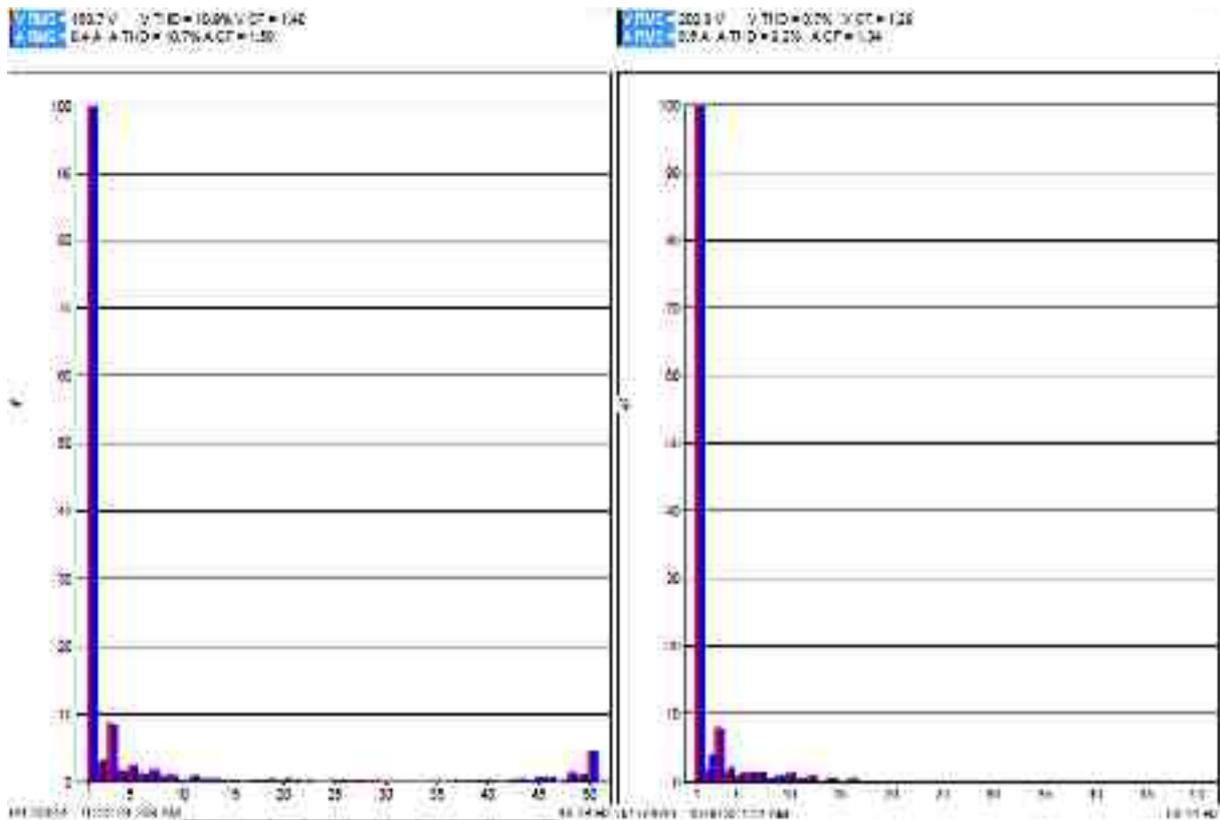
Sebelum Menggunakan Filter

160.1 V, V THD = 0.6% V CF = 1.24  
I LA = 4.5 A THD = 0.6% A CF = 1.32



Setelah Menggunakan Filter

## 5. Beban 125 W

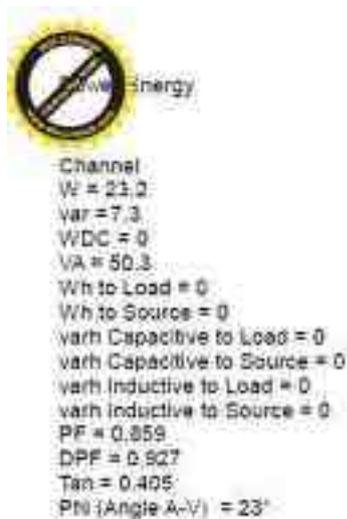


Sebelum Menggunakan Filter

Setelah Menggunakan Filter

## B.4 Daya

### 1. Beban 20 W



Sebelum Menggunakan Filter



Setelah Menggunakan Filter

## 2. Beban 40 W



Channel  
W = 75.2  
var = 3  
WDC = 0  
VA = 77.3  
Wh to Load = 0  
Wh to Source = 0  
varh Capacitive to Load = 0  
varh Capacitive to Source = 0  
varh Inductive to Load = 0  
varh Inductive to Source = 0  
PF = 0.973  
DPF = 0.999  
Tan = 0.041  
Phi (Angle A-V) = 2°

Sebelum Menggunakan Filter



Channel  
W = 79.6  
var = 2.7  
WDC = 0  
VA = 79.7  
Wh to Load = 0  
Wh to Source = 0  
varh Capacitive to Load = 0  
varh Capacitive to Source = 0  
varh Inductive to Load = 0  
varh Inductive to Source = 0  
PF = 0.998  
DPF = 0.999  
Tan = 0.034  
Phi (Angle A-V) = 2°

Setelah Menggunakan Filter

## 3. Beban 60 W



Channel  
W = 64.9  
var = 9.5  
WDC = 0  
VA = 67.8  
Wh to Load = 0  
Wh to Source = 0  
varh Capacitive to Load = 0  
varh Capacitive to Source = 0  
varh Inductive to Load = 0  
varh Inductive to Source = 0  
PF = 0.957  
DPF = 0.99  
Tan = 0.145  
Phi (Angle A-V) = 9°

Sebelum Menggunakan Filter



Channel  
W = 66.7  
var = 8.3  
WDC = 0  
VA = 67.9  
Wh to Load = 0  
Wh to Source = 0  
varh Capacitive to Load = 0  
varh Capacitive to Source = 0  
varh Inductive to Load = 0  
varh Inductive to Source = 0  
PF = 0.982  
DPF = 0.992  
Tan = 0.125  
Phi (Angle A-V) = 8°

Setelah Menggunakan Filter

4. **Beban 75 W**



Channel  
W = 75.2  
var = 3  
WDC = 0  
VA = 77.3  
Wh to Load = 0  
Wh to Source = 0  
varh Capacitive to Load = 0  
varh Capacitive to Source = 0  
varh Inductive to Load = 0  
varh Inductive to Source = 0  
PF = 0.973  
DPF = 0.999  
Tan = 0.041  
Phi (Angle A-V) = 2°

**Sebelum Menggunakan Filter**



Channel  
W = 79.6  
var = 2.7  
WDC = 0  
VA = 79.7  
Wh to Load = 0  
Wh to Source = 0  
varh Capacitive to Load = 0  
varh Capacitive to Source = 0  
varh Inductive to Load = 0  
varh Inductive to Source = 0  
PF = 0.998  
DPF = 0.999  
Tan = 0.034  
Phi (Angle A-V) = 2°

**Setelah Menggunakan Filter**

5. **Beban 125 W**



Channel  
W = 75  
var = -4.7  
WDC = 0  
VA = 78  
Wh to Load = 0  
Wh to Source = 0  
varh Capacitive to Load = 0  
varh Capacitive to Source = 0  
varh Inductive to Load = 0  
varh Inductive to Source = 0  
PF = 0.962  
DPF = 0.998  
Tan = -0.064  
Phi (Angle A-V) = -4°

**Sebelum Menggunakan Filter**



Channel  
W = 98.5  
var = -7.2  
WDC = 0  
VA = 98.9  
Wh to Load = 0  
Wh to Source = 0  
varh Capacitive to Load = 0  
varh Capacitive to Source = 0  
varh Inductive to Load = 0  
varh Inductive to Source = 0  
PF = 0.997  
DPF = 0.997  
Tan = -0.073  
Phi (Angle A-V) = -4°

**Setelah Menggunakan Filter**