

Simulasi Filter Pasif dan Perbandingan Unjuk Kerjanya dengan Filter Aktif dan Filter Aktif Hibrid dalam Meredam Harmonisa pada Induction Furnace

Yusak Tanoto, Limboto Limantara, Khristian Khandy Lestanto

Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra

Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236

Email: tanyusak@petra.ac.id, limboto@petra.ac.id

Abstrak

Makalah ini memaparkan tentang simulasi Filter Pasif untuk meredam harmonisa yang timbul akibat penggunaan beban *Vacuum Induction Furnace* dengan daya 9 kW, 13.8 kVA, 200V, 3 Ph, 50/60 Hz, serta perbandingannya dengan Filter Aktif dan Filter Aktif Hibrid. Pada penelitian terdahulu Filter Aktif maupun Filter Aktif Hibrid terbukti mampu meredam harmonisa arus yang timbul dengan baik. Hasil terbaik tetap didapat dengan menggunakan Filter Aktif Hibrid dengan $\%I_{THD}$ sebesar 4.27 % dan $\%V_{THD}$ sebesar 3.83 %. Penggunaan Filter Aktif memberikan hasil $\%I_{THD}$ sebesar 5.14% dan $\%V_{THD}$ sebesar 3.82%. Bila dibandingkan dengan penggunaan Filter Pasif maka ada peningkatan kinerja dari penggunaan Filter Aktif dalam hal mereduksi $\%I_{THD}$ sebesar 17.23% dan $\%V_{THD}$ sebesar 0.44%. Keduanya telah sesuai dengan standar % THD. Penggunaan Filter Aktif Hibrid mampu mereduksi $\%I_{THD}$ sebesar 17.65% dan $\%V_{THD}$ sebesar 0.43% dibanding penggunaan Filter Pasif. Penggunaan Filter Pasif memberikan hasil $\%I_{THD}$ sebesar 22.37% dan $\%V_{THD}$ sebesar 4.26%. $\%I_{THD}$ untuk Filter Pasif belum memenuhi standar % THD untuk arus.

Kata kunci: Harmonisa, Simulasi, Filter Aktif Hibrid, Filter Pasif, Filter Aktif, THD.

Abstract

This paper describe about simulation of Passive Filter in analysis to reduce harmonics that happened in a load such as vacuum casting induction furnace 9 kW, 13.8 kVA, 200V, 3 Ph, 50/60 Hz, also gives comparison with Hybrid Active Filter and Active Filter which made satisfaction result on the previous research. The best result achieved on the use of Hybrid Active Filter on $\%I_{THD}$ for 4.27 % and $\%V_{THD}$ for 3.83%, while Active Filter gave on $\%I_{THD}$ for 5.14 % and $\%V_{THD}$ for 3.82%. There are 17.23% and 0.44% lower in $\%V_{THD}$ and $\%I_{THD}$ if compared with result achieved by Passive Filter. Both of them are suited with %THD standard. But the result achieved by Hybrid active Filter gave most satisfactory value compared with Passive Filter's for 17.65% and 0.43% lower in $\%V_{THD}$ and $\%I_{THD}$. Simulation on Passive Filter produced on $\%I_{THD}$ for 22.37 % and $\%V_{THD}$ for 4.26%. In this case, $\%I_{THD}$ standard for applying Passive Filter could not be fulfilled.

Keywords: Harmonics, Harmonics, Hybrid Active Filter, Passive Filter, Active Filter, THD.

Pendahuluan

Penggunaan Filter untuk meredam harmonisa pada industri modern semakin banyak digunakan karena semakin banyak persoalan harmonisa yang timbul akibat penggunaan komponen beban non linier pada semua jenis industri, terutama industri pengecoran logam, industri baja, dan industri lainnya yang menggunakan peralatan konverter, inverter, dan lain sebagainya. Penggunaan jenis beban ini secara langsung akan mempengaruhi kualitas daya listrik karena arus pada beban non linier tidak berbentuk gelombang sinusoidal murni meskipun sumber tegangan yang dipakai pada saat itu berbentuk gelombang sinusoidal murni.

Harmonisa [1]

Harmonisa merupakan suatu fenomena yang timbul akibat pengoperasian beban listrik non linier, yang merupakan sumber terbentuknya gelombang frekuensi tinggi (kelipatan dari frekuensi fundamental, misal: 100Hz, 150Hz, 200Hz, 300Hz, dan seterusnya). Hal ini dapat mengganggu sistem kelistrikan pada frekuensi fundamentalnya yaitu 50/60 Hz, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan yang idealnya adalah sinusoidal murni akan menjadi cacat akibat distorsi harmonisa yang terjadi. Bentuk gelombang akibat munculnya harmonisa dapat dilihat pada Gambar 1.

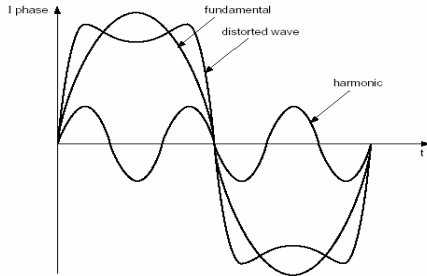
Efek utama dari tegangan dan arus harmonisa yang timbul di dalam sistem tenaga antara lain:

1. Penambahan tingkat harmonisa akibat dari resonansi hubungan seri dan paralel.
2. Penurunan efisiensi pada daya generator, transmisi, distribusi, dan pemakaiannya.

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Desember 2005. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 6, nomor 1, Maret 2006.

3. Interferensi dengan rangkaian-rangkaian telepon (telekomunikasi) dan pemancar karena arus harmonisa urutan nol.
4. Kesalahan-kesalahan pada meter-meter piringan putar pengukur energi.

Panas berlebihan yang timbul pada mesin berputar penghantar netral suatu sistem.



Gambar 1. Bentuk Gelombang Yang Terdistorsi Harmonisa[3]

Gelombang periodik yang tidak berbentuk sinusoidal dapat dinyatakan dalam jumlah seri harmonisa frekuensi dasar yang dinyatakan dengan analisis persamaan Fourier sebagai berikut[5]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_o t + b_n \sin n\omega_o t) \quad (1)$$

dimana:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

= nilai dari f fundamental untuk satu periode yaitu dari 0 hingga T

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_o t, dt \quad (3)$$

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

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_o t, dt \quad (4)$$

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

n = indeks harmonisa

$\%V_{THD}$ adalah prosentase jumlah total tegangan yang terdistorsi oleh harmonisa, $\%I_{THD}$ adalah prosentase jumlah total arus yang terdistorsi oleh harmonisa, diberikan oleh rumus:

$$\% V_h = \frac{V_h}{V_s} \times 100 = h \frac{I_h}{I_s} \times 100 \quad (5)$$

$$\% V_h = h \frac{(I_h / I_i)}{(I_{sc} / I_i)} \times 100 \quad (6)$$

$$\% I_h = \frac{I_h}{I_s} \times 100 \quad (7)$$

Dimana:

V_h : Tegangan harmonisa.

V_s : Tegangan sistem.

I_h : Arus harmonisa.

I_{sc} : Arus *short circuit*.

h : Harmonisa ke-n

I_{sc}/I_i : Rasio pada tabel Limit Distorsi Arus Harmonisa.

I_i : Arus yang mengambil daya beban elektronik.

Total Harmonic Distortion (THD) untuk arus didefinisikan dengan persamaan[6]:

$$I_{THD} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{I_h^2}}{I_i} \quad (8)$$

Total Harmonic Distortion (THD) untuk tegangan didefinisikan dengan persamaan:

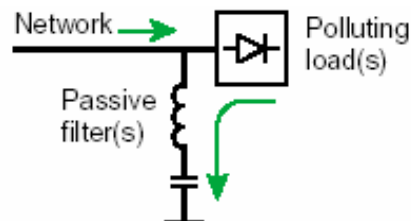
$$V_{THD} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{V_h^2}}{V_i} \quad (9)$$

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.

Komponen utama yang terdapat pada filter pasif adalah:

1. Kapasitor.
Kapasitor dihubungkan seri atau paralel untuk memperoleh sebuah total rating tegangan dan kVar yang diinginkan.
2. Induktor.
Induktor digunakan dalam rangkaian filter dirancang mampu menahan selubung frekuensi tinggi yaitu efek kulit (*skin effect*).



Gambar 2. Rangkaian *Passive Filter* dalam Sistem[4]

Filter Pasif tersusun dari kapasitor dan induktor dengan satu frekuensi yang disetting pada frekuensi tegangan harmonisa yang akan dihilangkan.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (10)$$

Dimana:

f_r = Frekuensi setting.

L = Induktansi.

C = Kapasitansi.

Karakteristik susunan frekuensi setting filter:

$$n_r = f_r/f_1 \quad (11)$$

Dimana:

n_r = Orde dari resonansi.

f_r = Frekuensi setting.

f_1 = Frekuensi fundamental.

Karakteristik kompensasi daya reaktif:

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_{r-1}^2} U_1^2 C 2\pi f_1 \quad (12)$$

Dimana:

Q_{var} = Daya reaktif untuk kompensasi.

U_1 = Tegangan fasa-fasa.

C = Kapasitansi.

f_1 = Frekuensi fundamental.

Karakteristik impedansi:

$$X_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (13)$$

Dimana:

X_o = Impedansi filter.

Karakteristik faktor kualitas:

$$q = X_o/r \quad (14)$$

Dimana:

q = Faktor kualitas dari reaktor.

X_o = Impedansi filter.

r = Tahanan reaktor.

(Nilai q = 75 untuk inti udara dan q > 75 untuk inti besi).

Objek Penelitian dan Alat Ukur



Gambar 3. Vacuum Casting Induction Furnace.[2]

Data Teknis:

Nominal Power : 3 kW, 3 fasa

Oscillating Frequency : 18 kHz

Arsorbed Power : 4.6 kVA

Power Supply : 200V,50/60Hz

Alat ukur yang digunakan adalah *Power Harmonics Analyzer* Fluke 41B, untuk mengukur besarnya tegangan, arus, daya, *power factor* dan tingkat kandungan harmonisa.

Pengukuran dilakukan pada:

1. *Incoming Main Distribution Panel* (MDP) dan penghantar netral MDP selama 1 jam untuk mengambil data: tegangan, % V_{THD} , % I_{THD} , frekuensi, arus, daya aktif, faktor daya (PF), dan distorsi faktor daya (DPF).
2. *Outgoing Sub Distribution Panel* (SDP) yang langsung berhubungan dengan bus beban *vacuum casting induction furnace* selama 1 jam untuk mengambil data: tegangan, % V_{THD} , % I_{THD} , frekuensi, arus, daya aktif, faktor daya, dan distorsi faktor daya (DPF).

Data Pengukuran[2]

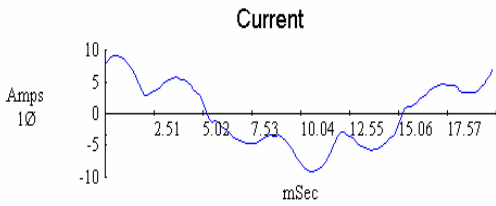
Tabel 1. Data Pengukuran Pada *incoming* MDP

Single Phase Readings			V	I
F	49.81	RMS	399.2	70.18
Power		Peak	568.7	100.65
KW	-15.2	DC Offset	-0.5	-0.16
KVA	28.02	Crest	1.42	1.43
KVAR	23.48	THD Rms	0.94	3.24
Peak KW	-42.5	THD Fund	0.94	3.24
Phase	123° lead	HRMS	3.7	2.27
Total PF	-0.54	KFactor		1.03
DPF	-0.55			

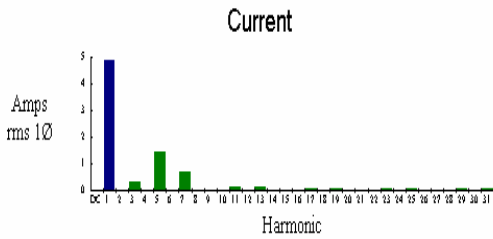
Tabel 2. Data Pengukuran Pada *Induction Furnace*

Single Phase Readings			V	I
F	49.81	RMS	395.2	5.18
Power		Peak	569.1	9.3
KW	0.35	DC Offset	-0.4	-0.04
KVA	2.05	Crest	1.44	1.8
KVAR	1.91	THD Rms	1.51	32.41
Peak KW	2.96	THD Fund	1.51	34.26
Phase	80°lead	HRMS	6	1.68
Total PF	0.17	KFactor		4.75
DPF	0.17			

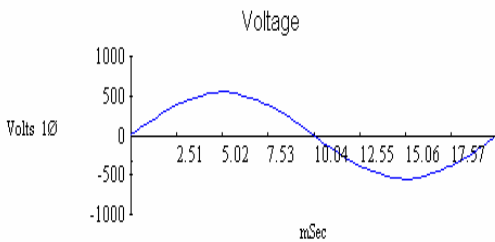
Seperti terlihat pada Gambar 4 dan Gambar 5, bentuk gelombang dan spectrum arus yang ditimbulkan oleh karena penggunaan beban menjadi tidak sinusoidal murni, tetapi terjadi harmonisa arus pada frekuensi harmonisa ke-5 dan ke-7.



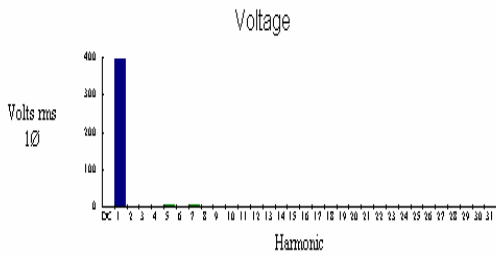
Gambar 4. Bentuk Gelombang Arus pada *Induction Furnace*



Gambar 5. Bentuk Spektrum Arus pada *Induction Furnace*



Gambar 6. Bentuk Gelombang Tegangan pada *Induction Furnace*

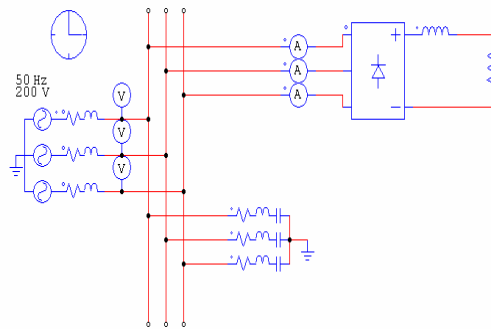


Gambar 7. Bentuk Spektrum Tegangan pada *Induction Furnace*

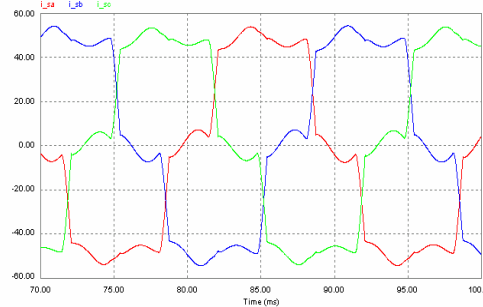
Pemodelan Sistem Menggunakan Filter Pasif

Penelitian terdahulu pada sistem dengan beban *Vacuum Induction Furnace* tanpa menggunakan filter[1] menunjukkan bahwa telah terjadi harmonisa arus pada frekuensi harmonisa ke-5 (250 Hz) sebesar 7.79 A, dan pada frekuensi harmonisa ke-7 (350 Hz) sebesar 4.49 A. Demikian juga untuk $\%I_{THD}$ dan $\%V_{THD}$ pada sistem tanpa filter telah diketahui nilainya masing-masing sebesar 32.86% ($\%I_{THD}$) dan 4.5% ($\%V_{THD}$).

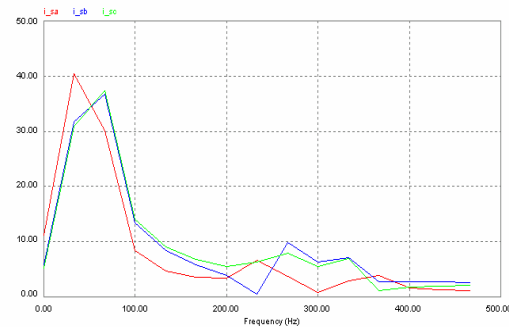
Filter pasif disetting pada frekuensi setting (f_r) 250 Hz atau sama dengan orde harmonisa ke-5, dengan frekuensi fundamental (f_1) 50 Hz. Dengan menggunakan persamaan 10, diketahui kapasitansi (C) berdasarkan referensi adalah: 24 μ F, maka didapatkan nilai induktansi sebesar 16,5mH. Dengan menggunakan persamaan 13, nilai X_o dapat diketahui sebesar 26.22 Ohm. Karena reaktor menggunakan inti udara, maka nilai q adalah 75, sehingga dari sini dapat ditentukan besar tahanan reaktornya sesuai dengan persamaan 14, yaitu sebesar 0.35 Ohm. Aplikasi perhitungan diatas dituangkan dalam pemodelan rangkaian Filter Aktif seperti gambar berikut ini[7]:



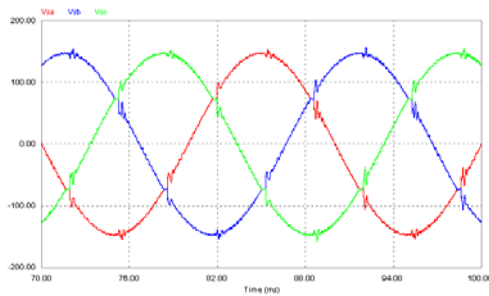
Gambar 8. Rangkaian Simulasi *Vacuum Casting Induction Furnace* dengan Filter Pasif.



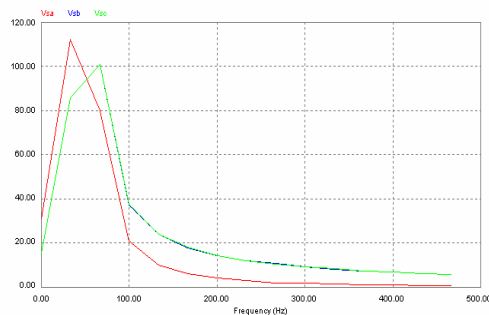
Gambar 9. Bentuk Gelombang Arus 3 Fasa yang Sudah Terfilter oleh Filter Pasif



Gambar 10. Bentuk Spektrum Arus 3 Fasa yang Sudah Terfilter oleh Filter Pasif



Gambar 11. Bentuk Gelombang Tegangan 3 Fasa yang Sudah Terfilter oleh Filter Pasif



Gambar 12. Bentuk Spektrum Tegangan 3 Fasa yang Sudah Terfilter oleh Filter Pasif

Dari Gambar 9 dan Gambar 10 tampak bentuk gelombang arus tiga fasa yang dihasilkan belum berbentuk sinusoidal yang *smooth*. Di sisi lain, bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan sudah cukup baik. Hal ini juga dapat dijelaskan melalui perhitungan $\%I_{THD}$ dan $\%V_{THD}$ berikut ini:

Berdasarkan persamaan 7, jika Diketahui: $I_{RMS} = 39.83$ A, $I_1 = 34.28$ A, $I_5 = 5.04$ A, $I_6 = 4.16$ A, $I_7 = 3.39$ A, $I_8 = 1.81$ A, $I_9 = 1.18$ A, maka $I_{THD} (\%) = 22.37 \%$.

Untuk $V_1 = 89.04$ Volt, $V_5 = 1.03$ Volt, $V_6 = 1.93$ Volt, $V_7 = 1.89$ Volt, $V_8 = 1.96$ Volt, $V_9 = 1.50$ Volt, maka $V_{THD} (\%) = 4.26 \%$.

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, Filter Pasif menunjukkan kinerja untuk meredam harmonisa, namun nilai $\%I_{THD}$ belum dapat diterima/diluar standar THD yang diperbolehkan. Nilai $\%V_{THD}$ sudah sesuai dengan dengan standar THD yang diperbolehkan. $\% THD$ tegangan sudah dapat diterima karena standart THD untuk tegangan yaitu 5% (untuk tegangan dibawah 69 kV. Dengan $I_{SC} = 10$ kA (Capasitas pemutusan MCB) dan $I_L = 40$ A (Perhitungan nilai arus *Induction Furnace* 13.8 kVA, 200 V, 3 fasa), maka: $I_{SC}/I_L = 10$ kA/40 A = 250 (antara 100-1000, sesuai tabel standard minimum I_{THD}), dengan demikian standart THD yang digunakan untuk arus adalah 15%.

Tabel 3. Limit Distorsi Arus Harmonisa[8]

MAXIMUM HARMONIC CURRENT DISTORTION						
In % of Fundamental						
I SC/IL	HARMONIC ORDER (ODD HARMONICS)					THD
	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
<20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-						
1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

EVEN HARMONICS are limited to 25 % of the odd harmonic limits above

• All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L

I_{sc} = Maximum short circuit current at PCC

I_L = Maximum load current (fundamental frequency) at PCC

Tabel 4. Limit Distorsi Tegangan Harmonisa[8]

HARMONIC VOLTAGE DISTORTION			
In % of Fundamental			
	< 69	69 - 138 kV	> 138 kV
Max. for Individual Harmonic	3	1.5	1
Total Harmonic Distortion (THD)	5	2.5	1.5

Perbandingan Unjuk Kerja Filter

Dari Hasil simulasi yang telah dilakukan untuk meredam harmonisa pada *Vacuum Induction Furnace*, dapat ditarik suatu perbandingan seperti tertuang pada tabel berikut ini:

Tabel 5. Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Standar[2]

Simulasi	Fluke 41B (%)		PSIM versi 4.1 (%)		Standar THD (%)	
	V	I	V	I	V _{THD}	I _{THD}
BTF	1,5	34,3	4,5	32,86	5	15
BdFP	-	-	4,26	22,37	5	15
BdFA	-	-	3,82	5,14	5	15
BdFAH	-	-	3,83	4,72	5	15

BTF : Beban Tanpa Filter
BdFP : Beban dengan Filter Pasif
BdFA : Beban dengan Filter Aktif
BdFAH : Beban dengan Filter Aktif Hibrid

Dari Tabel 5 terlihat ada perbedaan yang cukup signifikan untuk $\%I_{THD}$ antara beban tanpa filter dan beban dengan Filter Pasif, Filter Aktif, dan Filter Aktif Hibrid. Hasil terbaik diperoleh dengan menggunakan Filter Aktif Hibrid, dengan $\%I_{THD}$ sebesar 4.72 %. Penggunaan Filter Pasif belum dapat mengatasi harmonisa arus, dimana $\%I_{THD}$ yang dihasilkan sebesar 22.37 %, belum sesuai dengan standar maksimum I_{THD} seperti pada Tabel 3.

Perbedaan data pengukuran antara pengukuran yang menggunakan alat ukur dan simulasi disebabkan adanya beban induktor yang ada pada beban sehingga mengakibatkan pergeseran spektrum dari arus maupun tegangan yang dihasilkan oleh pemodelan.

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Peredaman harmonisa arus menggunakan Filter Pasif pada mesin *Vacuum Casting Induction Furnace* adalah sebesar 22.37 %, belum sesuai dengan standar I_{THD} yaitu sebesar 15%. Peredaman harmonisa tegangan menggunakan Filter Pasif adalah sebesar 4.26%, telah sesuai dengan standar V_{THD} yaitu sebesar 5 %.
2. Nilai-nilai % THD dari arus maupun tegangan sesudah Filter Aktif dipasang sudah dapat diterima/sesuai dengan standar THD yang diperbolehkan. Untuk $\%I_{THD}$ yaitu 5.14% ($\%I_{THD}$ sebelum dipasang Filter Aktif adalah 32.86%), sedangkan untuk $\%V_{THD}$ sudah dapat diterima karena standar THD untuk tegangan yaitu 5% (berdasarkan simulasi didapatkan hasil 3.82%, $\%V_{THD}$ sebelum dipasang Filter Aktif sebesar 4.5%). Bila dibandingkan dengan penggunaan Filter Pasif maka ada peningkatan kinerja dari penggunaan Filter Aktif dalam hal mereduksi $\%I_{THD}$ sebesar 17.23% dan $\%V_{THD}$ sebesar 0.44%.
3. Penggunaan Filter Aktif Hibrid mampu mereduksi $\%I_{THD}$ sebesar 17.65% dan $\%V_{THD}$ sebesar 0.43% dibanding penggunaan Filter Pasif.
4. Unjuk kerja terbaik didapat dari Filter Aktif Hibrid dengan $\%V_{THD}$ sebesar 3.83% dan $\%I_{THD}$ sebesar 4.72% atau turun 8.1% dibanding $\%I_{THD}$ menggunakan Filter Aktif.

Daftar Pustaka

- [1] Tanoto, Yusak, et.al. *Simulasi Aktif Filter dan Sistem Kerja Rangkaian dalam Meredam Harmonisa pada Vacuum Casting Induction Furnace dengan Daya 9 kW, 13.8 kVA, 200 V, 3 Fasa, 50/60 Hz*. Surabaya: Jurnal Teknik Elektro UK Petra 2005.
- [2] Limantara, Limboto, et.al. *Simulasi Hybrid Active Filter Dalam Meredam Harmonisa pada Induction Furnace dengan Daya 9 kW, 13.8 kVA, 200 V, 3 Ph, 50/60 Hz*. Surabaya: Prosiding SITIA 2005.
- [3] Rocca, Pierre and Quillon, Noël, *Harmonics in Industrial Networks*. Cahier Technique Merlin Gerin no: 152.
- [4] Ferracci, Ph. *Power Quality*. Cahier Technique Merlin Gerin no: 199.
- [5] B.L. Theraja, *A Textbook of Electrical Technology*, S Chand & Company LTD:1997.
- [6] Li, Jianlin, et al. *A Novel Current-source Converter with Carrier Phase Shifted SPWM for Active Power Filter*. Electrical Engineering Dept. Zhejiang University Hangzhou. China: 2000.
- [7] Powersim, Inc. *PSim Powersim Version 6.0*.
- [8] Burke, James J. *Power Distribution Engineering-Fundamentals And Applications*. New York: Marcel Dekker INC, 1994.