

Efektivitas Penggunaan Filter Pasif LC dalam Mengurangi Harmonik Arus

Azmi Rizki Lubis

Universitas Al Azhar Medan

Jln. Pintu Air IV No.214 Medan Johor

Email: rizki.loebiez@gmail.com

Abstrak

Harmonik yang dihasilkan oleh beban-beban non linier akan menyebabkan arus dalam bentuk pulsa-pulsa pendek. Dari data pengukuran yang dilakukan, terdapat harmonik pada Individual Harmonic Distortion (IHDi) arus orde – 5 pada transformator arus yang tidak sesuai standar IEEE 519 – 1992. Upaya yang dilakukan dalam mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan filter pasif LC yang disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Individual Harmonic Distortion (IHDi) arus orde – 5 pada transformator arus berkurang sesuai dengan standar IEEE 519 – 1992.

Kata Kunci : Transformator Arus, Harmonik, Individual Harmonic Distortion (IHDi), Filter Pasif LC.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dewasa ini penggunaan beban non linier pada sistem industri terus berkembang dimana akan menimbulkan permasalahan baru yaitu munculnya distorsi harmonik pada sistem distribusi. (Ismail, Anuar et al. 2010).

Distorsi harmonik terkadang dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada transformator, kesalahan sudut fasa, kesalahan rasio, dan meningkatnya rugi – rugi pada transformator (Henderson and Rose 1994). Munculnya harmonik ini akan berakibat pada tidak berfungsinya peralatan dan terputusnya sambungan di jaringan (Kennedy and Ivey 1990). Dalam beberapa kondisi, harmonik dapat meningkat dan menyebabkan kejenuhan (Kojovic 2002). Namun, kejenuhan transformator arus pada pengoperasian perangkat proteksi menghasilkan perbedaan dampak bagi jenis peralatan proteksi dan skema proteksi (Kojovic 2002). Jika transformator jenuh maka akan terjadi perubahan arus yang besar pada primer transformator (Wiszniewski, Rebizant et al. 2008).

Pada dasarnya transformator arus digunakan untuk pengukuran arus. Kelas akurasi merupakan parameter utama untuk menentukan batasan kesalahan dan akurasi pada transformator arus (Yahyavi, Brojeni et al. 2007).

Dari hasil pengukuran yang dilakukan pada PCC (Point of Common Coupling) transformator arus sisi sekunder (20 kV) dari transformator daya yang terdapat di PT. Gunung Gahapi Sakti selama satu minggu diperoleh nilai THD arus sebesar 24,8%. Data – data pengukuran ini telah melebihi standar yang ditetapkan oleh IEEE 519–1992 dengan perhitungan rasio hubung singkat.

B. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana peran beban nonlinier mempengaruhi tingkat ketelitian pengukuran alat ukur transformator arus.
2. Bagaimana kandungan harmonik arus dan tegangan yang muncul akibat beban nonlinier.
3. Bagaimana upaya yang harus dilakukan untuk mengurangi harmonik yang terdapat pada transformator arus.

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa efektif penggunaan filter pasif LC dalam mengurangi kandungan harmonik arus yang ada pada transformator arus agar memenuhi standar harmonik yang diizinkan berdasarkan standar IEEE 519 – 1992.

D. Kontribusi / Manfaat Penelitian

Setelah melakukan penelitian ini diharapkan :

- a. Mendapatkan kualitas daya listrik yang lebih baik dengan harmonik yang rendah dan faktor daya yang tinggi.
- b. Mampu mengurangi harmonik untuk pengukuran dan proteksi pada sistem.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Harmonik

Harmonik adalah pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Misalnya, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka harmonik keduanya adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 100 Hz dan harmonik ketiga dengan frekuensi 150 Hz dan seterusnya (Arrillaga and Watson 2004).

B. Sumber Harmonik

Beban nonlinier yang umumnya yang merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semikonduktor, dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semikonduktor atau elektronika daya sebagai rangkaian pengendali motor listrik (Arrillaga and Watson 2004).

C. Standar Harmonik

Arus harmonik yang terinjeksi ke dalam sistem tenaga listrik dapat menimbulkan efek yang merugikan pada peralatan sistem tenaga listrik terutama pada kapasitor, transformator, dan menyebabkan pemanasan dan pembebanan berlebih pada motor.

Tabel 1. Batas THD_v sesuai standar IEEE 519-1992

Tegangan bus pada PCC	Distorsi Tegangan individu	Total Harmonic Distorsi Tegangan (THD _v)
$V \leq 69\text{KV}$	3,0	5,0
$69\text{KV} < V \leq 161\text{KV}$	1,5	2,5
$V > 161\text{KV}$	1,0	1,5

D. Deret Fourier

Suatu fungsi periodik $f(\theta)$ dengan periode 2π yang memenuhi syarat-syarat Dirichelet sebagai berikut :

1. Mempunyai bilangan diskontinuitas yang terbatas dalam suatu periode.
2. Mempunyai maksimum dan minimum yang terbatas dalam satu periode.
3. Integral adalah terbatas (tertentu), dapat dikembangkan menjadi suatu deret Fourier.

Deret trigonometri untuk fungsi periodik $f(t)$ dapat dinyatakan dengan:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)]$$

Dengan koefisien a_0 , a_n , dan b_n masing – masing adalah :

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

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt$$

Nilai f fundamental untuk satu periode yaitu dari 0 hingga T .

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt$$

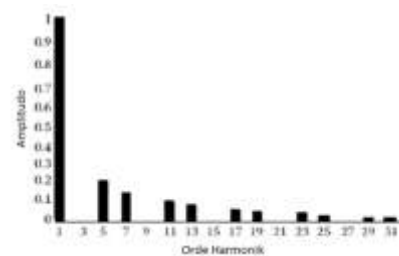
Dimana n adalah indeks harmonik.

Amplitudo harmonik biasa dinyatakan dengan :

$$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$$

dimana $n \geq 1$

Untuk nilai C sebagai fungsi n seringkali digambarkan dalam suatu barchart dan dikenal dengan “Spektrum Harmonik”. Spektrum Harmonik adalah distribusi semua amplitudo komponen harmonik sebagai fungsi orde harmoniknya dan diilustrasikan menggunakan histogram. (Irianto, Sukmawidjaja et al. 2008).



Gambar 1. Spektrum Harmonik

E. Individual Harmonic Distortion Arus (IHD_i)

Individual Harmonic Distortion Arus (IHD_i) adalah perbandingan antara nilai RMS dari harmonik individual dengan nilai RMS dari fundamental.

Rumus dari *Individual Harmonic Distortion* Arus adalah sebagai berikut (Irianto, Sukmawidjaja et al. 2008):

$$IHD_i = \sqrt{\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \times 100\%$$

Dimana :

IHD_i : *Individual Harmonic Distortion* arus (%)

I_h : Arus harmonik pada orde ke – n (Ampere)

I_1 : Arus fundamental (Irms) (Ampere)

F. Total Distorsi Harmonik

Pada sistem tenaga listrik untuk melihat distorsi Harmonik pada komponen fundamentalnya diistilahkan dengan THD atau Total Harmonik Distortion. Persentase total distorsi Harmonik (THD) tegangan dan arus dirumuskan sebagai berikut (Dugan, McGranaghan et al. 1996):

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

Dimana :

V_h = Komponen Harmonik tegangan ke – h

V_1 = Tegangan frekuensi fundamental (rms)

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$

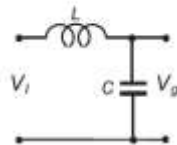
Dimana :

I_h = Komponen Harmonik arus ke – h

I_1 = Arus frekuensi fundamental (rms)

G. Filter Pasif LC

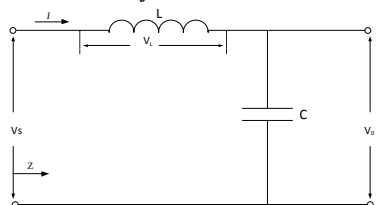
Meminimalkan daya reaktif sebuah kriteria tambahan yang diperlukan untuk menentukan induktansi dan kapasitansi dari filter LC. Pada penelitian ini daya reaktif digunakan sebagai tambahan meskipun kriterianya berdasarkan biaya minimum, ukuran, kerugian, dan lain-lain. Ukuran minimalisasi, kerugian dan biaya filter, kriteria tambahan berdasarkan daya reaktif minimum juga termasuk digunakan (Tella 2008). Namun, sebagai filter LC pada harmonik diberikan dalam bentuk Fourier seri ekspresi dari induktansi dan kapasitansi dari filter LC yang tidak diperoleh (Dahono, Purwadi et al. 1995).



Gambar 2. Rangkaian filter LC untuk inverter tiga fasa (Dewan and Ziogas 1979)

H. Mendesain Filter Pasif LC

Filter Pasif LC terdiri dari hubungan paralel komponen – komponen pasif yaitu Induktor dan Kapasitor. Dalam mendesain filter LC terlebih dahulu menentukan besar kapasitor sesuai kebutuhan faktor daya dan Induktor Filter.



Gambar 3. Rangkaian Impedansi Filter LC

Langkah-langkah yang harus dilakukan dalam merancang Filter LC adalah sebagai berikut (Wakileh G.J, 2001) :

a. Menghitung Nilai Kapasitor (C)

- Tentukan ukuran kapasitas kapasitor Q_c berdasarkan kebutuhan daya reaktif untuk perbaikan faktor daya. Daya reaktif kapasitor (Q_c) adalah :

$$Q_c = P \{ \tan(\cos^{-1} pf_1) - \tan(\cos^{-1} pf_2) \}$$

Dimana:

- P : daya aktif (kW).
- Pf_1 : faktor daya mula-mula sebelum diperbaiki.
- Pf_2 : faktor daya setelah diperbaiki.
- Tentukan Reaktansi kapasitor (X_c) :

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c}$$

imana:

- X_c : Reaktansi kapasitif (Ω).
- V : Tegangan RMS (Volt).
- Q_c : Daya reaktif kapasitor (VAR).

- Tentukan kapasitas dari kapasitor (C)

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_c}$$

Dimana :

- C : Kapasitansi kapasitor (Farad)
- f_0 : Frekuensi fundamental (Hz).

b. Menghitung nilai Induktor (L)

- Tentukan nilai impedansi Z induktor :

$$Z = \frac{V_s}{I}$$

- Tentukan Reaktansi Induktif dari Induktor :

$$X_L = \frac{X_c}{h_n^2}$$

- Tentukan reaktansi karakteristik dari filter pada orde tuning:

$$X_n = h_n X_L$$

- Tentukan Tahanan (R) dari Induktor :

$$R = \frac{X_n}{Q}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$Z^2 = R^2 + (\omega L)^2$$

$$\omega L = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

di mana $\omega = 2\pi f_0$, maka nilai induktansi dari induktor (L) :

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f_0}$$

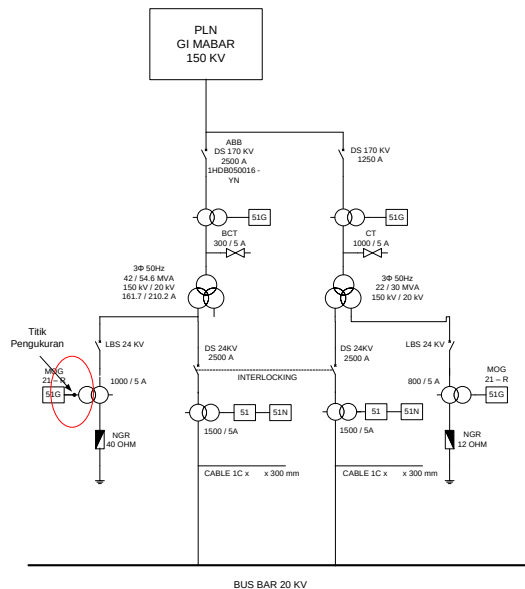
Dimana :

- V_s : Daya sumber (Volt)
- Z : Impedansi Induktor (Ω)
- I : Arus sumber(A)
- L : Induktansi (H)

III. METODE PENELITIAN

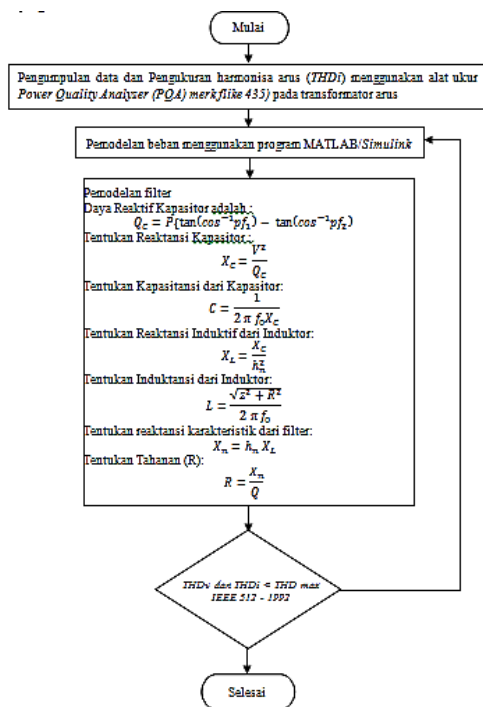
A. Teknis Pengukuran

Pengumpulan data dilakukan dengan pengukuran dengan menggunakan alat ukur *Power Quality Analyzer* (PQA) merk *Fluke 435* di PCC transformator arus pada sisi tegangan rendah transformator daya (20 kV) PT. Gunung Gahapi Sakti.



Gambar 4. Titik Pengukuran

B. Bagan Penelitian



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

IV. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

A. Data Pengukuran

Berikut ini data yang diambil melalui pengukuran pada transformator arus untuk sisi sekunder Transformator daya 20 kV dengan menggunakan alat ukur kualitas daya *Fluke 435*. Data – data pengukuran ditunjukkan pada Tabel berikut ini.

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran

Parameter	Satuan	Transformator arus (CT)
S (Apparent Power)	VA	12.667
P (Active Power)	Watt	12.5
Q (Reactive Power)	VAR	1.833
PF (Power Factor)	—	0.80
THDv	%	1.33
THDi	%	24.8
Frekuensi	Hz	50
V (Phase Voltage)	Volt	58.69
I (Phase Current)	Ampere	1.001

Pada Tabel 2 menunjukan bahwa data hasil pengukuran *Current Individual Harmonic Distortion* (IHD_i) dan *Individual Harmonic Distortion* tegangan (IHD_v) dari setiap orde harmonik. Orde harmonik yang ditampilkan adalah orde harmonik ganjil dari orde ke-1 sampai dengan orde ke-15 dengan nilai yang berbeda untuk setiap harmonik. Jika dibandingkan dengan standar IEEE 519 – 1992, ada beberapa orde harmonik arus (IHD_i) pada transformator arus dari hasil pengukuran yang tidak sesuai dengan standar.

Tabel 3. Data hasil pengukuran harmonik arus dan tegangan

Harmonik ke-n	Individual Distorsi Harmonik (IHD) Arus (i) (%)	Individual Distorsi Harmonik (IHD) Tegangan (v) (%)	THD i (%)	THD v (%)
3	2.85	0.15		
5	23.8	1.18		
7	6.22	0.23		
9	0.38	0.02	24.8	1.23
11	0.73	0.06		
13	0.12	0.02		
15	0.04	0.03		

B. Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Harmonik Pada Transformator Arus Dengan Standar IEEE 519 – 1992

Sebelum merancang filter pasif LC sebaiknya diketahui terlebih dahulu orde arus harmonik dari transformator arus hasil pengukuran mana saja yang tidak sesuai standar. Pada Tabel 4 dapat dilihat klasifikasi arus harmonik pada transformator arus dari hasil pengukuran berdasarkan standar IEEE 519 – 1992, dimana arus harmonik dari orde ke-3 sampai dengan orde ke-15 dibandingkan terhadap standar IEEE 519-1992.

Tabel 4. Perbandingan hasil pengukuran arus harmonik pada transformator arus dengan standar IEEE 519 – 1992

Orde harmonik	IHD_i (%)	Standar IEEE 519-1992 IHD_i (%)	Keterangan
Orde 3	2,85	12	Sesuai
Orde 5	23,81	12	Tidak Sesuai
Orde 7	6,22	12	Sesuai
Orde 9	0,38	12	Sesuai
Orde 11	0,73	5,5	Sesuai
Orde 13	0,12	5,5	Sesuai
Orde 15	0,04	5,5	Sesuai

C. Perhitungan Nilai L dan C dari Filter LC

Dalam menentukan besarnya parameter filter LC yang dibutuhkan, terlebih dahulu diperhatikan nilai selisih terbesar dari orde harmonisa arus yang tidak sesuai standar IEEE 519 – 1992.

D. Perhitungan Nilai C

Menentukan kebutuhan kapasitor sebagai perbaikan faktor daya, dengan memasukan nilai dari pengukuran. Diasumsikan bahwa faktor daya diperbaiki (pf_2) menjadi 0,95. Untuk menghitung kapasitas kapasitor yang dibutuhkan di hitung menggunakan Persamaan berikut:

$$Q_C = P\{\tan(\cos^{-1}pf_1) - \tan(\cos^{-1}pf_2)\}$$

Maka:

$$\begin{aligned} Q_C &= P\{\tan(\cos^{-1}(0,80)) - \tan(\cos^{-1}(0,95))\} \\ &= 0,0125\{\tan(\cos^{-1}(0,80)) - \tan(\cos^{-1}(0,95))\} \\ &= 0,0125\{\tan(36,87) - \tan(18,19)\} \\ &= 0,0125\{(0,75 - 0,33)\} \\ &= 0,0125\{0,42\} \\ &= 0,00526 \text{ VAR} \approx 5,3 \text{ KVAR} \end{aligned}$$

Jadi kebutuhan kapasitor C per fasa sebesar 0.00526 VAR

$$X_C = \frac{V^2}{4Q} = \frac{58.69^2}{5.3} = 654.05 \Omega$$

$$C = \frac{1}{314 \times 654.05} = 4.87 \times 10^{-6}$$

Dari hasil perhitungan nilai C, maka diperoleh besar nilai kapasitor yang akan digunakan pada filter pasif LC adalah 4.87×10^{-6} .

E. Perhitungan Nilai L

Menentukan besar nilai parameter indikator (L) sebagai filter mereduksi harmonisa, dengan memasukan nilai dari pengukuran. Sebelumnya dihitung terlebih dahulu nilai impedansi Z, di mana:

$$Z = \frac{V_s}{I}$$

Dari data ukur $I = 0.074$ Ampere pada faktor daya 0,80, maka

$$Z = \frac{58.69}{1.001} = 58.75 \Omega$$

Kemudian tentukan reaktansi induktif dari induktor:

$$X_L = \frac{654.05}{5^2} = 26.16 \Omega$$

Tentukan reaktansi karakteristik dari filter pada orde tuning:

$$X_n = 5 \times 26.16 = 130.81 \Omega$$

Tentukan Tahanan (R) dari Induktor:

$$R = \frac{130.81}{100} = 1.30 \Omega$$

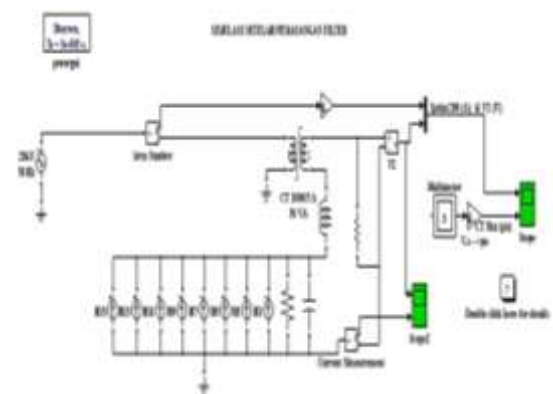
Jadi induktansi dari inductor (L) :

$$L = \frac{\sqrt{58.75^2 + 1.30^2}}{2 \times 3.14 \times 50} = 3.3 \text{ H}$$

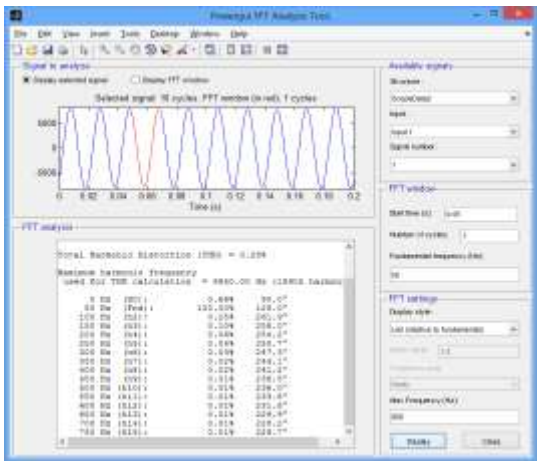
Dari perhitungan nilai L, maka diperoleh nilai L yang akan digunakan pada filter pasif LC adalah 3.3 H.

F. Rangkaian Simulasi Setelah Pemasangan Filter Pasif LC

Rangkaian simulasi terdiri dari satu buah filter pasif LC, sebuah resistor dan individual distorsi harmonik arus (IHD_i) orde ke-3 sampai dengan orde ke-15. Filter pasif LC terdiri dari sebuah kapasitor dan induktor yang terhubung secara seri dan nilainya telah diperhitungkan sebelumnya. Filter pasif LC dihubungkan secara paralel terhadap sistem. Sumber arus pada mewakili nilai arus harmonik dari orde ke-3 sampai orde ke-15. Bentuk gelombang arus dan spektrum harmonik arus diperoleh dari *Block Power GUI* bagian *Fast Fourier Transform (FFT) Analysis* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian simulasi setelah pemasangan filter pasif LC



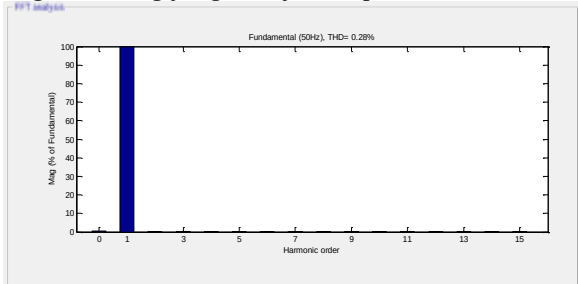
Gambar 7. Hasil simulasi yang ditunjukkan pada FFT analysis

Dari hasil simulasi dan spektrum harmonik arus input diperoleh arus harmonik orde ke-3, 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 dalam besaran maksimum. Nilai tersebut dibandingkan dengan standar IEEE 519 – 1992.

Tabel 5. Hasil simulasi setelah pemasangan filter pasif LC

Parameter	Satuan	Hasil Simulasi
IHD _i orde 1	%	100
IHD _i orde 3	%	0.10
IHD _i orde 5	%	0.04
IHD _i orde 7	%	0.02
IHD _i orde 9	%	0.01
IHD _i orde 11	%	0.01
IHD _i orde 13	%	0.01
IHD _i orde 15	%	0.01
THD _i	%	0.28

Dari Tabel yang merupakan hasil simulasi setelah pemasangan filter pasif LC maka diperoleh spektrum harmonik arus dalam bentuk diagram batang yang ditunjukkan pada Gambar .



Gambar 8. Spektrum harmonik arus setelah pemasangan filter pasif LC

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian dengan menggunakan filter pasif LC pada transformator arus hasil yang diperoleh kandungan harmonik arus berhasil direduksi dan sesuai dengan standar yang ditetapkan IEEE 519-1992.

Nilai arus harmonik orde ke-5 berkurang dari 23,81% menjadi 0,04% dan total harmonik distorsi arus sebelumnya 24,8% menjadi 0,28%, sehingga jelas terlihat bahwa filter pasif LC mempunyai peran penting dalam mereduksi harmonik yang muncul pada transformator arus.

B. Saran

Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan pereduksian harmonik transformator arus dengan menggunakan jenis filter yang lainnya. Disarankan pula untuk penelitian selanjutnya melakukan analisa penggunaan filter untuk beban nonlinier lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Arrillaga, J. and N. R. Watson, 2004, *Power system harmonics*. England, Wiley.

[2] C57.110/D7 ANSI/IEEE, 1998, *Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non-sinusoidal Load Currents*. NY, IEEE.

[3] Dahono, P. A., et al., 1995, *An LC filter design method for single-phase PWM inverters*. Power Electronics and Drive Systems, 1995., Proceedings of 1995 International Conference on.

[4] Dewan, S. B. and P. D. Ziogas, 1979, *Optimum Filter Design for a Single-Phase Solid-State UPS System*. IEEE Transactions on Industry Applications IA-15(6): 664-669.

[5] Dugan, R. C., et al., 1996, *Electrical power systems quality*. New York, McGraw-Hill

[6] Henderson, R. D. and P. J. Rose, 1994, *Harmonics: the effects on power quality and transformers*". IEEE Transactions on Industry Applications 30(3): 528-532.

[7] Irianto, C. G., et al., 2008, *Mengurangi Harmonisa Pada Transformator 3 Fasa*. JETri 7: 53-68.

[8] Ismail, D., et al., 2010, *Current transformer reaction with linear and non-linear loads*. The 4th International Power Engineering and Optimization Conference, 406-411.

[9] Kennedy, S. P. and C. L. Ivey, 1990, *Application, design and rating of transformers containing harmonic currents*. IEEE Pulp and Paper Industry Technical.

[10] Kojovic, L. A., 2002, *Comparison of different current transformer modeling techniques for protection system studies*". IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 3: 1084-1089 vol.1083.

[11] Kojovic, L. A., 2002, *"Impact of current transformer saturation on overcurrent protection operation"*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 3: 1078-1083.

- [12] Tella, P. C., 2008, "*The Study Of Singe Phase Diode Rectifiers With High Power Factor And Low Total Harmonic Distortion*". Columbia, University of Missouri. Master of Science
- [13] Theodore, W., 2007, "*Electrical Machines , Drives And Power Systems*". New Jersey, Pearson Education.
- [14] Wiszniewski, A., et al., 2008, "*Correction of Current Transformer Transient Performance*". IEEE Transactions on Power Delivery 23(2): 624-632.
- [15] Yahyavi, M., et al., 2007, "*Basic Theory and Practical Considerations in a Current Transformer*". IEEE Power Engineering Society General Meeting: 1-8.

