

PERBANDINGAN PASSIVE LC FILTER DAN PASSIVE SINGLE TUNED FILTER UNTUK MEREDUKSI HARMONISA VARIABLE SPEED DRIVE DENGAN BEBAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Mustamam ¹⁾, Usman Baafai ²⁾, Marwan Ramli ³⁾

ABSTRAK

Sebagian besar alat yang digunakan sebagai pengatur kecepatan putaran motor induksi tiga fasa adalah *Variable Speed Drive* (VSD) 1 fasa, di mana VSD merupakan pembangkit harmonisa. Oleh sebab itu harmonisa yang timbul pada VSD dapat direduksi dengan menggunakan filter fasif yaitu *passive LC filter* dan *passive single tuned filter* sehingga memenuhi standar *IEC61000-3-2 kelas A*. Hasil yang diperoleh dengan *passive LC filter* dapat mengurangi total distorsi harmonisa arus (*THDi*) dari 102,9% menjadi 23,78% sedangkan *passive single tuned filter* mengurangi total distorsi harmonisa arus (*THDi*) dari 102,9% menjadi 8,79%. Pada harmonisa ke 5 *passive LC filter* dapat mengurangi harmonisa dari 1,26 Amper menjadi 0,16 Amper, sedang *passive single tuned filter* dari 1,26 Amper menjadi 0,111 Amper. Impedansi yang dihasilkan *passive single tuned filter* lebih kecil yaitu 0,436 Ω sedang *passive LC filter* 8,34 Ω . Dengan demikian *passive single tuned filter* lebih baik untuk mereduksi harmonisa dibandingkan dengan *passive LC filter*.

Kata Kunci : *Variable speed drive* 1 fasa, motor induksi 3 fasa, harmonisa, *passive LC filter*, *passive single tuned filter*.

ABSTRACT

Most of the tools that used as speed control of three phase induction motors rotation is 1 phase Variable Speed Drive (VSD), where VSD is a harmonic generator. Therefore the harmonics that arise in the VSD can be reduced by using passive LC filters fasif namely passive single tuned filter that meet the standards IEC61000-3-2 Class A. The results obtained through passive LC filter could reduce the total distortion of harmonic current (THDi) from 102.9% to 23.78% while passive single tuned filter reduced the total harmonic distortion current (THDi) from 102.9% to 8.79%. At the fifth harmonics passive LC filters could reduce the harmonics current from 1.26 Ampere to 0.16 Ampere, while passive single tuned filter could reduce the harmonic current from 1.26 Amper to 0.111 Amper. The impedance produced by passive single tuned filters was smaller that is 0.436 Ω while passive LC filters was 8.34 Ω . There by passive single tuned filter is better to reduce harmonics than passive LC filters is.

Keywords: 1-phase Variable Speed Drive, 3-phase induction motor, harmonics, passive LC filters, passive single tuned filters.

Pendahuluan

Motor induksi tiga fasa cukup banyak digunakan sebagai penggerak utama mesin-mesin di dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi mempunyai keuntungan antara lain, bentuknya yang sederhana, konstruksinya cukup kuat, harganya relatif murah dan keandalannya tinggi. Namun yang menjadi kelemahannya adalah tidak mampu mempertahankan kecepatannya dengan konstan bila terjadi perubahan beban. Untuk mendapatkan kecepatan konstan serta memperbaiki kinerja motor induksi, maka dibutuhkan pengaturan kecepatan putaran motor. Sebagian besar alat yang digunakan sebagai pengatur kecepatan putaran motor induksi tiga fasa adalah *Variable Speed Drive* (VSD) [1],[2],[3].

VSD merupakan suatu peralatan di mana komponennya merupakan beban non linear yang menghasilkan bentuk gelombang arus dan tegangan sinusoidal yang tidak murni yang akan menghasilkan harmonisa dan dapat menimbulkan kerugian, seperti: menurunkan kualitas sistem tenaga listrik, penurunan

faktor daya, naiknya distorsi terhadap input, kegagalan fungsi dari peralatan elektronik yang sensitif, menurunkan efisiensi [1]. Banyaknya pemasangan VSD menyebabkan timbulnya harmonisa yang tersambung pada sumber yang sama. Untuk menurunkan harmonisa dapat dilakukan dengan menggunakan filter pasif seperti *passive LC filter* maupun *passive single tuned filter*.

Penelitian yang diajukan pada tesis ini adalah perbandingan pemasangan *passive LC filter* dan *passive single tuned filter* pada sisi input VSD tipe *ATV12H075* dengan daya 750 Watt untuk dapat mengurangi harmonisa dengan program simulasi menggunakan software MATLAB/ *Simulink*.

Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi adalah suatu mesin listrik yang merubah energi listrik menjadi energi gerak dengan menggunakan gandengan medan listrik dan mempunyai slip antara medan stator dan medan rotor. Arus motor ini didapat secara induksi atau imbas, sebagai akiba

adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator.

Bila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan medan stator, maka akan timbul medan putar dengan kecepatan (n) yang ditunjukkan pada Persamaan 1 [13],[14] :

$$n = \frac{120f}{P} \quad (1)$$

Perbedaan kecepatan antara medan putar stator dengan perputaran rotor tersebut disebut dengan slip (S) dan dinyatakan dengan Persamaan (2) [2] :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2)$$

Persamaan (2) dapat ditulis dengan Persamaan (3)

$$n_r = n_s \frac{120 f_s}{P} (1 - S) \quad (3)$$

Pengaturan kecepatan motor induksi

Pengaturan kecepatan motor induksi dapat dilakukan dengan beberapa cara mengacu pada Persamaan (1), [3]:

- Mengubah jumlah kutub motor
- Mengubah frekuensi jaringan
- Mengubah resistansi tahanan rotor
- Mengubah besarnya slip

Cara dengan mengubah frekuensi jaringan adalah yang paling umum digunakan yaitu dengan *inverter* [3].

Variable Speed Drive (VSD)

VSD atau juga disebut dengan *Variable Frequency Drive* atau *inverter* adalah mempunyai kemampuan untuk pengaturan motor sesuai bebannya atau sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Salah satu jenis VSD yang sering digunakan adalah tipe *ATV12H075M2* pada Gambar 1 [12].

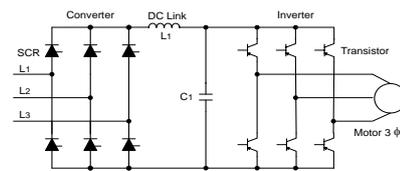


Gbr 1. Variable Speed Drive (VSD) tip *ATV12H075M2*

Secara sederhana untuk drive AC, *Variable Speed Drive* atau *inverter* akan mengubah AC ke DC yang kemudian diatur dengan suatu teknik penyaklaran 'switching'. Ada tiga jenis *inverter* yaitu [15]:

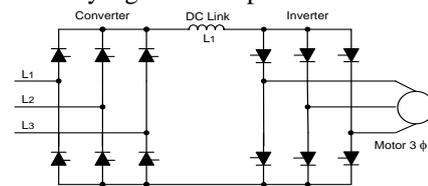
a. Variable voltage inverter (VVI)

Jenis *inverter* ini menggunakan konverter jembatan SCR untuk mengubah tegangan input AC ke DC. Memiliki kemampuan untuk mengatur nilai tegangan DC mulai dari 0 hingga mendekati 600 VDC. Gambar 2 rangkaian variabel *inverter* tegangan.



Gbr 2. Rangkaian variabel *inverter* tegangan
b. *Current source inverter (CSI)*

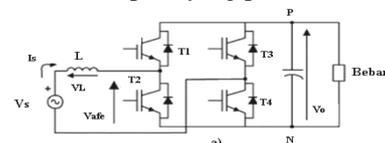
Jenis *inverter* satu ini menggunakan SCR untuk menghasilkan tegangan DC-link yang bervariasi untuk suplai ke bagian *inverter* seperti pada Gambar 3. Beda dengan VVI yang mengontrol tegangan, CSI justru mengontrol arus yang akan disuplai ke motor.



Gbr 3. Skema sumber *inverter* arus

c. Pulse width modulation

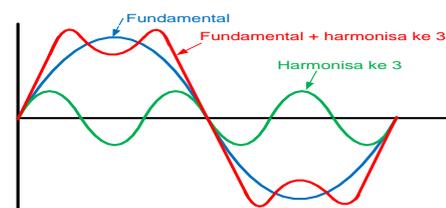
Teknik penyaklaran memberikan output yang lebih sinusoidal dibandingkan dua jenis *inverter* sebelumnya. Drive yang menggunakan PWM lebih efisien dan memberikan performa yang lebih tinggi. Biasanya konverter yang digunakan adalah tipe tidak terkontrol (dioda biasa) namun ada yang menggunakan setengah terkontrol atau kontrol penuh [15]. Bentuk rangkaian dan prinsip kerja dari penyearah PWM satu fasa seperti yang pada Gambar 4 [17].



Gbr 4. Penyearah PWM satu fasa *full bridge*.

Harmonisa

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Misalnya, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka harmonisa keduanya adalah gelombang dengan frekuensi 100 Hz, harmonisa ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz dan seterusnya. Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni/aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat seperti pada Gambar 5 [18].



Gbr 5. Gelombang fundamental dengan gelombang harmonisanya [18].

Perhitungan Harmonisa

Untuk menentukan besar *Total Harmonic Distortion (THD)* dari perumusan analisa deret *Fourier* untuk tegangan dan arus dalam fungsi waktu yaitu [19]:

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (4)$$

$$i(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (5)$$

Tegangan dan arus *RMS* dari gelombang sinusoidal yaitu nilai puncak gelombang dibagi $\sqrt{2}$ dan secara deret *Fourier* untuk tegangan dan arus yaitu [20]:

$$V_{RMS} = V_0^2 + \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (6)$$

$$I_{RMS} = I_0^2 + \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (7)$$

Untuk *THD* tegangan dan arus didefinisikan sebagai nilai *RMS* harmonisa urutan diatas frekuensi fundamental dibagi dengan nilai *RMS* pada frekuensi fundamentalnya, dan tegangan DC nya diabaikan.

Besar *THD* untuk tegangan dan arus ditunjukkan pada persamaan (8) dan (9) yaitu :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2}}{V_1} \quad (8)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \quad (9)$$

Hubungan Persamaan *THD* dengan arus *RMS* dari Persamaan (8) yaitu:

$$I_{RMS}^2 = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2$$

$$THD_I^2 = \frac{\frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{\frac{I_1^2}{2}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 - I_1^2}{I_1^2}$$

Selanjutnya di dapat Persamaan (10) yaitu:

$$I_{RMS}^2 = I_{1,RMS}^2 (1 + THD_I^2) \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = \frac{I_1^2}{2} (1 + THD_I^2)$$

Sehingga arus *RMS* terhadap *THD_I* yaitu:

$$I_{RMS}^2 = I_{1,RMS}^2 \sqrt{(1 + THD_I^2)} \quad (11)$$

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah perbandingan nilai *RMS* pada orde harmonisa terdistorsi terhadap nilai *RMS* pada frekuensi fundamental yaitu :

$$IHD_v = \frac{\frac{V_h}{\sqrt{2}}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}}} = \frac{V_h}{V_1} \quad (12)$$

$$IHD_i = \frac{\frac{I_h}{\sqrt{2}}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \frac{I_h}{I_1} \quad (13)$$

Hubungan Persamaan *IHD* dengan arus *RMS* dari Persamaan (14) yaitu:

$$I_{RMS}^2 = \frac{1}{2} I_n^2 \quad (14)$$

$$IHD_i^2 = \frac{\frac{1}{2} I_n^2}{\frac{I_1^2}{2}} = \frac{I_n^2 - I_1^2}{I_1^2} \quad (15)$$

Selanjutnya dari Persamaan (2.22) di dapat yaitu:

$$I_n^2 = I_1^2 + I_1^2 \cdot IHD_i^2 = I_1^2 (1 + IHD_i^2) \quad (16)$$

$$\frac{1}{2} I_n^2 = \frac{I_1^2}{2} (1 + IHD_i^2) \quad (17)$$

Sehingga arus *RMS* terhadap *IHD_i* yaitu:

$$I_{RMS}^2 = I_{1,RMS}^2 \sqrt{(1 + IHD_i^2)} \quad (18)$$

Batasan Harmonisa

Untuk mengurangi harmonisa pada suatu sistem secara umum dengan mereduksi sebagian harmonisa sehingga diperoleh nilai dibawah standar yang diizinkan. Dalam mereduksi harmonisa diperhatikan secara teknis dibawah standar yang diizinkan dan tidak membutuhkan biaya yang besar. Standar yang digunakan sebagai batasan harmonisa adalah yang dikeluarkan oleh *International Electrotechnical Commission (IEC)* yang mengatur batasan harmonisa pada beban kecil satu fasa ataupun tiga fasa dengan menggunakan standar *IEC61000-3-2*, [4],[5].

Adapun standar yang digunakan adalah kelas A yaitu semua kategori beban termasuk didalamnya peralatan penggerak motor dan semua peralatan 3 fasa yang arusnya tidak lebih dari 16 amper perfasanya. Untuk peralatan satu fasa (tegangan kerja 230 V) dan tiga fasa (230/400 V) seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas A

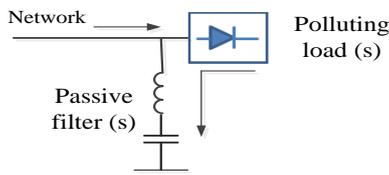
Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksimum yang diizinkan (A)
Harmonisa Ganjil	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15 ≤ n ≤ 39	2,25/n
Harmonisa Genap	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
8 ≤ n ≤ 40	1,84/n

Filter Harmonisa

Tujuan utama dari filter harmonisa adalah untuk mengurangi amplitudo satu frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem [21].

Filter pasif

Filter pasif merupakan metode penyelesaian yang efektif dan ekonomis untuk masalah harmonisa, rangkaian filter pasif seperti Gambar 6.

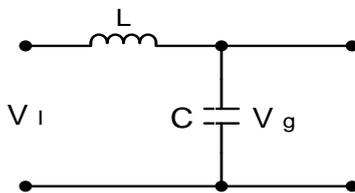


Gbr 6. Filter pasif

Jenis filter pasif, yaitu : (a) Band-Pass, (b) High-Pass, (c) Double Band Pass, (d) Composite [7].

Passive LC filter

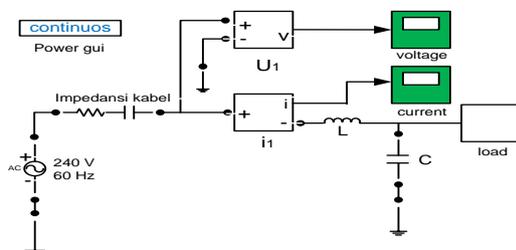
Rangkain *passive LC filter* untuk *inverter* tiga fasa seperti Gambar 7.



Gbr 7. Rangkaian *passive LC filter* untuk *inverter* tiga fasa [8].

Prinsip pereduksian harmonisa dari *passive LC filter*

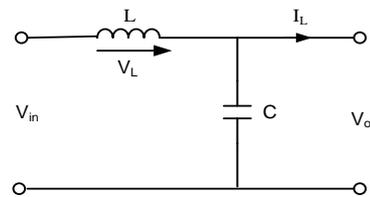
Prinsip kerja dari filter shunt (filter pasif paralel) adalah dengan meng-short circuit-kan arus harmonisa yang ada dekat sumber distorsi untuk menjaga arus harmonisa yang masuk tersebut tidak keluar menuju peralatan lain dan sumber suplai energi listrik dan memberikan keuntungan bagi sistem tenaga listrik, yaitu mereduksi harmonisa, memperbaiki $\cos \phi$ sistem, pada reaktornya berfungsi sebagai filter dan juga melindungi kapasitor dari over kapasitor hal ini dikarenakan adanya resonansi. Sebuah rangkaian LC dipasang pada frekuensi harmonisa sebagai filter, seperti Gambar 8 [7].



Gbr 8. Pemodelan *passive LC filter* [7]

Merancang *passive LC filter*

Rangkaian impedansi *passive LC filter* seperti Gambar 9.



Gbr 9. Rangkaian impedansi *passive LC filter* [22]

Passive LC filter terdiri dari hubungan paralel komponen-komponen pasif yaitu Induktor dan kapasitor. Dalam mendesain *passive LC filter* terlebih dahulu menentukan besar kapasitor sesuai kebutuhan faktor daya dan induktor filter. Langkah-langkah yang harus dilakukan dalam merancang *passive LC filter* adalah sebagai berikut [22],[23] :

A. Menghitung nilai kapasitor (C)

- 1) Tentukan ukuran kapasitas kapasitor Q_C

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

- 2) Tentukan reaktansi kapasitor (X_C) :

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad (19)$$

- 3) Tentukan kapasitas dari kapasitor (C)

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_C} \quad (20)$$

B. Menghitung nilai induktor (L)

- 1) Tentukan nilai impedansi Z induktor [22]:

$$Z = \frac{V_s}{I} \quad (21)$$

- 2) Tentukan Reaktansi Induktif dari Induktor [22,23]:

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} \quad (22)$$

- 3) Tentukan reaktansi karakteristik dari filter pada *orde tuning*:

$$X_n = h_n X_L \quad (23)$$

- 4) Tentukan Tahanan (R) dari Induktor [22,23]:

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (24)$$

- 5) Tentukan induktansi dari induktor [23]:

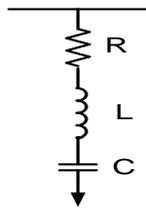
$$L = \frac{\sqrt{Z^2 + R^2}}{2\pi f_0} \quad (25)$$

Dari Gambar 9 dapat dicari impedansi rangkain dengan persamaan:

$$z = \frac{1}{\frac{1}{X_L} + \frac{1}{X_C}} \quad (26)$$

Passive single tuned filter

Passive single-tuned filter adalah filter yang terdiri dari komponen-komponen pasif R, L dan C terhubung seri, seperti pada Gambar 10. *Passive single-tuned filter* akan mempunyai impedansi yang kecil pada frekuensi resonansi sehingga arus yang memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi resonansi akan dibelokkan melalui filter.



Gbr 10. *Passive single tuned filter* [9]

Berdasarkan Gambar 10, besarnya impedansi *passive single tuned filter* pada frekuensi fundamental adalah [5]:

$$Z_F = R + j(X_L - X_C) \quad (27)$$

Pada frekuensi resonansi, Persamaan (27) menjadi:

$$Z_F = R + j\left(\omega_r L - \frac{1}{\omega_r C}\right) \quad (28)$$

Jika frekuensi sudut saat resonansi adalah:

$$\omega_r = 2\pi f_0 h_r \quad (29)$$

Impedansi filter dapat ditulis sebagai berikut:

$$Z_F = R + j\left(X_L h_r - \frac{X_C}{h_r}\right) \quad (30)$$

Saat resonansi terjadi nilai reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif sama besar, maka diperoleh impedansi *passive single tuned filter* seperti pada Persamaan (31) adalah

$$Z_F = R \quad (31)$$

Pada Persamaan (31) menunjukkan bahwa pada frekuensi resonansi, impedansi *passive single-tuned filter* sama dengan tahanan induktor R, sehingga arus harmonisa yang mempunyai frekuensi yang sama dengan frekuensi resonansi akan dialirkan atau dibelokkan melalui *passive single-tuned filter*. Dengan demikian *Passive single tuned filter* diharapkan dapat mengurangi IHD_v dan IHD_i sampai dengan 10-30%. Besarnya tahanan R dari induktor dapat ditentukan oleh faktor kualitas dari induktor. Pada frekuensi *tuning*:

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = X_n \quad (32)$$

Faktor kualitas:

$$Q = \frac{X_n}{R} \quad (33)$$

Berdasarkan persamaan (9), tahanan resistor adalah:

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (34)$$

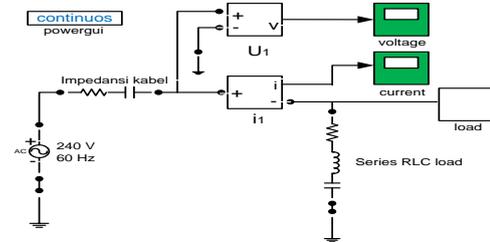
Prinsip pereduksian harmonisa dari *passive single-tuned filter*

Pada Frekuensi resonansi (f_r), *Passive single tuned filter* memiliki impedansi minimum sebesar nilai resistansi R dari induktor. Oleh karena itu, filter ini menyerap semua arus harmonik yang dekat dengan frekuensi resonansi (f_r) yang diinjeksikan. Ada dua parameter yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan nilai R, L, dan C, yaitu:

1. Faktor kualitas (Quality factor, Q)
2. Penyimpangan frekuensi relative (Relative Frequency Deviation, δ)

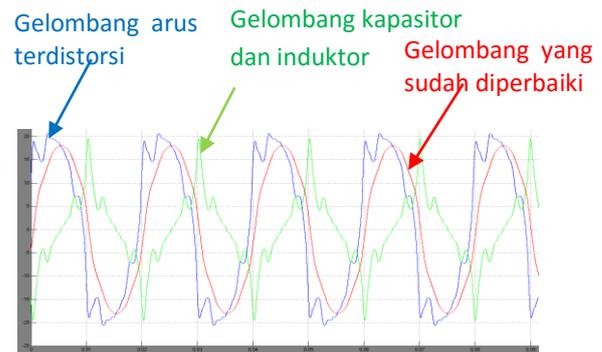
Filter dengan Q tinggi disetel pada frekuensi rendah (misalnya harmonisa kelima), dan nilainya biasanya terletak antara 30 dan 100. Perkiraan nilai Q untuk reaktor inti udara (*air core reactors*) adalah 75 dan lebih besar 75 untuk reaktor inti besi (*iron-core reactors*) [17].

Passive single-tuned filter yang diletakkan secara paralel akan men-short *circuit*-kan arus harmonisa yang ada dekat dengan sumber distorsi seperti pada Gambar 11. *Passive single tuned filter* yang merupakan hubungan seri komponen R, L, dan C memberikan keuntungan bagi sistem tenaga listrik, yaitu mampu mereduksi tingkat harmonisa, memperbaiki $\cos \phi$, sedangkan induktor berfungsi sebagai filter, melindungi kapasitor dari over kapasitor akibat adanya resonansi.



Gbr 11. Pemodelan *passive single tuned filter* [24]

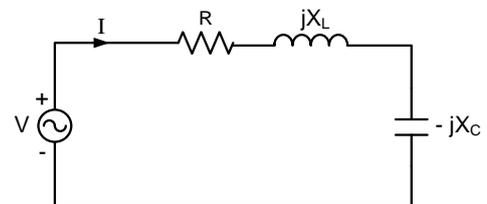
Pada Gambar 12 diperlihatkan gelombang hasil dari pemfilteran harmonisa dengan menggunakan bantuan simulasi MATLAB/ *Simulink* untuk menjelaskan proses eliminasi gelombang arus terdistorsi.



Gbr 12. Kompensasi gelombang filter

Merancang *passive single tuned filter*

Mendesain *passive single tuned filter* yang terdiri dari hubungan seri komponen-komponen pasif induktor, kapasitor dan tahanan seperti Gambar 13, [10], [11],[22].



Gbr 13. Rangkaian resonansi seri

Langkah-langkah rancangan *passive single tuned filter* adalah :

- a. Tentukan ukuran kapasitas kapasitor Q_c :
$$Q_c = P\{\tan(\cos^{-1}pf_1) - \tan(\cos^{-1}pf_2)\} \quad (35)$$

b. Tentukan reaktansi kapasitor :

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad (36)$$

c. Tentukan kapasitansi dari kapasitor :

$$C = \frac{1}{2 \pi f_0 X_C} \quad (37)$$

d. Tentukan reaktansi induktif dari induktor :

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} \quad (38)$$

e. Tentukan induktansi dari induktor :

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f_0} \quad (39)$$

f. Tentukan reaktansi karakteristik dari filter pada orde tuning :

$$X_n = h_n X_L \quad (40)$$

g. Tentukan tahanan (R) dari Induktor :

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (41)$$

Kebutuhan daya reaktif dapat dihitung dengan pemasangan kapasitor untuk memperbaiki faktor daya [23].

Daya Reaktif (Q) = Daya Aktif (P) $\times \tan \phi$

Daya reaktif pada pf awal yaitu :

$$Q_1 = P \times \tan \phi_1 \quad (42)$$

Daya reaktif pada pf diperbaiki yaitu :

$$Q_2 = P \times \tan \phi_2 \quad (43)$$

Sehingga rating kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya yaitu:

Daya reaktif $\Delta Q = Q_1 - Q_2$

Atau

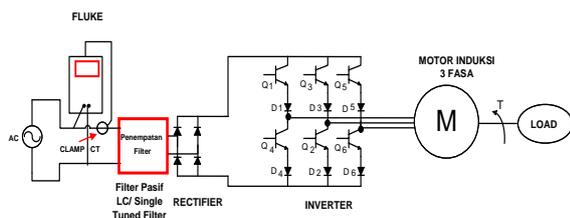
$$\Delta Q = P(\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (44)$$

Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah melakukan pengukuran harmonisa pada VSD tipe *ATV12H075M2* dengan beban motor induksi tiga fasa 750 W. Hasil pengukuran didapat berupa THDv, THDi, IHDv dan IHDi. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan parameter *passive LC filter* dan *passive single tuned filter* kemudian dilakukan pemodelan beban dan filter yang disimulasikan dengan program MATLAB/Simulink. Hasil kedua filter tersebut dibandingkan terhadap standar *IEC61000-3-2 Kelas A*.

Teknik Pengukuran Yang Dilakukan

Teknik pengukuran dan pengambilan data menggunakan alat ukur *Fluke 435 Power Quality Analyzer* yang dilakukan pada PLN Wilayah Sumatera Utara dengan menggunakan rangkaian Gambar 3.2.



Gbr 14. Diagram penempatan *passive LC filter*

dan *passive single tuned filter*

Data Hasil Pengukuran

Tabel 2 merupakan data yang diambil dari pengukuran *Variable Speed Drive*.

Tabel 2. Data hasil pengukuran

Variable Speed Drive tipe ATV12H075M2 dengan daya 750 Watt		
Parameter	Satuan	Nilai
S (Apparent Power)	VA	426.9
P (Active Power)	Watt	285.6
Q (Reactive Power)	VAR	317.4
PF (Power Factor)	-	0.67
THDv	%	3.5
THDi	%	102.9
Frekuensi	Hz	50
V (Phase Voltage)	Volt	219.63
I (Phase Current)	Ampere	2.402

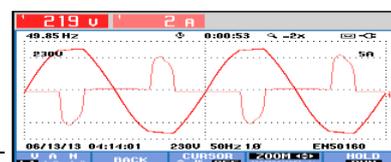
Pada Tabel 2 ditunjukkan bahwa data hasil pengukuran IHDi dan IHDv dari setiap orde harmonisa dalam satuan persen yaitu masing-masing sebesar 102,9 % dan 3,5 % yang dirubah dalam satuan amper dan tegangan.

Jika dibandingkan dengan standar *IEC61000-3-2 Kelas A*, ada beberapa orde IHDi pada VSD dari hasil pengukuran yang tidak sesuai dengan standar.

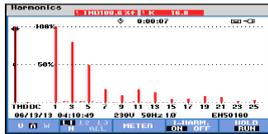
Tabel 3. Data hasil pengukuran harmonisa arus dan tegangan

Harmonisa ke-n	Individual Distorsi Harmonisa (IHD)				THDi (%)	THDv (%)
	Arus (i) (%)	Arus (j) (Amp)	Tegangan (V) (%)	Tegangan (V) Volt		
3	81,3	1,95	2,4	5,27		
5	52,7	1,26	2,2	4,83		
7	21,4	0,51	1,2	3,29		
9	5,2	0,12	0,5	1,09	102,9	3,5
11	15,3	0,36	0,3	0,65		
13	14,5	0,34	0,3	0,65		
15	6,8	0,16	0,3	0,65		

Bentuk gelombang , spektrum arus dan tegangan pada Gambar 3.3 s/d 3.5. Di mana pada Gambar 15 bentuk gelombang arus dan tegangan yang tidak sinusoidal.



Gbr 15. Bentuk gelombang arus dan tegangan.



Gbr 16. Bentuk spectrum harmonisa arus

THD%	THD
102.9	102.9
81.3	81.3
52.7	52.6
21.4	21.4
5.2	5.2
15.3	15.3
14.5	14.5
6.8	6.8

Gbr 17. Individual distorsi harmonisa arus

Perbandingan Klasifikasi Arus Harmonisa Pada VSD Berdasarkan Standar IEC61000-3-2 Kelas A

Sebelum merancang *filter* sebaiknya diketahui terlebih dahulu orde arus harmonisa mana yang tidak sesuai standar. Pada Tabel 3.3 dapat dilihat klasifikasi arus harmonisa pada VSD dari hasil pengukuran berdasarkan standar IEC61000-3-2 Kelas A.

Tabel 4. Perbandingan arus harmonisa pengukuran pada VSD dengan standar IEC61000 3-2 kelas A

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa Standar IEC61000-3-2 kelas A (Amper)	Arus Harmonisa VSD Hasil Pengukuran (Amper)	Keterangan
3	2,30	1,95	Sesuai
5	1,14	1,26	Tidak sesuai
7	0,77	0,51	Sesuai
9	0,40	0,12	Sesuai
11	0,33	0,36	Tidak sesuai
13	0,21	0,34	Tidak sesuai
15	0,15	0,16	Tidak sesuai

Perhitungan Nilai L dan C dari *Passive LC Filter*

Dalam menentukan besarnya parameter *passive LC filter* yang dibutuhkan, terlebih dahulu diperhatikan nilai selisih terbesar dari orde harmonisa arus. Dari Tabel 2 selisih terbesar terdapat pada orde harmonisa ke-5, oleh karena itu *passive LC filter* yang digunakan adalah *filter* untuk harmonisa ke-5.

a. Perhitungan pemakaian arus beban

Dalam menghitung pemakaian arus beban pada VSD dengan daya 285,6 watt (Tabel 2) yaitu :

$$I = \frac{285,6}{219,63 \times 0,67} = 1,9408 \text{ Amper}$$

Jika dari data pengukuran Tabel 3.1 dengan pemakaian arus sebesar 2,402 Ampere, pada tegangan kerja 219,63 Volt, dan faktor daya 0,67, maka pemakaian daya kondisi tersebut sebesar:

$$P = 219,63 \times 2,402 \times 0,67 = 352,45 \text{ watt}$$

Dengan demikian persentasi beroperasinya daya VSD sebesar 47% dari 750 W, jika diperbaiki faktor daya sistem menjadi 0,95, maka arus yang mengalir sebesar,

$$\frac{352,45}{219,63 \times 0,95} = 1,689 \text{ A}$$

Sehingga arus akan lebih kecil mengalir sebesar 70,32 % dari 2,402 A.

b. Perhitungan nilai C

Untuk memperbaiki faktor daya dari 0,67 menjadi 0,95 dengan menggunakan Tabel 2 dibutuhkan kapasitas kapasitor sebesar :

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

$$Q_C = 222,4824 \text{ Var}$$

Sehingga nilai reaktansi kapasitor :

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} = \frac{219,63^2}{222,4824} = 216,81417 \Omega$$

Maka besar nilai C yaitu :

$$C = \frac{1}{2 \pi f_0 X_C} = 14,689 \mu\text{F}$$

c. Perhitungan nilai L

Menentukan nilai L sebagai *filter* , dengan memasukan nilai dari pengukuran pada Tabel 3.

Nilai impedansi Z, di mana:

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

Dari Tabel 2 di dapat arus I = 2,402 Amper pada faktor daya 0,67, maka

$$Z = \frac{219,63}{2,402} = 91,43 \Omega$$

Reaktansi induktif dari induktor:

$$X_{L3} = \frac{X_C}{h_3^2} = \frac{216,81417}{3^2} = 24,0905 \Omega$$

Reaktansi karakteristik dari *filter* pada *orde tuning*:

$$X_n = 5 \times 8.6726 = 43.363 \Omega$$

Tahanan (R) dari Induktor:

$$R = \frac{X_n}{Q} = \frac{43,363}{100} = 0,43363 \Omega$$

Jadi induktansi dari induktor (L):

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 + R^2}}{2\pi f_0} = 0,2912 \text{ H}$$

Dari perhitungan diatas diperoleh parameter *filter* LC adalah :

$$C = 15 \mu\text{F} \text{ dan } L = 0.2912 \text{ H}$$

Impedansi rangkaian:

$$Z_3 = \frac{X_L \times X_C}{X_L + X_C} = 21,68$$

Perhitungan Nilai R, L dan C dari *Passive Single Tuned Filter*

Menentukan kebutuhan kapasitor sebagai perbaikan faktor daya, dengan memasukan nilai dari pengukuran pada Tabel 3.1. Untuk memperbaiki faktor daya dari 0,67 menjadi 0,95 dibutuhkan kompensasi kapasitor sebesar :

a. Kapasitas kapasitor

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

$$Q_C = 222,4824 \text{ Var}$$

b. Nilai reaktansi kapasitor :

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} = \frac{219,63^2}{222,4824} = 216,81417 \Omega$$

c. Kapasitansi dari kapasitor (C):

$$C = \frac{1}{2 \pi f_0 X_C} = 14,689 \mu F$$

d. Nilai reaktansi induktif dari induktor (X_L) yaitu :

$$X_{L3} = \frac{X_C}{h_3^2} = \frac{216,81417}{3^2} = 24,0905 \Omega$$

Induktansi dari induktor (L) :

$$L_n = \frac{X_{Ln}}{2 \pi f_0}$$

$$L_3 = \frac{24,0905}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,0767 H$$

e. Nilai reaktansi karakteristik dari filter (X_n) yaitu :

$$X_n = h_n X_{Ln}$$

$$X_3 = 3 \times 24,0905 = 72,2715 \Omega$$

f. Nilai tahanan (R) dari induktor :

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

$$R_3 = \frac{72,2715}{100} = 0,72272 \Omega$$

Pada frekuensi harmonisa ke 3 dimana filter dituned, maka impedansi yang dihasilkan adalah:

$$Z_n = R_n + j \left(2\pi f_n L_n - \frac{1}{2\pi f_n C} \right)$$

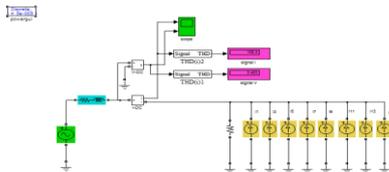
$$Z_3 = 0,72272 + j(0,0548)$$

$$|Z|_3 = 0,7238 \Omega$$

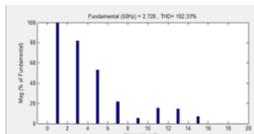
Diagram Simulasi MATLAB/Simulink

Untuk membuat simulasi MATLAB/ Simulink digunakan data hasil pengukuran besaran daya, tegangan, arus RMS, IHD_i pada setiap orde harmonisa pada VSD, serta hasil perhitungan nilai – nilai RLC dari *passive LC filter* dan *passive single tuned filter*.

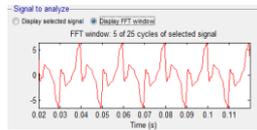
Pada Gambar 3.8 diagram simulasi rangkaian VSD sebelum pemakain filter. Bentuk gelombang arus dan spectrum arus diperoleh dari *Block Power GUI* bagian *Fast Fourier Transform (FFT) analysis* diperlihatkan pada Gambar 3.9 dan 3.10.



Gbr 18. Simulasi VSD sebelum pemasangan filter



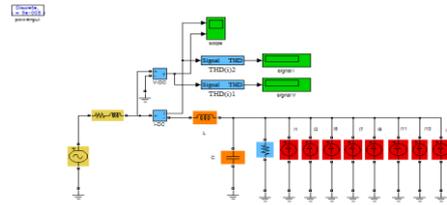
Gbr 19. Gelombang arus simulasi sebelum pemasangan filter



Gbr 20. Spektrum arus simulasi sebelum pemasangan filter

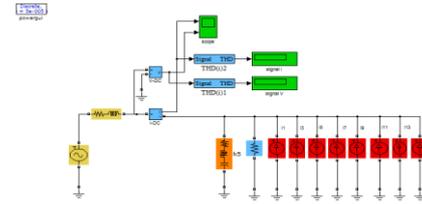
Terjadi cacat gelombang arus yang menyebabkan gelombang VSD jauh dari gelombang sinusoidal, sehingga diupayakan untuk mereduksi harmonisa arus pada VSD dengan menggunakan *passive LC filter* dan *passive single tuned filter* dengan hubungan sebagai berikut :

a. *Passive LC filter* terdiri dari L dan C dipasang paralel dengan beban, seperti Gambar 21.



Gbr 21. Simulasi VSD dengan *Passive LC filter*

b. *Passive single tuned filter* terdiri dari resistansi, induktor dan kapasitor dipasang paralel dengan beban, seperti Gambar 22.



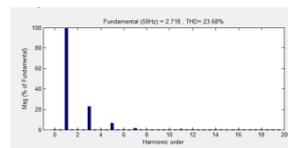
Gbr 22. Simulasi VSD dengan *passive single tuned filter*

Hasil Dan Pembahasan

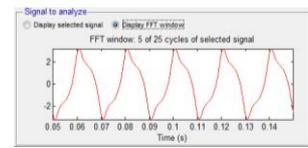
Simulasi yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan program MATLAB/Simulink dengan menggunakan *passive LC filter* dan *passive single tuned filter* yang dipasang paralel terhadap rangkaian, kemudian membandingkan kedua filter tersebut terhadap nilai IHD_i yang telah diredam oleh filter, dimana sebelum dipasang filter THD_i sebesar 102,9% dan setelah pemasangan *passive LC filter* dan *passive single tuned filter* berturut-turut THD_i nya 23,78% dan 8,79%.

Harmonisa Arus Setelah Pemasangan *Passive LC Filter*

THD_i hasil pengukuran dari VSD adalah 102,9%. Setelah pemasangan *passive LC filter* diperoleh THD_i berkurang menjadi 23,78% atau tereduksi sebesar 79,12%. Bentuk gelombang arus dan spektrum harmonisa arus setelah pemasangan *passive LC filter* dapat di lihat pada Gambar 4.1 dan 4.2. Bentuk gelombang yang dihasilkan tidak sinusoidal, ini menunjukkan bahwa pada gelombang masih terdapat harmonisa tetapi kandungan harmonisanya lebih kecil dibandingkan dengan bentuk gelombang sebelum pemakaian *passive LC filter*.



Gbr 23. Bentuk gelombang arus *passive LC filter*



Gbr 24. Spektrum harmonisa arus *passive LC filter*

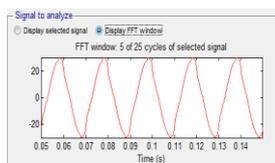
Dari Tabel 4 telah diketahui bahwa terdapat empat orde harmonisa yang tidak sesuai standar IEC61000-3-2 Kelas A. Setelah pemasangan *passive LC filter* nilai arus harmonisa berkurang dan memenuhi standar IEC61000-3-2 kelas A seperti pada (Tabel 5)

Tabel 5. Perbandingan arus harmonisa pengukuran pada VSD setelah pemasangan *passive LC filter* dengan standar IEC61000-3-2 kelas A

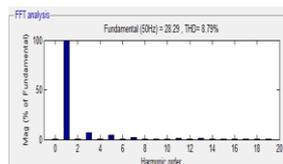
Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksimum Standar IEC61000-3-2 kelas A Yang di izinkan (Amper)	Arus Harmonisa VSD Setelah Pemasangan Passive LC Filter (Amper)	Keterangan
3	2,30	0,55	Sesuai standar
5	1,14	0,16	Sesuai standar
7	0,77	0,04	Sesuai standar
9	0,40	0,007	Sesuai standar
11	0,33	0,012	Sesuai standar
13	0,21	0,008	Sesuai standar
15	0,15	0,003	Sesuai standar
THDi (%)		23,78%	

Harmonisa Arus Setelah Pemasangan *Passive Single Tuned Filter*.

THDi hasil pengukuran dari VSD adalah 102,9%. Setelah pemasangan *passive single tuned filter* diperoleh THDi berkurang menjadi 8,78% atau tereduksi sebesar 94,12%. Bentuk gelombang arus dan spektrum harmonisa arus setelah pemakaian *passive single tuned filter* dapat dilihat pada Gambar 25 dan 26. Bentuk gelombang yang dihasilkan tidak sinusoidal, ini menunjukkan bahwa pada gelombang masih terdapat harmonisa tetapi kandungan harmonisanya lebih kecil.



Gbr 25. Bentuk gelombang arus *passive single tuned filter*



Gbr 26. Spektrum harmonisa arus *passive single tuned filter*

Dari Tabel 4 telah diketahui bahwa terdapat empat orde harmonisa yang tidak sesuai standar IEC61000-3-2 Kelas A. Setelah pemasangan *passive single tuned filter* nilai arus harmonisa berkurang dan memenuhi standar IEC61000-3-2 kelas A seperti yang dapat dilihat pada Tabel 6

Tabel 6. Perbandingan arus harmonisa pengukuran pada VSD setelah pemasangan *passive single tuned filter* dengan standar IEC61000-3-2 kelas A

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksimum Standar IEC61000-3-2 kelas A Yang di izinkan (Amper)	Arus Harmonisa VSD Setelah Pemasangan Single Tuned Filter (Amper)	Keterangan
3	2,30	0,215	Sesuai standar
5	1,14	0,111	Sesuai standar
7	0,77	0,045	Sesuai standar
9	0,40	0,011	Sesuai standar
11	0,33	0,032	Sesuai standar
13	0,21	0,031	Sesuai standar
15	0,15	0,014	Sesuai standar
THDi		8,79 %	

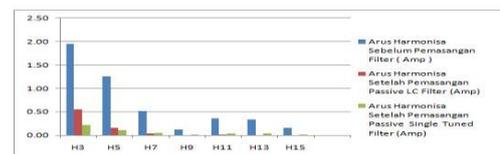
Perbandingan Hasil Simulink *Passive LC filter* dan *Passive single tuned filter* untuk Mereduksi Harmonisa Arus pada VSD

Perbandingan hasil harmonisa dengan menggunakan *passive LC filter* dan *passive single tuned filter* untuk mereduksi harmonisa pada VSD dengan penurunan THDi, IHD_i pada setiap orde harmonisa dapat dilihat pada Tabel 7.

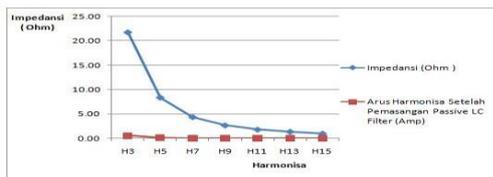
Tabel 7. Perbandingan arus harmonisa pada VSD sebelum dan sesudah pemasangan *filter* .

Harmo nisa ke-n	Standar IEC61000-3-2 kelas A (Amper)	Sebelum Pemasangan Filter (Amper)	Setelah Pemasangan Filter Pasif LC (Amper)	Setelah Pemasangan Pasissive Single Tuned Filter (Amper)
3	2,30	1,95	0,55	0,215
5	1,14	1,26	0,16	0,111
7	0,77	0,51	0,04	0,045
9	0,40	0,12	0,007	0,011
11	0,33	0,36	0,012	0,032
13	0,21	0,34	0,008	0,031
15	0,15	0,16	0,003	0,014
THDi (%)		102,9 %	23,78 %	8,79 %

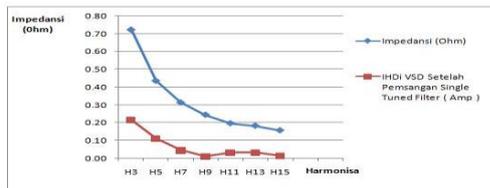
Untuk lebih jelas Tabel 8 dibuat dalam bentuk grafik seperti Gambar 27. Terlihat dari grafik tersebut yang paling baik untuk mereduksi arus harmonisa pada VSD adalah *passive single tuned filter* dibanding dengan *passive LC filter* , karena impedansi *passive single tuned filter* lebih kecil dari impedansi *passive LC filter*, seperti pada Gambar 28 dan 29 . Secara keseluruhan THDi yang dihasilkan peralatan telah dapat diturunkan dengan menggunakan *passive LC filter* dan *passive single tuned filter* .



Gbr 27. Diagram perbandingan sebelum dan sesudah pemasangan filter.



Gbr 28. Grafik hubungan impedansi dengan harmonisa arus passive LC filter



Gbr 29. Grafik hubungan impedansi dengan harmonisa arus passive single tuned filter

Kesimpulan Dan Saran

Kesimpulan

1. *Variable Speed Drive* yang diukur menghasilkan *THDi* sebesar 102,9% dengan beberapa orde harmonisa arus yang tidak sesuai standar *IEC61000-3-2 Kelas A* , yaitu orde ke-5, orde-11, orde-13, dan orde ke-15
2. Setelah pemasangan *passive LC filter* , *THDi* pada VSD berkurang dari 102.9% menjadi 23,68% atau tereduksi 79,22% ,
3. Setelah pemasangan *passive single tuned filter* , *THDi* pada VSD berkurang dari 102.9% menjadi menjadi 8,79% atau tereduksi sebesar 94,11% .
4. *Passive single tuned filter* lebih baik mereduksi harmonisa dibandingkan dengan *passive LC filter* , karena impedansi *passive single tuned filter* lebih kecil dari *passive LC filter* , untuk harmonisa ke 5 yaitu 0,436 Ω dan 8,34 Ω .
5. *Passive single tuned filter* lebih baik mereduksi harmonisa dibandingkan dengan *passive LC filter* , yaitu *THDi* *Passive single tuned filter* 8,79%, sedang pada *passive LC filter* 23,78%.

Saran

1. Peneliti selanjutnya untuk menggunakan filter lainnya untuk mereduksi harmonisa VSD.
2. Kepada pabrik pembuat VSD agar memberlakukan standar *IEC61000-3-2 kelas A* untuk mengurangi harmonisa sebelum diproduksi.

Daftar Pustaka

1. Mohan, Ned, Undeland, Tore M. and Robbins, William P., 1995. *Power electronics Converters, Application, and Design*. John Wiley and Sons, Inc.
2. Rijono, Yon. 1997. *Dasar Teknik Tenaga Listrik*. ANDI. Yogyakarta .
3. Wijaya Mochtar. 2001. *Dasar-dasar Mesin Listrik*. Djambatan. Jakarta.

4. Basu Supriatim, Bollen. J. H. M, Undeland M. Tore, 2008, *PFC Strategies in Light of EN 61000-3-2*, Norwegian University of Science and Technology Trondheim, Norway, Paper Identification Number A123656, pp:1-9.
5. Francisco C De La Rosa, 2006, *Harmonic And Power System*, by Taylor & Francisco Group LLC, Boca Raton London, New York.
6. Dahono A. Pekik, Purwandi, Qamaruzzaman, 1995, *An LC Filter Design Method for single-Phase PWM Inverter* , *IEEE, catalogue no. 95TH80250-7803-2423-4/95/*. Pp. 571-576.
7. Rasyid Harun , *Kajian pemasangan filter pasif sebagai pereduksi efek harmonisa*, *Jurnal ELTEK*, vol. 04, no. 02, Oktober 2006.
8. H.Ahmed Khaled, J. Finney Stephen and W. Williams Barry, 2007, *Passive Filter Design For Three-Phase Inverter Interfacing in Distributed Generation*, *Electrical Power Quality and Utilisation*, Journal Vol. XIII, No. 2, 2007, pp.49-58.
9. Chang, G.W, S.Y. Chu, and H.L. Wang, 2002, *A New Approach for Placement of Single-Tuned Passive Harmonic Filter in a Power System*, *IEEE*, pp. 814-817.
10. Cho, Young-Sik and Hanju Cha, 2011, *Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor*, *Journal of International Council on Electrical Engineering* Vol. 1, No. 1, pp. 7-13.
11. Endy Sopyandi, 2010, *Perancangan single-tuned filter untuk mereduksi arus dengan simulasi program ETAP Powerstation 5.0.3*, *Electrical Engineering Department, University of Indonesia*.
12. Schneider Electric Manual Book, April 2009, *Altiva 12 Variable Speed Drives for asynchronous motors user manual*.
13. Zuhail, 1988, *Dasar teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, PT. Gramedia, Jakarta.
14. Muhammad H, Rasyid, 1993, *Power Electronics Circuit, Devices, and Applications Second Edition*, New Jersey : Prentice Hall, Upper Saddle River.
15. Sabirin Taufiq, 2010, *Variable Speed Drive Part 1*, www.taufiqsabirin.wordpress.com/2010/08/04/variable-speed-drive-part-1.
16. Muhammad H, Rashid, 2004, *Power Electronics, Circuit Devices and Application*, Third Edition, Prentice Hall.
17. Jose R. Rodriguez, Juan W. Dixon, Jose R. Espinoza, Jorge Pont, Pablo Lezana, 2005, *PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art*, *IEEE transaction on industrial electronics*, vol. 52, No.1, Februari 2005, pp 5-21.
18. Johan Lundquist, 2001, *On Harmonic Distortion in Power Systems*, Departement Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
19. A.Priyadharshini, N.Nevarajan, AR. Uma Saranya, R.Anitt " *Survey of Harmonics in Non Linear Loads*" *International Journal of Recent Technology and Engineering* Vol.1, Issue 1, 2012.

20. Grady Mack, *Understanding Power System Harmonic*, University of Texas at Austin, 2005.
21. Basu Supratim, 2006, *Single Phase Active Power factor Correction Converter*, Chalmers University Technology, Goteborg, Sweden June.
22. Wakileh G.J, 2001, *Power System Harmonics: Fundamental, Analysis and Filter Design*, Springer Velag Press.
23. D.A. Gonzales and J.C. McCall, 1987, *Design of Filter to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power System*, IEEE Trans Ind. Application, Vol 1A-23, pp. 504-511. 130-134.
24. Rizkytama, Ardian, 2010, *Perencanaan High Pass dan Single Tuned Filter Sebagai Filter Harmonisa Pada Sistem Kelistrikan Tabang Coal Upgrading Plant (TCUP) Kalimantan Timur*, Proceedings Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya