

## Analisis Pemasangan Filter Pasif Untuk Mereduksi Harmonisa *Variable Speed Drive* di PT. IKPP Perawang

Elvira Zondra<sup>1</sup>, Nofriandi<sup>2</sup>, Masnur Putra Halilintar<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Email: [elviraz@unilak.ac.id](mailto:elviraz@unilak.ac.id), [nofriandi024@gmail.com](mailto:nofriandi024@gmail.com), [masnur@unilak.ac.id](mailto:masnur@unilak.ac.id)

Submitted : May 12, 2022

Accepted: December 18, 2023

DOI: 10.31849/sainetin.v8i1.10030

### Abstrak

Beban non linier sering digunakan dalam industri sehingga menimbulkan harmonisa dan rendahnya kualitas daya. Salah satunya adalah *Variable Speed Drive* (VSD) yang mengontrol motor induksi tiga fasa berkapasitas 160 kW yang menggerakkan *Green Liqour Pump-2* pada boiler. Hasil pengukuran menunjukkan kandungan harmonisa yang tinggi pada sisi sumber VSD tipe ACS800-07 saat kecepatan motor 1437 rpm. Kandungan harmonisa ditunjukkan oleh  $IHD_1$  pada orde ke-5, 7 dan 11 dengan rata-rata adalah 38,7%, 15,3% dan 7,2%, dan  $THD_1$  adalah 42,281%, sedangkan standarisasi IEEE 519-2014 adalah 4%. Salah satu solusinya adalah filter pasif *single tuned* untuk mereduksi  $IHD_1$  pada orde ke-5, 7 dan 11, dengan kapasitor (C) 1,406  $\mu F$ , dengan induktor (L) masing-masing 0,283 H, 0,144 H dan 0,058 H dan dengan resistor (R) masing-masing 5,6  $\Omega$ , 3,998  $\Omega$  dan 2,549  $\Omega$ , sedangkan koreksi faktor daya 65,745 kVAR. Hasil simulasi filter pasif *single tuned* menggunakan *software MATLAB/Simulink* dengan metode sumber arus mampu mereduksi  $IHD_1$  orde ke-5, 7 dan 11 menjadi 0,24%, 0,07% dan 0,03% dan  $THD_1$  menjadi 0,61%, dan sudah memenuhi standarisasi IEEE 519-2014. Kinerja filter pasif *single tuned* dalam mereduksi harmonisa mencapai 98,56%. Filter pasif *single tuned* dipilih karena lebih efektif dan mudah dalam perawatannya.

Kata Kunci: Harmonisa, motor induksi tiga fasa, *variable speed drive*, filter pasif, *single tuned*

### Abstract

*Non-linear loads are used in industry, causing harmonics and poor power quality. One of them is the Variable Speed Drive (VSD). The measurement results show a high content of harmonics on the source side of the VSD type ACS800-07 when the motor speed is 1437 rpm. The harmonic content is shown by  $IHD_1$  in the 5th, 7th and 11th order with the averages being 38.7%, 15.3% and 7.2%, and the  $THD_1$  is 42.281%, while the IEEE 519-2014 standardization is 4%. One solution is a passive single tuned filter to reduce  $IHD_1$  on the 5th, 7th and 11th orders, with a capacitor (C) is 1.406 F, with inductors (L) are 0.283 H, 0.144 H and 0.058 H, and with resistors (R) are 5.6  $\Omega$ , 3.998  $\Omega$  and 2.549  $\Omega$ , while the power factor correction is 65.745 kVAR. Simulation results of single tuned passive filter can reduce  $IHD_1$  of the 5th, 7th and 11th order to 0.24%, 0.07% and 0.03% and  $THD_1$  to 0.61%, and it already meets IEEE 519-2014 standardization. The performance of a single tuned passive filter in reducing harmonics reaches 98.56%. Single tuned passive filter was chosen because it is more effective and easier to maintain.*

Keywords: Harmonics, three-phase induction motor, variable speed drive, passive filter, single tuned

### 1. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa sangat banyak digunakan dalam dunia industri [1]. Seperti terlihat di PT. Indah Kiat Pulp and Paper (PT. IKPP) Tbk. Perawang yang bergerak di bidang produksi bubur kertas dan kertas (*pulp and paper*). Motor induksi tiga fasa dipilih karena konstruksinya sederhana, kuat dan mudah dalam pemeliharaannya, sehingga sangat

tepat digunakan sebagai penggerak mesin produksi seperti: penggerak pompa, penggerak kipas (*fan*) maupun sebagai penggerak *conveyor*. Motor induksi tiga fasa beroperasi dengan kecepatan penuh dan relatif konstan. Pengaturan kecepatan motor induksi dapat dilakukan dengan mengubah jumlah kutub motor. Hal ini tentunya membutuhkan waktu yang lama dan tidak tepat jika dilakukan pada mesin

produksi yang membutuhkan variasi kecepatan. Cara lain untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fase adalah dengan menggunakan Variable Speed Drive (VSD) atau dikenal juga dengan Variable Frequency Drive (VFD) [2]–[4]. Motor induksi tiga fase sangat banyak digunakan dalam dunia industri. Seperti terlihat di PT. Indah Kiat *Pulp and Paper* (PT. IKPP) Tbk. Perawang yang bergerak di bidang produksi bubur kertas dan kertas (*pulp and paper*). Motor induksi tiga fase dipilih karena konstruksinya sederhana, kuat dan mudah dalam pemeliharaannya, sehingga sangat tepat digunakan sebagai penggerak mesin produksi seperti: *pump, fan* dan *conveyor*.

Motor induksi tiga fase beroperasi dengan kecepatan penuh dan relatif konstan. Pengaturan kecepatan motor induksi dapat dilakukan dengan mengubah jumlah kutub motor. Hal ini tentunya membutuhkan waktu yang lama dan tidak tepat jika dilakukan pada mesin produksi yang membutuhkan variasi kecepatan. Cara lain untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fase adalah dengan menggunakan *Variable Speed Drive (VSD)* atau dikenal juga dengan *Variable Frequency Drive (VFD)*.

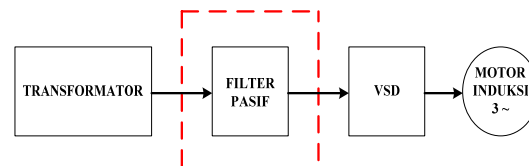
VSD atau VFD merupakan peralatan yang terdiri dari *rectifier, intermediate circuit* dan *inverter*. VSD mampu mengatur kecepatan motor induksi tiga fase dengan mengubah besaran frekuensi dan tegangan. Penggunaan VSD juga bertujuan untuk menghemat energi listrik, mengurangi arus *start* dan pengoperasian mesin menjadi lebih halus. VSD memiliki sebagian besar komponen yang merupakan beban non linear yang akan menimbulkan harmonisa pada sistem kelistrikan. Pemasangan filter pasif sangat diperlukan untuk mereduksi harmonisa dan meningkatkan kualitas daya listrik. Penelitian ini akan menganalisis kandungan harmonisa yang terdapat pada sisi sumber VSD, kemudian merancang filter pasif *single tuned* untuk mereduksi harmonisa agar sesuai dengan standarisasi IEEE 519-2014.

## 2. METODE PENELITIAN

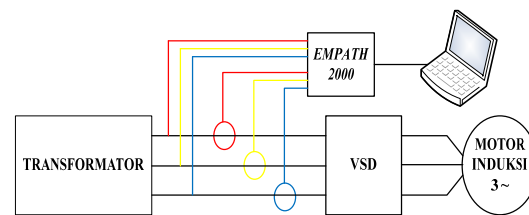
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode simulasi yang diawali dengan pengumpulan data motor induksi, pengukuran harmonisa, perhitungan parameter filter pasif *single tuned* dan kemudian mensimulasikannya menggunakan *software MATLAB/Simulink* untuk mereduksi harmonisa agar sesuai dengan standarisasi IEEE 519-2014. Titik pengukuran harmonisa berada pada sisi sumber VSD tipe ACS800-07 sebagai pengontrol

motor induksi tiga fase berkapasitas 160 kW dan kecepatan motor pada saat pengukuran adalah 1437 rpm. Alat ukur yang digunakan adalah *EMPATH 2000 (Electric Motor Performance Analysis and Trending Hardware)*.

Adapun diagram blok penelitian adalah seperti pada Gambar 1, sedangkan diagram pengukuran harmonisa seperti pada Gambar 2.



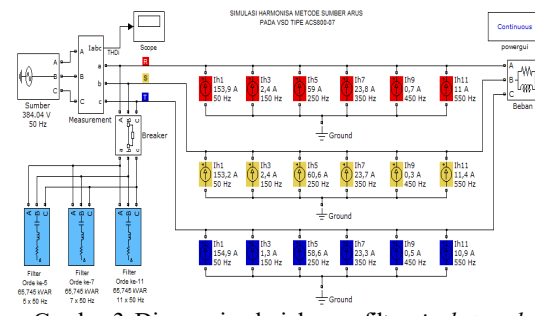
Gambar 1. Diagram Blok Penelitian



Gambar 2. Diagram pengukuran harmonisa

Simulasi pada penelitian ini menggunakan *software MATLAB/Simulink* dengan metode simulasi sumber arus, yaitu beban penghasil harmonisa dijadikan sebagai sumber arus dengan frekuensi yang disesuaikan dengan hasil pengukuran. Untuk simulasi terdiri dari dua tahapan yaitu simulasi tanpa filter dan simulasi dengan filter pasif *single tuned* yang dihubungkan dengan sebuah *breaker*. Diagram simulasi seperti pada Gambar 3.

Spesifikasi VSD yang dilakukan pengukuran harmonisa adalah seperti pada Tabel 1.



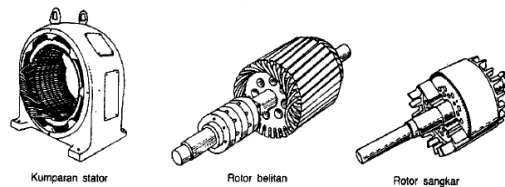
Gambar 3. Diagram simulasi dengan filter *single tuned*

Tabel 1. Spesifikasi VSD tipe ACS800-07

Spesifikasi VSD	Input	Output
Tegangan (V)	380 - 415	0 – V in
Arus (A)	286	290
Frekuensi (Hz)	48 – 63	0 - 300
Tipe	ACS800-07-0205-3	
<i>Minimum short circuit</i> (A)		2620
Tahun Pembuatan		2007
Merek		ABB

### Motor Induksi Tiga Phasa

Dinamakan motor induksi karena arus rotor diperoleh dari arus yang terinduksi dari medan magnet berputar pada stator saat diberi sumber tegangan tiga phasa. Medan magnet berputar pada stator dengan kecepatan sinkron akan memotong konduktor rotor sehingga terinduksi arus dan rotor akan ikut berputar mengikuti medan putar stator. Secara umum motor induksi dibagi dalam dua tipe rotor yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar tupai (*squirrel cage*) seperti pada Gambar 4 [5].



Gambar 4. Kumparan stator dan tipe rotor motor induksi [5]

Motor induksi mempunyai kecepatan putar yang konstan dan hampir mencapai kecepatan sinkronnya. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengatur kecepatan putar pada motor induksi yaitunya dengan mengubah jumlah kutub pada motor, mengubah frekuensi dan mengubah tegangan jala-jala. Pengaturan kecepatan motor induksi yang paling efektif adalah dengan mengubah frekuensi menggunakan *frequency converter* [5]. Peralatan yang biasa digunakan adalah *Variable Speed Drive* (VSD) atau dikenal juga dengan *Variable Frequency Drive* (VFD) [6].

### Variable Speed Drive

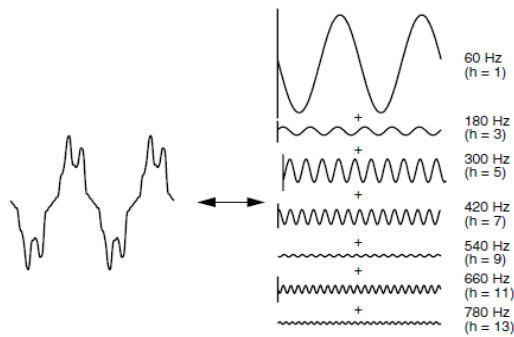
*Variable speed drive* (VSD) atau dikenal juga dengan *Variable Frequency Drive* (VFD) merupakan

suatu perangkat yang berfungsi untuk mengatur kecepatan putar motor listrik arus bolak-balik dengan cara mengubah besaran frekuensi yang disuplai ke motor tersebut. Pada VSD terdapat beberapa komponen utama seperti rectifier (penyearah), saluran DC, Inverter dan control circuit [7].

VSD atau disebut juga inverter merupakan peralatan pengubah tegangan jala-jala (AC) menjadi tegangan searah (DC) kemudian diubah kembali menjadi tegangan AC. Ada tiga jenis inverter yang tersedia saat ini, yaitu: inverter sumber arus (CSI), inverter sumber tegangan (VSI) dan inverter dengan pengatur lebar pulsa PWM (*Pulse Width Modulated*). Inverter VSI berfungsi mengatur tegangan, sedangkan inverter CSI mampu mengatur suplai arus ke motor [6].

### Harmonisa

Harmonisa merupakan gangguan yang terjadi akibat gelombang yang terdistorsi pada sistem tenaga listrik baik distorsi gelombang arus maupun tegangan [7]. Harmonisa dapat juga didefinisikan sebagai komponen sinusoidal gelombang berkala yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat terhadap frekuensi fundamentalnya [8]. Terjadinya superposisi antara gelombang sinusoidal dengan gelombang frekuensi harmonisa mengakibatkan gelombang menjadi terdistorsi sehingga bentuk gelombangnya tidak lagi sinusoidal [3]. Penggunaan beban non linier dalam dunia industri maupun komersial juga menyebabkan masalah kualitas daya yang disalurkan. Beban non linier adalah perangkat listrik yang menciptakan gelombang non sinusoidal pada saat dipasok oleh sumber sinusoidal [9]. Penggunaan beban non linier merupakan sumber utama harmonisa yang menimbulkan distorsi gelombang arus dan tegangan, sehingga mengakibatkan mengalirnya arus pada saluran netral [10]. Gabungan dari gelombang frekuensi fundamental dengan gelombang frekuensi harmonisa ketiga akibat beban non linier menyebabkan gelombang terdistorsi [11]. Bentuk gelombang terdistorsi akibat harmonisa adalah seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Gelombang terdistorsi dan mewakili deret *fourier* [12]

ecara umum dalam menganalisis masalah harmonisa diterapkan konsep deret *fourier*. Bentuk dari gelombang harmonisa identik dari suatu siklus ke siklus berikutnya. Jumlah dari gelombang sinusoidal tersebut dinamakan dengan seri *fourier*, yang diambil dari nama ahli matematika yang telah berhasil menemukan konsep tersebut [12].

Gelombang tegangan dan arus dapat direpresentasikan sebagai jumlah dari komponen DC dan gelombang sinus dengan frekuensi dasar, seperti persamaan (1) dan persamaan (2) [9]:

$$V(t) = V_0 + \sum_{h=1}^N V_h \sin(h\omega_1 t + \delta_h) \quad (1)$$

$$I(t) = I_0 + \sum_{h=1}^N I_h \sin(h\omega_1 t + \theta_h) \quad (2)$$

THD didefinisikan sebagai perbandingan dari arus RMS harmonisa total dan RMS arus fundamental total. Besarnya  $THD_I$  seperti pada persamaan (3) dan  $THD_V$  seperti pada persamaan (4) [9]:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \quad (3)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_h)^2}}{V_1} \quad (4)$$

#### Standarisasi IEEE 519-2014

Batasan harmonisa tegangan berdasarkan standarisasi IEEE 519-2014 seperti pada Tabel 2 dan batasan harmonisa arus seperti pada Tabel 3.

Untuk menghitung arus hubung singkat pada PCC harus menggunakan kapasitas hubung singkat minimum. Besaran  $I_{SC}$  dalam satuan ampere dapat diperoleh langsung dari *nameplate* sistem. Jika tersedia dalam satuan MVA dapat diubah menjadi satuan ampere melalui persamaan (5) [12]:

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3} \text{ kV}} \quad (5)$$

Dimana:

MVA = Kapasitas hubung singkat tiga fasa (MVA)

kV = Tegangan *line-to-line* pada PCC (kV)

Tabel 2. Batasan harmonisa tegangan [13]

Bus voltage $V$ at PCC	Individual harmonic (%)	THD (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5

Tabel 3. Batasan harmonisa arus [13]

$I_{SC} / I_L$	Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$					
	Individual harmonic order (odd harmonics)					
	3-11	11-17	17-23	23-35	35-50	TDD
$< 20^e$	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

Kemudian ubah permintaan kilowatt rata-rata menjadi arus permintaan rata-rata dalam ampere melalui persamaan (6), maka rasio hubung singkat (*SC ratio*) dapat diperoleh melalui persamaan (7) [12]:

$$I_L = \frac{kW}{PF \sqrt{3} \text{ kV}} \quad (6)$$

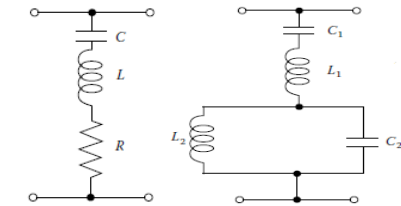
$$SC \text{ ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (7)$$

#### Filter Pasif

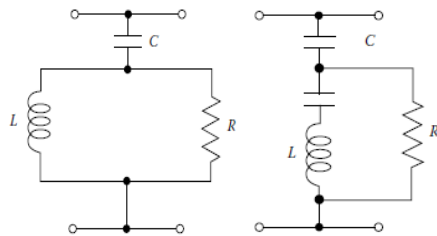
Salah satu cara menyelesaikan masalah harmonisa yang paling efektif adalah dengan menggunakan filter pasif. Filter pasif sengaja dibuat untuk mengalihkan aliran arus harmonisa yang terdapat dalam sistem tenaga. Rugi-rugi daya reaktif yang disebabkan oleh kandungan harmonisa pada umumnya dikompensasi menggunakan filter pasif [11].

Filter pasif merupakan gabungan dari sejumlah komponen pasif yaitu kapasitor (C), induktor (L) dan resistor (R). Berdasarkan rangkaian penyusun

filter pasif dibagi dalam tiga jenis yaitunya; *single tuned*, *double tuned*, dan *high-pass* [8]. Sedangkan filter pasif *high-pass* terdapat dua jenis yaitunya *damped high-pass* dan *modified high-pass*. Macam-macam rangkaian filter pasif seperti terdapat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. *Single tuned* dan *double tuned* [9]

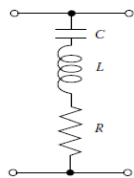


Gambar 7. *Damped high-pass* dan *modified high-pass* [9]

Frekuensi harmonisa terendah (contohnya pada harmonisa ke-5) memiliki faktor kualitas (Q) yang tinggi dengan perkiraan antara 30 sampai 100. Pada reaktor inti udara (*air core reactor*) perkiraannya adalah 75 dan pada reaktor inti besi (*iron core reactor*) perkiraan Q lebih besar dari 75 [11].

### Filter Pasif Single Tuned

Filter pasif *single tuned* adalah susunan seri komponen pasif dan dihubungkan paralel dengan sistem, yang merupakan filter pasif yang disetel tunggal untuk mereduksi arus harmonisa yang terdapat pada suatu orde tertentu. Bentuk rangkaian filter pasif *single tuned* seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Filter pasif *single tuned* [9]

Pada frekuensi resonansi filter pasif memiliki impedansi kecil sehingga arus harmonisa yang mempunyai frekuensi yang sama akan dibelokkan menuju filter [11].

Langkah-langkah menentukan parameter filter pasif *single tuned* adalah sebagai berikut:

- a. Menentukan kompensasi daya reaktif untuk perbaikan faktor daya dapat dihitung menggunakan persamaan (8) [12]:

$$K_{var} = kW(\tan \theta_{orig} - \tan \theta_{new}) \quad (8)$$

Dimana:

$K_{var}$  = kompensasi yang diperlukan

kW = beban (kW)

$\theta_{orig}$  = faktor daya hasil pengukuran

$\theta_{new}$  = faktor daya setelah diperbaiki

- b. Untuk reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan (9) [12]:

$$X_C = \frac{(kV)^2}{Mvar} \quad (9)$$

- c. Menentukan Kapasitansi kapasitor (C) dapat dihitung menggunakan persamaan (10) [11]:

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_C} \quad (10)$$

- d. Menentukan reaktansi induktif dari induktor ( $X_L$ ) dihitung menggunakan persamaan (11) [12]:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (11)$$

- e. Menentukan induktansi induktif dari induktor (L) dihitung menggunakan persamaan (12) [12]:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_0} \quad (12)$$

- f. Menentukan reaktansi karakteristik dari filter ( $X_n$ ) dihitung menggunakan persamaan (13) [11]:

$$X_n = h_n X_L \quad (13)$$

- g. Menentukan tahanan (R) dari induktor dapat dihitung menggunakan persamaan (14) [11]:

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (14)$$

Pada saat terjadi resonansi reaktansi induktif yang dimiliki filter akan sama besar dengan reaktansi kapasitif, maka, arus harmonisa pada sistem akan dibelokkan menuju filter. Impedansi filter pasif *single tuned* seperti yang terdapat pada persamaan (15) [11]:

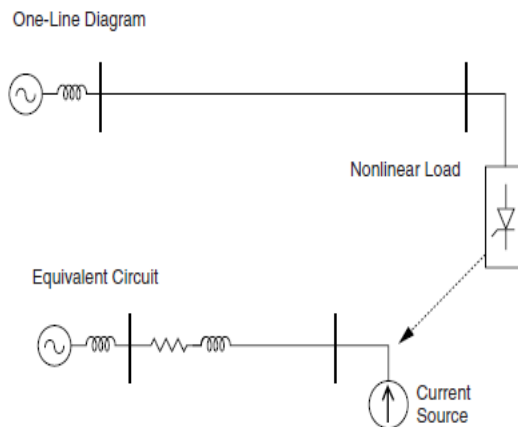
$$Z_F = R \quad (15)$$

Karakteristik penyetelan (*tuning*) filter ditentukan oleh faktor kualitasnya ( $Q$ ).  $Q$  adalah ukuran ketajaman penyetelan. Untuk resistansi filter seri didefinisikan sebagai faktor kualitas seperti persamaan (16) [12]:

$$Q = \frac{nX_L}{R} \quad (16)$$

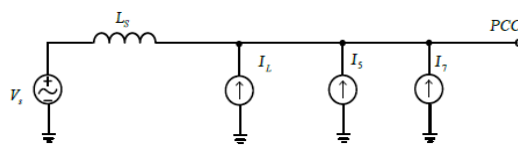
### Pemodelan Beban Non Linier sebagai Sumber Arus

Pemodelan beban non linier sebagai sumber arus yaitunya beban non linier penghasil harmonisa digantikan oleh sumber arus atau tegangan yang akan menginjeksikan harmonisa ke jaringan linier. Beban non linier penghasil harmonisa dapat diganti dengan sumber arus pada rangkaian ekuivalen seperti pada Gambar 9 [12].



Gambar 9. Beban non linier sebagai sumber arus [12]

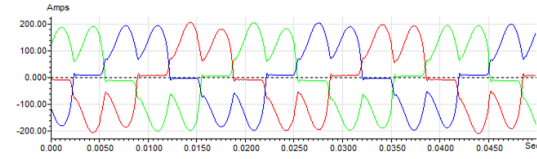
Untuk pendekatan simulasi dan perhitungan maka bentuk pemodelan R dan L diganti menjadi sumber arus dasar ( $I_L$ ) seperti pada Gambar 10 [14].



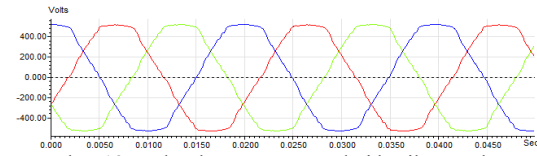
Gambar 10. Model beban non linier dan arus dasar [14]

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

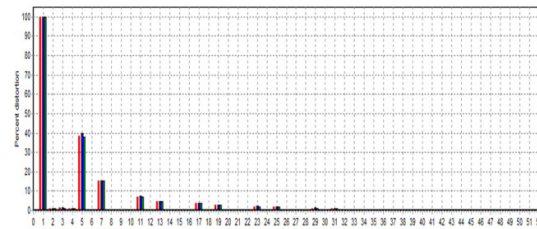
Hasil pengukuran yang terdapat pada sisi sumber VSD tipe ACS800-07 menggunakan alat ukur *EMPATH 2000* dengan kecepatan motor induksi tiga fasa sebesar 1437 rpm, diperoleh hasil berupa: gelombang arus dan tegangan serta spektrum arus dan tegangan seperti pada pada Gambar 11, Gambar 12, Gambar 13 dan Gambar 14.



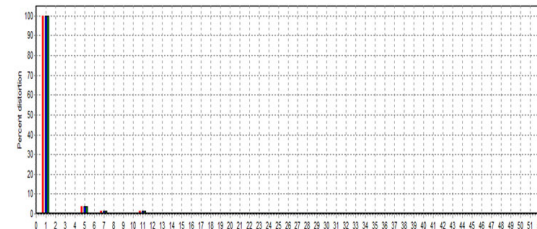
Gambar 11. Gelombang arus dari hasil pengukuran



Gambar 12. Gelombang tegangan dari hasil pengukuran



Gambar 13. Spektrum arus dari hasil pengukuran



Gambar 14. Spektrum tegangan dari hasil pengukuran

Sedangkan hasil pengukuran berupa besaran sistem kelistrikan dan THD seperti pada Tabel 4 dan komponen  $IHD_1$  seperti pada Tabel 5.

Tabel 4. Hasil pengukuran

Parameter	Phasa			Rata-rata /total
	R	S	T	
Faktor daya	0,337	0,357	0,369	0,354
THD <sub>I</sub> (%)	42,041	43,229	41,575	42,281
THD <sub>V</sub> (%)	4,261	4,283	4,327	4,056
Q (kVA)	26,299	26,306	26,336	78,941
P (kW)	8,862	9,387	9,728	27,977
R (kVAR)	24,761	24,575	24,473	73,808
Frekuensi (Hz)	50,457			

Untuk memudahkan analisis secara keseluruhan, maka komponen  $IHD_1$  yang memiliki kandungan harmonisa yang tinggi dari hasil pengukuran dalam satuan Amper (A) dikonversikan menjadi satuan persen (%). Konversi  $IHD_1$  dari hasil pengukuran seperti terdapat pada Tabel 6.

Tabel 5. Komponen IHD<sub>1</sub> dari hasil pengukuran

F (Hz)	Orde ke-n	R (A)	S (A)	T (A)	Rata-rata (A)
50	I <sub>1</sub>	153,9	153,2	154,9	154
100	I <sub>h2</sub>	1,4	1,5	1,5	1,466
150	I <sub>h3</sub>	2,4	2,4	1,3	2,033
200	I <sub>h4</sub>	1,1	1,2	1,1	1,133
250	I <sub>h5</sub>	59	60,6	58,6	59,4
300	I <sub>h6</sub>	0,2	0,2	0,2	0,2
350	I <sub>h7</sub>	23,8	23,7	23,3	23,6
400	I <sub>h8</sub>	0,2	0,2	0,2	0,2
450	I <sub>h9</sub>	0,7	0,3	0,5	0,5
500	I <sub>h10</sub>	0,1	0,2	0,1	0,133
550	I <sub>h11</sub>	11	11,4	10,9	11,1

Tabel 6. Konversi IHD<sub>1</sub> menjadi persen (%)

Arus	R (%)	S (%)	T (%)	Rata-rata (%)
IHD <sub>1</sub>				
I <sub>h5</sub>	38,336	39,556	37,83	38,57
I <sub>h7</sub>	15,464	15,469	14,977	15,3
I <sub>h11</sub>	7,147	7,441	7,036	7,2
THD <sub>1</sub>	42,041	43,229	41,575	42,281

Pada Tabel 6 dapat dilihat bahwa, komponen IHD<sub>1</sub> orde ke-5 pada fase R sebesar 38,336% merupakan hasil konversi dari satuan Amper (A) menjadi satuan persen (%). Hasil konversi IHD<sub>1</sub> orde ke-5 pada fase R diperoleh menggunakan persamaan berikut:

$$IHD_{1 \text{ Orde}_{ke-n}}(\%) = \frac{IHD_{1 \text{ orde}_{ke-n}}(A)}{I_1} \times 100\%$$

$$I_{h5} = \frac{59,0}{153,9} \times 100\%$$

$$I_{h5} = 38,336\%$$

#### Perhitungan Rasio Hubung Singkat (SC ratio)

Besar arus hubung singkat (I<sub>sc</sub>) pada titik kopling umum (PCC) tersedia berdasarkan spesifikasi VSD tipe ACS800-07 dengan arus hubung singkat (I<sub>sc</sub>) yaitu sebesar 2620 Amper.

Berdasarkan spesifikasi yang terdapat terdapat pada Tabel 1, arus beban (I<sub>L</sub>) pada VSD tipe ACS800-07 dengan beban motor induksi tiga fase berkapasitas 160 kW, dapat dihitung menggunakan persamaan (6):

$$I_L = \frac{kW}{Pf \times \sqrt{3} \times kV} = \frac{160}{0,85 \times \sqrt{3} \times 0,38} = 285,99 \text{ Amper}$$

Sehingga rasio hubung singkat (SC ratio) dapat dihitung menggunakan persamaan (7):

$$SC_{ratio} = \frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{2620}{285,99} = 9,16$$

Rasio hubung singkat (SC ratio) pada titik kopling umum (PCC) adalah sebesar 9,16 atau kecil dari 20, sehingga berdasarkan standarisasi IEEE 519-2014 harmonisa arus yang diijinkan adalah sebesar 4%.

#### Perhitungan Total Harmonisa Arus (THD<sub>1</sub>)

Komponen individual harmonisa arus (IHD<sub>1</sub>) dari hasil pengukuran seperti yang terdapat pada Tabel 5, dari orde ke-1 sampai orde ke-11 digunakan untuk menghitung besarnya THD<sub>1</sub> pada fase R, S dan T menggunakan persamaan (3). Untuk perhitungan THD<sub>1</sub> pada fase R adalah:

$$THD_{1R} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1}$$

$$THD_{1R} = \frac{1}{I_1} \sqrt{I_{h2}^2 + I_{h3}^2 + I_{h4}^2 + I_{h5}^2 + I_{h6}^2 + I_{h7}^2 + \sqrt{I_{h8}^2 + I_{h9}^2 + I_{h10}^2 + I_{h11}^2}}$$

$$THD_{1R} = \frac{1}{153,9} \sqrt{(1,4)^2 + (2,4)^2 + (1,1)^2 + \sqrt{(59)^2 + (0,2)^2 + (23,8)^2 + (0,2)^2 + \sqrt{(0,7)^2 + (0,1)^2 + (11)^2}}$$

$$THD_{1R} = \frac{1}{153,9} \times 64,637$$

$$THD_{1R} = 0,41999 \times 100\%$$

$$THD_{1R} = 41,999\%$$

Hasil perhitungan THD<sub>1</sub> pada fase R yang diperoleh sebesar 41,999%. Dengan menggunakan persamaan yang sama diperoleh hasil perhitungan THD<sub>1</sub> pada fase S sebesar 43,168% dan pada fase T sebesar 41,342%.

Selanjutnya hasil perhitungan THD<sub>1</sub> rata-rata tiga fase diperoleh menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} & \frac{THD_{I_{rata-rata}}}{THD_{I_R} + THD_{I_S} + THD_{I_T}} \\ &= \frac{THD_{I_{rata-rata}}}{3} \\ &= \frac{41,999 + 43,168 + 41,342}{3} \\ &THD_{I_{rata-rata}} = 42,169\% \end{aligned}$$

#### Perhitungan Parameter Filter Pasif *Single Tuned*

Langkah-langkah perhitungan parameter filter pasif *single tuned* adalah sebagai berikut:

a. Koreksi faktor daya

Faktor daya yang diperoleh dari hasil pengukuran sangat rendah yaitu sebesar 0,354 seperti pada Tabel 4. Koreksi faktor daya adalah perbaikan faktor daya berdasarkan kebutuhan daya reaktif untuk memperbaiki kualitas daya pada sistem. Koreksi faktor daya dari  $\cos \varphi$  awal sebesar 0,354 (*orig*) menjadi menjadi 0,96 (*new*) dapat dihitung menggunakan persamaan (8):

$$\begin{aligned} K_{var} &= kW(\tan \theta_{orig} - \tan \theta_{new}) \\ K_{var} &= 27,977\{ \tan(\cos^{-1}(0,354)) \\ &\quad - \tan(\cos^{-1}(0,96)) \} \\ K_{var} &= 27,977\{ \tan(69,267) \\ &\quad - \tan(16,26) \} \\ K_{var} &= 27,977(2,641 - 0,291) \\ K_{var} &= 65,745 \text{ Kvar} \end{aligned}$$

b. Reaktansi kapasitor ( $X_C$ ) dihitung menggunakan persamaan (9). Besarnya kV merupakan hasil pengukuran seperti pada Tabel 4 dengan tegangan pada fasa R sebesar 384,04 Volt atau 0,384 kV, sedangkan Mvar merupakan koreksi faktor daya berdasarkan kebutuhan daya reaktif.

$$\begin{aligned} X_C &= \frac{(kV)^2}{Mvar} \\ X_C &= \frac{(0,384)^2}{0,0657} \\ X_C &= 2,244 \text{ k}\Omega \\ X_C &= 2244 \Omega \end{aligned}$$

c. Kapasitansi dari kapasitor (C) dihitung menggunakan persamaan (10). Besarnya  $f_0$  merupakan frekuensi fundamental hasil pengukuran seperti pada Tabel 4.

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

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50,457 \times 2244} \\ C &= 0,000001406 \text{ F} \\ C &= 1,406 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Besarnya komponen induktor (L) pada orde ke-5, 7 dan 11 dihitung dengan menentukan impedansi (Z) pada frekuensi resonansi, nilai arus sebesar 118,68 Amper adalah arus rata-rata dari hasil pengukuran seperti pada Tabel 4. Besarnya impedansi induktor diperoleh dengan menggunakan persamaan (15) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_F &= R \quad \text{maka, } Z_F = \frac{V_S}{I} \\ Z_5 &= \frac{V_S}{I} = \frac{384,03}{118,68} = 3,235 \Omega \\ Z_7 &= \frac{V_S}{I} = \frac{384,03}{118,68} = 3,235 \Omega \\ Z_{11} &= \frac{V_S}{I} = \frac{384,03}{118,68} = 3,235 \Omega \end{aligned}$$

d. Kemudian menentukan reaktansi induktif ( $X_L$ ) dari induktor untuk filter pasif *single tuned* untuk mereduksi harmonisa pada orde ke-5, 7 dan 11 adalah menggunakan persamaan (11):

$$\begin{aligned} X_L &= \frac{X_C}{h^2} \\ X_{L5} &= \frac{X_C}{h^2} = \frac{2244}{5^2} = 89,76 \Omega \\ X_{L7} &= \frac{X_C}{h^2} = \frac{2244}{7^2} = 45,795 \Omega \\ X_{L11} &= \frac{X_C}{h^2} = \frac{2244}{11^2} = 18,545 \Omega \end{aligned}$$

e. Menentukan induktansi (L) dari induktor untuk filter harmonisa pada orde ke-5, 7 dan 11 dengan menggunakan persamaan (12):

$$\begin{aligned} L_5 &= \frac{X_L}{2\pi f_0} = \frac{89,76}{2 \times 3,14 \times 50,457} \\ &= 0,2832 \text{ H} \\ L_7 &= \frac{X_L}{2\pi f_0} = \frac{45,795}{2 \times 3,14 \times 50,457} \\ &= 0,1445 \text{ H} \\ L_{11} &= \frac{X_L}{2\pi f_0} = \frac{18,545}{2 \times 3,14 \times 50,457} \\ &= 0,0585 \text{ H} \end{aligned}$$

- f. Menentukan reaktansi karakteristik filter pada orde tuning ( $X_n$ ) dari filter orde ke-5, 7 dan 11 adalah dengan menggunakan persamaan (13):

$$X_{n5} = h_n X_L = 5 \times 89,76 = 448,8 \Omega$$

$$X_{n7} = h_n X_L = 7 \times 45,695 = 319,865 \Omega$$

$$X_{n11} = h_n X_L = 11 \times 18,545 = 203,995 \Omega$$

- g. Menentukan tahanan (R) dari induktor untuk filter orde ke-5, 7 dan 11 adalah dengan menggunakan persamaan (14):

$$R_5 = \frac{X_n}{Q} = \frac{448,8}{80} = 5,6 \Omega$$

$$R_7 = \frac{X_n}{Q} = \frac{319,865}{80} = 3,998 \Omega$$

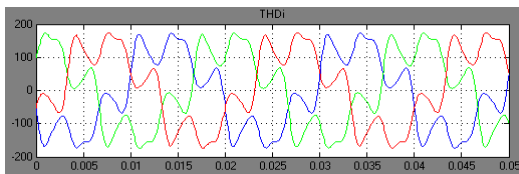
$$R_{11} = \frac{X_n}{Q} = \frac{203,995}{80} = 2,549 \Omega$$

Hasil perhitungan parameter filter pasif *single tuned* seperti pada Tabel 7.

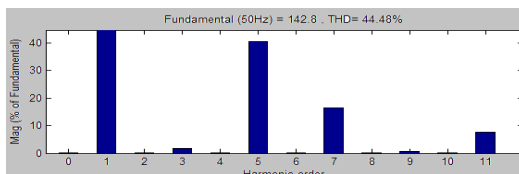
Tabel 7. Komponen C, L dan R pada filter pasif *single tuned*

Jenis filter pasif	Orde ke-n	C	L	R
<i>Single tuned</i>	5	1,406 $\mu F$	0,2832 H	5,6 $\Omega$
	7	1,406 $\mu F$	0,1445 H	3,998 $\Omega$
	11	1,406 $\mu F$	0,0585 H	2,549 $\Omega$

Hasil simulasi tanpa filter dilakukan untuk memperoleh kandungan harmonisa sesuai kondisi eksisting dan dibandingkan dengan hasil pengukuran. Hasil simulasi tanpa filter berupa gelombang arus dari blok *scope* seperti pada Gambar 15 dan spektrum arus dari blok *powergui FFT analysis* seperti pada Gambar 16.



Gambar 15. Gelombang arus simulasi tanpa filter



Gambar 16. Spektrum arus fase R simulasi tanpa filter

Hasil simulasi tanpa filter berupa komponen  $IHD_1$  dan  $THD_1$  seperti terdapat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil simulasi tanpa filter

Arus	R (%)	S (%)	T (%)	Rata-rata (%)
<b>IHD<sub>1</sub></b>	100	100	100	100
I <sub>h2</sub>	0,09	0,15	0,11	0,116
I <sub>h3</sub>	1,62	1,71	0,90	1,41
I <sub>h4</sub>	0,16	0,23	0,17	0,186
I <sub>h5</sub>	40,58	41,87	40,10	40,85
I <sub>h6</sub>	0,15	0,25	0,28	0,116
I <sub>h7</sub>	16,45	16,31	15,85	16,20
I <sub>h8</sub>	0,23	0,14	0,14	0,17
I <sub>h9</sub>	0,59	0,16	0,29	0,346
I <sub>h10</sub>	0,06	0,11	0,08	0,083
I <sub>h11</sub>	7,59	7,80	7,40	7,596
<b>THD<sub>1</sub></b>	44,48	45,64	43,76	44,626
<b>I<sub>PEAK</sub></b>	142,8	142,2	143,8	142,93
	A	A	A	A

Hasil simulasi dengan tanpa filter  $IHD_1$  hanya tersedia dalam satuan persen (%), kemudian dikonversikan menjadi satuan Amper (A) sesuai hasil pengukuran asli. Hasil konversi merupakan presentase masing-masing  $IHD_1$  terhadap arus puncak ( $I_{PEAK}$ ). Untuk hasil konversi  $IHD_1$  orde ke-1 ( $I_1$ ) fase R diperoleh dengan persamaan berikut:

$$IHD_1 (A) = IHD_1 (\%) \times I_{PEAK}$$

$$I_1 = \frac{100}{100} \times 142,8$$

$$I_1 = 142,8 \text{ Amper}$$

Sedangkan selisih (*error*) untuk  $IHD_1$  dalam satuan Amper (A) serta  $THD_1$  seperti pada Tabel 9.

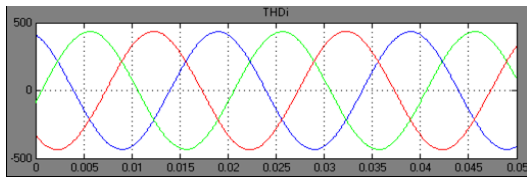
Tabel 9. Selisih (*error*) rata-rata hasil pengukuran dan simulasi tanpa filter

Arus	Hasil ukur rata-rata	Hasil simulasi tanpa filter rata-rata	Selisih ( <i>error</i> ) rata-rata
<b>IHD<sub>1</sub></b>	59,4 A	58,38 A	1,72%
I <sub>h5</sub>	23,6 A	23,14 A	1,95%
I <sub>h7</sub>	11,1 A	10,85 A	2,25%
<b>THD<sub>1</sub></b>	42,281%	44,626%	5,25%

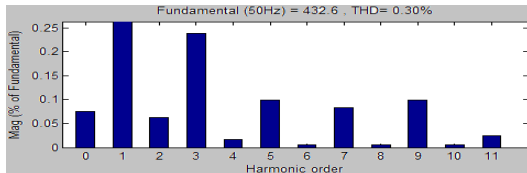
### Hasil Simulasi dengan Filter Pasif *Single Tuned*

Simulasi dengan filter pasif *single tuned* dilakukan untuk mereduksi harmonisa dari hasil pengukuran. Hasil simulasi dengan filter *single tuned*

berupa gelombang arus seperti pada Gambar 17 dan spektrum arus seperti pada Gambar 18.



Gambar 17. Gelombang arus filter pasif *single tuned*



Gambar 18. Spektrum arus fase R filter *single tuned*

Hasil simulasi dengan filter pasif *single tuned* berupa  $I_{HD1}$  dan  $THD_1$  seperti pada Tabel 10. Pada Tabel 10 dapat dilihat bahwa, filter pasif *single tuned* mampu mereduksi harmonisa baik  $I_{HD1}$  orde ke-5 ( $I_{h5}$ ), 7 ( $I_{h7}$ ) dan 11 ( $I_{h11}$ ), maupun  $THD_1$  yang ditandai dengan angka berwarna biru.

Tabel 10. Hasil simulasi filter pasif *single tuned*

Arus	R (%)	S (%)	T (%)	Rata-rata (%)
$I_{HD1}$	100	100	100	100
$I_{h2}$	0,06	0,11	0,08	0,083
$I_{h3}$	0,24	0,17	1,09	0,5
$I_{h4}$	0,02	0,04	0,03	0,03
$I_{h5}$	0,10	0,29	0,32	0,24
$I_{h6}$	0,01	0,03	0,03	0,023
$I_{h7}$	0,08	0,05	0,08	0,07
$I_{h8}$	0,01	0,02	0,02	0,016
$I_{h9}$	0,10	0,12	0,13	0,116
$I_{h10}$	0,00	0,01	0,01	0,006
$I_{h11}$	0,02	0,04	0,04	0,03
$THD_1$	0,30	0,38	1,15	0,61
$I_{PEAK}$	432,6 A	432,5 A	433 A	432,7 A

Hasil simulasi dengan filter pasif *single tuned* untuk  $I_{HD1}$  hanya tersedia dalam satuan persen (%), kemudian dikonversikan menjadi satuan Amper (A) agar dapat dibandingkan dengan hasil asli dari pengukuran. Hasil konversi merupakan presentase masing-masing  $I_{HD1}$  terhadap arus puncak ( $I_{PEAK}$ ), sehingga diperoleh hasil konversi  $I_{HD1}$  menjadi satuan Amper (A) semua orde pada setiap fase.

Untuk kinerja filter pasif *single tuned* rata-rata dalam satuan Amper (A) dalam mereduksi  $I_{HD1}$  orde ke-5 ( $I_{h5}$ ) diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Kinerja\ Filter = \frac{Hasil\ ukur - simulasi}{hasil\ ukur} \times 100\%$$

$$Kinerja\ Filter\ (I_{h5}) = \frac{59,4 - 1,023}{59,4} \times 100\%$$

$$Kinerja\ Filter\ (I_{h5}) = 98,27\%$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama diperoleh kinerja filter pasif *single tuned* rata-rata pada orde ke-7, 11 dan  $THD_1$  seperti terdapat pada Tabel 11.

Tabel 11. Kinerja filter pasif *single tuned* rata-rata

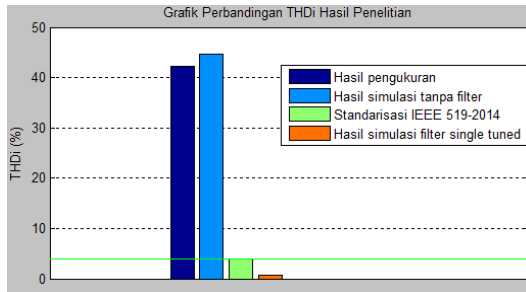
Arus	Hasil Pengukuran	Hasil simulasi filter pasif <i>single tuned</i>	Kinerja filter pasif <i>single tuned</i>
$I_{HD1}$	59,4 A	1,023 Amper	98,27%
$I_{h7}$	23,6 A	0,302 Amper	98,72%
$I_{h11}$	11,1 A	0,144 Amper	98,70%
$THD_1$	42,281%	0,61%	98,55%

Perbandingan semua harmonisa hasil penelitian berupa  $THD_1$  dan  $I_{HD1}$  seperti pada Tabel 12.

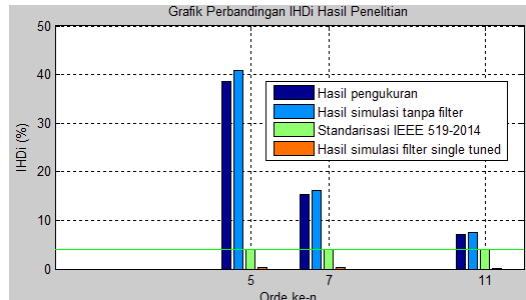
Tabel 12. Perbandingan harmonisa hasil penelitian

Harmonisa	$I_{HD1}$ orde ke-n			$THD_1$ (%)
	$I_{h5}$ (%)	$I_{h7}$ (%)	$I_{h11}$ (%)	
Pengukuran	38,57	15,3	7,2	42,281
Simulasi tanpa filter	40,85	16,20	7,596	44,626
Standarisasi IEEE 519-2014	4	4	4	4
Simulasi dengan filter <i>single tuned</i>	0,24	0,302	0,144	0,61

Berdasarkan Tabel 12 diperoleh grafik perbandingan  $THD_1$  dari hasil penelitian seperti pada Gambar 19 dan grafik  $I_{HD1}$  hasil penelitian seperti pada Gambar 20.



Gambar 19. Grafik perbandingan THDi hasil penelitian



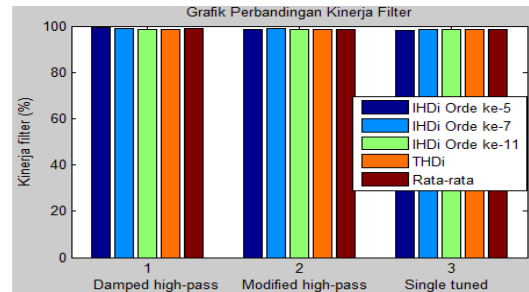
Gambar 20. Grafik perbandingan IHDi hasil penelitian

Kemudian dilakukan pengujian filter pasif jenis lain menggunakan simulasi yaitu *damped high-pass* dan *modified high-pass* dan dibandingkan dengan *single tuned*, maka diperoleh kinerja filter pasif rata-rata seperti pada Tabel 13.

Tabel 13. Perbandingan kinerja filter pasif

Jenis filter pasif	Kinerja filter pasif				Rata-rata (%)
	IHD <sub>i</sub> orde ke-n			THD <sub>i</sub> (%)	
	5 (%)	7 (%)	11 (%)		
<i>Damped high-pass</i>	99,48	98,78	98,70	98,56	98,88
<i>Modified high-pass</i>	98,37	98,78	98,70	98,57	98,69
<i>Single tuned</i>	98,27	98,72	98,70	98,55	98,56

Pada Tabel 13 dapat dilihat bahwa, kemampuan masing-masing filter dalam mereduksi harmonisa sangat baik. Jika diurutkan dari kinerja filter pasif yang terbaik yaitu *damped high-pass*, *modified high-pass* dan *single tuned* dengan kinerja rata-rata sebesar 98,88%, 98,69% dan 98,56%. Filter pasif *single tuned* dipilih karena lebih efektif, ekonomis dan lebih mudah dalam perawatannya. Berdasarkan Tabel 13 diperoleh grafik perbandingan kinerja filter pasif dalam mereduksi harmonisa seperti pada Gambar 21.



Gambar 21. Grafik perbandingan kinerja filter pasif

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh kandungan harmonisa yang tinggi yang terdapat pada sisi sumber VSD tipe ACS-800-07 dengan kecepatan motor induksi tiga fasa sebesar 1437 rpm. Kandungan harmonisa yang tinggi yaitu IHD<sub>i</sub> orde ke-5, 7 dan 11 yang masing-masing dengan rata-rata sebesar 38,7%, 15,3% dan 7,2% dan THD<sub>i</sub> sebesar 42,281%. Kandungan harmonisa tersebut melebihi batas yang diijinkan berdasarkan standarisasi IEEE 519-2014 yaitu sebesar 4%, sehingga perlu dilakukan pemasangan filter pasif *single tuned*. Filter pasif *single tuned* dirancang untuk mereduksi IHD<sub>i</sub> orde ke-5, 7 dan 11, dengan kapasitor (C) sebesar 1,406  $\mu F$ , induktor (L) masing-masing sebesar 0,283 Henry, 0,144 Henry dan 0,058 Henry dan resistor (R) masing-masing sebesar 5,6 Ohm, 3,998 Ohm, 2,549 Ohm. Sedangkan koreksi faktor daya sebesar 65,745 kVAR. Pemasangan filter pasif *single tuned* dilakukan dengan simulasi menggunakan *software MATLAB/Simulink* dengan metode simulasi sumber arus.

1. Setelah melakukan simulasi dengan filter pasif *single tuned* diperoleh IHD<sub>i</sub> orde ke-5, 7 dan 11 yang telah direduksi menjadi masing-masing sebesar 0,24%, 0,07% dan 0,03 % dan THD<sub>i</sub> menjadi sebesar 0,61% dan hasil tersebut sudah sesuai dengan standarisasi IEEE 519-2014 yaitu dibatasi sebesar 4%.
2. Pada pengujian filter pasif jenis lain dan dibandingkan dengan filter pasif *single tuned* diperoleh bahwa, kemampuan masing-masing filter dalam mereduksi harmonisa sangat baik. Jika diurutkan dari kinerja filter pasif terbaik yaitu *damped high-pass*, *modified high-pass* dan *single tuned* dengan kinerja rata-rata masing-masing sebesar 98,88%, 98,69% dan 98,56%. Filter pasif *single tuned* dipilih karena lebih efektif, ekonomis dan lebih mudah dalam perawatannya.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. A. Sinaga, H. Eteruddin, and A. Tanjung, "Pengaruh Kapasitor Terhadap Faktor Daya Motor Induksi Tiga Fasa di PT. Malindo Karya Lestari," *Jurnal Teknik*, vol. 15, no. 2, pp. 85–93, 2021.
- [2] E. P. Wibowo, E. Zondra, and U. Situmeang, "Studi Penggunaan Variable Speed Drive Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Exhaust Fan Pada Dyno Test Room PT. Trakindo Utama Pekanbaru," *Jurnal Teknik*, vol. 12, no. 2, pp. 85–96, 2018.
- [3] M. Al, A. Atmam, and E. Zondra, "Analisis Harmonisa Menggunakan Filter Pasif Pada VSD Dengan Beban Motor Electrical Submersible Pump Di PT. CPI," *Jurnal Teknik*, vol. 15, no. 1, pp. 9–17, 2021.
- [4] E. Hamzah, S. Edi, and S. David, "Analisa Pengontrolan Motor DC Sebagai Penggerak Kendaraan Listrik," *Metrik Serial Humaniora Dan Sains*, vol. 3, no. 2, pp. 53–63, 2022.
- [5] Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2000.
- [6] A. Atmam, A. Tanjung, and Z. Zulfahri, "Analisis Penggunaan Energi Listrik Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Variable Speed Drive (VSD)," *SainETIn*, vol. 2, no. 2, pp. 52–59, 2018.
- [7] M. Amir and A. I. Firdaus, "Studi Analisis Pengaruh Harmonisa akibat Penggunaan Variable Speed Drive pada Motor Induksi Tiga Fasa," *Sinusoida*, vol. XIX, no. 2, pp. 20–29, 2017.
- [8] R. Rahmadani, Atmam, and E. Zondra, "Analisis Pemasangan Filter Pasif untuk Mengurangi Harmonisa pada Transformator Rectifier di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Perawang," *SainETIn*, vol. 3, no. 2, pp. 59–68, 2019.
- [9] P. Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [10] E. Zondra, A. Tanjung, and A. Arlenny, "Pengaruh Tegangan Sumber Dan Beban Terhadap Tingkat Harmonisa Pada Motor Induksi Tiga Fasa," *SainETIn*, vol. 1, no. 1, pp. 17–24, 2016.
- [11] Mustamam, "Penggunaan Passive Filter Single Tuned untuk Mereduksi Harmonisa pada Juicer," *J. Electr. Technol.*, vol. 2, no. 3, 2017.
- [12] R. c. Dugan, M. F. McGranahan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, Second Edi. New York: McGraw-Hill, New York, 2004.
- [13] IEEE 519-2014, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York., 2014.
- [14] R. Amalia and R. Nazir, "Pemodelan dan Simulasi Beban Non-Linier 3-Fasa dengan Metoda Sumber Arus Harmonik," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 4, no. 2, pp. 165–171, 2015.