

ANALISIS HARMONISA MENGGUNAKAN *FILTER* PASIF PADA VSD DENGAN BEBAN MOTOR *ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP* DI PT. CPI

Marchtindra. Al¹, Atmam², Elvira Zondra³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning
Jl. YosSudarso Km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Email: Marchtindra@rocketmail.com, atmam@unilak.ac.id, elviraz@unilak.ac.id

ABSTRAK

Harmonisa merupakan komponen *sinusoidal* dari sebuah gelombang periodis yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari fundamental frekuensi gelombang periodis tersebut. Bila terjadi superposisi antara gelombang frekuensi dasar dengan gelombang frekuensi harmonisa maka terbentuklah gelombang yang terdistorsi sehingga bentuk gelombang tidak lagi *sinusoidal*. Adapun penyebab timbulnya harmonisa adalah beban non linier, salah satunya dari penggunaan *Variable Speed Drive* (VSD) yang berfungsi sebagai penggerak motor *Electrical Submersible Pump* (ESP) tiga fasa. Untuk mengurangi *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dan tegangan yang dihasilkan oleh VSD maka digunakanlah *filter* pasif salah satunya *filter* pasif LC yang hasilnya sesuai dengan batasan harmonisa arus dan tegangan berdasarkan IEEE standar 519-2014. Dari hasil penelitian menggunakan menggunakan *filter* pasif LC bahwa THD_I dan THD_V yang dihasilkan oleh VSD 6 pulsa untuk menggerakkan motor ESP tiga fasa di lapangan sumur minyak PT. Chevron Pasific Indonesia yang masih produksi dengan hasil pengukuran pada *input filter* LC diperoleh THD_I sebesar 93,03 % dan THD_V sebesar 37,6 % selanjutnya pada *output filter* pasif LC diperoleh THD_I sebesar 5,93 % dan THD_V sebesar 4,03 %. Untuk desain *Filter* pasif LC dari perhitungan pada orde ke 36 diperoleh nilai induktor (L) sebesar 0,000054 mH dan kapasitor (C) sebesar 0,0424 μ F, selanjutnya pada orde ke 40 diperoleh nilai induktor (L) sebesar 0,000054 mH dan kapasitor (C) sebesar 0,424 μ F.

Kata Kunci : *Variable Speed Drive* (VSD), *Filter* Pasif LC, Harmonisa.

ABSTRACT

Harmonics is a sinusoidal component of a periodic wave that has a frequency of a multiple of the fundamental frequency wave period. When superposition occurs between a basic frequency wave and a harmonic frequency wave, a distorted wave is formed so that the waveform is no longer sinusoidal. The cause of harmonic arising is non-linear load, one of which is the use of *Variable Speed Drive* (VSD) which is used as the drive for three-phase *Electrical Submersible Pump* (ESP) motor. To reduce the total Harmonic Distortion (THD) of current and voltage generated by VSD, a passive filter is used, one of which is the LC passive filter, the results are in accordance with the limits of current and voltage harmonics based on the IEEE standard 519-2014. From the results of the study using a passive LC filter that THD_I and THD_V are generated by a 6 pulse VSD to drive a three-phase ESP motor in the PT. Chevron Pacific Indonesia which is still producing with measurement results on the LC filter input obtained THD_I of 93.03 % and THD_V of 37.6 %, then on the passive LC output filter obtained THD_I of 5.93 % and THD_V of 4.03 %. For the passive filter LC design from the calculation in order 36 obtained an inductor value (L) of 0.000054 mH and a capacitor (C) of 0.0424 μ F, then in order 40 obtained an inductor value (L) of 0.000054 mH and capacitor (C) of 0.424 μ F.

Keywords: *Variable Speed Drive* (VSD), *Passive LC Filter*, Harmonic.

1. PENDAHULUAN

Electrical Submersible Pump (ESP) adalah suatu rangkaian pompa minyak yang terdiri dari motor induksi tiga fasa (*Motor*), protektor motor (*Seal*), Intake, pompa (*Pump*). Rangkaian ESP ini digerakkan oleh motor induksi tiga fasa yang

dioperasikan dibawah permukaan tanah, yang mana motor induksi ini kegunaannya sebagai penggerak utama pompa agar *impeller* dalam pompa dapat berputar dan melontarkan fluida dari dalam reservoir hingga kepermukaan tanah melalui pipa alir.

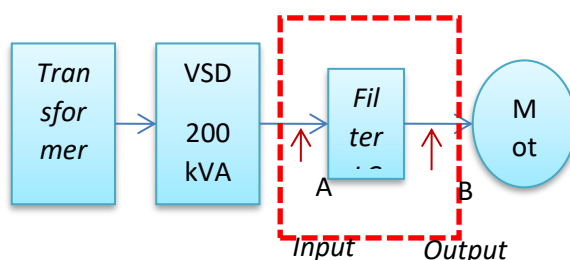
Dalam proses produksi minyak mentah ini PT. Chevron Pasific Indonesia (CPI) adalah salah satu perusahaan minyak terbesar di dunia yang beroperasi baik itu di darat (*on shore*) maupun di lepas pantai (*off shore*) yang menggunakan teknologi *Electrical Submersible Pump* (ESP), ada beberapa lokasi sumur minyak khususnya di blok Rokan yaitu MINAS *field* menggunakan *Variable Speed Drive* (VSD) sebagai pengendali atau pengontrol motor ESP agar kinerja pompa lebih optimal. VSD adalah peralatan yang menggunakan dioda sebagai penyearah untuk merubah tegangan *Alternating Current* (AC) menjadi tegangan *Direct Current* (DC) selanjutnya diubah kembali menjadi tegangan AC dan berdasarkan standard IEEE 519-2014 merupakan salah satu beban non-linier penyebab terjadinya gelombang harmonisa. Dalam penelitian ini akan dianalisa besaran *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan dan arus dengan menggunakan filter pasif LC pada *output Variable Speed Drive* (VSD) dengan beban motor *Electrical Submersible Pump* (ESP) disalah satu sumur minyak di MINAS *field* yang masih produksi.

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa metode sebagai berikut :

A. Metode pengumpulan data

Melakukan pengumpulan data-data yang diambil dari salah satu lapangan sumur minyak yang masih produksi yaitu motor *name plate* ESP 485 V / 47,4 A / 37,5 HP dan VSD *running* pada 58 Hz. Dengan melakukan pengukuran *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan dan arus disisi *input filter* pasif LC pada titik A dan disisi *output filter* pasif LC di lokasi sumur minyak MINAS 6D-41 pada titik B seperti pada Gambar 1. Blok diagram VSD dan filter pasif LC.



Gambar 1. Blok Diagram VSD dan Filter Pasif LC

B. Metode analisa data

Data-data yang diperoleh dari lokasi penelitian yang telah diukur besaran THD arus dan tegangan disisi *input* dan *output filter* pasif LC, selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan kapasitas

nilai kapasitor (C) dan nilai induktor (L) yang akan digunakan untuk mengurangi harmonisa yang dihasilkan dari penggunaan VSD.

C. Simulasi software

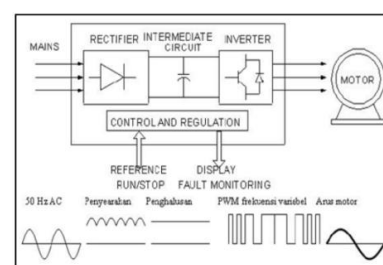
Data-data THD arus dan tegangan yang telah dianalisa, selanjutnya disimulasikan dengan menggunakan software *MATLAB/Simulink* untuk membuktikan bahwa dengan menggunakan filter pasif LC dapat mengurangi harmonisa arus dan tegangan.

Variable Speed Drive (VSD)

Alat yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor listrik *Alternating Current* (AC) dengan mengontrol frekuensi daya listrik yang disuplai ke motor disebut *Variable Speed Drive* (VSD) atau *Variable Frequency Drive* (VFD). Pada perangkat tersebut terdapat *rectifier*, *DC link*, *inverter* dan *micro controller* [1].

Variable speed drive (VSD) biasa disebut juga dengan *inverter*, yaitu suatu peralatan yang menggunakan beberapa dioda sebagai penyearah yang berfungsi untuk merubah tegangan AC menjadi tegangan DC kemudian diubah kembali menjadi tegangan AC. Desain *inverter* dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu *Current Source Inverter* (CSI), *Voltage Source Inverter* (VSI) dan *Inverter* dengan pengatur lebar pulsa/*Pulse Width Modulated* (PWM). Gelombang tegangan keluaran pada *inverter* biasanya tidak berbentuk *sinusoidal* karena masih mengandung komponen frekuensi yang tidak diinginkan yaitu seperti harmonisa. Apabila tegangan seperti ini digunakan untuk mencatu daya pada beban, seperti motor induksi maka akan menambah kerugian, getaran serta riak dalam motor [2].

Seperti pada Gambar 2. merupakan diagram rangkaian *Variable Speed Drive* (VSD) tiga fasa.



Gambar 2. Diagram Rangkaian Variable Speed Drive (VSD) Tiga Fasa [2].

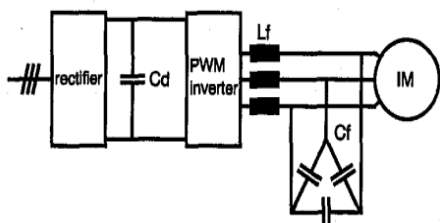
Filter Pasif

Teknik *filter* pasif adalah salah satu metode paling umum yang digunakan untuk mengontrol distorsi harmonisa dalam aplikasi industri. *Line reaktor* harus dihitung sebagai langkah pertama untuk desain *filter*. Dimana *line reaktor* memberikan

impedansi untuk mengurangi harmonisa yang dihasilkan oleh beban non-linier [3].

Prinsip kerja *filter* pasif adalah arus harmonisa dialirkan pada orde tertentu dari sumber harmonisa seperti beban non-linier yaitu melalui jaringan *filter*. Untuk memaksa arus mengalir ke jaringan *filter* pada orde tertentu maka besaran kapasitor harus ditentukan agar terjadi resonansi pada jaringan, sehingga harga impedansi pada saluran akan berkurang karena yang tinggal hanya komponen resistansi saja. Selain dapat mengurangi harmonisa, *filter* pasif juga dapat memperbaiki *power factor* [4].

Dengan menempatkan *filter* LC di antara sumber tegangan PWM *inverter* dan motor induksi, standar motor industri standar dapat digunakan juga dimanfaatkan untuk aplikasi *Variable Speed Drive* (VSD) seperti pada Gambar 3. konfigurasi *filter* LC [5].



Gambar 3. Konfigurasi *Filter* LC [5].

Berikut adalah langkah-langkah untuk menentukan nilai pada kapasitor (C) dan induktor (L) [6] :

A. Kapasitas nilai kapasitor (C)

Kapasitas kapasitor (Q_C) [5] :

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

Keterangan :

Q_C = Daya reaktif kapasitor

P = Daya aktif (kW)

pf_1 = Faktor daya sebelum diperbaiki

pf_2 = Faktor daya setelah diperbaiki

Reaktansi kapasitor (X_C) [6] :

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

Kapasitas dari kapasitor (C) [6] :

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_C} \quad (3)$$

B. Nilai kapasitas induktor (L)

Impedansi (Z) induktor [6] :

$$Z = \frac{V_S}{I} \quad (4)$$

Reaktansi induktif (X_L) dari induktor [6] :

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} \quad (5)$$

Reaktansi karakteristik (X_n) dari *filter* pada orde *tuning* [6] :

$$X_n = h_n X_L \quad (6)$$

Tahanan (R) dari induktor [6] :

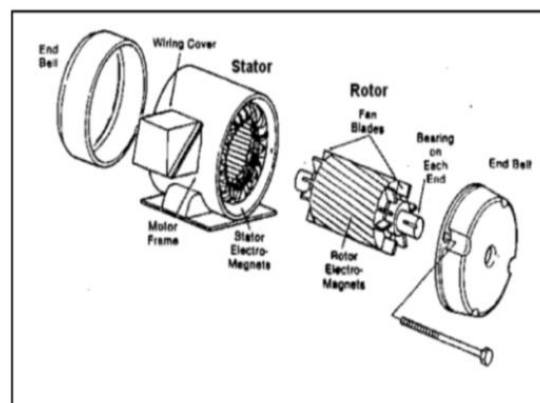
$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (7)$$

Induktansi (L) dari induktor [6] :

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 + R^2}}{2\pi f_0} \quad (8)$$

Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi adalah motor listrik *Alternating Current* (AC) yang bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator kerotornya, dimana arus rotor pada motor bukanlah diperoleh dari sumber tertentu, melainkan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif yaitu antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang diproduksi dari arus stator. Seperti pada Gambar 4. adalah motor induksi tiga fasa [2].



Gambar 4. Motor Induksi Tiga Fasa [2].

Kecepatan putaran sinkron pada motor induksi tiga fasa dapat dirumuskan seperti berikut [7] :

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (9)$$

Keterangan :

n_s = Kecepatan sinkron (rpm)

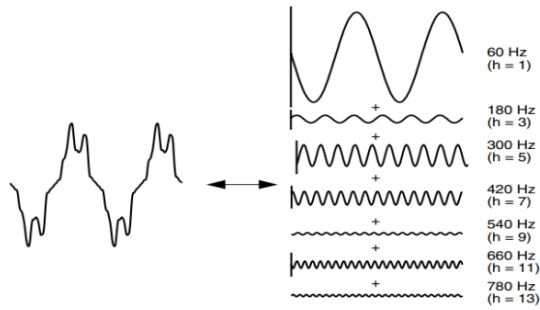
f = Frekuensi pada sumber (Hz)

P = Jumlah kutub pada motor induksi

Harmonisa

Komponen sinusoidal dari sebuah gelombang periodis yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamental gelombang periodis disebut dengan harmonisa (standar IEEE 519-1992). Bila terjadi superposisi antara gelombang frekuensi harmonisa dengan gelombang frekuensi dasar maka terbentuklah

gelombang distorsi sehingga bentuk dari gelombang tidak *sinusoidal* lagi. Pembentukan gelombang non-*sinusoidal* hasil distorsi harmonisa seperti pada Gambar 5 [8].



Gambar 5. Gelombang Hasil Distorsi Harmonisa [8].

Gelombang terdistorsi merupakan beberapa harmonisa, yang mana harmonisa pertama dikenal sebagai frekuensi dasar atau disebut juga dengan fundamental. Selanjutnya harmonisa dengan kelipatan ganjil dari frekuensi dasar disebut dengan harmonisa ganjil, kemudian harmonisa kelipatan genap dari frekuensi dasar disebut sebagai harmonisa genap. Distorsi harmonisa disebabkan karena adanya beban non-linier pada sistem tenaga. Beban non-linier merupakan salah satu jenis peralatan listrik yang dapat merubah bentuk gelombang arus dan tegangan kebentuk tertentu sehingga tidak *sinusoidal* lagi, contoh salah satunya seperti *inverter* [2].

Beban non-linier adalah salah satu sumber utama harmonisa pada suatu sistem tenaga konvensional. Pengaruh harmonisa yang ditimbulkan pada sistem satu phasa atau tiga phasa adalah terjadinya gelombang arus dan tegangan yang terdistorsi. Akibat langsung dari gelombang distorsi yang mengganggu ini yaitu meningkatnya arus yang mengalir pada netral [9].

Total Harmonic Distortion (THD) adalah untuk mengetahui besarnya pengaruh harmonisa pada sistem tenaga listrik yang didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen dasar atau fundamental, komponen tersebut terdiri dari tegangan atau arus.

THD dapat dirumuskan [10] :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (M_n^2)}}{M_1} \quad (10)$$

Keterangan :

THD = *Total Harmonic Distortion*

M_n = Nilai RMS arus atau tegangan harmonisa ke n

M_1 = Nilai RMS arus atau tegangan fundamental

Tabel 1. Batasan Harmonisa Tegangan, IEEE Standar 519-2014 [2].

Bus Voltage V at PCC	IHD _V (%)	THD _V (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	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
$V > 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

Tabel 2. Batasan Harmonisa Arus, IEEE Standar 519-2014 [2].

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics)						
I_{SC}/I_L	<11	11-16	17-22	23-34	35-49	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

$I_{Short Circuit}$ (I_{SC}) dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut [10] :

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad (11)$$

I_{Load} (I_L) dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut [10] :

$$I_L = \frac{kW}{PF \times \sqrt{3} \times kV} \quad (12)$$

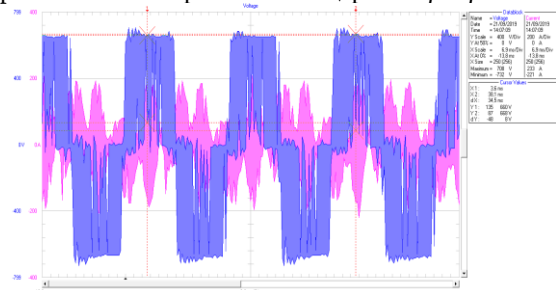
Short Circuit Ratio (SC_{ratio}) dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut [10] :

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (13)$$

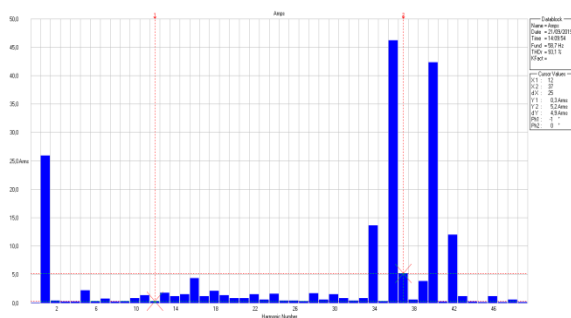
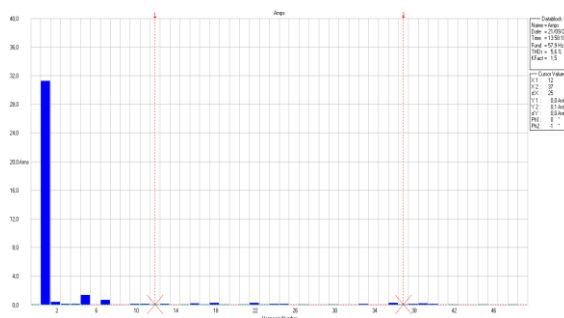
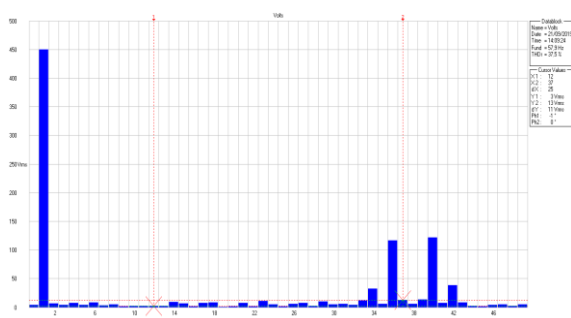
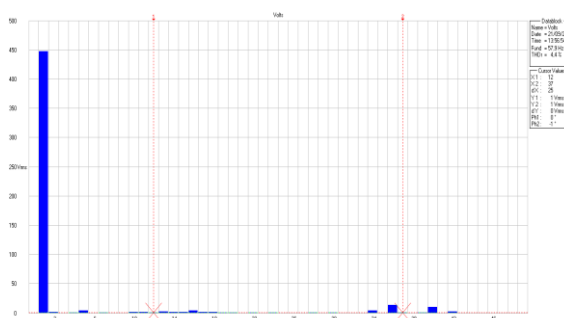
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Pengukuran pada *Input Filter LC*

Data yang diukur adalah *output Variable Speed Drive* (VSD) atau pada *input filter LC* dan Gambar 6. adalah bentuk hasil gelombang tegangan dan arus pada *input filter LC* dan seperti pada Gambar 7. spektrum THD_I pada *input filter LC* dan seperti pada Gambar 8. spektrum THD_V pada *input filter LC*.



Gambar 6. Gelombang Tegangan dan Arus pada *Input Filter LC*.

Gambar 7. Spektrum THD_I pada Input Filter LC.Gambar 10. Spektrum THD_I pada Output Filter LC.Gambar 8. Spektrum THD_V pada Input Filter LC.Gambar 11. Spektrum THD_V pada Output Filter LC.

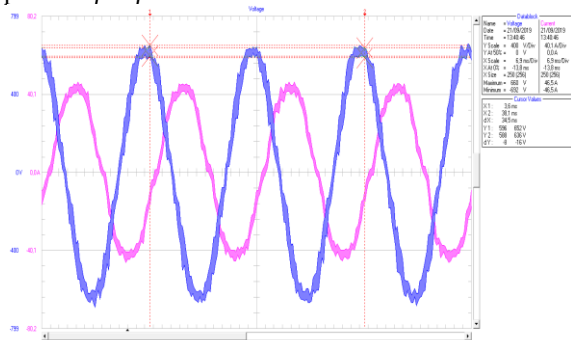
Data-data hasil pengukuran arus, tegangan dan THD pada *input filter* seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Arus, Tegangan, THD_I dan THD_V pada *Input Filter LC*.

Irms (A)	Vrms (V)	THD _I (%)	THD _V (%)
58,73	482,9	93,03	37,6

Data Pengukuran pada Output Filter LC

Data yang diukur adalah pada *output filter* LC dan Gambar 9. adalah bentuk hasil gelombang tegangan dan arus pada *output filter* LC dan seperti pada Gambar 10. Spektrum THD_I pada *output filter* LC dan seperti pada Gambar 11. Spektrum THD_V pada *output filter* LC.



Gambar 9. Gelombang Tegangan dan Arus pada Output Filter LC.

Data-data hasil pengukuran arus, tegangan dan THD pada *output filter* seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Arus, Tegangan, THD_I, THD_V pada *Output Filter LC*.

Irms (A)	Vrms (V)	THD _I (%)	THD _V (%)
30,16	447,27	5,93	4,03

Total Harmonic Distortion (THD) pada Input Filter LC

Data-data hasil pengukuran harmonisa yang diperoleh dari lokasi sumur minyak yang diukur pada *input filter* pasif LC, kemudian dilakukan perhitungan untuk membandingkan dengan data hasil pengukuran dengan alat ukur tipe Fluke 43B.

THD_I pada Input Filter LC

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 = I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_{49}^2$$

$$= 0,33^2 + 0,23^2 + 0,20^2 + \dots + 0,10^2$$

$$= 3197,63$$

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

$$= \frac{\sqrt{3197,63}}{58,73}$$

$$= \frac{56,55}{58,73}$$

$$= 0,963$$

$$= 96,3 \%$$

THD_v Pada Input Filter LC

$$\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 = V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_{49}^2$$

$$= 7,00^2 + 4,67^2 + 6,67^2 + \dots + 4,33^2$$

$$= 33157,44$$

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

$$= \frac{\sqrt{33157,44}}{482,9}$$

$$= \frac{182,09}{482,9}$$

$$= 0,377$$

$$= 37,7 \%$$

Batasan THD_i Berdasarkan Standar IEEE 519-2014

Nilai *I Short Circuit* (I_{SC}) pada *Point of Common Coupling* (PCC) berdasarkan dari data *step down transformer* dapat ditentukan sebagai berikut :

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{0,26 MVA}{0,831 kV} = 312,87 A$$

I Load (I_L) maksimum pada *step down transformer* adalah sebagai berikut :

$$I_L = \frac{kW}{PF \times \sqrt{3} \times kV} = \frac{16,37}{0,94 \times \sqrt{3} \times 0,48} = 20,96 A$$

Maka nilai *Short Circuit ratio* (SC_{ratio}) pada *Point of Common Coupling* (PCC) dapat ditentukan sebagai berikut :

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{312,87}{20,96} = 14,92 A$$

Kapasitas nilai kapasitor (C)

Melakukan perhitungan untuk kebutuhan kapasitor sebagai perbaikan $\cos \phi$, yang diasumsikan bahwa $\cos \phi$ sebelum diperbaiki 0,94% menjadi 0,99%. Untuk menghitung kapasitas kapasitor dapat menggunakan Persamaan berikut:

Ukuran kapasitas kapasitor (Q_C) :

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

$$= 16370 \{ \tan(\cos^{-1}(0,94)) - \tan(\cos^{-1}(0,99)) \}$$

$$= 16370 \{ \tan(19,95) - \tan(8,11) \}$$

$$= 16370 \{ 0,22 \}$$

$$= 3,6014 \text{ kVAR}$$

Reaktansi kapasitor (X_C) :

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C}$$

$$= \frac{482,9^2}{3,6014}$$

$$= 64750,49 \text{ Ohm}$$

$$= 64,75 \text{ k Ohm}$$

Kapasitas dari kapasitor (C) :

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

$$= \frac{1}{2 \times 3,14 \times 58 \times 64750,49}$$

$$= 0,0424 \mu F$$

Kapasitas nilai induktor (L) Orde ke 36

Impedansi (Z) induktor :

$$Z = \frac{V_S}{I} = \frac{482,9}{58,73} = 8,22 \text{ Ohm}$$

Reaktansi induktif (X_L) dari induktor :

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} = \frac{64750,49}{36^2} = 49,962 \text{ Ohm}$$

Reaktansi karakteristik dari filter pada orde *tuning* (X_n) :

$$X_n = h_n X_L = 36 \times 49,962 = 1798,632 \text{ Ohm}$$

Tahanan (R) dari induktor :

$$R = \frac{X_n}{Q} = \frac{1798,632}{100} = 17,99 \text{ Ohm}$$

Induktansi (L) dari induktor :

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 + R^2}}{2\pi f_0} = \frac{\sqrt{8,22^2 + 17,99^2}}{2 \times 3,14 \times 58} = 0,054 \text{ H}$$

Kapasitas nilai induktor (L) Orde ke 40

Impedansi (Z) induktor :

$$Z = \frac{V_S}{I} = \frac{482,9}{58,73} = 8,22 \text{ Ohm}$$

Reaktansi induktif (X_L) dari induktor :

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} = \frac{64750,49}{40^2} = 40,469 \text{ Ohm}$$

Reaktansi karakteristik dari filter pada orde *tuning* (X_n) :

$$X_n = h_n X_L = 40 \times 40,469 = 1618,76 \text{ Ohm}$$

Tahanan (R) dari induktor :

$$R = \frac{X_n}{Q} = \frac{1618,76}{100} = 16,19 \text{ Ohm}$$

Induktansi (L) dari induktor :

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 + R^2}}{2\pi f_0} = \frac{\sqrt{8,22^2 + 16,19^2}}{2 \times 3,14 \times 58} = 0,054 \text{ H}$$

Tabel 5. Desain *Filter LC* pada Orde ke-36 dan 40.

Jenis Filter	Orde	C	L
LC	36	0,0424 μF	0,000054 mH
	40	0,0424 μF	0,000054 mH

Data-data hasil pengukuran daya, power faktor, arus, tegangan dan THD pada *input* dan *output filter* pasif LC seperti pada Tabel 6.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Pengukuran Arus, Tegangan dan THD.

Kondisi	I _{rms} (A)	V _{rms} (V)	THD _i (%)	THD _v (%)
Input Filter LC	58,73	482,9	93,03	37,6
Output Filter LC	30,16	447,27	5,93	4,03

Total Harmonic Distortion (THD) pada Output Filter LC

Data-data hasil pengukuran harmonisa yang diperoleh dari lokasi sumur minyak yang diukur pada *output filter* pasif LC, kemudian dilakukan perhitungan untuk membandingkan dengan data hasil pengukuran dengan alat ukur tipe Fluke 43B.

THD_i pada Output Filter LC

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 = I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_{49}^2$$

$$= 0,43^2 + 0,27^2 + 0,10^2 + \dots + 0,00^2$$

$$= 3,10$$

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

$$= \frac{\sqrt{3,10}}{30,16}$$

$$= \frac{1,76}{30,16}$$

$$= 0,058$$

$$= 5,8 \%$$

THD_v pada Output Filter LC

$$\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 = V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_{49}^2$$

$$= 1,67^2 + 0,00^2 + 0,67^2 + \dots + 0,00^2$$

$$= 322,33$$

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

$$= \frac{\sqrt{322,33}}{447,27}$$

$$= \frac{17,95}{447,27}$$

$$= 0,040$$

$$= 4 \%$$

Data-data persentase *Error* antara perbandingan hasil pengukuran dan perhitungan

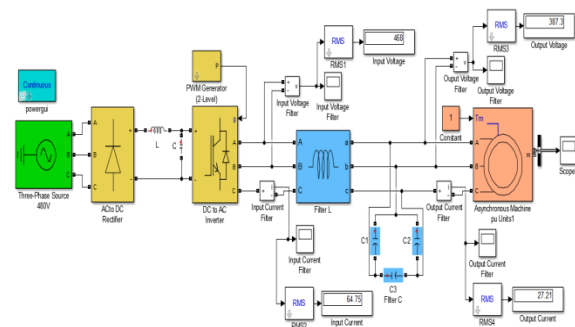
THD_i dan THD_v pada *input* dan *output filter* LC seperti pada Tabel 8.

Tabel 8. Data Pesentase *Error* Antara Data Hasil Pengukuran dan Data Hasil Perhitungan THD pada *Input* dan *Output Filter* Pasif LC.

Data	Input Filter LC		Output Filter LC	
	THD _i (%)	THD _v (%)	THD _i (%)	THD _v (%)
Hasil Pengukuran	93,03	37,06	5,9	4,03
Hasil Perhitungan	96,3	37,7	5,8	4
Error	3,39	1,69	1,69	0,74

Simulasi Variable Speed Drive (VSD) Menggunakan Software MATLAB/Simulink

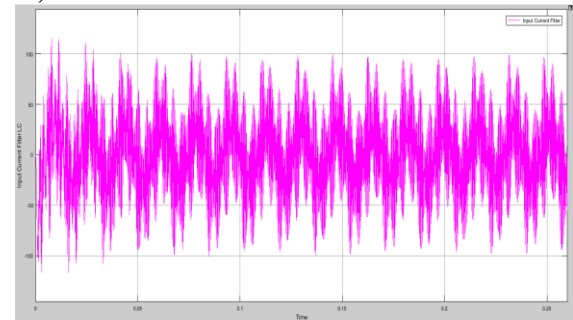
Untuk menganalisa besaran *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dan tegangan pada *input* dan *output filter* pasif LC berdasarkan data pada Tabel 7. dengan menggunakan aplikasi *MATLAB/Simulink* seperti pada Gambar 12.



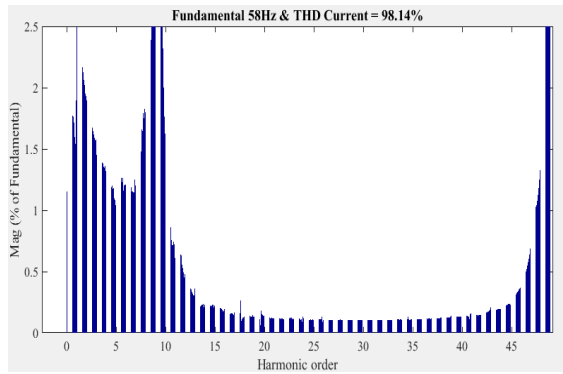
Gambar 12. Simulasi Variabel Speed Drive (VSD) dengan menggunakan Filter Pasif LC

Hasil Simulasi pada Input Filter Pasif LC

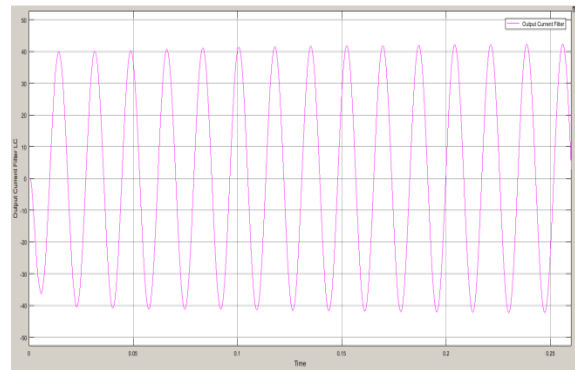
Seperti pada Gambar 13. merupakan bentuk gelombang arus pada *input filter* pasif LC atau *output* dari *Variable Speed Drive* (VSD) dan seperti pada Gambar 14. merupakan bentuk spektrum harmonisa tegangan pada *input filter* pasif dengan besaran THD_i 98,14 %.



Gambar 13. Simulasi Gelombang Arus pada Input Filter Pasif LC.

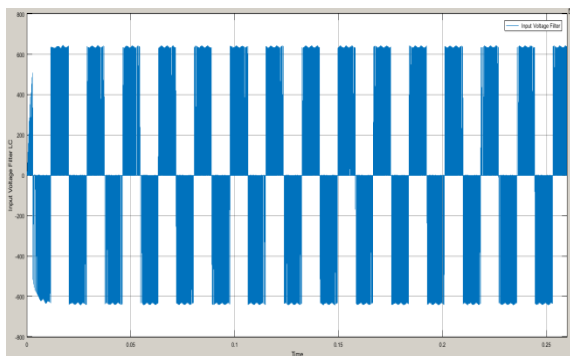


Gambar 14. Simulasi Spektrum THD_i 98,14 % pada Input Filter LC.

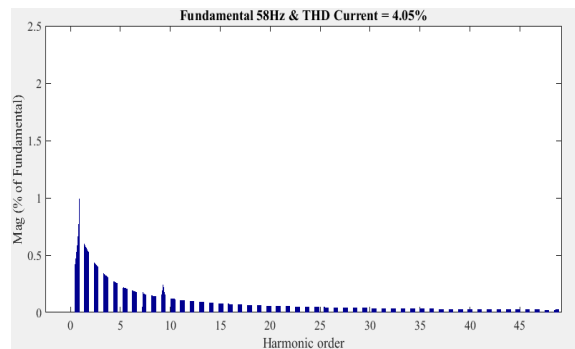


Gambar 17. Simulasi Gelombang Arus pada Output Filter LC.

Seperti pada Gambar 15. merupakan bentuk gelombang tegangan pada *input filter* pasif LC atau *output* dari *Variable Speed Drive* (VSD) dan seperti pada Gambar 16. merupakan bentuk spektrum harmonisa tegangan pada *input filter* pasif dengan besaran THD_v 26,67 %.

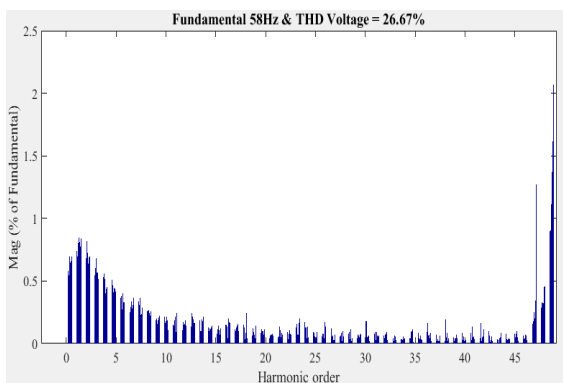


Gambar 15. Simulasi Gelombang Tegangan pada Input Filter LC

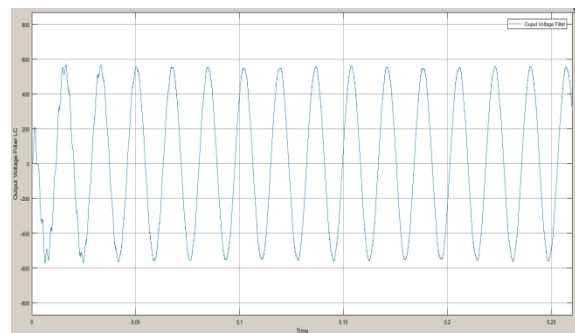


Gambar 18. Simulasi Spektrum THD_i 4,05 % pada Output Filter LC.

Seperti pada Gambar 19. merupakan bentuk gelombang tegangan pada *Output filter* pasif LC dan seperti pada Gambar 20. merupakan bentuk spektrum harmonisa tegangan pada *Output filter* pasif LC dengan besaran THD_v 6,71 %.



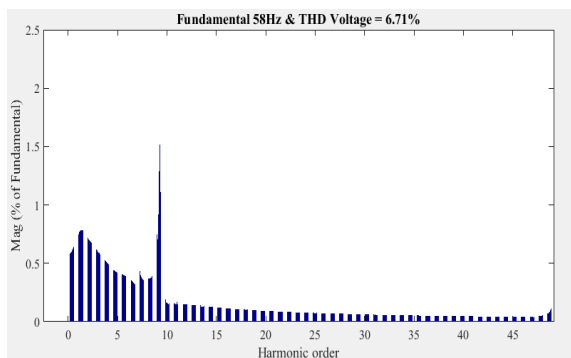
Gambar 16. Simulasi Spektrum THD_v 26,67 % pada Input Filter LC.



Gambar 19. Simulasi Gelombang Tegangan pada Output Filter LC.

Hasil Simulasi pada Output Filter Pasif LC

Seperti pada Gambar 17. merupakan bentuk gelombang arus pada *Output filter* pasif LC dan seperti pada Gambar 18. merupakan bentuk spektrum harmonisa arus pada *Output filter* pasif LC dengan besaran THD_i 4,05 %.



Gambar 20. Simulasi Spektrum THD_v 6,71% pada Output Filter LC.

Tabel 9. Data Persentase Error Antara Data Hasil Pengukuran dan Data Hasil Simulasi THD pada Input dan Output Filter Pasif LC.

Data	Input Filter LC		Output Filter LC	
	THD _i (%)	THD _v (%)	THD _i (%)	THD _v (%)
Hasil Pengukuran	93,03	37,06	5,9	4,03
Hasil Simulasi	98,14	26,67	4,05	6,71
Error	5,2	28,03	31,35	39,94

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan di lapangan sumur minyak MINAS *field* diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Besarnya THD_i dan THD_v yang dihasilkan oleh *Variable Speed Drive* (VSD) 6 pulsa untuk menggerakkan motor *Electrical Submersible Pump* (ESP) induksi tiga fasa di lapangan sumur minyak PT. Chevron Pasific Indonesia yang masih produksi dengan hasil pengukuran pada *input filter* LC diperoleh THD_i sebesar 93,03 % dan THD_v sebesar 37,6 % selanjutnya pada *output filter* pasif LC diperoleh THD_i sebesar 5,93 % dan THD_v sebesar 4,03 % dan telah memenuhi batas harmonisa berdasarkan standar IEEE 519-2014.
2. Filter pasif LC dari perhitungan pada orde ke 36 diperoleh nilai induktor (L) sebesar 0,000054 mH dan kapasitor (C) sebesar 0,0424 μ F, sedangkan pada orde ke 40 diperoleh nilai induktor (L) sebesar 0,000054 mH dan kapasitor (C) sebesar 0,424 μ F.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Atmam, A. Tanjung, dan Zulfahri, "Analisis Penggunaan Energi Listrik Motor Induksi," *SainETIn*, vol. 2, no. 2, hal. 52–59, 2018.
- [2] M. Amir dan A. I. Firdaus, "Variable Speed Drive Pada Motor Induksi Tiga Fasa," *Sinusoida*, vol. XIX, no. 2, hal. 20–29, 2017.
- [3] H. M. Umran, "Parameters Identification Of A 3 - Phase LC Filter Used For Variable Frequency Drive," *Kufa Journal of Engineering.*, vol. 6, no. 2, hal. 76–89, 2015.
- [4] Mustamam, "Penggunaan Passive Filter Single Tuned untuk Mereduksi Harmonisa pada Juicer," *Journal Electrical.*, vol. 2, no. 3, hal. 54–60, 2017.
- [5] J. K. Steinke, "Used Of an LC Filter To Achieve a Motor-Friendly Performance Of The PWM Voltage Source Inverter," *IEEE Transactions on Energy Conversion.*, vol. 14, no. 3, hal. 649–654, 1999.
- [6] A. R. Lubis, "Efektivitas Penggunaan Filter Pasif LC dalam Mengurangi Harmonik Arus," *Journal Electrical Technology.*, vol. 2, no. 3, hal. 1–8, 2017.
- [7] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals, Fourth Edition*. New York : McGraw-Hill, 2005.
- [8] H. Prasetijo, "Analisa Perancangan Filter Pasif Untuk Meredam Harmonik Pada Instalasi Beban NonLinier," *Techno*, vol. 13, no. 1, hal. 57–67, 2012.
- [9] E. Zondra, A. Tanjung, dan Arlenny, "Pengaruh Tegangan Sumber dan Beban Terhadap Tingkat Harmonisa Pada Motor Induksi Tiga Fasa," *SainETIn*, vol. 1, no. 1, hal. 17–24, 2016.
- [10] R. C. Dugan, Mark F. McGranaghan, S. Santoso, dan H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality, Second Edition*. New York : McGraw-Hill, 2004.