

ANALISIS PEMASANGAN FILTER PASIF UNTUK MENGURANGI HARMONIA PADA TRANSFORMATOR RECTIFIER DI PT. INDAH KIAT PULP AND PAPER PERAWANG

Rido Rahmadani¹, Atmam², Elvira Zondra³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning
Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324
Email: ridho.ramadhan007@gmail.com, atmam@unilak.ac.id, elviraz@unilak.ac.id

ABSTRAK

Proses klor-alkali merupakan proses elektrolisis yang berperan penting dalam industri kimia seperti industri pembuatan bubur kertas (*pulp industry*). Proses elektrolisis ini membutuhkan rangkaian arus searah (*Direct Current*) dengan arus yang besar dan tegangan yang rendah. Dalam proses elektrolisis ini digunakan *rectifier* 12 pulsa terkontrol tiga phasa yang terhubung dengan *multi winding* transformator yang akan menimbulkan distorsi harmonik pada sisi sumber transformator dan menurunkan kualitas daya pada sistem. Untuk mengatasi masalah harmonik yang terjadi pada sistem, dilakukan analisis pemasangan peralatan berupa *filter* pasif jenis *single tuned*. Pemasangan *filter* pasif ini dapat mengurangi distorsi harmonik arus dan tegangan serta meningkatkan faktor daya ($\cos \phi$). Dari hasil simulasi *harmonic analysis* menggunakan *software* ETAP, setelah dilakukan pemasangan *filter* harmonik orde ke-11,13 dan 23 maka nilai harmonik arus (THD_I) dan harmonik tegangan (THD_V) terjadi penurunan yaitu sebelum pemasangan *filter* nilai THD_I adalah 6,5%, setelah pemasangan *filter* nilai THD_I menjadi 0,98%, terjadi penurunan THD_I sebesar 5,52% dan nilai harmonik tegangan (THD_V) sebelum pemasangan *filter* adalah 1,48%, setelah pemasangan *filter* nilai THD_V menjadi 0,26%, terjadi penurunan THD_V sebesar 1,22%. Dari hasil simulasi aliran daya (*load flow analysis*), setelah dilakukan pemasangan *filter* terjadi peningkatan nilai faktor daya ($\cos \phi$) yaitu sebelum pemasangan *filter* nilai faktor daya ($\cos \phi$) adalah 0,8 setelah setelah pemasangan *filter* nilai faktor daya ($\cos \phi$) menjadi 0,96 terjadi peningkatan faktor daya sebesar 16%.

Kata Kunci: *filter* harmonik, *single tuned filter*, faktor daya, transformator *rectifier*

ABSTRACT

*The chlor-alkali process is an electrolysis process which plays an important role in the chemical industry such as the pulp industry. The process produces a product in the form of H₂ gas, Cl₂ gas and NaOH (where the source of chloride ion used is NaCl). This electrolysis process requires a direct current with a large current and a low voltage. In this electrolysis process a three phase controlled 12 pulse rectifiers are used which are connected with multi-winding transformers. In the rectifiers process there will be harmonic distortion on the source side of the transformer which can reduce the power quality of the system. To overcome the harmonic problems that occur in the system, an installation analysis of the equipment in the form of a passive single tuned filter is aimed at reducing harmonic distortion of current and voltage and increasing the power factor ($\cos \phi$). From the result of harmonic analysis using ETAP software, after the installation of harmonic filters orde 11, 13 and 23, the harmonic current value (THD_I) and harmonic voltage (THD_V) has decreased, namely, before the filter installation, THD_I value is 6,5% whereas after installation of filters, THD_I value becomes 0,98%, thus there is a THD_I decrease of 5,52%. Furthermore, for the voltage harmonic value (THD_V) before filter installation is 1,48% while after filtering, THD_V value becomes 0,26%, thus there is a THD_V decrease of 1,22%. From the results of the simulation of the flow of power (*load flow analysis*), after installation of filters there is an increase in the value of the power factor ($\cos \phi$). Namely, before the filter installation, the value of power factor ($\cos \phi$) is 0,8 while after the filter installation the value of the power factor ($\cos \phi$) to 0,96, thus an increase in the power factor ($\cos \phi$) of 16%.*

Keywords : *harmonic filter*, *single tuned filter*, *power factor*, *transformer rectifier*

1. PENDAHULUAN

Elektrolisis pada industri kimia adalah peristiwa penguraian elektrolit oleh arus listrik

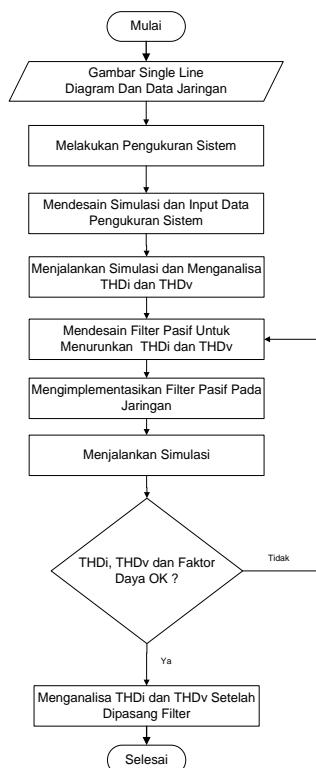
(proses yang merubah energi listrik menjadi energi kimia) menggunakan peralatan elektronika daya skala besar seperti *rectifier* 12 pulsa untuk menghasilkan arus searah yang besar. Dimana dalam

proses penyearah tersebut digunakan komponen aktif *thyristor* yang akan menimbulkan distorsi harmonik pada sisi sumber transformator yang dapat menurunkan kualitas daya pada sistem.

Distorsi harmonik terutama harmonik arus merupakan salah satu permasalahan kualitas daya listrik yang cukup memiliki pengaruh besar terhadap kinerja sistem tenaga listrik di PT. Indah Kiat *Pulp and Paper* Perawang khususnya pada *chemical plant*. Permasalahan ini selain dapat merusak dan memperpendek umur peralatan juga menyebabkan terjadinya pemborosan energi seperti daya, penurunan kualitas faktor daya ($\cos \phi$), tegangan dan arus yang menyimpang dari kondisi idealnya. *Chemical Plant* unit 10 (CM-10) di PT. IKPP Perawang merupakan salah satu lokasi untuk mengolah larutan natrium klorida (NaCl) menjadi natrium hidroksida (NaOH) melalui proses elektrolisis dengan menggunakan transformator yang terhubung pada *rectifier* 12 pulsa.

2. METODE PENELITIAN

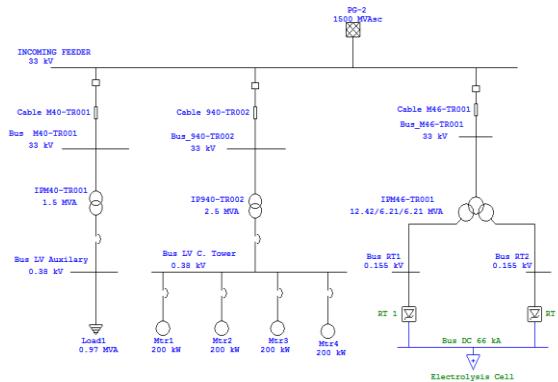
Berikut merupakan tahapan atau langkah-langkah penelitian dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) yang akan dilakukan dalam mengamati dan merancang *filter* harmonik yang akan dipasang pada jaringan sistem kelistrikan transformator *rectifier* di unit CM-10 PT. Indah Kiat Perawang seperti pada Gambar 1 berikut :



Gambar 1. *Flowchart* penelitian

Sistem Kelistrikan *Chemical Plant* Unit 10 (CM-10) Di PT.IKPP Perawang

Sistem kelistrikan pada unit CM-10 di PT. IKPP Perawang disuplai oleh *steam turbine generator* dari unit *Power Generating* 2 (PG-2) yang sudah terhubung interkoneksi seperti pada gambar berikut :



Gambar 2. *Single line diagram* pada sistem kelistrikan unit CM-10 PT. IKPP Perawang

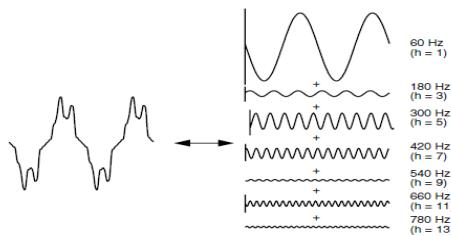
Transformator *Rectifier*

Transformator *rectifier* digunakan dalam aplikasi di mana tegangan skunder divariasikan dalam rentang yang luas pada nilai arus yang konstan. Sangat sulit dan tidak ekonomis untuk memasang *tap changer* pada gulungan skunder karena jumlah lilitannya yang sangat rendah dan nilai arus yang sangat tinggi. *Tap changer* hanya bisa dipasang pada lilitan *primer* atau dengan menggunakan transformator dengan pengaturan terpisah (*autotransformer*) [1].

Transformator *rectifier* mengalami dampak harmonik akibat gelombang arus yang *non-sinusoidal*. Oleh karena itu, terkadang jumlah pulsa ditentukan berdasarkan pertimbangan yang diakibatkan oleh harmonik, sehingga untuk transformator penyearah dibutuhkan perhitungan rugi-rugi yang lebih rumit jika dibandingkan dengan transformator konvensional [2].

Harmonik

Harmonik atau yang biasa disebut harmonisa merupakan komponen sinusoidal dari sebuah gelombang periodik yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari *fundamental* frekuensi gelombang periodik tersebut [3]. Kemunculan harmonik merupakan suatu fenomena yang timbul akibat pengoperasian beban listrik *nonlinear*, yang merupakan sumber terbentuknya gelombang frekuensi tinggi (kelipatan dari frekuensi *fundamental*), distorsi harmonik dapat menimbulkan efek berbeda-beda yang terhubung dengan jaringan listrik terutama karekteristik beban listrik itu sendiri. Bentuk gelombang dari distorsi harmonik seperti pada Gambar 3 berikut :



Gambar 3. Gelombang distorsi harmonik [4]

Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) digunakan untuk mendefinisikan efek harmonik pada tegangan sistem tenaga seperti sistem tegangan rendah, tegangan menengah, dan tegangan tinggi yang dinyatakan sebagai persen dari *fundamental* yang dapat dinyatakan dengan persamaan (1) berikut [5]:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

Nilai THD untuk gelombang arus dinyatakan dengan persamaan (2) berikut [5] :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan :

THD_V = *Total Harmonic Distortion* tegangan(%)

V₁ = Tegangan *fundamental* (V)

V_h = Tegangan harmonik ke-h (V)

THD_I = *Total Harmonic Distortion* arus (%)

I₁ = Arus *fundamental* (A)

I_h = Arus harmonik ke-h (A)

h = Bilangan orde harmonik

Beban Nonlinear

Harmonik akan disebabkan dengan adanya arus beban *nonlinear* yang impedansnya tidak konstan dalam setiap periode, beban *nonlinear* adalah beban di mana bentuk gelombang arus tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan masukan. Sehingga nanti beban-beban *nonlinear* tidak mematuhi dan mengikuti hukum ohm yang menetapkan arus berbanding lurus dengan tegangan yang dihasilkan [5].

Standar Harmonik IEEE 519-1992

Harmonik juga memiliki batasan yang akan ditentukan dengan perbandingan arus hubung singkat pada PCC (*Point of Common Coupling*), dan arus beban (I_L) biasa disebut arus beban *fundamental*. Batasan standar harmonik arus dan tegangan yang digunakan adalah standar IEEE 519-1992 sebagai parameter batasan yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2 berikut [3]:

Tabel 1. Batasan distorsi tegangan

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and Below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

(Sumber: Standar IEEE 519-1992).

Tabel 2. Batasan distorsi arus

Isc / I _L	Maximum Harmonic Current Distortion in % of I _L					
	<11	11-16	17-23	24-34	>34	% THD
<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

(Sumber: Standar IEEE 519-1992).

Tujuan dari batasan distorsi harmonik adalah untuk membatasi frekuensi tegangan individu harmonik maksimum menjadi 3% dari *fundamental* dan THD_V hingga 5% untuk sistem tanpa resonansi paralel utama. Menurut IEEE Standard 519-1992, untuk mengetahui standar batas maksimum THD_I pada jaringan kelistrikan, maka harus diketahui terlebih dahulu rasio hubung singkat (SC_{ratio}) agar dapat menghitung batas maksimum THD_I. Nilai hubung singkat (SC_{ratio}) akan dapat ditentukan dengan dengan persamaan berikut [4]:

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (3)$$

$$I_{SC} = \frac{100 \times MVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad (4)$$

$$I_L = \frac{kW}{Pf \times \sqrt{3} \times kV} \quad (5)$$

Keterangan :

SC_{ratio} = Rasio hubung singkat

I_{SC} = Arus hubung singkat maksimum pada PCC (A)

I_L = Arus beban maksimum (A)

kW = Total daya aktif (Watt)

Pf = Faktor daya sistem

Pengaruh yang Ditimbulkan Oleh Harmonik

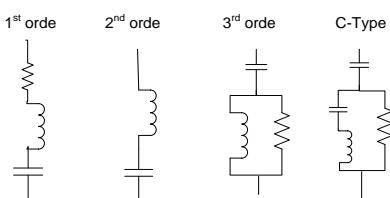
Arus harmonik yang dihasilkan oleh beban *nonlinear* disuntikkan kembali ke dalam sumber sistem. Arus ini dapat berinteraksi secara negatif dengan berbagai peralatan sistem tenaga listrik, terutama kapasitor, transformator, dan motor, sehingga menyebabkan rugi-rugi tambahan seperti

peralatan listrik menjadi terlalu panas, dan kelebihan beban.

Filter Harmonik Pasif

Filter pasif merupakan rangkaian yang tersusun dari komponen pasif seperti induktor, kapasitor, dan resistor. Filter pasif ini mempunyai beberapa bentuk berdasarkan susunan rangkaian komponen penyusun seperti pada Gambar 4. Secara umum filter pasif dapat dibedakan dalam tiga jenis :

- Filter dengan penalaan tunggal (*Single Tuned Shunt Filter*).
- Filter dengan penalaan ganda (*Double Tuned Filter*).
- High Pass Damp Filter Type*.



Gambar 4. Jenis filter pasif berdasarkan susunan rangkaian komponen [5]

Dengan penambahan filter harmonik pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber harmonik, maka penyebaran arus harmonik keseluruhan sistem dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu, filter harmonik pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem. Filter pasif menyediakan impedansi yang sangat rendah pada frekuensi *tuning*, di mana semua arus frekuensi tertentu akan dialihkan. Semua arus harmonik yang frekuensinya bertepatan dengan frekuensi yang diatur pada filter akan menemukan jalur impedansi rendah melalui filter. Frekuensi resonansi dari filter pasif ini dapat dihitung dengan persamaan (6) berikut [5] :

$$f_0 = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{(L \times C)}} \quad (6)$$

Keterangan :

- f_0 = Frekuensi resonansi (Hz)
 L = Induktansi filter (H)
 C = Kapasitansi filter (F)

Faktor kualitas (Q_f) dari filter adalah rasio antara reaktansi induktif atau kapasitif terhadap resonansi dan resistansi. Nilai-nilai khas Q_f berfluktuasi antara 15 sampai 80 untuk filter yang digunakan dalam industri. Persamaan (7) berikut digunakan untuk menghitung faktor kualitas [5] :

$$Q_f = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} \quad (7)$$

Keterangan :

- Q_f = Faktor kualitas
 X_L = Reaktansi induktif pada reaktor filter (Ω)
 X_C = Reaktansi kapasitif pada kapasitor filter (Ω)
 R = Resistansi filter (Ω)

Perhitungan Spesifikasi Single Tuned Filter

Langkah-langkah untuk mengatur filter harmonik menggunakan hubungan dasar dapat diuraikan sebagai berikut [5]:

- Hitung nilai kapasitansi yang dibutuhkan untuk meningkatkan faktor daya. Kompensasi faktor daya umumnya digunakan untuk meningkatkan faktor daya menjadi 0,95 atau lebih.
- Pilih reaktor untuk mengatur kapasitor seri ke frekuensi harmonik yang diinginkan.
- Hitung tegangan puncak pada terminal kapasitor dan arus reaktor rms.
- Pilih standar komponen untuk filter dan verifikasi kinerja filter untuk memastikan bahwa komponen kapasitor akan beroperasi dalam batas yang direkomendasikan IEEE-18.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Titik pengukuran harmonik dalam penelitian ini adalah pada sisi tegangan *input* 33kV transformator *rectifier* melalui peralatan *Potensial Transformer* (PT) dan *Current Transformer* (CT). Spesifikasi *main bus* sistem, transformator dan *rectifier* dengan nomor *function location* IPM46-TR001 seperti pada Tabel 3,4, dan 5 berikut :

Tabel 3. Spesifikasi data sistem *Main Bus* 33 kV

Spesifikasi	Kapasitas
Frekuensi (Hz)	50
Jumlah Phasa	3
Tegangan (V)	33.000
Arus (A)	1.200
Daya Short Circuit Maksimum (MVA)	1.500

(Sumber : PT. IKPP Perawang).

Tabel 4. Spesifikasi transformator IPM46-TR001

Spesifikasi	Tegangan AC	Tegangan DC
Kapasitas Daya (KVA)	12.420	2 x 2 x 2 x 2272
Jumlah Phasa	3	2 x 2 x 2 x 3
Tegangan (V)	33.000	159
Arus (A)	217	4.763
Frekuensi (Hz)		50
Impedansi Tegangan (%)	6,46 (12.420 kVA Base)	
Kapasitas Isolasi Minyak (L)		17.800
Berat Total (Kg)		54.000
Jenis Pendingin		OFWF
Nomor Seri		A1U69115T1
Tahun Pembuatan		1996
Merk		Fuji Electric

(Sumber : PT. IKPP Perawang)

Tabel 5. Spesifikasi *rectifier*

Spesifikasi	Kapasitas
Kapasitas Daya (kW)	10.362
Tegangan (Vdc)	157
Arus (Adc)	66.000
Frekuensi (Hz)	50
Tegangan Uji Frekuensi Rendah (kV)	2
Faktor pengontrolan (%)	8,65
Berat Total (Kg)	10.000
Jenis Pendingin	AFWF
Berat Peralatan Pendingin (Kg)	1.900
Kapasitas Air pendingin (L)	440
Merk	Fuji Electric

(Sumber : PT. IKPP Perawang)

Data Hasil Pengukuran

Data pengukuran THD arus, THD tegangan dan beban hasil pengukuran menggunakan alat ukur EMPATH 2000 seperti pada Tabel 6 berikut :

Tabel 6. Nilai pengukuran THD dan persentase beban

Frekuensi Sistem (Hz)	49,38
THD _I (%)	6,155
THD _V (%)	2,433
Beban (%)	75,1

Nilai konsumsi energi listrik dan kualitas daya hasil pengukuran adalah seperti pada Tabel 7 berikut :

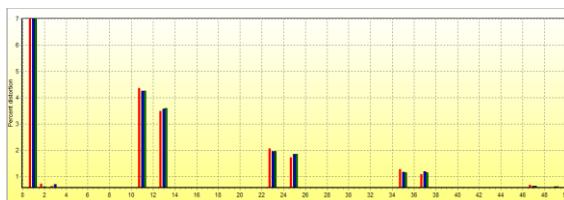
Tabel 7. Nilai pengukuran konsumsi energi dan kualitas daya

Phasa	R	S	T	Total
Faktor Daya (Cos φ)	0,81	0,813	0,801	0,808
Daya Aktif (kW)	2.585,6	2.647,4	2.549,7	7.782,7
Daya Reaktif (kVAR)	1.873,2	1.897,8	1.907,4	5.678,4
Daya Semu (kVA)	3.192,8	3.257,3	3.184,2	9.634,4
RMS Arus (A)	167,7	170,7	167,7	168,7
RMS Tegangan (V)	33.039	32.986	32.901	32.975

Bentuk gelombang dan spektrum arus dari hasil pengukuran seperti pada Gambar 5 dan 6 berikut :

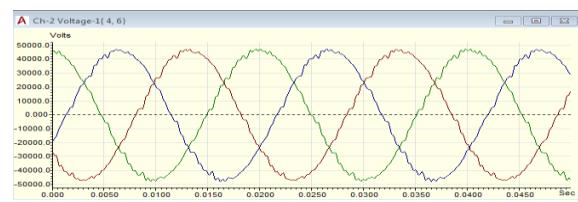


Gambar 5. Gelombang arus pada sisi input transformator rectifier

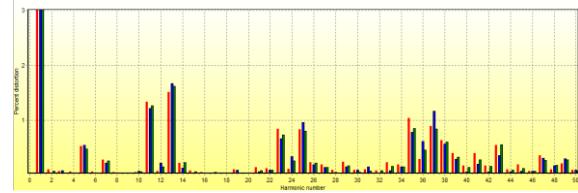


Gambar 6. Spektrum harmonik arus pada sisi input transformator rectifier

Bentuk gelombang dan spektrum tegangan dari hasil pengukuran seperti pada Gambar 7 dan 8 berikut :



Gambar 7. Gelombang tegangan sisi input transformator rectifier



Gambar 8. Spektrum harmonik tegangan sisi input transformator rectifier

Penilaian THD Arus Berdasarkan Standar IEEE 519-1992

Perhitungan nilai arus hubung singkat (I_{SC}) pada *Point of Common Coupling* (PCC) berdasarkan data spesifikasi pada Tabel 3, dan dengan menggunakan persamaan (4) maka nilai arus hubung singkat maksimum pada PCC adalah :

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{1000 \times 1500}{\sqrt{3} \times 33} = 26.243,194 \text{ A}$$

Arus beban (I_L) pada sisi sumber transformator rectifier pada kondisi beban rata-rata 75% adalah :

$$I_L = \frac{kW}{Pf \times \sqrt{3} \times kV} = \frac{7.782,7}{0,8 \times \sqrt{3} \times 33} = 170 \text{ A}$$

Maka nilai rasio hubung singkat (SC_{ratio}) pada PCC dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3) sehingga nilai SC_{ratio} adalah :

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{26.243,194}{170} = 154,37$$

Berdasarkan standar IEEE 519-1992 pada Tabel 2, nilai rasio hubung singkat (SC_{ratio}) berada pada nilai ratio $100 < 1000$, maka nilai THD arus maksimum yang diperbolehkan adalah sebesar 15%. Pemasangan *filter* pasif dilakukan untuk menghilangkan distorsi harmonik arus yang mulai terbentuk dan meningkatkan efisiensi kualitas daya ($\cos \phi$).

Analisa dan perhitungan *filter* harmonik pasif jenis *single tuned* yang akan dihitung yaitu pada orde harmonik arus yang nilainya dominan lebih tinggi yaitu orde 11, 13, 23, dan 25 pada sisi sumber transformator rectifier IPM46-TR001.

Dari spesifikasi sistem diketahui bahwa tegangan kerja antar phasa (V_{L-L}) adalah sebesar :

$$V_{L-L} = 33.000 \text{ Volt} = 33 \text{ kV}$$

Sistem kelistrikan bekerja pada frekuensi 50 Hz maka besarnya nilai radian sudut (ω) adalah sebagai berikut :

$$\omega = 2 \times \pi \times f = 2 \times 3,14 \times 50 = 314$$

Menentukan Kapasitor Filter Untuk Menentukan Daya Reaktif

Persyaratan daya reaktif kapasitif untuk faktor daya dan kontrol tegangan umumnya menentukan ukuran efektifitas kVAR dari filter harmonik. Nilai kVAR filter harmonik yang efektif selalu kurang dari kVAR *nameplate* dari kapasitor filter harmonik. Nilai daya reaktif efektif (Q_{eff}) tiga phasa dihitung dengan persamaan berikut [5] :

$$\begin{aligned} Q_{eff_3Phasa} &= P \times [\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)] \\ &= P \times \left[\tan(\cos^{-1} \varphi_{awal}) - \tan(\cos^{-1} \varphi_{target}) \right] \\ &= 7,782,7 \times \left[\tan(\cos^{-1} 0,8) - \tan(\cos^{-1} 0,98) \right] \\ &= 4,280 \text{ MVAR} \\ Q_{eff_1Phasa} &= \frac{Q_{eff_3phasa}}{3} = \frac{4,280,485}{3} = 1,427 \text{ MVAR} \end{aligned}$$

Keterangan :

- Q_{eff} = Daya reaktif yang efektif dari filter harmonik (VAR)
- P = Daya yang terbentuk oleh beban dan diterima oleh sistem (W)
- φ_{awal} = Nilai faktor daya sebelum dipasang filter
- φ_{target} = Nilai faktor daya yang akan dicapai

Pemilihan Frekuensi Tuning Filter

Filter biasanya akan diatur ke frekuensi terendah dari harmonik yang paling signifikan. Filter harmonik biasanya diatur ke frekuensi sekitar 3% hingga 15% di bawah frekuensi harmonik yang dipilih. Reaktansi efektif dari kapasitor filter untuk orde ke-11 dapat dihitung dengan persamaan berikut [5] :

$$X_{C1} = \frac{V_{L-L}^2(kV)}{Q_{eff}(MVAR)} = \frac{33^2}{1,427} = 763,14 \Omega$$

Maka nilai kapasitor untuk komponen filter (dalam Farad) adalah sebesar :

$$C = \frac{1}{\omega \times X_{C1}} = \frac{1}{314 \times 763,14} = 4,173 \mu\text{F}$$

Keterangan :

- X_{C1} = Reaktansi efektif kapasitor *filter* harmonik pada frekuensi dasar (Ω)
- Q_{eff} = Daya reaktif yang efektif dari *filter* harmonik (MVAR)
- V_{L-L} = Tegangan nominal *line to line* pada sistem (kV)

Nilai reaktor seri pada frekuensi *fundamental* (X_{L1}) untuk induktor *filter* orde ke-11 dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{h^2} = \frac{763,14}{10,8^2} = 6,543 \Omega$$

Sehingga nilai induktor untuk komponen *filter* (dalam Henry) adalah sebesar :

$$L = \frac{X_{L1}}{\omega} = \frac{6,543}{314} = 0,020837 \text{ H} = 20,837 \text{ mH}$$

Dengan penentuan nilai kualitas faktor (Q_f) = 60, maka besarnya nilai resistansi (R) *filter* harmonik orde ke-11 adalah :

$$R = \frac{X_{L1}}{Q_f} = \frac{6,543}{60} = 0,109 \Omega$$

Penentuan Parameter Operasi Kapasitor Filter

Arus yang melalui kapasitor dihitung dalam tegangan phasa ke netral maksimum, maka besarnya nilai arus yang melalui kapasitor *filter* harmonik orde ke-11 pada frekuensi *fundamental* (I_{C1}) adalah :

$$I_{C1} = (1,05) \times \frac{V_{L-N}}{(X_{C1} - X_{L1})} = (1,05) \times \frac{\left(\frac{33.000}{\sqrt{3}} \right)}{(763,14 - 6,543)} = 26,44 \text{ A}$$

Jika kita asumsikan arus harmonik dari beban berbanding terbalik dengan arus *fundamental* dengan daya semu beban hasil pengukuran sebesar 9.634,4 kVA pada Tabel 8, maka nilai arus pada harmonik orde ke-11 (I_{C11}) adalah :

$$I_{C11} = \frac{1}{h} \times \frac{kVA_{Load}}{\sqrt{3} \times 33} = \frac{1}{10,8} \times \frac{9634,4}{57,157} = 15,6 \text{ A}$$

Arus rms (I_{C_rms}) yang melalui kapasitor adalah penjumlahan dari semua arus rms yang akan mengalir melalui *filter*. Asumsinya di sini adalah bahwa hanya harmonik orde ke-11 yang difilter, maka nilai arus rms adalah :

$$I_{C_rms} = \sqrt{I_{C1}^2 + I_{C11}^2} = \sqrt{(26,44^2 + 15,6^2)} = 30,69 \text{ A}$$

Nilai reaktansi kapasitor *filter* pada frekuensi harmonik orde ke-11 (X_{C11}) adalah :

$$X_{C11} = \frac{X_{C1}}{h} = \frac{763,14}{10,8} = 70,66 \Omega$$

Nilai tegangan yang melaui kapasitor pada frekuensi fundamental (V_{C1}) adalah :

$$V_{C1} = X_{C1} \times I_{C1} = 763,14 \times 26,44 = 20.177,42 \text{ V}$$

Nilai tegangan yang melaui kapasitor pada saat frekuensi harmonik orde ke-11 (V_{C11}) ditentukan berdasarkan dari spektrum harmonik arus (I_{Ch}) khas dari beban *nonlinear* yang sesuai, maka besarnya nilai tegangan pada frekuensi harmonik orde ke-11 adalah :

$$V_{C11} = X_{C11} \times I_{C11} = 70,66 \times 15,6 = 1.102,3 \text{ V}$$

Nilai tegangan rms (V_{C_rms}) yang melalui kapasitor *filter* tersebut adalah :

$$V_{C_rms} = \sqrt{V_{C1}^2 + V_{C11}^2}$$

$$= \sqrt{(20.177,42^2 + 1.102,3^2)} = 20.207,5 \text{ V}$$

Nilai tegangan puncak (V_{C_peak}) yang melalui kapasitor adalah :

$$V_{C_Peak} = \sqrt{2} \times (V_{C1} + V_{C11})$$

$$= \sqrt{2} \times (20.177,42 + 1.102,3) = 30.094,06 \text{ V}$$

Menentukan Parameter Operasi Kapasitor *Filter*

Standar IEEE-18 merekomendasikan batasan untuk pengoperasian kapasitor *shunt* dalam sistem daya termasuk arus, daya, dan tegangan di seluruh unit kapasitor. kapasitor dirancang untuk dioperasikan pada atau di bawah tegangan pengenalnya untuk dapat beroperasi sesuai dengan ketentuan batasan pada Tabel 8 berikut :

Tabel 8. Batasan operasi maksimum kapasitor standar IEEE-18

Daya reaktif yang terbentuk (VAR)	135%
Tegangan RMS	110%
Tegangan yang terukur dan termasuk tegangan harmonik	120%
Arus RMS	135%

(Sumber : Rosa, 2006)

Jika tegangan *line to neutral* (V_{L-N}) pada sistem 33.000 Volt adalah sebesar 19.052,55 Volt, maka

perbandingan nilai *per-unit* (Pu) tegangan rms (V_{C_rms}) dan tegangan puncak (V_{C_peak}) yang mengalir pada kapasitor adalah sebagai berikut :

Perbandingan nilai tegangan rms kapasitor (V_{C_rms}) dalam Pu :

$$\frac{V_{C_rms}}{V_{C_rated}} = \frac{20.207,5}{19.052,55} = 1,06 \text{ Pu}$$

(Nilai masih dibawah standar IEEE-18 yaitu $< 1,1 \text{ Pu}$)

Perbandingan nilai tegangan puncak kapasitor (V_{C_peak}) dalam Pu :

$$\frac{V_{C_peak}}{V_{C_peak_rated}} = \frac{30.094,06}{\sqrt{2} \times 19.052,55} = 1,116 \text{ Pu}$$

(Nilai masih dibawah standar IEEE-18 yaitu $< 1,2 \text{ Pu}$)

Daya reaktif yang disediakan oleh kapasitor *filter* adalah :

$$\frac{(V_{C_rms}) \times (I_{C_rms})}{1000} = \frac{(20.207,5) \times (30,69)}{1000} = 620,168 \text{ kVAR}$$

Maka besarnya daya reaktif kapasitor tiga phasa adalah sebesar :

$$kVAR_{3_phasa} = 620,168 \times 3 = 1.860,504 \text{ kVAR}$$

Evaluasi Respon Frekuensi *Filter*

Nilai frekuensi respon (f_{Res}) dari *filter* untuk harmonik orde ke-11 adalah :

$$f_{res} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{(20,837 \times 10^{-3}) \times (4,173 \times 10^{-6})}} = 540,5 \text{ Hz}$$

Tabulasi Hasil Perhitungan

Dengan menggunakan perhitungan yang sama, maka nilai komponen kapasitor (C), induktor (L), reaktansi induktor (X_L), resistor (R) serta karakteristik *filter* selanjutnya yang akan digunakan pada setiap orde harmonik (h) yaitu orde harmonik ke13,23 dan 25 adalah seperti pada Tabel 9 dan 10 berikut :

Tabel 9. Nilai komponen *filter* satu phasa

Volt (kV)	Orde	C (μF)	L (mH)	X_L (Ω)	R (Ω)
33	11	4,173	20,837	6,543	0,109
	13	4,173	14,833	4,657	0,077
	23	4,173	4,675	1,468	0,024
	25	4,173	3,949	1,24	0,0206

Tabel 10. Karakteristik *Filter*

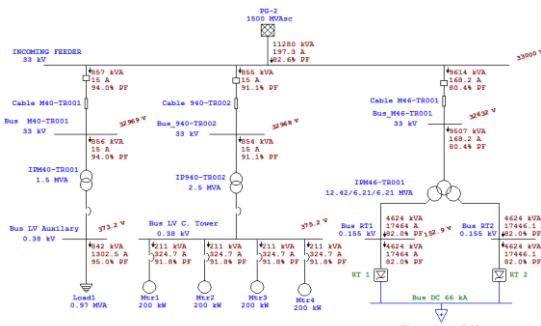
Orde Harmonik	Arus RMS (A)	Arus Kapasitor (A)	V _{RMS} (kV)	Tegangan Puncak Kapasitor (kV)	Daya Kapasitor 1 Phasa (kVAR)	Daya Kapasitor 3 Phasa (kVAR)	Respon Frekuensi (Hz)
11	15,6	30,69	20,207	30,094	620,16	1.860	540,5
13	13,169	29,47	20,143	29,575	593,6	1.780	641,02
23	7,393	27,28	20,046	28,697	546,86	1.640	1.140,25
25	6,796	27,11	20,033	28,625	543,2	1.629	1.242,2

Simulasi Sistem Kelistrikan CM-10 Menggunakan Software ETAP

Simulasi sistem ini bertujuan untuk membandingkan seberapa besar selisih tingkat distorsi harmonik arus dan tegangan dari hasil pengukuran dengan hasil simulasi pada sistem serta mengetahui kondisi awal saat sebelum dan setelah dipasang *filter single tuned* pada sistem dengan menggunakan *software ETAP* versi 12.6. Data untuk parameter komponen mengacu pada nilai-nilai aktual berdasarkan pada *nameplate*.

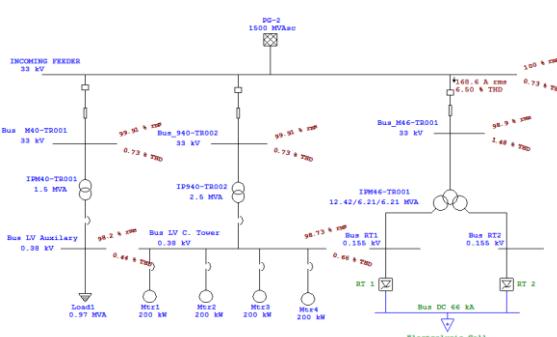
Simulasi Aliran Daya dan THD Sistem Sebelum Pemasangan Filter

Berdasarkan data pengukuran pada Tabel 6 dan Tabel 7, maka hasil simulasi menggunakan *software ETAP* adalah seperti pada Gambar 9 berikut :



Gambar 9. Simulasi aliran daya sebelum pemasangan filter

Nilai THD arus dan tegangan pada sisi sumber transformator *rectifier* IPM46-TR001 dari hasil simulasi seperti pada Gambar 10 berikut :

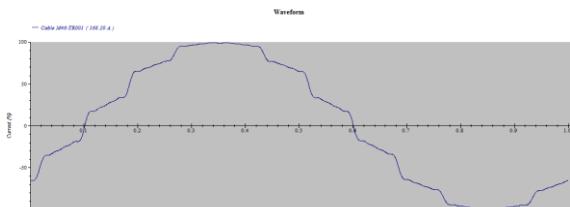


Gambar 10. Simulasi nilai THD arus dan tegangan sebelum pemasangan filter

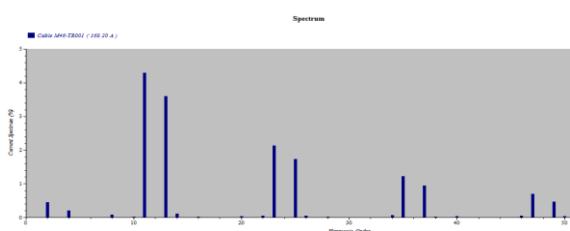
Simulasi Distorsi Harmonik Arus Sebelum Pemasangan Filter

Pemasangan Filter

Berdasarkan hasil dari simulasi sebelum pemasangan *filter*, maka nilai distorsi harmonik arus pada sisi sumber transformator *rectifier* IPM46-TR001 dapat diamati dalam bentuk gelombang dan spektrum seperti pada Gambar 11 dan 12 berikut :



Gambar 11. Gelombang arus akibat adanya distorsi harmonik

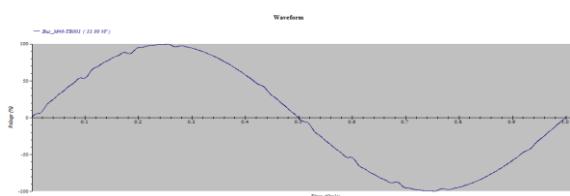


Gambar 12. Spektrum harmonik arus sebelum pemasangan filter

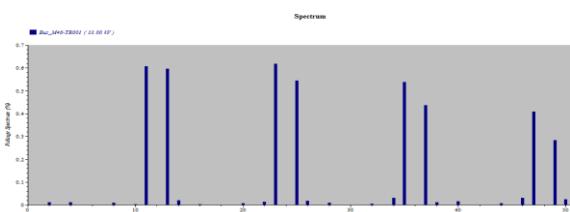
Dari bentuk spektrum arus pada Gambar 12 menunjukkan harmonik arus yang menonjol adalah harmonik pada orde ke-11,13,23 dan 25. Cacatnya bentuk gelombang arus menunjukkan kandungan harmonik yang ditimbulkan cukup besar.

Simulasi Distorsi Harmonik Tegangan Sebelum Pemasangan Filter

Nilai distorsi harmonik tegangan pada sisi sumber transformator *rectifier* IPM46-TR001 dapat diamati dalam bentuk gelombang tegangan seperti Gambar 13 dan 14 berikut :



Gambar 13. Gelombang tegangan akibat adanya distorsi harmonik



Gambar 14. Spektrum harmonik tegangan sebelum pemasangan filter

Dari bentuk spektrum tegangan pada Gambar 14

menunjukkan harmonik tegangan yang menonjol adalah harmonik pada orde ke-11,13,23 dan 25, kondisi harmonik yang terjadi pada tegangan merupakan efek dari distorsi harmonik arus yang berasal dari beban *nonlinear* yang dikirim kesistem.

Analisa Nilai Komponen Filter Pada Simulasi ETAP

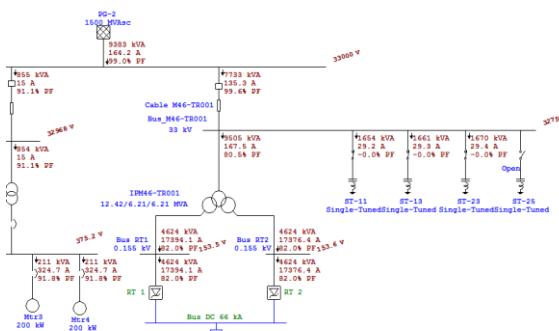
Nilai kapasitor dan induktor merupakan perhitungan substitusi pada simulasi dengan rangkaian *filter* terhubungan *wye* (Y) pada tegangan tiga phasa, sedangkan nilai untuk resistor dan nilai tegangan (rate kV) menggunakan data hasil perhitungan pada Tabel 9 dan Tabel 10, maka nilai perbandingan untuk masing-masing komponen *filter* adalah seperti pada Tabel 11 berikut :

Tabel 11. Perbandingan nilai komponen *filter* hasil simulasi dan perhitungan

Tegangan (kV)	Orde	Kapasitor (μ F)		Reaktansi Induktor (Ω)	
		Perhitungan	Simulasi	Perhitungan	Simulasi
33	11	4,173	4,867	6,543	5,404
	13	4,173	4,898	4,657	3,845
	23	4,173	4,946	1,468	1,216
	25	4,173	4,952	1,24	1,028

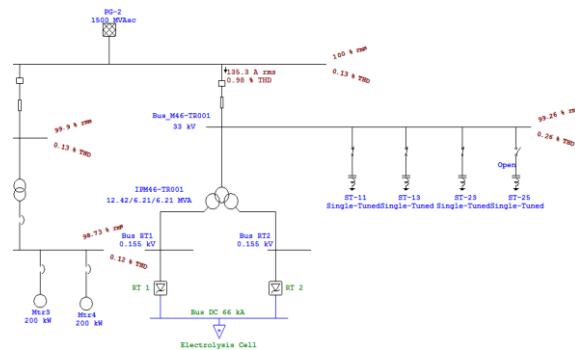
Simulasi Aliran Daya dan THD Sistem Setelah Pemasangan Filter

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya pada kondisi pemasangan *single tuned filter* untuk orde ke-11,13 dan 23 terjadi peningkatan faktor daya ($\cos \phi$) dari 0,8 menjadi 0,96. Nilai THD arus dan tegangan dari hasil simulasi setelah pemasangan *filter* seperti pada Gambar 15 berikut :



Gambar 15. Simulasi aliran daya sistem setelah pemasangan *filter*

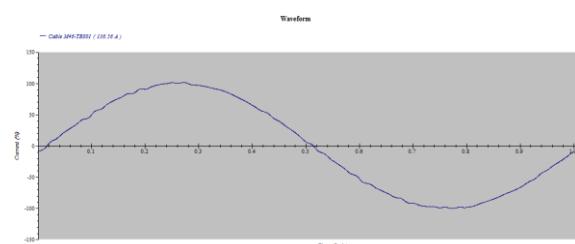
Dari Hasil simulasi *harmonic analysis* terjadi penurunan nilai distorsi harmonik arus dari 6,5% menjadi 0,98% dan distorsi harmonik tegangan dari 1,48% menjadi 0,26%. Pemasangan *single tuned filter* untuk orde ke-11,13 dan 23 sudah cukup efektif untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif dan meredam distorsi harmonik pada sistem.



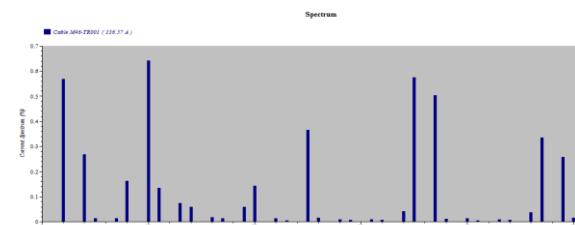
Gambar 16. Simulasi nilai THD arus dan tegangan setelah pemasangan *filter*

Simulasi Distorsi Harmonik Arus Setelah Pemasangan Filter

Kondisi dan nilai distorsi harmonik arus pada sisi sumber transformator *rectifier* IPM46-TR001 terjadi penurunan yang dapat diamati dalam bentuk gelombang arus seperti Gambar 17 dan 18 berikut :



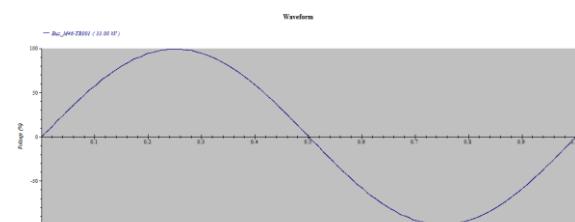
Gambar 17. Gelombang arus setelah pemasangan *filter*



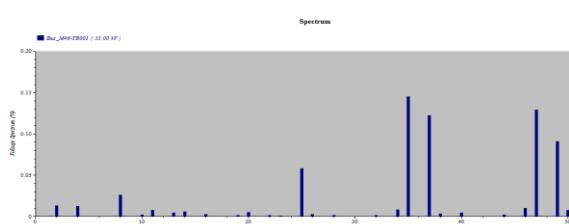
Gambar 18. Spektrum harmonik arus setelah pemasangan *filter*

Simulasi Distorsi Harmonik Tegangan Setelah Pemasangan Filter

Kondisi dan nilai distorsi harmonik tegangan terjadi penurunan yang dapat diamati dalam bentuk gelombang dan spektrum tegangan seperti pada Gambar 19 dan 20 berikut :



Gambar 19. Gelombang tegangan setelah pemasangan *filter*



Gambar 20. Spektrum harmonik tegangan setelah pemasangan *filter*

Setelah pemasangan *filter*, bentuk gelombang arus dan tegangan sudah mendekati kondisi sinusoidal. Perbandingan THD arus dan tegangan serta faktor daya ($\cos \phi$) simulasi sebelum dan setelah pemasangan *single tuned filter* seperti pada Tabel 12 berikut :

Tabel 12. Perbandingan nilai THD arus dan tegangan serta faktor daya hasil simulasi sebelum dan setelah pemasangan *filter*

Tegangan (kV)	Simulasi Sebelum Pemasangan <i>Filter</i>			Simulasi Setelah Pemasangan <i>Filter</i>		
	THD _I (%)	THD _V (%)	Cos ϕ (%)	THD _I (%)	THD _V (%)	Cos ϕ (%)
33	6,5	1,48	80	0,98	0,26	96
Selisih Nilai						
THD _I (%)	5,52		THD _V (%)	1,22		Cos ϕ (%)
				16		

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi yang dilakukan, maka dapat dibuat beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Munculnya harmonik disisi sumber transformator *rectifier* IPM46-TR001 pada harmonik orde ke-11,13,23 dan 25, maka dapat dilakukan perencanaan pemasangan *filter* pasif *single tuned* dengan nilai kapasitor *bank filter* (C) sama yaitu sebesar 4,173 μ F. Untuk *filter* harmonik orde ke-11, nilai induktor (L) adalah sebesar 20,837 mH. Untuk *filter* harmonik orde ke-13, nilai induktor (L) adalah sebesar 14,833 mH. Untuk *filter* harmonik orde ke-23, nilai induktor (L) adalah sebesar 4,637 mH, dan untuk *filter* harmonik orde ke-25, nilai induktor (L) adalah sebesar 3,943 mH.
2. Dari hasil simulasi *harmonic analysis* menggunakan *software* ETAP, setelah dilakukan pemasangan *filter* harmonik orde ke-11,13 dan 23 maka nilai harmonik arus (THD_I) dan harmonik tegangan (THD_V) terjadi penurunan yaitu sebelum pemasangan *filter* nilai THD_I adalah 6,5%, setelah pemasangan *filter* nilai THD_I menjadi 0,98% terjadi penurunan THD_I sebesar 5,52% dan distorsi harmonik tegangan dari 1,48% menjadi 0,26%, terjadi penurunan THD_V sebesar 1,22%. Pemasangan tiga unit

filter harmonik yaitu orde ke-11,13 dan 23 sudah efektif untuk meredam distorsi harmonik pada sistem.

3. Dari hasil simulasi aliran daya (*load flow analysis*) menggunakan *software* ETAP, setelah dilakukan pemasangan *filter* terjadi peningkatan nilai faktor daya ($\cos \phi$) yaitu sebelum pemasangan *filter* nilai faktor daya ($\cos \phi$) adalah 0,8, setelah pemasangan *filter* nilai faktor daya ($\cos \phi$) menjadi 0,96, terjadi peningkatan faktor daya sebesar 16%.

4. DAFTAR PUSTAKA

- [1] S.V.Kulkarni and S.A.kharparde, *Transformer Engineering: Design and Practice*. New York: Marcel Dekker.Inc, 2004.
- [2] S. Crepaz, "For an Improved Evaluation of Conventional Losses Transformers for Converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1975.
- [3] IEEE Standard 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. New York: IEEE Inc, 1992.
- [4] R. c. Dugan, M. F. McGranahan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, Second Edi. New York: McGraw-Hill, 2004.
- [5] F. C. D. La Rosa, *Harmonics And Power Systems*. Hazelwood, Missouri, U.S.A: Taylor & Francis Group, 2006.