

ANALISIS PENGARUH HARMONIK TERHADAP NILAI FAKTOR DAYA DAN RUGI DAYA DI INSTALASI LISTRIK INDUSTRI

Janny F. Abidin
Jurusan Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknologi Nasional
wiyon_jogja@ymail.com

ABSTRAK

Beban tak linier seperti konverter statis, pengaturan kecepatan motor (*adjustable speed drives*) dan catu daya kontinu (*uninterruptible power systems*), merupakan beban yang paling banyak digunakan pada jaringan tenaga listrik suatu industri moderen. Hal ini menimbulkan efek samping pada sistem tenaga listrik yaitu timbulnya arus harmonik sebagai akibat perubahan energi listrik. Arus harmonik akan mengakibatkan distorsi bentuk gelombang tegangan sehingga tidak berbentuk sinusoidal murni lagi. Hal ini sangat mengganggu bagi peralatan listrik yang didesain beroperasi pada gelombang tegangan sinusoidal. Akibatnya banyak kerugian yang akan diderita, di antaranya peralatan listrik menjadi lebih cepat panas sehingga dapat terjadi kegagalan isolasi yang berujung pada kerusakan atau makin pendek umur dari peralatan.

Penelitian bertujuan untuk mengetahui watak harmonik serta dapat menganalisis arus dan tegangan harmonik, menghitung *Total Harmonic Distortion* (THD). Selain mengetahui watak dan menganalisis harmonik, peneliti juga dapat mendesain tapis paralel (*shunt filter*) untuk mengurangi *Total Harmonic Distortion* (THD).

Hasil penelitian didapatkan bahwa 1) Pemasangan tapis penala tunggal untuk harmonik ke-11 pada masing-masing bus dalam penelitian terbukti dapat mengurangi THD. Untuk THD_v total rata-rata penurunannya 39,41% dan untuk THD_i total rata-rata penurunannya 22,02% 2) Perbaikan kualitas daya naik total rata-rata 9,77% dan 3) Perbaikan atau penaikan faktor daya beban total rata-rata 6,75%

Kata kunci : Total Harmonic Distortion (THD), Pengurangan THD_v dan THD_i, Tapis pasif harmonik, Perbaikan kualitas daya dan faktor daya, Instalasi Industri

PENDAHULUAN

Beban tak linier seperti konverter statis, pengaturan kecepatan motor (*adjustable speed drives*) dan catu daya kontinu (*uninterruptible power systems*), merupakan beban yang paling banyak digunakan pada jaringan tenaga listrik suatu industri moderen. Hal ini menimbulkan efek samping pada sistem tenaga listrik yaitu timbulnya arus harmonik sebagai akibat perubahan energi listrik.

Arus harmonik akan mengakibatkan distorsi bentuk gelombang tegangan sehingga tidak berbentuk sinusoidal murni lagi. Hal ini sangat mengganggu bagi peralatan listrik yang didesain beroperasi pada gelombang tegangan sinusoidal.

IEEE telah menerbitkan standar tentang batas-batas total distorsi harmonik tegangan (*voltage total harmonic distortion*), total distorsi harmonik arus (*current total harmonic distortion*) dan pengendalian harmonik dalam sistem tenaga pada titik sambung bersama (*point of common coupling*), yaitu standar IEEE 519-1992.

Standar IEEE 519-1992 menawarkan tiga solusi untuk mengendalikan arus harmonik dalam jaringan tenaga listrik, yaitu:

1. Tapis paralel (*shunt filter*)
2. Penggeseran fasa (*phase multiplication*) dan
3. Kompensasi atau injeksi harmonik

Penelitian ini menggunakan solusi nomor satu, yaitu dengan memasang tapis paralel (*shunt filter*) di dekat beban tak linier penyebab sumber harmonik (*harmonic source*) dengan pertimbangan bahwa di samping berfungsi sebagai tapis arus harmonik yang ditala pada frekuensi tertentu, tapis paralel juga dapat menyumbangkan KVAR dalam frekuensi dasar kedalam sistem tenaga listrik sehingga faktor daya beban tak linier semakin baik. Alasan lain adalah rangkaiannya sederhana dan memerlukan hanya sedikit pemeliharaan.

2. Tujuan Penelitian

Penelitian bertujuan untuk mengetahui watak harmonik serta dapat menganalisis arus dan tegangan harmonik, menghitung *Total Harmonic Distortion* (THD). Selain mengetahui watak dan menganalisis harmonik, peneliti juga dapat mendesain tapis paralel (*shunt filter*) untuk mengurangi *Total Harmonic Distortion* (THD).

TINJAUAN PUSTAKA

Beban tak linier adalah beban yang menarik gelombang arus menjadi tidak sinusoidal pada saat dicatu oleh sumber tegangan sinusoidal (IEEE-Standard 519-1992). Adanya beban-beban tak linier menimbulkan persoalan yang berhubungan dengan komponen harmonik. Pengaruh adanya komponen harmonik pada sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu tekanan pada sistem isolasi karena tegangan harmonik, pemanasan karena arus harmonik, kecacuan unjuk kerja peralatan (Ort Meyer, dkk, 1985).

Apabila terdapat arus terdistorsi akibat adanya beban tak linier maka jatuh tegangan di saluran juga terdistorsi sehingga terjadi perambatan harmonik dalam sistem tenaga listrik yang dapat mengganggu unjuk kerja sistem.

Landasan Teori

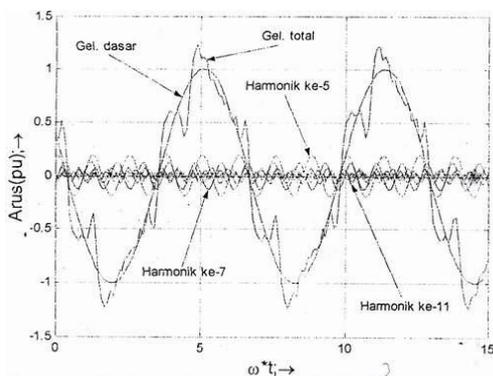
a. Definisi Harmonik

Harmonik didefinisikan sebagai komponen sinusoidal dari periodik atau besaran yang frekuensinya merupakan kelipatan bulat dari frekuensi fundamental. Apabila komponen frekuensinya dua kali frekuensi fundamental, maka disebut harmonik ke-2 (IEEE std 100-1992 [B-14]).

Jadi pada sistem daya 50 Hz, komponen harmonik, h , yang berbentuk sinusoidal mempunyai frekuensi:

$$h = n \times 50 \text{ Hz} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana n adalah bilangan bulat seperti ditunjukkan oleh gambar (2.1).



Gambar 1. Gelombang total dalam kawasan frekuensi fundamental, gelombang harmonik ke-5, ke-7, ke-11 dan gelombang total atau gelombang terdistorsi yang dibentuk oleh gelombang fundamental, gelombang harmonik ke-5, ke-7, dan ke-11.

b. Distorsi harmonik total/total harmonic distortion (THD)

Faktor distorsi menggambarkan tingkat gangguan harmonik pada jaringan listrik. Ada beberapa pengukuran yang umum digunakan, salah satu yang paling umum adalah distorsi harmonik total (THD) yang akan digunakan dalam penelitian ini, untuk tegangan ataupun arusnya.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \dots\dots\dots(1)$$

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

Dimana V_1 dan I_1 merupakan fundamental sedangkan V_h dan I_h komponen harmonik. Ukuran dari distorsi individual untuk tegangan dan arus harmonik ke-h, masing-masing didefinisikan sebagai V_h/V_1 dan I_h/I_1

c. Distorsi faktor daya

Tegangan dan arus yang mengandung komponen harmonik mempunyai nilai RMS sebagai berikut:

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \dots\dots\dots(3)$$

dan

$$I_{rms} = I_{rms} I_1 = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \dots\dots(4)$$

sehingga total faktor daya menjadi:

$$Pf_{tot} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \dots\dots(5)$$

Sebagian besar kasus hanya sedikit porsi daya rata-rata yang disumbangkan oleh komponen harmonik dan total distorsi tegangan kurang dari 10 % sehingga:

$$Pf_{tot} \approx \frac{P_1}{V_1 I_1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \dots\dots\dots(6)$$

$$Pf_{tot} \approx \cos(\theta_1 - \delta_1) \cdot Pf_{dist} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana $\cos(\theta_1 - \delta_1)$ dikenal sebagai *displacement power factor* dan Pf_{dist} disebut *distortion power factor*.

d. Dampak Harmonik

Arus beban setiap fase dari beban linier yang seimbang pada frekuensi dasarnya akan saling mengurangi sehingga arus netral menjadi nol. Sebaliknya beban tak linier satu fase akan menimbulkan harmonik kelipatan tiga ganjil yang disebut *triplen harmonic* (harmonik ke-3, ke-9, ke-15, dst). Harmonik ini tidak menghilangkan arus netral, tetapi dapat menghasilkan arus netral yang melebihi arus fasenya.

Selain itu ada beberapa akibat yang ditimbulkan oleh adanya harmonik dalam sistem tenaga listrik, antara lain:

1. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada KWH meter jenis elektromekanis yang menggunakan program induksi berputar. Sebagai akibatnya, putaran piring akan lebih cepat atau terjadi kesalahan ukur dalam KWH meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya pada frekuensi dasar.
2. Pemutusan beban dapat bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenalnya. Pemutus beban yang dapat terhindar dari gangguan harmonik umumnya adalah pemutus beban yang mempunyai respon terhadap arus rms sebenarnya (*true rms current*) atau kenaikan temperatur karena arus lebih.

e. Batas Distorsi Harmonik

Ada berbagai batas distorsi harmonik di beberapa negara. Kebanyakan industri menggunakan batas distorsi yang dikeluarkan oleh IEEE std-519-1992 (B-15).

1. Batas distorsi arus

Tabel Batas distorsi arus untuk sistem distribusi menurut IEEE 519-1992(120 V sampai 69000 V)

I_h/I_L	< 11	$h < 17$	$h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3
< 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5
< 100	10,00	4.5	4.0	1.5	0.7
<1000	12.5	5.5	5.0	2.0	1,0
>1000	7,0	7.0	6.0	2.5	1,4

2. Batas distorsi tegangan

Tabel Batas distorsi tegangan pada PCC menurut IEEE 519-1992

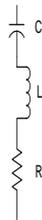
Tegangan Bus pada PCC	Batas harmonik indi (%)	THD _v (%)
$V \leq 69$ KV	3.0	5.0
69 KV – 161 KV	1.5	2.5
$V \geq 161$	1.0	1.5

f. Teknik Mengurangi Distorsi Harmonik

1. Filter Penala Tunggal/Single Tuned Filter (STF)

Umumnya tapis terbagi menjadi dua kelompok yaitu tapis pasif dan tapis aktif. Tapis pasif terbuat dari elemen-elemen kapasitor, induktor, dan resistor. Sedangkan tapis aktif terbuat dari komponen semi konduktor dengan prinsip kerja seperti pada elektronika daya.

Tapis pasif dapat berupa tapis penala dan tapis peredam seperti diperlihatkan pada gambar 2.



Gambar 2. Komponen tapis pasif

Tapis paralel merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mengendalikan aliran arus harmonik sehingga tapis ini dapat dirancang dari kombinasi seri reaktor (induktansi) dan kapasitor (kapasitansi) sehingga membentuk penala tunggal. Tapis paralel pasif bertindak sebagai "perangkap" karena menyerap arus harmonik yang ditalanya. Tapis LC dalam kenyataannya mempunyai nilai R yang berasal dari induktor sehingga rangkaian lengkap tapis diperlihatkan oleh gambar (2.9a).

Hubungan antara impedansi tapis dan frekuensi untuk nilai R, L dan C tertentu dengan frekuensi resonansi 50 Hertz adalah:

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \dots\dots\dots(8)$$

Ketajaman penalaan ditentukan oleh faktor kualitas yang didefinisikan sebagai perbandingan reaktansi induktif atau kapasitif pada frekuensi resonansi dengan resistansi tapis.

$$Q = \frac{X_0}{R} \dots\dots\dots(9)$$

Frekuensi resonansi diberikan oleh:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \dots\dots\dots(10)$$

dengan, f_1 adalah frekuensi fundamental
 L adalah induktansi tapis
 C adalah kapasitansi tapis
 X_C adalah reaktansi kapasitif pada
 X_L adalah reaktansi induktif pada

Desain Tapis Penala Tunggal

Langkah-langkah analisis dan desain pemasangan tapis harmonik penala tunggal adalah sebagai berikut:

1. Tentukan besarnya KVAR yang dibutuhkan

Umumnya KVAR yang dibutuhkan disesuaikan dengan tingkat kebutuhan perbaikan faktor daya pada sistem. Pada penelitian ini untuk menentukan KVAR yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

$$Q_1 = P \tan \theta_1 \dots\dots\dots(11)$$

$$Q_2 = P \tan \theta_2 \dots\dots\dots(12)$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots(13)$$

dengan,
 P = Daya aktif (watt)

- Q_1 = Daya reaktif sebelum pemasangan tapis (VAR)
- S_1 = Daya semu sebelum pemasangan tapis (VA)
- S_2 = Daya semu setelah pemasangan tapis (VA)
- Q_2 = Daya reaktif setelah pemasangan tapis (VAR)
- Q_c = Daya reaktif tapis

2. Tentukan besarnya komponen tapis penala tunggal

nilai kapasitor terhubung delta pada gambar (2.11a), maka

$$I_c = \frac{Q_c}{V_{L-L}} \dots\dots\dots(14)$$

sehingga,

$$I_{FL, cap} = \frac{Q_c}{\sqrt{3}V_{L-L}} \dots\dots\dots(15)$$

impedan ekuivalen fase tunggal dari kapasitor adalah

$$X_c = \frac{V_{L-L}}{I_c} \dots\dots\dots(16)$$

impedan tapis ditentukan dengan menggunakan

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \dots\dots\dots(17)$$

nilai resistor yang berasal dari impedan tapis adalah

$$R = \frac{X_L}{Q} \dots\dots\dots(18)$$

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimaksud untuk mengurangi distorsi harmonik dengan mendesain suatu tapis penala tunggal dan kemudian mensimulasikan bentuk gelombang tegangan dan arus pada masing-masing bus atau rel sebelum dan setelah pemasangan tapis.

Tahapan-tahapan yang harus dilalui dalam penelitian ini secara garis besar dibagi menjadi:

1. Membuat gambar sistem tenaga listrik pada lembar kerja program aplikasi ETAP (*Electrical Transient Analyser Program*) *powerstation* versi 4.0.0
2. Meng-input semua data yang diperlukan dalam simulasi yaitu data parameter sumber, saluran dan beban sistem.
3. Memulai langkah pertama yaitu melakukan simulasi pada saat tapis penala tunggal belum terpasang.
4. Kemudian simulasi dilakukan dengan memasang tapis penala tunggal.

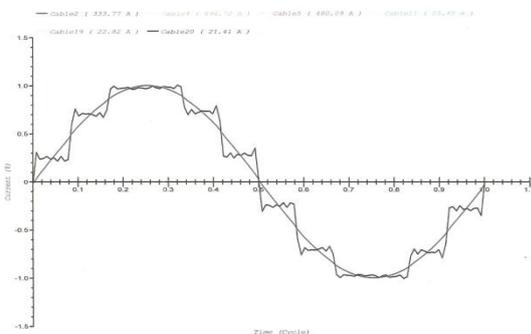
DATA DAN PEMBAHASAN

ETAP (*Electrical Transient Analyser Program*) Sebelum Pemasangan Tapis

Program dan analisis yang dibuat dalam penelitian ini diambil dari diagram satu garis data jaringan sistem kelistrikan industri 11 bus. Beberapa data dalam penelitian ini diperoleh dari hasil simulasi program ETAP (*Electrical Transient Analyser Program*) *PowerStation* 4.0.0. Data hasil simulasi program disajikan dalam tabel (1) dan (2).

Tabel .1 Hasil Simulasi Sebelum Dipasang Tapis

Bus	V (Kv)	Arus I (A)	Aliran Daya Total		Pf (%)
			(Mw)	(Mvar)	
Bus A	20	94	2,85	1,59	87,26
Bus B	20	94	2,85	1,59	87,26
Bus C	0,38	385	0,22	0,1	90,27
Bus D	0,22	296	0,09	0,05	87,29
Bus E	0,38	284	0,16	0,08	90,24
Bus F	0,38	329	0,18	0,09	88,90
Bus G	0,22	575	0,18	0,07	92,36
Bus H	0,38	511	0,29	0,14	90,49
Bus I	0,38	159	0,08	0,05	83,77
Bus J	0,38	114	0,06	0,04	84,67
Bus K	0,38	875	0,49	0,24	89,95



Gambar 3. Gelombang Harmonik Arus Sebelum Dipasang Tapis

Desain Tapis untuk Mengurangi Distorsi Harmonik

Dari data menunjukkan bahwa harmonik yang dominan berada di harmonik ke-11. Pada penelitian ini untuk mengurangi distorsi harmonik didesain tapis penala tunggal (*single tuned filter*) harmonik ke-11 pada masing-masing dengan diolah secara perhitungan manual untuk mendapatkan parameter komponen tapis harmonik. Langkah-langkah analisis dan desain pemasangan tapis harmonik penala tunggal harmonik ke-11 pada masing-masing bus adalah sebagai berikut:

1. Tentukan Besarnya KVAR yang Dibutuhkan

Dalam perhitungan komponen tapis, penulis hanya memberi contoh pada salah satu bus. Daya nyata pada bus Flat Card A = 60 KW, daya reaktif = 40 KVAR, faktor daya 0,84 dan apabila direncanakan dengan pemasangan tapis harmonik maka faktor daya akan diperbaiki dari 0,84 *lagging* menjadi 0,98 *lagging*, maka total KVAR tapis yang dibutuhkan adalah:

$\cos \theta_1$ (terbaca) : 0,84

$\cos \theta_2$ (yang diinginkan) : 0,98

$\theta_1 = \cos^{-1} 0,8726 = 41,11^{\circ}$

$\theta_2 = \cos^{-1} 0,98 = 11,47^{\circ}$

Besar sudut pergeseran = $41,11^{\circ} - 11,47^{\circ} = 29,64^{\circ}$

2. Tentukan Komponen Tapis Penala Tunggal

$Q_2 = P \operatorname{tg} \theta_2$

= 3,10 MW . tg (11,47⁰)

$Q_2 = 0,63 \text{ MVAR}$

$Q_c = Q_1 - Q_2 = 1,36 - 0,6 = 0,76 \text{ MW}$

$I_c = \frac{Q_c}{V_{L-L}} = \frac{0,76 \text{ MW}}{20 \text{ KV}} = 38 \text{ Ampere}$

$X_c = \frac{V_{L-L}}{I_c} = \frac{20 \text{ kV}}{38} = 526,32 \text{ Ohm}$

$X_c = \frac{V_{L-L}}{I_c} = \frac{20 \text{ kV}}{38} = 526,32 \text{ Ohm}$

$X_L = \frac{X_c}{h^2} = \frac{526,32}{11^2} = 4,35 \text{ Ohm}$

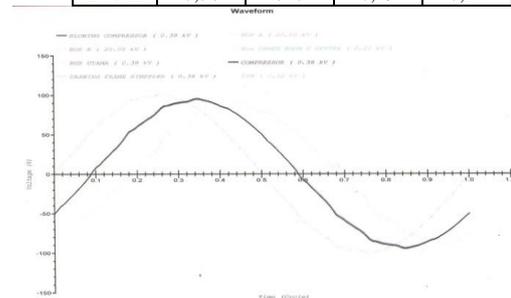
$R = \frac{X_L}{Q} = \frac{4,35}{40} = 0,11 \text{ Ohm}$

Analisis Data dengan Simulasi Program ETAP Setelah Pemasangan Tapis

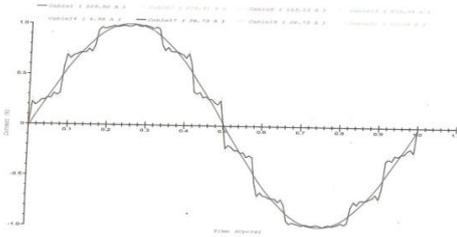
Data dalam penelitian ini diperoleh dari hasil simulasi program ETAP. Data hasil simulasi program disajikan dalam tabel (1) dan (2). terlihat bahwa *Total Harmonic Distortion* (THD) pada masing-masing bus setelah tapis dipasang mengalami pengurangan. Gelombang harmonik arus dan tegangan diperlihatkan oleh gambar (4) sampai (5).

Tabel 2. Hasil Simulasi Setelah Dipasang Tapis

Bus	Teg V (kV)	Arus I (A)	Aliran Daya		Faktor daya Total (%)
			(Mw)	(Mvar)	
Bus A	20	94	3,10	1,36	91,57
Bus B	20	94	3,10	1,36	91,57
Bus C	0,38	471	0,29	0,03	99,41
Bus D	0,22	378	0,13	0,02	99,03
Bus E	0,38	283	0,16	0,08	90,24
Bus F	0,38	328	0,18	0,09	88,90
Bus G	0,22	549	0,18	0,05	95,89
Bus H	0,38	509	0,29	0,14	90,49
Bus I	0,38	204	0,12	0,03	97,38
Bus J	0,38	153	0,09	0,02	98,12
Bus K	0,38	873	0,49	0,24	90,02



Gambar 4. Gelombang Harmonik Tegangan Setelah Dipasang Tapis



Gambar 5. Gelombang Harmonik Arus Setelah Dipasang Tapis

Perbandingan Analisa Data dengan Simulasi Program ETAP Sebelum dan Setelah Pemasangan Tapis

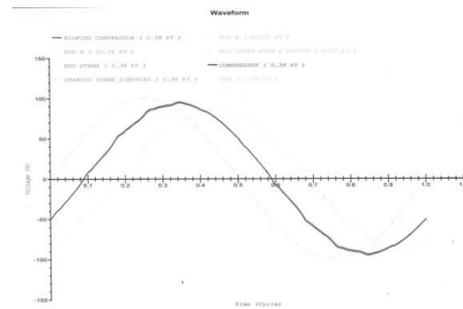
Dari tabel 3 terlihat bahwa pada kondisi dimana tapis setelah dipasang *Total Harmonic Distortion* (THD) mengalami penurunan. Selain mengurangi THD pada masing-masing bus juga memperbaiki daya jaringan yang ditunjukkan pada tabel 4). Perbandingan bentuk gelombang harmonik arus dan harmonik tegangan sebelum dipasang tapis dan setelah dipasang tapis untuk masing-masing bus ditunjukkan oleh gambar (6) sampai (7).

Tabel 3. Hasil Penelitian Besarnya THD Tanpa dan Dengan Tapis

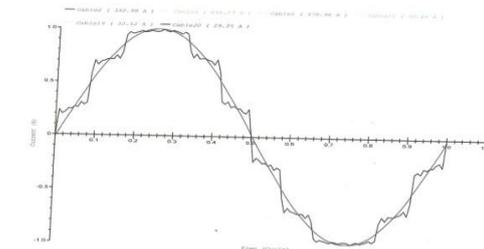
BUS	THD(%)				Ket
	THD _v		THD _i		
	Tanpa Tapis	Dgn Tapis	Tanpa Tapis	Dgn Tapis	
A	2,62	1,32	0,1	0,06	Turun
B	2,63	1,32	0,1	0,06	Turun
C	2,93	1,46	0,78	0,87	Turun
D	12,78	4,04	17,78	1,66	Turun
F	2,92	1,47	0,59	0,36	Turun
G	2,92	1,47	0,54	0,33	Turun
H	13,89	3,90	3,92	6,35	Turun
I	2,93	1,47	0,7	0,43	Turun
J	2,93	1,47	0,59	0,75	Turun
K	3,01	1,49	0,57	0,79	Turun

Tabel 4. Perbandingan Daya Tanpa Tapis dan Dengan Tapis

Bus	Daya					
	Tanpa Tapis			Dengan Tapis		
	P MW	Q MVAR	Pf %	P MW	Q MVAR	Pf %
A	2,85	1,59	87,3	3,1	1,36	91,57
B	2,85	1,59	87,3	3,1	1,36	91,57
C	0,22	0,1	90,3	0,29	0,03	99,41
D	0,09	0,05	87,3	0,13	0,02	99,03
F	0,16	0,08	90,2	0,16	0,08	90,24
G	0,18	0,09	88,9	0,18	0,09	88,9
H	0,18	0,07	92,7	0,18	0,05	95,89
I	0,29	0,14	90,5	0,29	0,14	90,49
J	0,08	0,05	83,8	0,12	0,03	97,38
K	0,06	0,04	84,7	0,09	0,02	98,12



Gambar 6 Gelombang Harmonik Tegangan Setelah Dipasang Tapis



Gambar 7. Gelombang Harmonik Arus Setelah Dipasang Tapis

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang telah dikemukakan pada bab sebelumnya mengenai reduksi *Total Harmonic Distortion* (THD) terhadap perbaikan kualitas daya pada untai 3 fase 4 kawat, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- 1) THD_v total rata-rata penurunannya 39,41% dan untuk THD_i total rata-rata penurunannya 22,02 %
- 2) Perbaikan kualitas daya naik dengan total rata-rata 9,77%
- 3) Perbaikan atau penaikan faktor daya beban dengan total rata-rata 6,75%

DAFTAR PUSTAKA

Arrilangga J., Bradley, D.A, Bodger, P S, 1985, *Power System Harmonic*, John Willey & Sons, New York.
 IEEE Std. 519-1992., 1994, *IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converter*. Internet.
 M.Isnaeni B.S., 2000, *Pengurangan Arus Harmonik Netral Pada Untai 3 Fase 4 Kawat Berbeban Lampu Fluoresen*, Tesis, UGM Yogyakarta.
 Ort Meyer.,dkk, 1985, *Pengaruh Adanya Komponen Harmonik Pada Sistem Tenaga Listrik*.
 Penangsang O., 2002, *Faktor Daya dan Harmonisa pada Sistem Kelistrikan yang Mengandung Harmonisa*, Tutorial SSTE, ITS Surabaya.
 Roger C. Dugan., Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, New York.