

STUDI IMPLEMENTASI FILTER PASIF DALAM PENGURANGAN HARMONIK ARUS PADA PENGENDALI TEGANGAN ARUS SEARAH (RECTIFIER)

Sujito

Abstrak: Peralatan elektronika daya banyak digunakan pada aplikasi *drive system* pada industri untuk mengendalikan tegangan arus searah, merupakan beban tidak linear dan merupakan sumber harmonik. Mengacu pada karakteristik beban tidak linear peralatan zat padat pengkonversi daya, maka arus harmonik akan diinjeksikan ke dalam sistem tenaga, sehingga mengakibatkan distorsi harmonik tegangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui watak arus dan tegangan harmonik, menganalisa THD tegangan dan arus, dan menentukan parameter tapis pasif pelewat rendah yang digunakan untuk mengurangi arus dan tegangan harmonik pada *rectifier*. Penelitian ini dilakukan secara eksperimen di laboratorium dengan tiga kondisi pengamatan, yaitu mengubah tegangan keluaran pada kondisi berbeban dan tanpa beban, dan mengubah arus beban *rectifier*. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pada kondisi tegangan keluaran berubah tanpa beban, tegangan harmonik tertinggi pada orde ke-3 sedangkan arus harmonik tertinggi pada orde ke-5. Pada kondisi tegangan keluaran berubah berbeban dan arus beban berubah tegangan harmonik tertinggi pada orde ke-5 sedangkan arus harmonik pada orde ke-2. Pemasangan tapis pasif pelewat rendah dengan nilai induktans 0.6278 Henry dan tahanan dalam 8.145 Ohm dan kapasitans 4 mikrofard dapat mengurangi THD tegangan dari 0.007% sampai 0.566 % dan THD arus dari 5.49% sampai 59.616%.

Kata kunci: Harmonik, Penyearah, Beban non-linear, Tapis Pasif

Pengurangan harmonik dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain pemasangan filter, baik filter aktif maupun pasif dan injeksi harmonik. Sumber utama harmonik dalam sistem tenaga adalah beban non linear. Beban non-linear menggambarkan arus non-sinusoidal ketika tegangan sinusoidal diaplikasikan. Beban non-linear di golongkan atas tiga tipe yaitu: (i) peralatan elektronika daya seperti konverter, (ii) peralatan yang menimbulkan busur api (*arcing devices*) seperti *arc furnaces* dan lamp *fluorescent*, dan (iii) peralatan dengan satu inti ferromagnetik (IEEE 519-1992).

Mengacu pada karakteristik beban taklinear peralatan zat padat pengkonversi daya (*solid state power conversion equipment*), maka arus harmonik akan diinjeksikan ke dalam sistem tenaga, sehingga mengakibatkan distorsi harmonik tegangan (*voltage harmonic distortion*). Arus harmonik akan mengakibatkan distorsi bentuk gelombang tegangan sinusoidal, akibatnya banyak kerugian yang akan diderita. Peran teknologi elektronika daya dalam industri modern sangat besar, baik pada aplikasi *drive system* pada industri-industri, apli-

kasi rumah tangga maupun pada sistem tenaga listrik. Pada peralatan elektronika saat ini hampir selalu terdapat rangkaian penyearah, inverter ataupun rangkaian elektronika daya lainnya. Penggunaan peralatan ini dikenal dengan beban nonlinear.

Rectifier

Rectifier merupakan salah satu peralatan pengkonversi bentuk tegangan, yaitu dari tegangan ac ke bentuk tegangan dc. *Rectifier* yang digunakan pada penelitian merupakan pengubah bentuk tegangan arus bolak-balik menjadi bentuk tegangan arus searah enam pulsa setengah gelombang yang terdiri dari 3 buah Thyristor dio da. *Rectifier* ini digunakan untuk pengendalian DC (*DC Drive*) dengan sumber daya yang digunakan merupakan sistem daya ac yang disearahkan, sehingga arus harmonik yang ditimbulkan oleh konverter ini akan diinjeksikan pada jaringan ac. Penggunaan thyristor pada masing-masing fasa pada pengendali DC (*DC Drive*) akan menghasilkan pergeseran level kandungan harmonik pada beban induktif, yang dapat be

rupa harmonik orde genap atau arus searah (Arrilaga, dkk, 1985).

Komponen Harmonik pada Pengendali Tegangan DC

Penyearah setengah gelombang pada gambar 1 umumnya mempunyai induktans lebih banyak pada sisi dc dari pada sisi ac. Arus searah merupakan arus konstans, sehingga pada sistem ini sumber tegangan harmonik pada sisi dc dan arus harmonik pada sisi ac. Penyearah setengah gelombang enam pulsa tiga fasa nilai $w = 2\pi/3$ pada persamaan (2.1) dan menyisipkan arus searah I_d . Penyajian arus ac pada fasa ‘R’ pada daerah frekuensi adalah :

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{p} I_d \left(\cos w + \frac{1}{7} \cos 5w + \frac{1}{13} \cos 9w + \frac{1}{19} \cos 13w + \dots \right) \quad (1)$$

Arus harmonik secara teoritis, dengan jumlah (p) pulsa dapat dinyatakan dengan $pk \pm 1$ dan magnitudenya berkurang sebanding dengan bertambahnya orde harmonik. Arus harmonik ini terdiri dari komponen urutan positif ($pk+1$) dan komponen urutan negatif ($pk-1$). Umumnya harmonik di atas orde 49 diabaikan karena amplitudonya kecil (Arrilaga, dkk, 1985).

Tegangan Harmonik

Bentuk gelombang tegangan yang tidak sinusoidal murni (mengandung harmonik) pada kondisi mantap (*steady state*), maka tegangan dapat direpresentasikan oleh deret Fourier sebagai berikut (Aysen Arsoy, dkk):

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} v_n \sin(nwt + \Phi_n) \quad (2)$$

dengan bagian dc biasanya diabaikan untuk kesederhanaan. Nilai v_n adalah nilai *rms* untuk harmonik orde ke- h pada masing-masing tegangan. Dengan mengaplikasikan hubungan orthogonal, maka nilai *rms* tegangan, maka diperoleh persamaan berikut:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} v_n^2} \quad (3)$$

dimana n merupakan orde harmonik ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Arus Harmonik

Gelombang arus pada saat ada harmonik dapat ditulis dalam bentuk persamaan berikut (Aysen Arsoy, dkk)

$$i(t) = I_o + \sum_{n=1}^{\infty} (I_n \sin(nwt + \Phi_n)) \quad (4)$$

dengan :

$n = 1, 2, 3, \dots$

$I_n =$ Koefisien komponen harmonik ke- n

$\omega = 2\pi f$: kecepatan sudut

$f =$ frekuensi

$\Phi_n =$ sudut fase komponen harmonik ke- n

1.1 Indeks Harmonik

Analisis harmonik terhadap kualitas tegangan dan arus ditentukan oleh nilai indeks harmonik, antara lain yaitu THD (*Total Harmonic Distortion*) dan TDD (*Total Demand Distortion*). Indeks harmonik tersebut digunakan untuk melukiskan pengaruh harmonik pada kompone sistem tenaga dan sistem komunikasi (Aysen Arsoy, dkk).

Total Harmonic Distortion (THD)

Total harmonic distortion didefinisikan sebagai perbandingan nilai *rms* komponen harmonik terhadap komponen dasar dan biasanya dinyatakan dalam persen (%). Indeks ini digunakan untuk mengukur penyimpangan (*deviation*) dari bentuk gelombang yang mengandung harmonik pada gelombang sinus sempurna dalam satu periode. Pada bentuk gelombang sinus sempurna pada frekuensi dasar, maka nilai THD adalah nol. (Aysen Arsoy, dkk).

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \% \quad (5)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \% \quad (6)$$

Persamaan (5) dan (6) merupakan persamaan untuk menentukan nilai THD tegangan dan THD arus (Aysen Arsoy, dkk; Dugan, dkk, 1996). Sedangkan sumbang-

an masing-masing komponen harmonik terhadap distorsi arus dinyatakan oleh *individual harmonic distortion* (IHD). Nilai IHD untuk harmonik tegangan dan arus pada orde ke- h didefinisikan sebagai V_h/V_1 dan I_h/I_1 .

Total Demand Distortion (TDD)

Total demand distortion (TDD) merupakan distorsi harmonik arus total yang secara umum dinyatakan sebagai berikut :

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (7)$$

dimana I_L merupakan arus beban maksimum yang dibutuhkan (*the maximum demand load current*), dalam 15 atau 30 menit pada frekuensi fundamental pada titik sambungan bersama (*the point of common coupling*, PCC).

Tapis Pasif Pelewat Rendah

Tapis pasif pelewat rendah merupakan tapis yang terdiri dari komponen resistan, induktans dan kapasitans yang dapat melewatkan frekuensi dibawah frekuensi *cut-off* dan menahan frekuensi diatas frekuensi *cut-off*. Gambar 2 memperlihatkan tipe tapis pelewat rendah LC dan RC. Pada tapis pasif tipe RL, nilai sinyal dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (8). Sedangkan pada tapis tipe RC, nilai sinyal keluaran dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (9) (David Iwin, 1996).

$$V_o = \left(\frac{1/j\omega C}{R + j\omega L + 1/j\omega C} \right) V_s \quad (8)$$

$$V_o = \left(\frac{1}{1 + j\omega RC} \right) \quad (9)$$

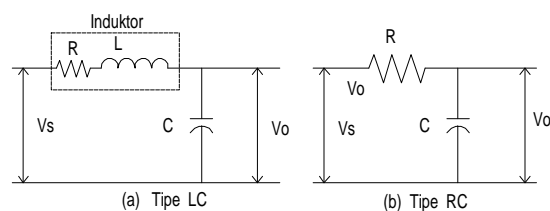
$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (10)$$

$$L = \frac{1}{\omega_o^2 C} \text{ H} \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{\omega_o^2 L} \text{ Farad} \quad (12)$$

dimana V_o merupakan sinyal keluaran tapis, sedangkan V_s merupakan sinyal masukan. Sedangkan tahanan R pada tapis pasif

pelewat rendah tipe LC merupakan tahanan dalam induktor.



Gambar 2. Tapis Pelewat Rendah

Kualitas tapis pada tipe LC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (10).

Pada tapis tipe LC, nilai L dan C ditentukan dengan terlebih dahulu menentukan nilai frekuensi *cut-off*, kemudian menentukan nilai parameter tapis dengan menggunakan persamaan (11) untuk menentukan induktansi atau (12) untuk menentukan nilai kapasitansi.

METODE

Pada penelitian ini ada tiga kondisi yang diamati, yaitu :

1. Tegangan keluaran *rectifier* berubah dalam kondisi tanpa beban.
2. Tegangan keluaran *rectifier* berubah dalam kondisi tanpa beban.
3. Arus beban *rectifier* berubah.

Tahapan penelitian sebagai berikut :

1. Pada masing-masing kondisi diteliti watak tegangan dan arus harmonik.
2. Menganalisa dan menghitung THD tegangan dan arus pada ketiga kondisi.
3. Mendesain tapis untuk mengurangi arus harmonik.

HASIL

Hasil penelitian berdasarkan metode yang digunakan diperlihatkan pada Tabel 1 sampai Tabel 9.

PEMBAHASAN

Pengujian Watak Harmonik *Rectifier* dengan Mengubah Tegangan Keluaran pada Kondisi Tanpa Beban

Pada kondisi tanpa beban dengan mengubah tegangan keluaran *rectifier*, se

belum dan sesudah dipasang tapis harmonik tegangan tertinggi terjadi pada orde ke-5 dan arus pada orde ke-3. Tabel 1 memperlihatkan nilai THD tegangan sebelum dan sesudah pemasangan tapis, dan tabel 2 untuk THD arus.

Penurunan nilai THD tegangan berkisar antara 0.008-0.091 % pada fase R, 0.012-0.259% pada fase S, dan 0.007-0.266% pada fase T. Penurunan THD arus berkisar antara 24.33-28.35% pada fase R, 5.49-7.78% pada fase S, dan 0.24.11-26.04% pada fase T. Tabel 3 memperlihatkan nilai penurunan THD tegangan dan arus untuk tegangan yang berbeda. Perubahan tegangan keluaran mempengaruhi nilai THD tegangan dan THD arus hal ini dikarenakan adanya perbedaan sudut penyulutan dan perubahan tegangan penyulutan pada gate thyristor pada setiap kenaikan tegangan *rectifier*.

Pengujian Watak Harmonik *Rectifier* dengan Mengubah Tegangan Keluaran pada Kondisi Tanpa Beban

Pada kondisi tanpa beban dengan mengubah tegangan keluaran *rectifier*, sebelum dan sesudah dipasang tapis harmonik tegangan tertinggi terjadi pada orde ke-5 dan arus pada orde ke-2. Pada kondisi tegangan keluaran berubah berbeban, di mana beban yang digunakan adalah motor DC, maka dapat diketahui bahwa telah terjadi pergeseran nilai komponen tertinggi pada arus harmonik dari kondisi tanpa beban.

Berdasarkan data yang diperoleh, maka THD tegangan dan arus untuk kondisi sebelum dan sesudah pemasangan tapis dapat dihitung. Tabel 4 memperlihatkan nilai THD tegangan dan tabel 5 untuk THD arus sebelum dan sesudah pemasangan tapis.

Nilai penurunan THD tegangan berkisar antara 0.070-0.336% pada fase R, 0.080-0.513% pada fase S, dan 0.252-0.566% pada fase T. Sedangkan penurun-

an THD arus berkisar antara 47.600-59.616% pada fase R, 41.720-52.832% pada fase S, dan 50.978-59.450% pada fase T.

Pergeseran komponen tertinggi harmonik arus dikarenakan sifat induktif pada sisi DC lebih dominan sehingga merubah nilai impedans sistem. Sedangkan perbedaan nilai THD tegangan dan THD arus dikarenakan perbedaan sudut penyulutan thyristor dan tegangan penyulutan pada gate thyristor.

Pengujian Watak Harmonik Ketika Arus Beban Berubah

Pada kondisi penelitian ini diperoleh data yang memperlihatkan bahwa sebelum dan sesudah pemasangan tapis harmonik tegangan tertinggi terjadi pada orde ke-5, sedangkan harmonik arus tertinggi terjadi pada orde ke-2.

Tabel 7 memperlihatkan nilai THD tegangan sebelum dan sesudah pemasangan tapis dan tabel 8 untuk THD arus. Pemasangan tapis dapat mengurangi nilai THD tegangan dan arus. Penurunan THD tegangan berkisar antara 0.649-0.831% pada fase R, 0.236-0.414% pada fase S, dan 0.120-0.587% pada fase T. Penurunan THD arus berkisar antara 32.12-35.72% pada fase R, 30.15-33.91% pada fase S, dan 34.50-38.37% pada fase T. Nilai penurunan THD tegangan dan arus untuk bermacam-macam arus beban ditampilkan pada tabel 9.

Tapis Pasif Pelewat Rendah

Pada penelitian ini digunakan tapis pasif pelewat rendah dengan frekuensi *cut-off* 100 Hz. Jenis tapis yang digunakan merupakan tapis LC dengan nilai induktans 0.6278 Henry, resistans dalam 8.145 Ohm dan kapasitans 4 mikroFarad. Perhitungan nilai parameter tapis diperoleh dengan cara terlebih dahulu menentukan nilai frekuensi *cutoff* dan nilai kapasitans kemudian menghitung nilai induktans dengan menggunakan persamaan (11).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada kondisi tegangan keluaran *rectifier* berubah tanpa beban sebelum dan sesudah pemasangan tapis komponen harmonik tegangan tertinggi terjadi pada orde ke-5 dan arus pada orde ke-3.
2. Pada kondisi tegangan keluaran *rectifier* berubah berbeban sebelum dan sesudah pemasangan tapis komponen harmonik tegangan tertinggi terjadi pada orde ke-5 dan arus pada orde ke-2.
3. Pada kondisi arus beban *rectifier* berubah sebelum dan sesudah pemasangan tapis komponen harmonik tegangan tertinggi terjadi pada orde ke-5 dan arus pada orde ke-2.
4. Pemasangan tapis pasif pelewat rendah dapat menurunkan nilai THD tegangan dan THD arus yang relatif besar. Pada kondisi tegangan *rectifier* berubah tanpa beban penurunan THD tegangan berkisar antara nilai 0.008-0.091% pada fase R, 0.012-0.259% pada fase S, dan 0.007-0.266% pada fase T, sedangkan penurunan THD arus berkisar antara nilai 24.33-28.35% pada fase R, 5.49-7.78% pada fase S, dan 24.11-26.04% pada fase T. Pada kondisi tegangan *rectifier* berubah berbeban, THD tegangan mengalami penurunan berkisar antara nilai 0.070-0.336% pada fase R, 0.080-0.513% pada fase S, dan 0.252-0.566% pada fase T, sedangkan THD arus berkisar antara nilai 47.60-59.616% pada fase R, 41.72-52.832% pada fase S, dan 50.978-59.450% pada fase T. Sedangkan pada kondisi arus beban *rectifier* berubah THD tegangan mengalami penurunan antara nilai 0.649-0.831% pada fase R, 0.236-

0.414% pada fase S, dan 0.120-0.587% pada fase T, sedangkan THD arus mengalami penurunan antara nilai 32.12-35.72% pada fase R, 30.15-33.91% pada fase S, dan 34.50-38.37% pada fase T.

Daftar Pustaka

- Arrilaga, J., Bradley, D.A., Bodger, P.S., 1985, *Power System Harmonic*, John Wiley & Sons, Norwich
- Aysen Arsoy, S, Mark halpin, Yilu liu, Paulo F. Ribeiro, ..., *Modeling and Simulation of Power System Harmonic*, IEEE Product # EC 102, ISBN 0-7803-4597-5
- Chi-Jui Wu, Jung-Chen Chaing, Ching-Jung Liao, Shih-Shong Yen, Jin-Shyr Yang, Tzong-Yih Guo, 1998, *Investigation and Mitigation of Harmonic Amplification Problem Caused by Single-tuned Filter*, IEEE *Transaction on Power Delivery*, Vol 13, No. 3, July 1998, New York USA
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Wayne Beaty, H., 1996, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill Companies, USA
- David Irwin, J 1996, *Basic Engineering Circuit Analysis*, Prentice-Hall International. Inc, USA
- Edward M. Gulachenski, 2000, *Advanced Power Quality Analysis (Self-Study Course)*, IEEE self-study course, Inc, USA
- Gonen, T., 1987, *Electric Power Distribution System Engineering*, Terbitan ke-2, McGraw-Hill Book Company, Singapore
- Grotzbach M, Ried Ch, *Investigation of AC/DC Converter Harmonics by an Analytical Based Time-Discrete Approach*, IEEE *Transactions on Power Delivery*, vol. 12, No.2, April 1997

IEEE, 1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems* (IEE Std 519-1992), IEEE Inc., New York, NY 10017– 2394, USA

IEEE, 1995, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* (IEEE std 1159-1995), IEEE Inc., 345 East 47th street, New York, NY 10017– 2394, USA

IEEE, 1997. *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*, (IEEE Std 399-1997) IEEE Inc., 345 East 47th street, New York, NY 10017– 2394, USA

Isnaeni, M. BS., 2000, *Pengurangan Arus Harmonik Netral pada Untai 3 Fasa Kawat Berbeban Lampu Fluoresen*, Tesis, Program Pascasarjana Program Studi Teknik Elektro UGM, Yogyakarta

Kreyszig, E., 1993, *Matematika Teknik Lanjut*, Edisi ke-6 Buku I, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta

Laurence Snaider, Edward Lo, Terrance Lai, 1999, *Harmonic Simulation of MTR Traction System by EMTP*, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive System, PEDS'99, July 1999. Hong Kong

Mielczarski W, Lawrence W B, Szczepanik J, *Field Tests of a Filter to Reduced Harmonic Currents in a Three Phase Fluorescent Lamp System*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999

Nababan, S., 2001, *Tapis Paralel Pasif untuk Mengurangi Distorsi Harmonik Beban Taklinear; Pemodelan, Analisis, dan Desain*, Tesis, Program Pascasarjana Program Studi Teknik Elektro UGM, Yogyakarta

Smith B. C, Watson N. R, Wood A. R, Arrilaga J, *A sequence components model of ac/dc converter in the harmonic domain*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997

Tabel 1. THD_v Sebelum dan Sesudah Pemasangan Tapis untuk Berbagai macam Tegangan Keluaran Rectifier Pada Kondisi Tanpa Beban

Tegangan Keluaran Rectifier	THD _v Sebelum Pemasangan Tapis (%)			THD _v Sesudah P (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
40	2.819	2.974	2.380	2.759	2.728	2.300
50	2.807	2.769	2.420	2.752	2.723	2.067
60	2.766	2.784	2.300	2.743	2.632	2.245
70	2.721	2.737	2.280	2.703	2.689	2.169
80	2.734	2.777	2.296	2.703	2.721	2.209
90	2.807	2.795	2.355	2.795	2.752	2.235
100	2.774	2.835	2.376	2.712	2.823	2.276
110	2.782	3.092	2.548	2.699	2.976	2.421
120	2.836	2.884	2.704	2.745	2.798	2.697
130	2.806	2.753	2.395	2.785	2.701	2.287
140	2.810	2.898	2.399	2.734	2.794	2.278
150	2.820	2.661	2.520	2.784	2.639	2.431
160	2.806	2.782	2.367	2.798	2.789	2.298
170	2.832	2.768	2.520	2.811	2.734	2.254
180	2.822	2.854	2.355	2.802	2.790	2.307

Tabel 2. THD_I Sebelum dan Sesudah Pemasangan Tapis untuk Berbagai macam Tegangan Keluaran *Rectifier* Pada Kondisi Tanpa Beban

Tegangan Keluaran <i>Rectifier</i>	THD _I Sebelum Pemasangan Tapis (%)			THD _I Sesudah Pemasangan Tapis (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
40	44.65	23.25	41.63	16.37	15.47	15.59
50	43.97	24.13	41.13	17.32	16.74	16.37
60	44.12	23.59	41.56	17.85	17.33	16.70
70	44.17	23.06	41.10	16.96	16.71	16.50
80	45.32	22.58	41.26	16.97	16.47	16.18
90	44.74	22.81	41.31	17.28	16.61	16.56
100	43.33	23.60	41.16	16.83	16.19	16.22
110	43.85	23.20	41.24	17.04	16.45	16.58
120	43.69	22.97	41.67	17.30	16.71	16.66
130	44.11	22.58	41.96	17.51	17.02	16.81
140	43.94	23.24	41.55	17.80	17.35	17.03
150	42.32	23.60	41.83	17.99	17.15	17.01
160	43.78	23.19	41.99	18.03	17.45	17.49
170	43.81	23.09	42.06	18.19	17.60	17.47
180	43.54	23.58	41.35	18.05	17.70	17.24
190	43.01	23.40	41.82	17.74	17.54	17.18

Tabel 3. Penurunan THD_V dan THD_I Untuk Berbagai macam Tegangan Keluaran *rectifier* Sesudah Pemasangan Filter

Tegangan Keluaran <i>Rectifier</i>	Penurunan THD _V (%)			Penurunan THD _I (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
40	0.060	0.246	0.080	28.28	7.78	26.04
50	0.055	0.046	0.353	26.65	7.39	24.37
60	0.023	0.152	0.055	26.27	6.26	24.86
70	0.022	0.048	0.111	27.21	6.35	24.60
80	0.031	0.056	0.087	28.35	6.11	25.08
90	0.012	0.043	0.120	27.46	6.20	24.75
100	0.062	0.012	0.100	26.50	7.41	24.94
110	0.082	0.116	0.127	26.81	6.75	24.66
120	0.091	0.183	0.007	26.39	6.26	25.01
130	0.021	0.052	0.108	26.60	5.56	25.15
140	0.076	0.259	0.121	26.14	5.89	24.52
150	0.036	0.022	0.089	24.33	6.45	24.82
160	0.008	0.048	0.069	25.75	5.74	24.50
170	0.021	0.034	0.266	25.62	5.49	24.59
180	0.020	0.064	0.048	25.49	5.88	24.11
190	0.035	0.033	0.148	25.27	5.86	24.64

Tabel 4. Nilai THD Tegangan Harmonik untuk Berbagai macam Tegangan Keluaran *Rectifier* pada Kondisi Berbeban

Tegangan Keluaran <i>Rectifier</i>	THD Tegangan Sebelum Ditapis (%)			THD Tegangan Sesudah Ditapis (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
17	2.015	2.414	2.600	1.931	2.334	2.348
63	2.040	2.545	2.670	1.970	2.350	2.331
110	2.168	2.671	2.738	1.983	2.480	2.172
148	2.019	2.470	2.598	1.914	2.309	2.302
170	2.130	2.650	2.850	1.956	2.463	2.290
185	2.333	2.909	2.727	1.997	2.396	2.402
190	2.334	2.720	2.802	1.996	2.435	2.536

Tabel 5. Nilai THD Arus untuk Berbagai macam Tegangan Keluaran *Rectifier* pada Kondisi Berbeban

Tegangan Keluaran <i>Rectifier</i>	THD Arus Sebelum Ditapis (%)			THD Arus Sesudah Ditapis (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
17	67.04	60.36	66.76	7.424	7.528	7.326
63	58.71	55.96	64.09	7.130	7.430	7.485
110	60.13	56.59	65.92	7.151	7.429	7.499
148	64.21	58.09	67.23	7.169	7.500	7.780
170	65.77	56.30	65.10	7.191	7.189	7.510
185	62.79	54.41	63.23	7.145	7.230	7.570
190	54.74	49.00	58.15	7.140	7.280	7.172

Tabel 6. Penurunan THD tegangan dan THD arus untuk Berbagai macam Tegangan Keluaran *Rectifier* pada Kondisi Berbeban

Tegangan Keluaran <i>Rectifier</i>	THD Tegangan (%)			THD Arus (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
17	0.084	0.080	0.252	59.616	52.832	59.434
63	0.070	0.195	0.339	51.580	48.530	56.605
110	0.185	0.191	0.566	52.979	49.061	58.421
148	0.105	0.170	0.296	57.041	50.590	59.450
170	0.174	0.187	0.560	58.579	49.111	57.590
185	0.336	0.513	0.325	55.645	47.180	55.66
190	0.330	0.285	0.266	47.600	41.720	50.978

Tabel 7. THD Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan Tapis untuk Arus Beban yang berbeda

Arus Beban <i>Rectifier</i> (A)	THD Tegangan Sebelum Ditapis (%)			THD Tegangan Sesudah Ditapis (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
1.32	1.982	2.445	2.340	1.202	2.156	2.202
1.65	2.116	2.594	2.421	1.285	2.212	2.107
1.7	2.014	2.533	2.541	1.327	2.297	2.072
1.8	2.048	2.680	2.370	1.399	2.414	2.075
1.9	2.055	2.602	2.597	1.294	2.322	2.010
2	2.117	2.633	2.466	1.318	2.219	2.033

Tabel 8. THD Arus Sebelum dan Sesudah Pemasangan Tapis untuk Arus Beban yang berbeda

Arus Beban <i>Rectifier</i> (A)	THD Arus Sebelum Ditapis (%)			THD Arus Sesudah Ditapis (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
1.32	39.99	39.46	44.02	4.260	5.550	5.650
1.65	38.36	37.46	41.73	4.660	5.700	5.880
1.7	38.08	37.54	41.24	5.070	6.080	6.040
1.8	37.83	37.33	40.83	5.460	6.150	6.330
1.9	37.79	36.58	40.64	5.020	6.080	6.070
2	37.67	36.56	40.86	5.550	6.410	6.290

Tabel 9. Penurunan THD Arus dan THD Tegangan Sesudah Pemasangan Tapis untuk Arus Beban yang berbeda

Arus Beban <i>Rectifier</i> (A)	Penurunan THD Tegangan (%)			Penurunan THD Arus (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
1.32	0.780	0.289	0.120	35.73	33.91	38.37
1.65	0.831	0.382	0.314	33.70	31.76	35.85
1.7	0.687	0.236	0.469	33.01	31.46	35.20
1.8	0.649	0.266	0.295	32.37	31.18	34.50
1.9	0.761	0.280	0.587	32.77	30.50	34.57
2	0.799	0.414	0.433	32.12	30.15	34.57