

Shunt Active Power Filter untuk Meredam Harmonisa Beban Non-Linear Satu Fasa

Fahmi Naufala Mumtaz¹, Indhana Sudiharto², Ony Asrarul Qudsi³

Jurusan Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya 60111

¹fahminaufala20@gmail.com

²indhana@eepis-its.edu

³ony@pens.ac.id

Intisari — Penggunaan beban non-linear semakin umum digunakan seiring berkembangnya teknologi yang menerapkan komponen elektronika daya di dalamnya. Beban non-linear dapat menimbulkan harmonisa pada jaringan listrik dan mengakibatkan penurunan kualitas daya. Cara yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini salah satunya adalah dengan menggunakan *Active Power Filter*. Pada penelitian ini suatu *Shunt Active Power Filter* (SAPF) untuk sistem satu fasa didesain dan disimulasikan untuk meredam harmonisa yang timbul karena penggunaan beban non-linear satu fasa yang sering digunakan di skala rumah tangga. Teori ip-iq dan kontrol PI untuk tegangan DC digunakan untuk mendapatkan referensi arus kompensasi. Pada simulasi, beban yang digunakan berupa penyearah dioda yang dihubungkan ke beban RL seri. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum pemasangan SAPF, nilai THD arus sumber mencapai 32.63%. Sedangkan setelah pemasangan SAPF nilai THD arus sumber yang dihasilkan hanya sebesar 4.47%. SAPF yang disimulasikan memiliki kemampuan peredaman harmonisa sebesar 28.16% dan dapat memenuhi standar yang ditoleransi oleh IEEE 519-2014.

Kata kunci — Beban non-linear, harmonisa, kualitas daya, teori ip-iq, kontrol PI tegangan DC, *shunt active power filter*.

Abstract — Uses of non-linear load are increasing in line with the development of technologies that apply power electronic components. The non-linear load can cause harmonics and degradation of power quality in an electric grid. There is a way that can be used to overcome these problems, it is by using an active power filter. In this research, a shunt active power filter (SAPF) for a single-phase system was designed and simulated to reduce the harmonics that are frequently produced by using a single-phase non-linear load on the household scale. Ip-iq theory and PI control for dc-link voltage are used to get a current compensation reference. In the simulations, a diode rectifier that is connected to the RL series used as a non-linear load. The results show that before the installation of the SAPF, the THD value of source current was at 32.63%. However, after the installation of a SAPF, the THD value of source current is only 4.47%. The simulated SAPF could reduce harmonic up to 28.16% and could meet the standards tolerated by IEEE 519-2014.

Keywords — Non-linear load, harmonic, power quality, ip-iq theory, PI control dc-link voltage, *shunt active power filter*.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi terkini telah meningkatkan penggunaan perangkat elektronika daya. Peralatan rumah tangga seperti lampu LED, oven, televisi, *power supply* komputer, pengisi daya gawai, AC, pompa air, dll adalah beberapa contoh aplikasi perangkat elektronika daya dan termasuk sebagai beban non-linier.

Sifat beban non-linier adalah menghasilkan harmonisa. Dalam penelitian [1] yang menggunakan beban berupa lampu LHE dan lampu LED yang masing-masing memiliki *rating* daya sebesar 36W dan 13W memperlihatkan bahwa nilai THD_i yang dihasilkan besarnya mencapai >100%. Selain itu, penelitian [2] menunjukkan bahwa terjadi distorsi yang signifikan pada arus karena penggunaan komputer, peralatan elektronik, dan penerangan CFL di area perumahan dan komersial. Kehadiran harmonisa dalam sistem dapat berdampak negatif pada sistem tenaga dan dapat berpotensi merusak peralatan. Harmonisa mengurangi kualitas daya dengan meningkatkan daya reaktif dan *total harmonic distortion* (THD). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa masalah harmonisa pada beban non-linear satu fasa dapat diatasi dengan menggunakan *Active Power Filter* (APF) satu fasa berbasis *Voltage Source Converter* (VSC) dengan penyimpanan energi kapasitif[3]. APF satu fasa (dua kabel) memiliki berbagai konfigurasi dan strategi kontrol untuk memenuhi kebutuhan beban non-linier satu fasa[3]. Salah satunya yang diusulkan dalam artikel ini adalah jenis *shunt active power filter* (SAPF). Pada tahun 1971, Sasaki dan Machida mengusulkan konsep SAPF untuk menghilangkan harmonisa arus dalam sistem tenaga[4]. Tujuan umum SAPF adalah untuk mengurangi distorsi harmonisa yang disebabkan oleh beban non-linier dan meningkatkan faktor daya untuk beban reaktif. Kinerja efisien dari SAPF pada dasarnya sangat bergantung pada dua area kontrol penting yaitu

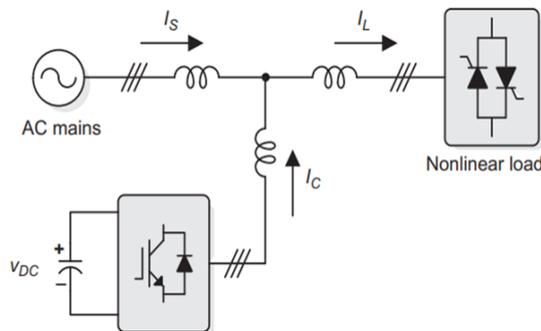
ekstraksi kompensasi arus referensi dan pengontrol arus untuk PWM[5]. Dalam komputasi kompensasi arus referensi memerlukan proses dekomposisi arus terdistorsi yang dihasilkan oleh beban non-linier dan menyoroti komponen yang tidak berguna[6].

Pada tahun 1983 Akagi H mengajukan teori daya reaktif sesaat tiga fasa (teori p-q) yang berhasil diterapkan dalam deteksi harmonisa dan reaktif untuk rangkaian tiga fasa. Tetapi algoritmanya rumit. Metode kedua, algoritma konstruksi dua fasa lebih sederhana karena mengubah komponen arus satu fasa secara langsung menjadi dua fasa[7]. Metode yang dikemukakan oleh Akagi merupakan pengembangan dari teori daya reaktif sesaat (α - β) sebelumnya. Transformasi Clarke diterapkan untuk mengubah besaran koordinat tiga fasa menjadi besaran ekuivalen dua fasa α - β [6]. Sebuah teori p-q yang diterapkan untuk sistem satu-fasa telah diusulkan dalam artikel [8] dan akan digunakan untuk mendapatkan referensi arus kompensasi dalam simulasi dengan beban non-linier dalam artikel ini. Simulasi ini bertujuan untuk mereduksi harmonisa sehingga memenuhi standar yang ditoleransi oleh IEEE 519.

II. METODE PENELITIAN

A. Active Power Filter

Suatu *active power filter* (APF) dapat diklasifikasikan berdasarkan topologinya seperti *shunt*, *series*, atau *hybrid*. Dalam artikel [9] menyebutkan bahwa *Series Active Power Filter* untuk beban non-linear satu fasa digunakan untuk meredam harmonisa pada tegangan. *Shunt Active Power Filter* (SAPF) yang disimulasikan dalam artikel ini banyak digunakan untuk mengkompensasi harmonisa arus, daya reaktif, dan arus beban tidak seimbang[10]. Topologi rangkaian SAPF ditunjukkan pada Gambar 1.



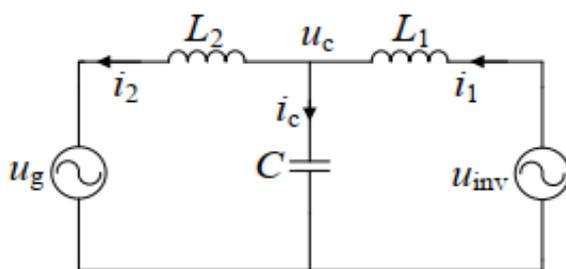
Gbr.1 Topologi rangkaian *Shunt Active Power Filter* (SAPF)

Secara umum, SAPF menggunakan *Voltage Source Converter* (VSC) yang dikontrol dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk menginjeksikan arus kompensasi pada *point of common coupling* (PCC). SAPF harus menginjeksikan komponen reaktif dan harmonisa kepada arus beban dengan tujuan untuk meredam harmonisa pada arus sumber dan menjadikannya sefasa dengan tegangan sumber sesuai dengan persamaan:

$$i_f(t) = i_L(t) - i_s(t) \quad (1)$$

B. LCL Interface Filter

VSC yang digunakan dalam SAPF dapat menghasilkan komponen harmonisa yang menyebabkan riak pada arus keluarannya sehingga diperlukan LCL filter untuk menghilangkan harmonisa frekuensi tinggi[11].



Gbr.2 Rangkaian *LCL Interface Filter*

Struktur dari LCL filter untuk SAPF satu fasa ditunjukkan pada Gambar 2 di atas. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa LCL filter terdiri dari dua induktor: L_1 , L_2 dan sebuah kapasitor: C .

L_1 adalah induktor di sisi keluaran SAPF, yang didesain untuk meredam riak arus keluaran. Kemudian L_2 adalah induktor untuk sisi *grid* sistem. Sedangkan C adalah filter kapasitor untuk meredam harmonisa frekuensi tinggi yang disebabkan oleh arus induktor L_1 .

C. Ekstraksi Harmonisa

Proses ekstraksi harmonisa dapat dilakukan dengan metode dq[12] dan metode i_p - i_q [5]. Dalam penelitian ini menggunakan metode i_p - i_q karena tegangan sumber yang tidak terdistorsi dan kontrol SAPF disinkronisasi dengan *phase-locked loop* (PLL) untuk menyamakan frekuensi. Keluaran dari PLL berupa nilai \cos dan \sin dari frekuensi sinyal tiap satuan waktu (ωt). Dimana nilai tersebut yang digunakan sebagai pengali i_α dan i_β sehingga dapat diperoleh nilai i_p - i_q yang bila ditulis ke dalam persamaan menjadi:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Nilai i_p dan i_q masih mengandung komponen AC yang merepresentasikan nilai harmonisa arus aktif dan reaktif. Diperlukan penggunaan *low-pass filter* untuk menghilangkan komponen AC, sehingga tersisa komponen DC yang merepresentasikan nilai fundamental dari arus aktif dan reaktif pada komponen arus terdistorsi. Sinyal untuk arus referensi hanya dengan memerlukan komponen DC berupa arus I_p dan $-I_q$.

Hal ini karena secara ideal arus sumber sudah menyuplai nilai aktif fundamental dari permintaan beban, sedangkan untuk nilai harmonisa dan reaktifnya akan dipenuhi oleh SAPF. Besarnya nilai arus fundamental diperoleh dari persamaan berikut:

$$i_{fund} = [\sin\omega t \quad -\cos\omega t] [I_p \quad -I_q] \quad (3)$$

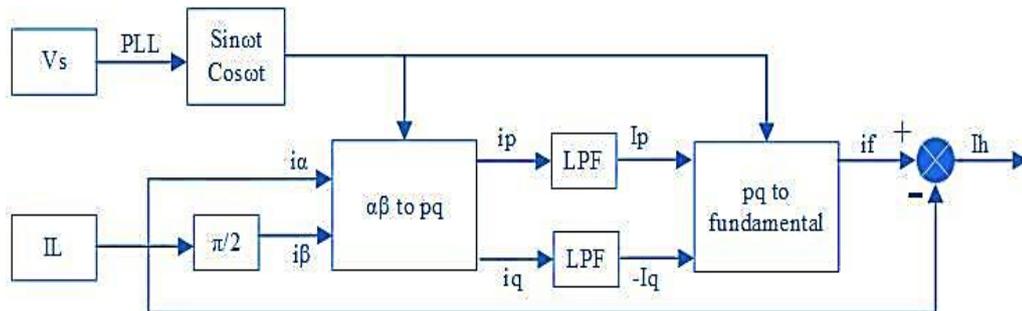
Arus harmonisa dapat dihitung dengan:

$$i_h = i_L - i_{fund} \quad (4)$$

$$i_q = I_q \cos \omega t \quad (5)$$

Sedangkan untuk nilai arus reaktif diperoleh dari persamaan berikut:

Maka proses ekstraksi harmonisa dapat disederhanakan ke dalam blok diagram seperti pada Gambar 3 berikut ini:



Gbr.3 Blok Diagram Ekstraksi Harmonisa

Kemudian arus harmonisa (I_h) di-*summing* dengan i_{DC} keluaran kontrol-PI tegangan untuk menghasilkan nilai referensi arus. Nilai referensi arus kemudian di-*subtract* dengan arus keluaran *shunt active power filter* yang mengalir untuk menghasilkan nilai *error* yang kemudian digunakan sebagai masukan *PWM current control*.

D. Kontrol Tegangan DC

Tegangan bus DC yang terdapat pada rangkaian *shunt active power filter* nilainya perlu dijaga konstan sesuai dengan hasil perencanaan. Namun ketika terdapat daya aktif yang tidak seimbang karena harmonisa arus, maka terdapat deviasi tegangan (ΔV_{DC}). Kontrol tegangan merespons untuk menyesuaikan amplitudo arus aktif jaringan secara tepat serta memulihkan tegangan bus DC ke level tegangan referensi.

Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk menjaga nilai tegangan DC tetap konstan. Dalam penelitian [13] menggunakan kontrol *fuzzy*, sedangkan dalam penelitian ini digunakan suatu kontrol-PI. Keluaran kontrol-PI tegangan dapat menentukan jumlah ΔV_{DC} yang sesuai dengan amplitudo arus, kemudian disebut i_{DC} . Nilai i_{DC} dalam proses perhitungan arus referensi mewakili komponen yang diperlukan untuk mempertahankan nilai konstan pada tegangan bus DC[14].

E. Simulink MATLAB

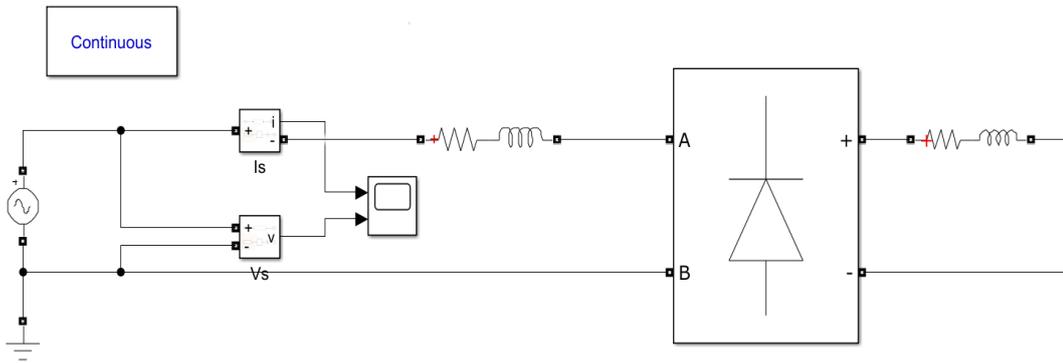
Pada artikel ini dilakukan penelitian dengan membuat model dan simulasi dengan menggunakan Simulink MATLAB. Simulasi dilakukan sebagai metode pengujian sistem SAPF satu fasa.

Adapun pengujian yang dilakukan antara lain adalah:

1. Simulasi rangkaian beban non-linear,
2. Simulasi rangkaian SAPF untuk beban non-linear.

Simulasi rangkaian beban non-linear bertujuan untuk mengetahui karakteristik harmonisa yang dihasilkan ketika suplai tegangan 220 V diberikan beban non-linear. Dengan mengetahui karakteristik harmonisa, maka dapat memberikan batasan-batasan untuk penelitian. Keluaran dari simulasi berupa gelombang tegangan sumber, gelombang arus terdistorsi, dan nilai THD pada *point of common coupling* (PCC) dari sistem yang direncanakan.

Beban non-linear yang digunakan dalam simulasi ini adalah penyearah yang terhubung dengan RL seri. Dari rencana simulasi beban non-linear di atas, maka parameter yang dimasukkan ke dalam simulasi rangkaian beban non-linear pada Gambar 4 di atas dapat disajikan ke dalam bentuk Tabel 1 sebagai berikut:



Gbr.4 Simulasi Rangkaian Beban Non-linear

Tabel 1 Parameter Komponen Simulasi Beban Non-linear

No,	Parameter	Nilai
1	Tegangan Sumber	220 V
2	RL jaringan	10 Ω, 10 mH
3	RL beban	20 Ω, 100 mH

Simulasi rangkaian SAPF bertujuan untuk memastikan kinerja dan keandalan dari sistem yang dirancang dalam proses peredaman harmonisa.

Rangkaian *voltage source converter* (VSC) dengan 4 buah IGBT dirangkai dengan skema H-Bridge. Pada sisi masukan konverter dipasang sebuah kapasitor sebagai pembangkit sumber tegangan DC, kemudian keluaran konverter dihubungkan dengan LCL filter sebagai *interface filter*. Frekuensi *switching* dari PWM yang digunakan sebagai *trigger* IGBT adalah sebesar 24 kHz. Keseluruhan rangkaian yang dibuat kemudian disebut sebagai rangkaian SAPF. Rangkaian simulasi SAPF dipasang pada *grid* sistem yang terhubung dengan beban non-linear ditunjukkan pada Gambar 5.

Nilai tegangan DC yang mengalir di kapasitor harus lebih besar dari nilai puncak tegangan yang mengalir pada sistem. Hal ini bertujuan agar VSI dapat mengontrol keseluruhan siklus dari masukan tegangan AC. Perhitungan untuk nilai tegangan DC maksimum adalah:

$$V_{DC(max)} = \frac{3\sqrt{2} \times V_{line}}{\pi} \tag{6}$$

Sehingga untuk sistem dengan tegangan AC sebesar 220 V, nilai tegangan DC maksimumnya adalah:

$$V_{DC(max)} = \frac{3\sqrt{2} \times 220}{\pi} \approx 300VDC \tag{7}$$

Jumlah energi yang mengalir pada kapasitor dapat dihitung dengan:

$$E = \frac{1}{2} \times C_{DC} \times V_{DC}^2 = P \times T \tag{8}$$

Dalam penelitian ini, SAPF didesain untuk mengkompensasi daya reaktif sebesar ~1kW. Jika nilai satu periode untuk suplai tegangan AC adalah sebesar 20ms, maka:

$$C_{DC} = \frac{2 \times P \times T}{V_{DC}^2} \tag{9}$$

$$C_{DC} = 444,44 \mu F$$

Dari perhitungan di atas, maka dapat dipilih nilai C_{DC} sebesar 1000 μF . Nilai minimum dari induktor L_1 dapat dihitung dengan persamaan:

$$L_1 = \frac{V_{DC}}{8\Delta_{L1,max}f_{sw}} \tag{10}$$

Dimana nilai *ripple* arus induktor adalah 30% dari nilai efektif arus kompensasi filter. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan pada artikel [15], perhitungan optimum untuk nilai minimum dari induktor L_2 dapat dipilih antara 3-5 kali lebih kecil dari induktor L_1 . Pada penelitian ini dipilih nilai L_2 3.5 kali lebih kecil dari nilai L_1 .

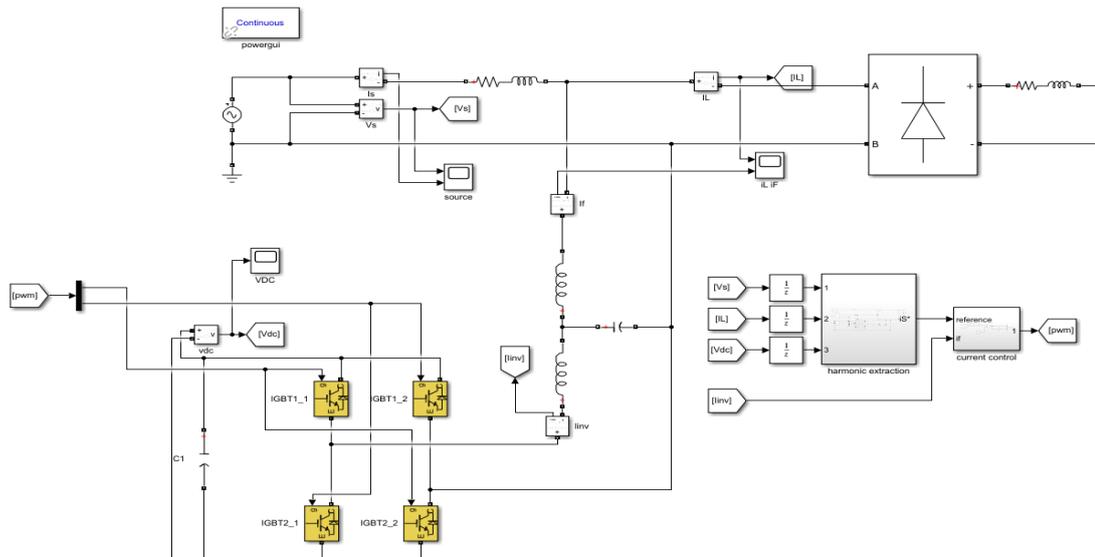
Kemudian nilai C diperhitungkan dengan memberi batasan sebesar 5% dari daya reaktif sistem yang dirancang yaitu $\sim 1\text{kW}$. Sehingga nilai kapasitansi dihitung dengan:

$$C \leq 5\% \cdot \frac{S}{\omega_f V_{AC}^2} \quad (11)$$

Dimana S adalah kapasitas kompensasi filter, ω_f adalah frekuensi fundamental sistem dalam satuan rad/s, dan V_{AC} adalah tegangan sistem.

Nilai L_1 , L_2 , dan C adalah:

$$\begin{aligned} L_1 &\approx 1\text{mH} \\ L_2 &\approx 0.298\text{mH} \\ C &\approx 3.29\mu\text{F} \rightarrow C = 1\mu\text{F} \end{aligned} \quad (12)$$



Gbr.5 Simulasi Rangkaian SAPF untuk Beban Non-linear

Rangkaian Simulink dari proses ekstraksi harmonisa dan perhitungan arus referensi ditunjukkan pada Gambar 6. *Low-pass filter* (LPF) digunakan untuk memfilter komponen AC pada arus terdistorsi, sehingga menyisakan komponen DC aktif I_p dan komponen DC reaktif $-I_q$. LPF yang digunakan pada proses ini adalah *second-order* LPF. Nilai frekuensi *cut-off* yang dibutuhkan adalah kurang dari dua kali nilai frekuensi fundamental. Frekuensi *cut-off* yang digunakan sebesar 10 Hz. Sehingga nilai R dan C dapat dihitung dengan:

$$f_c = \frac{1}{2} \pi RC \quad (13)$$

Bila nilai R diasumsikan 100Ω , maka nilai C yang digunakan adalah:

$$C = \frac{2f_c}{\pi R} \quad (14)$$

$$C = 159.24 \mu\text{F}$$

RC low-pass filter dalam rangkaian ekstraksi harmonisa dibuat dalam bentuk digital dengan memperhatikan persamaan aslinya, yaitu:

$$v_{in}(t) - v_{out}(t) = RC \frac{dv_{out}}{dt} \quad (15)$$

Nilai K pada rangkaian di atas merepresentasikan nilai RC , dimana nilai $R = 100 \Omega$ dan $C = 159.24 \mu\text{F}$.

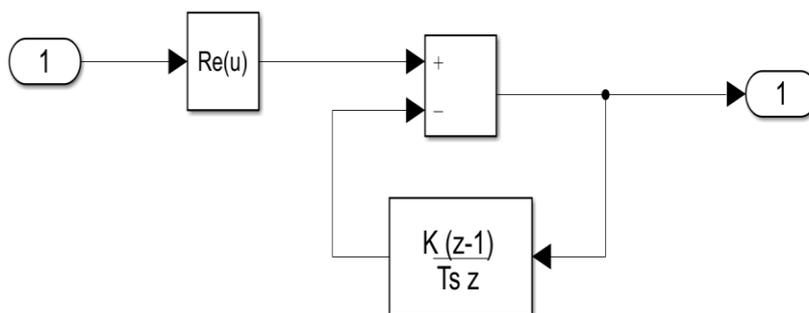
Dari perhitungan yang telah dilakukan maka parameter yang dimasukkan ke dalam rangkaian simulasi Gambar 5 di atas dapat disajikan ke dalam bentuk Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Parameter Komponen Simulasi Beban Non-linear dengan pemasangan SAPF

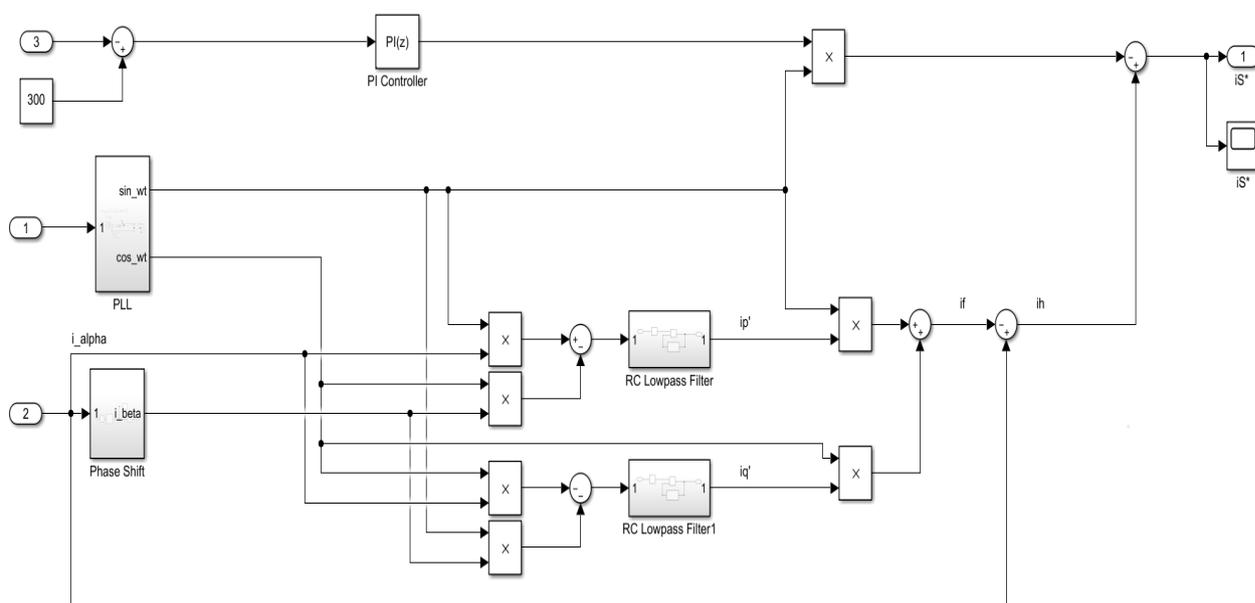
No.	Parameter	Nilai
1	Tegangan Sumber	220 V
2	RL jaringan	10 Ω, 10 mH
3	RL beban	20 Ω, 100 mH
4	Frekuensi <i>Switching</i>	24 kHz
5	Tegangan Bus DC	300 V

6	Kapasitor Bus DC (C _{DC})	1000 μF
7	LCL filter	L ₁ = 1 mH L ₂ = 0.298 mH C = 1 μF

Sehingga RC low-pass filter dapat dirangkai menjadi seperti Gambar 7 berikut ini:



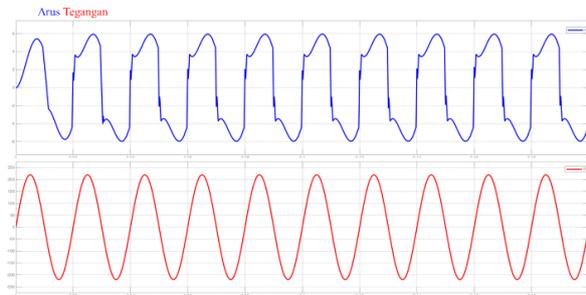
Gbr.7 Rangkaian Simulink RC low-pass filter



Gbr.6 Rangkaian Simulink Proses Ekstraksi Harmonisa

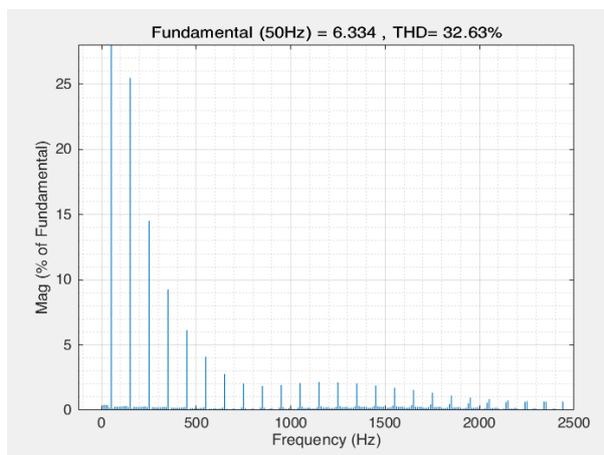
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi pertama berupa rangkaian beban non-linear dijalankan dalam mode *Continuous* selama 0.2 sekon untuk melihat bentuk gelombang arus dan gelombang tegangan yang terdistorsi, seperti ditunjukkan pada Gambar 8 berikut ini:



Gbr.8 Gelombang arus dan tegangan sumber

Dari Gambar 8 di atas dapat dilihat bahwa gelombang arus terlihat dalam bentuk gelombang cacat karena terdapat harmonisa, sedangkan gelombang tegangan terlihat dalam bentuk sinusoidal murni tanpa terdistorsi. Hal ini dikarenakan harmonisa arus belum cukup besar untuk menimbulkan harmonisa tegangan[16]. Untuk mengetahui besar harmonisa yang terdapat pada gelombang arus, maka digunakan *Powergui FFT Analysis Tool*. Dengan hasil yang ditunjukkan seperti Gambar 9 berikut:

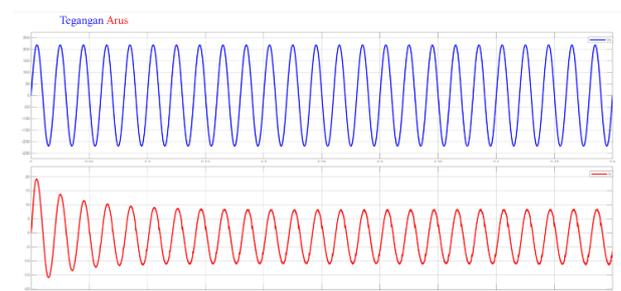


Gbr.9 Grafik THD Arus Sumber

Dari hasil simulasi rangkaian beban non-linear yang ditunjukkan pada Gambar 9 di atas menunjukkan nilai THD yang dihasilkan mencapai 32.63%.

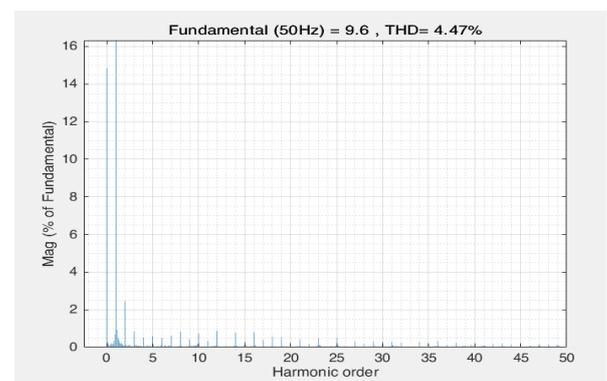
Nilai THD tersebut tidak memenuhi standar harmonisa yang ditoleransi oleh IEEE 519-2014. Seharusnya bila mengacu pada standar [17], nilai THD yang masih bisa ditoleransi pada suatu jaringan tegangan rendah (< 1 kV) hanya sebesar 8%.

Simulasi kedua berupa rangkaian SAPF untuk beban non-linear dijalankan dalam mode *Continuous* selama 0.5 sekon untuk melihat bentuk gelombang tegangan sumber dan gelombang arus sumber setelah pemasangan SAPF seperti ditunjukkan pada Gambar 10 berikut:



Gbr.10 Gelombang tegangan dan arus sumber setelah pemasangan SAPF

Gambar 10 di atas menunjukkan gelombang tegangan dan arus di sisi sumber. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa distorsi arus di sisi sumber sudah berkurang dan gelombang arus lebih mendekati gelombang sinusoidal murni. Dengan ditunjukkannya bentuk gelombang arus yang mendekati sinusoidal murni, maka nilai harmonisa arus pun akan berkurang. Untuk mengetahui besar harmonisa yang terdapat pada gelombang arus di sisi sumber, maka digunakan *Powergui FFT Analysis Tool*. Dengan hasil yang ditunjukkan seperti Gambar 11 berikut:



Gbr.11 Grafik THD Arus Sumber setelah pemasangan SAPF

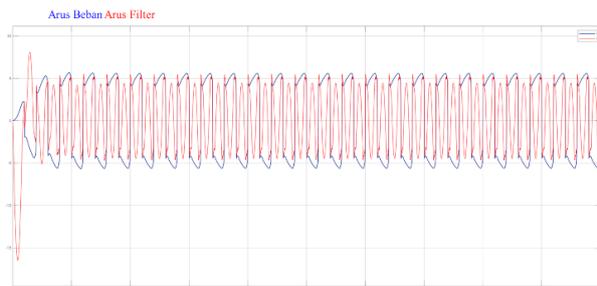
Dari hasil simulasi beban non linear dengan pemasangan SAPF memiliki nilai THD sebesar 4.47% dimana terjadi peredaman harmonisa sebesar 28.16% dari yang sebelumnya 32.63%. Nilai peredaman harmonisa yang ditunjukkan dengan penurunan THD dari simulasi SAPF dalam artikel ini memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan hasil peredaman harmonisa oleh APF pada [18]–[20] karena terdapat perbedaan metode.

Nilai THD yang dihasilkan dari kedua simulasi disajikan ke dalam Tabel 3 seperti berikut:

Tabel 3. Perbandingan THD Arus Sumber sebelum dan setelah pemasangan SAPF

No.	Kondisi	THD _i (%)
1	Sebelum pemasangan SAPF	32.63 %
2	Setelah pemasangan SAPF	4.47 %

Penurunan nilai THD terjadi karena SAPF menginjeksikan arus filter ke sistem yang berfungsi untuk meredam harmonisa yang terjadi pada arus sumber, Gelombang arus filter dan arus beban ditunjukkan pada Gambar 12 berikut:



Gbr.12 Gelombang arus filter dan arus beban setelah pemasangan SAPF

Ketika arus filter (gelombang warna merah) menginjeksikan komponen reaktif dan harmonisa ke arus beban (gelombang warna biru), maka cacat pada gelombang arus sumber akan berkurang. Penurunan THD yang terjadi setelah pemasangan SAPF merepresentasikan kemampuan dari SAPF untuk meredam harmonisa yang terjadi, yaitu mencapai 86.3%.

IV.KESIMPULAN

Dalam artikel ini telah disimulasikan suatu *shunt active power filter* (SAPF) untuk meredam harmonisa pada beban non-linear satu fasa. Beban yang digunakan berupa penyearah dioda yang dihubungkan ke beban RL seri. Rangkaian SAPF disusun dari *Voltage Source Converter* (VSC) yang terkontrol oleh PWM dengan penyimpan tegangan berupa kapasitor dihubungkan dengan *LCL interface filter*. Rangkaian SAPF kemudian dihubungkan dengan grid sistem. Proses ekstraksi harmonisa untuk mendapatkan nilai arus referensi dilakukan dengan metode i_p - i_q . Tegangan DC kapasitor dikontrol dengan PI untuk menjaga nilainya konstan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum pemasangan SAPF, nilai THD arus sumber mencapai 32.63%. Sedangkan setelah pemasangan SAPF nilai THD arus sumber yang dihasilkan hanya sebesar 4.47%. SAPF yang disimulasikan memiliki kemampuan peredaman harmonisa sebesar 28.16% dan dapat memenuhi standar yang ditoleransi oleh IEEE 519 yaitu kurang dari 8%. Hasil desain, analisis dan simulasi ini dapat berfungsi sebagai dasar untuk pengimplementasian purwarupa perangkat keras SAPF di masa mendatang.

REFERENSI

- [1] E. Dermawan dan R. L. Rahman, “Analisis Pengaruh Distorsi Harmonisa Terhadap Deviasi Pengukuran Energi Listrik Pada Kwh Meter,” Jurnal Elektrum vol. 15, no. 2, hlm. 10, Okt 2018. ISSN : 1979-5564. e-ISSN : 2550-0678.
- [2] S. Puchalapalli dan N. M. Pindoriya, “Harmonics assessment for modern domestic and commercial loads: A survey,” International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems (ICETEESES–16) hlm. 6, 2016.
- [3] B. Singh, K. Al-Haddad, dan A. Chandra, “A review of active filters for power quality improvement,” *IEEE Trans. Ind.*

- Electron.*, vol. 46, no. 5, hlm. 960–971, Okt 1999, doi: 10.1109/41.793345.
- [4] H. Sasaki dan T. Machida, “A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation-Considerations on Basic Design,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-90, no. 5, hlm. 2009–2019, Sep 1971, doi: 10.1109/TPAS.1971.292996.
- [5] R. Kanagavel, I. Vairavasundaram, dan S. Padmanaban, “Design and prototyping of single-phase shunt active power filter for harmonics elimination using model predictive current control,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 2, Feb 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12231.
- [6] A. Bitoleanu dan M. Popescu, “Shunt active power filter Overview on the reference current methods calculation and their implementation,” dalam *2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, Galati, Romania, Okt 2013, hlm. 1–12, doi: 10.1109/ISEEE.2013.6674384.
- [7] X. Lei, C. Guo, Y. Xu, dan Q. Liu, “Study on Detection Method for Harmonic and Reactive Current in Single-Phase Circuit,” dalam *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Zhangjiajie, Hunan, China, 2009, hlm. 695–698, doi: 10.1109/ICMTMA.2009.168.
- [8] A. Bhattacharya, C. Chakraborty, dan S. Bhattacharya, “Shunt compensation,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 3, no. 3, hlm. 38–49, Sep 2009, doi: 10.1109/MIE.2009.933881.
- [9] J. L. Torre, L. A. M. Barros, J. L. Afonso, dan J. G. Pinto, “Development of a Proposed Single-Phase Series Active Power Filter without External Power Sources,” dalam *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Porto, Portugal, Sep 2019, hlm. 1–6, doi: 10.1109/SEST.2019.8849010.
- [10] L. Morán, J. Dixon, dan M. Torres, “Active Power Filters,” dalam *Power Electronics Handbook*, Elsevier, 2018, hlm. 1341–1379.
- [11] Q. Liu, L. Peng, Y. Kang, S. Tang, D. Wu, dan Y. Qi, “A Novel Design and Optimization Method of an LCL Filter for a Shunt Active Power Filter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 8, hlm. 4000–4010, Agu 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2282592.
- [11] S. Samal, P. K. Hota and P. K. Barik, “Harmonics mitigation by using shunt active power filter under different load condition,” 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), Paralakhemundi, India, 2016, pp. 94–98, doi: 10.1109/SCOPEs.2016.7955598.
- [12] J. Dixon, J. Contardo and L. Moran, “DC link fuzzy control for an active power filter, sensing the line current only,” PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference 1970-71. Power Processing and Electronic Specialists Conference 1972, St. Louis, MO, USA, 1997, pp. 1109-1114 vol.2, doi: 10.1109/PESC.1997.616887.
- [14] H. H. Tumbelaka dan M. Miyatake, “Application of a CC-VSI for Active Filtering and Photovoltaic Energy Conversion with a 1-to-1 MPPT controller,” *J. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 2, hlm. 64–69, Apr 2010, doi: 10.9744/jte.8.2.64-69.
- [15] L. Zhou, Z. Liu, Y. Ji, D. Ma, J. Wang, dan L. Li, “A Improved Parameter Design Method of LCL APF Interface Filter,” dalam *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*, Dalian, China, Jun 2020, hlm. 948–952, doi: 10.1109/ICAICA50127.2020.9182457.
- [16] A. Shukla, A. Das and S. Anand, “Method to Reduce Harmonic Voltage Distortion and Improve Harmonic Current Sharing in an islanded AC Microgrid,” 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, VIC, Australia, 2019, pp. 498-503, doi: 10.1109/ICIT.2019.8754950.
- [17] “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.

- [18] S. A. Taher, M. H. Alaei, dan Z. Dehghani Arani, "Model predictive control of PV-based shunt active power filter in single phase low voltage grid using conservative power theory," dalam *2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, Mashhad, 2017, hlm. 253–258, doi: 10.1109/PEDSTC.2017.7910332.
- [19] H. Vanjani, U. K. Choudhury, M. Sharma, dan B. Vanjani, "Takagi-sugeno (TS)-type fuzzy logic controller for three-phase four-wire shunt active power filter for unbalanced load," dalam *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*, Bikaner, Rajasthan, India, Nov 2016, hlm. 1–4, doi: 10.1109/POWERI.2016.8077227.
- [20] M. Mane and M. K. Namboothiripad, "PWM based sliding mode controller for shunt active power filter," 2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), Vashi, India, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICNTE.2017.7947964.