

# Analisis Perbandingan Faktor Daya Masukan Penyearah Satu Fasa dengan Pengendalian Modulasi Lebar Pulsa dan Sudut Penyalaan

Syaifur Ridzal<sup>1</sup>, Ir.Soeprapto,M.T.<sup>2</sup>, Ir.Soemarwanto,M.T.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Teknik Elektro, <sup>2,3</sup>Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: [riezal.ivor@gmail.com](mailto:riezal.ivor@gmail.com)

**Abstrak**—Pada saat sekarang ini peralatan elektronika daya sering digunakan dalam aplikasi di industri. Seperti konverter sebagai peralatan konversi daya listrik, yang biasanya digunakan sebagai power supply. Penggunaan penyearah terkendali memiliki kekurangan karena dapat menimbulkan harmonisa pada sistem tenaga listrik dan juga memiliki faktor daya yang rendah. Seperti halnya Faktor daya pada penyearah satu fasa terkendali dengan pengendalian sudut penyalaan yang cenderung rendah.

Teknik pengendalian pada penyearah dapat meningkatkan faktor daya masukan. Teknik komutasi merupakan teknik pengendalian pada sistem penyearah. Salah satu dari teknik pengendalian adalah pengendalian modulasi lebar pulsa . Oleh karena itu akan dibandingkan dua macam pengendalian, yaitu pengendalian sudut penyalaan dan pengendalian modulasi lebar pulsa.

Pada penelitian ini digunakan analisis menggunakan deret fourier dan simulasi untuk mengetahui harmonisa dan faktor daya pada penyearah terkendali.

**Kata Kunci** — Penyearah setengah terkendali, Faktor daya, Harmonisa.

## I. PENDAHULUAN

Faktor daya merupakan topik yang sering diperbincangkan dalam sistem tenaga listrik. Faktor daya terdiri dari *displacement power factor* atau  $\cos$  yang dipengaruhi oleh perbandingan arus fundamental dengan arus total ( $\frac{I_{s1}}{I_s}$ ) yang ditimbulkan oleh harmonisa [3].

Pada saat sekarang ini peralatan elektronika daya sering digunakan dalam aplikasi di industri. Seperti konverter sebagai peralatan konversi daya listrik, yang biasanya digunakan sebagai power supply. Penggunaan penyearah pada konverter memiliki kekurangan karena dapat menimbulkan harmonisa pada sistem tenaga listrik. Dengan peningkatan penggunaan peralatan penyearah ini, arus harmonisa akan menjadi sebuah permasalahan. Selain itu beberapa standard harmonisa arus telah dibuat oleh organisasi energi elektrik internasional, sehingga merupakan suatu kebutuhan untuk mengurangi harmonisa atau meningkatkan faktor daya.

Untuk menyelesaikan permasalahan turunnnya faktor daya, baik yang diakibatkan oleh harmonisa atau  $\cos \phi$  seperti yang diutarakan di

atas, dapat dilakukan dengan berbagai cara, bisa menggunakan peralatan tambahan seperti filter harmonisa atau kapasitor bank. Cara lain yang dapat dilakukan tanpa pembelian atau perubahan alat baru dapat dilakukan melalui perbaikan kualitas penyearah melalui perubahan teknik pengendalian pada penyearah.

Faktor daya pada penyearah fasa terkontrol dengan pengendalian sudut penyalaan biasanya cenderung rendah<sup>[2]</sup>. Komutasi paksa dapat meningkatkan faktor daya masukan. Teknik komutasi merupakan teknik pengendalian pada sistem penyearah.

Dalam penelitian ini akan diteliti perbandingan perbaikan faktor daya masukan penyearah dengan kontrol modulasi lebar pulsa dan dengan pengendalian sudut penyalaan.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Komponen Semikonduktor Daya

#### 1. Diode

Ketika potensial anode positif terhadap katode, diode bertindak bias maju dan diode terkonduksi. Ketika potensial katode positif terhadap anode, diode dikatakan sebagai bias mundur.

#### 2. SCR (*Silicon Control Rectifier*)

SCR adalah diode yang mempunyai fungsi sebagai pengendali. SCR dapat dihidupkan dengan arus penyulut singkat melalui kaki Gate. Sekali SCR mencapai keadaan ON walaupun tegangan gate dilepas atau di *short* ke katoda SCR akan tetap ON.

#### 3. IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

IGBT merupakan piranti elektronik yang dikemudikan oleh tegangan, dengan kebutuhan akan daya pengemudi yang relatif kecil saja.

### B. Deret Fourier

Deret Fourier merupakan penguraian fungsi periodik menjadi jumlahan fungsi-fungsi. Segala jenis fungsi yang ada bisa diurai dalam bentuk penjumlahan fungsi sinus dan cosinus, dengan pemilihan periode dasar yang tepat. Dengan penentuan periode dasar yang tepat bisa diketahui frekuensi2 lain (harmonik ke-n) yang nantinya menjadi bagian dari pembentuk fungsi yang akan diurai. Berikut adalah persamaan deret fourier dan koefisien pembentuknya.

$$i_s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

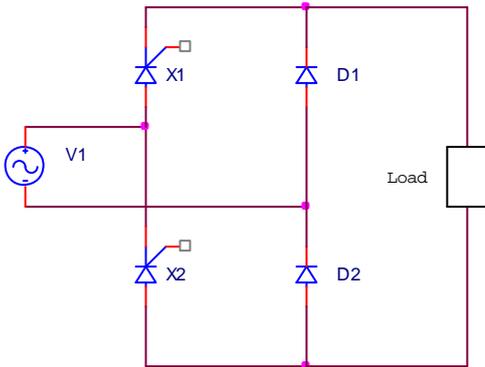
$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_s(t) d(\omega t)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_s(t) \cos n\omega t d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_s(t) \sin n\omega t d(\omega t)$$

**C. Penyearah Terkendali Sudut Penyalaan**

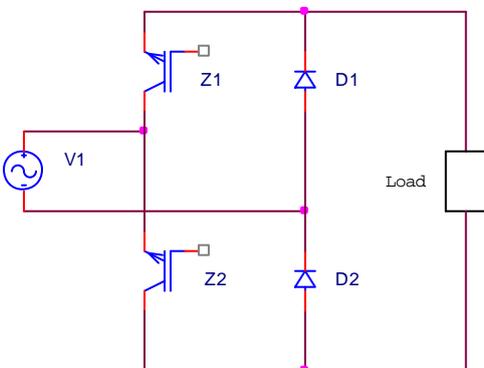
Rangkaian penyearah setengah terkendali dengan kendali sudut penyalaan menggunakan 2 buah SCR dan 2 buah dioda sebagaimana pada Gambar 1. Rangkaian setengah terkendali mempunyai wilayah operasi pada kuadran 1 saja. Sehingga tegangan beban selalu bernilai positif.



Gambar 1. Rangkaian Penyearah terkendali sudut penyalaan  
Sumber: Rashid,2001:171

**D. Penyearah Terkendali Modulasi Lebar Pulsa**

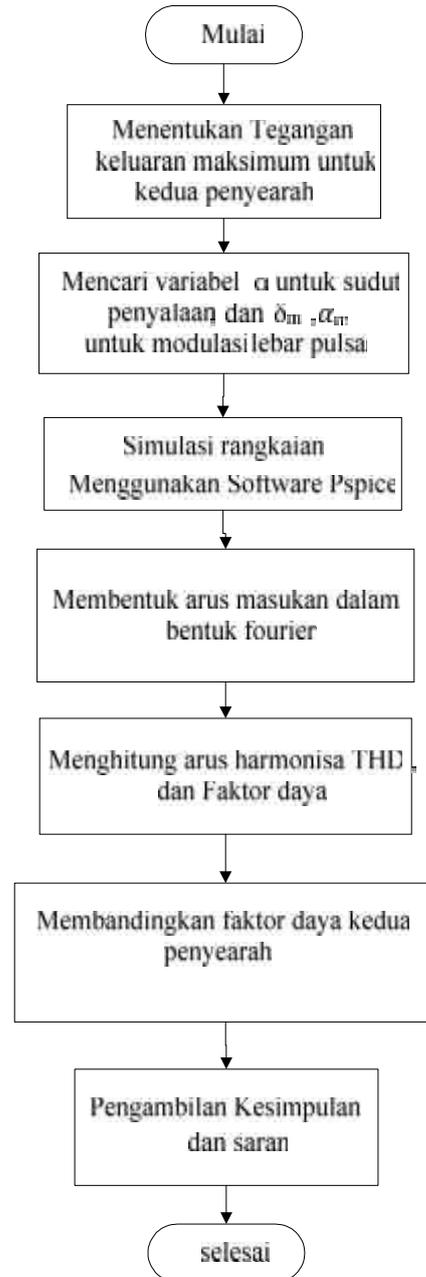
Pada kendali modulasi lebar pulsa, saklar converter dinyalakan dan dimatikan beberapa kali setiap setengah siklus dan tegangan keluaran dikendalikan dengan mengubah-ubah lebar pulsanya. Rangkaian penyearah setengah terkendali dengan kendali modulasi lebar pulsa menggunakan 2 buah IGBT dan 2 buah dioda sebagaimana pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Penyearah terkendali modulasi lebar pulsa  
Sumber: Rashid,2001:135

**III. METODE PENELITIAN**

Penelitian yang digunakan dalam penelitian ini tersusun seperti pada diagram alir tampak pada Gambar 3:



Gambar 3. Diagram alir penelitian  
Sumber: penulis

**IV. ANALISIS**

**A. Analisis Fourier Arus masukan penyearah**

Dengan menentukan tegangan keluaran pada beban dengan besaran yang sama, faktor daya pada masing-masing metode pengendalian dibandingkan. Oleh karena itu perlu dicari berapa besarnya  $V_{dc}$  maksimum yang nantinya akan berfungsi untuk pembandingan pada tiap level tegangan. Level Tegangan output beban akan diawali dari 20% dari tegangan beban maksimum ( $V_{dcmax}$ ) sampai 100% dari  $V_{dcmax}$ , tegangan akan ditingkatkan dengan interval 20%.

**1. Penyearah kendali sudut penyalan**

Untuk mengetahui berapa nilai dari parameter-parameter faktor daya maka arus masukan fundamental dan harmonisa pada masukan penyearah harus diketahui. Dalam deret fourier nantinya akan dicari beberapa koefisien fourier yaitu koefisien  $a_n$  dan koefisien  $b_n$ .

Adapun persamaan koefisien fourier untuk arus masukan pada beban resistif:

$$a_n = \frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \int_0^{\pi} \sin(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) + \frac{1}{\pi n} \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\omega t + \pi) \cos n\omega t d(\omega t) \tag{1}$$

$$b_n = \frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \int_0^{\pi} \sin(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) + \frac{1}{\pi n} \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\omega t + \pi) \sin n\omega t d(\omega t) \tag{2}$$

untuk persamaan induktif maka persamaan menjadi sebagai berikut:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left[ \frac{V_m}{\omega} [\sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] \cos n\omega t d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} \frac{V_m}{\omega} [\sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] \cos n\omega t d(\omega t) \right] \tag{3}$$

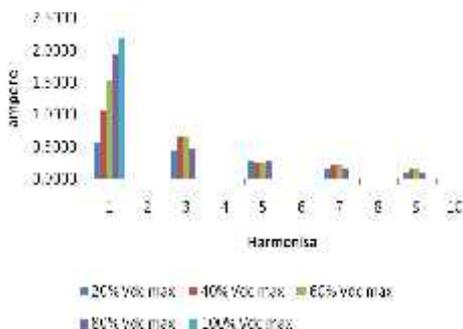
$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left[ \frac{V_m}{\omega} [\sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] \sin n\omega t d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} \frac{V_m}{\omega} [\sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] \sin n\omega t d(\omega t) \right] \tag{4}$$

$$A = \frac{V_m}{\omega} \frac{[\sin(\pi - \varphi) e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] - \sin(\pi - \varphi)}{1 - e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}} \tag{5}$$

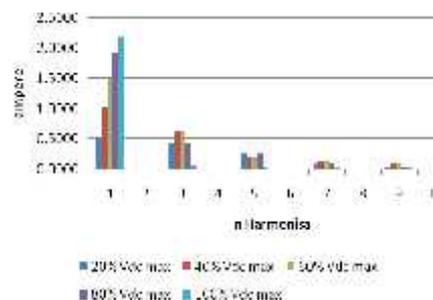
Setelah koefisien fourier diketahui maka arus harmonisa rms adalah

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)} \tag{6}$$

Hasil dari perhitungan untuk arus harmonisa untuk tiap level beban pada beban resistif dan beban resistif induktif bisa dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Arus Harmonisa pada sudut penyalan beban resistif. Sumber: Analisis



Gambar 5. Arus Harmonisa pada sudut penyalan beban resistif induktif. Sumber: Analisis

**2. Penyearah kendali modulasi lebar pulsa**

Pada penyearah setengah terkendali modulasi lebar pulsa terdiri dari 4 pulsa pada tiap setengah siklus pada frekuensi input 50Hz. Persamaan koefisien fourier untuk beban resistif

$$a_n = \frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left[ \int_{\frac{m\pi}{n}}^{\frac{(m+1)\pi}{n}} \sin \omega t \cos n\omega t d(\omega t) + \int_{\frac{(m+1)\pi}{n}}^{\frac{(m+2)\pi}{n}} \sin \omega t \cos n\omega t d(\omega t) \right] \tag{7}$$

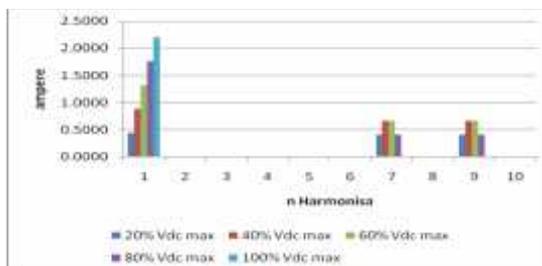
$$b_n = \frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left[ \int_{\frac{m\pi}{n}}^{\frac{(m+1)\pi}{n}} \sin \omega t \sin n\omega t d(\omega t) + \int_{\frac{(m+1)\pi}{n}}^{\frac{(m+2)\pi}{n}} \sin \omega t \sin n\omega t d(\omega t) \right] \tag{8}$$

Pada beban yang terdiri dari beban induktif harus dipertimbangkan waktu transient akibat komponen induktif. Sehingga persamaan untuk beban resistif induktif

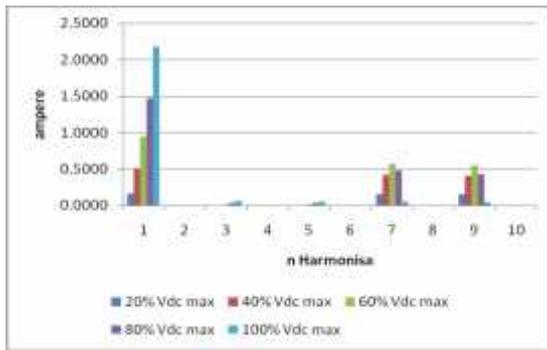
$$a_n = \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^n \left[ \int_{\frac{m\pi}{n}}^{\frac{(m+1)\pi}{n}} \frac{V_m}{\omega} [\sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] \cos n\omega t d(\omega t) + \int_{\frac{(m+1)\pi}{n}}^{\frac{(m+2)\pi}{n}} \frac{V_m}{\omega} [\sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] \cos n\omega t d(\omega t) \right] \tag{9}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^n \left[ \int_{\frac{m\pi}{n}}^{\frac{(m+1)\pi}{n}} \frac{V_m}{\omega} [\sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] \sin n\omega t d(\omega t) + \int_{\frac{(m+1)\pi}{n}}^{\frac{(m+2)\pi}{n}} \frac{V_m}{\omega} [\sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\cos^{-1} \frac{\omega}{\omega_0}}] \sin n\omega t d(\omega t) \right] \tag{10}$$

Hasil dari perhitungan untuk arus harmonisa untuk tiap level beban pada beban resistif dan beban resistif induktif bisa dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Arus Harmonisa pada kendali modulasi lebar pulsa beban resistif. Sumber: Analisis



Gambar 7. Arus Harmonisa pada kendali modulasi lebar pulsa beban resistif induktif  
Sumber: Analisis

**B. Analisis Faktor Daya**

Setelah arus harmonisa diketahui perlu dihitung berapa nilai dari arus distorsi, persamaan untuk arus distorsi adalah

$$I_{dist} = \sqrt{\sum_{n=2}^{10} I_{in}^2} \tag{11}$$

Setelah diketahui nilai dari arus distorsi maka total harmonic distortion (THD%)

$$\%THD_1 = 100 \cdot \frac{I_{dist}}{I_{e1}} \tag{12}$$

Faktor daya terdiri dari 2 parameter, yaitu displacement power faktor (DPF) dan  $\frac{I_{s2}}{I_s}$ .

Adapun DPF:

$$DPF = \cos\phi_1 \tag{13}$$

Maka faktor daya adalah

$$PF = \frac{I_{e1}}{I_s} \cos\phi_1 \tag{14}$$

atau

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} \cos\phi_1 \tag{15}$$

Untuk hasil dari analisis THD dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. THD pada kendali sudut penyalakan

Level tegangan beban	Beban resistif		Beban Resistif induktif	
	THD(%)	Cos $\frac{P_{avg}}{P_{ref}}$	THD(%)	Cos $\frac{P_{avg}}{P_{ref}}$
20%	104.35	0.572	97.94	0.471
40%	72.20	0.774	67.08	0.685
60%	49.98	0.899	45.95	0.831
80%	29.41	0.973	26.36	0.931
100%	0	1	4.66	0.992

Sumber: Analisis

Tabel 2. THD pada kendali modulasi lebar pulsa

Level tegangan beban	Beban resistif		Beban Resistif induktif	
	THD(%)	Cos $\frac{P_{avg}}{P_{ref}}$	THD(%)	Cos $\frac{P_{avg}}{P_{ref}}$
20%	132.2982	1	134.9700	0.9990
40%	107.0315	1	115.2600	0.9967
60%	71.3543	1	83.6860	0.9945
80%	33.0745	1	43.4950	0.9928
100%	0	1	4.6606	0.9912

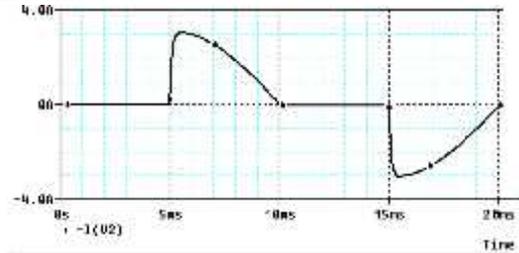
Sumber: Analisis

**C. Simulasi Menggunakan PSpice**

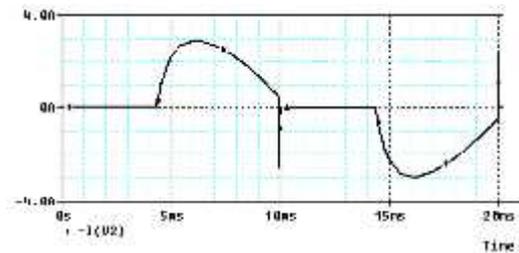
Simulasi menggunakan software Pspice dengan komponen yang telah tersedia di library PSpice.

**1. Kendali sudut penyalakan**

Pada simulasi ini menggunakan tipe komponen SCR 2N2578 dan general purpose dioda 1N4004. Hasil simulasi untuk arus masukan tampak pada Gambar 8 dan Gambar 9.



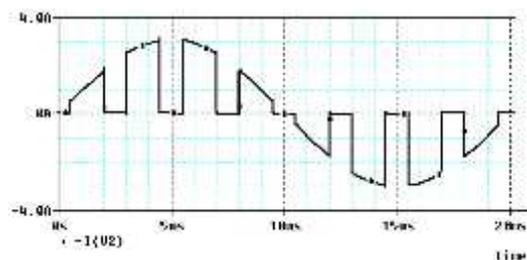
Gambar 8. Arus masukan pada beban resistif  
Sumber: Hasil Simulasi



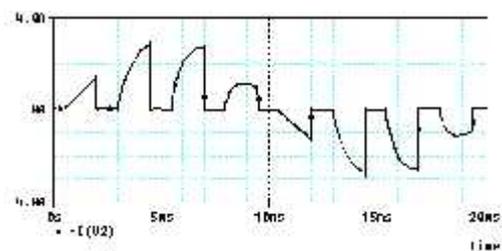
Gambar 9. Arus masukan pada beban resistif induktif  
Sumber: Hasil Simulasi

**2. Kendali modulasi lebar pulsa**

Pada kendali modulasi lebar pulsa menggunakan komponen IGBT IXGH10N60 dan diode general purpose 1N4004 Hasil simulasi untuk arus masukan tampak pada Gambar 10 dan 11.



Gambar 10. Arus masukan pada beban resistif  
Sumber: Hasil Simulasi



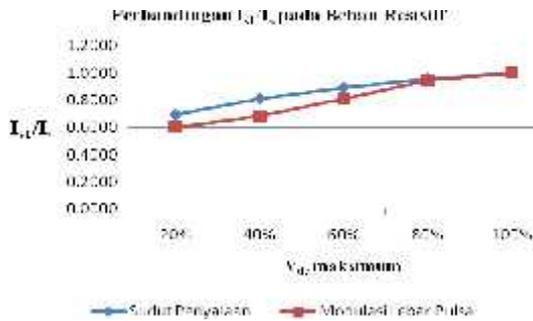
Gambar 11. Arus masukan pada beban resistif induktif.  
Sumber: Hasil Simulasi

**D. Perbandingan Kedua Penyearah**

Berikut ini adalah parameter-parameter yang diperoleh dari hasil analisis penyearah dengan kendali

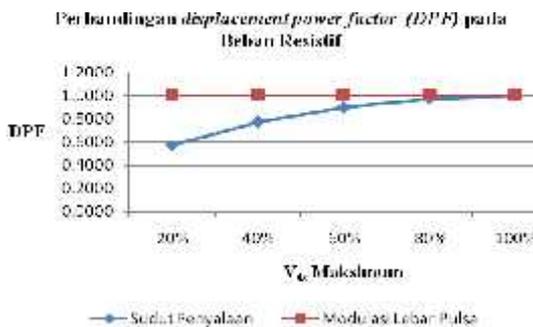
sudut penyalaan dan kendali modulasi lebar pulsa masing-masing adalah *displacement power factor* (DPF) dan  $\frac{I_{G4}}{I_G}$ .

**1. Faktor daya pada beban resistif**



Gambar 12. Perbandingan  $\frac{I_{G4}}{I_G}$  arus masukan pada beban resistif  
Sumber: Analisis

$\frac{I_{G4}}{I_G}$  untuk beban resistif pada tegangan beban 100%  $V_{dmax}$  untuk kendali sudut penyalaan maupun kendali modulasi lebar pulsa mempunyai nilai yang sama, ini disebabkan karena pada level tegangan ini kedua penyearah akan terkonduksi dan terkomutasi secara alamiah.



Gambar 13. Perbandingan DPF pada beban resistif  
Sumber: Analisis

DPF pada tegangan beban 100%  $V_{dmax}$  untuk kendali sudut penyalaan maupun kendali modulasi lebar pulsa mempunyai nilai yang sama, ini disebabkan karena pada level tegangan ini kedua penyearah akan terkonduksi dan terkomutasi secara alamiah.

Sedangkan untuk level tegangan dibawah 100%  $V_{dmax}$  penyearah dengan pengendalian modulasi lebar pulsa mempunyai nilai yang lebih besar karena sudut pergeseran yang selalu satu, ini disebabkan karena arus masukan fundamental mempunyai periode konduksi yang sama dengan tegangan masukan beban.



Gambar 14. Perbandingan faktor daya pada beban resistif  
Sumber: Analisis

Faktor daya pada level tegangan 100% dan 80% mempunyai nilai yang sama dikarenakan parameter faktor daya bernilai sama.

Untuk level tegangan 20% sampai 60%  $V_{dmax}$  mempunyai nilai yang lebih besar, karena perkalian parameter-parameter yang mempengaruhi besarnya faktor daya menghasilkan nilai yang lebih besar.

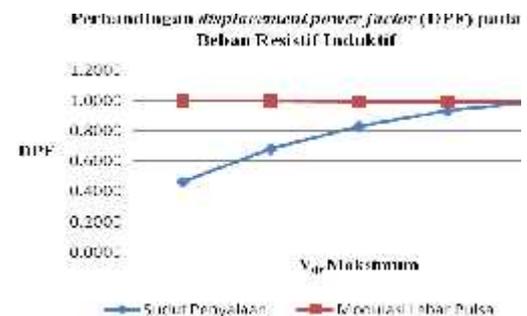
**2. Faktor daya pada beban resistif induktif**



Gambar 15. Perbandingan  $\frac{I_{G4}}{I_G}$  arus masukan pada beban resistif induktif  
Sumber: Analisis

Pada level tegangan 100%  $V_{dmax}$  untuk kedua penyearah mempunyai level tegangan yang sama, dikarenakan kedua penyearah akan terkonduksi maupun terkomutasi secara alamiah sehingga menghasilkan arus masukan yang sama.

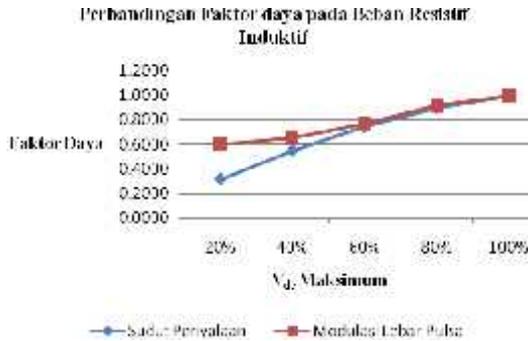
Pada level tegangan beban 20% sampai 80% nilai faktor distorsi pada penyearah pengendalian modulasi lebar pulsa mempunyai nilai yang lebih rendah, karena pada kendali modulasi lebar pulsa ini terdapat beberapa periode konduksi dan komutasi sehingga akan memicu terjadinya arus harmonisa.



Gambar 16. Perbandingan DPF pada beban resistif induktif  
Sumber: Analisis

*Displacement power factor* pada level 100%  $V_{dcmax}$  bernilai sama karena arus terkomutasi dan terkonduksi secara alamiah

Pada level tegangan beban 20%  $V_{dcmax}$  .. 80%  $V_{dcmax}$  untuk penyearah dengan sudut penyalan mempunyai nilai yang besar karena keterlambatan dari arusnya.



Gambar 17. Perbandingan faktor daya pada beban resistif induktif  
Sumber: Analisis

Faktor daya pada level tegangan 100%  $V_{dcmax}$  , 80%  $V_{dcmax}$  dan 60%  $V_{dcmax}$  mempunyai nilai yang sama dikarenakan parameter faktor daya bernilai sama.

Untuk level tegangan 20%  $V_{dcmax}$  dan 40%  $V_{dcmax}$  mempunyai nilai yang lebih besar, karena perkalian parameter-parameter yang mempengaruhi besarnya faktor daya menghasilkan nilai yang lebih besar.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang dilakukan maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada tegangan beban maksimum dengan beban resistif pada kedua penyearah terkonduksi secara alamiah dan terkomutasi secara alamiah sehingga menyebabkan nilai faktor daya kedua penyearah bernilai sama.
2. Pada Penyearah dengan kendali pengendalian modulasi lebar pulsa dengan beban resistif induktif pada level tegangan 20%  $V_{dcmax}$  mempunyai nilai DPF paling rendah karena arus masukan penyearah hampir sefasa dengan tegangan sumber.
3. Faktor daya pada penyearah kendali modulasi lebar pulsa dengan beban resistif mempunyai nilai yang lebih baik pada semua level tegangan. Pada beban resistif induktif kendali modulasi lebar pulsa mempunyai nilai yang lebih baik pada level tegangan beban 80%  $V_{dcmax}$  dan 100%  $V_{dcmax}$ .

### B. Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian dilakukan lebih lanjut untuk mengetahui nilai faktor daya bisa dilakukan dengan menggunakan metode kontrol sudut yang lain atau dengan daerah operasi penyearah yang berbeda.
2. Dalam pengoperasian modulasi lebar pulsa pada frekuensi tinggi sangat perlu untuk memperhatikan performa komponen elektronika daya seperti  $t_{tr}$  yang akan mempengaruhi keluaran, karena dalam

pemilihan komponen akan mempengaruhi kualitas penyearah.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rashid, Muhammad H.(2001). Power Electronic Handbook. California : Academic Press.
- [2] Rashid, Muhammad H.(1993). Elektronika Daya: Rangkaian, Devis dan Aplikasinya, edisi kedua (Edisi Bahasa Indonesia). Jakarta: PT. Prenhallindo
- [3] Mohan, Ned. (1995). Power electronics: converters, applications, and design. New York: John Wiley & son, Inc.
- [4] Grigore, Vlad.(2001). Topological issues in single phase power factor correction. Helsinki: University of Technology.
- [5] Sudirham, Sudaryatno.(2012). Analisis Rangkaian Listrik Jilid-1. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [6] Sudirham, Sudaryatno.(2012). Analisis Rangkaian Listrik Jilid-2. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [7] Mazda, Fraidoon.(1997). Power Electronic Handbook (third edition). London: Newnes press
- [8] Chiu, Y.(2013). Lab 1: Introduction to Pspice. <http://www.utdallas.edu/~yxc101000/courses/3111Lab/handouts/Lab%201.pdf>. Diakses pada tanggal: 9 November 2013
- [9] Katz, Sharlene. Pulse and Exponential Waveforms in PSPICE. [http://www.csun.edu/~skatz/pspice\\_tutorials/pspice\\_tutorial\\_7.pdf](http://www.csun.edu/~skatz/pspice_tutorials/pspice_tutorial_7.pdf) . diakses pada tanggal: 9 November 2013
- [11] Ramaswamy, Venkat. Interactive Power Electronic Text. [http://services.eng.uts.edu.au/~venkat/pe\\_html/contents.htm](http://services.eng.uts.edu.au/~venkat/pe_html/contents.htm). diakses pada tanggal: 24 Desember 2013