

# PERBANDINGAN KINERJA RANGKAIAN PERBAIKAN FAKTOR DAYA JENIS KONVERTER BUCKBOOST TOPOLOGI SATU TINGKAT DAN DUA TINGKAT DENGAN BEBAN LAMPU FLUORESCENT

Anindita Singgih Pambudi<sup>\*)</sup>, Mochammad Facta, and Agung Warsito

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang  
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail : aninditasinggihp@gmail.com

## Abstrak

Lampu Fluorescent saat ini banyak digunakan karena memiliki intensitas cahaya yang relatif tinggi. Lampu fluorescent membutuhkan rangkaian ballast untuk menyalakan lampu. Ballast elektronik untuk mensuplai lampu fluorescent memiliki faktor daya yang rendah. Untuk itu, dibutuhkan rangkaian perbaikan faktor daya. Rangkaian perbaikan faktor daya lampu fluorescent yang umum digunakan menggunakan 2 rangkaian kontrol, satu untuk kontrol Konverter DC-DC dan yang lain untuk inverter. Rangkaian ini disebut dengan rangkaian perbaikan faktor daya 2 tingkat. Sementara itu, saat ini masih banyak dikembangkan rangkaian 1 tingkat. Penelitian mengenai perbandingan rangkian 1 tingkat dan 2 tingkat masih belum banyak dilakukan. Pada penelitian ini, akan dibuat perangkat keras rangkaian perbaikan faktor daya 1 tingkat dan 2 tingkat untuk beban lampu fluorescent. Konfigurasi rangkaian konverter adalah jenis buckboost dan konfigurasi ballast adalah inverter half bridge resonan LCC. Pengaturan duty cycle dan frekuensi pada rangkaian kontrol dilakukan untuk mengetahui daya lampu, efisiensi dan juga faktor daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor daya rangkaian 1 tingkat paling besar adalah 0,888 sedangkan pada rangkaian 2 tingkat factor daya yaitu 0,946. Efisiensi rangkaian perbaikan factor daya 1 tingkat dan 2 tingkat paling besar secara berurutan adalah sebesar 17,02% dan 17,49%.

*Kata Kunci : Faktor Daya, Buckboost, Fluorescent, 1 tingkat, 2 tingkat*

## Abstract

Fluorescent lamps currently are used widely because it has a relatively high light intensity. Fluorescent lamps require ballast circuit to turn on the lights. There are electronic ballasts for fluorescent lamps has a low power factor. Therefore, it is required of power factor improvement circuits. The power factor correction circuit of fluorescent lamps is proposed to use two control circuits, one controls the DC-DC converter and the other is for inverter. This circuit is called of a power factor correction in double stages circuit. Meanwhile, there are many developed the power factor correction use in single stage circuit. Research on comparison single stage and double stage circuits is still much to do. In this research, power factor correction single stage and doubles stage circuits were made to turn on fluorescent loads. Converter configuration was based on the Buckboost topology and ballast was based on half bridge resonant inverter with LCC resonant tank. The duty cycle and frequency of control circuit experimental were performed to determine lamp power, efficiency and power factor. The results showed that the greatest power factor on single stage circuit is 0.888 and power factor on double stages is 0,946. The maximum efficiency of the single stage and double stage consecutively are 17.02% and 17.49%.

*Keywords: Power Factor, Buckboost, Fluorescent, single stage, double stage*

## 1. Pendahuluan

Lampu merupakan peralatan listrik yang sangat banyak digunakan. Ada berbagai macam jenis lampu yang memiliki karakteristik tersendiri. Salah satu lampu yang banyak digunakan adalah lampu jenis *fluorescent*. Lampu jenis ini banyak digunakan karena mudah didapatkan dan memiliki intensitas cahaya yang relatif tinggi

dibandingkan dengan lampu jenis *incandescent*. Lampu fluorescent membutuhkan rangkaian *ballast* untuk menyalakan lampu. *Ballast* terdiri dari 2 jenis yaitu magnetik dan elektronik. *Ballast* yang sering digunakan adalah *ballast* magnetik yang memiliki faktor daya yang rendah, sementara *ballast* elektronik masih jarang digunakan.

Penelitian mengenai *ballast* elektronik untuk suplai lampu *fluorescent* sudah banyak dilakukan. *Ballast* elektronik untuk lampu *fluorescent* memiliki faktor daya yang rendah sehingga diperlukan rangkaian perbaikan faktor daya [5]. Faktor daya yang rendah baik pada *ballast* elektronik maupun *ballast* magnetic sebenarnya dapat ditingkatkan. Untuk *ballast* elektronik, rangkaian pengubah tegangan DC atau konverter dapat dimanfaatkan sebagai rangkaian perbaikan faktor daya dengan memanfaatkan proses pensaklaran pada konverter [6][9][17].

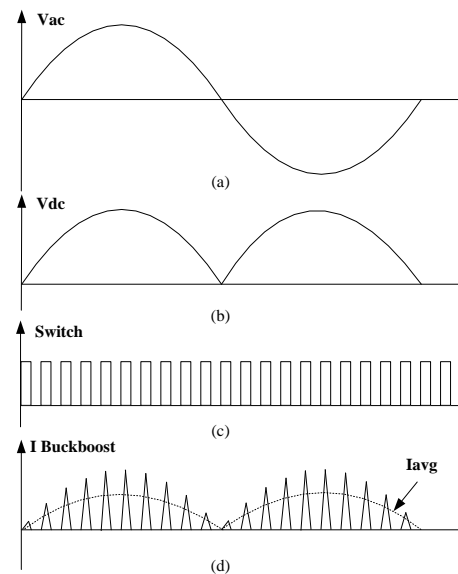
Rangkaian perbaikan faktor daya pada lampu *fluorescent* yang banyak diketahui saat ini terdiri dari 2 rangkaian kontrol, yaitu kontrol pada Konverter dan kontrol pada *inverter/ ballast*. Rangkaian dengan dua sistem pengontrolan ini disebut dengan rangkaian perbaikan faktor daya dua tingkat atau *Power Factor Correction Double Stage*. Kedua rangkaian kontrol ini dapat digabung menjadi 1 rangkaian pengontrolan dengan dilakukan perubahan pada rangkaian *inverter* dan konverter. Rangkaian perbaikan faktor daya dengan 1 rangkaian pengontrolan disebut sebagai rangkaian perbaikan faktor daya satu tingkat atau *Power Factor Correction Single Stage* [4][7][8]. Rangkaian satu tingkat ini memiliki keuntungan yaitu menghemat dalam rangkaian pengontrolan dan dapat mengurangi rugi-rugi akibat pensaklaran.

Pada penelitian ini akan dirancang 2 rangkaian perbaikan faktor daya yaitu rangkain 1 tingkat (*PFC Single Stage*) dan rangkaian 2 tingkat (*PFC Double Stage*) dengan konfigurasi konverter *buckboost*. Penelitian akan membahas mengenai kinerja dari kedua rangkaian ini dalam menyuplai beban berupa lampu *fluorescent*. Penelitian mengenai perbandingan dua metode pensaklaran pada rangkaian perbaikan faktor daya belum pernah dilakukan sebelumnya.

## 2. Metode

Rangkaian *Active PFC* merupakan solusi yang paling banyak digunakan untuk memperbaiki faktor daya. Rangkaian ini menggunakan kontrol pensaklaran untuk memperbaiki faktor daya sisi sumber. Dengan kontrol pensaklaran yang diletakan setelah penyearah, maka PFC bisa dibuat dengan menggunakan konfigurasi Konverter DC-DC yang bisa diatur sistem pensaklarannya.

Rangkaian PFC dioperasikan pada mode DCM (*Discontinuous Conduction Mode*), frekuensi dan *duty cycle* yang tetap untuk mendapatkan faktor daya mendekati 1. [6]

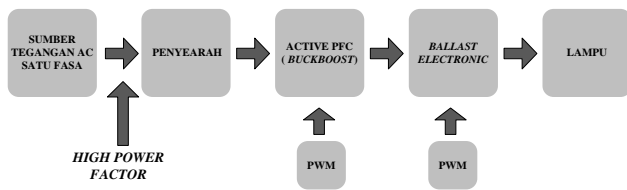


**Gambar 1. Prinsip kerja *buckboost* sebagai PFC (a) tegangan jala-jala AC (b) tegangan penyearah DC (c) pensaklaran konverter *buckboost* (d) arus *buckboost* hasil pensaklaran**

Gambar 1(a) menunjukkan gelombang tegangan masukan AC yang berbentuk sinusoidal ( $V_{ac}$ ). Kemudian gelombang  $V_{ac}$  tersebut disearahkan menjadi gelombang DC yang ditunjukkan pada Gambar 1(b). Pensaklaran pada *buckboost* pada Gambar 1(c) menyebabkan gelombang arus pada *buckboost* (Gambar 1(d)) menjadi terbagi-bagi dan menyerupai gelombang tegangan  $V_{dc}$ . Dapat dilihat bahwa gelombang arus Gambar 1(d) satu fasa dengan gelombang tegangan Gambar 1(b).  $I_{avg}$  pada Gambar 1(d) merupakan besar arus rata-rata.

Gelombang arus Gambar 1 (d) merupakan gelombang arus DC, apabila melewati penyearah dan berada pada sisi jala-jala, maka arus DC menjadi arus AC yang satu fasa dengan tegangan pada jala-jala. Prinsip kerja tersebut yang menyebabkan faktor daya mendekati 1. Dengan gelombang arus yang masih terbeagi(dicacah) ini, menyebabkan harmonik arus menjadi besar. Dapat dilihat bahwa gelombang arus melewati ground yang artinya gelombang tersebut adalah mode pensaklaran DCM. [7] [8]

Kekurangan pengoprasian konverter pada mode DCM adalah besarnya distorsi arus pada sisi sumber (akibat dari arus frekuensi tinggi yang tidak bekerja secara *continuous*). Stres tegangan dan arus yang tinggi pada pensaklaran menyebabkan pengoperasian DCM tidak cocok untuk beban dengan daya tinggi.[6]

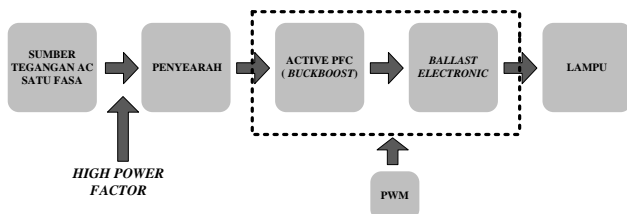


Gambar 2. Blok diagram Active PFC buckboost

Gambar 2 menunjukkan blok diagram PFC menggunakan konfigurasi konverter buckboost. Faktor daya yang tinggi didapatkan pada sisi sumber sebelum penyearah dengan pengaturan switching pada buckboost.

Pada konfigurasi Active PFC membutuhkan komponen dengan ukuran yang cukup besar untuk mendapatkan faktor daya yang tinggi. Rangkaian perbaikan faktor daya banyak menggunakan konverter dan terhubung dengan inverter resonan (ballast) sebagai suplai lampu fluorescent.

Berbagai macam konfigurasi PFC; buck, buckboost, sepic, boost yang terhubung dengan ballast maka sistem rangkaian kontrol dapat disederhanakan hanya menjadi 1 sistem kontrol saja. PFC dengan hanya 1 sistem kontrol disebut sebagai rangkaian perbaikan faktor daya 1 tingkat atau PFC Single Stage. Rangkaian single stage ini menyebabkan Active PFC lebih disukai sebagai desain PFC untuk lampu jenis fluorescent.[6]



Gambar 3. Blok Diagram PFC buckboost single stage

Gambar 3 merupakan blok diagram PFC Buckboost single stage yang secara umum memiliki konfigurasi sama dengan PFC buckboost biasa. Hanya saja antara buckboost dan inverter dikontrol oleh satu pemucuan PWM saja.

## 2.1. Perancangan Rangkaian kontrol

Pada penelitian ini, akan dibuat 2 buah rangkaian yaitu perbaikan faktor daya 1 tingkat dan 2 tingkat. Masing-masing rangkaian tersebut memiliki karakteristik kontrol yang berbeda.

Secara umum, pembentukan sinyal kontrol pada kedua rangkaian menggunakan IC494 yang dikombinasikan dengan rangkaian driver. Pemilihan TL494 karena IC ini bisa diatur frekuensi dan duty cycle.

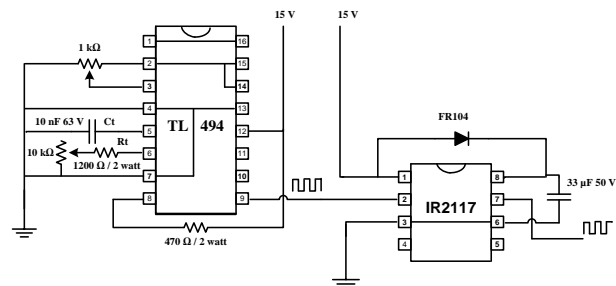
### 2.1.1. PFC Double Stage

Pada topologi rangkaian ini menggunakan 2 buah rangkaian kontrol yaitu untuk konverter buckboost dan inverter resonan.

#### 2.1.1.1. Kontrol Konverter Buckboost

Rangkaian kontrol menggunakan IC TL494 sebagai pembentuk sinyal kotak dan dihubungkan dengan IC IR2117 sebagai penguat sinyal kotak.

Pada perancangan penelitian ini, frekuensi yang digunakan untuk pensaklaran pada Buckboost adalah 21 kHz. Frekuensi ini dipilih karena berada di atas frekuensi pendengaran manusia dan menghindari Konverter DC-DC mengalami saturasi akibat frekuensi yang tinggi.[20]

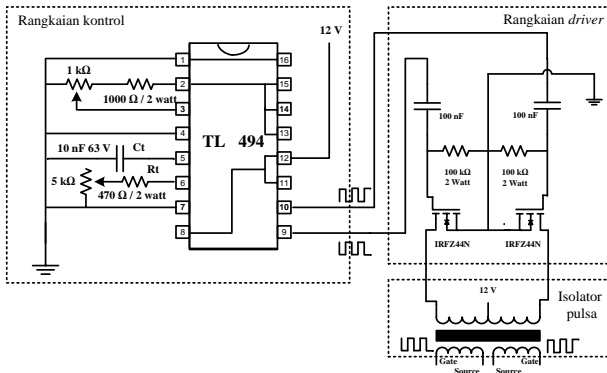


Gambar 4. Rangkaian kontrol konverter buckboost

#### 2.1.1.2. Kontrol Inverter

Inverter bekerja dengan menggunakan dua buah MOSFET yang dipicu secara bergantian (Inverter Half Bridge). Rangkaian kontrol pemucuan inverter IC TL 494 sebagai pengatur duty cycle dan frekuensi dihubungkan dengan rangkaian driver dan isolator pulsa. IC ini bekerja secara push pull yaitu memiliki 2 sinyal keluaran yang aktif secara bergantian dengan duty cycle maksimal 50%.

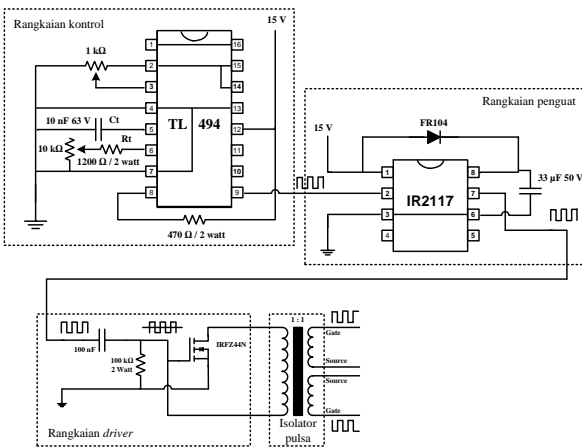
Driver dan isolator pulsa berfungsi mengoptimalkan fungsi kerja MOSFET dan memberi perlindungan terhadap rangkaian kontrol itu sendiri. Rangkaian driver digunakan untuk memastikan bahwa 2 buah MOSFET dipicu secara bergantian sehingga tidak terjadi hubung singkat. Trafo inti ferit yang digunakan sebagai isolator pulsa memisahkan rangkaian daya dan rangkaian kontrol secara elektrik.



Gambar 5. Rangkaian kontrol inverter

### 2.1.2. PFC Double Stage

PFC *single stage* memiliki sistem kontrol pemecuan secara bersama dimana *inverter* dan Konverter DC-DC *Buckboost* dipicu oleh satu rangkaian pemecuan saja. sinyal keluaran dari IC TL494 hanya 1 buah yang kemudian masuk pada rangkaian *driver*.

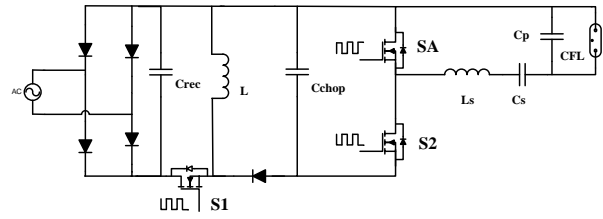


Gambar 6. Rangkaian kontrol PFC Single Stage

Rangkaian ini hanya memiliki 1 sinyal keluaran dari IC TL494 dan IC IR2117. Ini dilakukan agar duty cycle kerja bisa lebih dari 50%. Satu buah sinyal ini kemudian masuk ke rangkaian driver dan isolator pulsa Setelah melewati isolator pulsa, sinyal kontrol menjadi 2 buah yang memiliki *duty cycle* saling berkebalikan antara kedua buah sinyal.

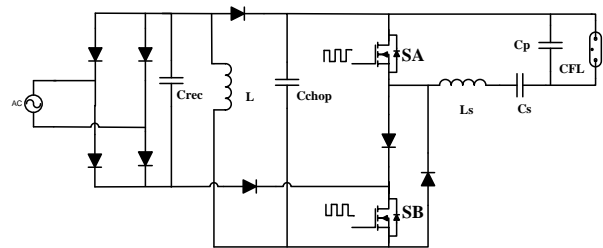
## 2.2. Perancangan Rangkaian Daya

Rangkaian daya terdiri dari 2 buah rangkaian utama yaitu rangkaian perbaikan faktor daya 1 tingkat (*PFC Single Stage*) dan 2 tingkat (*PFC Double Stage*).



Gambar 7. Rangkaian Daya PFC Double Stage

Gambar 7 menunjukkan rangkaian PFC menggunakan 2 sinyal kontrol. MOSFET S1 bekerja sebagai pensaklaran konverter *buckboost* sedangkan MOSFET SA dan S2 bekerja untuk pensaklaran *inverter*.



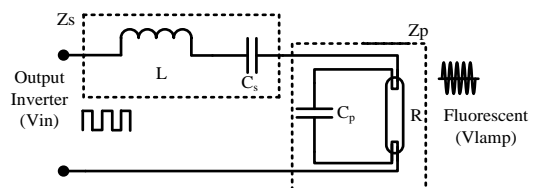
Gambar 8. Rangkaian Daya PFC Single Stage

PFC Single Stage hanya memiliki 2 buah MOSFET Sebagai sistem pensaklaran. MOSFET SA dan SB digunakan sebagai kontrol inverter. Akan tetapi MOSFET SB juga digunakan sebagai kontrol pensaklaran konverter Buckboost.

Untuk mempermudah dalam penelitian yaitu membandingkan kinerja rangkaian, maka komponen rangkaian daya pada kedua rangkaian PFC memiliki spesifikasi yang sama.

### 2.2.1. Resonan LCC

Pada perancangan, rangkaian resonan digunakan untuk menyediakan tegangan yang cukup tinggi pada proses penyalan lampu (sebagai ballast elektronik). Rangkaian resonan LCC dipilih karena jenis resonan ini dapat memberikan tegangan yang tinggi untuk proses *igniting* lampu dan juga memberikan proses penyalan lampu yang halus.<sup>[6]</sup>



Gambar 9. Rangkaian resonan LCC

Gambar 9 menunjukkan rangkaian resonan LCC dengan beban lampu *fluorescent*. Tegangan masuk berupa sinyal kotak yang merupakan keluaran dari *inverter* frekuensi tinggi. Resonan LCC mengubah gelombang tegangan kotak menjadi gelombang sinus yang digunakan untuk menyuplai beban lampu. Pengaturan tegangan pada lampu dilakukan dengan mengatur besar frekuensi gelombang output *inverter*. Langkah-langkah dalam merancang rangkaian resonan LCC sebagai suplai lampu *fluorescent* dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Menentukan impedansi lampu (Z)

Beban yang digunakan dalam penelitian ini adalah lampu *fluorescent* 7 Watt. Tegangan kerja lampu adalah 47 volt dengan arus sebesar 0.175 Ampere. Nilai  $\alpha$  diperlukan untuk menghitung besar nilai L dan C.

$$C_e = \frac{C_s.C_p}{C_s + C_p} \tag{3.1}$$

$$\alpha = \frac{C_e}{C_p} \tag{3.2}$$

$$\alpha = \frac{C_s}{C_s + C_p} \tag{3.3}$$

Nilai  $\alpha$  berpengaruh terhadap proses heating dan igniting pada lampu *fluorescent*. Untuk membuat range variasi frekuensi dari fase heating ke *igniting* lebih lebar, nilai  $\alpha$  dipilih mendekati 1 yaitu sebesar  $\alpha = \frac{C_s}{C_s + C_p} = 0,9$ .<sup>[5][6]</sup>

Dengan menggunakan hukum *kirchoff* maka dapat dihitung impedansi lampu (Z) sebagai berikut.

$$Z = \frac{V_{lamp}}{\alpha \cdot I_{lamp}} \tag{3.4}$$

$$Z = \frac{47}{0,9 \times 0,175} = 298,4 \Omega$$

2. Menentukan frekuensi resonan

Pada perancangan, frekuensi resonan yang juga frekuensi kerja rangkaian ditentukan sebesar 25 KHz. Nilai frekuensi ditentukan sebesar 25 KHz karena frekuensi tersebut di atas frekuensi pendengaran manusia sehingga tidak mengganggu ketika dioperasikan. Selain itu, rangkaian resonan juga digunakan pada rangkaian PFC 1 tingkat (*single stage*). Pada *PFC* ini frekuensi resonan juga sama dengan frekuensi kerja Konverter DC-DC. Dengan frekuensi yang relatif rendah (25 KHz), dapat mengurangi efek saturasi pada rangkaian Konverter DC-DC. Saturasi terjadi ketika induktor bekerja pada frekuensi yang terlalu tinggi menyebabkan nilai reaktansi induktor meningkat dan permeabilitas inti induktor turun sehingga *losses* induktor meningkat.[20]

3. Menentukan tegangan masukan dan keluaran resonan

Tegangan keluaran resonan merupakan tegangan kerja pada lampu yaitu sebesar 47 volt dan tegangan masukan resonan merupakan keluaran dari *inverter*. Dalam perancangan, tegangan keluaran dari *inverter* adalah sebesar 20 V<sub>AC</sub>.

4. Menghitung nilai komponen resonan Ls (induktor), Cs (Kapasitor Seri) dan Cp (Kapasitor paralel)

Dari Gambar 9 dapat diketahui hubungan antara tegangan masukan resonan (gelombang kotak) dan tegangan keluaran resonan sebagai berikut.

$$\left| \frac{V_{lamp}}{\alpha \cdot I_{lamp}} \right| = \left| \frac{Z_p(j\omega)}{Z_p(j\omega) + Z_s(j\omega)} \right| \tag{3.5}$$

Frekuensi resonan saat *igniting* dan frekuensi ketika dalam kondisi *steady state* dapat dilihat dalam persamaan 3.6 dan 3.5 berikut. [8][17]

$$\omega_{igniting} = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_s.C_p}{C_s + C_p}}} \tag{3.6}$$

$$\omega_{steady} = \frac{1}{\sqrt{L.C_s}} \tag{3.7}$$

Jika frekuensi *starting* lebih besar dari frekuensi *steady state* maka rangkaian akan bekerja pada *zero voltage switching* (ZVS).<sup>[17]</sup> Hubungan keduanya diasumsikan dengan persamaan berikut.

$$\omega_{starting} = 4\omega_{steady} \tag{3.8}$$

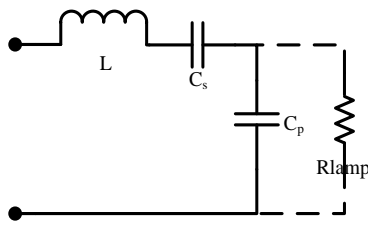
Dengan menggabungkan persamaan 3.5 sampai 3.8 maka dapat dihitung nilai induktor dan kapasitor sebagai berikut.<sup>[17]</sup>

$$C_s = 15 \left( \frac{V_{lamp}}{V_{in}} \right) \left( \frac{1}{Z_{lamp} \cdot \omega_{starting}} \right) = \left( \frac{47}{20} \right) \left( \frac{1}{298,4(2.3,14.25000)} \right) = 751,7nF$$

$$C_p = \frac{C_s}{15} = \frac{751,7nF}{15} = 50,11nF$$

$$L = \frac{16}{C_s \cdot (\omega_{starting})^2} = \frac{16}{751,7nF(2.3,14.25000)^2} = 0,86mH$$

Ketika lampu belum menyala, yaitu pada saat proses *igniting*, nilai tahanan lampu sangat besar sehingga arus cenderung mengalir pada kapasitor Cp dan rangkaian ekuivalen resonan menjadi seperti Gambar 10.



Gambar 10. Rangkaian resonan lampu belum menyala

Pada proses *igniting*, dengan tahanan yang besar maka kapasitor Cs dan Cp akan terhubung seri dan frekuensi kerja sama dengan frekuensi resonan saat *igniting*. Frekuensi resonan saat *igniting* dapat dihitung dengan menggunakan penurunan persamaan 3.6.[5][8][17]

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_s C_p}{C_s + C_p}}} \quad (3.9)$$

$$f = \frac{1}{2.3,14 \sqrt{0,86mH \frac{741,9nF \cdot 51nF}{741,9nF + 51nF}}} = 24856,64Hz = 24,856kHz$$

Dari perhitungan di atas didapatkan frekuensi kerja saat *igniting* adalah sebesar 24,85 KHz. Dalam perancangan, tegangan masukan resonan dari inveter adalah sebesar 20 volt. Untuk menghitung tegangan keluaran resonan dapat digunakan persamaan *Gain* ( $j\omega$ ).[5]

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{C_p}{C_s} - \omega^2 LC_p + \frac{j\omega L}{R} - \frac{j}{\omega C_s R}} \quad (3.10)$$

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 + \frac{C_p}{C_s} - \omega^2 LC_p + \frac{j\omega L}{R} - \frac{j}{\omega C_s R}} \quad (3.11)$$

$$V_{out} = \frac{20}{1 + \frac{51}{741,9} - \omega^2 (0,86 \cdot 10^{-3}) (51 \cdot 10^{-9}) + j \left( \frac{\omega (0,86 \cdot 10^{-3})}{298,4} - \frac{j}{\omega (741,9 \cdot 10^{-9}) (298,4)} \right)}$$

$$V_{out} = \frac{20}{|-0,0000464 + j(0,4215)|}$$

$$V_{out} = \frac{20}{0,42155} = 47,45Volt$$

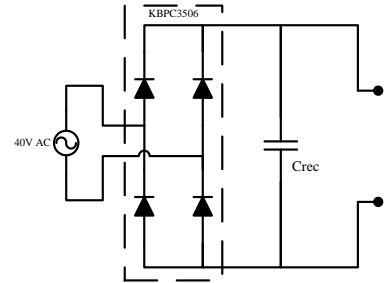
Tegangan keluaran resonan pada saat frekuensi 24,85 KHz adalah sebesar 47,45 volt. Nilai tegangan keluaran ini mendekati tegangan kerja lampu *fluorescent* yaitu 47 volt sehingga sudah cukup untuk suplai lampu.

### 2.2.2. Sumber AC 1 Fasa

Sumber tegangan yang dibutuhkan untuk menyuplai rangkaian PFC adalah sebesar 40 Volt AC. Tegangan tersebut diperoleh dengan menurunkan tegangan jala-jala 220 volt menggunakan trafo *step down* 5A. Sumber 40 Volt ini akan disearahkan yang digunakan sebagai suplai pada Konverter DC-DC *Buckboost*.

### 2.2.3. Penyearah Gelombang Penuh

Penyearah jembatan penuh terdiri dari *diode bridge* KBPC3506 dan kapasitor tapis.



Gambar 11. Penyearah Gelombang penuh

Untuk mendapatkan faktor daya yang tinggi di sisi sumber, seharusnya tidak diperlukan nilai kapasitor tapis ( $C_{rec}$ ) yang tinggi. Semakin besar nilai  $C_{rec}$  maka *Crest Factor* (CF) pada lampu akan turun, namun faktor daya sisi sumber akan buruk.<sup>[4]</sup> Untuk mendapatkan faktor daya yang baik, maka dipilih nilai  $C_{rec}$  yang relatif kecil yaitu sebesar 10  $\mu F/450 V$ .

Dengan adanya pemasangan kapasitor tapis pada keluaran penyearah sehingga tegangan keluaran rata-rata mendekati nilai maksimalnya yaitu  $V_{DC} = \sqrt{2} \times 40 = 56,56 V$ . Akan tetapi, berdasarkan simulasi dengan software PSIM, nilai tegangan keluaran hanya 40 V. Ini disebabkan karena nilai kapasitor yang kecil dan pembebanan proses pensaklaran pada rangkaian PFC.

### 2.2.4. Induktor Buckboost

Untuk mendapatkan faktor daya yang tinggi di sisi sumber maka Konverter DC-DC harus bekerja pada mode DCM. Mode DCM dapat dihasilkan dengan mengatur nilai induktansi induktor.<sup>[4][7]</sup> Induktor *Buckboost* yang juga merupakan induktor PFC dapat dihitung nilai induktansi dengan memperhitungkan parameter lain yang berhubungan. Perhitungan nilai induktor agar bekerja pada mode DCM dapat dilakukan menggunakan persamaan berikut.<sup>[7]</sup>

$$L = \frac{D_1^2 V_m^2}{4f_s (P_o)} \quad (3.12)$$

- L = Induktansi Induktor (H)
- D = *Duty cycle* (%)
- Vm = Tegangan maksimal (volt)
- Fs = frekuensi kerja (Hertz)
- Po = Daya beban (Watt)

Pada perancangan, *duty cycle* diatur sebesar 50 %, tegangan Vm adalah 56,56 volt, frekuensi kerja 25000 Hz dan daya lampu adalah 7 watt. Dengan menggunakan persamaan 3.14 dapat diperoleh nilai induktansi L sebagai berikut.

$$L = \frac{D_1^2 V_m^2}{4f_s(P_o)} = \frac{0,5^2(56,56)^2}{4 \times 25000 \times 7} = 1,1425 \text{mH}$$

### 3.2.5. Kapasitor Buckboost

Kapasitor berfungsi sebagai filter tegangan untuk membatasi ripple tegangan karena kenaikan nilai beban sehingga tegangan keluaran lebih rata. Dengan asumsi nilai tahanan beban adalah nilai tahanan pada lampu maka.

$$C_{\min} = \frac{D}{f_s R} \times \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{CPP}}} \tag{3.13}$$

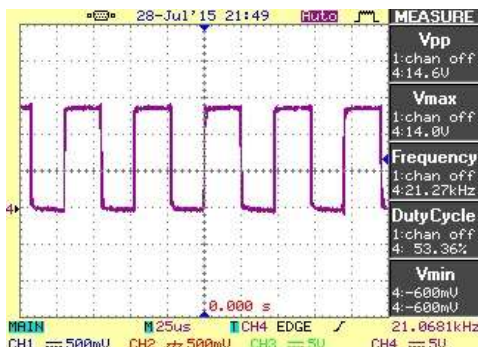
$$C_{\min} = \frac{0,5}{25000 \cdot 289} \times \frac{93,33}{0,928}$$

$$C_{\min} = 6,95 \mu\text{F}$$

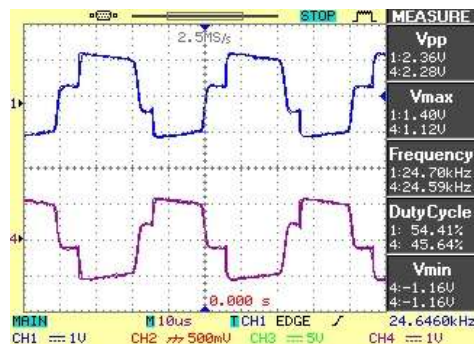
Besar nilai kapasitor minimal sesuai perhitungan adalah 6,95 uF. Kapasitor yang dipilih sebagai filter Buckboost adalah 100 uF/ 450 V. Pemilihan nilai kapasitor yang lebih besar ini bertujuan agar tegangan keluaran Buckboost lebih halus.

## 3. Hasil dan Analisis

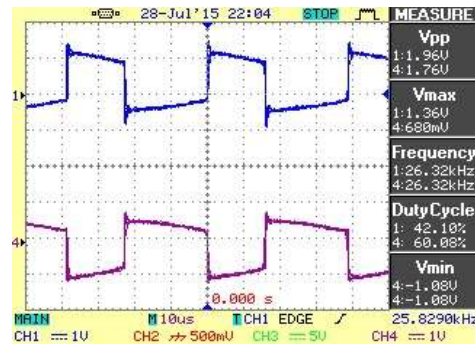
### 3.1. Pengujian rangkaian kontrol



(a)



(b)



(c)

Gambar 12. Sinyal kontrol (a) Konverter Buckboost (b) inverter (c) PFC Double Stage

Pengujian sinyal kontrol dilakukan pada 3 buah rangkaian kontrol yaitu 2 buah kontrol PFC Double Stage untuk konverter dan inverter, sedangkan 1 kontrol untuk PFC Single Stage.

Gambar 12 menunjukkan gelombang kontrol MOSFET pada rangkaian PFC. Piranti MOSFET yang digunakan adalah IRFP460. Dari 3 gambar gelombang dapat diketahui bahwa tegangan maksimal sudah di atas tegangan kerja MOSFET (gate source voltage/ $V_{GS}$ ) yaitu 4 Volt. Ini sudah cukup untuk memicu MOSFET untuk bekerja.

### 3.2. Analisis Proses Penyalan Lampu

Penyalan lampu discharge, dalam hal ini lampu fluorescent, terdiri dari proses heating, igniting, dan running. Proses heating merupakan proses pemanasan pada elektroda lampu. Untuk dapat mencapai proses igniting tegangan pada kedua sisi elektroda harus cukup tinggi agar lampu bisa menyala. Setelah menyala, lampu berada pada fase igniting. Tegangan yang tinggi diperoleh dari rangkaian resonan LCC dengan pengaturan frekuensi sampai diperoleh tegangan yang paling tinggi yaitu pada saat rangkaian resonansi.

#### 3.2.1. PFC Double Stage

Pengujian proses penyalan lampu pada PFC ini dilakukan dengan pengaturan pada Konverter Buckboost dan juga pada inverter. Rangkaian inverter dan resonan dirancang untuk menyalakan lampu dari tegangan 40 VDC menjadi tegangan kerja lampu yaitu 47 VAC. Dengan tegangan masuk dari penyearah adalah 40 VDC maka Konverter Buckboost diharapkan bisa menyalakan lampu pada duty cycle 50%.

Pengujian pada *PFC Double Stage* ini dilakukan dengan mengatur frekuensi kerja *inverter* pada frekuensi resonan yaitu 25 KHz. Frekuensi *inverter* diposisikan pada frekuensi resonan bertujuan agar lampu mendapatkan tegangan yang tinggi pada saat proses *igniting*. *Duty cycle* pada konverter dinaikan perlahan dari 0 sampai terjadi proses *igniting* dan lampu menyala. Sementara itu, frekuensi kerja konverter tetap sesuai perancangan yaitu 21 KHz.

Tabel 1. Pengujian penyalan lampu PFC Double Stage

Parameter	Igniting	Running
Tegangan	98,99 V	35,35V
Arus	47,8 mA	141,4 mA

Pada hasil pengujian penyalan lampu didapatkan hasil tegangan *igniting* sebesar 98,99 V dan tegangan running sebesar 35,35V. Lampu berhasil dinyalakan pada frekuensi inverter 25 KHz dengan *duty cycle* konverter *buckboost* sebesar 60%.

### 3.2.2. PFC Single Stage

Untuk proses penyalan lampu pada PFC ini berbeda dengan *PFC Double Stage*. Pada PFC ini, kedua MOSFET bekerja pada *duty cycle* 50% dan frekuensi diatur diatas frekuensi resonan perancangan. Kemudian frekuensi diturunkan perlahan sampai lampu menyala.

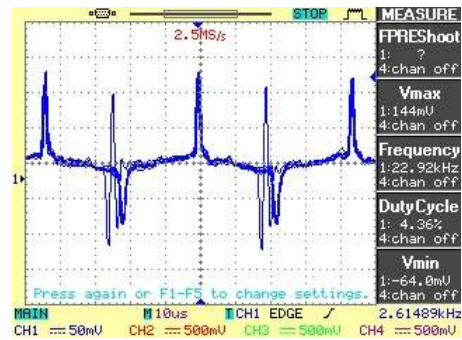
Tabel 2. Pengujian penyalan lampu PFC Single Stage

Parameter	Igniting	Running
Tegangan	106,06 V	35,35 V
Arus	226,2 mA	141,4 mA

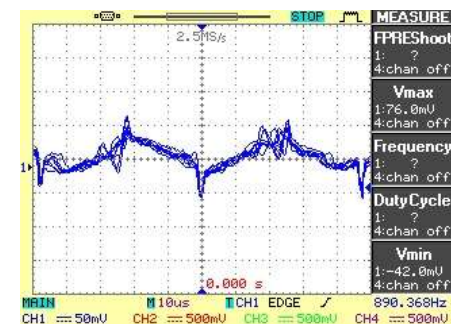
Pengujian penyalan lampu menunjukkan bahwa lampu dapat dinyalakan pada frkuensi 22,9 KHz. Frekuensi ini berbeda dari perancangan. Hal ini bisa terjadi karena perubahan nilai komponen resonan akibat tegangan tinggi. Selain itu, komponen induktif memiliki nilai kapastif demikian juga sebaliknya. Hal ini tidak diperhitungkan dalam perancangan.

### 3.3. Pengujian Arus Induktor

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah PFC (konverter *Buckboost*) bekerja pada mode *Continuous Current Mode (CCM)* atau *Discontinuous Current Mode (DCM)*. Pengujian ini dilakukan ketika rangkaian dalam kondisi berbeban yaitu lampu sudah menyala.



(a)



(b)

Gambar 13. Arus induktor (a) *PFC Double Stage* (b) *PFC Single Stage*

*PFC Double Stage* maupun *PFC Single Stage* bekerja pada mode *Discontinuous Conduction Mode (DCM)*. Hal ini dapat dilihat dari gelombang arus yang menyentuh dan melewati titik 0 (ground).

### 3.4. Pengujian Pengukuran Daya

Pengujian pengukuran daya dilakukan dengan mengukur daya masukan dan daya keluaran pada beban. Tujuan pengujian pengukuran daya yaitu untuk mengetahui karakteristik alat terhadap variasi frekuensi dan *duty cycle*. Karakteristik yang akan dianalisis adalah besar faktor daya, besar daya yang digunakan oleh alat, dan menghitung efisiensi.

#### 3.4.1. PFC Double Stage

Tabel 3. Data variasi duty cycle PFC Double Stage

Frekuensi inverter	Duty cycle konverter	Daya lampu	Data masukan rangkaian		Efisiensi
			Cos $\phi$	P	
25 KHz	40%	0,99 W	0,81	8,58 W	11,53 %
25 KHz	45%	1,37W	0,842	10,71 W	12,87 %
25 KHz	50%	1,87W	0,864	10,93 W	17,10 %
25 KHz	55%	2,34W	0,898	13,32 W	17,59 %
25 KHz	60%	2,67W	0,925	15,61 W	17,12 %
25 KHz	65%	2,91W	0,936	17,85 W	16,29 %
25 KHz	70%	2,95W	0,946	20,05 W	14,74 %



Tabel 4. Data variasi frekuensi PFC Double Stage

Frekuensi inverter	Duty cycle konverter	Daya lampu	Data masukan rangkaian		Efisiensi
			Cos $\phi$	P	
17 KHz	50%	1,32W	0,864	10,88 W	12,13%
18 KHz	50%	1,47W	0,869	11,05 W	13,32%
19 KHz	50%	1,50W	0,875	11,13 W	13,56%
20 KHz	50%	1,54W	0,878	13,03 W	11,86%
21 KHz	50%	1,62W	0,883	13,10 W	12,38%
22 KHz	50%	1,84W	0,886	13,02 W	14,18%
23 KHz	50%	1,75W	0,879	13,04 W	13,42%
24 KHz	50%	1,73W	0,877	11,15 W	15,54%
25 KHz	50%	1,71W	0,875	11,13 W	15,41%
26 KHz	50%	1,58W	0,872	11,09 W	14,27%
27 KHz	50%	1,64W	0,870	10,96 W	14,96%
28 KHz	50%	1,31W	0,863	10,87 W	12,09%

Untuk variasi *duty cycle*, daya paling tinggi terjadi ketika *duty cycle* konverter diatur pada 70 % yaitu sebesar 20,05 W untuk daya masukan dan 2,95 W untuk daya keluaran . Sementara itu, daya paling rendah terjadi ketika *duty cycle* konverter diatur pada 40 % yaitu sebesar 8,58W untuk daya masukan dan 0,99 W untuk daya keluaran. Faktor Daya paling tinggi adalah 0,946.

Untuk variasi frekuensi, daya masukan paling tinggi terjadi ketika frekuensi inverter diatur pada nilai 21 KHz yaitu sebesar 13,10 W dan daya keluaran pada frekuensi 22 KHz yaitu sebesar 1,84 W. Sementara faktor daya sisi masukan yang paling tinggi adalah pada frekuensi 22 KHz sebesar 0,886.

3.4.2. PFC Single Stage

Tabel 5. Data variasi duty cycle PFC Single Stage

Frekuensi inverter	Duty cycle MOSFET SB	Daya lampu	Data masukan rangkaian		Efisiensi
			Cos $\phi$	P	
25 KHz	40%	0,70W	0,817	10,34 W	6,77%
25 KHz	45%	0,70W	0,831	10,52 W	6,68%
25 KHz	50%	0,99W	0,861	10,84 W	9,20%
25 KHz	55%	1,96W	0,888	13,11 W	14,98%
25 KHz	60%	0,87W	0,872	12,87 W	6,78%

Untuk variasi *duty cycle*, daya masukan dan keluaran maksimal dicapai pada saat *duty cycle* kontrol MOSFET SB sebesar 55%, masing-masing sebesar 13,11 W dan 1,96 W. MOSFET SB Juga berfungsi sebagai kontrol pada konverter *Buckboost*. Ketika sinyal kontrol pada MOSFET SB memiliki *duty cycle* yang semakin tinggi maka Tegangan keluaran konverter semakin tinggi. Faktor daya masukan paling tinggi adalah 0,888.

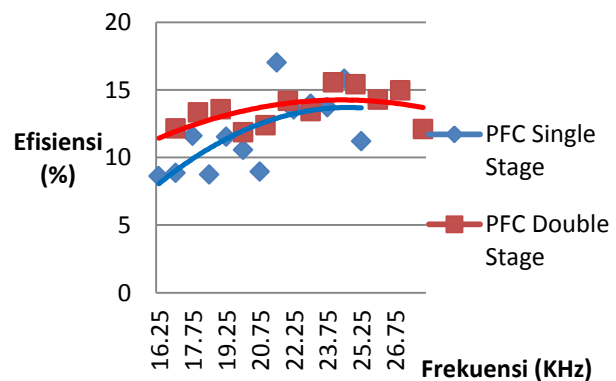
Daya masukan paling tinggi ketika frekuensi diatur pada nilai 20,75 KHz yaitu sebesar 12,85 W dan daya keluaran pada frekuensi 21,5 KHz yaitu sebesar 2,17 W. Sementara faktor daya sisi masukan yang paling tinggi adalah pada frekuensi 16,25 KHz sebesar 0,882.

Tabel 6. Data variasi duty cycle PFC Single Stage

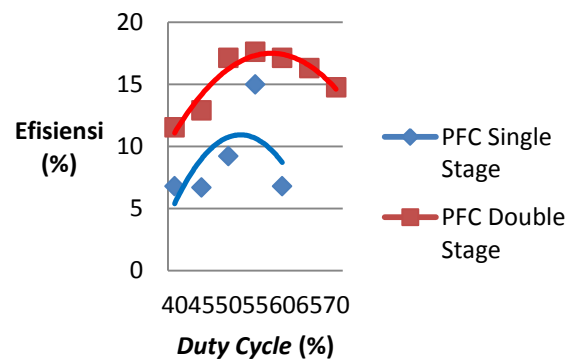
Frekuensi inverter	Duty cycle MOSFET SB	Daya lampu	Data masukan rangkaian		Efisiensi
			Cos $\phi$	P	
16,25 KHz	50%	0,95W	0,882	11,06W	8,61%
17 KHz	50%	0,98W	0,878	11,11W	8,85%
17,75 KHz	50%	1,27W	0,869	11,00W	11,61%
18,5 KHz	50%	0,95W	0,860	10,88W	8,74%
19,25 KHz	50%	1,25W	0,864	10,88W	11,53%
20 KHz	50%	1,15W	0,864	10,88W	10,57%
20,75 KHz	50%	1,14W	0,870	12,85W	8,94%
21,5 KHz	50%	2,17W	0,866	12,79W	17,02%
22,25 KHz	50%	1,73W	0,866	12,79W	13,53%
23 KHz	50%	1,76W	0,862	12,67W	13,96%
23,75 KHz	50%	1,49W	0,862	10,91W	13,71%
24,5 KHz	50%	1,70W	0,850	10,76W	15,83%
25,25 KHz	50%	1,13W	0,805	10,14W	11,20%

3.4.3. Efisiensi

Efisiensi dihitung dengan membandingkan daya keluaran dengan daya masukan. Variasi dilakukan terhadap frekuensi dan juga *duty cycle*.



Gambar 14. Perbandingan efisiensi daya PFC Single Stage dan PFC Double Stage terhadap perubahan frekuensi

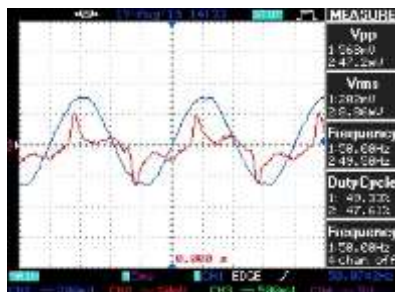


Gambar 15. Perbandingan efisiensi daya PFC Single Stage dan PFC Double Stage terhadap perubahan duty cycle

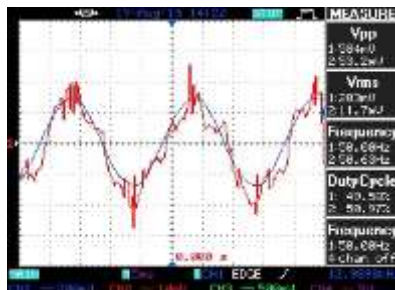
Efisiensi *PFC Double Stage* lebih tinggi dari pada *PFC Single Stage* terutama pada frekuensi yang rendah. Akan tetapi, efisiensi tertinggi ada pada *PFC Single Stage* yaitu pada frekuensi 21,5 KHz. Seperti pada variasi frekuensi, dengan perubahan *duty cycle* maka *PFC Single Stage* juga memiliki efisiensi yang lebih tinggi dengan efisiensi maksimal pada *duty cycle* 55%. Secara Keseluruhan efisiensi paling tinggi pada *PFC Double Stage* adalah sebesar 17,59% dan pada *PFC Single Stage* adalah sebesar 17,02%.

**3.4.4. Perbandingan Faktor Daya**

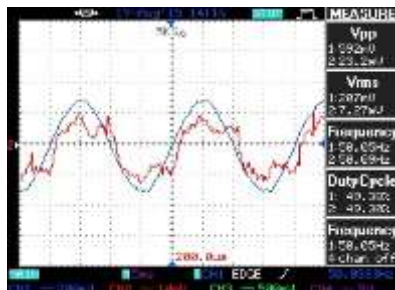
Sebagai perbandingan kinerja dari rangkaian perbaikan faktor daya, maka lampu dinyalakan dengan menggunakan rangkaian resonan tanpa adanya konverter sebagai rangkaian perbaikan faktor daya.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 16** Gelombang tegangan dan arus sisi masukan (a) tanpa PFC (b) dengan *PFC Double Stage* (c) dengan *PFC Single Stage*

Kinerja rangkaian PFC dapat diamati dari bentuk gelombang tegangan dan arus pada sisi sumber (220 V, 50

Hz). Data bentuk gelombang diambil dengan menggunakan osiloskop dengan bantuan *probe* arus dan *probe* tegangan.

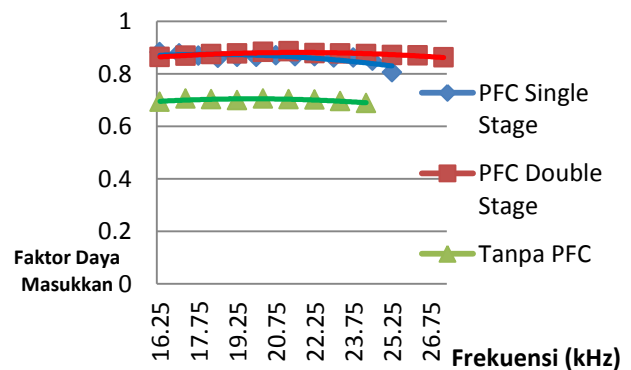
Gambar 16 menunjukkan bentuk gelombang arus dan tegangan. Gelombang warna merah merupakan gelombang arus sedangkan warna biru merupakan gelombang tegangan. Gelombang tegangan memiliki bentuk sinus dengan sedikit dipengaruhi harmonik. Pada gelombang arus juga berbentuk sinus namun dipengaruhi harmonik yang banyak. Untuk itu diperlokkan rangkaian filter pada sisi sumber untuk mengurangi besar harmonik.

Gambar 16(a) merupakan gelombang pada kondisi lampu dinyalakan tanpa menggunakan PFC. Dapat dilihat bahwa gelombang arus tidak berbentuk sinus dan terlihat beda fasa yang besar. Setelah ditambahkan rangkaian perbaikan faktor daya, Gambar 16 (b) dan Gambar 16(c) menunjukkan gelombang arus yang berbentuk sinus tapi dengan harmonik yang tinggi. Perbedaan sudut fasa arus dan tegangan *PFC Double Stage* (Gambar 16(b)) lebih kecil dari pada *PFC Single Stage* (Gambar 16(c)).

**Tabel 7.** Data faktor daya masukan tanpa rangkaian PFC

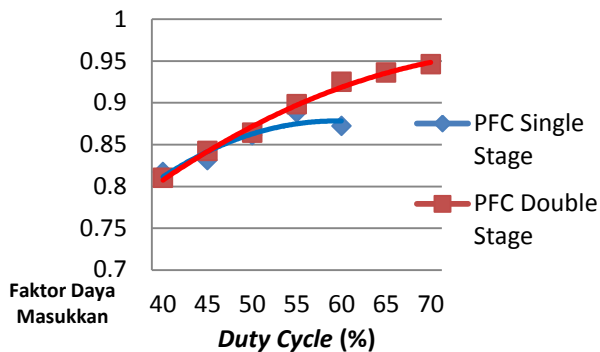
Frekuensi inverter	Faktor daya masukan
17 KHz	0,693
18 KHz	0,705
19 KHz	0,703
20 KHz	0,700
21 KHz	0,706
22 KHz	0,703
23 KHz	0,702
24 KHz	0,696
25 KHz	0,689
Rata-rata	0,699

Dari Tabel 7 dapat dilihat bahwa faktor daya masukan tanpa adanya rangkaian PFC memiliki nilai yang cukup rendah yaitu di bawah 0,85. Dengan tidak adanya rangkaian perbaikan faktor daya, maka rata-rata nilai faktor daya adalah sebesar 0,699. Dari hasil pengukuran pada sub bab sebelumnya dapat dibandingkan nilai faktor daya pada masukan rangkaian.



**Gambar 17.** Perbandingan faktor daya masukan *PFC Single Stage* dan *PFC Double Stage* terhadap perubahan frekuensi

Gambar 17 menunjukkan bahwa secara rata-rata, dengan perubahan frekuensi maka faktor daya *PFC Double Stage* lebih besar dari pada faktor daya pada *PFC Single Stage*. Hanya saja pada frekuensi yang sangat rendah, faktor daya pada *PFC Single Stage* mengalami peningkatan. Selain itu, 2 rangkaian PFC tersebut memiliki faktor daya masukan yang lebih besar dari pada tanpa menggunakan PFC secara keseluruhan.



Gambar 18. Perbandingan faktor daya Masukkan PFC Single Stage dan PFC Double Stage terhadap perubahan duty cycle

Gambar 18 menunjukkan faktor daya dengan perubahan *duty cycle*. Pada kedua rangkaian, semakin besar *duty cycle* maka faktor daya juga semakin besar. Tetap pada *PFC Single Stage* mengalami penurunan faktor daya ketika *duty cycle* 60%. Variasi *duty cycle* pada *PFC Single Stage* tidak dapat dilakukan lebih dari 60% karena beban lampu akan meredup dan padam jika melebihi nilai tersebut. Faktor daya paling tinggi pada *PFC Double Stage* dengan *duty cycle* 70%

#### 4 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Rangkaian perbaikan faktor daya dirancang memiliki tegangan masukan 220 V 50 Hz untuk menyalakan lampu *fluorescent* 7 Watt. Pada rangkaian perbaikan faktor daya 2 tingkat (*PFC Double Stage*), lampu dapat dinyalakan pada *duty cycle* konverter sebesar 60% dan frekuensi inverter 25 KHz. Sedangkan pada rangkaian perbaikan faktor daya 1 tingkat (*PFC Single Stage*) lampu dapat dinyalakan pada *duty cycle* MOSFET SB 50% dan frekuensi 22,9 KHz.
2. Daya keluaran dan masukan lampu dapat diatur dengan mengubah frekuensi dan *duty cycle* rangkaian perbaikan faktor daya. Pada *PFC Double Stage*, pengaturan daya dengan mengatur *duty cycle* konverter dari 40% sampai 70% dan frekuensi inverter dari 17 KHz sampai 28 KHz. Untuk *PFC Single Stage*, daya dapat diatur dengan mengubah *duty cycle* MOSFET SB dari 40% sampai 60% dan frekuensi dari 16,25 KHz sampai 25,25 KHz.

3. Pada *PFC Double Stage*, daya keluaran pada lampu dan daya masukan pada sumber terbesar yaitu 2,95 Watt dan 20,05 Watt pada *duty cycle* konverter 70% dan frekuensi inverter 25 KHz. Sedangkan daya yang terkecil pada *duty cycle* konverter 40% dan frekuensi inverter 25 KHz sebesar 0,99 Watt untuk daya lampu dan 8,58 Watt untuk daya pada masukan.
4. Pada *PFC Single Stage*, daya keluaran pada lampu terbesar yaitu 2,17 Watt pada *duty cycle* MOSFET SB 50% dan frekuensi 21,5 KHz dan daya masukan yang terbesar sebesar 13,11 Watt *duty cycle* MOSFET SB 55% dan frekuensi 23 KHz. Daya terkecil pada keluaran lampu sebesar 0,70 watt dan masukan sebesar 10,34 Watt yaitu pada *duty cycle* MOSFET SB sebesar 40% dan frekuensi 23 KHz.
5. Efisiensi daya pada *PFC Double Stage* paling besar 17,59% sedangkan pada *PFC Single Stage* efisiensi paling besar adalah 17,02%.
6. Faktor daya masukan pada 2 rangkaian perbaikan faktor daya (PFC) memiliki nilai faktor daya yang lebih tinggi dari pada faktor daya tanpa adanya rangkaian PFC. Tanpa menggunakan PFC, faktor daya rata-rata sebesar 0,699 sedangkan pada *PFC Double Stage* faktor daya paling besar adalah 0,946 dan *PFC Single Stage* paling besar adalah 0,888

#### Referensi

- [1]. Ghifari, Abdurrahman. *Studi Harmonisa Pengaruh Kapasitor Bank pada Sistem Kelistrikan PT. Chandra Asri Petrochemical, Tbk*. Teknik Elektro Universitas Dipnegoro. 2013
- [2]. Francisco, Tumbur. *Analisis Pengaruh Penggunaan DC Chopper Terhadap Harmonik dan Faktor Daya yang Dipengaruhi dengan Adanya Komponen Penyearah*. Teknik Elektro Universitas Dipnegoro. 2011
- [3]. Sulistyowati, *Aplikasi Analisis Pemasangan Kapasitor di Jaringan yang Terpolusi Harmonisa*. 2012
- [4]. Lam, John. *A Dimmable High Power Factor Electronic Ballast For Compact Fluorescent lam*. Queen's University Kingston. Canada. 2010
- [5]. Atmaja, Gilang Surya. *Ballast Electronic Lampu UV Bertopologi Inverter Setengah Jembatan Resonan LCC Frekuensi Tinggi*. Teknik Elektro Universitas Dipnegoro. 2014
- [6]. Alonso, J. Marcos. *Electronic Ballasts*. University of Oviedo. 2007
- [7]. Hsieh, Jen-Cheng, Lin Jong-Lick. *Novel Single-Stage Self-Oscillating Dimmable Electronic Ballast With High Power Factor Correction*. IEEE. VOL. 58. 2011
- [8]. Alves, Joable Andrade. *An Electronic Ballast With High Power Factor For Compact Fluorescent Lamps*. Federa University of Santa Catarina. 1996
- [9]. *Power Factor Correction Handbook*. On Semiconductor. 2014
- [10]. Kazimierczuk, Marian. 2008. *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*. Ohio : Wright State University Dayton
- [11]. Fashian, Nik Muammad. *Electronic Ballast*. Universiti Malaysia Pahang. 2007

- [12]. Rashid, Muhammad H. *Power Electronic Handbook*. University of Florida. 2001
- [13]. Lee, Yim-Shu and Martin H. L. Chow. *Diode Rectifiers*. Department of Electronic and Information Engineering, The Hong Kong Polytechnic, University Hong Kong. 2007
- [14]. Ahmed, Ashfaq. *Power Electronic for Technology*. Purdue University-Calumet. 1999
- [15]. Fewson, Denis. *Introduction to Power Electronics*. School of Electronic Engineering, Middlesex University. 1998
- [16]. Ramdhani, Mohamad. *Rangkaian Listrik*.
- [17]. Shivastava Ashis. *PFC Cuk Converter Based Electronic Ballast for an 18 W Compact Fluorescent Lamp*. Indian Institute of Technology Delhi, Hauz Khas. 2010
- [18]. Moo, Chin Sien. *A Single-Stage High-Power-Factor Electronic Ballast With ZVS Buck-Boost Conversion*. IEEE. Vol 56. 2009.
- [19]. *Datasheet Philips Fluorescent Lamp*.
- [20]. West, Robert. *Common Mode Inductors for EMI Filters Require Careful Attention to Core Material Selection*. PCIM Magazine. 1995
- [21]. Wibawanti, Raras Arlini. *Aplikasi Inverter Frekuensi Tinggi dengan Rangkaian Resonansi LC Berbeban Paralel Sebagai Catu Daya Lampu TL*. Teknik Elektro Universitas Diponegoro. 2015
- [22]. Hammond Power Solution. *Transformers, Harmonic Currents and Phase Shifting*.
- [23]. Wardana, Adam Kusuma. *Aplikasi Buckboost Converter Sebagai Penyedia Daya Arus Searah Pada Rangkaian Tegangan Tinggi Impuls*. Teknik Elektro Universitas Diponegoro. 2014