

PERANCANGAN KONVERTER ARUS SEARAH TIPE *SYNCHRONOUS BUCK* BERBASIS IC TL494

Nur Muhammad Adam^{*)}, Trias Andromeda, dan Yuli Christyono

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail : nurmuhadam@gmail.com

Abstrak

Elektronika daya merupakan salah satu bidang penting dalam ketenagalistrikan. Ciri khas pada elektronika daya adalah penggunaan Switched Mode Power Supply (SMPS). Pada konverter arus searah tipe synchronous buck, dioda yang bertindak sebagai saklar diganti oleh MOSFET. Aplikasi penggantian dioda menjadi MOSFET merupakan dasar dari konverter arus searah tipe synchronous buck karena memiliki rugi konduksi yang lebih rendah dari buck converter standar/konvensional. Perancangan rangkaian sinyal pembangkit PWM untuk memicu synchronous buck menggunakan IC TL494, IC TL494 digunakan agar gelombang PWM bersifat komplementer dan terdapat deadtime. Diharapkan konverter arus searah tipe synchronous buck dapat menyuplai beban 5 V_{DC} pada sistem Hybrid Charger Controller. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian konverter dengan umpan balik tegangan menggunakan variasi beban resistor. Hasil pengujian konverter dengan umpan balik, diperoleh tegangan keluaran tetap terjaga sebesar 5 V ketika diberi variasi beban resistor 100 Ω sampai 15 Ω serta efisiensi tertinggi sebesar 93,25 % pada beban 47 Ω dan efisiensi terendah pada beban 56 Ω sebesar 82,89 %, dengan rata-rata efisiensi sebesar 88,14 %. Penambahan kontrol umpan balik tegangan pada konverter arus searah tipe synchronous buck menghasilkan nilai tegangan keluaran yang lebih stabil dengan adanya perubahan nilai beban.

Kata kunci : Konverter arus searah tipe synchronous buck, IC TL494, PWM, MOSFET, efisiensi, umpan balik tegangan

Abstract

Power electronic is one of the important chapter in electricity. Power electronics characteristic is using Switched Mode Power Supply (SMPS). On synchronous buck converter, diode replaced by MOSFET. Application of diode replacement with MOSFET is basic of synchronous buck converter because conduction losses on synchronous buck is lower than conventional buck converter. Design of PWM generator signal to trigger the synchronous buck in this Final Project is using IC TL494, IC TL494 is used to make complementary PWM wave and also deadtime. In realized, synchronous buck converter will supply 5 V_{DC} load in Hybrid Charger Controller system. In this research, tested the converter with voltage feedback using variation of load resistor. The result of converter test with voltage feedback is maintained at 5 V when given variation of resistor load 100 Ω to 15 Ω. The highest efficiency is 93,25 % at 47 Ω load and the lowest efficiency is 82,89 % at 56 Ω load, with average efficiency is 88,14 %. The addition of voltage feedback control on the synchronous buck converter produces a more stable output voltage value with the change of load value

Keywords: Synchronous buck converter, IC TL494, PWM, MOSFET, efficiency, voltage feedback

1. Pendahuluan

Elektronika daya merupakan salah satu bidang penting dalam ketenagalistrikan. Elektronika daya biasa digunakan untuk pengendalian daya elektrik atau pengkondisian daya, konversi daya elektrik dari satu bentuk ke bentuk yang lain [1]. Elektronika daya modern membutuhkan suplai daya yang berkualitas tinggi, handal, dan efisien [2].

Salah satu ciri khas pada elektronika daya adalah penggunaan *Switched Mode Power Supply* (SMPS). SMPS

menggunakan semikonduktor sebagai saklar, saklar tersebut beralih dari mode aktif (*on*) ke tidak aktif (*off*) secara cepat atau bekerja pada frekuensi tinggi. Prinsip SMPS digunakan pada konverter arus searah [3].

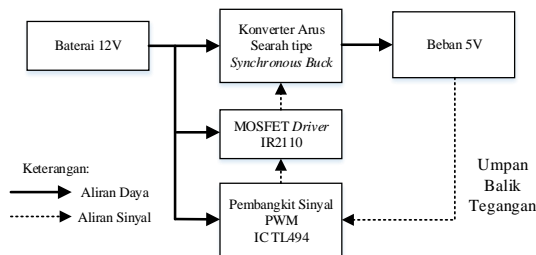
Konverter arus searah adalah rangkaian elektronika daya yang mengonversikan tegangan arus searah (DC) ke tegangan arus searah (DC) pada tingkatan yang berbeda, umumnya menghasilkan suatu keluaran yang diregulasikan [1]. Efisiensi pada konverter arus searah sebagai sumber daya dan sumber tegangan pada perangkat elektronik dapat

ditingkatkan dengan cara mengganti dioda pada konverter arus searah dengan MOSFET [4]. Rangkaian yang menggunakan MOSFET sebagai pengganti dioda disebut *synchronous power converter*. MOSFET yang digunakan sebagai pengganti dioda (MOSFET *low-side*) harus mempunyai nilai frekuensi yang sama dengan MOSFET yang berfungsi sebagai saklar utama (MOSFET *high-side*) untuk menghindari *overlapping* sinyal pemicuan yang akan mengakibatkan *short circuit* atau hubung arus pendek [5].

2. Metode

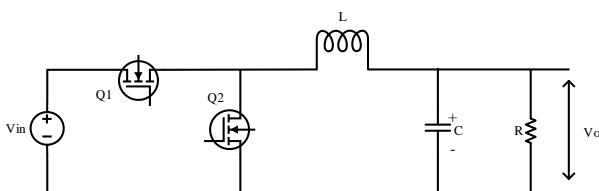
2.1. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan penelitian ini terdiri dari sumber arus searah baterai, rangkaian konverter arus searah tipe *synchronous buck*, dan rangkaian pembangkit sinyal PWM.



Gambar 1. Blok diagram alat

2.2. Konverter Arus Searah Tipe *Synchronous Buck*



Gambar 2. Rangkaian konverter arus searah tipe *synchronous buck*

Rangkaian konverter arus searah tipe *synchronous buck* tersusun dari komponen-komponen berikut:

1. Sumber Tegangan DC (V_{in})
Sumber tegangan yang digunakan sebagai suplai daya konverter berasal dari keluaran baterai Panasonic 12 V berkapasitas 7,2 Ah.
2. Saklar
Pada konverter arus searah tipe *synchronous buck* menggunakan 2 buah MOSFET sebagai komponen pensaklaran. MOSFET yang akan digunakan harus memperhatikan nilai tegangan dan arus operasi, selain itu untuk MOSFET *low-side* dipilih MOSFET dengan $R_{DS(on)}$ yang rendah. Tujuan pemilihan MOSFET

dengan $R_{DS(on)}$ yang rendah adalah agar rugi daya pada *synchronous buck* bernilai kecil apabila dibandingkan dengan dioda pada konverter *buck* konvensional. MOSFET yang digunakan adalah MOSFET IRFZ44N yang mempunyai tegangan *Drain-Source* sebesar 55 V dan kemampuan arus *drain* maksimal 49 A, serta $R_{DS(on)}$ yang rendah yaitu maksimal 17,5 m Ω [6]. Pemilihan MOSFET IRFZ44N dengan kemampuan tersebut dinilai cukup aman untuk implementasi rangkaian daya konverter.

3. Induktor

Induktor yang digunakan pada konverter arus searah ini diperhitungkan nilainya untuk disesuaikan dengan parameter lain yang berhubungan. Induktor yang digunakan merupakan induktor jenis solenoida yang dibuat dari kawat tembaga yang dililitkan pada inti ferit.

$$L_{min} = \frac{(1 - D_{min})R}{2f_{sw}} = \frac{(1 - 0,1) \times 100}{2 \times 25000} = 1,8 \text{ mH}$$

Dari perhitungan di atas maka dipilih induktor L dengan nilai 3 mH. Pemilihan nilai induktor lebih besar 25 % dari nilai induktor minimal agar konverter arus searah tipe *synchronous buck* bekerja pada *Continuous Conduction Mode* (CCM).

4. Kapasitor

Kapasitor C berfungsi sebagai *filter* tegangan untuk membatasi *ripple* tegangan yang disebabkan kenaikan nilai beban [7].

$$C_{min} = \frac{(1 - D_{max}) \times V_o}{8 \times L \times \Delta V_o \times f_{sw}^2} = \frac{0,52 \times 5}{8 \times 0,003 \times \left[\left(\frac{0,005}{5}\right)\right] \times 25000^2} = 173 \mu\text{F}$$

Realisasinya kapasitor yang dipasang adalah 470 $\mu\text{F}/35 \text{ V}$ agar *ripple* tegangan keluaran *synchronous buck* bernilai kecil.

2.3. Rangkaian Kontrol Pembangkit Sinyal PWM dengan Umpan Balik Tegangan IC TL494

Pada Penelitian ini, sinyal PWM dihasilkan oleh IC TL494. Frekuensi PWM keluaran IC TL494 diatur oleh dua komponen *resistor timer* (R_T) dan *capacitor timer* (C_T) [8].

$$f_{osc} = \frac{1}{R_T \cdot C_T} \quad (1)$$

$$f_{osc(max)} = \frac{1,1}{8200 \times (1 \times 10^{-9})} \times \frac{1}{2} = 67073,17 \text{ Hz} \quad (R_{VAR} = 0 \text{ k}\Omega)$$

$$f_{osc(max)} = \frac{1,1}{58200 \times (1 \times 10^{-9})} \times \frac{1}{2} = 9450,17 \text{ Hz } (R_{VAR} = 50 \text{ k}\Omega)$$

Dengan kedua perhitungan di atas, maka *range* frekuensi gelombang PWM yang digunakan adalah 9450,17 Hz hingga 67073,17 Hz per-fase. Mengacu pada parameter perancangan alat, frekuensi dengan *range* nilai 9450,17 Hz hingga 67073,17 Hz perfase dapat diatur menjadi 25 kHz per-fase. Pengaturan nilai frekuensi gelombang sinyal PWM yang dihasilkan oleh IC TL494 dilakukan dengan mengatur resistor variabel 50 kΩ.

Pada IC TL494 terdapat kontrol umpan balik tegangan untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran sistem. Terdapat resistor R_1 dan resistor R_2 sebagai pembagi tegangan yang berfungsi menyesuaikan tegangan keluaran konverter dengan tegangan referensi pada pin 2 (*inverting*), maka perhitungan resistor R_1 dan R_2 sebagai berikut:

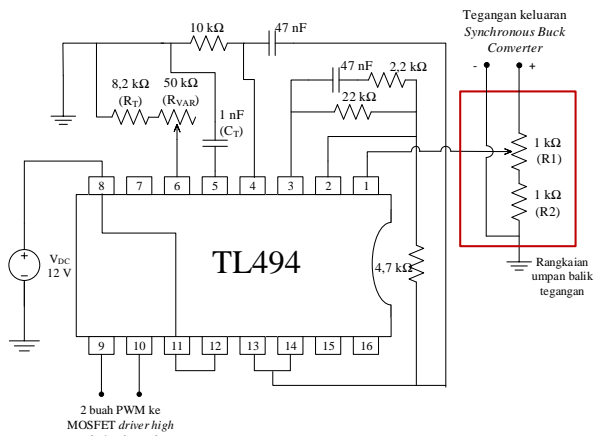
$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2)$$

$$5 = 4,3 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$R_1 = 0,163R_2$$

$$R_2 = 6,143R_1$$

Pada perhitungan di atas, dibutuhkan nilai R_1 sebesar 0,163 kali R_2 . Potensiometer 1 kΩ yang diatur sebesar 163 Ω digunakan untuk merealisasikan R_1 , maka nilai R_2 sebesar 1 kΩ. Potensiometer 1 kΩ dapat digunakan untuk mengatur skala tegangan keluaran untuk memvariasikan tegangan masukan pin 1 IC TL494

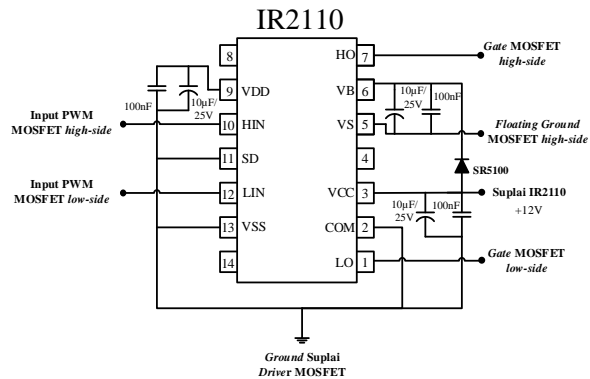


Gambar 3. Rangkaian kontrol PWM IC TL494 dengan umpan balik tegangan

2.4. Rangkaian Driver MOSFET IR2110

Rangkaian *driver* MOSFET IR2110 digunakan sebagai penguat sinyal keluaran pemunculan PWM. *Driver* IR2110 dapat *drive* 2 MOSFET secara bersamaan, MOSFET *high-side* pada pin *high-side output* dan MOSFET *low-side* pada pin *low-side output*, berbeda dengan *driver* MOSFET

lainnya yang hanya bisa *drive* 1 MOSFET saja.

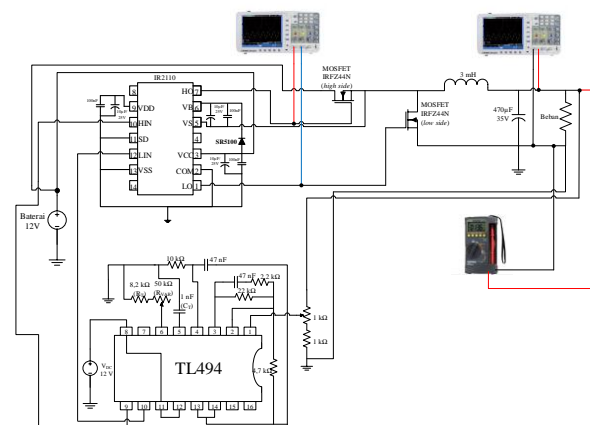


Gambar 4. Rangkaian *driver* MOSFET IR2110

Pada Gambar 4., IR2110 mendapat suplai V_{CC} 12 V yang berasal dari baterai Panasonic berkapasitas 7,2 Ah. Pada rangkaian IR2110 terdapat kapasitor *bootstrap* 10 µF, dimana fungsi kapasitor ini adalah sebagai pengisian muatan agar dapat memicu *gate* MOSFET serta terdapat kapasitor *decoupling* pada masukan pin V_{CC} -Ground, V_B - V_S , V_{DD} -Ground agar tegangan yang masuk pada pin tersebut stabil (memiliki riak tegangan yang sangat kecil) dan tetap terjaga dari tegangan jatuh.

3. Hasil dan Analisis

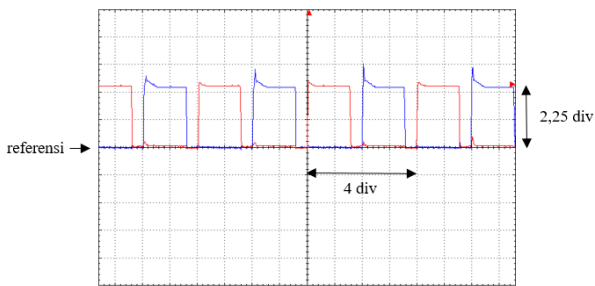
3.1. Pengujian Konverter Arus Searah Tipe Synchronous Buck dengan Umpan Balik Tegangan



Gambar 5. Pengujian konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan

Pengujian dengan umpan balik tegangan (*feedback*) *disetting* dengan variasi beban resistif untuk mengetahui respon tegangan keluaran dan arus keluaran konverter arus searah tipe *synchronous buck*. Dengan memvariasikan beban resistif dengan rentang 100 Ω sampai 15 Ω, maka didapat hasil pengamatan osiloskop seperti pada Gambar 6. dan Gambar 7. saat beban 100 Ω serta Gambar 8. dan

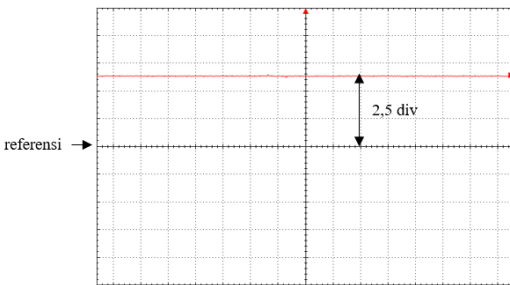
Gambar 9. saat beban 15 Ω sebagai berikut:



Gambar 6. Gelombang PWM saat beban 100 Ω, duty cycle = 39,20 %, V/div = 5V, T/div = 10 μs

Pada Gambar 6. terlihat pada beban 100 Ω tegangan pada gelombang PWM sebesar 2,25 div dengan nilai skala 5 V/div. Tegangan peak dapat dihitung sebagai berikut:

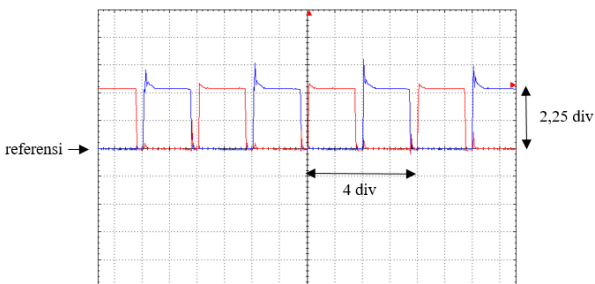
$$V_p = 2,25 \text{ div} \times 5V/\text{div} \times 1 = 11,25 \text{ V}$$



Gambar 7. Gelombang tegangan keluaran saat beban 100 Ω, V/div = 2 V, T/div = 50 ms

Sedangkan pada Gambar 7. terlihat tegangan keluaran tetap stabil pada beban 100 Ω sebesar 2,5 div dengan nilai skala 2 V/div. Tegangan keluaran dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_{DC} = 2,5 \text{ div} \times 5V/\text{div} \times 1 = 5 \text{ V}$$

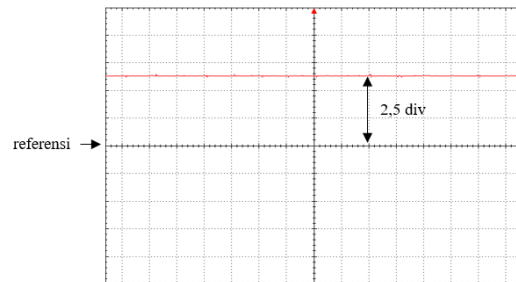


Gambar 8. Gelombang PWM saat beban 15 Ω, duty cycle = 44,20 %, v/div = 5 V, T/div = 10 μs

Pada Gambar 8. terlihat pada beban 15 Ω tegangan pada gelombang PWM sebesar 2,25 div dengan nilai skala 5

V/div. Tegangan peak dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_p = 2,25 \text{ div} \times 5V/\text{div} \times 1 = 11,25 \text{ V}$$



Gambar 9. Gelombang tegangan keluaran saat beban 15 Ω, V/div = 2 V, T/div = 20 μs

Sedangkan pada Gambar 9. terlihat tegangan keluaran tetap stabil pada beban 15 Ω sebesar 2,5 div dengan nilai skala 2 V/div. Tegangan keluaran dapat dihitung sebagai berikut:

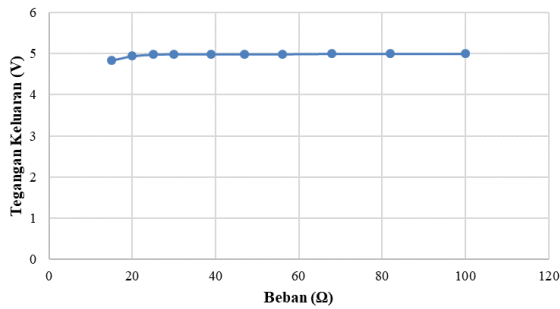
$$V_{DC} = 2,5 \text{ div} \times 5V/\text{div} \times 1 = 5 \text{ V}$$

Tegangan yang terbaca pada multimeter digital saat beban 100 Ω sebesar 5 V dan saat beban 15 Ω sebesar 4,83 V. Terdapat perbedaan hasil pengamatan osiloskop dan multimeter disebabkan skala pengukuran osiloskop yang terlalu besar sehingga mengakibatkan kurangnya ketelitian terhadap pengamatan nilai pada gelombang tegangan. Dengan memvariasikan beban dari 100 Ω sampai 15 Ω maka dapat dibuat Tabel 1. sebagai berikut:

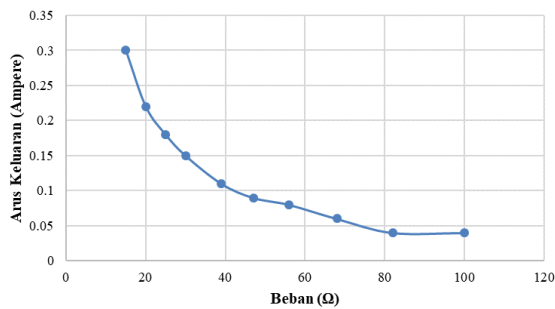
Tabel 1. Pengujian konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan

Beban (Ω)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Duty Cycle (%)
100	12,04	0,02	5	0,04	39,20
82	12,04	0,02	5	0,04	39,40
68	12,04	0,03	5	0,06	39,90
56	12,04	0,04	4,99	0,08	40,70
47	12,04	0,04	4,99	0,09	41,20
39	12,04	0,05	4,99	0,11	41,40
30	12,04	0,07	4,99	0,15	42,20
25	12,03	0,08	4,98	0,18	42,70
20	12,03	0,10	4,94	0,22	43,70
15	12,03	0,13	4,83	0,30	44,20

Tabel 1. menunjukkan nilai tegangan masukan, arus masukan, tegangan keluaran, arus keluaran dan *duty cycle*. Sedangkan Gambar 10. menunjukkan grafik tegangan keluaran konverter dengan umpan balik tegangan terhadap beban resistif dan Gambar 11. menunjukkan grafik arus keluaran konverter dengan umpan balik tegangan terhadap beban resistif.



Gambar 10. Hubungan beban resistif dan tegangan keluaran menggunakan umpan balik tegangan



Gambar 11. Hubungan beban resistif dan arus keluaran menggunakan umpan balik tegangan

Pada Tabel 1. terlihat bahwa *duty cycle* pada saat beban 100 Ω bernilai 39,20 % mengalami perubahan pada beban 15 Ω menjadi 44,20 % dikarenakan konverter bekerja dalam mode dengan umpan balik tegangan (*close loop*) pada saat beban berubah maka tegangan keluaran konverter akan berubah dan mempengaruhi nilai tegangan masukan pin 1 IC TL494 sehingga mempengaruhi keluaran *error amplifier* IC TL494 yang akan dibandingkan dengan gelombang gergaji pada komparator untuk mengeluarkan gelombang *duty cycle* yang lebih kecil atau lebih besar sehingga tegangan keluaran konverter akan kembali ke tegangan *settingan*.

Menurut Tabel 1. dan Gambar 10. pada saat beban 100 Ω tegangan keluaran konverter sebesar 5 V kemudian saat beban berubah menjadi 15 Ω tegangan keluaran konverter menjadi 4,83 V, terdapat penurunan tegangan yang cukup kecil pada saat beban berubah sebesar 0.17 V. Hal tersebut menunjukkan hubungan antara beban resistif dengan tegangan keluaran konverter arus searah tipe *synchronous buck* menggunakan umpan balik yaitu semakin besar ataupun kecil resistansi suatu beban maka tegangan keluaran akan tetap stabil pada tegangan *settingan* sebesar 5 V. Pada Gambar 11. terlihat hubungan antara beban resistif dengan arus keluaran konverter menggunakan umpan balik tegangan yaitu semakin berkurangnya resistansi suatu beban maka arus keluaran semakin bertambah begitupun sebaliknya ketika resistansi suatu beban bertambah maka arus keluaran akan semakin menurun.

Berdasarkan pengujian konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan, tegangan keluaran tetap terjaga pada 5 V meskipun adanya perubahan beban dari 100 Ω ke 15 Ω dengan penurunan tegangan yang cukup kecil sebesar 0,17 V. Dapat dilihat pada Gambar 10. penurunan tegangan keluaran yang paling signifikan ketika penggantian beban 20 Ω ke 15 Ω yaitu sebesar 0,11 V dengan *duty cycle* 44,20 %, hal ini terjadi karena saat penurunan beban resistif terjadi penurunan tegangan keluaran konverter yang mempengaruhi nilai tegangan masukan pin 1 IC TL494. Kondisi ini menyebabkan tegangan pada pin 1 saat konverter dibebani resistor 15 Ω lebih rendah daripada saat dibebani resistor 20 Ω sehingga komparator akan mempengaruhi IC TL494 untuk mengeluarkan gelombang PWM dengan *duty cycle* kerja yang lebih besar sehingga tegangan keluaran konverter akan kembali stabil. Namun *duty cycle* maksimal pada mode *push-pull operation* hanya 48 % [8] (realisasi pada alat hanya 45 %), sedangkan ketika konverter dibebani 15 Ω *duty cycle* bernilai 44,20 %. Karena *duty cycle* hampir mendekati nilai maksimalnya maka tegangan keluaran mengalami sedikit penurunan dari tegangan *settingan* yakni sebesar 0,17 V.

3.2. Perhitungan Efisiensi Konverter Arus Searah Tipe *Synchronous Buck*

Efisiensi merupakan perbandingan dari besar daya keluaran terhadap daya masukan, jika nilai daya keluaran semakin mendekati daya masukan maka efisiensi bernilai tinggi. Efisiensi konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan dapat dicari dengan menghitung daya *input* (P_{IN}) dan daya *output* (P_{OUT}) pada variasi beban antara 100 Ω hingga 15 Ω, dengan menggunakan Persamaan 4.2 berikut:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100 \% \quad (3)$$

keterangan :

$$P_{IN} = V_{IN} \times I_{IN}$$

$$P_{OUT} = V_{OUT} \times I_{OUT}$$

$$P_{IN} = \text{Daya masukan (W)}$$

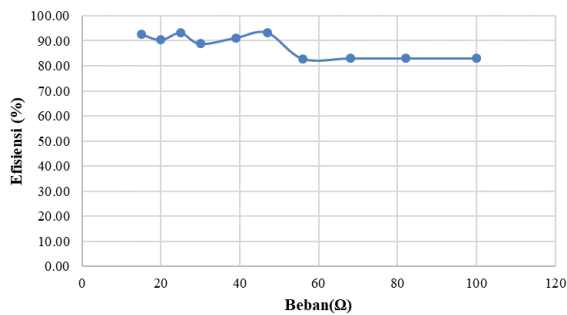
$$P_{OUT} = \text{Daya keluaran (W)}$$

Persamaan 3. digunakan untuk mengetahui seberapa besar efisiensi dari konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan. Hasil perhitungan besar efisiensi konverter dapat dilihat pada Tabel 2.

Pada Tabel 2. terlihat nilai efisiensi dari konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan memiliki efisiensi tertinggi sebesar 93,25 % pada beban 47 Ω dan efisiensi terendah pada beban 56 Ω dengan efisiensi sebesar 82,89 %. Rata-rata efisiensi dari konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan sebesar 88,14 %.

Tabel 2. Perhitungan efisiensi konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan

Beban (Ω)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
100	12,04	0,02	5	0,04	0,24	0,20	83,06
82	12,04	0,02	5	0,04	0,24	0,20	83,06
68	12,04	0,03	5	0,06	0,36	0,30	83,06
56	12,04	0,04	4,99	0,08	0,48	0,40	82,89
47	12,04	0,04	4,99	0,09	0,48	0,45	93,25
39	12,04	0,05	4,99	0,11	0,60	0,55	91,18
30	12,04	0,07	4,99	0,15	0,84	0,75	88,81
25	12,03	0,08	4,98	0,18	0,96	0,90	93,14
20	12,03	0,10	4,94	0,22	1,20	1,09	90,34
15	12,03	0,13	4,83	0,30	1,56	1,45	92,65



Gambar 12. Grafik hubungan efisiensi konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan terhadap beban

Pada Gambar 12. menunjukkan grafik hubungan antara efisiensi konverter arus searah tipe *synchronous buck* terhadap beban resistif. Efisiensi konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan terlihat naik turun (fluktuatif), ketika beban 100 Ω sampai 68 Ω efisiensi konstan sebesar 83,06 %, kemudian mengalami penurunan pada beban 56 Ω sebesar 82,89 % dan mengalami kenaikan saat beban 47 Ω sebesar 93,25 %, setelah itu mengalami sedikit kenaikan dan penurunan lagi sampai beban 15 Ω sebesar 92,65 %.

Efisiensi konverter arus searah tipe *synchronous buck* pada beban 100 Ω sampai 15 Ω tampak fluktuatif dalam range 83,06 % sampai 93,25 %, namun dapat dilihat pada Tabel 2. semakin kecil beban maka efisiensi cenderung meningkat. Hal tersebut terjadi karena disaat variasi resistor semakin kecil maka terjadi penurunan tegangan keluaran konverter yang mempengaruhi nilai tegangan masukan pin 1 IC TL494. Kondisi ini menyebabkan tegangan pada pin 1 saat konverter dibebani resistor yang bernilai lebih kecil maka komparator akan mempengaruhi IC TL494 untuk mengeluarkan gelombang PWM dengan *duty cycle* kerja yang lebih besar sehingga tegangan keluaran konverter akan kembali stabil. Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil nilai resistansi beban maka efisiensi akan semakin besar, karena tegangan keluaran tidak mengalami penurunan signifikan sehingga P_{OUT} akan cenderung meningkat.

4. Kesimpulan

Tegangan keluaran konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan tetap terjaga 5 V meskipun terdapat perubahan beban resistif dari 100 Ω sampai 15 Ω dengan penurunan tegangan yang cukup kecil sebesar 0,17 V pada saat beban 15 Ω.

Pada pengujian konverter arus searah tipe *synchronous buck* dengan umpan balik tegangan pada variasi beban 100 Ω sampai 15 Ω, *duty cycle* mengalami peningkatan dari 39,20 % sampai dengan 44,20 %.

Hubungan antara beban resistif dengan arus keluaran konverter arus searah tipe *synchronous buck* menggunakan umpan balik tegangan yaitu semakin berkurangnya resistansi suatu beban maka arus keluaran semakin bertambah begitupun sebaliknya ketika resistansi suatu beban bertambah maka arus keluaran akan semakin menurun.

Efisiensi tertinggi pada pengujian konverter arus searah tipe *synchronous buck* yaitu sebesar 93,25 % pada beban 47 Ω dan efisiensi terendah pada beban 56 Ω sebesar 82,89 %, dengan rata-rata efisiensi sebesar 88,14 %.

Referensi

- [1]. Daniel W. Hart, *Power Electronics*. 2016.
- [2]. Muhammad H. Rashid, *POWER ELECTRONICS Handbook*. 2011.
- [3]. C. Vrej Barkhordarian, International Rectifier, El Segundo, "Power MOSFET Basics," pp. 1–93.
- [4]. S. Jaunay and J. Brown, "Vishay Siliconix DC-to-DC Design Guide AN607 Vishay Siliconix," *Plateau*, pp. 1–23, 2002.
- [5]. N. T. Rich Nowakowski, "Efficiency of synchronous versus nonsynchronous buck converters," *Analog Appl. J. Texas Instruments Inc. 4Q*, pp. 1–6, 2009.
- [6]. International Rectifier, "IRFZ44N," pp. 1–8, 2001.
- [7]. Daniel W. Hart, *Power Electronics*. 2016.
- [8]. O. Semiconductor, "Switch Mode Pulse Width Modulation Control Circuit," *TI 494*, pp. 1–14, 2005.