

Rancang Bangun *SEPIC* (Single-Ended Primary Inductance Converter) untuk Aplikasi MPPT (Maximum Power Point Tracker) Jenis Constant Voltage(CV)

Riska Fibrianti

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

email: riskafibri.rf@gmail.com



Abstract

Kebutuhan permintaan akan sumber energi terbarukan semakin meningkat. Solar PV sebagai jenis pembangkit listrik yang memiliki peranan penting sebagai energi terbarukan. Namun dalam aplikasinya solar PV masih memiliki kekurangan, yaitu efisiensi keluaran yang rendah dikarenakan kurva karakteristik V-I solar PV yang tidak linier terhadap beban dan tegangan keluaran yang dihasilkan solar PV tidak stabil. Untuk menstabilkan tegangan keluaran dari solar PV maka digunakan *SEPIC* (Single Ended Primary Inductance Converter). Pada penelitian ini akan dibahas pembuatan *SEPIC* Converter yang berfungsi menaikkan dan menurunkan tegangan keluaran agar tetap stabil 14 Volt dengan frekuensi switching 31 kHz. Pembuatan alat ini bertujuan untuk menstabilkan tegangan keluaran DC sesuai tegangan setpoint yang diinginkan dari tegangan masukan yang bervariasi dengan cara mengatur besarnya nilai PWM dengan menggunakan Arduino, yang dicatu oleh sebuah transistor MOSFET. Pada pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan sebesar 12 Volt dan 15 Volt menghasilkan nilai tegangan keluaran mendekati atau sama dengan set point. Pada pengujian *SEPIC* Converter menunjukkan bahwa besar tegangan keluaran dipengaruhi oleh duty cycle. Untuk nilai tegangan keluaran minimal yang dihasilkan *SEPIC* Converter adalah 1,2 Volt pada duty cycle 5% sedangkan nilai tegangan maksimum sebesar 37,6 Volt pada duty cycle 50%.

Keywords: Konverter DC/DC, *SEPIC* Converter, duty cycle

I. PENDAHULUAN

Solar PV (*Photovoltaic*) adalah salah satu metode pembangkit listrik dengan mengubah radiasi sinar matahari menjadi arus listrik searah (DC) yang menggunakan bahan semikonduktor. Solar PV dengan pengontrol MPPT mampu bekerja menghasilkan efisiensi maksimum dan menghasilkan daya keluaran yang paling besar. MPPT adalah suatu metode untuk mencari *point* (titik) maksimum dari kurva karakteristik tegangan dan arus *input* (V-I) pada aplikasi solar PV. Sistem MPPT dengan bantuan konverter DC-DC digunakan untuk mengatur besarnya tegangan keluaran pada solar PV agar dapat memaksa solar PV memperoleh daya maksimum pada berbagai tingkat intensitas cahaya matahari.

Konverter yang digunakan untuk menstabilkan tegangan keluaran dari solar PV adalah *SEPIC* (*Single Ended Primary Inductance Converter*). *SEPIC* converter dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih kecil ataupun lebih besar daripada sumber tegangan dengan polaritas yang sama.

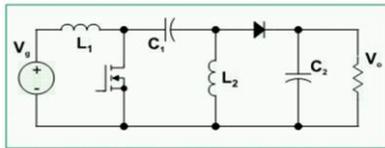
II. KAJIAN LITERATUR

1. Konverter DC-DC

Konverter DC-DC diperlukan untuk mengubah tegangan DC tetap menjadi tegangan DC yang bersifat variabel. Seperti halnya pada transformator yang berfungsi menaikkan atau menurunkan tegangan AC, konverter DC-DC dapat digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan DC. Rangkaian konverter DC-DC memerlukan suatu sumber tegangan DC yang konstan dan tegangan keluaran yang bervariasi dengan mengatur waktu pensaklaran pada transistor yang dihubungkan ke beban. [1]

2. *SEPIC* Converter

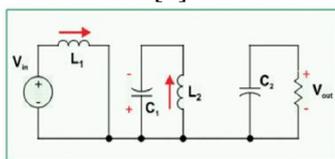
SEPIC (*Single-Ended Primary Inductance Converter*) converter adalah jenis konverter DC-DC yang dapat difungsikan sebagai menaikkan dan menurunkan tegangan dari tegangan *input*nya. Polaritas antara tegangan *input* dan keluaran adalah sama. *SEPIC* converter dapat beroperasi pada kondisi *continuous* dan *discontinuous*. Rangkaian *SEPIC* converter dapat dilihat pada gambar 1. [2]



Gambar 1 Rangkaian SEPIC Converter

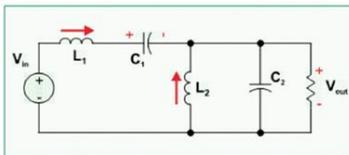
3. Prinsip Kerja SEPIC Converter

Susunan kerja untuk rangkaian SEPIC Converter pada kondisi continuous ditunjukkan pada gambar 2 ketika saklar on selama t1 maka tegangan masuk dan disimpan ke induktor L1 dan induktor yang lain L2 menyimpan energi dari kapasitor C1. Selama saklar on, kapasitor C2 tidak mendapatkan energi karena dioda pada kondisi reverse. [2]



Gambar 2 Saklar Kondisi ON

Pada gambar 3 saat saklar off selama t2, diode D kondisi forward maka energi yang tersimpan di kedua induktor ditransfer ke beban dan juga charging kapasitor C2. [2]



Gambar 3 Saklar Kondisi OFF

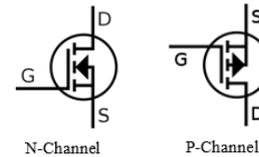
4. Duty cycle

Duty cycle merupakan fraksi dari suatu periode di mana sinyal atau sistem aktif. Siklus kerja umumnya dinyatakan sebagai presentase atau rasio. Periode adalah waktu yang diperlukan sinyal untuk menyelesaikan siklus hidup-mati. Duty cycle merupakan faktor kerja pada saklar, tegangan keluaran dapat dirubah dengan melakukan variasi nilai duty cycle pada saklar. [3]

$$Duty\ cycle = D = \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN} + V_{OUT} + V_D} \quad (1)$$

5. MOSFET

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) diperuntukkan untuk melakukan pensaklaran dengan kapasitas arus yang besar. Ada dua tipe MOSFET yaitu MOSFET tipe n dan tipe p. MOSFET memiliki tiga kaki yaitu kaki gate, drain dan source. Berikut ini gambar 3 merupakan gambar simbol MOSFET tipe n dan tipe p. [4]



Gambar 4 Simbol MOSFET n- dan p- channel

6. Perhitungan Induktor

Arus ripple yang mengalir dalam induktor L1 dan L2.

$$\Delta I_L = I_{IN} \times 40\% = I_{OUT} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} \times 40\% \quad (2)$$

Nilai induktor dapat dihitung menggunakan rumus:

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_{IN(min)}}{\Delta I_L \times f_{SW}} \times D_{max} \quad (3)$$

Keterangan:

f_{SW} : frekuensi switching

D_{max} : duty cycle maksimum

$V_{IN(min)}$: tegangan input minimum

Arus peak pada induktor untuk memastikan induktor tidak mengalami saturasi, dapat dirumuskan [3]:

$$I_{L1(peak)} = I_{OUT} \times \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN(min)}} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (4)$$

$$I_{L2(peak)} = I_{OUT} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (5)$$

7. Penentuan Rating MOSFET

Tegangan peak switch sama dengan Vin + Vout. Arus peakswitch dirumuskan:

$$I_{Q1(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)} \quad (6)$$

Arus RMS switching dirumuskan:

$$I_{Q1(rms)} = I_{OUT} \sqrt{\frac{(V_{OUT} + V_{IN(min)} + V_D) \times (V_{OUT} + V_D)}{V_{IN(min)}^2}} \quad (7)$$

Disipasi daya MOSFET (PQ1) kira-kira [3] :

$$P_{Q1} = I_{Q1(rms)}^2 \times R_{DS(ON)} \times D_{max} + (V_{IN(min)} + V_{OUT}) \times I_{Q1(peak)} \times \frac{Q_{GD} \times f_{SW}}{I_G} \quad (8)$$

8. Penentuan Output Dioda

Output dioda harus dipilih untuk mengatasi arus peak dan tegangan reverse. Dalam SEPIC, arus puncak dioda sama dengan arus puncak IQ1 (puncak). Puncak tegangan reverse minimum dioda yang harus ditahan adalah [3]:

$$V_{RD1} = V_{IN(max)} + V_{OUT(max)} \quad (9)$$

9. Penentuan SEPIC Coupling Capacitor

Pemilihan kapasitor SEPIC (Cs), tergantung pada arus RMS yang dirumuskan dengan persamaan:

$$I_{Cs(rms)} = I_{OUT} \times \sqrt{\frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN(min)}}} \quad (10)$$

Rating tegangan kapasitor *SEPIC* harus lebih besar dari tegangan input maksimum. Tantalum dan kapasitor keramik adalah pilihan terbaik, memiliki peringkat RMS tinggi saat ini relatif terhadap ukuran. [3]

10. Penentuan *Output Capacitor*

Dalam konverter *SEPIC*, ketika saklar daya Q1 dihidupkan, induktor sedang mengisi daya dan output arus dipasok oleh kapasitor keluaran. Akibatnya, kapasitor keluaran melihat arus *ripple* besar. Dengan demikian kapasitor keluaran yang dipilih harus mampu menanggapi arus RMS maksimum kapasitor keluaran adalah [3]:

$$I_{Cout(rms)} = I_{OUT} \times \sqrt{\frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN(min)}}} \quad (11)$$

$$C_{OUT} = \frac{I_{OUT} \times D_{max}}{V_{ripple} \times V_D \times f_{sw}} \quad (12)$$

11. Penentuan *Input Capacitor*

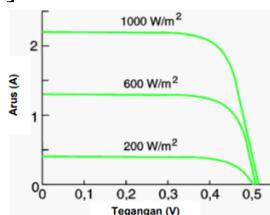
Arus RMS di kapasitor *input* dirumuskan dengan:

$$I_{Cin(rms)} = \frac{\Delta I_L}{\sqrt{12}} \quad (13)$$

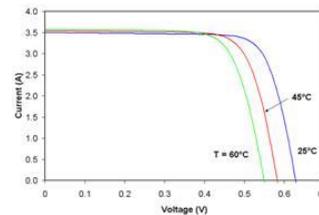
Kapasitor *input* harus mampu menanggapi arus RMS. Nilai kapasitor *input* minimal 10µF / lebih tinggi, kapasitor yang berkualitas baik akan mencegah adanya interaksi impedansi.[3]

12. *Maximum Power Point Tracker* (MPPT)

MPPT merupakan sistem penunjang pada proses transfer daya pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). MPPT berfungsi mengoptimalkan transfer daya dari panel surya menuju baterai. Setiap kurva mempunyai titik dimana transfer daya maksimum terjadi, yaitu pada koordinat (Vmpp, Impp), titik inilah titik daya maksimum atau *Maximum Power Point* (MPP). Proses transfer daya ini terlihat pada karakteristik panel surya yaitu kurva I-V. Kurva I-V yang tidak linier ini tergantung pada kondisi cuaca, yaitu suhu dan level *irradiance* matahari. [5]



Gambar 5 Kurva Karakteristik Panel Surya Berdasarkan *Irradiance*



Gambar 6 Kurva Karakteristik Panel Surya Berdasarkan Suhu

13. *Constant Voltage* (CV)

Constant Voltage (CV) merupakan salah satu metode MPPT yang sederhana dan mudah untuk diterapkan, dimana tegangan *output* dari sel surya diatur ke nilai konstan dan dicocokkan dengan tegangan referensi, tegangan referensi sama dengan tegangan *Maximum Power Point* (MPP). Metode *Constant Voltage* kurang optimal jika digunakan, dikarenakan titik MPP dari sel surya sering berubah-ubah letaknya mengikuti dari perubahan nilai suhu dan radiasi sinar matahari. Sedangkan *setpoint* dari referensi tidak dapat dirubah mengikuti titik dari tegangan MPP. Tegangan MPP dapat diketahui dengan menggunakan persamaan [6]:

$$V_{MPP} = k \times V_{OC} \quad (14)$$

Keterangan:

V_{MPP} : *Maximum operating voltage*

k : Konstanta MPPT jenis CV antara 0,71-0,78

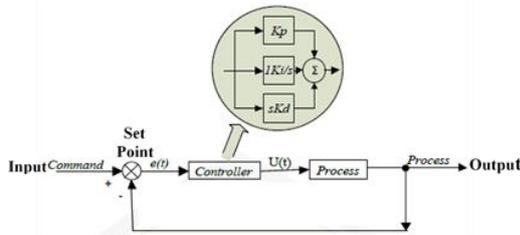
V_{oc} : Tegangan *open circuit*

14. PWM (*Pulse Width Modulation*)

Sinyal PWM adalah sinyal yang beroperasi pada frekuensi. Pada *board* Arduino Uno, pin yang bisa dimanfaatkan untuk PWM adalah pin yang diberi tanda tilde (~), yaitu pin 3, 5, 6, 9, 10, dan pin 11. Pin-pin tersebut bisa difungsikan untuk *input* analog atau *output* analog. Oleh sebab itu, jika akan menggunakan PWM pada pin ini, bisa dilakukan dengan perintah *analogWrite*. [7]

15. *PID Controller*

PID (*Proportional Integral Derivative*) *Controller* merupakan kontroler mekanisme umpan balik (*Unity System Feedback*) yang biasanya dipakai pada sistem kontrol industri. Sebuah kontroler PID secara kontinyu menghitung nilai kesalahan sebagai beda antara *setpoint* yang diinginkan dan variabel proses terukur. Gambar 7 menunjukkan gambar sistem dengan *Unity System Feedback*. [8]



Gambar 7 Blok diagram untuk Unity System Feedback

16. Desain Kontroler PI

- *Propotional control*, hubungan antara output dari pengatur $u(t)$ dan sinyal penggerak error $e(t)$ adalah:

$$u(t) = K_p e(t) \tag{15}$$

- *Integral control*, dari output pengontrol $u(t)$ diubah pada tingkat propotional ke sinyal penggerak error $e(t)$.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \tag{16}$$

- *PI control*, kombinasi dari kedua control yaitu propotional dan integral control yaitu:

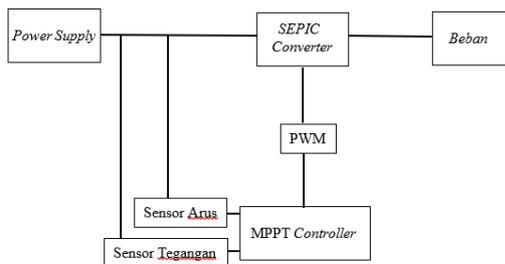
$$u(t) = K_i e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \tag{17}$$

- Transfer fungsinya yaitu [9]:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \tag{18}$$

III. METODE PENELITIAN

1. Blok Diagram Sistem Keseluruhan

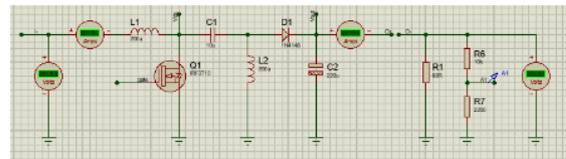


Gambar 8 Blok Diagram Sistem Keseluruhan

Pada gambar 8 menunjukkan blok diagram sistem secara keseluruhan. *Power supply* digunakan sebagai tegangan *input* yang akan digunakan pada sistem ini. *SEPIC Converter* akan bekerja menjaga agar tegangan keluaran sesuai dengan *set point* yakni sebesar 14 Volt dengan beban yang bervariasi. Besarnya tegangan *set point* tersebut diatur oleh sebuah *MPPT controller* di dalam program Arduino. Tegangan dan arus akan dibaca oleh sebuah sensor kemudian memberikan nilai *feedback* ke Arduino dan diolah di dalam program Arduino yang dapat mengontrol *SEPIC Converter* agar memberikan nilai tegangan yang stabil.

2. Perancangan *SEPIC Converter*

Gambar di bawah ini merupakan gambar rangkaian dasar dari *SEPIC Converter* yang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu induktor, kapasitor dan MOSFET.



Gambar 9 Rangkaian Dasar *SEPIC Converter*

Sebelum mendesain alat *SEPIC Converter* maka terlebih dahulu menentukan spesifikasi dari alat tersebut yang terdiri dari beberapa parameter utama. Berikut ini terdapat tabel 1 merupakan spesifikasi dari *DC/DC SEPIC Converter* yang akan dibuat:

Tabel 1 Spesifikasi DC/DC SEPIC Converter

Parameter	Nilai
Tegangan <i>Input</i>	9 Volt – 21 Volt
Tegangan Keluaran	14 Volt
Arus Keluaran	5 A
Frekuensi <i>Switching</i>	31 kHz

3. Langkah Pengerjaan



Gambar 10 Diagram Alir Pengerjaan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Perancangan *SEPIC Converter*

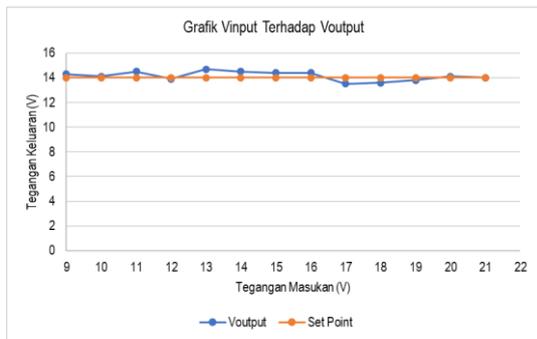
Gambar berikut menunjukkan hasil perancangan dari alat *SEPIC Converter* dengan menggunakan Arduino sebagai pengatur dari besarnya nilai PWM. Pada rangkaian pengendali PWM diberikan tegangan *input* sebesar 12 Volt. Sedangkan pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan *input* yang bervariasi dari *power supply*.



Gambar 11 Hasil Perancangan SEPIC Converter

2. Pengujian SEPIC Converter Mode Buck-Boost

Berikut ini hasil pengujian SEPIC Converter sebagai penaik dan penurun tegangan keluaran dalam kondisi tanpa beban.



Gambar 12 Grafik Vinput Terhadap Voutput

Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa ketika diberi sumber tegangan yang berubah-ubah mulai dari 9 Volt hingga 21 Volt dalam kondisi tanpa beban dengan set point diatur 14 Volt maka besar tegangan output mendekati tegangan referensinya yaitu 14 Volt (dengan toleransi ±2% hingga ±5% dari tegangan referensinya). Hal ini terbukti bahwa alat SEPIC Converter yang sudah dibuat sudah mampu bekerja menjaga tegangan output agar tetap stabil sesuai dengan tegangan set point.

3. Pengujian SEPIC Converter (Tanpa Baterai dan dengan Baterai)

Pada pengujian ini SEPIC Converter diberi sumber tegangan bervariasi dan set point diatur 12 Volt dalam kondisi tanpa beban dan dalam kondisi dihubungkan dengan baterai.

a) Pengujian Tanpa Baterai

Tabel 2 Data Pengujian Tanpa Baterai dan V Input Bervariasi

No.	Vin (V)	Iin(A)	SEPIC		Set Point (V)	Vout (V)	Iout (A)
			ON	OFF			
1	1	0.2	√		12	1.8	0
2	2	0.2	√		12	2.8	0
3	4	0.2	√		12	4.1	0
4	6	0.3	√		12	5.1	0
5	8	0.3	√		12	12.1	0
6	10	0.3	√		12	11.7	0
7	12	0.4	√		12	12	0
8	14	0.4	√		12	11.8	0
9	16	0.4	√		12	11.8	0
10	18	0.4	√		12	11.8	0
11	20	0.3	√		12	11.6	0

12	22	0.4	√	11.9	0
13	24	0.4	√	12.6	0

Dari tabel pengujian diatas dapat diketahui bahwa ketika diberikan nilai range tegangan dari 1 Volt hingga 6 Volt nilai tegangan keluaran tidak mencapai tegangan set point. Pada saat diberikan nilai range tegangan dari 8 Volt hingga 24 Volt nilai tegangan keluaran mencapai tegangan set point yaitu mendekati 12 Volt.

b) Pengujian dengan Baterai

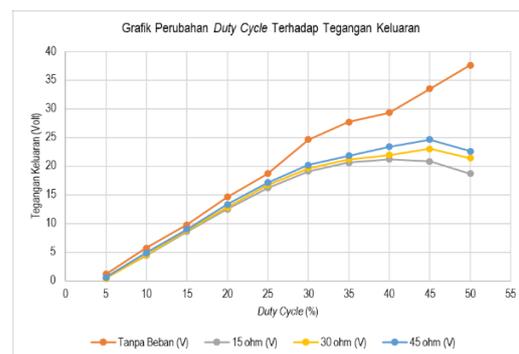
Tabel 3 Data Pengujian dengan Baterai dan V Input Bervariasi

No.	Vin (V)	Iin(A)	SEPIC		Set Point (V)	Vout (V)	Iout (A)
			ON	OFF			
1	1	0.2	√		12	12.2	0.1
2	2	0.2	√		12	12.3	0.1
3	4	0.2	√		12	12.3	0.1
4	6	0.2	√		12	12.2	0.1
5	8	0.7	√		12	12.3	0.3
6	10	1.1	√		12	12.3	0.3
7	12	1.2	√		12	12.3	0.4
8	14	0.9	√		12	12.3	0.3
9	16	0.7	√		12	12.2	0.3
10	18	1.3	√		12	12.3	0.4
11	20	1.5	√		12	12.3	0.3
12	22	1.1	√		12	12.2	0.4
13	24	1.2	√		12	12.3	0.4

Dari tabel pengujian diatas dapat diketahui bahwa ketika diberikan nilai range tegangan dari 1 Volt hingga 6 Volt nilai tegangan keluaran mencapai tegangan set point dan alat dalam kondisi undervoltage. Pada saat diberikan nilai range tegangan dari 8 Volt hingga 24 Volt nilai tegangan keluaran mencapai tegangan set point yaitu mendekati 12 Volt.

4. Pengaruh Duty Cycle Terhadap Tegangan Keluaran

Tegangan masukan yang diberikan sebesar 14,6 Volt dengan beban meliputi 15 Ω, 30 Ω dan 45 Ωserta menggunakan variasi duty cycle mulai dari 5% hingga 50% untuk mengetahui pengaruh perubahan duty cycle terhadap tegangan keluaran. Hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 12 Grafik pengaruh *duty cycle* terhadap tegangan keluaran pada beban

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa ketika dalam kondisi tanpa beban semakin besar nilai *duty cycle*, maka semakin besar pula nilai tegangan keluaran. Dan semakin besar beban, maka semakin besar nilai tegangan keluaran yang dihasilkan. Pada beban 15 Ω nilai tegangan keluaran terbesar yaitu 21,2 Volt. Pada beban 30 Ω nilai tegangan keluaran terbesar yaitu 23 Volt. Pada beban sebesar 45 Ω nilai tegangan keluaran terbesar yaitu 24,6 Volt.

5. Hasil Pengukuran *SEPIC Converter*

Pengukuran ini bertujuan mengetahui nilai efisiensi dari alat *SEPIC Converter* dengan memberikan tegangan sumber dari *power supply* DC sebesar 10 Volt dan 16 Volt dengan *set point* 14 Volt dan beban yang bervariasi. Hasil pengukuran tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4 Hasil Pengukuran *SEPIC Converter*

No.	Beban	Set Point (V)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
1	No load	14	10	0.3	13.9	0	3	1.37	46.33
			16	0.4	13.8	0	6.4	1.36	21.25
2	15 Ω	14	10	3.6	14.1	0.8	36	11.28	31.33
			16	2.9	13.8	0.8	46.4	11.04	23.79
4	30 Ω	14	10	1.8	14	0.5	18	7	38.89
			16	1.9	13.8	0.5	30.4	6.9	22.7
5	45 Ω	14	10	1.3	14	0.3	13	4.2	32.31
			16	1.5	14.1	0.3	24	4.23	17.63

Dari tabel pengukuran *SEPIC Converter* dapat diketahui bahwa ketika diberi tegangan 10 Volt efisiensi terbesar dihasilkan pada kondisi tanpa beban yaitu sebesar 46,33%. Sedangkan ketika diberi tegangan 16 Volt efisiensi terbesar dihasilkan pada beban R = 15 Ω yaitu sebesar 23,79% dengan daya *output* 11,04 Watt.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan dari analisis maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Dalam mendesain alat *SEPIC Converter* komponen utama yang digunakan adalah Arduino Uno, MOSFET IRF540, induktor, kapasitor, resistor, Dioda MUR810, *Optocoupler* CT817. Alat *SEPIC Converter* dapat bekerja menaikkan dan menurunkan tegangan *output* sesuai dengan tegangan *set point* 14 Volt.
2. Prosedur yang dilakukan dalam pembuatan *SEPIC Converter* meliputi pembuatan gambar rangkaian, *layout* PCB, pemilihan

komponen, pemasangan komponen kemudian melakukan pengujian alat.

3. Pada saat pengukuran dengan beban resistor 30Ω, didapatkan efisiensi tertinggi yaitu 38,89%, daya *output* sebesar 7Watt dengan *duty cycle* 61,1% pada tegangan input 10 Volt dan tegangan *output* 14 Volt.

REFERENSI

- [1] A. Winoto, "Mikrokontroler AVR Atmega dan Pemrogramannya dengan Bahasa C pada WinAVR," Informatika Bandung, 2008.
- [2] B. Respati, Maximum Power Point Tracker (MPPT) Menggunakan Konverter SEPIC Dengan Kontrol Logika Fuzzy Untuk Sistem Photovoltaic, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November, 2015.
- [3] D. Zhang, "AN-1484 Designing A SEPIC Converter," Texas Instruments Application Report, 2013.
- [4] J. Linggarjati, "Optimasi Penentuan Jenis MOSFET pada Pengendali Elektronika Motor BLDC," *Jurnal Teknik Komputer*, 2012.
- [5] P. Megantoro, "Perancangan MPPT Berbasis Mikrokontroler Menggunakan Algoritma Tegangan Konstan Dan Perturb & Observ Serta Buck Converter Dengan Pengendalian Fuzzy," 2014.
- [6] S. Ferdous, M. A. Mohammad, F. Nasrullah, A. M. Saleque and A. Z. M. S. Mutallib, "Design and Simulation of an Open Voltage Algorithm Based Maximum Power Point Tracker for Battery Charging PV System," *Jurnal International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2012.
- [7] F. W. Azhari and A. Aswardi, "Sistem Pengendalian Motor DC Menggunakan Buck Converter Berbasis Mikrokontroler ATmega 328.," *Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional*, 2020.
- [8] F. Arifin, "PID Controller," Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
- [9] K. Ogata, Modern Control Engineering. Third edition, New Jersey: Prentice Hall, 1997.