

# PEMANFAATAN THERMOELECTRIC ENERGY GENERATOR (TEG) SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK MENGGUNAKAN BUCK CONVERTER DENGAN UMPAN BALIK TEGANGAN BERBASIS IC TL494

Masaji<sup>\*)</sup>, Mochammad Facta dan Bambang Winardi

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

<sup>\*)</sup>E-mail: masajie\_22@yahoo.com

## Abstrak

Pemanfaatan energi baru dan terbarukan yang ramah lingkungan terus dikembangkan, selain potensi dari energi surya, air, dan angin terdapat sumber energi lain yaitu panas. Tanpa disadari energi panas terbuang percuma dalam kehidupan sehari-hari, contohnya pada saluran gas buang kendaraan dan cerobong asap pada industri. Energi panas yang terbuang dapat diubah menjadi energi listrik menggunakan thermoelectric energy generator (TEG). Modul termoelektrik bekerja sesuai efek seebeck. Tegangan termoelektrik dipengaruhi oleh koefisien seebeck dan perbedaan suhu. Oleh karena itu tegangan yang dihasilkan tidak stabil. Untuk itu pada penelitian ini dirancang pembangkit listrik dengan menggunakan modul termoelektrik kemudian energi yang dihasilkan dimanfaatkan untuk menyuplai beban menggunakan konverter arus searah tipe buck converter dengan umpan balik tegangan berbasis IC TL494 sebagai rangkaian pembangkit sinyal PWM. Umpan balik tegangan berfungsi untuk memonitor tegangan keluaran buck converter, yang akan diumpungkan pada komparator yang ada di dalam IC TL494. Hasil pengujian yang sudah dilakukan didapatkan bahwa tegangan keluaran buck converter dengan umpan balik tegangan cenderung konstan dengan adanya perubahan nilai resistif pada sisi beban. Tegangan keluaran rata – rata buck converter dengan umpan balik tegangan sebesar 5 volt. Efisiensi buck converter dengan umpan balik tegangan rata – rata diatas 60 %.

**Kata kunci:** termoelektrik, konverter arus searah, buck converter, umpan balik, IC TL494

## Abstract

Utilization of new and renewable energy that is environmentally friendly continues to be developed, in addition to the potential of solar, water, and wind energy there are other energy sources namely heat. Unwittingly, heat energy is wasted in everyday life, for example on vehicle exhaust gases and chimneys in the industry. Wasted heat energy can be converted into electrical energy using a thermoelectric energy generator (TEG). The electric thermo module works according to the seebeck effect. The thermoelectric voltage is affected by the seebeck coefficient and temperature difference. Therefore the resulting voltage is unstable. For this reason, this project designed a power plant using a thermoelectric module and the energy produced was used to supply the load using a buck converter with voltage feedback based on IC TL494 as a PWM signal generator circuit. Voltage feedback serves to monitor buck converter output voltage, which will be fed to the comparator in IC TL494. The test results that have been made have been found that the buck converter output voltage with voltage feedback tends to be constant with a change in the resistive value on the load side. The average output of buck converter with feedback is 5 volt. The efficiency buck converter above 60%.

**Keywords:** thermoelectric, direct current converter, buck converter, feedback, IC TL494

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan energi terus meningkat seiring dengan berkembangnya zaman. Salah satu energi yang paling penting adalah energi listrik. Di Indonesia energi listrik memiliki peran vital dalam kehidupan sehari-hari [1]. Konsumsi energi listrik terus meningkat setiap tahun [2]. Saat ini pembangkitan energi listrik masih didominasi pada energi fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas

alam [3]. Sebagai energi yang tidak dapat diperbarui jumlah energi fosil semakin berkurang setiap tahun. Penggunaan bahan bakar fosil juga memiliki dampak pencemaran lingkungan. Oleh karena itu diperlukan pengembangan sumber energi baru dan terbarukan (EBT) yang ramah terhadap lingkungan.

Pengembangan energi baru dan terbarukan masih berfokus pada energi surya, air, dan angin. Selain 3

sumber tersebut terdapat sumber energi lain yang dapat dimanfaatkan yaitu panas atau kalor. Tanpa disadari banyak energi panas terbuang seperti pada exhaust atau saluran gas buang pada mesin kendaraan bermotor dan cerobong asap industri. Energi panas yang terbuang dapat dirubah menjadi listrik menggunakan modul thermoelectric energy generator (TEG) [4].

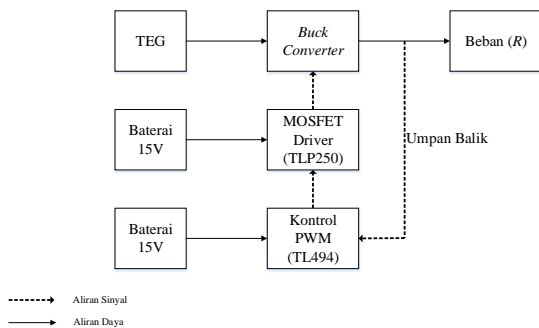
Termoelektrik merubah energi panas menjadi listrik menggunakan efek seeback [5]. Termoelektrik memiliki beberapa kelebihan dibanding pembangkit listrik lainnya, antara lain tidak bersuara karena tidak ada komponen yang bergerak, ramah lingkungan, dapat digunakan dalam skala kecil maupun besar, dan memiliki tingkat keandalan yang tinggi [6]. Kemampuan termoelektrik dipengaruhi oleh koefisien seeback dan suhu [7], oleh karena itu daya yang dihasilkan termoelektrik tidak stabil.

Pada penelitian terdahulu [8] penggunaan modul TEC12706 memiliki tegangan output tertinggi sebesar 0,55V serta efisiensi yang rendah. Kemudian pada penelitian [9] tegangan keluaran yang dihasilkan termoelektrik langsung dihubungkan ke beban sehingga tegangan keluaran berubah-ubah.

Berdasarkan penelitian terdahulu maka pada penelitian ini dirancang sistem pembangkitan listrik menggunakan termoelektrik yang diharapkan menghasilkan tegangan 10-12V kemudian listrik yang dihasilkan diturunkan menggunakan konverter arus searah buck menjadi 5V dengan umpan balik tegangan sehingga diharapkan tegangan keluaran tetap stabil meskipun terjadi perubahan tegangan masukan dan perubahan beban.

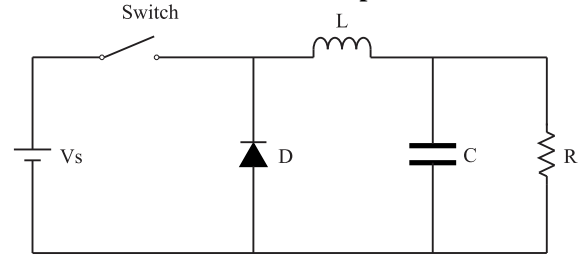
## 2. Metode

Perancangan pada penelitian ini terdiri dari rangkaian sumber tegangan, rangkaian konverter arus searah tipe buck converter, rangkaian kontrol pembangkit sinyal PWM, dan beban.



Gambar 1. Blok Diagram Alat

### 2.1. Konverter Arus Searah Tipe Buck Converter



Gambar 2. Rangkaian Buck Converter

Konverter arus searah tipe Buck Converter digunakan sebagai penyedia daya DC untuk suplai beban resistor keramik pada penelitian penelitian ini. Komponen – komponen penyusun yang digunakan pada konverter arus searah tipe Buck Converter antara lain :

#### 1. Sumber Tegangan Arus Searah

Sumber yang dipakai untuk menyuplai rangkaian konverter arus searah didapat dari pembangkitan listrik menggunakan termoelektrik. Tegangan yang dihasilkan sebesar 10-12V.

#### 2. Saklar

Komponen pensaklaran yang digunakan pada konverter arus searah pada penelitian ini adalah MOSFET. Pemilihan MOSFET harus mempertimbangkan nilai tegangan dan arus operasi. Tegangan masukan Konverter arus searah adalah 10-12V volt.

MOSFET yang dipakai adalah MOSFET IRFZ44N yang mempunyai tegangan Breakdown Drain-Source  $V_{(BR)DS}$  adalah 55 volt dan kemampuan arus drain maksimal 49 ampere [15], sehingga pemakaian MOSFET tipe IRFZ44N ini aman untuk dipakai karena arus maksimum yang dialirkan rangkaian daya yaitu 1 A.

#### 3. Dioda

Dioda yang digunakan adalah MUR1560. Dioda ini dipilih karena mempunyai sifat *ultrafast recovery* dengan waktu pemulihan 60ns [16].

#### 4. 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.

$$L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (1)$$

$$= \frac{(1 - 0,5)100}{2 \cdot 20000} = 1,25 \text{ mH}$$

Induktor yang digunakan sebesar 1,5mH. Pemilihan nilai induktor lebih besar dari nilai induktor minimal ( $L > L_{min}$ ) agar *Buck Converter* bekerja pada *Continuous Current Mode (CCM)* [3].

5. Kapasitor

Kapasitor berfungsi sebagai filter tegangan untuk membatasi *ripple* tegangan yang disebabkan kenaikan nilai beban. Kapasitor yang digunakan untuk perancangan *buck converter* ini mempunyai nilai 470  $\mu$ F. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan tegangan *ripple* puncak ke puncak kapasitor ( $\Delta V_o$ ) yang kecil.

$$C = \frac{(1 - D)}{8 L \frac{\Delta V_o}{V_o} f^2} \tag{2}$$

$$= \frac{(1 - 0,5)}{8 \cdot 1,5 \times 10^{-3} \cdot \frac{0,005}{5} \cdot 20000^2}$$

$$= 10,416 \mu F$$

Pada perhitungan kapasitor didapat nilai kapasitansi kapasitor sebesar 10,416  $\mu$ F. Pada realisasinya kapasitor yang dipasang adalah 470  $\mu$ F. Pemilihan nilai kapasitansi kapasitor yang lebih besar daripada nilai perhitungan bertujuan untuk mengurangi *ripple* tegangan keluaran.

2.2. Rangkaian Kontrol Pembangkit Sinyal PWM dengan Umpan Balik Tegangan

PWM atau disebut *Pulse Width Modulation* digunakan untuk pengontrolan MOSFET. MOSFET dipicu untuk menjadi saklar dengan frekuensi tinggi. Proses pensaklaran atau *switching* ini diaplikasikan dengan T-on (waktu saat switch tertutup) dan T (waktu satu periode pulsa) atau biasa disebut *Duty Cycle*. Pada penelitian ini sinyal PWM yang dihasilkan dari IC TL494 dan rangkaian MOSFET driver. Pada IC TL494 terdapat pin *feedback* yang berfungsi menerima sinyal umpan balik dari tegangan keluaran sistem

Nilai frekuensi osilasi pada rangkaian kontrol IC TL494 diatur oleh dua komponen yang dihubungkan dengan kaki 5 dan 6. Kaki 5 IC TL494 adalah *Resistor Timer (RT)* dan kaki 6 IC TL494 adalah *Capacitor Timer (CT)* [4].

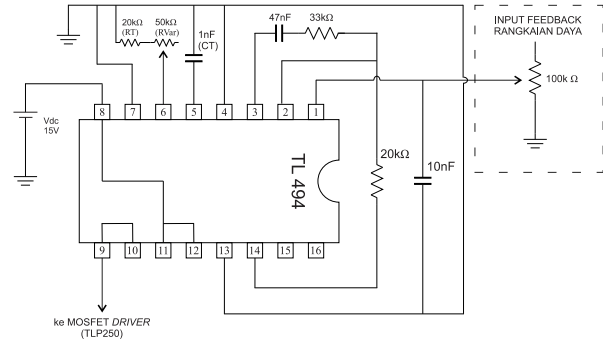
$$f_s = \frac{1}{R_T \cdot C_T} \tag{3}$$

$$f_{osc(max)} = \frac{1}{20000 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 50 \text{ kHz (} R_{Var} = 0 \Omega \text{)}$$

$$f_{osc(min)} = \frac{1}{70000 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 14,285 \text{ kHz (} R_{Var} = 50 \text{ k}\Omega \text{)}$$

Perancangan umpan balik yang digunakan pada penelitian ini adalah umpan balik tegangan. Umpan balik tegangan

berfungsi untuk memonitor tegangan keluaran *buck converter*. Pada perancangan umpan balik tegangan terdapat potensio 100 k $\Omega$  yang berfungsi sebagai sensor tegangan keluaran *buck converter*.

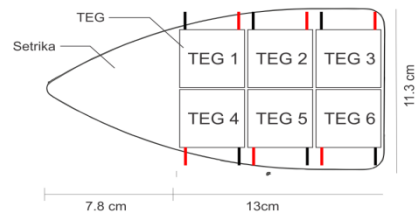


Gambar 3. Rangkaian IC TL494 dengan umpan balik tegangan

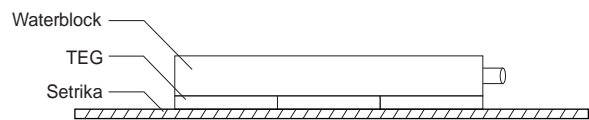
2.3. Perancangan Catu Daya Arus Searah (DC)

2.3.1. Perancamgam Thermoelectric Energy Generator

TEG yang digunakan sebagai catu daya rangkaian konverter arus searah buck adalah tipe TEC1-12706 dengan jumlah 6 sel yang disusun secara seri dengan bagian panas diletakkan diatas setrika sebagai sumber panas, kemudian bagian dingin diletakkan pada waterblock sebagai sumber dingin. Dengan susunan seperti ini diharapkan TEG dapat menghasilkan tegangan DC 10-12V.



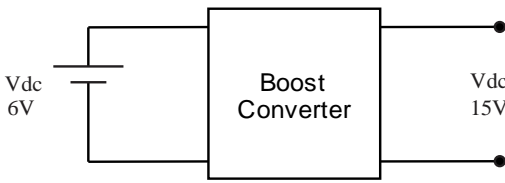
Gambar 4. Susunan penampang TEG tampak atas



Gambar 5. Susunan penampang TEG tampak samping

2.3.2 Perancamgam Catu Daya DC Rangkaian Kontrol

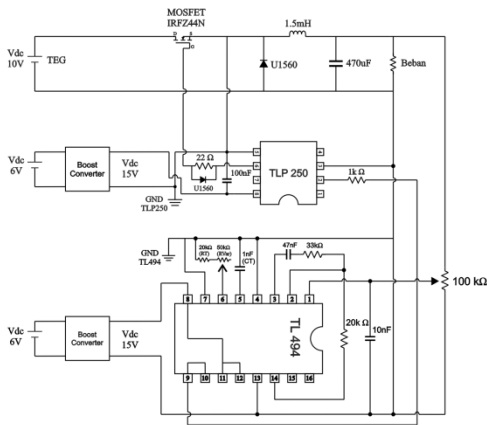
Pada penelitian ini digunakan tegangan  $V_{in}$  sebesar 15V untuk rangkaian kontrol IC TL494 dan rangkaian driver TLP250.  $V_{in}$  15 V didapat dari baterai 6V yang kemudian dinaikkan tegangannya menggunakan *boost converter* menjadi 15V.



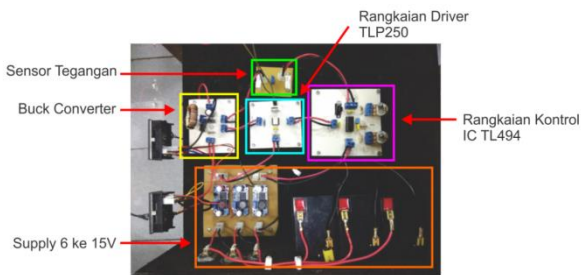
Gambar 6. Rangkaian supply kontrol PWM

## 2.4 Beban

Beban yang digunakan pada Penelitian ini adalah resistor keramik dengan 6 variasi tahanan berbeda. Resistor beban terdiri dari 15Ω, 30Ω, 50Ω, 75Ω, 100Ω dan 220Ω. Penggunaan resistor berbeda untuk melihat respon perubahan beban terhadap tegangan keluaran *buck converter*.



Gambar 7. Skema rangkaian keseluruhan

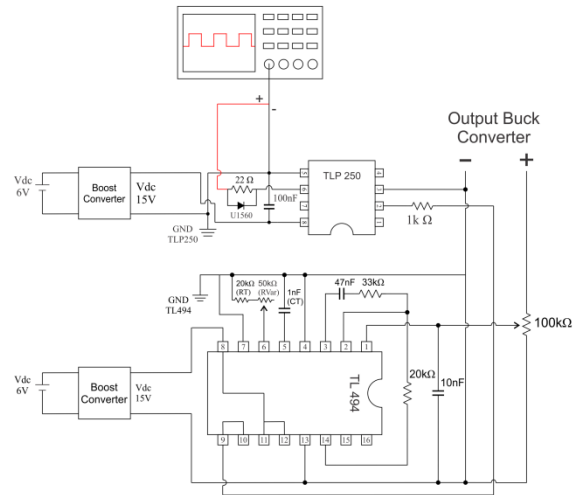


Gambar 8. Realisasi rangkaian keseluruhan

## 3. Hasil dan Analisis

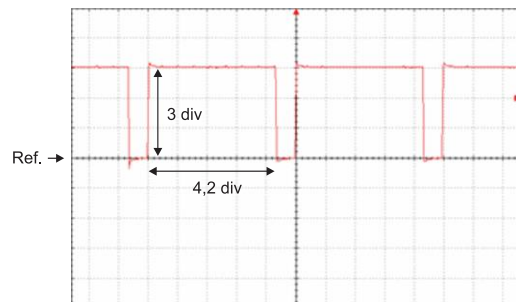
### 3.1 Pengujian Rangkaian Kontrol Sinyal PWM dengan Umpan Balik Tegangan

Rangkaian kontrol pembangkit sinyal PWM yang digunakan pada Penelitian ini adalah IC TL494 dengan satu keluaran (*single-ended*). Pengujian rangkaian kontrol pembangkit sinyal PWM dilakukan dalam kondisi beban telah terpasang dan sinyal *feedback* juga terpasang ke rangkaian kontrol. Pengujian dilakukan dengan melihat respon gelombang kontrol ketika beban berubah.



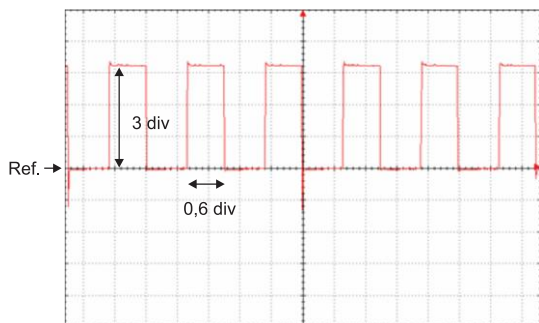
Gambar 9. Pengujian rangkaian kontrol pembangkit sinyal PWM dengan IC TL494

Gambar 9 adalah pengujian rangkaian kontrol pembangkit sinyal PWM berbasis IC TL494 dengan umpan balik dari keluaran *buck converter*. Pengujian dilakukan pada keluaran TLP250 sebagai *driver* rangkaian kontrol pembangkit sinyal PWM IC TL494. Sinyal PWM digunakan untuk memicu MOSFET pada rangkaian *buck converter*.



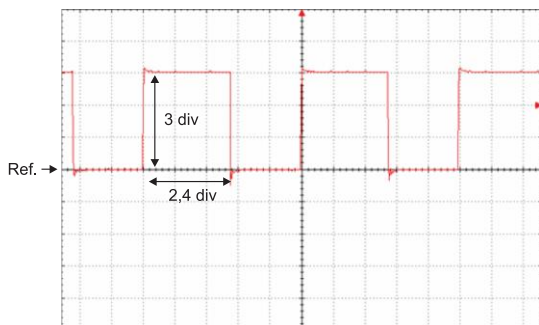
Gambar 10. Gelombang keluaran sinyal PWM TL494 dengan *driver* TLP250 ketika *duty cycle* 86,7%

Gambar 10 merupakan gelombang keluaran dari IC TL494 ketika *duty cycle* 86,7% dan kondisi *buck converter* belum menyala (*off*). Pada Gambar 10 terlihat bahwa gelombang kontrol dari IC TL494 dengan *feedback* ketika kondisi *buck converter* *off* mengakibatkan tegangan pada pin 1 yang terhubung dengan *output buck converter* bernilai 0 Volt (tidak bertegangan). Pin 2 pada IC TL494 telah terhubung dengan tegangan referensi, sehingga komparator pada IC TL494 membandingkan tegangan pin 1 *noninverting* dengan pin 2 *inverting*. Tegangan pada pin 1 *noninverting* lebih kecil daripada tegangan pada pin 2 *inverting*, sehingga akan menaikkan *duty cycle*. Dalam penelitian ini frekuensi pensaklaran atau *switching* diatur sebesar 20,08 kHz.



Gambar 11. Gelombang keluaran sinyal PWM TL494 dengan driver TLP250 ketika duty cycle 46,8%

Gambar 11 menampilkan hasil gelombang keluaran sinyal PWM ketika duty cycle 46,8 % dan kondisi buck converter telah menyala (on) dengan beban sebesar 100  $\Omega$ . Ketika buck converter telah menyala (on) dengan beban terpasang 100  $\Omega$  maka tegangan keluaran buck converter dengan feedback sebesar 5,01 Volt. Pada kondisi ini rangkaian kontrol memberikan respon dengan mengeluarkan duty cycle sebesar 46,8 %. Kondisi duty cycle yang semula bernilai 86,7 % pada Gambar 10 ketika buck converter off, duty cycle secara otomatis berubah menjadi 46,8 % ketika buck converter on. Hal ini karena tegangan keluaran buck converter diumpan balik ke pin 1 IC TL494, sehingga pada pin 1 noninverting TL494 yang semula tidak bertegangan mendapat tegangan dari umpan balik tegangan buck converter. Frekuensi pensaklaran atau switching diatur sebesar 20,08 kHz.



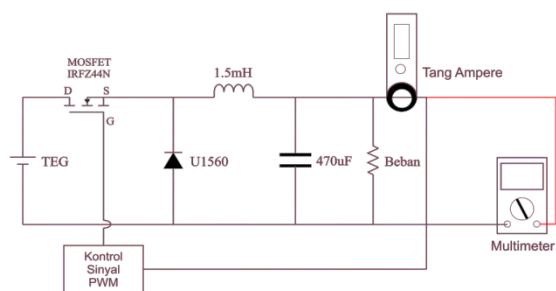
Gambar 12. Gelombang keluaran sinyal PWM TL494 dengan driver TLP250 ketika duty cycle 55,4 %

Gambar 12 adalah hasil gelombang keluaran sinyal PWM ketika duty cycle 55,4% dan beban buck converter sebesar 15,32  $\Omega$ . Ketika beban terpasang 15,32  $\Omega$  maka untuk mempertahankan tegangan sebesar 5 Volt, rangkaian kontrol memberikan respon dengan mengeluarkan duty cycle sebesar 55,4 %. Tegangan keluaran buck converter tetap stabil walau terjadi perubahan beban dan duty cycle. Hal ini karena tegangan keluaran buck converter diumpan balik ke rangkaian kontrol. Hubungan duty cycle pada buck converter dengan umpan balik tegangan berbanding terbalik

terhadap beban. Semakin kecil nilai tahanan beban pada buck converter, maka semakin besar duty cycle yang dihasilkan. Frekuensi switching yang terbaca pada kondisi beban 15,32  $\Omega$  adalah 20,08 kHz.

### 3.2 Pengujian Tegangan Keluaran Rangkaian Buck Converter dengan Umpan Balik Tegangan

Pengujian tegangan keluaran buck converter dengan umpan balik dapat dilihat pada Gambar 13. Gambar 13 menunjukkan bahwa keluaran dari buck converter diumpan balik ke rangkaian kontrol sinyal PWM, sehingga rangkaian buck converter pada Gambar 13 dalam kondisi close loop.



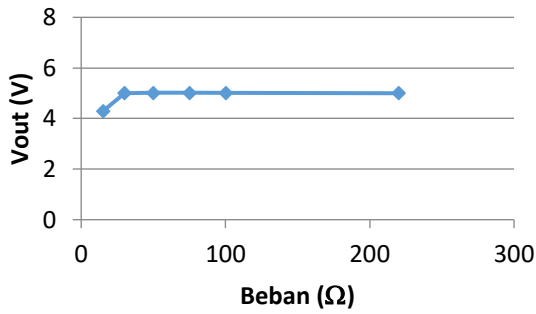
Gambar 13. Pengujian tegangan keluaran buck converter dengan umpan balik

Tabel 1. Hasil pengujian tegangan keluaran buck converter dengan umpan balik tegangan

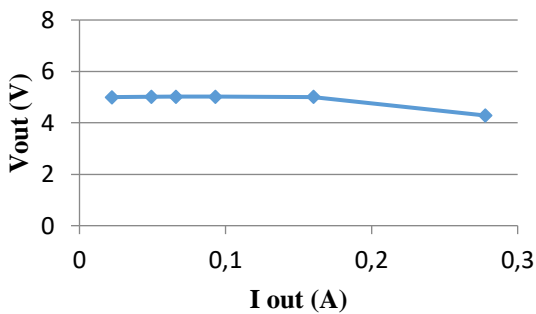
No	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Beban ( $\Omega$ )	Duty Cycle (%)
1	6,02	0,290	4,28	0,270	15	86,7
2	9,3	0,137	5,009	0,160	30	66,5
3	10,72	0,069	5,013	0,093	50	55,6
4	10,89	0,048	5,014	0,066	75	53
5	11,13	0,037	5,015	0,049	100	45,3
6	10,17	0,02	5,001	0,022	220	34,4

Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa ada perubahan duty cycle terhadap beban. Data diatas menunjukkan bahwa semakin kecil beban pada buck converter maka semakin besar duty cycle yang dihasilkan. Dapat disimpulkan hubungan antara duty cycle dengan beban adalah berbanding terbalik.. Frekuensi switching diatur pada 20,08 kHz.

Buck converter dengan feedback tegangan menghasilkan tegangan keluaran yang konstan 5V karena fungsi feedback sebagai pengoreksi selisih antara tegangan keluaran dan referensi. Selisih dari tegangan tersebut diumpan balik ke rangkaian kontrol sebagai masukan, sehingga tegangan keluaran dari buck converter berusaha stabil walau beban diubah-ubah. Pada beban 15  $\Omega$  terjadi penurunan Vout sebesar 4,28V. Hal ini disebabkan daya dari TEG tidak mampu menyuplai beban 15  $\Omega$



Gambar 14. Grafik tegangan keluaran buck converter dengan feedback tegangan



Gambar 15. Grafik tegangan keluaran buck converter dengan feedback arus keluaran

Dapat dilihat bahwa tegangan keluaran cenderung konstan pada 5V sedangkan arus berubah sesuai dengan perubahan beban. Dengan tegangan yang sama semakin besar beban maka arus keluaran akan semakin kecil, sebaliknya jika beban semakin kecil maka arus beban akan semakin besar.

### 3.3 Perhitungan Efisiensi Buck Converter

Efisiensi buck converter dapat dicari dengan menghitung daya input ( $P_{in}$ ) dan daya output ( $P_{out}$ ) pada buck converter dengan variasi beban antara 15 Ω hingga 100 Ω, dengan menggunakan Persamaan 4 berikut.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100 \% \quad (4)$$

dengan :

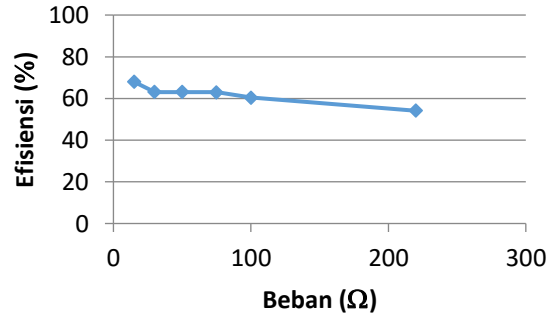
$$P_{in} = V_{in} \times I_{in}$$

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

Nilai efisiensi dari buck converter dengan feedback tegangan memiliki efisiensi tertinggi sebesar 67,9 % pada beban 15 Ω dan efisiensi terendah pada beban 220 Ω dengan efisiensi sebesar 54 %. Rata-rata efisiensi dari buck converter dengan feedback tegangan sebesar 61,9 %. Nilai efisiensi dari buck converter dengan feedback tegangan memiliki efisiensi dengan nilai rata-rata efisiensi tiap variasi beban diatas 60 %.

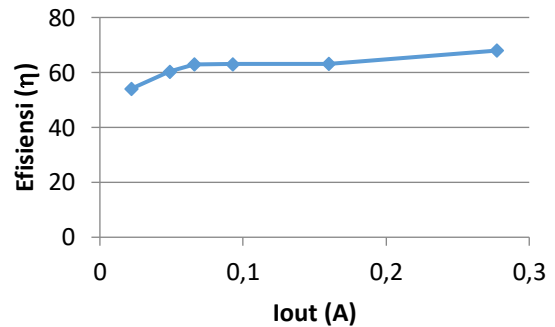
Tabel 2. Hasil perhitungan efisiensi buck converter dengan umpan balik tegangan

Vin (V)	Iin (A)	Pin (W)	Vout (V)	Iout (A)	Pout (W)	η (%)	R (Ω)
6,02	0,290	1,75	4,28	0,270	1,19	67,9	15
9,3	0,137	1,27	5,00	0,160	0,80	63,1	30
10,72	0,069	0,74	5,01	0,093	0,46	63,0	50
10,89	0,048	0,52	5,01	0,066	0,33	62,9	75
11,13	0,037	0,41	5,01	0,049	0,24	60,3	100
10,17	0,02	0,20	5,00	0,022	0,11	54,0	220



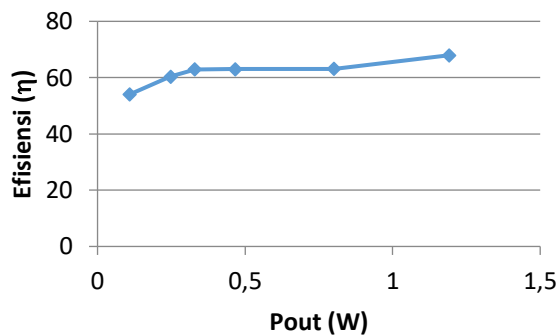
Gambar 16. Grafik hubungan efisiensi buck converter dengan feedback tegangan terhadap beban

Pada Gambar 16 menunjukkan grafik hubungan antara efisiensi buck converter dengan feedback tegangan terhadap beban. Ketika beban berubah dari 15 Ω hingga 220 Ω maka efisiensi akan mengalami penurunan. Semakin besar nilai beban semakin kecil nilai efisiensi buck converter dengan feedback tegangan



Gambar 17. Grafik hubungan efisiensi buck converter dengan feedback tegangan terhadap arus beban

Gambar 17 menunjukkan perbandingan efisiensi buck converter dengan arus keluaran. Dapat dilihat bahwa efisiensi berbanding lurus dengan arus keluaran semakin besar arus keluaran maka efisiensi pada buck converter akan semakin tinggi. Sebaliknya jika arus keluaran semakin kecil maka efisiensi pada buck converter akan semakin rendah. Hal ini sesuai dengan persamaan 4 yang menunjukkan bahwa efisiensi berbanding lurus dengan arus keluaran.



Gambar 18. Grafik hubungan efisiensi buck converter dengan feedback tegangan terhadap daya beban

Gambar 18 menunjukkan perbandingan efisiensi buck converter dengan daya keluaran. Terlihat bahwa hubungan efisiensi berbanding lurus dengan daya keluaran. Semakin besar daya keluaran maka efisiensi akan semakin tinggi. Sebaliknya jika daya keluaran buck converter semakin kecil maka efisiensi akan semakin rendah. Hal ini sudah sesuai dengan Persamaan 4 yang menunjukkan bahwa efisiensi berbanding lurus dengan daya keluaran ( $P_{out}$ ).

#### 4. Kesimpulan

Perancangan pembangkit listrik dengan termoelektrik menggunakan 6 sel TEG dengan seri TEC1270 yang disusun secara seri mampu menghasilkan tegangan keluaran DC dengan range 10-12V. Rangkaian konverter arus searah buck sudah mampu mengkonversi tegangan keluaran lebih rendah dari tegangan masukan. Dengan tegangan masukan 10-12V tegangan keluaran konverter buck sebesar 5V. Berdasarkan hasil pengujian tegangan keluaran buck converter dengan umpan balik tegangan pada beban 220  $\Omega$  menghasilkan tegangan keluaran sebesar 5,001 volt, pada beban 100  $\Omega$  menghasilkan tegangan keluaran sebesar 5,015 volt. Beban 75  $\Omega$  tegangan keluaran buck converter sebesar 5,014 volt. Beban 50  $\Omega$  tegangan keluaran buck converter sebesar 5,013 volt. Beban 30  $\Omega$  tegangan keluaran buck converter sebesar 5,009 volt. Beban 15  $\Omega$  tegangan keluaran buck converter sebesar 4,28 volt, tegangan keluaran buck converter dengan umpan balik tegangan cenderung konstan dengan tegangan 5V, namun pada beban 15  $\Omega$  tegangan keluaran turun menjadi 4,28V. Hal ini karena daya yang dihasilkan TEG tidak mampu menyuplai beban 15  $\Omega$ . Berdasarkan hasil pengujian efisiensi buck converter dengan umpan balik tegangan yang dibuat memiliki efisiensi tertinggi yaitu 67,9 % ketika beban 15

$\Omega$  dan efisiensi terendah yaitu 54 % ketika beban 220  $\Omega$ , nilai efisiensi buck converter dengan umpan balik tegangan memiliki efisiensi dengan nilai rata-rata tiap variasi beban diatas 60%. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menggunakan pemanas dengan suhu yang konstan, menambah sel TEG yang digunakan, dan menggunakan modul TEG dengan daya lebih besar.

#### Referensi

- [1]. D. Champier, "Thermoelectric generators : A review of applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 140, pp. 167–181, 2017.
- [2]. D. KETENAGALISTRIKAN, *Statistik Ketenagalistrikan 2016*, 2016th ed. 2017.
- [3]. D. E. dan KE, *Statistik EBTKE 2016*, 2016th ed. Jakarta, 2016.
- [4]. M. A. B. M. SOHID and This, "DESIGN AND DEVELOPMENT OF ENERGY CONVERSION SYSTEM BY USING THERMOELECTRIC GENERATOR (TEG)," *Univ. Tech. Malaysia Melaka*, no. June, 2014.
- [5]. S. Wango, "SMART POWER GENERATION FROM WASTE HEAT BY THERMO," *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, pp. 45–49, 2016.
- [6]. E. Kanimba and Z. Tian, "Modeling of a Thermoelectric Generator Device Technology & Medicine," *INTECH*, no. February 2017, 2016.
- [7]. T. Power, "Small Thermoelectric Generators," *INTERFACE*, no. 2, pp. 2–4, 2008.
- [8]. H. A. AL FIKRI, "EFEKTIFITAS MODUL PELTIER TEC-12706 SEBAGAI GENERATOR DENGAN MEMANFAATKAN ENERGI PANAS DARI MODUL PELTIER TEC-12706," *Univ. Muhammadiyah Surakarta*, 2016.
- [9]. T. Jeng, S. Tzeng, B. Yang, and Y. Li, "Design , Manufacture and Performance Test of the Thermoelectric Generator System for Waste Heat," no. 1, pp. 1–16, 2016.
- [10]. G. Li, "Recent development and application of thermoelectric generator and cooler," *Appl. Energy*, vol. 143, no. December 2014, pp. 1–25, 2017.
- [11]. C. Pline, "Peltier Cooling Module Installation," no. February, 2009.
- [12]. D. W. Hart, *Power Electronics*. Indiana: Pearson Education, Inc.
- [13]. L. W. Cahyadi, *KINERJA KONVERTER ARUS SEARAH TIPE BUCK CONVERTER DENGAN UMPAN BALIK TEGANGAN BERBASIS IC TL494*. Semarang, 2017.
- [14]. T. Instruments, "TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits," 2017.
- [15]. I. I. Rectifier, "HEXFET Power MOSFET," vol. PD-94053, pp. 1–9, 2001.
- [16]. Intersil, "MUR1560," no. 2778, pp. 1–4, 2000.