# ANALISIS PERFORMANSI SISTEM TANDEM PANEL SURYA–TERMOELEKTRIK SKALA LAB

# ANALYSIS PERFORMANCE OF LAB SCALE SOLAR PANEL–THERMOELECTRIC TANDEM SYSTEM

**Riswanda Imawan[1], M. Ramdlan Kirom[2], Tri Ayodha Ajiwiguna[3]**

[1,2,3]Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
[1]riswandaimawantf@gmail.com, [2]jakasantang@gmail.com, [3]tri.ayodha@gmail.com

**Abstrak**

Dalam penelitian ini digunakan panel surya tanpa *thermoelectric generator* sebagai referensi pembanding dengan panel surya yang menggunakan *thermoelectric generator* agar dapat diketahui pengaruh terhadap efisiensi listriknya. Modul panel surya yang digunakan berjenis polikristalin silikon dan *thermoelectric generator* yang digunakan berjumlah 10 buah TEG SP 1848. Parameter yang diukur pada penelitian ini di antaranya suhu, arus, dan tegangan pada ketinggian cahaya lampu 35 cm, 40 cm, 45 cm. Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa sistem tandem panel surya dengan *thermoelectric generator* memiliki persentase efisiensi listrik yang lebih besar dari pada panel surya tanpa *thermoelectric generator*. Peningkatan efisiensi listrik pada panel surya disebabkan karena *thermoelectric generator* mampu menurunkan suhu panel surya sekaligus menghasilkan listrik. Peningkatan efisiensi listrik rata-rata sistem tandem panel surya dengan *thermoelectric generator* pada ketinggian cahaya lampu 35 cm, 40 cm, 45 cm adalah 0.66%, 0.74%, dan 0.84%.

**Kata kunci :** efisiensi listrik, panel surya, generator termoelektrik

**Abstract**

In this study, solar panels without thermoelectric generators were used as a reference for comparison with solar panels using thermoelectric generators to determine the effect on their electrical efficiency. The solar panel modules used were polycrystalline silicon and thermoelectric generators used in the amount of 10 1848 SP TEGs. The parameters measured in this study included temperature, current, and voltage at the lamp height 35 cm, 40 cm, 45 cm. From the results of this study it was found that tandem solar panel systems with thermoelectric generators have a greater percentage of electrical efficiency than solar panels without thermoelectric generators. Increased electricity efficiency in solar panels is caused by thermoelectric generators capable of lowering the temperature of solar panels while producing electricity. The increase in the electrical efficiency of the average tandem solar panel system with a thermoelectric generator at the light beam height of 35 cm, 40 cm, 45 cm is 0.66%, 0.74%, and 0.84%.

**Keywords:** electricity efficiency, solar panels, thermoelectric generators

## 1. Pendahuluan

Matahari adalah sumber energi terbarukan yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Pemanfaatan dari cahaya matahari sangat cocok untuk diterapkan di panel surya. Panel surya merupakan modul yang bisa merubah dari cahaya matahari menjadi energi listrik. Dimana terdapat kekurangan pada panel surya, hal ini disebabkan karena panas yang berlebih dari modul panel surya. Salah satu hal yang mempengaruhi kinerja dari panel surya adalah suhu. Efisiensi listrik pada panel surya akan menurun jika suhu pada panel surya meningkat [1].

Kondisi ini terjadi dikarenakan radiasi cahaya matahari mengandung energi panas yang menyebabkan efisiensi listrik panel surya menurun. Untuk dapat memanfaatkan panas yang ada, yaitu dilakukan dengan penambahan *Thermoelectric Generator (TEG).* TEG akan menyerap panas dari panel surya untuk dapat dijadikan sebagai penghasil listrik tambahan. Penurunan kinerja panel surya akibat suhu, dapat meningkatkan daya yang dihasilkan oleh TEG [2].

Untuk peningkatan efisiensi listrik panel surya, dapat menggunakan *water cooling* sebagai sistem pendingin. Pendingin dengan air pada sistem PV/T memiliki efisiensi termal sedikit lebih besar dibandingkan pendingin udara [3]. Namun masih belum efektif karena masih memerlukan daya dari luar. Alternatif lain yaitu menggunakan *heat sink* bersirip. *Heat sink* digunakan untuk alat penukar panas atau sebagai media pendinginan suatu bahan elektronik. Pendinginan pasif dapat diterapkan pada suatu sistem yaitu penggunaan *heat sink* melalui media udara.

Berdasarkan percobaan sebelumnya yang telah dilakukan menggunakan *Thermoelectric Cooler (TEC)* yaitu dapat menaikkan efisiensi listrik panel surya dengan rata-rata 0.73% melalui sistem pendingin air dan penurunan suhu rata-rata mencapai 5.5 $^{o}$C [4]. Sedangkan efisiensi TEC-12706 diperoleh sebesar 1.6%, tegangan yang dihasilkan untuk 10 TEC sebesar 0.36 V, serta daya TEC yang sebagai pembangkit listrik yang dihasilkan rata-

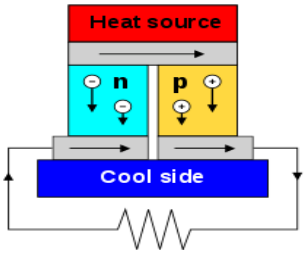
rata sebesar 0.052 mW [5]. Percobaan pada sistem tersebut dilakukan pengujian dibawah matahari langsung.

Untuk mengetahui performansi sistem tandem panel surya-termoelektrik, perlu dilakukan analisis. Pada tugas akhir ini, penulis melakukan penelitian untuk mengetahui peningkatkan efisiensi listrik panel surya dengan adanya penambahan TEG. Lampu pijar akan digunakan untuk penyinaran buatan sekaligus penghasil panas. Modul panel surya dan TEG akan dipasang secara tandem, yang artinya menempelkan TEG ke bagian belakang panel surya [6]. Performansi pada panel surya dapat diukur dengan membandingkan efisiensi listrik panel surya tanpa TEG dan menggunakan TEG. Melalui sistem tandem tersebut, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi listrik dari panel surya.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 *Thermoelectric Generator(TEG)*

TEG adalah modul yang merubah energi panas menjadi energi listrik karena adanya perbedaan suhu antara dua sisi keping. Modul termoelektrik dapat digunakan untuk pendingin, pemanas, dan pembangkit energi [7].




Gambar 2.1 *Thermoelectric generator* [8]

Modul termoelektrik terdiri dari susunan 2N pellet dari material semikonduktor yang berbeda (tipe p dan n) menjadi pasangan termoelektrik N yang dihubungkan berdasar termal dan listrik yaitu pararel dan seri [9]. Jenis semikonduktor tipe p cenderung kekurangan elektron dan tipe n cenderung kelebihan elektron. Sumber panas akan masuk dari sisi panas modul kemudian ditolak ke sisi dingin. Semakin bagus pendinginannya, maka listrik yang dihasilkan semakin besar.

Generator termoelektrik bekerja berdasarkan efek seebeck. Dimana ketika dua buah logam berbeda yang ujungnya disambungkan lalu memiliki perbedaan suhu diantara keduanya maka akan menghasilkan beda potensial. Sisi panas adalah sisi pada keping polos, sedangkan sisi dingin adalah sisi padakeping yang bertulisan. Koefisien seebeck merupakan nilai yang didapat saat *open circuit voltage* (Voc), yaitu rangkaian terbuka saat tidak ada beban dengan satuan V/K. Besarnya koefisien seebeck bergantung pada material penyusun semikonduktor yang digunakan. Material yang digunakan biasanya Bismuth Telluride ($Bi_2Te_3$).

### 2.2 Panel Surya

Panel surya adalah modul yang dapat mengubah energi foton (cahaya) menjadi energi listrik sedangkan energi panas dari radiasi matahari menyebabkan pengurangan efisiensi listrik panel surya [10]. Panel surya yang mudah ditemukan dipasaran adalah polikristalin silikon. Efisiensi listrik panel surya jenis polikristalin pada suhu 25$^o$C adalah sebesar 12.4% [10]. Panel surya jenis polikristalin memiliki karakteristik yang tidak tahan terhadap suhu tinggi. Efisiensi listrik panel surya tidak hanya bergantung pada radiasi matahari, tetapi dipengaruhi juga oleh suhu yang beroperasi pada panel surya tersebut [11]. Sehingga dengan suhu yang semakin meningkat, daya keluaran yang dihasilkan panel surya akan menurun.

### 2.3 Perpindahan Kalor

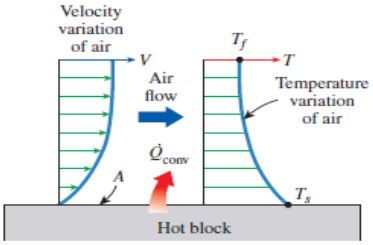
Perpindahan kalor merupakan suatu perpindahan energi yang berpindah dari suhu tinggi ke suhu yang lebih rendah. Mekanisme perpindahan kalor dibedakan menjadi tiga cara, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi [12]. Pada penelitian ini terjadi dalam dua cara, yaitu secara konduksi dan konveksi.

#### 2.3.1 Konduksi

Konduksi adalah transfer energi dari partikel yang memiliki energi lebih dari suatu zat ke partikel yang kurang energi yang berdekatan dari hasil interaksi antar partikel [12]. Dalam tugas akhir ini, peristiwa konduksi terjadi dua kali pada TEG, yaitu pertama saat sisi panasnya menempel dengan panel surya yang lama-kelamaan menjadi panas saat lampu dihidupkan dan kedua ketika sisi dingin menempel dengan *heat sink* menjadi dingin dari hasil konveksi udara terhadap *heat sink.*

### 2.3.2 Konveksi

Konveksi adalah transfer energi antara permukaan padat dan fluida yang bergerak berdekatan dengan melibatkan pergerakan fluidanya. Semakin cepat gerakan fluida semakin besar perpindahan panas [12].




Gambar 2.3 Konveksi alami [12]

Konveksi alami dapat terjadi pada suatu sistem denegan media udara saja. *Heat sink* berfungsi untuk melepaskan kalor secara alami ke udara bebas. Hal ini dipengaruhi oleh luas penampang yang dimiliki oleh *heat sink* tersebut. Perpindahan panas yang terjadi di area *heat sink* bervariasi. Pada daerah yang berdekatan dengan *heat sink* akan memiliki kecepatan pergerakan udara yang lebih kecil dibandingkan dengan jarak yang berjauhan dari *heat sink*. Begitu pula variasi suhu udara, semakin dekat dengan *heat sink* maka akan memiliki suhu yang lebih tinggi dan semakin jauh dari *heat sink* suhunya akan semakin rendah. Sehingga kalor yang diserap dapat terbuang ke lingkungan.

### 2.4 Daya Listrik

Untuk perhitungan kelistrikan dari panel surya dan TEG dapat menggunakan persamaan seperti berikut ini:

$$P_{out} = IV \tag{2.2}$$

Dimana :

$P_{out}$ = daya listrik yang dihasilkan (watt)
I = arus listrik (ampere)
V = tegangan (volt)

Persamaan 2.2 diatas menyatakan daya listrik yang dihasilkan sebanding dengan arus listrik dikali tegangan.

$$P_{in} = A \sum_{n=1}^{36} I_{rad} \tag{2.3}$$

Dimana :

$P_{in}$ = daya listrik yang masuk (watt)
A = luas *cell* dari panel surya ($m^2$)
$I_{rad}$ = intensitas cahaya lampu ($W/m^2$)

Persamaan 2.3 menyatakan daya listrik yang masuk berbanding lurus dengan intensitas cahaya dan luas permukaan panel surya. Intensitas cahaya diperoleh dari tiap-tiap *cell* panel surya yaitu ada 36 *cell* yang berukuran 2.2 cm x 7.8 cm. Perhitungan ini dilakukan karena energi foton yang diserap oleh panel surya berbeda-beda disetiap titiknya. Untuk mengetahui efisiensi listrik panel surya tanpa TEG dapat dihitung seperti persamaan dibawah ini :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} x\ 100\% \tag{2.4}$$

$$\eta = \frac{P_{panelsurya}}{A \sum_{n=1}^{36} I_{rad}} x\ 100\% \tag{2.5}$$

$$\eta = \frac{(I_{sc}.V_{oc}.FF)_{panelsurya}}{A \sum_{n=1}^{36} I_{rad}}\ x\ 100\% \tag{2.6}$$

Sedangkan untuk mengetahui efisiensi listrik sistem tandem panel surya dengan adanya penambahan TEG dapat dihitung seperti dibawah ini :

$$\eta = \frac{P_{panelsurya}+P_{TEG}}{A \sum_{n=1}^{36} I_{rad}} x\ 100\% \tag{2.7}$$

$$\eta = \frac{(I_{sc}.V_{oc}.FF)_{panelsurya}+(I.V)_{TEG}}{A \sum_{n=1}^{36} I_{rad}}\ x\ 100\% \tag{2.8}$$

Besarnya nilai *Fill Factor (FF)* yang diperoleh dari *datasheet* panel surya adalah 0.67. Untuk perhitungan efisiensi maksimum TEG dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini :

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{\Delta T}{T_H} . \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+\frac{T_C}{T_H}} \tag{2.9}$$

Dimana nilai ZT menyatakan *figure of merit* yang didefinisikan sebagai kemampuan material penyusun TEG yaitu Bismuth Telluride ($Bi_2Te_3$) dalam mengkonversi suhu menjadi listrik. Nilai ZT dapat diperoleh dari nilai referensi yaitu 0.7 sampai 0.8 [13].

## 3. Metodologi Penelitian

### 3.1 Alat dan Bahan Penelitian

#### 3.1.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

Tabel 3.1 Alat Penelitian

| No | Alat | Kegunaan |
|---|---|---|
| 1 | Multimeter Fluke 87V | Mengukur arus dan tegangan keluaran panel surya dan TEG |
| 2 | *Solar Power Meter* | Mengukur intensitas cahaya pada panel surya |
| 3 | *Thermocouple Thermometers* HT-9815 dan sensor suhu termokopel tipe k | Mengukur suhu di beberapa titik pengukuran |
| 4 | *Stopwatch* | Sebagai penanda waktu setiap 1 menit |

#### 3.1.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

Tabel 3.2 Bahan Penelitian

| No | Bahan | Kegunaan |
|---|---|---|
| 1 | Panel Surya Polikristalin | Sebagai media pengujian |
| 2 | TEG SP 1848 | Sebagai media pengujian |
| 3 | *Heat sink* alumunium bersirip | Sebagai pendingin TEG |
| 4 | *Thermal Glue* | Untuk mengurangi hambatan panas permukaan diantara panel surya, TEG dan *heat sink* |
| 5 | Lampu pijar toki 800 W | Sebagai penyinaran buatan |
| 6 | Spon | Sebagai isolator TEG |
| 7 | Solder dan timah | Sebagai penghubung TEG |

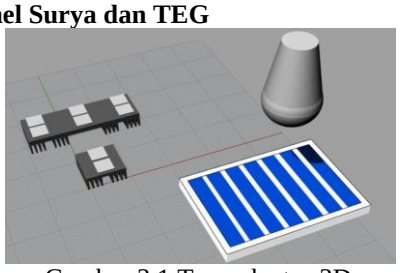
### 3.2 Prosedur Penelitian

#### 3.2.1 Karakterisasi Panel Surya dan TEG

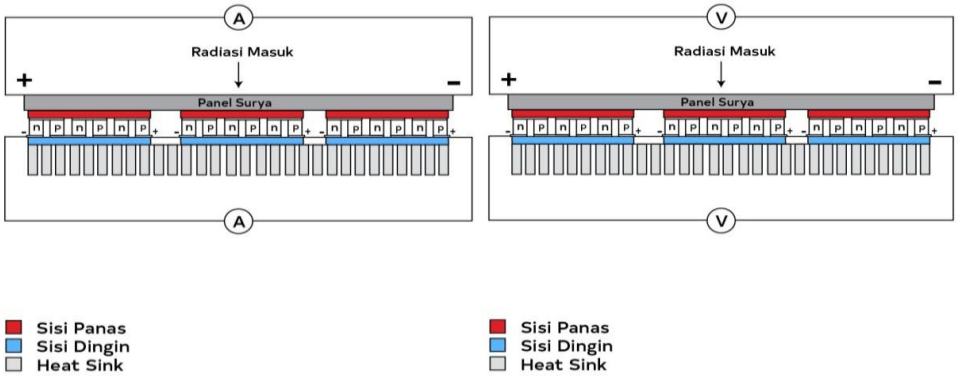
Dalam penelitian ini, karakterisasi modul panel durya dan TEG berdasarkan data spesifikasi dari *datasheet* kedua modul masing-masing. TEG yang akan digunakan berukuran 4 x 4 $cm^2$. Modul TEG dapat beroperasi dengan baik hingga suhu 85 $^oC$. Karakterisasi TEG dilakukan dengan melihat perbedaan suhu kedua sisi. Semakin besar perbedaan suhunya, maka daya listrik yang dihasilkan juga semakin besar. Panel surya yang digunakan berukuran 35 x 25 $cm^2$ dengan luas *cell* sebesar 2.2 x 7.8 $cm^2$ jenis polikristal buatan *solar land.* Panel surya jenis ini dapat beroperasi hingga 85 $^oC$. Karakterisasi panel surya dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan *open circuit.* Berdasarkan spesifikasi, besarnya tegangan *open circuit* yang dimiliki panel surya yaitu 21.6 V.

Dari nilai tersebut dapat dibandingkan dengan hasil yang didapat saat pengujian sistem. Saat panel surya diberikan cahaya dari lampu, maka dapat diamati perubahan suhu pada panel surya yang berpengaruh pada nilai tegangan *open circuit.*

#### 3.2.2 Desain Sistem Tandem Panel Surya dan TEG



Gambar 3.1 Tampak atas 3D




Gambar 3.2 Skematik pengukuran arus dan tegangan

Dengan menggunakan aplikasi gambar 3.2 desain rhinoceros 3D dan gambar 3.3 adobe ilustrator diperoleh hasil seperti gambar diatas. Dengan desain seperti ini tentu mempermudah dalam memahami sistem. Pada gambar 3.2 menunjukkan lampu digunakan untuk pemberi cahaya buatan yang fungsinya sebagai pengganti matahari. TEG akan ditempel diantara bagian belakang panel surya dan *heat sink*. Sedangkan gambar 3.3 menunjukkan skematik sistem tandem dengan pengukuran tanpa berbeban pada panel surya dan TEG. Perangkaian TEG dilakukan seri dengan menyambungkan kabel positif bertemu dengan kabel negatif TEG lainnya. Selanjutnya dapat diukur arus yang tegangan dengan multimeter secara bergantian.

### 3.2.3 Pengujian Sistem Tandem Panel Surya dan TEG

Penyusunan TEG dilakukan seri sebanyak 10 buah. Dirangkai seperti ini supaya tegangan yang dihasilkan menjadi besar namun arus tetap. Sisi panas TEG akan ditempel dibelakang panel surya, sehingga sisi panas TEG ini akan sama dengan suhu dibelakang panel surya. Sedangkan sisi dingin TEG ditempel ke *heat sink* bersirip.

TEG ditempel menggunakan *thermal glue*. Penggunaan *thermal glue* ini bertujuan untuk penghantar yang bersifat konduktif. Caranya dioleskan secara merata pada kedua sisi TEG. TEG akan diberikan spon berbahan isolator diantara sisi panas dan dingin agar terisolasi sempurna supaya terjadi perbedaan suhu yang baik. Sebelum pengujian, sensor termokopel tipe k dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan kalibrator. Setelah itu dipasang di beberapa titik pengukuran yang berbeda. Setelah semua sudah dirangkai, saatnya menyalakan lampu secara tegak lurus dengan panel surya.

Pengujiaan dilakukan dengan menggunakan lampu yang pasang diatas panel sejauh 35 cm, 40 cm, dan 45 cm. Kabel keluaran listrik masing-masing akan dipisah baik dari panel surya maupun TEG. Data dicatat secara manual selama 90 menit dengan interval waktu setiap 1 menit. Data yang didapat berupa data suhu dari kedua panel surya, suhu panas TEG, suhu dingin TEG, suhu lingkungan, arus, tegangan dan intensitas cahaya. Kemudian membuat grafik pengujian dan perhitungan daya serta efisiensi listrik sistem tandem.

### 3.2.4 Pengukuran Efisiensi Listrik

Efisiensi listrik diukur dengan melihat perubahan yang terjadi dengan membandingkan panel surya tanpa TEG dan dengan TEG pada persamaan 2.6 dan 2.8. Sedangkan perhitungan efisiensi TEG seperti pada persamaan 2.9.

## 4. Hasil dan Analisis

### 4.1 Performansi Antara TEG dan TEC

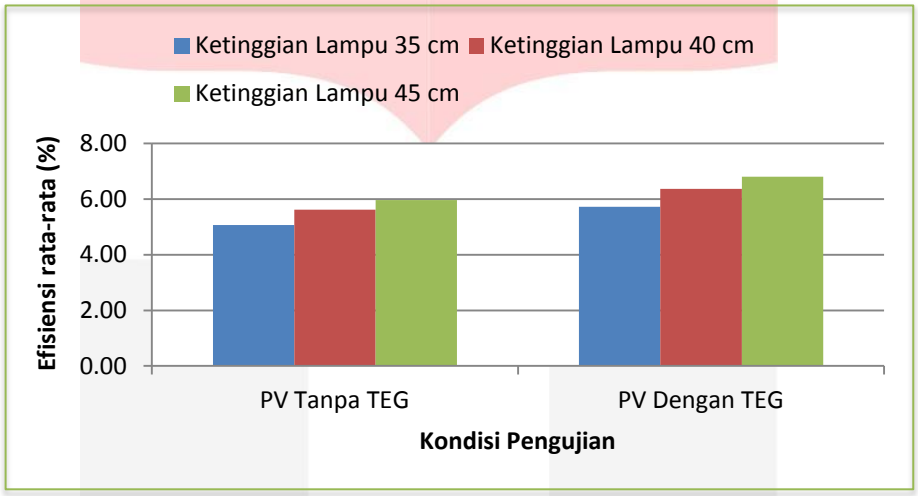
Berdasarkan referensi, data pengujian TEC-12706 sebagai pendingin pada panel surya yang diperoleh dari Joko Suryo Sumbodo, berhasil meningkatkan efisiensi PV dengan rata-rata sebesar 0.73% dan daya TEC-12706 sebesar 0.052 mW dengan penurunan suhu rata-rata sebesar 5.5 $^{o}$C yaitu menggunakan air sebagai media pendinginan pada pengujian *outdoor* [4].

Pada tabel 4.1 merupakan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa terjadi kenaikan efisiensi listrik rata-rata sistem tandem panel surya dengan TEG SP 1848 pada ketinggian 35 cm, 40 cm, 45 cm adalah 0.66%, 0.74%, dan 0.84% dengan penurunan suhu rata-rata sebesar 18 $^{o}$C, 15.3 $^{o}$C, dan 10 $^{o}$C. Artinya TEG SP 1848 kurang efektif jika ditinjau secara termal karena hubungan antara penurunan suhu yang besar dengan peningkatan efisiensi listrik panel surya yang tidak terlalu besar menyebabkan kurang relevan. Namun jika ditinjau sebagai pembangkit listrik, TEG SP 1848 memiliki daya yang lebih besar dari pada TEC-12706.

Tabel 4.1 Efisiensi Listrik Panel Surya

| No | Ketinggian Lampu (cm) | Intensitas Rata-rata ($W/m^2$) | Efisiensi Rata-rata Panel Surya (%) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | PV Tanpa TEG | PV Dengan TEG |
| 1 | 35 | 885 | 5.07 | 5.73 |
| 2 | 40 | 625 | 5.62 | 6.37 |
| 3 | 45 | 525 | 5.96 | 6.81 |

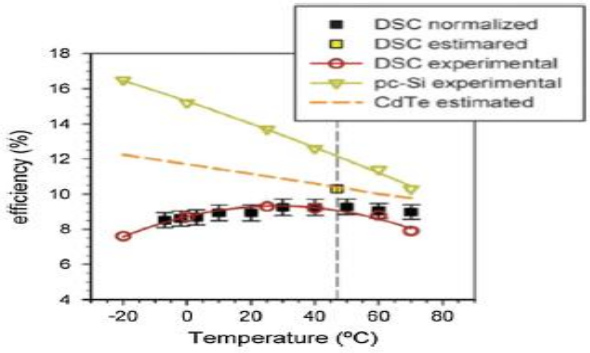
Pada gambar 4.1 merupakan grafik efisiensi listrik rata-rata panel surya yang dihasilkan terhadap kondisi panel surya tanpa TEG SP 1848 dan dengan TEG SP 1848 pada ketinggian 35 cm, 40 cm, 45 cm. Semakin jauh jarak lampu dengan panel surya maka efisiensi listriknya semakin besar yang disebabkan karena intensitas yang masuk semakin berkurang. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini sama dengan referensi yang didapat bahwa dengan adanya peningkatan intensitas cahaya maka efisiensi listrik yang dihasilkan menjadi berkurang [14].




Gambar 4.1 Grafik efisiensi listrik rata-rata panel surya

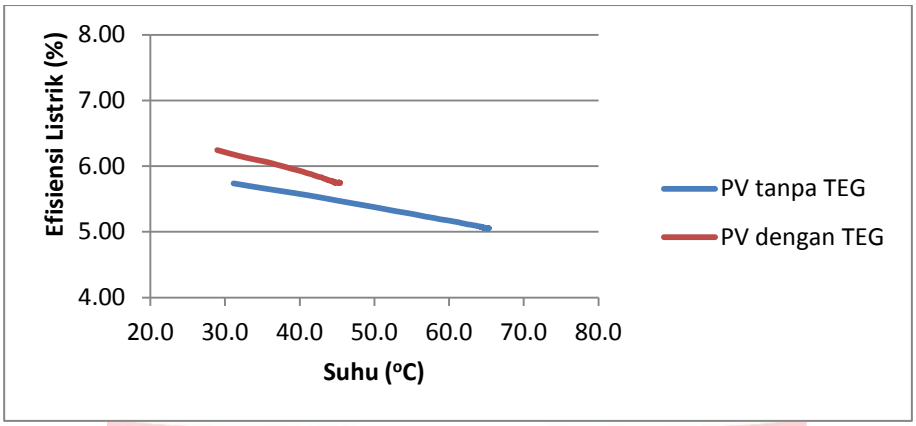
### 4.2 Pengaruh Peningkatan Suhu Terhadap Efisiensi Listrik

Pada gambar 4.2 berdasarkan referensi, telah dilakukan pengujian terhadap beberapa jenis sel surya, diantaranya: *Dye-sensitized Solar Cell (DSSC) dan Polycrystalline Silicon.* Hasilnya, suhu pada modul sel surya tersebut mempengaruhi efisiensi listriknya. Pada suhu 25 $^{o}$C sel surya jenis DSSC menghasilkan efisiensi listrik sebesar 9.3% namun efisiensi listrik menurun menjadi 8.1% saat suhu 70 $^{o}$C. Sedangkan pada sel surya jenis polikristalin suhu 25 $^{o}$C menghasilkan efisiensi listrik sebesar 12.4% dan efisiensi listriknya terus berkurang seiring meningkatnya suhu sel surya tersebut [15].

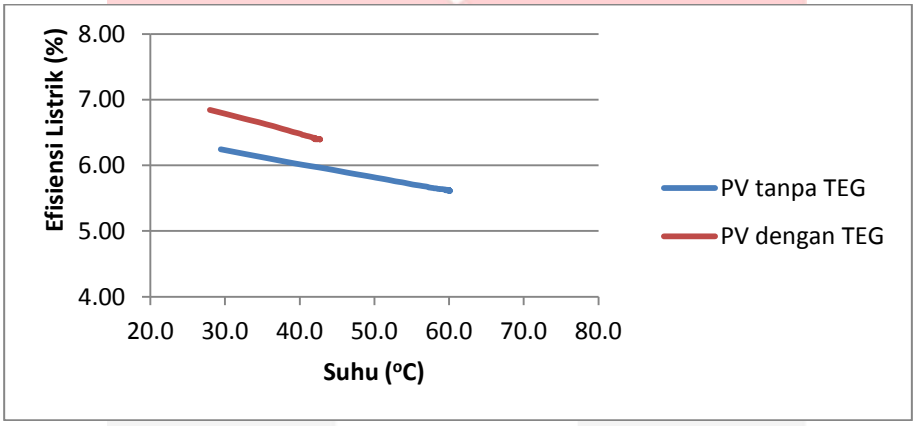



Gambar 4.2 Grafik efisiensi listrik terhadap suhu panel surya [15]

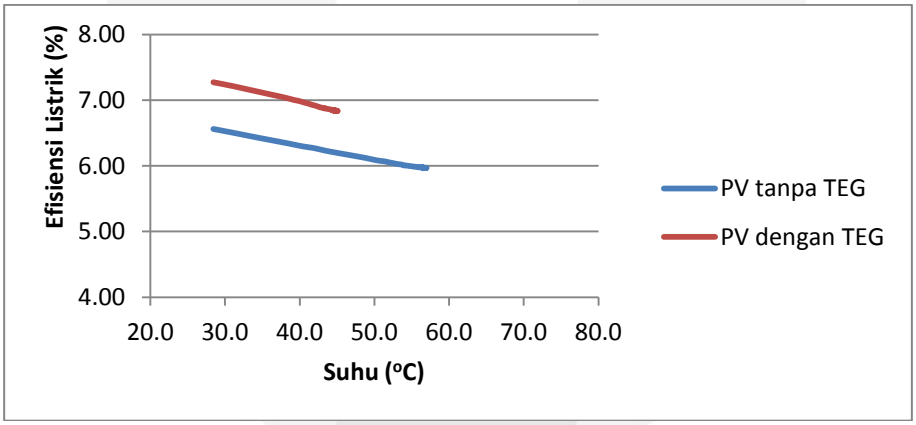
Pada gambar 4.3, 4.4, dan 4.5 merupakan hasil penelitian yang menunjukkan pengaruh peningkatan suhu terhadap efisiensi listrik panel surya di ketinggian 35 cm, 40 cm, dan 45 cm. Pola yang digambarkan adalah sama dengan referensi gambar 4.16 pada garis warna hijau yaitu hasil eksperimen panel surya polikristalin silikon. Dimana seiring terjadinya peningkatan suhu maka efisiensi listrik panel surya terus menurun.




Gambar 4.3 Grafik suhu terhadap efisiensi listrik panel surya pada ketinggian 35 cm




Gambar 4.4 Grafik suhu terhadap efisiensi listrik panel surya pada ketinggian 40 cm




Gambar 4.5 Grafik suhu terhadap efisiensi listrik panel surya pada ketinggian 45 cm

### 4.3 Perbedaan Sistem Pendingin

Berdasarkan referensi dengan konfigurasi yang hampir sama, pemasangan TEG, yaitu TEG diletakkan langsung disisi belakang PV jenis polikristalin. Eksperimen dilakukan di laboratorium dengan intensitas 1000 W/m$^2$. Suhu pada modul PV bervariasi dari 25 $^o$C sampai 85 $^o$C dengan suhu ruangan 25 $^o$C. Material yang digunakan Bismuth Telluride ($Bi_2Te_3$). Suhu dingin TEG dijaga 20 $^o$C menggunakan pendinginan dengan air. Sehingga TEG menghasilkan daya 2.26 W dengan efisiensi sistem yang diperoleh sebesar 30-40% [6].

Terdapat perbedaan yang penulis lakukan, diantaranya intensitas cahaya tidak mencapai 1000 W/m$^2$. Namun intensitas tertinggi yang dihasilkan hanya 885 W/m$^2$. Hal ini dilakukan karena mengingat jika jarak ketinggian lampu semakin dekat dengan panel surya maka dapat menyebabkan kerusakan pada wafer silikon pada modul tersebut. Perbedaan lainnya adalah suhu dingin TEG tidak bisa dijaga konstan dikarenakan pendinginan dengan *heat sink* akan lebih dipengaruhi oleh suhu lingkungan yang akan terus meningkat seiring waktu berjalan. Secara keseluruhan sistem tandem dengan pendingin *heat sink* cukup baik dalam meningkatkan efisiensi listrik panel surya dengan pendinginan yang dilakukan secara alami melalui udara.

## 5 Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan pengujian dan analisa terhadap sistem maka dapat ditarik beberapa kesimpulan :

1. Peningkatan efisiensi listrik rata-rata sistem tandem panel surya dengan TEG SP 1848 pada ketinggian lampu 35 cm, 40 cm, 45 cm adalah 0.66%, 0.74%, dan 0.84%. Peningkatan efisiensi listrik pada panel surya ini disebabkan karena TEG SP 1848 mampu menurunkan suhu panel surya sekaligus menghasilkan listrik. Semakin jauh jarak lampu dengan panel surya maka efisiensi listriknya semakin besar yang disebabkan karena intensitas yang masuk semakin berkurang.
2. Daya listrik rata-rata yang dihasilkan oleh TEG SP 1848 pada ketinggian lampu 35 cm, 40 cm, 45 cm adalah 0.015 W, 0.010 W, dan 0.007 W. Daya listrik yang dihasilkan ini masih sangat kecil dikarenakan perbedaan suhu di antara kedua sisi TEG SP 1848 tidak terlalu besar.
3. Besarnya suhu rata-rata yang mampu diturunkan sistem tandem panel surya dengan TEG SP 1848 pada ketinggian lampu 35 cm, 40 cm, 45 cm adalah 18 $^{o}$C, 15.3 $^{o}$C, dan 10 $^{o}$C. Dengan adanya penurunan suhu panel surya ini menyebabkan efisiensi listrik sistem tandem panel surya dengan TEG SP 1848 dapat meningkat.

### 5.2 Saran

1. Perlu adanya desain agar kalor terbuang dengan baik sehingga TEG SP 1848 memiliki selisih suhu yang besar sehingga listrik yang dihasilkan juga semakin besar dan bisa diterapkan pada kondisi *real.*
2. Menggunakan jenis tembaga untuk *heat sink* agar kalor yang dibuang lebih besar sehingga panas pada panel surya terbuang dengan baik.

**Daftar Pustaka:**

[1] D. Suryana and M. M. Ali, 2016, Pengaruh Temperatur / Suhu Terhadap Tegangan Yang Dihasilkan Panel Surya Jenis Monokristalin, *Teknol. Proses dan Inov. Ind*., vol. 2, no. 1, pp. 5-8

[2] R. Bjork, K. K. Nielsen, 2015, The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system, *Solar Energy*, vol. 120, pp. 187-194

[3] P. G. Charalambous, G. G. Maidment, S. A. Kalogirou, Yiakoumetti K., 2007, Photovoltaic thermal (PV/T) collectors, *Appl Therm Eng*, vol. 27, pp. 275–286

[4] J.S. Sumbodo, 2018, Efektifitas Pendingin Menggunakan Termoelektrik Pada Panel Surya, Telkom University

[5] F. A. Diawan, 2018, Pemanfaatan Thermoelectric Cooler Pada Photovoltaic Sebagai Pembangkit, Telkom University

[6] D. N. Kossyvakis, G. D. Voutsinas, E. V. Hristoforou, 2016, Experimental analysis and performance evaluation of a tandem photovoltaic-thermoelectric hybrid system, *Energy Conversion Management*, vol. 17, pp. 490–450

[7] A. F. Ioffe, 1957, Semiconductors thermoelements and thermoelectric cooling, London, U.K.: Infoserch Limited

[8] Anonim, 2018. *Thermoelectric Generator*. [Online]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric generator. [Accessed: 07 Nov 2018]

[9] Simon Linekyn and Shmuel Ben-Yaakov, 2007, Modeling and analysis of thermoelectric modules, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 2

[10] Skoplaki E, Palyvos J, 2009, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations, *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614-624

[11] Y. M. Irwan, 2015, Indoor test performance of PV panel through water cooling method, *Energy Procedia*, pp. 604–611

[12] Y. A. Cengel and M. A. Boles, 2015, *Thermodynamics An Engineering Approach*, 8$^{th}$ ed. New York: McGraw-Hill Education

[13] C. Daniel, 2017, Thermoelectric generators: A review of applications, *Energy Conversion and Management*, pp. 167-181

[14] Nasrin R, Hasanuzzaman M, Rahim N. A., 2018, Effect of high irradiation on photovoltaic power and energy, *Int. J. Energy Research*, pp. 1115-1131

[15] Raga S, Santiago F, 2013, Temperature effects in dye-sensitized solar cells, *Phys Chem*, vol.15, no. 7.