

# Efektifitas Konsentrator Cahaya Aluminium Foil Terhadap Kenaikan Intensitas Cahaya dan Temperatur Permukaan Solar Cell

Parlin Siagian<sup>1</sup>, Hermansyah Alam<sup>1</sup>, Ridho Anggu Frasasti<sup>2</sup>

<sup>1,2,2</sup>Fakultas Sains dan Teknologi, Teknik Elektro, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia

Email: <sup>1</sup>parlinsiagian@dosen.pancabudi.ac.id, <sup>2</sup>Author2@email.com

(\* : coressponding author)

## Abstrak

Penelitian ini mengkaji efektivitas penggunaan konsentrator cahaya dari aluminium foil dalam menghambat kenaikan suhu permukaan solar cell. Desain eksperimen melibatkan dua kondisi: dengan dan tanpa konsentrator cahaya aluminium foil. Pengukuran dilakukan untuk suhu permukaan solar cell dan output daya listrik dalam interval waktu tertentu. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penggunaan aluminium foil sebagai konsentrator cahaya secara signifikan meningkatkan intensitas cahaya yang mengenai permukaan solar cell, namun juga berdampak pada kenaikan suhu. Analisis statistik menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam kenaikan suhu antara solar cell dengan dan tanpa konsentrator cahaya. Penggunaan konsentrator aluminium foil terbukti efektif dalam meningkatkan output daya listrik dengan suhu permukaan yang lebih rendah dibandingkan tanpa konsentrator. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi manajemen termal untuk meningkatkan efisiensi dan umur panjang solar cell.

**Kata Kunci:** Konsentrator\_cahaya, aluminium\_foil, solar\_cell, suhu\_permukaan, efisiensi\_daya.

## 1. PENDAHULUAN

Dalam meningkatkan intensitas cahaya yang mengenai permukaan panel surya diperlukan elemen pengumpul cahaya matahari yang seharusnya tidak mengenai solar cell jatuh pada permukaan. Peningkatan cahaya yang mengenai panel surya pada keadaan normal terjadi apabila cahaya matahari atau posisi matahari tegak lurus bidang solar cell. Namun pada saat kondisi ini maka akan meningkatkan suhu permukaan panel surya. Sel surya, juga dikenal sebagai sel fotovoltaik (PV), adalah perangkat semikonduktor yang secara langsung mengubah sinar matahari menjadi listrik. Kenaikan suhu yang berlebihan dapat berdampak negatif terhadap efisiensinya dan berpotensi merusak material semikonduktor. Peningkatan suhu panel surya yang berlebihan akan dapat merusak rangkaian semikonduktor nya [1]. Efisiensi dan umur panjang sel surya terkait erat dengan suhu pengoperasiannya. Suhu permukaan yang tinggi, sering kali disebabkan oleh paparan sinar matahari langsung, dapat menyebabkan hilangnya efisiensi dan potensi kerusakan pada sel surya. Penelitian telah menunjukkan bahwa kenaikan suhu pada sel surya multi-persimpangan dapat mengurangi efisiensi dan memperpendek masa pakainya [2]. Untuk mengatasi masalah ini, berbagai penelitian telah mengeksplorasi berbagai metode manajemen termal sel surya.

Upaya untuk mengatur suhu sel surya antara lain dengan menggunakan bahan antarmuka termal dengan pengisi graphene [2], pelat pipa panas berlapis nano [3], lapisan pendingin termal yang sangat berpori [4], dan bahan aerogel keramik isolasi termal transparan [5]. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi variasi suhu dalam panel surya, membatasi kenaikan suhu, dan meningkatkan efisiensi sel surya dengan menyediakan mekanisme pendinginan yang efektif.

Selain itu, penelitian telah menyoroti dampak suhu terhadap efisiensi sel fotovoltaik, dengan penelitian menunjukkan bahwa efisiensi sel fotovoltaik menurun seiring dengan meningkatnya suhu sel karena koefisien suhu negatif pada bahan tertentu [6]. Metode pendinginan aktif dan pendinginan pasif telah diidentifikasi sebagai dua pendekatan utama dalam manajemen termal sel surya [7], [8].

Pada akhirnya, menjaga suhu pengoperasian yang optimal sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi dan umur sel surya. Menerapkan strategi manajemen termal yang efektif, seperti yang melibatkan material canggih [9] dan teknik pendinginan, dapat membantu mengurangi dampak negatif kenaikan suhu terhadap kinerja sel surya.

Untuk menyelidiki pengaruh konsentrator cahaya menggunakan cermin pada suhu permukaan sel surya, kita dapat mengambil wawasan dari penelitian yang relevan. Penggunaan cermin untuk memusatkan sinar matahari ke sel surya dapat berdampak signifikan terhadap suhu permukaannya. Penelitian tentang kolektor surya telah menunjukkan bahwa cermin parabola dapat memusatkan sinar matahari ke titik fokus, dimana energi diubah dan diangkut oleh penerima. Sesuai dengan [10]. Konsentrasi radiasi matahari ini dapat menyebabkan kenaikan suhu yang cepat, yang dapat dikontrol dengan mengatur jarak antara cermin dan sel surya [11].

Selain itu, penelitian tentang cermin surya telah menyoroti pentingnya sudut datang pada reflektansi, menekankan bahwa cahaya matahari terkonsentrasi pada titik fokus atau garis menggunakan cermin pelacak dalam Concentrating Solar Technologies (CST) [12]. Bentuk dan kelengkungan cermin pada konsentrator surya memainkan peran penting dalam memfokuskan radiasi secara efektif [13]. Selain itu, penggunaan lensa atau cermin pada pengumpul konsentrasi surya dapat meningkatkan fluks panas pada area penyerap kecil, sehingga berdampak pada suhu sel surya [14].

Selain itu, desain dan optimalisasi konsentrator surya, seperti palung parabola dan sistem cermin Fresnel, telah dipelajari untuk meningkatkan kinerja sistem fotovoltaik surya [15], [16]. Konsentrator yang memfokuskan sinar matahari ke area yang lebih kecil pada sel fotovoltaik dapat meningkatkan penyerapan energi dan meningkatkan suhu pengoperasian sel surya [2]. Pengembangan penukar panas tenaga surya-udara yang inovatif dan konsep penerima panas fotovoltaik terkonsentrasi semakin menunjukkan upaya berkelanjutan untuk mengoptimalkan konsentrasi energi matahari dan pengelolaan panas [17], [18].

Kesimpulannya, penggunaan cermin sebagai konsentrator cahaya dalam sistem energi surya dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap suhu permukaan sel surya.

Oleh karena itu dalam tulisan ini akan diteliti konsentrator cahaya berbahan aluminium foil yang dapat mengurangi akibat yang tidak baik karena suhu yang terlalu panas dalam konsentrator berbahan cermin.

## 2. TINJAUAN TEORITIS

### 1. Konsep dasar solar cell dan permasalahan temperatur

Sel surya, juga dikenal sebagai sel fotovoltaik (PV), adalah perangkat yang mengubah sinar matahari langsung menjadi listrik menggunakan efek fotovoltaik. Mereka terutama terbuat dari bahan semikonduktor, seperti silikon, yang menyerap foton dari sinar matahari dan melepaskan elektron, sehingga menghasilkan arus listrik [19]. Untuk menangkal dampak suhu tinggi, sel surya seringkali dirancang dengan sistem pendingin atau ditempatkan dalam struktur peneduh untuk mengurangi paparan panas. Penelitian berfokus pada pendinginan sel surya untuk meningkatkan efisiensi konversi energi, terutama dalam berbagai kondisi iklim.

Temperatur tinggi berdampak negatif terhadap efisiensi sel surya terutama melalui dua mekanisme: penurunan tegangan keluaran dan peningkatan rugi-rugi resistif.

1. Output Tegangan Berkurang: Ketika suhu sel surya meningkat, energi celah pita bahan semikonduktor menurun. Pengurangan energi celah pita ini menyebabkan tegangan rangkaian terbuka yang lebih rendah. Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) merupakan parameter penting dalam menentukan efisiensi sel surya secara keseluruhan.  $V_{oc}$  yang lebih rendah berarti tegangan maksimum yang dapat dihasilkan sel dalam kondisi tanpa beban berkurang, yang secara langsung berdampak pada keluaran daya [20].
2. Peningkatan Kerugian Resistif: Suhu yang lebih tinggi meningkatkan konsentrasi pembawa intrinsik dalam bahan semikonduktor, yang pada gilirannya, meningkatkan resistansi seri. Peningkatan resistansi ini menyebabkan kerugian resistif ( $I^2R$ ) yang lebih tinggi ketika arus mengalir melalui sel. Daya yang hilang karena hambatan pada bahan dan sambungan sel mengurangi keluaran daya bersih yang tersedia untuk penggunaan eksternal [21].

Penurunan keluaran tegangan dan peningkatan rugi-rugi resistif menurunkan efisiensi konversi sel surya secara keseluruhan, menyebabkan lebih sedikit energi listrik yang dihasilkan dari jumlah sinar matahari yang sama.

### 2. Studi-studi mengenai penggunaan konsentrator cahaya

Menanggapi pertanyaan pengguna tentang pemanfaatan konsentrator cahaya untuk meningkatkan efisiensi sel surya dan mengatasi tantangan terkait peningkatan pembangkitan panas, referensi berikut telah ditinjau dan dikonfirmasi relevansinya:

- penelitian [22] membahas konsep pendinginan radiasi peredam surya menggunakan benda hitam termal kristal fotonik yang tampak transparan. Referensi ini penting karena membahas masalah pengelolaan panas pada peredam surya, yang merupakan hal yang sangat penting ketika menggunakan konsentrator cahaya untuk meningkatkan kinerja sel surya.
- fokus pada sintesis titik kuantum karbon untuk luminescent solar concentrators (LSCs). LSC dikenal karena mengkonsentrasikan foton surya secara efisien, selaras dengan tujuan mengeksplorasi konsentrator cahaya untuk meningkatkan kinerja sel surya [23].
- desain dan optimalisasi lensa Fresnel untuk sistem fotovoltaik konsentrasi tinggi. Eksplorasi penerapan konsentrator untuk meningkatkan efisiensi sel surya sekaligus mempertimbangkan manajemen panas [24].
- pengembangan sistem Fotovoltaik Terkonsentrasi (CPV) berbasis Fresnel dengan penyinaran seragam. Referensi ini penting karena mempelajari penggunaan lensa Fresnel dalam konsentrator surya untuk meningkatkan kinerja sel surya [25].

Referensi ini memberikan wawasan berharga mengenai penggunaan konsentrator cahaya untuk meningkatkan efisiensi sel surya dan mengatasi tantangan yang terkait dengan pengelolaan peningkatan pembangkitan panas di sistem tata surya.

### **Pengurangan Suhu pada Modul Fotovoltaik Konsentrator Menggunakan Pelapisan dengan Emisivitas dan Konduktivitas Termal Tinggi**

Penerapan lapisan radiasi termal dengan emisivitas termal dan konduktivitas termal yang tinggi pada sasis aluminium modul konsentrator fotovoltaik (CPV) secara signifikan mengurangi suhu sel. Sampel yang dilapisi menunjukkan suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan sampel yang tidak dilapisi, terutama dalam kondisi berangin, karena peningkatan radiasi dan konduksi panas. Efektivitas pelapisan ini menyoroti pentingnya manajemen termal dalam menjaga efisiensi dan umur panjang sistem CPV.

Pengaruh Suhu pada Sel Surya Tandem AlGaAs/GaAs untuk Fotovoltaik Konsentrator menunjukkan bahwa peningkatan rasio konsentrasi dalam sistem CPV menyebabkan suhu lebih tinggi, yang berdampak buruk pada kinerja sel surya multijungsi. Studi ini menemukan bahwa suhu yang lebih tinggi mengurangi tegangan rangkaian terbuka dan efisiensi konversi. Strategi manajemen termal yang efektif, seperti mengoptimalkan desain dan material sel tandem, sangat penting untuk memitigasi efek termal ini dan menjaga efisiensi tinggi dalam aplikasi CPV [24].

Studi ini berfokus pada pengembangan konsentrator surya luminescent (LSC) efisiensi tinggi menggunakan titik kuantum karbon (C-dots) dengan pergeseran Stokes yang besar. Pergeseran Stokes yang besar membantu menekan kehilangan reabsorpsi, sehingga meningkatkan efisiensi optik LSC. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya menyeimbangkan sifat penyerapan dan emisi cahaya untuk meningkatkan kinerja konsentrator surya secara keseluruhan. Manajemen termal yang efisien di LSC dicapai dengan mengoptimalkan sifat material untuk meminimalkan pembentukan panas selama proses penyerapan dan emisi ulang cahaya [26].

Studi-studi ini secara kolektif menyoroti peran penting manajemen termal dalam menjaga efisiensi sel surya dalam kondisi cahaya terkonsentrasi. Material dan pelapis canggih, desain sel yang dioptimalkan, dan konsentrator luminescent yang inovatif merupakan strategi utama untuk mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh peningkatan suhu dalam sistem fotovoltaik surya.

### **3. Keunggulan dan kelemahan aluminium foil sebagai konsentrator cahaya.**

#### **Keuntungan**

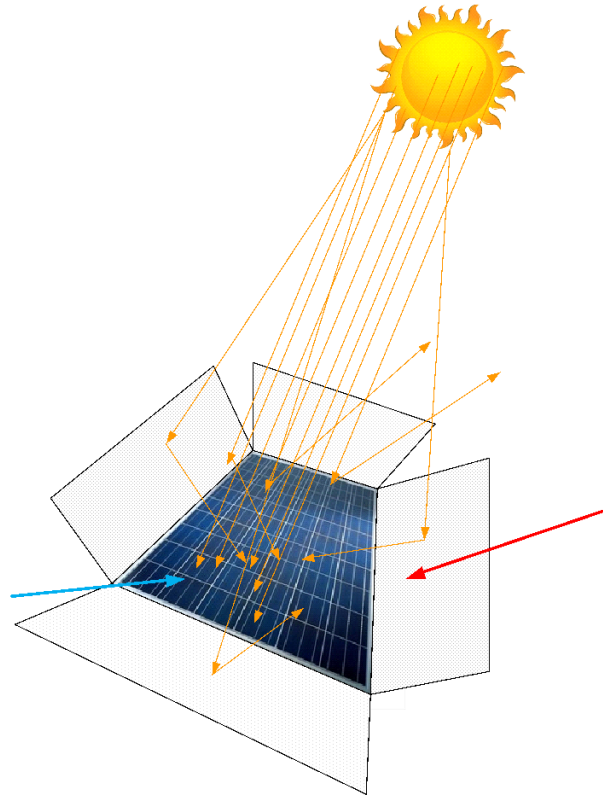
1. Hemat Biaya: Aluminium foil tidak mahal dan tersedia secara luas, menjadikannya pilihan hemat biaya untuk aplikasi konsentrasi cahaya.
2. Ringan: Ringan, sehingga mudah ditangani dan dipasang pada berbagai pengaturan tanpa menambah bobot signifikan pada struktur.
3. Reflektivitas Tinggi: Aluminium foil memiliki reflektivitas tinggi terhadap cahaya tampak, yang meningkatkan jumlah cahaya yang diarahkan ke sel surya, sehingga meningkatkan kinerjanya.
4. Mudah Dibentuk dan Dipasang: Aluminium foil dapat dengan mudah dipotong dan dibentuk agar sesuai dengan berbagai konfigurasi, memungkinkan desain dan pemasangan yang fleksibel.

#### **Kekurangan**

1. Masalah Manajemen Termal: Meskipun aluminium foil dapat memusatkan cahaya, hal ini juga dapat menyebabkan peningkatan suhu pada permukaan sel surya, yang dapat mengurangi efisiensi dan berpotensi merusak sel jika tidak dikelola dengan benar [24].
2. Masalah Daya Tahan: Aluminium foil relatif rapuh dan mudah rusak oleh faktor lingkungan seperti angin, hujan, dan abrasi fisik, sehingga menyebabkan penurunan kinerja seiring berjalannya waktu.
3. Efektivitas Terbatas dalam Cahaya Tersebar: Efektivitas aluminium foil sebagai konsentrator cahaya berkurang dalam kondisi cahaya menyebar, seperti cuaca berawan, karena aluminium foil bergantung pada sinar matahari langsung untuk kinerja optimal.
4. Potensi Penerangan yang Tidak Merata: Jika tidak disejajarkan dengan hati-hati, aluminium foil dapat menyebabkan distribusi cahaya yang tidak merata pada permukaan sel surya, sehingga menyebabkan titik panas dan efisiensi yang tidak seragam di seluruh sel.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk membuat konzentrador cahaya agar dapat meningkatkan intensitas cahaya pada panel surya diperlukan aluminium foil yang terletak di sekeliling panel.



Gambar 1. Desain Eksperimen

#### Desain Eksperimen

##### Variabel Penelitian

1. **Variabel Bebas (Independent Variable):**  
Penggunaan konzentrador cahaya aluminium foil.
2. **Variabel Tergantung (Dependent Variable):**  
Temperatur permukaan solar cell.  
Output daya listrik dari solar cell.
3. **Variabel Kontrol (Control Variable):**  
Intensitas cahaya matahari.  
Luas permukaan solar cell.  
Jenis dan spesifikasi solar cell.  
Kondisi lingkungan sekitar (suhu, kelembaban, angin).

##### Alat dan Bahan

- Solar cell dengan spesifikasi yang sama.
- Konzentrador cahaya aluminium foil.
- Termometer atau alat ukur suhu permukaan.
- Alat ukur intensitas cahaya matahari (lux meter atau pyranometer).
- Alat ukur daya listrik (multimeter atau data logger).
- Statif dan penjepit untuk penempatan alat ukur.
- Stopwatch.
- Laptop atau perangkat untuk pencatatan data.

##### Prosedur Eksperimen

###### 1. Persiapan:

- Pasang solar cell pada lokasi yang terkena sinar matahari langsung.
- Tempatkan termometer pada permukaan solar cell untuk mengukur suhu.

- Hubungkan solar cell dengan alat ukur daya listrik.
  - Pastikan kondisi lingkungan sekitar konstan selama eksperimen.
2. **Eksperimen Tanpa Konsentrator Cahaya:**
- Catat suhu awal permukaan solar cell.
  - Catat intensitas cahaya matahari menggunakan lux meter atau pyranometer.
  - Nyalakan stopwatch dan biarkan solar cell terkena sinar matahari selama 30 menit.
  - Catat suhu permukaan solar cell setiap 5 menit.
  - Catat output daya listrik setiap 5 menit.
3. **Eksperimen Dengan Konsentrator Cahaya:**
- Pasang konsentrator cahaya aluminium foil pada solar cell sesuai desain yang telah ditentukan.
  - Ulangi langkah-langkah pada eksperimen tanpa konsentrator cahaya.

**Pengolahan Data**

- **Analisis Data Suhu:**

Bandingkan kenaikan suhu permukaan solar cell dengan dan tanpa konsentrator cahaya. Gunakan analisis statistik (misalnya, uji t) untuk menentukan signifikan tidaknya perbedaan kenaikan suhu.

- **Analisis Data Daya Listrik:**

Bandingkan output daya listrik solar cell dengan dan tanpa konsentrator cahaya. Analisis statistik juga dapat digunakan untuk menentukan efektivitas konsentrator dalam meningkatkan efisiensi daya solar cell.

**Penyimpulan**

- Tarik kesimpulan berdasarkan hasil analisis data.
- Diskusikan implikasi hasil penelitian terhadap penggunaan konsentrator cahaya pada aplikasi solar cell di dunia nyata.
- Sarankan penelitian lanjutan untuk memperbaiki atau mengembangkan lebih lanjut konsentrator cahaya.

Dengan mengikuti metode desain eksperimen ini, penelitian diharapkan dapat memberikan bukti empiris yang kuat mengenai efektivitas konsentrator cahaya aluminium foil dalam menghambat kenaikan temperatur permukaan solar cell, serta dampaknya terhadap performa daya listrik yang dihasilkan.

**4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Penyajian data hasil eksperimen

**Tabel 1.** Pengujian rangkaian terbuka dengan aluminium foil

Pukul	Vout Panel Surya	Intensitas Cahaya	Suhu
8	17.45	17145	27°C
9	18.55	19246	27°C
10	19.35	20231	28°C
11	20.44	23281	28°C
12	20.58	26091	30°C
13	20.66	25911	29°C
14	20.69	24552	27°C
15	20.86	25242	28°C
16	20.93	27453	29°C
17	20.54	26347	27°C
18	17.88	22694	27°C
19	0	0	26°C

Berdasarkan data hasil pengujian Voc (Tegangan *Open Circuit*) pada panel surya melalui table, diperoleh grafik hubungan antara tegangan dengan intensitas cahaya pada Gambar. Tegangan *open circuit* maksimum diperoleh pada saat pengujian yaitu 20,93 V pada saat pukul 16.00 Wib dengan intensitas cahaya yang mengenai panel surya sebesar 27.453 lux dan kondisi cuaca berawan. Tegangan open circuit minimum diperoleh pada pukul 19.00

dengan intensitas cahaya yang mengenai panel surya sebesar 0 lux dengan kondisi gelap sehingga Voc panel surya juga 0.

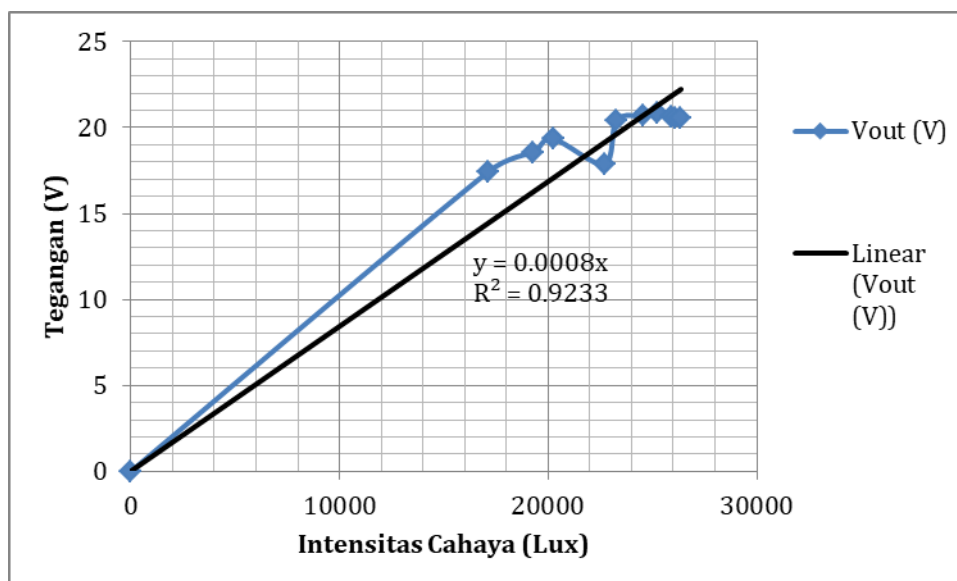
**Tabel 2.** Pengujian rangkaian terbuka dengan aluminium foil

Pukul	V Panel Surya	Intensitas Cahaya	Suhu
8.02	19,42	21,321	28°C
9.02	19,65	22.231	28°C
10.02	20,23	26.453	28C
11.02	20,53	26.661	29°C
12.02	20,90	28.345	29°C
13.02	21,22	30.556	30°C
14.02	21,47	31.345	27°C
15.02	21,88	30.567	28°C
16.02	21,90	30.778	30°C
17.02	20,86	29.214	28°C
18.02	19,62	22210	27°C
19.02	0	0	26°C

Berdasarkan data hasil pengujian Voc (Tegangan *Open Circuit*) pada panel surya melalui tabel, diperoleh grafik hubungan antara tegangan dengan intensitas cahaya pada Gambar. Tegangan *open circuit* maksimum diperoleh pada saat pengujian yaitu 21,90 V pada saat puku 16.00 Wib dengan intensitas cahaya yang mengenai panel surya sebesar 30.778 lux dan kondisi cuaca berawan. Tegangan open circuit minimum diperoleh pada pukul 19.00 dengan intensitas cahaya yang mengenai panel surya sebesar 0 lux dengan kondisi gelap sehingga Voc panel surya juga 0.

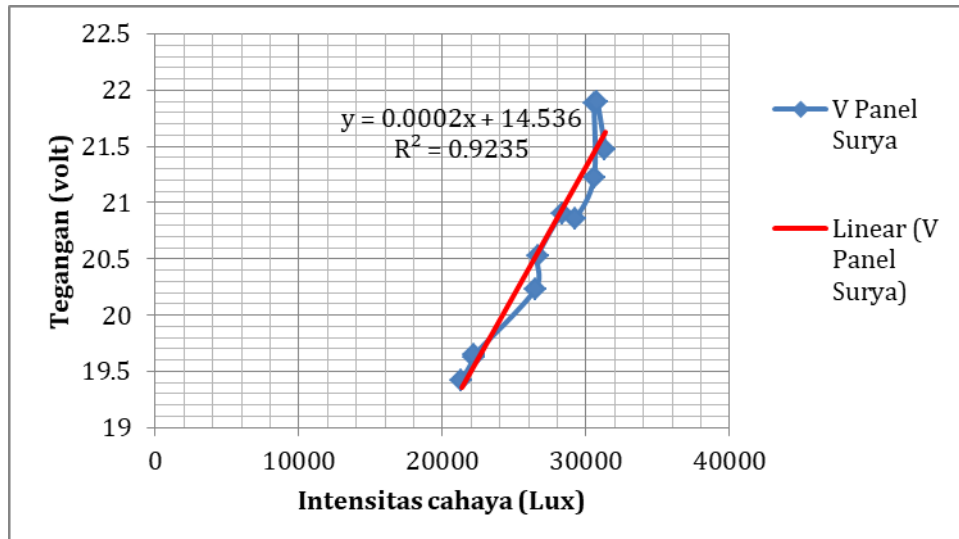
Dari data terlihat suhu panel tidak terlalu efektif yang diakibatkan intensitas yang besar dikarenakan konsentrator. Pada suhu 30°C intensitas 30566 lumen, dihasilkan tegangan terminal 21,90 V. jika dibandingkan dengan tanpa konsentrator suhu 30°C hanya menghasilkan 26091 dengan tegangan terminal 20,58 V. ini berarti konsentrator cukup efektif memperoleh intensitas tetapi dengan sugu permukaan yang jauh lebih rendah. Begitu juga dengan suhu 28oC nilai tegangan lebih tinggi saat menggunakan konsentrator dibandingkan dengan tanpa konsentrator.

Grafik perubahan temperatur permukaan solar cell dengan dan tanpa aluminium foil.



**Gambar 3.** Pengujian rangkaian terbuka dengan aluminium foil





**Gambar 4.** Grafik pengujian rangkaian terbuka (Voc)

### Analisis data statistik

Analisis data dilakukan menggunakan Microsoft Excel untuk mendapatkan nilai linearitas hubungan intensitas cahaya dengan tegangan output terminal panel surya.

## 5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengevaluasi efektivitas penggunaan konsentrator cahaya aluminium foil dalam menghambat kenaikan temperatur permukaan solar cell. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penggunaan aluminium foil sebagai konsentrator cahaya dapat meningkatkan intensitas cahaya yang mengenai solar cell tanpa menyebabkan kenaikan suhu yang signifikan. Secara khusus, tegangan open circuit (Voc) yang lebih tinggi dicapai pada suhu permukaan yang lebih rendah dengan penggunaan konsentrator aluminium foil dibandingkan dengan tanpa konsentrator. Ini mengindikasikan bahwa aluminium foil efektif dalam meningkatkan efisiensi energi solar cell sambil mengendalikan kenaikan suhu yang berlebihan.

### Saran riset lanjutan

Untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk mengeksplorasi berbagai konfigurasi dan sudut penempatan aluminium foil untuk mengoptimalkan performa solar cell. Selain itu, penambahan sistem pendingin pasif atau aktif dapat dipertimbangkan untuk lebih mengurangi suhu permukaan solar cell. Penelitian ini juga dapat diperluas dengan menggunakan material reflektif lainnya dan membandingkan efektivitasnya terhadap aluminium foil. Uji coba dalam berbagai kondisi cuaca dan lingkungan juga perlu dilakukan untuk memastikan keandalan dan konsistensi hasil dalam situasi nyata. Implementasi strategi manajemen termal yang lebih canggih dapat membantu dalam pemanfaatan teknologi ini pada skala yang lebih luas.

## REFERENCES

- [1] L. M. Shaker, A. A. Al-Amiery, M. M. Hanoon, W. K. Al-Azzawi, and A. A. H. Kadhum, "Examining the influence of thermal effects on solar cells: a comprehensive review," *Sustain. Energy Res.*, vol. 11, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s40807-024-00100-8.
- [2] B. K. Mahadevan, S. Naghibi, F. Kargar, and A. A. Balandin, "Non-Curing Thermal Interface Materials With Graphene Fillers for Thermal Management of Concentrated Photovoltaic Solar Cells," *C - J. Carbon Res.*, vol. 6, no. 1, p. 2, 2019, doi: 10.3390/c6010002.
- [3] Y. Du, N. C. H. Le, D. Chen, H. Chen, and Y. Zhu, "Thermal Management of Solar Cells Using a Nano-Coated Heat Pipe Plate: An Indoor Experimental Study," *Int. J. Energy Res.*, vol. 41, no. 6, pp. 867–876, 2016, doi: 10.1002/er.3678.
- [4] V. Kumar, H. Dhasmana, A. Verma, P. K. Bhatnagar, and V. K. Jain, "Efficiency Enhancement of Silicon Solar Cells Using Highly Porous Thermal Cooling Layer," *Energy Environ.*, vol. 29, no. 8, pp. 1495–1511, 2018, doi: 10.1177/0958305x18781897.
- [5] L. An *et al.*, "Transparent Thermal Insulation Ceramic Aerogel Materials for Solar Thermal Conversion,"

- Nanoscale Adv.*, vol. 4, no. 20, pp. 4291–4295, 2022, doi: 10.1039/d2na00412g.
- [6] B. Lee, J. Z. Liu, B. Sun, C. Shen, and G. Dai, “Thermally Conductive and Electrically Insulating EVA Composite Encapsulant for Solar Photovoltaic (PV) Cell,” *Express Polym. Lett.*, vol. 2, no. 5, pp. 357–363, 2008, doi: 10.3144/expresspolymlett.2008.42.
- [7] M. Cui, N. Chen, J. Deng, and L. Liu, “Thermal Modeling Optimization and Experimental Validation for a Single Concentrator Solar Cell System With a Heat Sink,” *Chinese Phys. B*, vol. 22, no. 8, p. 84208, 2013, doi: 10.1088/1674-1056/22/8/084208.
- [8] M. A. Saadah, E. Hernandez, and A. A. Balandin, “Thermal Management of Concentrated Multi-Junction Solar Cells With Graphene-Enhanced Thermal Interface Materials,” *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 6, p. 589, 2017, doi: 10.3390/app7060589.
- [9] S. Supiyandi, C. Rizal, M. Iqbal, M. N. H. Siregar, and M. Eka, “Smart Home Berbasis Internet of Things (IoT) Dalam Mengendalikan dan Monitoring Keamanan Rumah,” *J. Inf. Syst. Res.*, vol. 99, no. 99, pp. 1–7, 2023, doi: 10.30865/jurikom.v9i1.9999.
- [10] W. Huang, F. Shen, L. Sun, and C. Zong, “Performance Prediction and Optimization of Multi-Mirror Combined Solar Dish Collector,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 5, p. 2347, 2022, doi: 10.3390/app12052347.
- [11] T. E. Putri *et al.*, “Performance Characteristics of Bifacial Dye-Sensitized Solar Cells With a v-Shaped Low-Concentrating Light System,” *Acs Appl. Energy Mater.*, vol. 4, no. 12, pp. 13410–13414, 2021, doi: 10.1021/acsaem.1c02774.
- [12] F. Sutter, M. Montecchi, H. von Dahlen, A. Fernández-García, and M. Röger, “The Effect of Incidence Angle on the Reflectance of Solar Mirrors,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 176, pp. 119–133, 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2017.11.029.
- [13] Z. Kaczor, Z. Buliński, and S. Werle, “Numerical Studies on Capability to Focus Solar Radiation With Mirrors of Different Curvatures,” *Therm. Sci.*, vol. 23, no. Suppl. 4, pp. 1153–1162, 2019, doi: 10.2298/tsci19s4153k.
- [14] A. Ustaoglu, J. Okajima, X. R. Zhang, and S. Maruyama, “Performance Evaluation of a Nonimaging Solar Concentrator in Terms of Optical and Thermal Characteristics,” *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 553–564, 2015, doi: 10.1002/ep.12236.
- [15] M. A. Al Masud, M. Abedien, A. Araf, M. J. Abadin, M. R. Islam, and M. S. H. Choudhury, “Performance Optimization of Solar Photovoltaic System Using Parabolic Trough and Fresnel Mirror Solar Concentrator,” *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 14, no. 1, 2022, doi: 10.30880/ijie.2022.14.01.020.
- [16] M. A. Moghimi, K. J. Craig, and J. P. Meyer, “Simulation-Based Optimisation of a Linear Fresnel Collector Mirror Field and Receiver for Optical, Thermal and Economic Performance,” *Sol. Energy*, vol. 153, pp. 655–678, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.06.001.
- [17] M. Hangweirer, R. Höller, and H. Schneider, “Design and Analysis of a Novel Concentrated Photovoltaic-thermal Receiver Concept,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 8S1, p. 08KE01, 2015, doi: 10.7567/jjap.54.08ke01.
- [18] H. Grassmann and M. Citossi, “Development and Test of a New Solar-Air Heat Exchanger for the Linear Mirror II System,” *Smart Grid Renew. Energy*, vol. 10, no. 05, pp. 155–164, 2019, doi: 10.4236/sgre.2019.105010.
- [19] S. H. Zyoud and A. H. Zyoud, “Simulation and Numerical Investigation of the Effect of Temperature and Defect on ZnTe/ZnSe/ZnO Thin-Film Photovoltaic Solar Cell Performance Efficiency,” *Int. J. Eng. Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, 2023, doi: 10.15866/irea.v11i1.20839.
- [20] E. T. Hoke, D. J. Slotcavage, E. R. Dohner, A. R. Bowring, H. I. Karunadasa, and M. D. McGehee, “Reversible Photo-Induced Trap Formation in Mixed-Halide Hybrid Perovskites for Photovoltaics,” *Chem. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 613–617, 2015, doi: 10.1039/c4sc03141e.
- [21] L. C. Hirst and N. J. Ekins-Daukes, “Fundamental Losses in Solar Cells,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 19, no. 3, pp. 286–293, 2010, doi: 10.1002/pip.1024.
- [22] L. Zhu, A. Raman, and S. Fan, “Radiative Cooling of Solar Absorbers Using a Visibly Transparent Photonic Crystal Thermal Blackbody,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 112, no. 40, pp. 12282–12287, 2015, doi: 10.1073/pnas.1509453112.
- [23] H. Zhao *et al.*, “Gram-Scale Synthesis of Carbon Quantum Dots With a Large Stokes Shift for the Fabrication of Eco-Friendly and High-Efficiency Luminescent Solar Concentrators,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no. 1, pp. 396–406, 2021, doi: 10.1039/d0ee02235g.
- [24] S. Nakamura, K. Sakamoto, and K. Nishioka, “Reduction of Temperature in Concentrator Photovoltaic Module Using Coating With High Thermal Emissivity and Conductivity,” *Matec Web Conf.*, vol. 65, p. 4004, 2016, doi: 10.1051/mateconf/20166504004.
- [25] J. Lei, H. Liu, Y. Wang, W. Xu, H. Zhang, and Z. Lu, “Design and Optimization of Fresnel Lens for High Concentration Photovoltaic System,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2014, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1155/2014/539891.
- [26] H. Zhao *et al.*, “Gram-scale synthesis of carbon quantum dots with a large Stokes shift for the fabrication



of eco-friendly and high-efficiency luminescent solar concentrators," *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no. 1, pp. 396–406, 2021, doi: 10.1039/d0ee02235g.