

Pengaruh penambahan *solar tracking system single axis* dengan kombinasi reflektor dan *fresnel lens concentrator* terhadap daya keluaran yang dihasilkan *solar cell*

Shandy Kurniadi, Sehat Abdi Saragih

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau

Jl. Kaharuddin Nasution No.113, Pekanbaru, Riau

Email: shandy@eng.uir.ac.id

ABSTRAK

Energi surya di Indonesia memiliki potensi besar, tetapi sel surya konvensional memiliki daya keluaran dan kinerja yang rendah karena posisi pemasangan yang tetap, yang mengurangi cahaya insiden (kerugian kosinus). Penggunaan reflektor masih rentan terhadap bayangan parsial. Studi ini bertujuan untuk menguji pengaruh penambahan sistem pelacak surya sumbu tunggal dengan reflektor dan konsentrator lensa Fresnel pada daya keluaran sel surya. Metode yang digunakan adalah pendekatan eksperimental yang membandingkan sel surya statis (90°) dengan sistem yang dimodifikasi menggunakan sel surya polikristalin 10 WP, reflektor cermin, dan mikrokontroler Arduino Nano dengan LDR (*Solar Tracker Single Axis*). Hasil menunjukkan bahwa sistem yang dimodifikasi secara konsisten menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi. *Solar Tracker Single Axis* dengan reflektor dan konsentrator lensa Fresnel terbukti efektif dalam meminimalkan kerugian kosinus di pagi hari, menghasilkan daya hingga 5 kali lebih besar daripada sistem statis pada tanggal 22 Mei 2025 (7,83 Watt dibandingkan dengan 1,56 Watt). Sistem yang dimodifikasi ini juga menunjukkan ketahanan yang lebih unggul terhadap anomali termal di bawah radiasi ekstrem ($>1000 \text{ W/m}^2$), menghasilkan daya 8,8 kali lebih besar (4,51 W) daripada sistem statis (0,51 W), dan memperpanjang durasi produksi energi efektif hingga pukul 09.00–15.00 WIB.

Kata kunci: Daya Keluaran, *Fresnel Lens Concentrator*, Reflektor, *Single Axis Solar Tracking*.

ABSTRACT

Solar energy in Indonesia has great potential, but conventional solar cells have low output power and performance due to fixed installation positions, which reduce incident light (cosine losses). The use of reflectors remains susceptible to partial shading. This study aims to test the effect of adding a single-axis solar tracking system with a reflector and a Fresnel lens concentrator on the output power of the solar cell. The method is an experimental approach that compares static solar cells (90°) with a modified system using 10 WP polycrystalline solar cells, mirror reflectors, and Arduino Nano/LDR (*Solar Tracker Single Axis*) microcontrollers. The results show that the modified system consistently produces higher power output. The Single-Axis Solar Tracker with reflector and Fresnel lens concentrator has proven effective in minimizing cosine losses in the morning, producing up to 5 times more power than the static system on May 22, 2025 (7.83 Watts compared to 1.56 Watts). The modified system also exhibits superior resistance to thermal anomalies under extreme irradiation ($>1000 \text{ W/m}^2$), produces 8.8 times more power (4.51 W) than the static system (0.51 W), and extends the duration of effective energy production to 09.00–15.00 WIB.

Keyword: Ouput Power, Fresnel Lens Concentrator, Reflector, Single Axis Solar Tracking.

1. PENDAHULUAN

Di dalam kehidupan ini energi menjadi penggerak utama bagi kelangsungan makhluk hidup untuk bisa terus bertahan hidup dan keterlibatan energi melingkupi semua aspek kehidupan di dunia ini, sumber energi bisa berupa energi terbarukan dan tidak terbarukan [1], [2], [3]. Sumber energi terbarukan dapat berupa energi angin, energi air, energi matahari, energi biogas yaitu energi yang berasal dari kotoran makhluk hidup dan energi yang berasal dari tumbuh-tumbuhan seperti biomassa, adapun energi tidak terbarukan dapat berupa energi fosil contohnya yaitu BBM, batu bara [1], [2]. Energi terbarukan memiliki banyak sekali keuntungan yaitu ramah lingkungan, bersih, tidak menimbulkan polusi, berlimpah, serta yang paling menguntungkan ialah energi ini bisa didapatkan dengan gratis. Sedangkan energi fosil cenderung memiliki banyak sekali kekurangan yang berupa dampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Kemudian jika dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya energi surya lebih memiliki banyak keunggulan seperti bersih, tidak berisik, sangat ramah lingkungan dan aman [3].

Matahari merupakan salah satu sumber energi paling bersih dan paling ramah lingkungan, karena letak Indonesia yang melewati garis khatulistiwa maka Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar dan energi ini sangat cocok untuk negara tropis seperti Indonesia [4]. Di Indonesia energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang perkembangannya cukup pesat di dunia. Indonesia berada tepat pada garis khatulistiwa sehingga dengan ini menjadikan Indonesia sebagai negara beriklim tropis yang mendapatkan sinar matahari sepanjang tahun dengan sumber daya alam berupa pasir silika yang berlimpah merupakan kekayaan alam yang harus dimanfaatkan sebaik-baiknya [4], [5], [6], [7]. Potensi pengembangan energi surya di Indonesia sangat besar, bahwa Indonesia memiliki potensi energi surya sebesar 207.898 MW (4,80 kWh/m²/hari) [4]. Potensi ini jauh melampaui kebutuhan energi nasional saat ini dan masa depan, dengan ruang yang cukup untuk pemasangan panel surya di atap bangunan, lahan terbuka, dan area laut untuk sistem fotovoltaik terapung. Meskipun potensi besar ini, pemanfaatan energi surya di Indonesia masih sangat terbatas, dengan kapasitas terpasang yang baru mencapai sebagian kecil dari potensi tersebut. Pemanfaatan energi surya sangat cocok untuk Indonesia yang beriklim tropis dan terletak di garis khatulistiwa, sehingga mendapatkan radiasi matahari yang stabil sepanjang tahun. Pengembangan energi surya diharapkan dapat mendukung transisi energi nasional menuju sumber energi terbarukan yang lebih bersih dan berkelanjutan. Namun, tantangan seperti biaya investasi yang tinggi dan kebutuhan kebijakan yang mendukung masih perlu diatasi untuk memaksimalkan pemanfaatan potensi ini.

Target kapasitas pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia adalah mencapai 6,5 GW pada tahun 2025 dan meningkat signifikan menjadi 45 GW pada tahun 2050 sesuai dengan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) [8]. Untuk periode 2025-2030, kapasitas PLTS diharapkan terus bertumbuh secara substansial sebagai bagian dari upaya meningkatkan porsi energi terbarukan dalam bauran energi nasional yang ditargetkan mencapai 23% pada 2025 dan 31% pada 2050. Pemerintah dan PLN juga mengembangkan berbagai sistem PLTS, termasuk on-grid, off-grid, dan hybrid, yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia, terutama di daerah terpencil. Selain itu, pengembangan PLTS didukung oleh integrasi dengan teknologi lain seperti pengisian kendaraan listrik dan penyimpanan energi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Meskipun potensi energi surya Indonesia sangat besar, realisasi kapasitas saat ini masih jauh di bawah target, sehingga diperlukan kebijakan dan investasi yang lebih agresif untuk mencapai target tersebut. Upaya ini penting untuk mendukung transisi energi bersih dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil di Indonesia [9], [10], [11], [12]. PLTS merupakan solusi terbaik agar ke depan pemanfaatan energi bersih semakin masif dan cita-cita Indonesia bebas energi fosil dapat terwujud. Oleh karena itu, pemerintah berupaya untuk melibatkan pihak-pihak terkait dengan pengembangan energi terbarukan khususnya para *stakeholder*, sehingga dengan itu penggunaan

green energy berbasis *clean technology* menjadi pilihan utama bagi para pemangku kepentingan dan masyarakat dalam mendukung keberlanjutan energi terbarukan di Indonesia.

Energi listrik yang bersumber dari cahaya matahari dapat dimanfaatkan dengan menggunakan efek photovoltaic, efek ini bekerja di dalam *solar cell* yang terdiri dari susunan *semiconductor* agar dapat menghasilkan energi listrik [4]. Berdasarkan pengamatan penulis, diketahui *solar cell* yang dominan digunakan saat ini memiliki kelemahan yaitu daya yang kecil, harga yang *relative* mahal ditambah posisi (sudut) pemasangan yang konstan, ini dikarenakan iradiasi *solar* bergantung pada sudut azimuth surya yang mendefinisikan tinggi matahari. Dengan sudut pemasangan yang konstan dapat mengakibatkan rendahnya iradiasi cahaya yang diterima oleh *solar cell* yang akan menurunkan kinerja *solar cell*. Penelitian menunjukkan bahwa sudut pemasangan yang optimal bervariasi tergantung lokasi geografis, musim, dan kondisi lingkungan seperti debu dan cuaca, yang semuanya memengaruhi jumlah radiasi matahari yang diterima. Misalnya, sudut pemasangan yang lebih kecil cenderung meningkatkan durasi *output* daya harian dan total energi yang dihasilkan, seperti pada studi pemasangan PV di pesawat udara yang menunjukkan sudut ideal sekitar $\pm 10^\circ$ saat penerbangan jelajah [13]. Di lingkungan gurun, sudut kemiringan sekitar 25° memberikan hasil terbaik dalam mengurangi akumulasi debu dan memaksimalkan output daya, terutama setelah hujan membersihkan debu [14], [15]. Selain itu, sudut kemiringan optimal juga dipengaruhi oleh faktor seperti tinggi pemasangan, reflektansi permukaan sekitar, dan ukuran sistem, dengan sudut optimal musiman yang dapat bervariasi dari sekitar 5° di musim panas hingga 65° di musim dingin untuk lokasi tertentu [13], [16]. Ketidaksiharian antara sudut pemasangan dan sudut datangnya sinar matahari menyebabkan penurunan efisiensi karena berkurangnya radiasi yang diserap dan peningkatan penumpukan debu, sehingga penting untuk menyesuaikan sudut pemasangan agar sesuai dengan kondisi lokal dan musiman guna memaksimalkan kinerja *solar cell* [17], [18].

Untuk itu perlu dilakukan suatu upaya agar kinerja *solar cell* dapat meningkat, Upaya yang telah dilakukan salah satunya adalah menggunakan reflektor surya [19], [20], [21], namun cara ini masih terdapat kekurangan yaitu apabila reflektor surya tidak terpasang secara optimal dan *photovoltaic* tidak tegak lurus terhadap sang surya maka akan mengakibatkan munculnya *partial shading* yang dapat menutup permukaan *PV module* secara horizontal, sehingga pada bagian *PV module* yang terbayangi arus keluaran akan terpotong dan kinerja *solar cell* akan menjadi *drop*. Untuk mengatasi hal tersebut solusi yang paling memungkinkan adalah dengan memaksimalkan intensitas cahaya matahari yang akan diserap *PV module* dengan menggunakan kombinasi peralatan pendukung seperti *solar tracking system single axis*, reflektor dan *fresnel lens concentrator*. Dengan menggunakan peralatan pendukung tersebut maka jumlah cahaya matahari yang jatuh ke *PV module* akan terkonsentrasi dan *PV module* secara otomatis dapat mengikuti sudut *azimuth* matahari dengan tepat sehingga penyerapan sinar matahari akan menjadi optimal dan cara ini akan membuat daya *output solar cell* meningkat. Oleh sebab itu perlunya di lakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh penambahan *solar tracking system single axis* dengan kombinasi reflektor dan *fresnel lens concentrator* terhadap daya *output* yang dihasilkan *solar cell*.

2. METODE PENELITIAN

Untuk mendapatkan hasil daya *output* pada *solar cell*, penelitian ini menggunakan metode eksperimental terapan dengan pendekatan rekayasa guna untuk merancang, merealisasikan, dan menguji daya keluaran sistem *solar cell* sebagai upaya meningkatkan penyerapan energi surya dibandingkan dengan panel surya statis. Untuk perancangan dan realisasi, dibutuhkan bahan serta alat.

2.1 Bahan dan Peralatan Utama

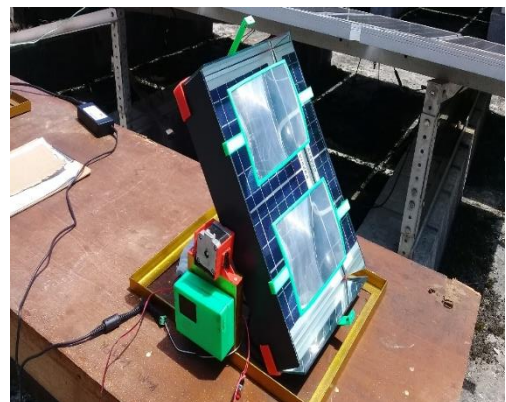
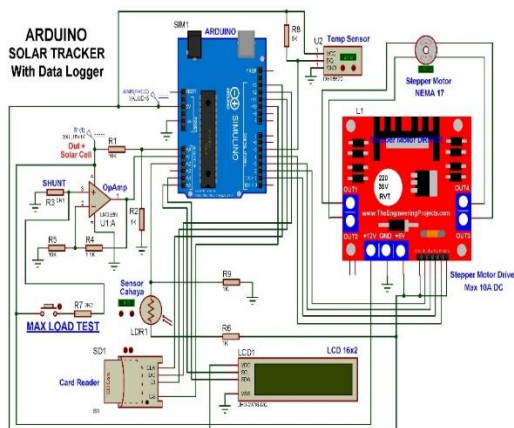
Bahan-bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. **Modul Solar Cell:** Dua buah *solar cell polycrystallin* 10 WP (Visero) berbentuk persegi panjang, dengan dimensi panjang 36 cm, lebar 26 cm, dan ketebalan 5 cm, serta spesifikasi tegangan kerja 19 Volt.
2. **Reflektor:** Empat buah reflektor berupa cermin datar dengan ukuran panjang 36 cm, lebar 26 cm, dan tebal 2 mm.
3. **Fresnel Lens Concentrator:** Dua buah lensa *fresnel* dengan panjang 18 cm, lebar 14 cm, dan ketebalan 1 mm.
4. **Aktuator:** Satu buah motor *stepper* DC (Nema).

Peralatan utama lainnya adalah rangkaian listrik pengendali (*Controller*) untuk *solar tracking system single axis* yang dilengkapi dengan sistem *data logger*. Komponen penting yang menyusun rangkaian ini meliputi:

1. **Mikrokontroler Utama:** Arduino Nano (berfungsi mengendalikan keseluruhan sistem).
2. **Driver:** *Stepper motor driver* (berfungsi sebagai penggerak motor *stepper*).
3. **Sensor:** *Light Dependent Resistor* (LDR) (berfungsi sebagai sensor cahaya berdasarkan perbedaan hambatan). Resistor digunakan untuk mengurangi tegangan listrik yang masuk ke LDR agar kerjanya optimal,.
4. **Antarmuka:** LCD (berfungsi menampilkan nilai *output* solar cell secara *realtime*).
5. **Penyimpanan Data:** *Card Reader* dan *SD Card* (berfungsi sebagai media penyimpanan data *output* secara *realtime* untuk mempermudah proses pengambilan dan pengolahan data).

Adapun untuk rancangan kelistrikan hingga tampak keseluruhan *solar tracking system single axis* dengan kombinasi reflektor dan *fresnel lens concentrator* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Solar Tracking System Single Axis* dengan Kombinasi Reflektor dan *Fresnel Lens Concentrator*.

2.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dibagi menjadi dua tahapan utama:

1. **Tahapan Persiapan dan Perakitan**

Tahapan ini mencakup pembuatan rancangan rangkaian listrik (*electrical*) menggunakan *software eagle* dan dilanjutkan dengan perakitan serta pemasangan seluruh komponen yang telah disiapkan sesuai dengan rancangan tersebut.

2. Tahapan Pengujian dan Pengambilan Data

Tahapan pengujian dilakukan dengan membandingkan dua kondisi *solar cell*:

- a) *Solar cell* diletakkan pada sudut 90° terhadap permukaan tanah (kondisi statis tanpa peralatan pendukung).
- b) *Solar cell* dipasang lengkap dengan *solar tracking system single axis* yang dikombinasikan dengan reflektor dan *fresnel lens concentrator*.

Pengukuran arus dan tegangan *output* pada *solar cell* dilakukan secara otomatis. Hasil pengukuran tegangan dan arus dapat dilihat pada layar LCD secara *realtime* dan tersimpan otomatis ke dalam SD *card*. Pengukuran ini dilaksanakan di gedung C Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, selama 3 hari dengan pengambilan data setiap jam dari pukul 09.00 hingga 16.00 WIB.

2.3 Metode Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan adalah analisa deskriptif, yang memanfaatkan hasil penelitian sebagai landasan untuk menarik kesimpulan. Setelah nilai tegangan (*V*) dan arus (*I*) didapatkan, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai daya *output* (*P*) yang dihasilkan oleh *solar cell* menggunakan persamaan 1.

$$P = V \times I \tag{1}$$

Diketahui:

- P* = Daya Keluaran (Watt)
- V* = Tegangan (Volts)
- I* = Arus Listrik (Ampere)

Data yang didapatkan dari hasil percobaan kemudian diolah serta dianalisis menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel* dan disajikan dalam bentuk grafik daya keluaran terhadap waktu untuk memfasilitasi analisis.

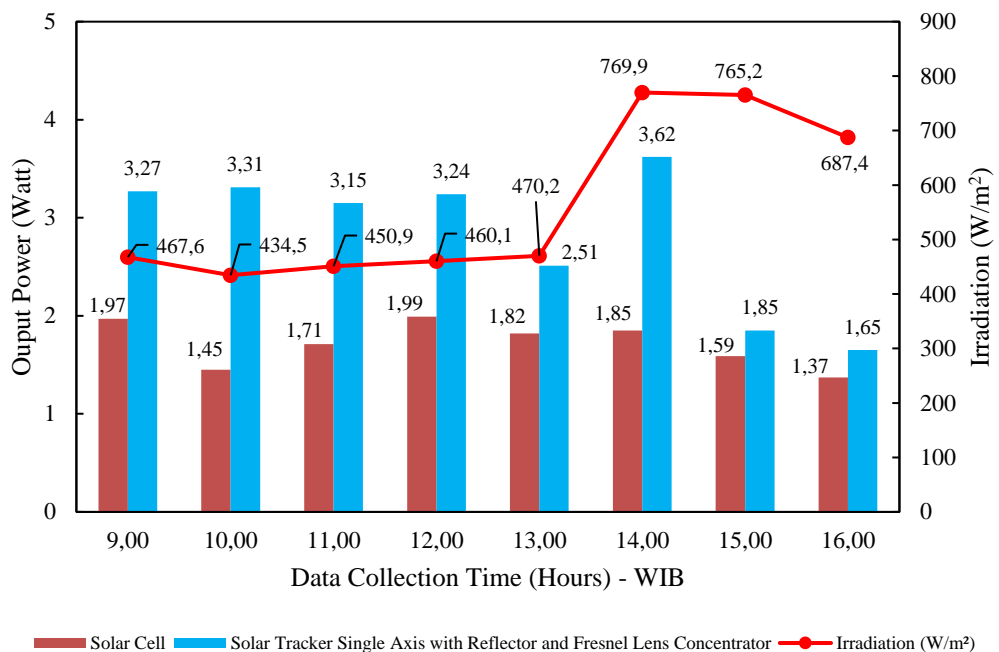
3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian kinerja *solar cell* dilakukan selama tiga hari berturut-turut (20–23 Mei 2025) dengan membandingkan dua konfigurasi: (1) Sistem statis tanpa peralatan pendukung, dan (2) Sistem dinamis yang dilengkapi *single axis solar tracker*, reflektor, dan *Fresnel lens concentrator*. Pengukuran arus dan tegangan dilakukan setiap satu jam mulai pukul 09.00 hingga 16.00 WIB untuk mendapatkan nilai *daya output*. Data hasil pengujian selama tiga hari menunjukkan tren yang menarik pada kedua sistem, sebagaimana dirangkum dalam grafik profil *daya output* harian (Gambar 2, 3, dan 4). Berdasarkan pengujian yang telah dilaksanakan pada tanggal 21 Mei – 23 Mei 2025, diperoleh data perbandingan *daya output* yang dihasilkan *solar cell*. Tabel 1 menyajikan rangkuman hasil pengolahan data *daya output* yang dihasilkan *solar cell* tanpa peralatan tambahan dibandingkan dengan sistem yang dilengkapi dengan *single axis solar tracker*, reflektor, dan *Fresnel Lens Concentrator*.

Tabel 1. Data hasil pengolahan pengujian daya *output* yang dihasilkan oleh *solar cell* pada tanggal 21 Mei 2025.

Waktu (WIB)	Daya Output Solar Cell Tanpa Peralatan Tambahan (Watt)	Daya Output Solar Cell dengan Tambahan <i>Single Axis Solar Tracker</i> , Reflektor, dan <i>Fresnel Lens Concentrator</i> (Watt)	Iradiasi Cahaya Matahari (W/m ²)
09.00	1,97	3,27	467,6
10.00	1,45	3,31	434,5
11.00	1,71	3,15	450,9
12.00	1,99	3,24	460,1
13.00	1,82	2,51	470,2
14.00	1,85	3,62	769,9
15.00	1,59	1,85	765,2
16.00	1,37	1,65	687,4

Berdasarkan Tabel 1, terlihat adanya perbedaan performa yang nyata antara panel surya konvensional dengan panel yang telah dimodifikasi. Untuk memvisualisasikan tren kenaikan daya dan pengaruh fluktuasi iradiasi matahari sepanjang waktu pengujian, data tersebut direpresentasikan ke dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Pengaruh Daya *Output* Terhadap Waktu (21 Mei 2025).

Gambar 2 menyajikan visualisasi komparatif kinerja antara panel surya konvensional (*fixed tilt*) dan panel surya yang telah dimodifikasi dengan integrasi *single axis solar tracker*, reflektor, dan *Fresnel Lens Concentrator*. Grafik batang oranye merepresentasikan daya keluaran panel surya

standar, batang biru merepresentasikan sistem modifikasi, sedangkan garis merah menunjukkan fluktuasi iradiasi matahari selama pengujian. Secara keseluruhan, sistem modifikasi secara konsisten menghasilkan daya listrik yang lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional di setiap interval waktu pengujian. Peningkatan signifikan ini menegaskan efektivitas penggunaan *Fresnel lens* dan reflektor dalam memusatkan intensitas cahaya ke permukaan sel surya. Hal ini sejalan dengan studi literatur oleh [22], yang menyatakan bahwa teknologi *Concentrated Photovoltaic* (CPV) berbasis lensa Fresnel mampu meningkatkan rapat fluks energi matahari secara drastis, sehingga memaksimalkan konversi foton menjadi elektron. Namun, analisis lebih mendalam pada grafik menunjukkan fenomena non-linear antara intensitas iradiasi dan daya keluaran. Berdasarkan data, daya maksimum pada sistem modifikasi tercatat sebesar 4,15 Watt pada pukul 11.00 WIB, padahal intensitas iradiasi saat itu baru mencapai 450,9 W/m². Sebaliknya, pada pukul 14.00 WIB, ketika iradiasi matahari mencapai puncaknya di angka 769,9 W/m², daya keluaran justru mengalami penurunan menjadi 3,62 Watt.

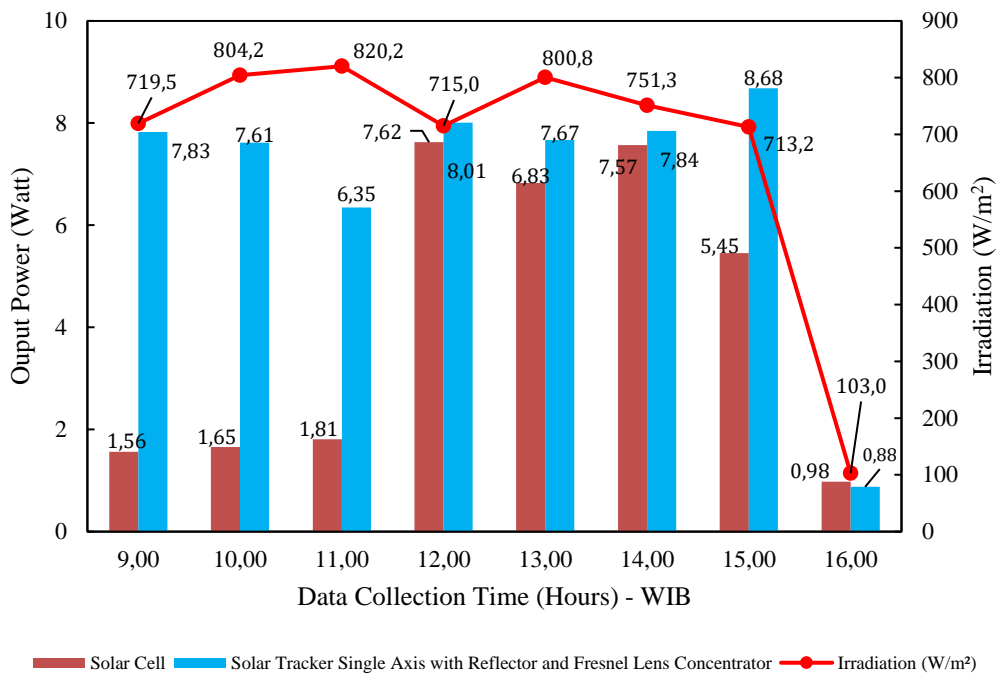
Penurunan performa saat iradiasi tertinggi ini mengindikasikan adanya pengaruh termal yang dominan (*thermal losses*). Peningkatan konsentrasi cahaya oleh lensa Fresnel dan reflektor tidak hanya meningkatkan arus listrik, tetapi juga menaikkan temperatur operasional sel surya secara signifikan [23]. Fenomena ini konsisten dengan hukum termodinamika semikonduktor yang dijelaskan oleh [24]. Penelitian mereka menyimpulkan bahwa efisiensi sel surya silikon memiliki korelasi negatif terhadap suhu; kenaikan temperatur sel akan menurunkan tegangan sirkuit terbuka (*Open Circuit Voltage/Voc*) dan *Fill Factor*, yang pada akhirnya mereduksi daya total keluaran meskipun iradiasi sedang tinggi. Selain itu, stabilitas *output* yang lebih baik pada pagi hari (pukul 09.00 - 10.00 WIB) pada sistem modifikasi membuktikan peran krusial dari *single axis tracker*. Sistem ini menjaga sudut datang sinar matahari tetap tegak lurus, meminimalisir *cosine losses* yang biasanya terjadi pada panel diam (*fixed*) saat sudut elevasi matahari masih rendah. Tabel 2 menyajikan rangkuman hasil pengolahan data daya *output* yang dihasilkan *solar cell* tanpa peralatan tambahan dibandingkan dengan sistem yang dilengkapi dengan *single axis solar tracker*, reflektor, dan *Fresnel Lens Concentrator* pada hari berikutnya.

Tabel 2. Data hasil pengolahan pengujian daya *output* yang dihasilkan oleh *solar cell* pada tanggal 22 Mei 2025.

Waktu (WIB)	Daya Output Solar Cell Tanpa Peralatan Tambahan (Watt)	Daya Output Solar Cell dengan Tambahan Single Axis Solar Tracker, reflektor, dan Fresnel Lens Concentrator (Watt)	Iradiasi Cahaya Matahari (W/m ²)
09.00	1,56	7,83	719,5
10.00	1,65	7,61	804,2
11.00	1,81	6,35	820,2
12.00	7,62	8,01	715,0
13.00	6,83	7,67	800,8
14.00	7,57	7,84	751,3
15.00	5,45	8,68	713,2
16.00	0,98	0,88	103,0

Hasil pengukuran hari kedua yang disajikan pada Tabel 2 menunjukkan adanya perbedaan karakteristik daya yang signifikan dibandingkan hari sebelumnya, terutama dipengaruhi oleh intensitas iradiasi matahari yang lebih tinggi. Untuk mempermudah interpretasi pola hubungan

antara fluktuasi iradiasi matahari terhadap daya keluaran pada kedua sistem, data tersebut divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Daya Output Terhadap Waktu (22 Mei 2025).

Gambar 3 memvisualisasikan dinamika daya keluaran (*output power*) terhadap waktu pada pengujian hari kedua (22 Mei 2025). Grafik ini membandingkan kinerja panel surya konvensional (batang oranye) dengan sistem terintegrasi yang dilengkapi *single axis tracker*, reflektor, dan *Fresnel Lens* (batang biru), serta hubungannya dengan iradiasi matahari (garis merah). Temuan paling signifikan dari data ini adalah disparitas kinerja yang ekstrim pada sesi pagi hari (pukul 09.00 – 11.00 WIB). Pada rentang waktu tersebut, panel surya konvensional hanya mampu menghasilkan daya rata-rata di bawah 2 Watt (misalnya, 1,56 Watt pada pukul 09.00), meskipun intensitas iradiasi matahari sudah cukup tinggi mencapai 719,5 W/m². Sebaliknya, sistem modifikasi mampu menghasilkan daya sebesar 7,83 Watt pada saat yang sama.

Kesenjangan kinerja hampir 500% ini membuktikan peran vital dari *single axis solar tracker*. Pada pagi hari, sudut datang sinar matahari (*angle of incidence*) terhadap panel diam (*fixed tilt*) sangat besar, sehingga sebagian besar energi foton terpantul kembali dan tidak terserap (Hukum Cosinus Lambert). Dengan adanya *tracker*, posisi panel modifikasi selalu tegak lurus terhadap matahari, meminimalisir *cosine losses*. Hal ini dikuatkan oleh studi Sadeghi et al. [25], yang menyatakan bahwa penggunaan sistem pelacak matahari dapat meningkatkan efisiensi pengumpulan energi sebesar 30-40% dibandingkan sistem tetap, terutama pada waktu-waktu di mana sudut elevasi matahari rendah (pagi dan sore).

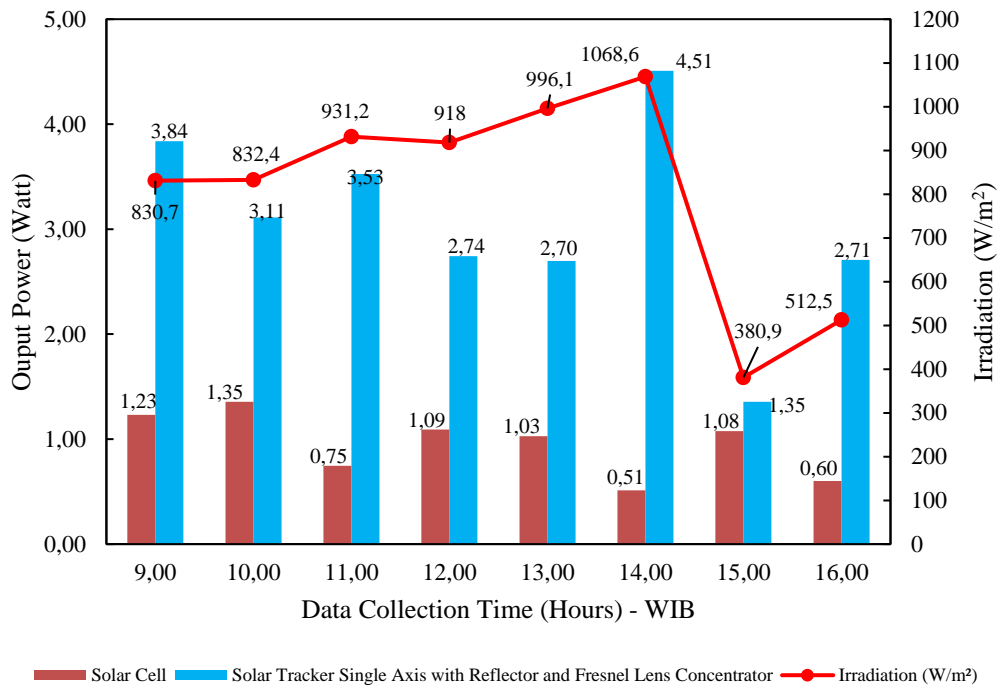
Fenomena menarik lainnya terjadi pada pukul 15.00 WIB. Pada titik ini, sistem modifikasi mencapai daya puncak harian sebesar 8,68 Watt, meskipun iradiasi matahari (713,2 W/m²) justru lebih rendah dibandingkan saat tengah hari (800,8 W/m²). Peningkatan efisiensi di sore hari ini mengindikasikan bahwa sistem *Concentrated Photovoltaic* (CPV) bekerja lebih optimal saat suhu lingkungan mulai menurun dibandingkan saat terik siang hari. Pendinginan alami di sore hari

membantu menjaga tegangan sel (*voltage*) tetap tinggi [26]. Temuan ini sejalan dengan penelitian Obaid et al [27], yang menjelaskan bahwa meskipun *concentrator* (seperti lensa Fresnel) meningkatkan arus, manajemen temperatur sangat krusial karena efisiensi sel surya akan menurun drastis jika suhu operasional terlalu tinggi saat puncak iradiasi siang hari. Sebaliknya, panel konvensional baru menunjukkan lonjakan kinerja yang signifikan pada pukul 12.00 WIB (7,62 Watt) hingga 14.00 WIB, ketika posisi matahari berada tepat di atas kepala (*zenith*). Hal ini mengonfirmasi bahwa panel surya statis memiliki *window of operation* yang sangat sempit, hanya efektif selama beberapa jam di tengah hari, sementara sistem modifikasi mampu memperluas durasi produksi daya efektif (*effective generation hours*) dari pagi hingga sore hari.

Tabel 3. Data hasil pengolahan pengujian daya *output* yang dihasilkan oleh *solar cell* pada tanggal 23 Mei 2025.

Waktu (WIB)	Daya Output Solar Cell Tanpa Peralatan Tambahan (Watt)	Daya Output Solar Cell dengan Tambahan <i>single axis solar tracker</i> , reflektor, dan <i>Fresnel Lens Concentrator</i> (Watt)	Iradiasi Cahaya Matahari (W/m ²)
09.00	1,23	3,84	830,7
10.00	1,35	3,11	832,4
11.00	0,75	3,53	931,2
12.00	1,09	2,74	918
13.00	1,03	2,70	996,1
14.00	0,51	4,51	1068,6
15.00	1,08	1,35	380,9
16.00	0,60	2,71	512,5

Data hasil pengukuran hari ketiga yang tersaji pada Tabel 3 memperlihatkan fenomena menarik, di mana iradiasi matahari mencapai intensitas tertinggi sebesar 1068,6 W/m² pada pukul 14.00 WIB. Namun, tingginya iradiasi tersebut justru direspons dengan penurunan daya yang drastis pada panel surya konvensional (0,51 Watt), berbanding terbalik dengan sistem modifikasi yang mampu mempertahankan daya di angka 4,51 Watt. Untuk menganalisis disparitas kinerja ekstrem tersebut secara lebih mendalam, data ini divisualisasikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Daya *Output* Terhadap Waktu (23 Mei 2025).

Gambar 4 merepresentasikan kinerja dinamis panel surya pada kondisi cuaca dengan intensitas radiasi matahari yang sangat fluktuatif dan mencapai titik ekstrim. Grafik ini memetakan hubungan antara waktu pengujian, iradiasi matahari (garis merah), dan daya keluaran dari sistem konvensional (batang oranye) serta sistem modifikasi (batang biru). Temuan paling menonjol pada pengujian hari ketiga ini adalah terjadinya anomali kinerja pada saat iradiasi matahari mencapai puncaknya. Pada pukul 14.00 WIB, sensor mencatat intensitas iradiasi sebesar 1068,6 W/m², angka tertinggi selama seluruh periode pengujian. Secara teoritis, peningkatan iradiasi harusnya berbanding lurus dengan peningkatan daya. Namun, data menunjukkan bahwa panel surya konvensional justru mengalami penurunan performa drastis hingga titik terendah 0,51 Watt. Fenomena penurunan daya saat iradiasi puncak ini mengindikasikan terjadinya saturasi panas (*thermal saturation*). Intensitas cahaya yang sangat tinggi (di atas 1000 W/m²) menyebabkan temperatur modul meningkat tajam melampaui batas suhu kerja optimal (NOCT). Merujuk pada hukum fisika semikonduktor yang dijelaskan oleh Skoplaki & Palyvos, [28], efisiensi sel surya silikon kristalin akan menurun seiring kenaikan suhu karena terjadinya penyusutan celah pita energi (*band gap shrinkage*), yang berdampak langsung pada penurunan tegangan sirkuit terbuka (Voc). Dalam kondisi tanpa sistem pendingin atau mekanisme pelacak yang optimal, panas berlebih ini menjadi faktor parasit yang mereduksi daya keluaran secara signifikan. Sebaliknya, sistem modifikasi yang dilengkapi *single axis tracker*, reflektor, dan *Fresnel Lens* menunjukkan respons yang jauh lebih superior. Pada kondisi ekstrim pukul 14.00 WIB tersebut, sistem modifikasi mampu menghasilkan daya sebesar 4,51 Watt, atau sekitar 8,8 kali lipat lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional. Hal ini membuktikan bahwa meskipun terdapat pengaruh panas, mekanisme *tracking* memastikan posisi panel tetap tegak lurus terhadap matahari, memaksimalkan penyerapan foton. Selain itu,

penggunaan *concentrator* (Lensa Fresnel) terbukti efektif meningkatkan rapat arus (I_{sc}) yang cukup besar untuk mengkompensasi penurunan tegangan akibat panas, sebagaimana dinyatakan dalam studi Xie et al. [29] mengenai karakteristik sistem *Concentrated Photovoltaic* (CPV).

Gambar 4 juga merekam fluktuasi cuaca yang drastis pada pukul 15.00 WIB, di mana iradiasi anjlok menjadi $380,9 \text{ W/m}^2$ (kemungkinan akibat awan tebal mendadak). Meskipun demikian, sistem modifikasi tetap mampu mempertahankan daya di atas 1 Watt, sedangkan panel konvensional kembali pulih sedikit namun tetap tidak signifikan. Pola ini menegaskan bahwa sistem terintegrasi memiliki ketahanan (*robustness*) yang lebih baik terhadap variabilitas kondisi lingkungan ekstrem dibandingkan sistem statis.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data kinerja panel surya konvensional dibandingkan dengan panel surya termodifikasi (integrasi *single axis solar tracker*, reflektor, dan *Fresnel Lens Concentrator*) selama tiga hari pengamatan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. **Peningkatan Daya Signifikan:** Sistem termodifikasi secara konsisten menghasilkan daya keluaran (*output power*) yang lebih tinggi dibandingkan panel surya konvensional pada seluruh variasi waktu dan kondisi cuaca. Integrasi reflektor dan lensa Fresnel terbukti efektif dalam memusatkan intensitas cahaya matahari ke permukaan sel, meningkatkan densitas energi yang dikonversi.
2. **Efektivitas Tracking System pada Sudut Rendah:** Penggunaan *single axis solar tracker* memberikan dampak paling signifikan pada pagi hari (pukul 09.00 – 11.00 WIB) dan sore hari. Pada pengujian tanggal 22 Mei 2025, sistem modifikasi mampu menghasilkan daya hingga 5 kali lipat lebih besar dibandingkan sistem statis pada pagi hari (7,83 Watt berbanding 1,56 Watt). Hal ini mengonfirmasi bahwa mekanisme pelacak mampu meminimalisir *cosine losses* dengan menjaga posisi panel tetap tegak lurus terhadap datangnya sinar matahari.
3. **Ketahanan Terhadap Iradiasi Ekstrem (Anomali Termal):** Penelitian ini menemukan fenomena kritis pada saat iradiasi matahari mencapai titik ekstrem ($>1000 \text{ W/m}^2$). Pada tanggal 23 Mei 2025 pukul 14.00 WIB (iradiasi $1068,6 \text{ W/m}^2$), panel surya konvensional mengalami penurunan daya drastis hingga 0,51 Watt akibat saturasi panas (*overheating*). Sebaliknya, sistem modifikasi menunjukkan performa yang jauh lebih superior dengan daya 4,51 Watt (sekitar 8,8 kali lipat lebih tinggi). Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun temperatur meningkat, peningkatan arus singkat (*short-circuit current*) dari konsentrator mampu mengkompensasi kerugian tegangan (*voltage drop*), menjadikan sistem ini lebih andal di cuaca terik ekstrem.
4. **Perluasan Durasi Efektif:** Sistem modifikasi memperluas rentang waktu produksi energi efektif (*effective generation window*). Jika panel konvensional hanya bekerja optimal selama 3-4 jam di tengah hari (sekitar pukul 11.00–14.00), sistem modifikasi mampu mempertahankan daya tinggi mulai dari pukul 09.00 hingga 15.00 WIB.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Güney, "Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development," *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, vol. 26, pp. 389–397, 2019, doi: 10.1080/13504509.2019.1595214.

- [2] I. Khan, L. Han, H. Khan, and L. T. K. Oanh, "Analyzing Renewable and Nonrenewable Energy Sources for Environmental Quality: Dynamic Investigation in Developing Countries," *Math. Probl. Eng.*, p., 2021, doi: 10.1155/2021/3399049.
- [3] S. N. Choudhury, "Review of Energy Sources (Renewable and Non-Renewable)," *International Journal of Research and Scientific Innovation*, p., 2025, doi: 10.51244/ijrsi.2025.120700085.
- [4] D. Silalahi, A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and L. Hayes, "Indonesia's Vast Solar Energy Potential," *Energies (Basel)*, p., 2021, doi: 10.3390/en14175424.
- [5] N. Pambudi *et al.*, "Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development," *Sustainability*, p., 2023, doi: 10.3390/su15032342.
- [6] I. Khan, L. Han, H. Khan, and L. T. K. Oanh, "Analyzing Renewable and Nonrenewable Energy Sources for Environmental Quality: Dynamic Investigation in Developing Countries," *Math. Probl. Eng.*, p., 2021, doi: 10.1155/2021/3399049.
- [7] N. Handayani and D. Ariyanti, "Potency of Solar Energy Applications in Indonesia," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 1, pp. 33–38, 2012, doi: 10.14710/ijred.1.2.33-38.
- [8] C. Ave Duga Purba, O. Wahyu Wicaksono, I. Wayan Arta Wijaya, and I. Nyoman Budiastira, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap di Hotel Mega Dana," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 10, no. 3, pp. 57–67, 2023.
- [9] K. U. Mulyodinoto, S. Herawan, V. Fernando, I. Pardiansyah, Y. Ibrani, and H. I. Kirom, "Leveraging Performance Evaluation through Special Maintenance of Photo Voltaic Power Plant in Nusa Tenggara Region to Achieve Photovoltaic Reliability Excellence," *2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, pp. 812–816, 2023, doi: 10.1109/ichveps58902.2023.10257456.
- [10] F. Paundra and A. Nurdin, "Study Of The Potential And Development Of Renewable Energy Power In Indonesia : A Review," *Steam Engineering*, p., 2022, doi: 10.37304/jptm.v3i2.4024.
- [11] L. A. M. Sijabat and A. Mostavan, "Solar power plant in Indonesia: economic, policy, and technological challenges to its development and deployment," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 753, p., 2021, doi: 10.1088/1755-1315/753/1/012003.
- [12] E. A. Setiawan, M. P. Sumarto, and M. Z. Hussin, "A Lesson of Solar Energy Development in Malaysia and Indonesia," *International Journal of Energy Economics and Policy*, p., 2024, doi: 10.32479/ijeep.15258.
- [13] A. Asgharzadeh, B. Marion, C. Deline, C. Hansen, J. Stein, and F. Toor, "A Sensitivity Study of the Impact of Installation Parameters and System Configuration on the Performance of Bifacial PV Arrays," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 8, pp. 798–805, 2018, doi: 10.1109/jphotov.2018.2819676.
- [14] M. Alzahrani, T. Rahman, M. Rawa, and A. Weddell, "Impact of dust and tilt angle on the photovoltaic performance in a desert environment," *Solar Energy*, p., 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113239.
- [15] G. Chala, S. Sulaiman, and X. Chen, "A Study on the Performance of Soiled Solar Photovoltaic Panels at Different Tilt Angles in Al Seeb, Oman," *Energies (Basel)*, p., 2025, doi: 10.3390/en18020301.
- [16] T. Khan *et al.*, "Optimum location and influence of tilt angle on performance of solar PV panels," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 141, pp. 511–532, 2019, doi: 10.1007/s10973-019-09089-5.

- [17] M. Farahmand, M. Nazari, S. Shamlou, and M. Shafie-khah, "The Simultaneous Impacts of Seasonal Weather and Solar Conditions on PV Panels Electrical Characteristics," *Energies (Basel)*, p., 2021, doi: 10.3390/en14040845.
- [18] V. Osadčuks, D. Berjoza, J. Lācekliš-Bertmanis, and I. Jurgena, "A Methodological Framework for Studying the Tilt Angle of Solar Photovoltaic Panels," *Energies (Basel)*, p., 2025, doi: 10.3390/en18133487.
- [19] F. S. Putri *et al.*, "Prosiding The 13th Industrial Research Workshop and National Seminar Bandung," 2022.
- [20] S. Hariyanto, "Rancang Bangun REFLECTOR Untuk Mengoptimalkan Daya Serap Matahari Pada Panel Surya Dengan Variasi Sudut Guna Menghasilkan Daya Optimal," 2021.
- [21] M. Hanifah, A. H. Rahardjo, and A. Pudín, "Pengaruh Penggunaan Reflektor Datar Dengan Variasi Sudut Terhadap Daya Keluaran Panel Surya," 2024.
- [22] N. Jost *et al.*, "Fabrication of high-performance lens arrays for micro-concentrator photovoltaics using ultraviolet imprinting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, pp. 5961–5970, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13350-z.
- [23] W. Cameron, K. Reddy, and T. Mallick, "Review of high concentration photovoltaic thermal hybrid systems for highly efficient energy cogeneration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p., 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112512.
- [24] A. Sachenko, V. Kostyl'ov, I. Sokolovskiy, and M. Evstigneev, "Effect of Temperature on Limit Photoconversion Efficiency in Silicon Solar Cells," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 10, pp. 63–69, 2020, doi: 10.1109/jphotov.2019.2949418.
- [25] R. Sadeghi, M. Parenti, S. Memme, M. Fossa, and S. Morchio, "A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems," *Energies (Basel)*, p., 2025, doi: 10.3390/en18102553.
- [26] O. Rejeb, S. Shittu, C. Ghenai, G. Li, X. Zhao, and M. Bettayeb, "Optimization and performance analysis of a solar concentrated photovoltaic-thermoelectric (CPV-TE) hybrid system," *Renew. Energy*, p., 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.02.007.
- [27] A. H. Obaid, E. Mahdi, A. H. Muslem, A. N. Jafer, S. S. Abed, and T. Y. Khuder, "Evaluation of the Performance of Silicon Solar Cell with Fresnel Lens as Photovoltaic Solar Concentrator," *Iraqi Journal of Science*, p., 2021, doi: 10.24996/ij.s.2021.62.9(si).11.
- [28] E. Skoplaki and J. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations," *Renew. Energy*, vol. 34, pp. 23–29, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.04.009.
- [29] W. Xie, Y. Dai, R. Wang, and K. Sumathy, "Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2588–2606, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.03.031.