

Hibridisasi Sistem *Photovoltaic* dan *Thermoelectric Generator* sebagai Konverter Energi Cahaya dan Termal Surya Menjadi Energi Listrik

Rifky*, M. Naufal Fadurrahman, Thoriq Muhammad Nur Zain, & Hafizh Raihan

Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. DR.

HAMKA Jl. Tanah Merdeka no.6 Rambutan Ciracas Jakarta Timur .

Corresponding author: rifky@uhamka.ac.id

Abstrak

Energi matahari adalah energi yang digolongkan sebagai energi baru dan terbarukan. Pemanfaatan energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang bersih melalui panel surya. Penelitian ini menggunakan panel surya yang disatukan dengan modul termoelektrik. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja panel surya yang telah dihibrid dengan generator termoelektrik yang tersusun paralel. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah eksperimental, dimulai dengan perancangan dan membuat alat-alat penelitian. Alat penelitian berupa model bangunan yang atapnya memiliki kemiringan 30° serta dilengkapi dengan sistem hibrida yang terdiri dari seperangkat panel surya, generator termoelektrik, dan sistem pendingin yang memungkinkan generator termoelektrik didinginkan. Perangkat hibrida mencakup dua sistem berbeda. Sistem pertama, panel surya dengan generator termoelektrik dirakit menggunakan rak tersendiri, sehingga panel surya dengan generator termoelektrik berada pada rak terpisah. Sistem kedua, panel surya beserta generator termoelektrik dirangkai menjadi satu rangkaian terpadu pada rak yang sama. Variabel yang diukur dalam penelitian ini adalah intensitas cahaya matahari, temperatur lingkungan, temperatur panel surya (sisi atas dan sisi bawah), temperatur air bak penampungan, kecepatan angin, kelembaban udara, temperatur generator termoelektrik, tegangan rangkaian terbuka (Voc), tegangan maksimum, arus hubungan singkat (Isc), dan arus maksimum. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi hibridisasi dengan sistem rak menyatu memiliki rata-rata 18,3%, sedangkan dengan sistem rak terpisah memiliki efisiensi yang lebih rendah dengan rata-rata 14,7%. Berdasarkan hal tersebut bahwa hibridisasi menggunakan sistem rak menyatu lebih efisien dibandingkan sistem rak terpisah.

Kata Kunci: energi terbarukan, panel surya, termoelektrik, efisiensi

Abstract

Solar energy is energy that is classified as new and renewable energy. Utilization of solar radiation energy into clean electrical energy through solar panels. This study uses solar panels that are integrated with thermoelectric modules. This study aims to improve the performance of solar panels that have been hybridized with thermoelectric generators arranged in parallel. The method used in this study is experimental, starting with the design and manufacture of research tools. The research tool is a model of a building whose roof has a slope of 30° and is equipped with a hybrid system consisting of a set of solar panels, a thermoelectric generator, and a cooling system that allows the thermoelectric generator to be cooled. The hybrid device includes two different systems. The first system, a solar panel with a thermoelectric generator, is assembled using a separate rack, so the solar panel with a thermoelectric generator is located on a separate rack. The second system, solar panels and thermoelectric generators are assembled into an integrated circuit on the same rack. The variables measured in this study are the intensity of sunlight, ambient temperature, solar panel temperature (top and bottom), water temperature, wind speed, humidity, thermoelectric generator temperature, open circuit voltage (Voc), maximum voltage, short circuit current (Isc), and maximum current. The research results show that the efficiency of hybridization with a combined rack system has an average of 18.3%, while with a separate rack system the efficiency is lower with an average of 14.7%. Based on this, hybridization using a fused rack system is more efficient than a separate rack system.

Keywords: renewable energy, solar panels, thermoelectric, efficiency

1. PENDAHULUAN

Matahari merupakan sumber energi yang bersih dan ramah lingkungan. Energi matahari di negara yang bercuaca tropis seperti Indonesia cukup bermanfaat untuk digunakan. Jadi, Indonesia mempunyai potensi radiasi pancaran energi matahari yang berlimpah. Sejak dahulu hingga sekarang energi panas matahari di Indonesia dimanfaatkan penduduk nusantara ini, seperti untuk mengeringkan pakaian, hasil pertanian, hasil tangkapan dari laut, dan menjadi pemanas air [1][2].

Energi matahari juga menghasilkan energi cahaya yang berperan dalam proses fotosintesis tumbuhan hijau yang menghasilkan materi dan energi kimia dalam cadangan makanan di tumbuhan tersebut sebagai mata rantai pertama pada jaring-jaring kehidupan di ekosistem lingkungan kehidupan. Energi cahaya matahari dengan sentuhan teknologi modern, yakni teknologi material semikonduktor dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik. Teknologi konverter energi tersebut berupa perangkat panel surya yang memanfaatkan efek *photovoltaic*. Panel surya terdiri dari sel-sel konverter yang dinamakan *solar cell* atau sel surya [3].

Sel surya akan menurun daya luarannya, ketika temperatur di permukaan panel meningkat [4]. Oleh karena itu dibutuhkan pendingin untuk menstabilkan temperatur permukaan panel tersebut. Sebagai pendingin sel surya dapat digunakan modul termoelektrik. Selain sebagai pendingin termoelektrik dapat juga berfungsi sebagai generator, *thermoelectric generator* (TEG).

Generator termoelektrik mengkonversi energi panas menjadi listrik secara langsung. Untuk memperoleh listrik, termoelektrik cukup diletakkan pada beberapa rangkaian yang menghubungkan sumber panas dan sumber dingin [5]. Generator termoelektrik pada dasarnya memiliki prinsip dimana memproduksi daya listrik dengan cara yang efektif dari radiasi yang dihasilkan panas matahari [6].

Penempatan modul termoelektrik pada sisi bawah panel surya untuk memanfaatkan energi termal yang dibuang panel surya dan diubah oleh modul termoelektrik untuk menghasilkan energi listrik secara simultan [7].

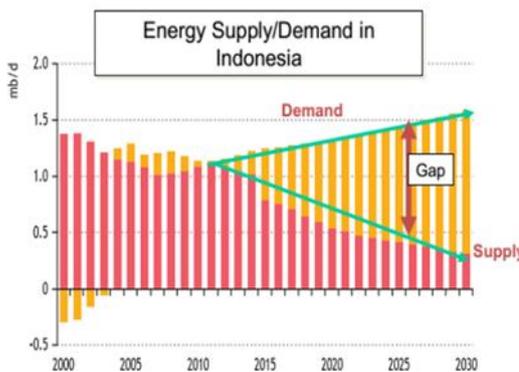
Modul termoelektrik mengubah energi termal menjadi energi listrik melalui adanya perbedaan temperatur antara sisi panasnya (melekat dengan panel surya) dengan sisi dinginnya (menempel sistem pendingin waterblock). Pemanfaatan panas buang dari panel surya tersebut oleh modul termoelektrik (lebih tepatnya disebut generator termoelektrik secara fungsinya) diharapkan berkontribusi dalam mempengaruhi efisiensi panel surya (sistem fotovoltaik, PV) sebagai pembangkit listrik tenaga surya dan peningkatan efisiensi kedua pengubah energi surya tersebut secara simultan dan hibrid. Oleh karena itu modul harus memiliki stabilitas termal dan kimia yang baik pada temperatur tinggi bila digunakan di bawah sinar matahari [6]. Modul-modul termoelektrik tersebut dirangkai dengan susunan paralel, sehingga dapat mengoptimalkan energi termal secara merata dan tetap konstan dengan daya input termal konstan [8], sehingga kinerja hibridisasi kedua konverter (PV+ TEG) tersebut meningkat.

2. DASAR TEORI

2.1 Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah energi yang memiliki dampak lingkungan yang jauh lebih rendah daripada energi konvensional [9]. Energi terbarukan, seperti angin, panas bumi, matahari, dan bioenergi, dihasilkan dari proses alami yang dapat digunakan secara berulang. Sumber energi tersebut secara langsung atau tidak langsung berasal dari panas matahari atau dari dalam bumi [10]. Berdasarkan data hasil dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) potensi energi bersih dan terbarukan yang dimiliki Indonesia cukup tinggi. Tingginya potensi yang ditimbulkan dari sumber daya ini terciptanya pemerataan akses energi secara nasional [9].

Tahun 2016 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) menunjukkan data bahwa minyak bumi dan batu bara masih berada diangka 46% dan 21%, serta gas alam sekitar 18%. Sementara itu, energi terbarukan hanya berkontribusi sebesar 5%. Ketidak seimbangan antara *energy supply* dan *energy demand* akan terus meningkat. Jika tidak adanya pemerataan yang signifikan menimbulkan ketidakseimbangan antara *supply* dan *demand* [11]. Berikut kebutuhan *energy supply* dan *energy demand* di Indonesia dari tahun 2000 hingga 2030 dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Situasi kebutuhan energi di Indonesia.

Energi baru dan terbarukan dapat dikendalikan yaitu dengan terus melakukan pemanfaatan dan pengembangan terhadap potensinya. Potensi besar yang dimiliki Indonesia dalam mengembangkan EBT berdasarkan jenis energinya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Potensi pertumbuhan energi terbarukan

No	Jenis Energi Terbarukan	Potensi (MW)
1	Angin	950
2	Surya	11
3	Air	75
4	Biomassa	32
5	Biofuel	32
6	Energi Laut	60
7	Panas Bumi	29

2.2 Energi Matahari

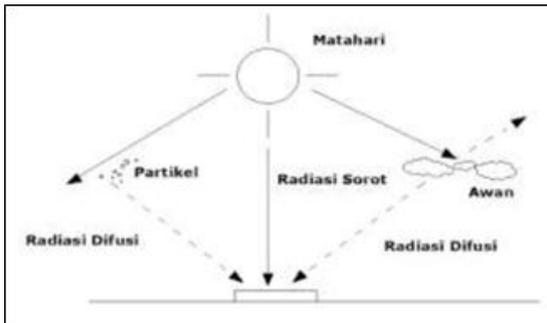
Energi matahari, dapat digunakan secara langsung untuk pemanasan dan penerangan rumah dan bangunan lainnya, untuk menghasilkan listrik, untuk pemanasan air panas, pendinginan matahari, berbagai penggunaan komersial dan industri [12]. Energi matahari di Indonesia mempunyai potensi yang cukup besar sekitar 4.8 KWh/m² atau setara dengan 112.000 GWp, tetapi yang dimanfaatkan sekarang ini baru sekitar 10 MWp [13].

Permukaan bumi menyerap energi yang dihasilkan oleh sinar matahari sebesar 69% dari total keseluruhan pancaran yang dihasilkan matahari. Energi surya yang diterima permukaan bumi mencapai 3×10^{24} joule/tahun sama dengan 2×10^{17} watt. Energi sebesar itu dapat dimanfaatkan di Indonesia karena pada saat puncaknya matahari tegak lurus, radiasi matahari yang diserap permukaan panel surya dengan luas 1 m² dapat menghasilkan 900 sampai 1000 watt [14].

2.3 Radiasi Matahari

Pancaran energi per satuan luas yang dikeluarkan oleh matahari adalah radiasi matahari. Radiasi menjadi salah satu faktor penting untuk melakukan pembentukan cuaca di atmosfer bumi karena radiasi matahari menghasilkan panas yang dapat diperoleh sebagai penggerak suatu siklus di atmosfer sehingga terjadinya cuaca yang berubah-ubah sepanjang masa [15].

Radiasi matahari yang mencapai bumi telah melemah akibat pantulan dan hamburan oleh atmosfer Bumi. Radiasi yang mencapai permukaan bumi, yang tidak berubah arah, disebut radiasi pancaran, sedangkan radiasi yang berubah arah karena pemantulan dan hamburan disebut radiasi difusi [16]. Terjadinya proses jatuhnya radiasi ke bumi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Proses radiasi matahari ke bumi.

Beberapa jenis dari radiasi matahari adalah sebagai berikut [17]:

1. Radiasi matahari (*beam/direct radiation*)
Radiasi yang sampai di Bumi tanpa merubah arah sejajar sinar yang datang.
2. Radiasi hambur (*diffuse radiation*)
Radiasi yang mengalami suatu perubahan determinasi penghamburan.
3. Radiasi total (*global radiation*)
Penjumlahan radiasi secara langsung dan radiasi akibat penghamburan

Radiasi matahari menghasilkan sinar ultraviolet (UV) sebesar 6%, cahaya tampak sebesar 48%, dan cahaya infra merah (IR) yang menghasilkan energi panas sebesar 46% [18].

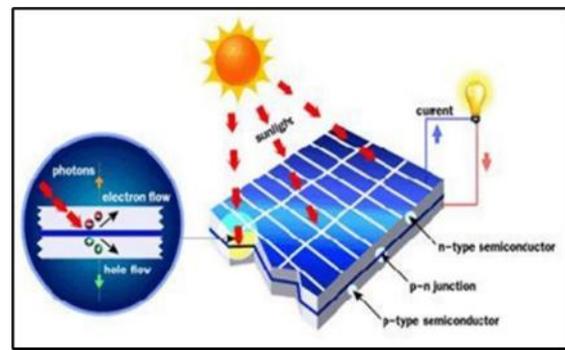
2.4 Panel Surya

Panel surya adalah perangkat yang mengubah energi matahari menjadi listrik dengan proses efek fotovoltaik. Sel surya adalah singkatan dari foto (cahaya) dan volta (listrik) [14].

Komponen utama yang dimiliki oleh panel surya adalah memiliki absorber berfungsi sebagai penyerap. Absorber ini terdiri dari diode *p-n junction*, yang dimana pada saat cahaya matahari mengenai maka menghasilkan energi listrik, proses tersebut dinamakan fotolistrik. Pengaruh besarnya suatu daya yang dihasilkan oleh fotovoltaik adalah intensitas suatu cahaya dan temperatur yang ada di modul fotovoltaik tersebut [19]. Tegangan yang dihasilkan dari satu komponen sel surya

komersil biasanya menghasilkan tegangan searah sebesar 0.5 hingga 0.1 volt [20].

Sel surya komersil bekerja menggunakan prinsip *p-n junction*, yaitu sambungan antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Jenis semikonduktor ini terdiri dari ikatan atom dengan elektron sebagai penyusun dasarnya. Fungsi *p-n junction* adalah untuk membentuk medan listrik sehingga elektron dapat terekstraksi oleh material kontak, sehingga menghasilkan energi listrik [20]. Terjadinya proses konversi yang dilakukan energi cahaya menjadi energi listrik dapat dilihat pada Gambar 3.



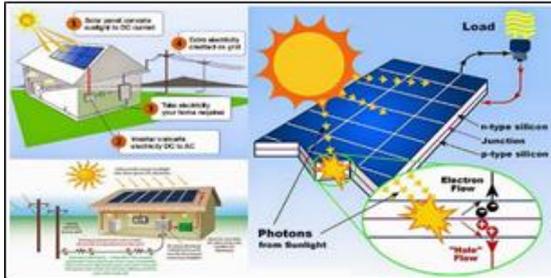
Gambar 3 Proses mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik.

Modul sel surya terbuat dari bahan semi konduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik. Bidang silikon yang terdapat pada sel surya menghasilkan energi listrik yang sama sekali tidak bergantung pada besaran luas yang ada, dan secara tetap menghasilkan energi sekitar ± 0.5 volt – max 600 mV pada 2 amp – dengan radiasi solar matahari 1000 W/m^2 yang menghasilkan arus listrik sekitar 30 mA/cm^2 per sel surya [21].

2.5 Kinerja Panel Surya

Kinerja sel surya ditentukan dengan semakin besar intensitas sinar matahari, semakin besar arusnya, dan tegangannya cenderung konstan [22]. Kinerja sistem panel surya dipengaruhi beberapa faktor seperti temperatur, kecepatan angin, dan radiasi matahari. Daya luaran yang diberikan panel surya tergantung pada banyaknya cahaya yang diserap panel surya. Panel surya dapat bekerja

secara maksimal pada temperatur rata-rata 25°C. Besarnya temperatur pada panel surya sangat berpengaruh pada daya yang ditimbulkan dari panel surya [23]. Cara kerja sistem panel surya dapat dilihat pada Gambar 4.

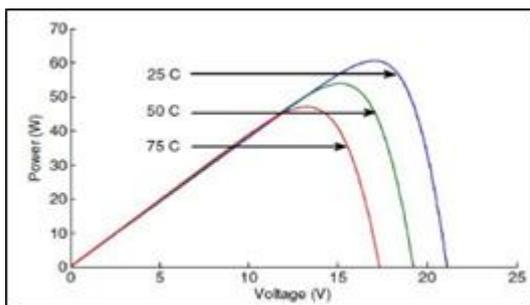


Gambar 4 Cara kerja sistem panel surya.

Panel surya dapat beroperasi secara maksimal tergantung pada hal berikut [24]:

1. Temperatur

Kenaikan temperatur yang sangat tinggi dari temperatur normal dapat meredakan tegangan (V_{oc}) yang dihasilkan. Tiap kenaikan temperatur pada panel surya 1°C (dari 25°C) dapat mengakibatkan mengurangnya daya total yang ditimbulkan sekitar 0.5%. Grafik terjadinya perubahan temperatur pada panel surya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Perubahan temperatur ditunjukkan pada kurva P-V.

2. Intensitas sinar matahari

Daya keluaran panel surya berpengaruh pada intensitas sinar matahari. Rendahnya intensitas sinar yang diserap panel surya mengakibatkan arus (I_{sc}) menjadi rendah.

3. Sudut kemiringan pada panel surya

Dampak besar pada radiasi matahari terjadi pada pemasangan sudut kemiringan panel surya. Pada sudut kemiringan konstan, dalam satu tahun dapat memperoleh daya maksimum ketika sudut kemiringan panel surya sejajar dengan garis lintang di lokasi.

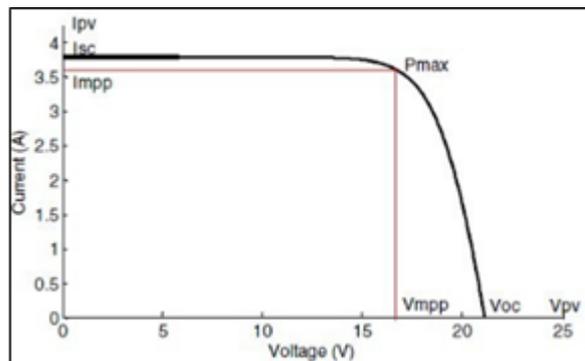
4. Penyesuaian panel surya

Penyesuaian panel surya menghadap ke arah cahaya matahari suatu hal yang penting, agar dapat menghasilkan energi yang maksimal.

5. Iradiasi matahari

Iradiasi adalah sumber energi utama dari sel surya, oleh sebab itu daya keluarannya tergantung pada perubahan iradiasi.

Karakteristik tersebut antara lain yaitu; *open circuit voltage* (V_{oc}), *short circuit current* (I_{sc}), dan daya maksimal (P_{max}) [24]. Karakteristik kurva I-V dan P-V yang dipengaruhi oleh intensitas matahari dapat dilihat pada Gambar 6.

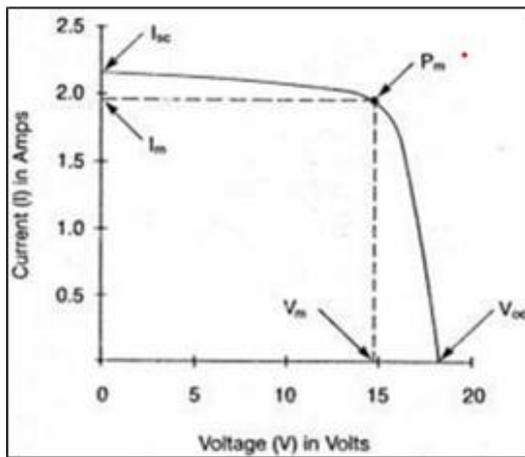


Gambar 6 Kurva karakteristik I-V dan P-V yang dipengaruhi intensitas matahari.

Arus hubungan singkat (I_{sc}) adalah arus maksimum yang akan dihasilkan panel surya dengan cara mempersingkat kutub positif panel surya ke kutub negatif [25]. I_{sc} juga merupakan arus maksimum sel surya tanpa hambatan (R), $V = 0$ dan arus yang mengalir melalui sel surya ketika tegangan melintasi sel surya adalah nol ($V_{oc} = 0$) [26]. Sel surya menghasilkan arus yang dapat menentukan seberapa cepat panel mengisi baterai [25].

Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) adalah tegangan maksimum sel surya dan terjadi ketika arus sel surya nol ($I_{sc}=0$) [26].

Daya maksimum (P_{max}) adalah daya yang didapat dari panel surya dengan didistribusikan cakupan cahaya. P_{max} dapat diperoleh dengan mengalikan (I_m) dan (V_m) [27]. Pada titik tertentu daya maksimum sel surya mencapai titik maksimumnya dan titik ini disebut MPP (*Maximum Power Point*) [17]. Nilai MPP yang berbeda diperoleh pada temperatur dan kondisi iradiasi yang berbeda [28]. Karakteristik kurva (V-I) pada panel surya dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Kurva karakteristik V-I pada sel surya.

Daya maksimum pada panel surya dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [27]:

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (1)$$

Permukaan panel surya memiliki luas yang dapat dihitung dengan persamaan berikut [29]:

$$A = P \times L \quad (2)$$

Daya masukan panel surya yang dapat digunakan dalam penelitian menggunakan persamaan berikut [30]:

$$P_{in} = G \times A \quad (3)$$

Daya keluaran pada panel surya yang dapat digunakan dalam penelitian menggunakan persamaan berikut [30]:

$$P_{out} = V_{max} \times I_{max} \quad (4)$$

Faktor pengisi adalah nilai dari parameter kinerja panel surya, oleh karena itu perhitungannya dengan perbandingan antara rangkaian terbuka arus maksimum (I_{max}) dengan rangkaian tegangan tertutup (V_{oc}) serta tegangan maksimum (V_m) dan arus hubungan singkat (I_{sc}). Perhitungan faktor pengisi dapat dihitung dengan persamaan berikut [29]:

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (5)$$

Penentuan efisiensi panel surya menggunakan persamaan berikut [31]:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

2.6 Termoelektrik

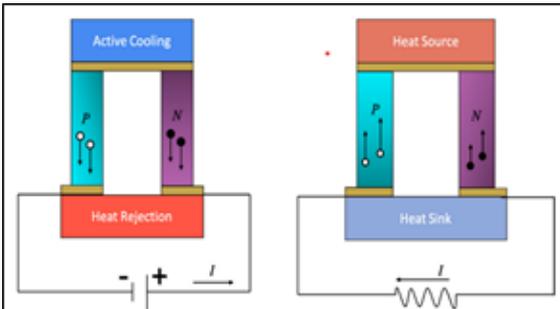
Termoelektrik adalah suatu modul yang fungsinya dapat melakukan konversi secara langsung dengan perbedaan temperatur yang ada menjadi tegangan listrik [32]. Termoelektrik dapat bekerja jika kedua sisi modul termoelektrik mengalami temperatur yang berbeda maka material yang berada didalam termoelektrik dapat mengalirkan suatu tegangan listrik [33].

Modul termoelektrik terbagi menjadi dua jenis: generator termoelektrik (TEG) dan pendingin termoelektrik (TEC). Generator termoelektrik merupakan perangkat yang digunakan sebagai pembangkit tegangan listrik dengan memanfaatkan daya penghantar panas dari lempengan logam yang terdapat di dalam modul termoelektrik [33]. Berikut adalah Gambar 8 modul generator termoelektrik dengan tipe SP-184827145 SA.



Gambar 8 Modul generator termoelektrik SP-184827145 SA.

TEG dan TEC memiliki perbedaan yang dapat dilihat pada Gambar 9[34].



Gambar 9 Pendingin oleh efek Peltier dan pembangkit listrik oleh efek Seebeck

Efek Seebeck yaitu suatu kondisi yang mengalami perbedaan temperatur menjadi energi listrik. Jika kedua jenis logam yang berbeda ujungnya dan saling bersentuhan akan memiliki suatu sambungan dalam satu putaran [35].

Berdasarkan efek Seebeck, dapat diperoleh koefisien Seebeck dengan persamaan sebagai berikut [36]:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (7)$$

Efek Thomson yaitu suatu peristiwa penyerapan atau pelepasan panas antara dua titik konduktor pembawa arus, dan panas tersebut diserap tergantung pada material dan arah arus yang ada [37].

Berdasarkan efek Thomson, diperoleh persamaan sebagai berikut [38]:

$$q = K\Delta T \quad (8)$$

Efek Peltier menyatakan bahwa ketika tegangan diberikan kepada termokopel, maka terjadinya suatu kondisi dimana terdapat perbedaan temperatur kepada kedua sisinya.

Konsep teori ini dikenal dengan efek Peltier pada termoelektrik pendingin (TEC) yang dikemukakan Jean Charle Athanase Peltier fisikawan asal Perancis [39]:

$$Q_c = Q_h = V_{XY}I_{XY} \quad (9)$$

Arus listrik yaitu suatu perbandingan tegangan suplai dengan hambatan suatu rangkaian listrik [40]. Tegangan listrik yaitu suatu metode hasil perkalian arus listrik dengan hambatan suatu rangkaian listrik [40].

Untuk mendapatkan pengukuran daya yang dikeluarkan generator termoelektrik menggunakan persamaan berikut[41]:

$$P = V \cdot I \quad (10)$$

Figure of merit atau angka pantas (Z) merupakan aspek penting untuk mengetahui nilai efisiensi pada modul termoelektrik [42]. Semakin besar nilai Z pada pengujian maka semakin baik nilai efisiensi modul termoelektrik yang beroperasi. Namun kendala yang dihadapi saat ini dalam pengembangan dan pemanfaatan generator termoelektrik adalah efisiensi termalnya rendah, hanya sekitar 4%. Berikut persamaan *figure of merit* (Z) [35]:

$$Z = \frac{s^2 \cdot \sigma}{\lambda} \quad (11)$$

Persamaan *figure of merit* merupakan gabungan dari konduktivitas listrik (σ), koefisien Seebeck (S), dan konduktivitas termal (λ) [43].

Efisiensi generator termoelektrik merupakan perbandingan antara usaha yang dihasilkan dengan energi panas yang diterima [44]. Pada penelitian ini generator termoelektrik yang digunakan adalah tipe SP1848-27145 SA terbuat dari bahan *bismuth telluride* (Bi_2Te_3), dengan dimensi 40 mm x 40 mm x 3.4 mm yang mempunyai nilai konduktivitas termal (K) 1,20 W/m °C, resistivitas listrik (ρ) 0,000009 $\Omega \cdot m$, 0,000009 m, konduktivitas listrik (σ) 1,1 x 10⁵ S/m [45]. Efisiensi termoelektrik dapat dihitung dengan persamaan berikut [46].

$$\eta_t = \frac{W}{Qh} = \frac{VI}{\alpha ThI - \frac{1}{2}I^2R + K(T_h - T_c)} \quad (12)$$

Persamaan resistansi listrik (R) menggunakan persamaan berikut dengan ρ merupakan resistivitas bahan dan A luas penampang [41]:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (13)$$

Untuk mengetahui konduktansi termal (K) menggunakan persamaan berikut [47]:

$$K = \frac{k \cdot A}{L} \quad (14)$$

2.7 Hibrida Panel Surya dengan Generator Termoelektrik

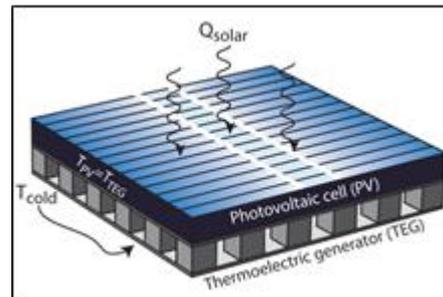
Sistem hibrida panel surya adalah suatu permodelan numerik tiga dimensi untuk modul panel surya dan perangkat generator termoelektrik untuk mempelajari kinerja sistem pembangkit listrik hibrida PV+TE yang terdiri dari generator termoelektrik yang terpasang pada bagian belakang panel surya [48]. Pengembangan sistem hibridisasi PV+TEG terutama dilakukan dengan dua cara.

Pertama adalah metode pemisahan spektral untuk mentransmisikan energi di bawah panjang gelombang 2500 nm pada panel surya dan di atas 2500 nm pada generator termoelektrik.

Metode kedua adalah metode langsung, dimana generator termoelektrik dihubungkan langsung ke bagian belakang PV+TEG menggunakan kelebihan panas dari energi matahari untuk menghasilkan listrik tambahan [10].

Peningkatan temperatur pada modul panel surya dapat menyebabkan penurunan efisiensi secara bertahap. Peningkatan temperatur sel surya dari 10°C menjadi 35°C hingga 45°C dapat menurunkan efisiensi sel surya dari 12%

menjadi 10,5% [26]. Temperatur permukaan panel surya dapat mencapai 80 °C, memanfaatkan temperatur tinggi ini dengan menempatkan modul termoelektrik di bagian belakang panel surya sehingga temperatur tinggi bertemu dengan panas termoelektrik [48]. Di sisi lain, berkat sistem pendingin, temperaturnya dapat lebih rendah. Skema sistem hibridasi PV+TEG dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 Skema sistem hibridasi PV+TEG

Perhitungan efisiensi dari hibridasi panel surya dengan generator termoelektrik dapat dilihat pada persamaan berikut [49]:

$$\eta_{PV-TEG} = \eta_{PV} + \eta_{TEG}(1 - \eta_{PV}) \quad (15)$$

Persamaan di atas menunjukkan efisiensi individual PV dan TEG memberikan efisiensi sistem PV+TEG. Namun, dalam efisiensi sistem PV meningkat seiring penurunan temperatur modul. Sistem PV+TEG yang dihibridasi menghasilkan energi tambahan dibandingkan dengan sistem PV yang berdiri sendiri. TEG menyerap panas dari modul PV, yang meningkatkan efisiensi PV, dan TEG juga menyediakan energi tambahan dengan panas modul [49].

3. METODOLOGI PENELITIAN

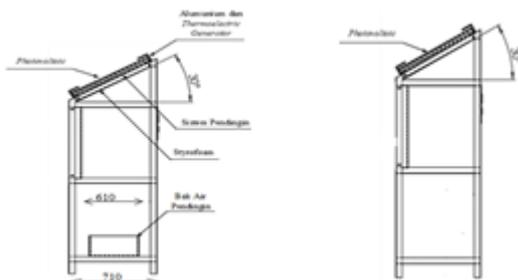
3.1 Alur Penelitian



Gambar 11 Diagram alir penelitian

3.2 Hibrida Panel Surya dengan Generator Termoelektrik

Berikut ini adalah desain dari penelitiannya, pada Gambar 12.

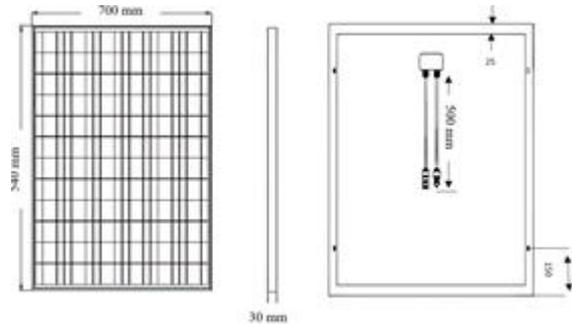


Gambar 12 Desain (a) rak PV-TEG dengan bak air pendingin dan (b) rak panel surya.

Pada Gambar 12 ini merupakan sebuah komponen alat dari penelitian yang digunakan untuk mengetahui hasil dari penelitian dengan bentuk kerangka setinggi dua meter terbuat

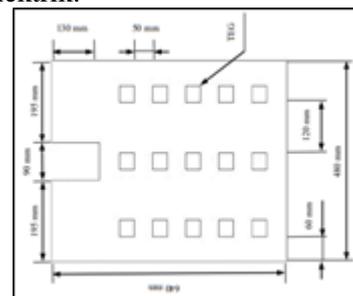
dari baja hollow 5cm x 5cm. Pada rangka penelitian ini terdapat: panel surya, generator termoelektrik, bak penampung air, termometer digital, dan *flowmeter*.

Adapun desain panel surya pada penelitian ini menggunakan panel surya 50Wp menggunakan bahan dasar *Polycrystalin* (Si) dengan merk ST Solar yang memiliki dimensi 700 x 540 x 30 mm dan dimensi tiap selnya adalah 660 x 480 mm. Gambar 13 adalah desain dari sistem panel surya.



Gambar 13 Desain sistem panel surya 50 Wp

Pada penelitian ini dibuat juga desain rangkaian generator termoelektrik menggunakan tipe SP 1848-27145 SA sebanyak 15 unit yang dirangkai secara paralel. Gambar 14 adalah rangkaian generator termoelektrik.

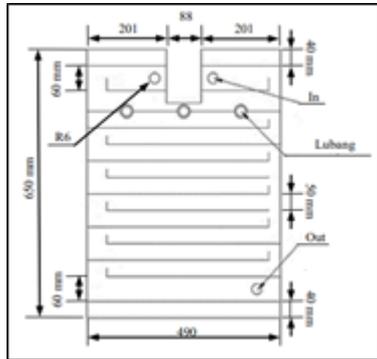


Gambar 14 Desain rangkaian generator termoelektrik secara paralel.

Penggunaan rangkaian paralel pada generator termoelektrik ini dipilih agar dapat mengetahui seberapa besar tegangan yang dihasilkan dibandingkan dengan rangkaian kelistrikan lainnya [50].

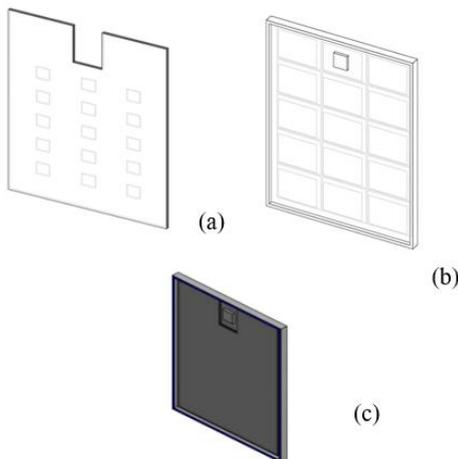
Adapun pada penelitian ini dibuat juga desain sistem pendingin yang terbuat dari

material plat alumunium yang memiliki ketebalan 1 mm dan tebal keseluruhan desain menjadi 20 mm dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15 Desain pendingin pada generator termoelektrik

Selain desain susunan rak, desain sistem panel surya, desain sistem rangkaian generator termoelektrik, dan susunan sistem pendingin. Adapun pada penelitian ini dibuat desain penyusunan panel surya dengan generator termoelektrik yang dapat dilihat pada Gambar 16.

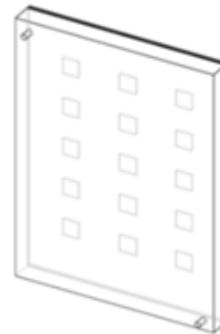


Gambar 16 Desain panel surya disusun dengan generator termoelektrik

Pada Gambar 16 (a) merupakan generator termoelektrik dengan sistem rangkaian yang disusun secara paralel yang akan ditempatkan pada rak penelitian serta pada Gambar 16 (b) merupakan desain panel surya yang belum disatukan dengan generator termoelektrik, dan pada Gambar 16 (c) merupakan gabungan rangkaian hibridisasi

sistem panel surya dengan generator termoelektrik yang diaplikasikan pada rak penelitian.

Desain berikut adalah susunan sistem dengan rak terpisah, dimana satu rak hanya terdiri dari panel surya dan rak lainnya terdiri dari susunan generator termoelektrik dan pendingin. Gambar 17 merupakan desain rangkaian hibridisasi PV+TEG.

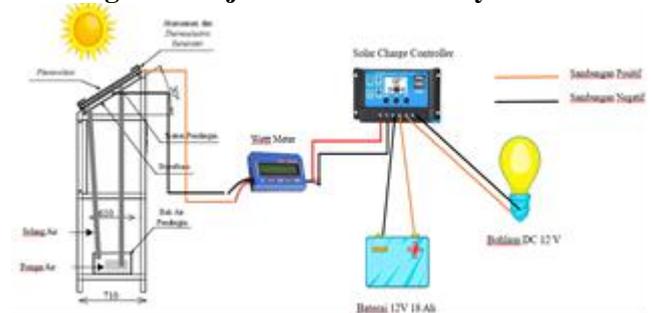


Gambar 17 Rangkaian hibridisasi sel surya dengan generator termoelektrik

3.3 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang digunakan adalah dengan cara menggunakan pengukuran. Parameter yang akan diukur dalam penelitian ini meliputi intensitas cahaya matahari, kecepatan angin, kelembaban udara, temperatur panel surya, temperatur generator termoelektrik, temperatur sistem pendingin, temperatur air, tegangan dan arus listrik sebagai data luaran.

3.4 Diagram Kerja Sistem Panel Surya



Gambar 18 Diagram kerja sistem panel surya

Pada Gambar 18 merupakan diagram kerja dari sistem panel surya yang dimana sistem dari panel surya dan generator termoelektrik ini tepat berada di pancaran sinar matahari dan sel-

sel panel surya menyerap energi dari radiasi matahari tersebut. Sistem pendingin yang digunakan untuk melapisi generator termoelektrik dengan bahan plat alumunium berguna untuk proses penyerapan panas pada bagian sisi bawah panel surya dengan dibantunya proses sistem pendinginan oleh air yang dipompa dari bak berisi air dan es batu. Sel panel surya yang menyerap energi dari matahari kemudian menyalurkan daya ke alat ukur wattmeter berfungsi untuk mengukur arus dan tegangan yang masuk dari sel panel surya. Selanjutnya wattmeter menyalurkan kembali ke alat ukur *solar charge controller* (SCC) berfungsi untuk mengatur kapasitas arus dan tegangan yang keluar dari panel surya kemudian masuk ke baterai dan generator termoelektrik ke baterai supaya tidak terjadinya kelebihan muatan. Setelah semua perangkat sudah terpasang kemudian disambungkan menggunakan bohlam dengan arus DC sebesar 12 volt guna mengetahui arus dan tegangan yang diperoleh.

4. Hasil dan Pembahasan

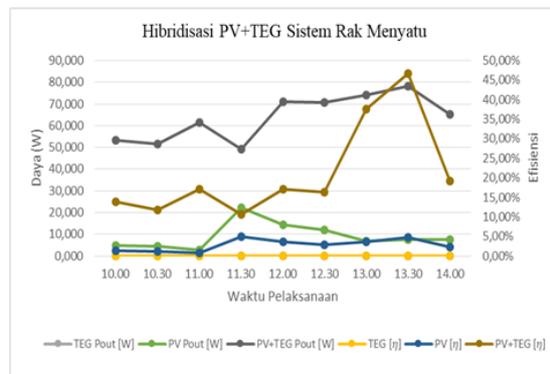
Pada hasil pengujian sistem diambil untuk mengetahui rata-rata efisiensi dari hibridisasi panel surya dengan generator termoelektrik pada rangkaian rak terpisah dan rak menyatu. Hasil dari pengujian merupakan hasil yang telah diolah untuk mendapatkan nilai efisiensi dari kedua sistem. Data hasil pengolahan sistem dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2 Kinerja PV+TEG pada sistem rak menyatu.

Pukul	Hibridisasi PV+TEG Sistem Rak Menyatu									
	TEG			PV		PV+TEG				
ΔT [°C]	Qh [W]	Pout [W]	$[\eta]$	Pin [W]	Pout [W]	$[\eta]$	Pin [W]	Pout [W]	$[\eta]$	
10.00	27,2	21,3	0,001	0,01%	364,8	4,9	1,34%	386,1	48,4	12,5%
10.30	23,6	8,7	0,002	0,03%	430,0	4,6	1,07%	438,6	47,1	10,7%
11.00	17,4	14,9	0,004	0,02%	347,9	2,6	0,75%	362,8	59,0	16,3%
11.30	24,7	13,5	0,006	0,04%	452,0	22,1	4,88%	465,4	27,0	5,8%
12.00	19,6	12,2	0,002	0,01%	407,2	14,4	3,53%	419,3	56,7	13,5%
12.30	21,8	10,6	0,004	0,04%	424,9	12,1	2,85%	435,5	58,7	13,5%
13.00	17,4	7,4	0,003	0,04%	190,3	6,9	3,63%	197,7	67,2	34,0%
13.30	15,0	6,4	0,002	0,03%	161,9	7,7	4,76%	168,2	70,6	41,9%
14.00	22,4	13,6	0,001	0,01%	329,4	7,7	2,33%	343,0	57,7	16,8%
Maksimum	27,2	21,3	0,006	0,04%	452,0	22,1	4,88%	465,4	70,6	41,9%
Minimum	15,0	6,4	0,001	0,01%	161,9	2,6	0,75%	168,2	27,0	5,8%
Rata-rata	21,0	12,0	0,003	0,02%	345,4	9,2	2,67%	357,4	54,7	15,3%

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa pada sistem rak menyatu generator termoelektrik diperoleh rata-rata perbedaan temperatur pada generator termoelektrik (ΔT) sebesar 21,0°C dengan rata-rata efisiensi sebesar 0,02%.

Sementara itu pada panel surya diperoleh rata-rata daya masukan (P_{in}) sebesar 345,5 watt dengan rata-rata daya keluaran (P_{out}) sebesar 9,2 watt dan efisiensi (η) yang diperoleh pada panel surya sebesar 2,67%. Efisiensi hibridisasi PV+TEG pada sistem rak menyatu ini memperoleh rata-rata daya masukan sebesar 357,4 watt dengan rata-rata daya keluaran yang diperoleh sebesar 54,7 watt dan menghasilkan rata-rata efisiensi sebesar 15,3%. Berdasarkan hasil pengolahan data pada Tabel 2 maka dapat dibuat grafik pada Gambar 19 berikut ini.



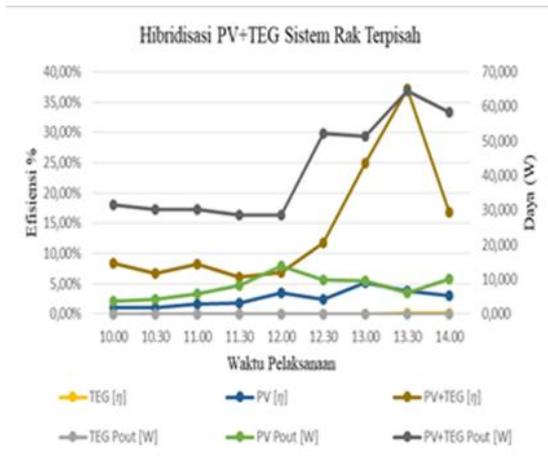
Gambar 19 Kinerja hibridisasi PV+TEG rak menyatu

Pada Gambar 19 terlihat bahwa daya keluaran tertinggi yang dihasilkan panel surya terjadi pada pukul 11.30 WIB sebesar 22,1 watt dengan efisiensi yang dihasilkan sebesar 4,88 %. Nilai tersebut memengaruhi daya yang dihasilkan sistem hibridisasi, terlihat bahwa pada waktu yang sama daya keluaran yang dihasilkan oleh sistem hibridisasi (PV+TEG) adalah sebesar 27,0 watt dengan efisiensi sebesar 5,8%. Pengaruh penambahan generator termoelektrik sebagai sumber tenaga tambahan pada panel surya hibridisasi dikatakan memberikan pengaruh yang besar terhadap daya keluaran panel surya [51].

Tabel 3 Kinerja PV+TEG pada sistem rak terpisah.

Pukul	TEG			PV			PV+TEG			
	ΔT [°C]	Qh [W]	Pout [W]	η	Pin [W]	Pout [W]	η	Pin [W]	Pout [W]	η
10.00	13,10	13,27	0,001	0,01%	364,80	3,67	1,01%	378,07	31,52	8,34%
10.30	20,50	20,78	0,004	0,02%	429,95	4,25	0,99%	450,73	30,08	6,67%
11.00	17,20	17,44	0,003	0,02%	347,94	5,92	1,70%	365,38	30,16	8,26%
11.30	18,90	19,20	0,006	0,03%	451,97	8,30	1,84%	471,17	28,70	6,09%
12.00	13,40	13,63	0,004	0,03%	407,17	13,99	3,44%	420,80	28,52	6,78%
12.30	20,10	20,42	0,006	0,03%	424,90	9,96	2,34%	445,31	52,23	11,73%
13.00	16,30	16,59	0,006	0,04%	190,34	9,69	5,09%	206,92	51,46	24,87%
13.30	11,60	11,86	0,005	0,04%	161,86	6,19	3,82%	173,71	64,44	37,09%
14.00	16,70	17,01	0,007	0,04%	329,41	9,99	3,03%	346,42	58,22	16,80%
Maksimum	20,50	20,78	0,007	0,04%	451,97	13,99	3,09%	471,17	64,44	37,09%
Minimum	11,60	11,86	0,001	0,01%	161,86	3,67	0,99%	173,71	28,52	6,09%
Rata-rata	16,42	16,69	0,005	0,03%	345,37	7,99	2,31%	362,06	41,70	11,52%

Pada Tabel 3 dapat dilihat pada sistem rak terpisah generator termoelektrik diperoleh rata-rata dengan perbedaan temperatur (ΔT) sebesar 16,42°C dengan rata-rata efisiensi yang dihasilkan 0,03%. Sementara itu rata-rata daya masuk yang dihasilkan pada panel surya (P_{in}) sebesar 345,37 watt dengan rata-rata daya luaran (P_{out}) menghasilkan sebesar 7,99 watt dan efisiensi rata-rata panel surya menghasilkan sebesar 2,31%. Hibridisasi pada PV +TEG sistem rak terpisah ini memperoleh rata-rata daya masuk (P_{in}) sebesar 362,06 watt dengan daya luaran (P_{out}) memperoleh rata-rata sebesar 41,70 watt serta efisiensi hibridisasi memperoleh rata-rata sebesar 11,52%. Berdasarkan hasil pengolahan Tabel 3 maka dapat dibuat grafik pada Gambar 20 berikut ini.



Gambar 20 Kinerja hibridisasi PV+TEG rak terpisah.

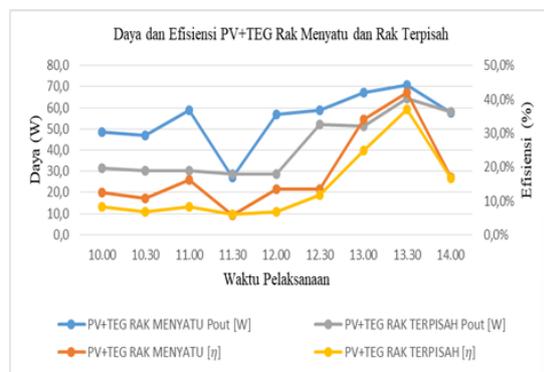
Pada Gambar 20 dapat dilihat bahwa panel surya menghasilkan daya keluaran (P_{out}) tertinggi terjadi pada pukul 12.00 WIB sebesar 13,99 watt dengan efisiensi panel surya yang dihasilkan sebesar 3,44%. Adapun nilai ini

mempengaruhi daya yang dihasilkan pada sistem hibridisasi PV+TEG, dapat dilihat pada waktu pelaksanaan yang sama daya keluaran yang dihasilkan pada sistem hibridisasi ini menghasilkan nilai sebesar 28,52 watt dan nilai efisiensi yang dihasilkan sebesar 6,78%. Penurunan efisiensi panel surya seiring dengan peningkatan temperatur jauh lebih cepat dibandingkan peningkatan daya yang dihasilkan oleh generator termoelektrik, karena rendahnya efisiensi yang diterima generator termoelektrik [52]. Hasil efisiensi hibridisasi yang diperoleh pada sistem rak menyatu dan rak terpisah ditunjukkan pada Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4 Kinerja hibridisasi PV+TEG sistem rak menyatu dan rak terpisah.

Pukul	PV+TEG Rak Menyatu		PV+TEG Rak Terpisah	
	Pout [W]	η	Pout [W]	η
10.00	48,4	12,5%	31,52	8,34%
10.30	47,1	10,7%	30,08	6,67%
11.00	59,0	16,3%	30,16	8,26%
11.30	27,0	5,8%	28,70	6,09%
12.00	56,7	13,5%	28,52	6,78%
12.30	58,7	13,5%	52,23	11,73%
13.00	67,2	34,0%	51,46	24,87%
13.30	70,6	41,9%	64,44	37,09%
14.00	57,7	16,8%	58,22	16,80%
Maksimum	70,6	41,9%	64,44	37,09%
Minimum	27,0	5,8%	28,52	6,09%
Rata-rata	54,7	18,3%	41,70	14,07%

Pada Tabel 4 hasil distribusi didapatkan berdasarkan daya keluaran dan efisiensi dari Tabel 2 dan Tabel 3. Berdasarkan hasil pengolahan Tabel 4 dapat dibuat grafik pada Gambar 21 berikut ini.



Gambar 21 Kinerja PV+TEG rak menyatu dan terpisah

Pada Gambar 21 dapat dilihat bahwa nilai dari efisiensi dengan sistem hibridisasi rak menyatu lebih besar dibandingkan dengan efisiensi hibridisasi sistem rak terpisah. Sistem PV+TEG yang dihibridisasi menghasilkan energi tambahan dibandingkan dengan sistem PV yang berdiri sendiri. TEG menyerap panas dari modul PV, yang meningkatkan efisiensi PV, dan TEG juga menyediakan energi tambahan dengan panas modul [49]. Hasil dari nilai tersebut dapat dilihat pada rata-rata efisiensi yang didapat pada Tabel 4. Nilai rata-rata efisiensi hibridisasi pada sistem rak menyatu sebesar 18,3 % dengan daya keluaran (P_{out}) yang dihasilkan sebesar 54,7 watt, dibandingkan nilai rata-rata dari efisiensi hibridisasi sistem rak terpisah hanya memperoleh 14,07 % dengan daya keluaran yang dihasilkan sebesar 41,70 watt. Berdasarkan Gambar 21 dapat dikatakan bahwa pengaruh penambahan generator termoelektrik sebagai sumber tenaga tambahan pada panel surya hibridisasi dikatakan memberikan pengaruh yang besar terhadap daya keluaran panel surya [51]. Perbedaan penempatan pada sistem generator termoelektrik pada kedua rak penelitian tersebut mempengaruhi pada hasil nilai efisiensi yang diperoleh.

5. SIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan pengujian, perhitungan, dan analisis serta pembahasan di atas, maka dapat diambil simpulan sebagai berikut: Pada hibridisasi sistem rak menyatu memperoleh daya maksimum sebesar 70,6 watt dengan efisiensi rata-rata sebesar 18,3 %. Sementara pada hibridisasi sistem rak terpisah memperoleh daya maksimum sebesar 64,44 watt dengan efisiensi rata-rata sebesar 14,07 %. Hasil penelitian mendapatkan bahwa sistem rak menyatu dan rak terpisah mempengaruhi efisiensi pada sistem hibrid panel surya dengan generator termoelektrik. Hibridisasi panel surya dengan generator termoelektrik dengan sistem rak menyatu memperoleh efisiensi rata-rata lebih besar dibandingkan sistem rak terpisah.

Pada penelitian eksperimental selanjutnya diharapkan untuk memakai alat sesuai dengan waktu yang ditentukan dengan kondisi cuaca yang tepat, sehingga pada pengambilan data yang diperoleh akurat.

DAFTAR REFERENSI

- [1] A. Yani, "Pengaruh Penambahan Alat Pencari Arah Sinar Matahari Dan Lensa Cembung Terhadap Daya Output Solar Cell," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 82–87, 2017.
- [2] Y. H. Anoi, A. Yani, and Y. W., "Analisis sudut panel solar cell terhadap daya output dan efisiensi yang dihasilkan," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 177–182, 2019.
- [3] D. Dzulfikar and W. Broto, "Optimalisasi Pemanfaatan Energi Listrik Tenaga Surya Skala Rumah Tangga," *Pros. Semin. Nas. Fis. SNF2016*, vol. 5, pp. 73–76, 2016.
- [4] A. Asrori and E. Yudiyanto, "Kajian Karakteristik Temperatur Permukaan Panel terhadap Performansi Instalasi Panel Surya Tipe Mono dan Polikristal," *FLYWHEEL J. Tek. Mesin Untirta*, vol. 1, no. 1, p. 68, 2019.
- [5] M. A. Pradana and M. Widartono, "Prototipe Pembangkit Listrik Termoelektrik Generator Menggunakan Penghantar Panas Alumunium, Kuningan dan Seng," *J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 40–51, 2014.
- [6] Rifky, A. Fikri, and M. Mujirudin, "Konversi Energi Termal Surya Menjadi Energi Listrik Menggunakan Generator Termoelektrik," *J. Kaji. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, pp. 60–65, 2021.
- [7] Mustofa, "Variasi Jarak Titik Fokus Cahaya Foton pada PV yang di Hibrid dengan TEG Menggunakan Pemisah Spektrum jenis Hot Mirror," *J. Arus Elektro Indones.*, vol. 8, no. 2, pp. 52–55, 2018.

- [8] R. Lamba and S. C. Kaushik, "Modeling and Performance Analysis of a Concentrated Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid Power Generation System," *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 288–298, 2016.
- [9] N. A. Putri, "Rancang Bangun Energi Terbarukan bagi Industri Pertahanan guna Mendukung Pelaksanaan Perang Berlarut," *Citiz. J. Ilm. Multidisiplin Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 216–222, 2022.
- [10] U. A. Saleh, M. A. Johar, S. A. Jumaat, M. N. Rejab, and W. A. W. Jamaludin, "Evaluation of a pv-teg hybrid system configuration for an improved energy output: A review," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 10, no. 2, pp. 385–400, 2021.
- [11] Sugeng S, "Rancang Undang-Undang Tentang Energi Baru dan Energi Terbarukan," *Pus. Stud. Huk. Energi dan Pertamb.*, p. 177, 2022.
- [12] A. Fudholi *et al.*, "Solar Drying Technology in Indonesia: an Overview," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 9, no. 4, p. 1804, 2018.
- [13] T. Alamsyah, A. Hiendro, and Z. Abidin, "Analisis Potensi Energi Matahari sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Panel Mono-Crystalline dan Poly-Crystalline di Kota Pontianak dan sekitarnya," *J. Tek. Elektron.*, p. 10, 2019.
- [14] M. T. Hasbullah, "Konversi Energi Surya," *Tek. Elektro FPTK*, 2012.
- [15] D. P. Dyah, "Sistem Monitoring Intensitas Radiasi Matahari," *Sekol. Tinggi Meteorol. Klimatologi dan Geofis.*, pp. 1–10, 2015.
- [16] C. A. Siregar, A. M. Siregar, and M. Daud, "Pemetaan Potensi Radiasi Matahari Berdasarkan Perhitungan Matematika di Sumatera Utara," *Semin. Nas. Teknol. Edukasi dan Hum.*, vol. 1, pp. 72–77, 2021.
- [17] Y. D. Arfita, "Pemanfaatan Energi Surya Sebagai Suplai Cadangan pada Laboratorium Elektro Dasar di Institut Teknologi Padang," *J. Pengabd. LPPM Untag Surabaya*, vol. 2, no. 3, pp. 20–28, 2019.
- [18] A. Widyakusuma and A. M. Zainoeddin, "Ruang Ibadah pada Bangunan Masjid Darul Ulum Pamulang Ditinjau dari Sisi Kenyamanan Termal," *J. Kalibr.*, vol. 5, no. 1, pp. 22–44, 2022.
- [19] S. Taufik, "Optimalisasi Daya Panel Surya Menggunakan Reflektor Cekung dan Cooling System sebagai Pengatur Suhu Panel Surya Terhadap Radiasi Matahari," 2019.
- [20] R. Hidayat *et al.*, "Modul Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Aplikasi Beban Rendah (600 W)," *J. INTEKNA Inf. Tek. dan Niaga*, vol. 17, no. 1, pp. 29–36, 2017.
- [21] M. Gatrisher and J. T. Elektro, "Pemanfaatan Energi Matahari Menggunakan Teknologi Solar Cell untuk Charger di Lingkungan Kampus Ist Akprind Yogyakarta," *J. Elektr.*, vol. 2, no. 1, pp. 75–74, 2015.
- [22] Suwarti, Wahyono, and B. Prasetyo, "Analisis Pengaruh Intensitas Matahari, Suhu Permukaan & Sudut Pengarah Terhadap Kinerja Panel Surya," *Eksergi*, vol. 14, no. 3, p. 78, 2019.
- [23] P. K. Tiyas and M. Widyartono, "Pengaruh Efek Suhu Terhadap Kinerja Panel Surya," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 1, pp. 1–6, 2020.
- [24] E. Roza and M. Mujirudin, "Perancangan Pembangkit Tenaga Surya Fakultas Teknik UHAMKA," *J. Kaji. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 16–30, 2019.

- [25] S. Satwiko, "Uji Karakteristik Sel Surya pada Sistem 24 Volt DC sebagai Catudaya pada Sistem Pembangkit Tenaga Hybrid," *Pros. Pertem. Ilm. XXVI HFI Jateng DIY*, 14, pp. 208–212, 2012.
- [26] R. Pido, S. Himran, and Mahmuddin, "Analisa Pengaruh Pendinginan Sel Surya Terhadap Daya Keluaran dan Efisiensi," *Teknologi*, vol. 19, no. 1, pp. 31–38, 2018.
- [27] K. Akhmad, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Penerapannya untuk Daerah Terpencil," *Din. Rekayasa*, vol. 1, no. 1, pp. 29–33, 2005.
- [28] S. Utami, "Implementasi Algoritma Perturb and Observe untuk Mengoptimasi Daya Keluaran Solar Cell Menggunakan MPPT," *J. INFOTEL Inform. - Telekomun. - Elektron.*, vol. 9, no. 1, pp. 92–99, 2017.
- [29] N. R. Alham, F. H. Rumawan, M. Muslimin, R. M. Utomo, and A. Maulana, "Aplikasi Photovoltaic Cell (PV) terhadap Variasi Beban Elektrik sebagai Energi Alternatif," *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 5, no. 2, pp. 123–129, 2021.
- [30] A. Julisman, I. D. Sara, and R. H. Siregar, "Prototipe Pemanfaatan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Pada Sistem Otomasi Stadion Bola," *Kitekro*, vol. 2, no. 1, pp. 35–42, 2017.
- [31] Z. Iqtimal, I. Devi, and Syahrizal, "Aplikasi Sistem Tenaga Surya sebagai Sumber Tenaga Listrik Pompa Air," *Kitekro J. Online Tek. Elektro*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [32] A. E. Putra, R. Rifky, and A. Fikri, "Pemanfaatan Panas Buang Atap Seng dengan Menggunakan Generator Termoelektrik sebagai Sumber Energi Listrik Terbarukan," *Pros. Semin. Nas. Teknoka*, vol. 3, no. 2502, p. 38, 2019.
- [33] Suwandi, "Implementasi DC/DC Boost Converter dengan Kontrol MPPT Perturb and Observe (P&O) sebagai Pengendali Daya Keluaran Thermoelectric Generator," Universitas Jember, 2017.
- [34] R. Rifky and Y. Sirodz, "Pengembangan Model Pendingin Kabin City Car Bertenaga Surya Menggunakan Photovoltaics (PV) dan Thermoelectric (TEC)," *Teknobiz J. Ilm. Progr. Stud. Magister ...*, vol. 10, no. 1, pp. 34–40, 2020.
- [35] Satria and G. Muhammad, "Rancang Bangun Energi Terbarukan dengan Mesin Pendingin," *J. Ilm. TEKNOBIZ*, vol. 5, no. 3, pp. 152–158, 2015.
- [36] S. C. Puspita, H. Sunarno, and B. Indarto, "Generator Termoelektrik untuk Pengisian Aki," *J. Fis. dan Apl.*, vol. 13, no. 2, pp. 84–87, 2017.
- [37] S. Ependi, N. Maharta, and E. Suyanto, "Pengembangan Perangkat Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik," *J. Pendidik. Fis.*, vol. 4, no. 1, pp. 37–46, 2016.
- [38] Vazri Muharom and Rifky, "Pengaruh Sifat Konduktivitas Termal Material Isolator (Kayu, Karet dan Styrofoam) terhadap Perpindahan Panas dan Daya Keluaran Sistem Generator Termoelektrik," *Met. J. Manufaktur, Energi, Mater. Tek.*, vol. 1, no. 1, pp. 8–15, 2022.
- [39] R. & A. Z. M. Sary, "Kaji Eksperimental Perpindahan Panas pada Lemari Penyimpan Darah Portable dengan Memanfaatkan Efek Peltier," *J. Tek. Mesin Unsyiah*, vol. 1, no. 2, p. 30, 2012.
- [40] S. N. Hutagalung and M. Panjaitan, "Pembelajaran Fisika Dasar Dan Elektronika Dasar (Arus, Hambatan Dan Tegangan Listrik) Menggunakan Aplikasi Matlab Metode Simulink," *J.*

- Ikat. Alumni Fis. Unimed*, vol. 4, no. 3, pp. 29–33, 2018.
- [41] N. Putra, R. A. Koestoer, M. Adhitya, A. Roekettino, and B. Trianto, “Potensi Pembangkit Daya Termoelektrik untuk Kendaraan Hibrid,” *MAKARA Technol. Ser.*, vol. 13, no. 2, pp. 53–58, 2010.
- [42] S. Kwon, Y. Kim, S. Lee, and J. C. Kim, “Measurement of The Figure-of-Merit of Thermoelectric Devices,” 2012.
- [43] A. H. Yavuz, C. Emeksiz, and O. Sönmez, “The Experimental Design of Thermoelectric Generator for Industrial Waste Heat Recovery,” *J. New Results Sci.*, vol. 5, no. 12, pp. 253–263, 2016.
- [44] G. J. Snyder and T. S. Ursell, “Thermoelectric Efficiency and Compatibility,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 91, no. 14, pp. 148301/1-148301/4, 2003.
- [45] S. Renge, Barhaiya, Yashika, S. Pant, and S. sharma, “A Review on Generation of Electricity using Peltier Module,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. V6, no. 01, pp. 453–457, 2017.
- [46] Rifky, Dan Mugisidi, W. Kuncoro, and M. Vazri, “Pemanfaatan Panas Matahari Pada Dinding Luar Bangunan Sebagai Sumber Energi Listrik Menggunakan Generator Termoelektrik,” in *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 107–15.
- [47] H. Lee, “Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells,” *Therm. Des. heat Sink. Thermoelectr. heat pipes, Compact heat Exch. Sol. cells*, vol. 91, no. 14, p. 10, 2022.
- [48] A. Lekbir, M. Meddad, A. Eddiai, S. Benhadouga, and R. Khenfer, “Higher-efficiency for combined photovoltaic-thermoelectric solar power generation,” *Int. J. Green Energy*, vol. 16, no. 5, pp. 371–377, 2019.
- [49] C. Babu and P. Ponnambalam, “The Theoretical Performance Evaluation of Hybrid PV-TEG System,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 173, no. April, pp. 450–460, 2018.
- [50] J. T. Jarman, E. E. Khalil, and E. Khalaf, “Energy Analyses of Thermoelectric Renewable Energy Sources,” *Open J. Energy Effic.*, vol. 02, no. 04, pp. 143–153, 2013.
- [51] H. Habiburosid, W. Indrasari, and R. Fahdiran, “Karakterisasi Panel Surya Hybrid Berbasis Sensor Ina219,” in *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2019*, 2019, vol. VIII, pp. SNF2019-PA-173–178.
- [52] R. Bjørk and K. K. Nielsen, “The Performance of A Combined Solar Photovoltaic (PV) and Thermoelectric Generator (TEG) System,” *Sol. Energy*, vol. 120, pp. 187–194, 2015.