

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Radiasi Matahari

Sumber utama energi berasal dari matahari. Setiap tahun, sekitar $3,9 \times 10^{24}$ Joule, setara dengan $1,08 \times 10^{18}$ kWh, energi matahari mencapai permukaan bumi. Jumlah ini sekitar 10000 kali lebih besar dari total kebutuhan energi primer global tahunan dan melebihi cadangan energi keseluruhan di bumi. Dengan kata lain, jika kita dapat menggunakan energi dari cahaya matahari dengan optimal sebanyak 10000 kali lipat, itu akan dapat memenuhi seluruh kebutuhan energi di masa depan (Setiawan & Muchammad, 2011).

Menurut (Setiawan & Muchammad, 2011) Radiasi matahari di luar atmosfer bumi memiliki intensitas yang bergantung pada jarak antara matahari dan bumi. Setiap tahun, jarak ini fluktuatif dalam kisaran antara 1.47×10^8 km dan 1.52×10^8 km. Akibatnya, intensitas radiasi E^0 bervariasi antara 1325 W/m^2 dan 1412 W/m^2 . Rata-rata nilai ini dikenal sebagai konstanta matahari.

2.1.2 Photovoltaic

Istilah '*photovoltaic*' terdiri dari dua kata, yaitu '*photo*' dan '*Volta*'. '*Photo*' berasal dari bahasa Yunani '*phos, photos*' yang berarti cahaya, sedangkan '*Volta*' mengacu pada nama fisikawan Italia Alessandro Volta

yang hidup antara tahun 1745-1827 dan berarti unit tegangan listrik. Jadi, secara sederhana, *photovoltaic* merujuk pada proses konversi langsung cahaya matahari menjadi energi listrik. Singkatnya, istilah *photovoltaic* sering disingkat sebagai PV (Setiawan & Muchammad, 2011).



Gambar 2.1 *Photovoltaic Cell*

Sumber : (Putranto et al., 2020)

Energi listrik dapat dihasilkan melalui suatu proses yang disebut *photovoltaic* (PV), yang mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Kata "*photo*" mengacu pada cahaya dan "*voltaic*" mengacu pada tegangan. Istilah ini digunakan untuk menjelaskan sel elektronik yang menghasilkan arus listrik searah dari radiasi matahari. (Putranto et al., 2020).

Kenaikan suhu sel surya merupakan masalah signifikan karena dapat menyebabkan penurunan efisiensinya, terutama pada sistem tenaga surya yang terfokus. Penurunan efisiensi listrik sekitar 0,2–0,5% untuk setiap kenaikan suhu sel sebesar 1°C dilaporkan terjadi karena adanya ketergantungan suhu terhadap tegangan sirkuit terbuka sel surya, tergantung pada bahan fotovoltaiik (PV). Properti PV ini dikenal sebagai koefisien suhu

sel PV. Tabel 2.1 menunjukkan koefisien suhu berbagai teknologi PV beserta efisiensi tipikal merek (Li et al., 2018). a

Tabel 2.1 Koefisien Suhu dan Efisiensi PV

No.	Teknologi	$T_{ref}(^{\circ}C)$	$\eta T_{ref}(\%)$	$\beta_{ref}(C^{-1})$
1.	Mono-cSi	25	16-24	0.0041
2.	Poly-cSi	25	14-18	0.004
3.	a-Si	25	4-10	0.011
4.	CIS	25	7-12	0.0048
5.	CdTe	25	10-11	0.00035

Sumber : (Li et al., 2018)

Penurunan efisiensi panel surya (PV) akibat kenaikan suhu dapat dianalisis menggunakan koefisien suhu efisiensi (β_{ref}) yang menggambarkan penurunan efisiensi relatif terhadap kenaikan suhu di atas suhu referensi (T_{ref}) (Aghaei et al., 2022). Persamaan pengaruh kenaikan suhu terhadap penurunan efisiensi PV ditunjukkan pada persamaan 2.1 berikut.

$$\eta(T) = \eta_{ref} \times [1 - \beta_{ref} \times (T - T_{ref})] \dots \dots \dots (2.1)$$

Di mana: $\eta(T)$ = Efisiensi pada suhu T (%)

η_{ref} = Efisiensi pada suhu referensi T_{ref} 25°C (%)

β_{ref} = Koefisien suhu (C^{-1})

T = Suhu operasi panel ($^{\circ}C$)

T_{ref} = Suhu referensi (25°C)

2.1.3 Spesifikasi Modul PV 50 watt

Tabel 2.2 Spesifikasi Sel PV *Monocrystalline*

Spesifikasi	Remark
Model	MS50M-36
Rated Maximum Power (Pm)	50W
Tolerance	0~+5%
Voltage at Pmax (Vmp)	20.88V
Current at Pmax (Imp)	2.40A
Open-circuit Voltage (Voc)	24.01V
Short-circuit Current (Isc)	2.51A
Normal Operating Cell Temp (NOCT)	47±2°C
Maximum System Voltage	1000V DC
Maximum Series Fuse Rating	10A
Operating Temperature	-40 to 85°C
Application Class	Class A
Fire Safety Class	Class C
Cell Technology	Mono
Weight	4.21kg
Dimension (mm)	610*580*35mm
All Technical data at standard test condition AM=1.5, E=1000w/m, TC=25°C	

Sumber : (www.maysunsolar.com)

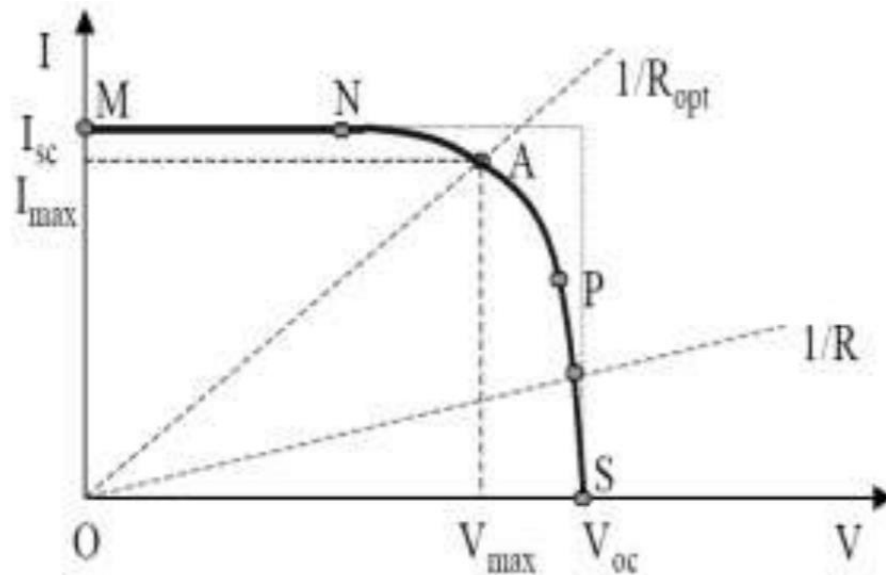
Tabel 2.3 Spesifikasi Sel PV *Polycrystalline*

Spesifikasi	Remark
Model	MS50P-30
Rated Maximum Power (P _m)	50W
Tolerance	0~+5%
Voltage at P _{max} (V _{mp})	18.00V
Current at P _{max} (I _{mp})	2.78A
Open-circuit Voltage (V _{oc})	20.70V
Short-circuit Current (I _{sc})	2.92A
Normal Operating Cell Temp (NOCT)	47±2°C
Maximum System Voltage	1500V DC
Maximum Series Fuse Rating	10A
Operating Temperature	-40 to 85°C
Application Class	Class A
Fire Safety Class	Class C
Cell Technology	Poly
Weight	3.8kg
Dimension (mm)	550*580*30mm
All Technical data at standard test condition AM=1.5, E=1000w/m, TC=25°C	

Sumber : (Homba et al., 2021)

Karakteristik arus dan tegangan sel surya dapat mengalami perubahan seiring perubahan intensitas cahaya matahari yang menyinari permukaan panel surya. Semakin besar intensitas cahaya, daya dan efisiensi yang dihasilkan juga semakin besar. Untuk memahami karakteristik arus dan tegangan pada sel surya dalam kondisi beban atau resistensi yang

bervariasi, dapat dilihat pada Gambar 2.2 yang menampilkan kurva karakteristik arus dan tegangan I-V di bawah ini. (Pido et al., 2019)



Gambar 2.2 Kurva Karakteristik Arus dan Tegangan I-V

Sumber : (Pido et al., 2019)

(Pido et al., 2019) menguraikan parameter yang digunakan untuk menentukan nilai keluaran pada sel surya, termasuk:

- a. Arus hubung singkat atau *short circuit current* (I_{sc}), yang merujuk pada arus keluaran maksimum pada kondisi tanpa resistansi (R), ketika tegangan (V) sama dengan 0.
- b. Tegangan hubung terbuka atau *open circuit voltage* (V_{oc}), yaitu kemampuan mencapai tegangan maksimum pada saat tidak ada arus mengalir.
- c. Daya maksimum (P_{max}) pada Gambar 2.2 ditemukan di titik A (V_{max} , I_{max}).

- d. Faktor pengisian atau *Fill Factor* (FF) adalah nilai mendekati konstanta untuk suatu sel surya tertentu. Jika nilai FF melebihi 0.7, menunjukkan bahwa sel surya tersebut memiliki performa yang lebih baik.

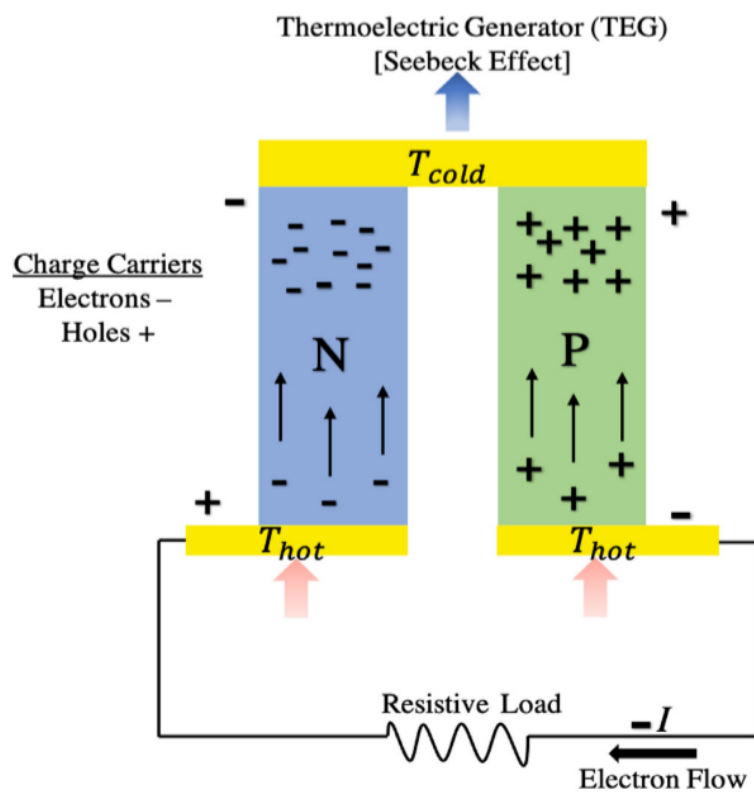
2.1.4 Bahan Semikonduktor

Bahan semikonduktor merupakan elemen dasar dalam komponen-komponen elektronika seperti transistor, IC, dan diode. Sebagai bahan dengan konduktivitas listrik yang berada di antara isolator dan konduktor, semikonduktor memiliki peran penting dalam domain elektronika. Keistimewaan semikonduktor terletak pada kemampuan konduktivitasnya yang dapat diubah-ubah dengan menambahkan materi lain, suatu proses yang umumnya dikenal sebagai doping. Penggunaan semikonduktor sangat luas, terutama setelah penemuan transistor pada akhir tahun 1940-an. Oleh karena itu, semikonduktor menjadi fokus studi yang intensif dalam fisika zat padat. Namun, penelitian ini akan memusatkan perhatian pada bahan semikonduktor termoelektrik (Peltier) (Wahyudi, 2019).

Bahan termoelektrik konvensional, yang umumnya berupa paduan semikonduktor atau kalkogenida, dapat dikategorikan ke dalam tiga optimum. Sebagai contoh, untuk aplikasi dengan rentang suhu kurang dari 150 °C, digunakan bahan berbasis Bi₂Te₃, untuk rentang suhu 150 hingga 500 °C, digunakan bahan TAGS [AgSbTe₂)_{1-x}(GeTe)_x] dan berbasis SiGe, sedangkan untuk suhu di atas 500 °C (Romanjek et al., 2015; Zoui et al., 2020). Spektrum suhu dapat diperluas dengan menggunakan campuran

bahan yang dibedakan oleh tingkat suhu dalam struktur yang tersegmentasi (Yatim et al., 2018).

2.1.5 Generator *Thermoelectric*



Gambar 2.3 Prinsip Kerja *Thermoelectric*

Sumber : (Jouhara et al., 2021)

Perbedaan suhu antara dua sisi generator adalah yang menentukan operasi TEG. Gambar 2.3 menjelaskan teori di balik TEG. Jika salah satu sisi dari sebuah potongan logam bisa dipanaskan sementara sisi lainnya didinginkan, elektron-elektron yang mengelilingi atom logam di sisi panas akan memiliki energi lebih tinggi daripada elektron yang setara di sisi yang lebih dingin. Ini berarti elektron-elektron panas akan memiliki energi kinetik lebih tinggi daripada mereka di sisi yang lebih dingin. Oleh karena

itu, elektron-elektron panas bergerak lebih cepat menuju sisi yang dingin daripada gerakan elektron-elektron dingin menuju sisi panas, dan akhirnya ujung dingin dari generator termoelektrik menjadi bermuatan negatif, sedangkan ujung panas bermuatan positif (Jouhara et al., 2018).

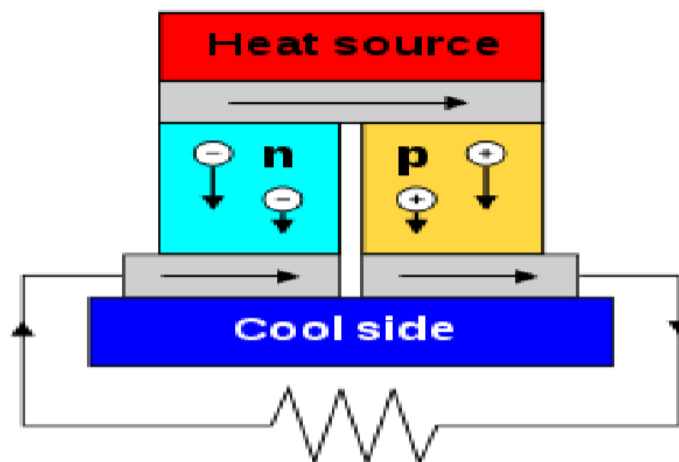
Kelemahan dari teknik ini adalah bahwa tegangan yang dihasilkan sangat kecil, dan ini tidak dapat diatasi dengan menghubungkan kelompok bagian logam secara berurutan, karena kawat yang digunakan untuk menghubungkannya, yang juga terbuat dari logam, akan menghasilkan tegangan dalam arah yang salah dan menentang tegangan yang dihasilkan pada bagian logam utama. Jadi, cara paling efektif untuk mengatasi masalah ini adalah dengan mengembangkan bahan yang dapat menghantarkan listrik menggunakan muatan positif (Jouhara et al., 2021).

Tegangan yang dihasilkan oleh elemen Peltier sejajar dengan gradien suhu. Elemen Peltier adalah suatu perangkat yang awalnya didasarkan pada prinsip Peltier, di mana arus listrik yang mengalir melalui sambungan dua jenis logam dapat menghasilkan perpindahan panas. Generator termoelektrik dimulai dari teori fisikawan Jerman bernama Thomas Johann Seebeck pada tahun 1826, yang menyatakan bahwa dua bahan semikonduktor berjenis berbeda, jika memiliki perbedaan temperatur (gradien) pada masing-masing permukaannya, akan menghasilkan tegangan (Wahyudi, 2019).

2.1.6 Efek Seebeck, Peltier, dan Thompson

a. Efek Seebeck

Mekanisme ini, dimana perbedaan suhu menghasilkan tegangan, dikenal sebagai efek termoelektrik atau efek Seebeck dan diyakini telah didefinisikan untuk pertama kalinya pada tahun 1820-an oleh fisikawan Jerman, Thomas Johann Seebeck. Namun, bukti terbaru menunjukkan bahwa Alessandro Volta juga telah mengamati efek Seebeck 27 tahun sebelum Thomas Seebeck (Jouhara et al., 2021).



Gambar 2.4 Skema Efek Seebeck

Sumber : (Wahyudi, 2019)

1) Koefisien Seebeck

Efek Seebeck menjelaskan akumulasi celah potensial (ΔV) melalui semikonduktor (atau konduktor) karena difusi pembawa muatannya melalui gradien suhu ($\Delta T = T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}}$). Ini terjadi pada substansi jika salah satu sisinya dipanaskan atau didinginkan. Koefisien Seebeck (S), yang bertanggung jawab untuk memungkinkan arus bergerak saat gradien suhu

ada, adalah hubungan antara diferensial teoritis yang dihasilkan dan gradien suhu yang diterapkan, sebagaimana terlihat pada Persamaan (2.1) (M. Naito & T. Yokoyama, 2018).

$$S = \frac{\Delta T}{\Delta V} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana : S = Koefisien Seebeck ($V/^{\circ}C$)

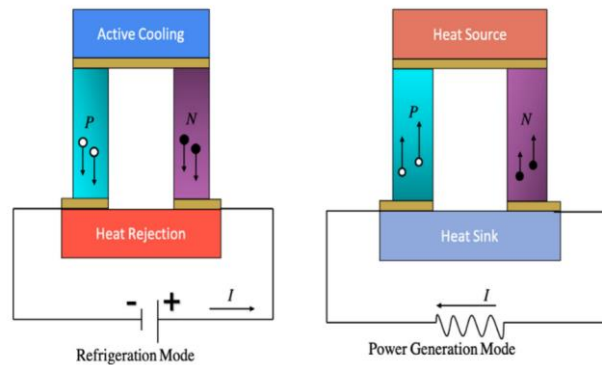
ΔT = Gradien suhu ($^{\circ}C$)

ΔV = Akumulasi celah potensial (V)

Gradien suhu (ΔT) harus dihasilkan antara dua sisi sampel, dan tegangan yang dihasilkan (ΔV) harus diukur dengan mengambil hubungan listrik dari dua titik (sisi) tersebut (Jouhara et al., 2021).

b. Efek Peltier

Seperti yang disebutkan sebelumnya, pada tahun 1821, Thomas Seebeck, seorang fisikawan Jerman, melakukan sejumlah uji coba tentang listrik dan menemukan bahwa listrik dapat berfungsi melalui suatu rangkaian yang terdiri dari dua konduktor terpisah, asalkan sambungan di mana konduktor-konduktor ini terhubung dijaga pada suhu yang berbeda. Namun, Seebeck tidak dapat menjelaskan hipotesis empiris yang sebenarnya di balik proses ini dan keliru menyimpulkan bahwa aliran panas menghasilkan hasil yang sama seperti aliran energi (Rowe. D, 2012)



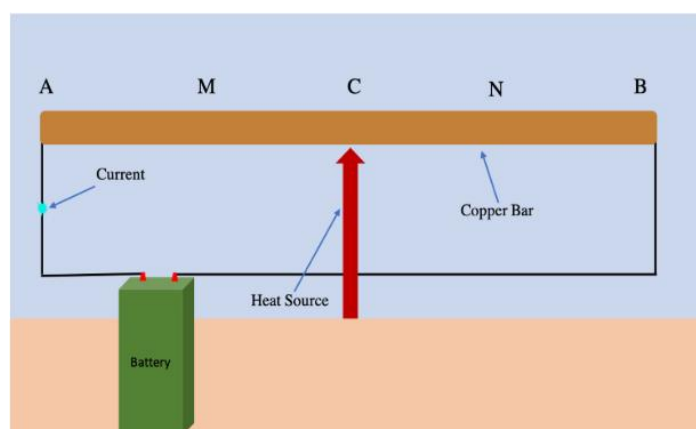
Gambar 2.5 Generator Peltier dan Pendingin Peltier (Efek Peltier)

Sumber : (K. Jurgen & Buschow, 2001)

c. Efek Thompson

Thomson menyatakan bahwa saat arus melewati konduktor yang dipanaskan secara tidak merata, energi termal entah dikonsumsi atau terbentuk dalam struktur logam 32 . Dengan kata lain, efek Thomson adalah pembentukan panas yang dapat dibalikkan ketika arus listrik melewati bahan konduktif yang dikenai gradien suhu (Jouhara et al., 2021).

1) Efek Thompson Positif dan Negatif



Gambar 2.6 Demonstrasi Efek Thompson

Sumber : (Jouhara et al., 2021)

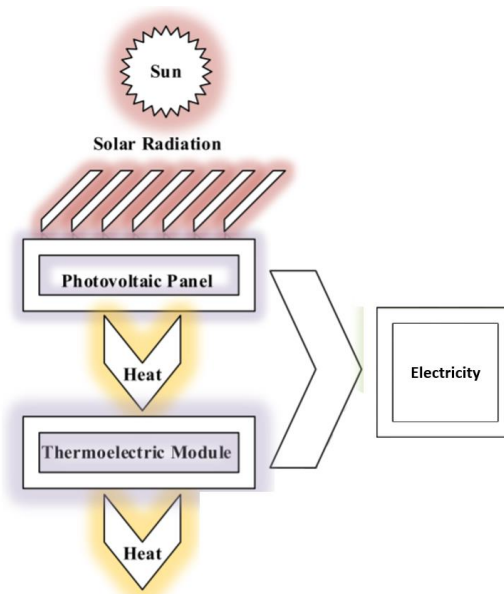
Gambar 2.6 menunjukkan sebuah batangan tembaga, sebagaimana ditunjukkan dari titik A ke B yang dipanaskan di tengah-tengah pada titik C. Ketika tidak ada arus yang mengalir melalui batang, titik M dan N, yang berjarak sama dari C, berada pada suhu yang sama. Namun, ketika arus mengalir dari titik A ke B, titik N menunjukkan suhu yang lebih tinggi dibandingkan titik M. Demikian pula, suhu titik B akan lebih tinggi daripada titik A. Dalam hal ini, dengan aliran arus, dapat diasumsikan bahwa panas diserap dari titik A ke C dan dipancarkan dari titik C ke B. Hal ini dikenal sebagai efek Thomson positif dan efek serupa diamati pada kasus Antimon, Perak, Seng, dan Kadmium. Sebaliknya, pada kasus besi, ketika batang dipanaskan pada titik C dan arus mengalir dari A ke B, suhu di titik M menjadi lebih tinggi daripada di titik N, yang berarti bahwa panas berpindah dari titik C ke titik A dan dikeluarkan dari titik C ke titik B, yaitu efek Thomson negatif. Efek serupa teramati pada kasus Platinum, Bismut, Kobalt, Nikel, dan Merkuri (Jouhara et al., 2021).

2) Koefisien Thompson

Sebagai ukuran dari efek ini, jumlah panas yang diserap atau dilepaskan ketika satu ampere arus mengalir selama satu detik (yaitu satu Coulomb) dalam sebuah logam antara dua titik yang memiliki perbedaan suhu satu derajat Celsius disebut sebagai koefisien Thomson (Y. Demirel, 2007).

2.2 Sistem *Photovoltaic-Thermoelectric Generator (PV-TEG)* Terintegrasi

Teori dan teknologi sistem PV-TEG datar telah dibahas dan dikembangkan secara luas selama beberapa tahun terakhir. Selain itu, berbagai bahan untuk PV dan TEG telah digunakan, dan metodologi peningkatan efisiensi telah dipelajari. Telah diselidiki secara eksperimental kelayakan penggunaan generator termoelektrik dalam sistem hibrid non-konsentrasi. Menurut hasil mereka, keluaran generator termoelektrik secara linear tergantung pada suhu antara pelat termoelektrik yang panas dan dingin dan mencapai sekitar 4% pada perbedaan suhu 155°C . Selain itu, pembangkitan daya berbanding lurus dengan perbedaan suhu dengan daya dua. Analisis efisiensi biaya menunjukkan bahwa biaya modul PV dan TEG akan sama jika perangkat tersebut digunakan pada tingkat industri. (Marandi et al., 2018).



Gambar 2.7 Diagram Sistem *Hybrid PV-TEG*

Sumber : (Li et al., 2018)

Cahaya matahari dan kalor diserap oleh PV dan cahaya matahari tersebut dikonversi menjadi energi listrik. Energi yang dihasilkan PV akan berkurang seiring naiknya suhu yang diterima PV yang berkurangnya nilai efisiensi PV. Untuk meminimalisir berkurangnya efisiensi PV yang disebabkan kenaikan suhu, dipasanglah modul TE untuk menyerap kalor dan merubahnya menjadi energi listrik.

Modul TE memiliki dua sisi kerja yaitu sisi panas dan sisi dingin dimana sisi panas ini ditempatkan dengan panel PV untuk menyerap kalor pada panel PV dan merubahnya menjadi energi listrik. Modul TE bekerja dengan merubah energi kalor menjadi energi listrik dimana semakin besar selisih nilai suhu antara dua sisi (sisi panas dan sisi dingin), maka semakin besar pula energi listrik yang dapat dihasilkan. Oleh karena itu, untuk membuat jarak nilai suhu antara dua sisi modul TE ini, dipasanglah *heatsink* untuk menyerap kalor pada sisi dingin modul TE dan melepaskannya ke udara.

2.2.1 Karakteristik Generator PV-TEG

a. Daya Masuk (P_o)

Daya adalah besaran yang diturunkan dari nilai tegangan dan arus sehingga nilai tegangan dan arus yang dihasilkan merupakan bagian dari kelistrikan yang dimiliki oleh sel surya (Pido et al., 2019).

Menurut (Sinaga & Beily, 2019) Luaran daya modul PV yang merupakan arus hubung singkat (I_{sc}) berbanding lurus dengan tegangan

rangkaian terbuka (V_{oc}) sehingga daya keluaran PV (P_o) dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_o = I_{sc} \times V_{oc} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana : P_o = Daya keluaran (W)

I_{sc} = Arus hubung singkat (A)

V_{oc} = Tegangan rangkaian terbuka (V)

b. Daya Maksimum

Daya maksimum (P_m) diperoleh dengan arus dan tegangan pada setiap titik A kurva I-V pada gambar 2.2. Secara grafis daya maksimum pada sel surya berada pada puncak yang memiliki luas terbesar. Titik puncak tersebut dapat disebut *maximum power point* (MPP) (Pido et al., 2019).

Daya maksimum dari sel surya dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$P_m = V_m \times I_m \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana : P_m = Daya maksimal keluaran (W)

V_m = Tegangan maksimum (V)

I_m = Arus maksimum (A)

c. Daya Masuk

Daya masuk (P_i) diperoleh dari perkalian antara intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas area sel surya (Pido et al., 2019).

Menurut Sinaga & Beily(2019), besaran daya radiasi matahari yang masuk sebagai daya masukan PV dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_i = SR \times A_{SPV} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana : P_i = Daya masukan PV (W)

A_{spv} = Luas permukaan PV (m²)

SR = Radiasi matahari (W/m²)

d. Faktor Pengisi

Faktor pengisi adalah ukuran kualitas dari sel surya dapat diketahui dengan membandingkan daya maksimum teoritis dan daya output pada tegangan rangkaian terbuka dan hubungan pendek. Factor pengisi yaitu parameter yang menyatakan seberapa besar $V_{oc} \times I_{sc}$ dari daya maksimum $V_m \times I_m$ yang dihasilkan sel surya (Pido et al., 2019).

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana : FF = Factor pengisi

V_m = Tegangan maksimum (V)

I_m = Arus maksimum (A)

V_{oc} = Rangkaian tegangan terbuka (V)

I_{sc} = Arus hubung singkat (A)

e. Daya Keluar Berbeda

Daya keluaran (P_o) pada sel surya yaitu besaran nilai dari hasil perkalian antara tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) dengan arus hubung singkat (I_{sc}) dan factor pengisi (FF) yang dihasilkan oleh sel surya dapat dihitung dengan persamaan berikut (Pido et al., 2019).

$$P_o = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana : P_o = Daya keluaran (watt)

I_{sc} = Arus hubung singkat (A)

V_{oc} =Tegangan rangkaian terbuka (V)

FF = Faktor pengisi

f. Efisiensi

Temperatur permukaan modul memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi eksergi tetapi tidak berpengaruh terhadap efisiensi energi. Efisiensi energi relative konstan yaitu berkisar antara 19,6% sampai 19,0%. Sebaliknya efisiensi eksergi cukup fluktuatif yaitu berkisar antara 42,09% sampai 54,19% (Homba et al., 2021).

Polycrystalline Cell merupakan kristal yang banyak macamnya, terbuat dari kristal silicon dengan efisiensi 10-12 persen (Pido et al., 2019). Menurut Beeri et al., (2015), Jumlah nilai daya keluaran P_{hybrid} , dan nilai efisiensi η_{hybrid} dari system *hybrid* PV-TEG adalah sebagai berikut.

$$P_{hybrid} = P_{PV} + P_{TE} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana : P_{hybrid} = Daya keluaran PV-TEG *hybrid* (W)

P_{PV} = Daya keluaran modul PV (W)

P_{TE} = Daya keluaran modul TE (W)

Efisiensi modul PV dapat dihitung dengan persamaan :

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana : η = Nilai efisiensi (%)

P_o = Daya keluaran (W)

$$P_i = \text{Daya masukan (W)}$$

Sedangkan untuk nilai efisiensi PV-TE dapat dihitung dengan persamaan :

$$\eta_{hybrid} = \frac{P_{hybrid}}{P_i} \times 100\% \dots \dots \dots (2.10)$$

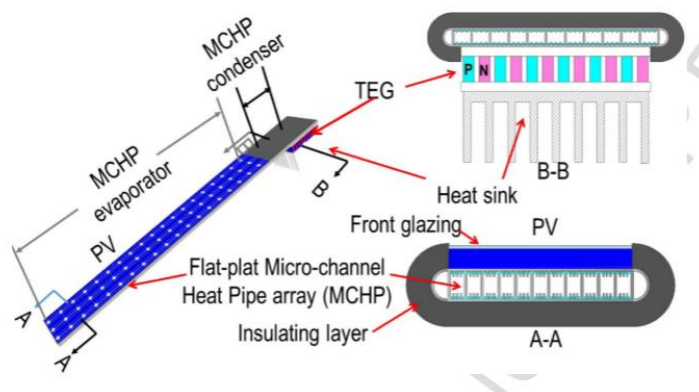
Dimana : η_{hybrid} = Efisiensi PV-TEG *hybrid* (%)

P_{hybrid} = Daya keluaran PV-TEG *hybrid* (W)

P_i = Daya masukan (W)

2.2.2 Micro Channel Heat Pipe (MCHP)

Li et al., (2016) merancang sistem PV-TE yang baru menggunakan Pipa Panas Mikro-Channel (MCHP) dengan pelat datar yang dapat mengurangi jumlah TEG yang digunakan. Modul PV dalam sistem ini terpasang di permukaan atas evaporator MCHP, sementara modul TE terpasang di permukaan bawah kondensor. Selama operasi, energi surya dikenakan pada modul PV yang terletak di permukaan atas evaporator MCHP, kemudian energi termal disalurkan ke kondensor MCHP melalui penguapan fluida kerja di dalam MCHP. Pada kondensor, panas dibuang melalui kondensasi fluida kerja MCHP, dan panas ini kemudian ditransfer ke modul TE yang terpasang. Konfigurasi ini secara signifikan mengurangi jumlah modul TEG yang digunakan dan juga mengurangi sebagian besar biaya, sehingga menunjukkan keunggulannya dibandingkan dengan sistem TE tanpa pipa panas berturut-turut.



Gambar 2.8 Diagram Skema Sistem PV-TEG dengan MCHP

Sumber : (Li et al., 2016)

2.2.3 *Heatsink dan Coldsink*

a. *Heatsink*

Heatsink ini merupakan suatu logam dengan desain khusus yang terbuat dari aluminium atau tembaga, berfungsi untuk memperluas proses transfer panas. Pada komponen-komponen CPU yang umumnya digunakan untuk menyerap panas ini biasanya terbuat dari aluminium, seringkali dikombinasikan dengan penggunaan kipas pada *heatsink* untuk meningkatkan penyerapan panas. Tujuan utamanya adalah mengalirkan panas dari heatsink ke luar CPU, mengoptimalkan penyerapan panas dan meningkatkan kinerja komputer. *Heatsink* juga membantu meningkatkan pelepasan panas pada sisi yang lebih dingin, sehingga meningkatkan efisiensi modul tersebut. Potensi pembangkitan daya dari modul termoelektrik tunggal bervariasi tergantung pada ukuran, konstruksi, dan perbedaan temperaturnya (Wahyudi, 2019).

Gambar 2.9 *Heatsink*

Sumber : (Wahyudi, 2019)

b. *Coldsink*

Coldsink adalah objek yang digunakan untuk mengurangi suhu pada peralatan elektronik tertentu, khususnya pada IC, CPU, dan Peltier. Fungsinya serupa dengan heatsink, yakni menyerap panas, tetapi perbedaannya terletak pada penggunaannya. *Heatsink* digunakan untuk mengalirkan panas ke peltier, sementara *coldsink* digunakan untuk menurunkan atau bahkan menghilangkan suhu panas pada peltier. Tujuannya adalah menjaga perbedaan suhu pada peltier agar tetap optimal, sehingga energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih efisien dan peltier tidak mengalami kelebihan panas (Wahyudi, 2019).

Gambar 2.10 *Coldsink*

Sumber : (Wahyudi, 2019)

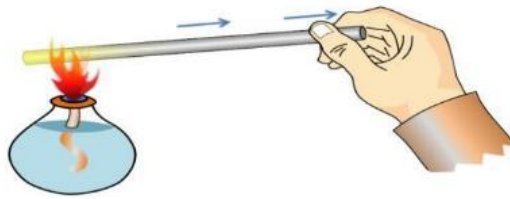
2.2.4 Panas

Panas merupakan bentuk energi yang erat kaitannya dengan gerakan atau getaran molekul. Molekul, sebagai partikel dari suatu benda, akan bergerak dengan cepat saat benda dipanaskan dan bergerak lebih lambat saat didinginkan. Perpindahan panas terjadi karena adanya perbedaan suhu pada suatu benda. Ketika panas diambil dari benda, suhu benda tersebut akan menurun. Semakin banyak panas yang diambil, suhu benda akan semakin rendah, namun suatu titik -273°C (nol absolut) menandai batas terendah yang tidak dapat dicapai. Dalam dunia ilmiah, titik ini dikenal sebagai nol absolut atau 0°K (Wahyudi, 2019).

Perpindahan panas terjadi karena adanya perbedaan suhu, di mana energi panas mengalir dari benda yang memiliki suhu tinggi ke benda yang memiliki suhu lebih rendah (Wahyudi, 2019).

a. Perpindahan Panas Secara Konduksi

Perpindahan panas melalui konduksi terjadi ketika panas berpindah antara benda atau partikel yang berkontak langsung satu sama lain tanpa adanya pergerakan relatif di antara mereka. Proses ini terjadi saat panas mengalir dari daerah dengan suhu tinggi ke daerah dengan suhu rendah. Hukum Fourier digunakan untuk menyatakan laju perpindahan panas dalam konduksi. Prinsip perpindahan panas konduksi pada dinding pelat dapat diilustrasikan melalui gambar (Wahyudi, 2019).

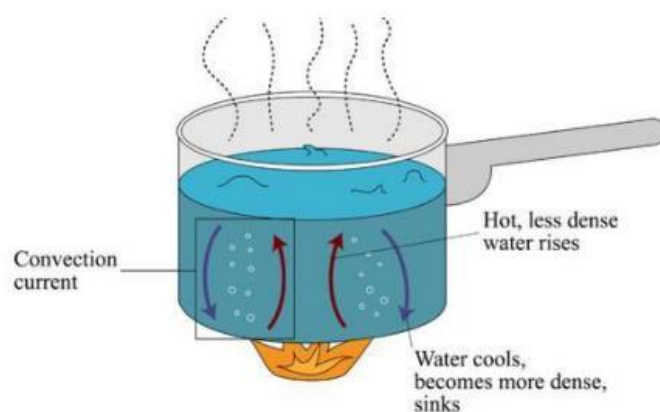


Gambar 2.11 Perpindahan Panas Secara Konduksi

Sumber : (Wahyudi, 2019)

b. Perpindahan Panas Secara Konveksi

Perpindahan panas melalui konveksi terjadi ketika panas berpindah antara permukaan suatu benda padat dan fluida (cairan atau gas) yang mengalir dan menyentuh permukaan tersebut. Contohnya adalah panas atau dingin pada dinding pipa logam yang dipengaruhi oleh aliran fluida panas atau dingin di dalamnya. Konveksi paksa terjadi ketika aliran udara disebabkan oleh suatu blower, sedangkan konveksi alami terjadi ketika aliran disebabkan oleh gradien massa jenis (Wahyudi, 2019).

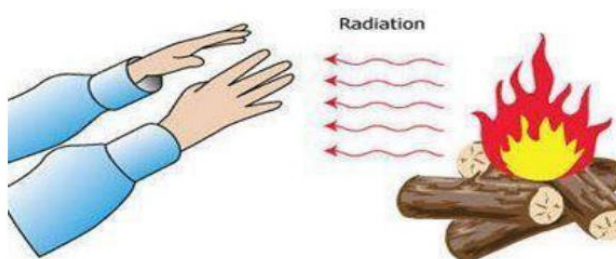


Gambar 2.12 Perpindahan Panas Secara Konveksi

Sumber : (Wahyudi, 2019)

c. Perpindahan Panas Secara Radiasi

Perpindahan panas melalui radiasi terjadi antara dua permukaan tanpa adanya media perantara. Contohnya adalah perpindahan panas antara matahari dan mobil berwarna hitam yang terparkir di tempat yang terik. Pada proses ini, udara tidak berfungsi sebagai perantara karena suhu udara di sekitar mobil lebih rendah daripada suhu mobil itu sendiri (Wahyudi, 2019).



Gambar 2.13 Perpindahan Panas Secara Radiasi

Sumber : (Wahyudi, 2019)

2.3 Penelitian Terkait dan Kebaruan Penelitian

Tabel 2.4 Penelitian Terkait

No.	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
1.	Pemanfaatan <i>Solar Cell</i> Dan <i>Thermoelectric Generator</i> (Teg) Sebagai Sumber Energi Listrik Lampu Penerangan Jalan 50 Watt	Cahaya matahari sebagai sumber energi panas dimanfaatkan <i>solar cell</i> dan <i>thermoelectric generator</i> (TEG) yang dapat membangkitkan	Penelitian ini membahas penggabungan antara teknologi PV sebagai pembangkit listrik tenaga matahari dan modul Peltier sebagai pembangkit listrik tenaga kalor.	Metode penggabungan kedua jenis teknologi pembangkit energi listrik berbeda, peruntukan penggunaan alat berbeda, dan perencanaan

		energi listrik untuk pengisian baterai. Dari hasil pengujian antara solar cell dan thermoelectric generator (TEG) dengan beban maksimal pada pembangkit listrik tenaga surya diperoleh efisiensi 84,4 %.		rancang bangun alat juga berbeda.
2.	<i>Hybrid photovoltaic-thermoelectric system for concentrated solar energy conversion: Experimental realization and modeling</i>	Dalam penelitian ini, sebuah demonstrator hibrid PV-TEG berdasarkan arsitektur CMJ diselidiki secara eksperimental dan teoretis. Dengan menggunakan sel PV MJ yang tersedia secara komersial dan TEG, efisiensi sistem hibrid mencapai 32%. Kontribusi listrik langsung dari TEG terhadap efisiensi sistem hibrid ditingkatkan dengan peningkatan	Penelitian ini membahas penggabungan antara teknologi PV sebagai pembangkit listrik tenaga matahari dan modul Peltier sebagai pembangkit listrik tenaga kalor.	Penelitian ini bukan hanya melakukan upaya peningkatan dari konversi suhu, tetapi juga melakukan upaya optimasi dengan memaksimalkan konsentrasi sinar matahari pada sel surya. Bahan <i>heatsink</i> dan <i>coldsink</i> yang digunakan berbeda, yaitu menggunakan lempengan jenistembaga. Jenis PV yang digunakan berbeda, yaitu

		konsentrasi matahari dan suhu, mencapai nilai maksimal hampir 20% untuk konsentrasi matahari ~300.		menggunakan PV jenis MJ.
3.	<i>Optimal design method for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system</i>	1. Nilai minimum angka kualitas dari generator termoelektrik dapat digunakan untuk mengevaluasi kelayakan sistem hibrid fotovoltaiik-thermoelektrik berfokus dan memilih perangkat penghubung. 2. Penggunaan generator termoelektrik yang lebih efisien disarankan dalam sistem hibrid ketika efisiensi referensi atau koefisien suhu efisiensi sel fotovoltaiik menjadi lebih besar. 3. Efisiensi total dari sistem hibrid fotovoltaiik-thermoelektrik berfokus dapat	Penelitian ini membahas penggabungan antara teknologi PV sebagai pembangkit listrik tenaga matahari dan modul Peltier sebagai pembangkit listrik tenaga kalor.	Perbedaan dari penelitian ini adalah menggunakan system <i>concentrating photovoltaic</i> . Metode yang digunakan untuk memperoleh nilai efisiensi yang optimal berbeda.

		dioptimalkan dengan menghitung distribusi suhu optimal. Selain itu, penyesuaian hambatan termal termoelektrik dapat menjaga sistem hibrid beroperasi pada distribusi suhu optimal. 4. Suhu optimal fotovoltaiik dan hambatan termal termoelektrik optimum menurun dengan peningkatan koefisien suhu efisiensi fotovoltaiik tetapi meningkat dengan peningkatan angka kualitas termoelektrik. 5. Koefisien perpindahan panas konvektif dari sistem pendingin memiliki sedikit dampak pada suhu optimal fotovoltaiik ketika koefisien suhu efisiensi fotovoltaiik kecil.		
--	--	---	--	--

		Generator termoelektrik dengan hambatan termal yang lebih besar sebaiknya digunakan sambil meningkatkan kondisi pendinginan sistem hibrid. 6. Sel fotovoltaik sebaiknya dijaga pada suhu yang lebih rendah ketika sel fotovoltaik dengan efisiensi referensi yang lebih besar digunakan untuk penggabungan.		
4.	<i>An integrated design of the photovoltaic-thermoelectric hybrid system</i>	1. Piringan keramik dan piring tembaga dalam sistem PV-TE konvensional dihilangkan untuk mengurangi total hambatan termal. Elektroda TE diubah desainnya untuk menggantikan peran piring keramik dan piring tembaga. Hasil pengujian menunjukkan bahwa desain ini	Penelitian ini membahas pembuatan rancang bangun menggunakan sebuah konsep terintegrasi untuk meningkatkan system PV-TEG.	Pada penelitian ini dilakukan desain ulang pada elektroda TEG dengan melepas pelat keramik dan pelat tembaga. PV yang digunakan disusun dengan struktur tipe-V untuk meningkatkan efisiensi penyerapan optik.

		secara efektif dapat meningkatkan efisiensi TE dengan meningkatkan transfer panas. 2. Dengan tujuan meningkatkan absorpsi sinar matahari, struktur datar dari sistem PV-TE konvensional diganti dengan struktur tipe V. Alur tipe V terbukti sebagai metode yang baik untuk meningkatkan efisiensi absorpsi optik, sehingga peningkatan yang jelas dalam efisiensi PV-TE dapat diperoleh dengan menggunakan alur tipe V.		
5.	<i>Conceptual development of a novel photovoltaic-thermoelectric system and preliminary economic analysis</i>	Secara keseluruhan, sistem PV-TE baru memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan sistem PV-TE konvensional dan	Penelitian ini membahas penggabungan <i>hybrid</i> antara teknologi PV sebagai pembangkit listrik tenaga matahari dan modul Peltier sebagai	Penelitian ini menggunakan <i>flat plate micro-channel</i> sebagai teknologi distribusi kalor guna meningkatkan nilai keluaran listrik.

		sistem PV: (a) Pipa panas mikro-channel dapat mengurangi jumlah TEG dan menghemat biaya secara signifikan dibandingkan dengan sistem PV-TE konvensional; (b) Pipa panas mikro-channel memiliki kinerja transfer panas yang lebih tinggi daripada pipa panas biasa, sehingga sistem baru memiliki kinerja transfer panas yang tinggi; (c) Struktur pelat datar dari pipa panas mikro-channel dapat dilaminasi dengan PV dan TE dengan baik dan mengurangi hambatan termal kontak secara signifikan antara keduanya; (d) Gradien suhu rendah dapat menjaga keluaran listrik tinggi dari	pembangkit listrik tenaga kalor.	Penelitian ini melakukan analisis ekonomi terhadap teknologi yang dikembangkan. Model matematika yang digunakan pada penelitian ini berbeda.
--	--	--	---	---

		PV dan TE; (e) Dibandingkan dengan sistem PV konvensional, PV-TE memiliki kinerja keluaran dan nilai ekonomi yang lebih tinggi.		
6.	<i>Experimental optimization of operating conditions for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system</i>	Dalam makalah ini, disediakan proses optimisasi eksperimental yang komprehensif dari sistem hibrid fotovoltai-thermoelektrik berfokus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa memperbesar daya masukan total dan resistansi termal termoelektrik adalah cara kritis untuk meningkatkan kemampuan sistem hibrid fotovoltai-thermoelektrik berfokus. Mengoptimalkan sirkuit beban perangkat penghubung dan	Penelitian ini membahas penggabungan <i>hybrid</i> antara teknologi PV sebagai pembangkit listrik tenaga matahari dan modul Peltier sebagai pembangkit listrik tenaga kalor.	Penelitian ini menggunakan teknologi <i>water cooling block</i> sebagai system pendingin modul <i>thermoelectric</i> . Penelitian ini juga menggunakan teknologi PV yang berbeda, yaitu <i>concentrating photovoltaic</i> yang terdiri dari dua konsentrator.

		menggunakan mode koneksi seri juga penting untuk kinerja hibrid yang lebih tinggi. Sistem hibrid fotovoltaik-thermoelektrik berfokus terbukti lebih unggul dibandingkan sistem fotovoltaik berfokus untuk perangkat penghubung yang digunakan saat ini. Daya keluaran yang dioptimalkan dari sistem hibrid fotovoltaik-thermoelektrik berfokus adalah 1,50 W, sedangkan sistem fotovoltaik berfokus hanya 1,38 W. Pemanfaatan penghubung meningkatkan pembangkitan listrik matahari sebesar 8,7%, dan ini akan lebih signifikan saat beroperasi pada rasio konsentrasi		
--	--	---	--	--

		optik yang lebih tinggi atau menggunakan modul termoelektrik dengan resistansi termal yang lebih besar. Pekerjaan masa depan akan difokuskan pada peningkatan lebih lanjut kinerja sistem hibrid fotovoltaiik-thermoelektrik berfokus dan evaluasi stabilitas sistem.		
--	--	--	--	--