

**PENGEMBANGAN MODEL PENDINGIN KABIN *CITY CAR*
BERTENAGA SURYA MENGGUNAKAN *PHOTOVOLTAICS*
SYSTEM (PV) DAN *THERMOELECTRIC COOLER (TEC)***

TESIS

OLEH

RIFKY

5315220028



**diajukan untuk melengkapi sebagian
persyaratan menjadi Magister Teknik**

**Program Magister Teknik Mesin
UNIVERSITAS PANCASILA
2020**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul:

Pengembangan Model Pendingin Kabin *City Car* Bertenaga Surya

Menggunakan *Photovoltaics System (PV)* dan *Thermoelectric Cooler (TEC)*

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Program Strata II Universitas Pancasila, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tesis yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapat gelar Sarjana di Lingkungan Universitas Pancasila maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 11 Februari 2020



Rifky
5315220028

Hak Cipta milik Universitas Pancasila, tahun 2020

Hak Cipta dilindungi undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebut sumber
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Penulisan tidak merugikan kepentingan MTM-UP yang wajar.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa ijin MTM-UP.



**PERSETUJUAN KOMISI PEMBIMBING
DIPERSYARATKAN UNTUK TESIS**

Pembimbing



(Dr. Ir. Yogi Sirodz Gaos, M.T.)

PERSETUJUAN PANITIA UJIAN MAGISTER




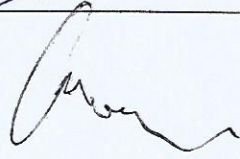


NAMA	TANDA TANGAN	TANGGAL
Dr. Ismail, S.T., M.T. (Ketua)		11/01/2020
Dr. Ir. La Ode M. Firman, M.T. (Sekretaris)		11/01/2020
Nama	: Rifky	
No. Pokok	: 5315220028	
Tgl. Lulus	:	

BUKTI PENGESAHAN PERBAIKAN TESIS

Nama : Rifky

No. Reg : 5315220028

Program Studi : Magister Teknik Mesin

NO.	NAMA	TANDA TANGAN	TANGGAL
1.	Pembimbing Dr. Ir. Yogi Sirodz Gaos, M.T.		12-02-2020
2.	Kaprog Dr. Ismail, M.T.		15/02/2020
3.	Sekprog Dr. Ir. Laode M. Firman, M.T.		1/2-2020
4.	Penguji I Dr. Ir. Iskendar, M.S.		1/2 2020
5.	Penguji II Dr. Ir. Laode M. Firman, M.T.		1/2 2020
6.	Penguji III Dr. Ir. Dwi Rahmalina, M.T.		4/2-2020

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, sebuah kata syukur yang pantas penulis ucapkan atas selesainya penelitian sekaligus penulisan tesis Program Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila. Selain itu penulis perlu berterima kasih kepada sejumlah orang yang memberi kontribusi atas kebahagiaan ini. Hj. Nasuha, ibunda yang mengajarkan kesabaran dan ketabahan dalam mengarungi hidup dan kehidupan, dan dengan doanya penulis mendapatkan tambahan energi dalam masa-masa riset. H. Muhammad Ishak (alm.), ayahanda sekaligus guru utama dan pertama penulis sehingga penulis dapat mengerti huruf Arab dan Latin (dapat mengaji dan membaca) yang semasa kuliah beliau memotivasi, sehingga tesis ini menjadi persembahan bakti ke mendiang. Cholillah, S.Pd., istri tercinta penulis yang sangat pengertian dan ikhlas ketika waktu kebersamaan dengannya telah penulis sita dan gunakan untuk keperluan ini. Bapak Dr. Ir. Yogi Sirodz Gaos, M.T., dosen pembimbing yang sabar dan terbuka dalam berdiskusi, yang telah menyempatkan waktu sibuknya yang luar biasa untuk memberi bimbingan dan konsultasi. Ucapan terima kasih baik mewakili institusi maupun secara personal, penulis haturkan kepada Bapak Dr. Ismail, M.T., yang memberi motivasi dan berkontribusi besar dalam monitoring kemajuan proses penyelesaian tesis ini.

ABSTRAK

Energi radiasi matahari terdiri dari energi radiasi panas dan energi radiasi cahaya. Energi panas matahari sudah dimanfaatkan sejak lama pada proses pengeringan, sementara energi cahaya matahari baru dimanfaatkan kemudian melalui teknologi fotovoltaik. Sistem fotovoltaik ini memanfaatkan energi radiasi matahari untuk menjadi energi listrik secara langsung, sedangkan termoelektrik menggunakannya yang menyebabkan perpindahan kalor antara sisi panas dan sisi dingin. Penelitian ini mengkombinasikan kedua sistem tersebut dengan mengkonversi energi radiasi matahari menjadi listrik yang digunakan untuk pendingin kabin *city car*. Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah mendapatkan penyerapan kalor pada ruang kabin *city car* sehingga didapatkan temperatur 25 °C. Penelitian dilakukan dengan membuat model ruang pendingin. Sel surya diletakkan ke hadapan cahaya matahari sepanjang hari. Perubahan radiasi cahaya dari pagi hingga sore menjadi variabel yang diukur, disamping temperatur lingkungan, temperatur sel surya dan kecepatan angin sehingga didapatkan besarnya arus dan tegangan listrik yang kemudian dapat dihitung besarnya energi listrik yang dihasilkan sistem fotovoltaik tersebut. Kemudian energi listrik tersebut digunakan termoelektrik yang sedang menerima panas matahari, sehingga termoelektrik akan mengubah energi listrik menjadi perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin yang semakin besar. Pengukuran temperatur pada susunan aluminium-termoelektrik dan termoelektrik-*heatsink* serta temperatur ruang, dinding-dinding dalam dan temperatur dinding luar menjadi variabel. *Heatsink* digunakan sebagai distributor pendingin yang dibangkitkan sisi dingin termoelektrik yang kemudian memberikan efek pendinginan menyeluruh ke ruang di bawahnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja sistem fotovoltaik dengan daya luaran sebesar 60,09 W mampu memasok energi listrik ke pendingin termoelektrik sehingga didapatkan CoP sistem pendingin sebesar 1,259 dengan temperatur terendah yang dicapai adalah 23,40 °C.

Kata kunci: energi, radiasi, fotovoltaik, termoelektrik, pendingin

ABSTRACT

Solar radiation energy consists of thermal energy and light energy. Solar thermal energy has been used for a long time in the drying process, while new solar energy is utilized later through photovoltaic technology. The photovoltaic system utilizes solar radiation energy to become electrical energy directly, while thermoelectric uses it which causes heat transfer between the hot side and the cold side. This research combines the two systems by converting solar radiation energy into electricity that is used for cooling the city car cabin. The aim to be achieved in this research is to get heat absorption in the city car cabin so that the temperature is 25 °C. The research was conducted by making a cooling chamber model. Solar cells are placed in the presence of sunlight for all day. Changes in light radiation from morning to evening are measured variables, in addition to environmental temperatures, solar cell temperatures and wind speeds so that the magnitude of the electric current and voltage can be obtained which can then be calculated the amount of electrical energy produced by the photovoltaic system. Then the electrical energy is used thermoelectric which is receiving solar heat, so thermoelectric will convert electrical energy into temperature differences between the hot side and the cold side which is getting bigger. Temperature measurements on the aluminium-thermoelectric and thermoelectric-heatsink arrangement as well as the temperature of the room, inside walls and outside wall temperatures are variable. Heatsink is used as a distributor of coolant generated by the thermoelectric cold side which then provides a comprehensive cooling effect to the space below. The results showed that the performance of a photovoltaic system with an output power of 60.09 W was able to supply electrical energy to a thermoelectric cooler so that the cooling system CoP was obtained at 1,259 with the lowest temperature achieved was 23.40 °C.

Keywords: energy, radiation, photovoltaic, thermoelectric, cooling

DAFTAR ISI

Halaman

JUDUL

ABSTRAK..... vii

ABSTRACT..... viii

DAFTAR ISI..... ix

DAFTAR GAMBAR xiii

DAFTAR TABEL..... xv

BAB 1 PENDAHULUAN..... 1

1.1 Latar Belakang Masalah 1

1.2 Kajian Pustaka 2

1.3 Perumusan Masalah 4

1.4 Tujuan Penelitian 5

1.5 Manfaat Penelitian 5

BAB 2 LANDASAN TEORI..... 6

2.1 Matahari sebagai Sumber Energi 6

2.2 Kebutuhan akan Energi yang Ramah Lingkungan 7

2.3 Konversi Radiasi Matahari 9

2.4 Sistem Fotovoltaik 12

2.4.1 Sistem Fotovoltaik dan Radiasi Matahari 13

2.4.2 Prinsip Dasar Sistem Fotovoltaik..... 16

2.4.2.1 Kinerja Sel Surya (PV) 18

2.4.2.2 Arus dan Tegangan PV 20

1.4.2.3 Daya PV	20
2.4.2.4 Faktor pengisian (<i>FF</i>)	20
2.4.2.5 Efisiensi PV	21
2.5 Energi Termal Surya	22
2.6 Sistem Termoelektrik.....	24
2.6.1 Generator Termoelektrik (TEG)	26
2.6.2 Pendingin Termoelektrik (TEC)	27
2.7 Sistem Sambungan Modul Termoelektrik	30
2.7.1 Sistem Sambungan Seri antar Modul Termoelektrik	31
2.7.2 Sistem Sambungan Seri-Paralel antar Modul Termoelektrik	32
2.7.3 Sistem Sambungan Paralel antar Modul Termoelektrik	32
2.8 Sistem Pendingin	32
2.9 Sistem Pendingin Ruang Termoelektrik	35
2.10 Perpindahan Kalor pada Sistem Pendingin Ruang	38
2.10.1 Perpindahan Kalor Konduksi	39
2.10.2 Perpindahan Kalor Konveksi	40
2.10.3 Hambatan Kontak Termal.....	41
2.11 Sistem Pendingin Kabin <i>City Car</i>	43
BAB 3 METODE PENELITIAN	44
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	45
3.2 Desain Penelitian	46
3.3 Variabel Penelitian.....	47
3.4 Bahan atau Material	49

3.5	Alat atau Instrumen.....	49
3.6	Prosedur Pengambilan dan Pengumpulan Data	50
3.7	Diagram Alir Penelitian	52
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		55
4.1	Hasil Penelitian	55
4.1.1	Spesifikasi Sistem Pendingin.....	55
4.1.2	Hasil Pengukuran pada Sel Surya.....	56
4.1.3	Susunan Sambungan Seri antar Modul Termoelektrik	58
4.1.3.1	Hasil Pengukuran Temperatur pada <i>Heatsink</i>	58
4.1.3.2	Hasil Pengukuran Temperatur pada Ruang Pendingin	58
4.1.4	Susunan Sambungan Seri-Paralel antar Modul Termoelektrik.....	59
4.1.4.1	Hasil Pengukuran Temperatur pada <i>Heatsink</i>	59
4.1.4.2	Hasil Pengukuran Temperatur pada Ruang Pendingin	60
4.1.5	Susunan Sambungan Paralel antar Modul Termoelektrik	60
4.1.5.1	Hasil Pengukuran Temperatur pada <i>Heatsink</i>	60
4.1.5.2	Hasil Pengukuran Temperatur pada Ruang Pendingin	61
4.2	Pembahasan	62
4.2.1	Distribusi Temperatur, Energi Radiasi, Tegangan dan Arus pada Sel Surya ..	62
4.2.2	Kinerja Sel Surya	65
4.2.3	Analisis Distribusi Temperatur pada Termoelektrik	70
4.2.3.1	Susunan Sambungan Seri antar Modul Termoelektrik	70
4.2.3.2	Susunan Sambungan Seri-Paralel antar Modul Termoelektrik	74
4.2.3.3	Susunan sambungan Paralel antar Modul Termoelektrik	75

4.2.4	Analisis Temperatur Ruang Pendingin	73
4.2.4.1	Susunan Sambungan Seri antar Modul Termoelektrik	73
4.2.4.2	Susunan Sambungan Seri-Paralel antar Modul Termoelektrik.....	74
4.2.4.3	Susunan Sambungan Paralel antar Modul Termoelektrik	78
4.2.5	Perhitungan Beban Susunan Modul Termoelektrik.....	76
4.2.6	Konversi Energi Sistem Pendingin	78
4.2.7	Kinerja Sistem Pendingin	81
BAB 5	KESIMPULAN	96
DAFTAR PUSTAKA	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Rute produksi tenaga dari sumber energi hijau berkelanjutan.....	8
2.2 Matahari memancarkan energi sebagai radiator benda hitam pada 6000 K dengan bagian dari energi dalam spektrum ultraviolet (UV) dan bagian dalam spektrum inframerah (IR).....	10
2.3 Jenis pembawa energi dan konversinya.....	11
2.4 Pembangkitan energi pasangan elektron-lubang.....	14
2.5 Spektrum matahari dalam spektrum elektromagnetik sebagai fungsi panjang gelombang, frekuensi, dan energi.....	15
2.6 Klasifikasi sel surya (sistem PV).....	16
2.7 Penampang melintang sel PV.....	17
2.8 Pengaturan modul termoelektrik untuk (a) pembangkit listrik oleh efek Seebeck dan (b) pendinginan oleh efek Peltier.....	28
2.9 Sistem sambungan seri model termoelektrik.....	31
2.10 Sistem sambungan seri-paralel model termoelektrik.....	31
2.11 Sistem sambungan paralel model termoelektrik.....	32
2.12 Rangkaian listrik pendingin termoelektrik.....	37
2.13 <i>Heatsink</i>	40
2.14 Keseimbangan termal dalam kabin mobil.....	44
3.1 Perangkat sistem PV dan TE.....	48
3.2 Susunan pelat Al-TEC- <i>Heatsink</i> (tampak samping).....	48
3.3 Susunan pelat Al-TEC- <i>Heatsink</i> (bentuk tiga dimensi).....	48
3.4 Diagram alir penelitian.....	55

4.1 Alat penelitian sistem pendingin termolektrik bertenaga sel surya.....	58
a. Sebelah kiri adalah sistem pendingin termolektrik	
b. Sebelah kanan adalah sel surya	
4.2 Distribusi radiasi, temperatur, tegangan, dan arus listrik (TE seri).....	65
4.3 Distribusi radiasi, temperatur, tegangan, dan arus listrik (TE seri-paralel).....	66
4.4 Distribusi radiasi, temperatur, tegangan, dan arus listrik (TE paralel).....	67
4.5 Distribusi energi radiasi, tegangan, arus, daya, dan efisiensi (TE ser).....	70
4.6 Distribusi energi radiasi, tegangan, arus, daya, dan efisiensi (TE seri-paralel)....	72
4.7 Distribusi energi radiasi, tegangan, arus, daya, dan efisiensi (TE paralel).....	73
4.8 Distribusi temperatur pada sistem termolektrik (seri).....	74
4.9 Distribusi temperatur pada sistem termolektrik (seri-paralel).....	75
4.10 Distribusi temperatur pada sistem termolektrik (paralel).....	76
4.11 Distribusi temperatur ruang pendingin (TE seri).....	77
4.12 Distribusi temperatur ruang pendingin (TE seri-paralel).....	78
4.13 Distribusi temperatur ruang pendingin (TE paralel).....	79

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Siklus hidup sumber energi dan metode menghasilkan listrik.....	11
2.2 Efisiensi konversi energi.....	15
2.3 Sifat termoelektrik bermaterial dasar Bi_2Te_3	28
2.4 Kinerja beberapa material termoelektrik.....	29
2.5 Gambaran ikhtisar proses tenaga termal untuk pendinginan dan pendingin udara.....	35
4.1 Hasil pengukuran pada sel surya (TE seri).....	59
4.2 Hasil pengukuran pada sel surya (TE seri-paralel).....	60
4.3 Hasil pengukuran pada sel surya (TE paralel).....	60
4.4 Hasil pengukuran temperatur pada <i>heatsink</i> (sambungan seri).....	61
4.5 Hasil pengukuran temperatur pada ruang pendingin (sambungan TE- <i>heatsink</i> seri).....	62
4.6 Hasil pengukuran temperatur pada <i>heatsink</i> (sambungan seri-paralel).....	62
4.7 Hasil pengukuran temperatur pada ruang pendingin (sambungan TE- <i>heatsink</i> seri-paralel).....	63
4.8 Hasil pengukuran temperatur pada <i>heatsink</i> (sambungan paralel).....	64
4.9 Hasil pengukuran temperatur pada ruang pendingin (sambungan TE- <i>heatsink</i> paralel).....	64
4.10 Hasil perhitungan daya luaran dan efisiensi sel surya (TE seri).....	69
4.10 Hasil perhitungan daya luaran dan efisiensi sel surya (TE seri-paralel).....	71
4.10 Hasil perhitungan daya luaran dan efisiensi sel surya (TE paralel).....	73

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan dan konsumsi energi yang semakin meningkat memotivasi berbagai kalangan yang peduli pada masalah energi untuk menggunakan energi alternatif disamping mengoptimalkan pemakaian energi berbahan dasar energi fosil. Energi alternatif ini dikenal sebagai energi baru dan terbarukan (EBT). Penggunaan EBT ini sebagai antisipasi krisis energi, karena pasokan energi fosil yang semakin berkurang serta dampak lingkungan akibat penggunaan energi fosil tersebut. Salah satu penggunaan EBT adalah memanfaatkan energi surya atau energi matahari. Energi matahari mudah didapat dan memiliki potensi besar untuk dikembangkan. Diperkirakan pada tahun 2050 konsumsi energi dunia sebesar 45% diperoleh dari matahari [1].

Melalui sistem *photovoltaik (PV)* energi cahaya matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik. Sementara sistem termoelektrik (TE) dapat mengubah perbedaan temperatur menjadi perbedaan tegangan listrik atau sebaliknya. Hibridisasi kedua sistem dapat dimanfaatkan pada bangunan dan alat transportasi. Mobil sebagai alat transportasi dapat memanfaatkan energi hasil konversi tersebut baik untuk seluruh kebutuhan sistem maupun sebagian, misalnya untuk sistem pendingin kabin. Selama ini sistem pendingin kabin hanya bekerja selama mesin hidup (mobil berjalan) dan ketika mobil berhenti terutama sedang parkir otomatis ruang kabin menjadi panas karena tidak berfungsinya sistem pendingin.

Berdasarkan hal di atas untuk memanfaatkan energi cahaya dan energi panas matahari sekaligus, maka dibuat hibridisasi kedua sistem menjadi model sistem pendingin kabin mobil jenis *city car*. Jenis mobil ini digunakan dengan pertimbangan ukuran kabin yang tidak terlalu luas, sehingga diharapkan temperatur yang ditargetkan tercapai dan proses pendinginan berlangsung cepat merata.

1.2 Kajian Pustaka

Penelitian tentang sistem PV dan sistem termoelektrik (TE) baik berupa sistem tunggal maupun hibridisasi ditujukan dalam menghasilkan energi listrik. Seperti telah disebut di muka sistem PV digunakan pada konversi langsung cahaya matahari menjadi listrik. Untuk sistem TE secara tunggal digunakan dalam menghasilkan listrik atau untuk membuat sistem pendingin. Penelitian ini memadukan sistem PV dengan sistem TE untuk menghasilkan sistem pendingin kabin mobil jenis *city car*.

Penelitian sejenis yang lebih dahulu ada dan berkaitan dengan pemanfaatan energi matahari (surya), penggunaan sistem PV dan sistem TE, pembuatan sistem pendingin, serta energi dalam gedung diantaranya dilakukan oleh:

1. Yogi Sirodz Gaos, Muhamad Yulianto, Mulya Juarsa, Nurrohman, Edi Marzuki, Dwi Yuliaji, dan Kabul Budiono [1]. Penelitian mereka membahas pemanfaatan panas matahari oleh kolektor surya tipe CPC menggunakan tiga pipa yang tertutup tabung kaca dengan air sebagai fluida kerja beserta kinerjanya. Hasil penelitiannya menyimpulkan kolektor tersebut dapat menangkap energi dalam bentuk panas dari radiasi matahari dalam kondisi dengan atau tanpa penutup kaca.

2. Diana Enescua dan F. Spertino [2]. Dalam penelitiannya membahas sistem hibrida PV-TEC yang mempertimbangkan karakteristik termal dan listrik dan indikasi peningkatan efisiensi dan kapasitas daya yang diperoleh sistem hibrida. Simpulan yang diperoleh adalah efisiensi dan kapasitas daya sistem PV dapat meningkat serta berkurangnya temperatur sel PV.
3. Hamidreza Najafi dan Keith A. Woodbury [3]. Penelitiannya membahas penggunaan modul pendingin termoelektrik pada sel fotovoltaik, dimana temperatur sel fotovoltaik dikendalikan dan mengoptimasi arus listrik yang disediakan modul pendingin untuk memperoleh daya maksimum. Dalam menentukan temperatur sistem disimulasikan dengan MATLAB. Hasil penelitian menyimpulkan modul pendingin dapat digunakan dalam mengontrol temperatur dan nilai optimal didapat dengan tingginya daya keluaran.
4. Aarti Kane, Vishal Verma, dan Bhim Singh [4]. Dalam penelitiannya dibahas penggunaan model matematika dalam penggunaan *heatsink* aktif yang mendinginkan sistem PV untuk meningkatkan kinerja sistem PV. Simpulan yang dihasilkan dalam penelitian tersebut adalah terjadi peningkatan efisiensi listrik pada modul PV dan sistem hibrida tersebut sesuai untuk kondisi iklim panas dengan temperatur sekitar lebih tinggi.
5. Tsung-Chieh Cheng, Chin-Hsiang Cheng, Zhu-Zin Huang, dan Guo-Chun Liao [5]. Penelitiannya membahas rumah model yang sistem pendinginnya dengan menyerap panas ruangan oleh sistem TEC yang sumber energinya diperoleh dari sistem PV. Simpulan hasil penelitian ini model gabungan ini mampu mendinginkan udara dalam ruangan rumah model.

6. M. Benganema, A.A. Al-Mashraqi, dan K.O. Daffallah [6]. Penelitiannya membahas penghilangan kelebihan panas yang dihasilkan sel surya dengan menempatkan pendingin TEC di sisi belakang sel surya. Hasil penelitiannya pendingin sel surya dapat meningkatkan efisiensinya.
7. ZhongBing Liu, Ling Zhang, GuangCai Gong, HangXin Li, dan GuangFa Tang [7]. Dalam penelitiannya dibahas penggunaan teknologi pendingin termoelektrik pada sistem PV untuk digunakan pada gedung tanpa energi dari luar. Simpulan hasil penelitiannya adalah kinerja koefisien sistem pendingin udara termoelektrik surya dan sistem pendingin penyimpanan energi termoelektrik surya yang keduanya lebih efisien daripada sistem pendingin termoelektrik konvensional.
8. Wei Hea, JinZhi Zhou, Chi Chen, dan Jie Ji [8]. Dalam penelitiannya dibahas investigasi teoritis dan eksperimentasi model sistem pendingin TEC yang digerakkan panel PV yang dilakukan pada musim panas dan dingin dengan analisis energi dan eksergi. Hasil penelitiannya menyimpulkan efisiensi eksergetik dalam mode operasi musim panas lebih rendah daripada mode operasi di musim dingin.

1.3 Perumusan Masalah

Penelitian sistem PV dengan memadukan sistem TE dapat ditinjau dari perancangan sistem dan eksperimentasinya. Eksperimentasi pada kombinasi kedua sistem ini dapat diidentifikasi masalahnya melalui uraian sistematis yang dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana energi radiasi cahaya matahari diterima sistem PV dan dikonversi langsung menjadi energi listrik?
2. Bagaimana energi listrik yang dihasilkan sistem PV memasok untuk sistem TE?

3. Bagaimana *heatsink* pada sisi dingin sistem TE memberikan efek pendinginan dalam kabin mobil?

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian yang memanfaatkan energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PV untuk dimanfaatkan sistem TEC menjadi model sistem pendingin kabin *city car* memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Untuk memperoleh kinerja sistem PV yang dapat dimanfaatkan sistem TEC.
2. Untuk membuktikan pengaruh sistem sambungan listrik antar modul TEC terhadap perbedaan temperatur yang dihasilkan.
3. Untuk mendapatkan temperatur lebih rendah dari 25°C yang dihasilkan sistem TEC sehingga pendinginan optimal.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang akan diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Memberi informasi penggunaan energi matahari melalui media konversi sistem PV dan atau sistem TE untuk kebutuhan bangunan dan alat transportasi.
2. Menjadi rujukan untuk penelitian sejenis yang menggunakan tipe panel PV dan modul TE yang sama baik dalam sistem terpisah maupun terpadu.
3. Menjadi rujukan dalam pengembangan penelitian sistem TEC sebagai pendingin kabin mobil terutama jenis *city car*.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Matahari sebagai Sumber Energi

Kehidupan memerlukan energi dan energi itu diperoleh dari matahari. Energi matahari dipancarkan ke bumi dengan jumlah sangat besar. Total energi yang datang ke permukaan bumi adalah 99,98% matahari, 0,02% panas bumi, dan 0,002% pasang surut/gravitasi [10]. Pada dasarnya semua energi yang digunakan di bumi berasal dari matahari. Matahari juga merupakan sumber dari beberapa bentuk energi lain di planet ini, seperti: tenaga angin tergantung pada dampak matahari pada gerakan atmosfer ketika menciptakan pola angin; melalui fotosintesis, matahari berkontribusi pada bioenergi (kayu dan bahan organik lainnya); dan bahan bakar fosil secara tidak langsung berhutang atas kreasi jutaan tahun yang lalu menjadi sumber energi [11].

Energi matahari yang sampai ke bumi berbentuk radiasi. Radiasi matahari mencapai permukaan bumi dengan langsung dan transmisi tersebar. Radiasi langsung ditransmisikan melalui atmosfer tanpa gangguan [12] dan merupakan radiasi utama energi alami. Pada radiasi tersebar (difus) terjadi pembiasan dan aerosol dalam atmosfer [12]. *Output* energi harian matahari adalah $8,33 \times 10^{25}$ kWh, di mana bumi menerima $4,14 \times 10^{15}$ kWh. Setiap saat laju energi matahari yang mencapai bumi adalah $1,75 \times 10^{17}$ W dan selama satu tahun matahari memberikan energi sebesar $5,46 \times 10^{24}$ J [13] atau sekitar 20.000 kali lebih besar dari total tingkat penggunaan energi dunia [14].

Sementara Indonesia dengan posisinya di katulistiwa merupakan negara tropis menikmati energi radiasi matahari sebesar 4,5 sampai 4,8 kWh/m² [1].

2.2 Kebutuhan akan Energi yang Ramah Lingkungan

Meningkatnya jumlah manusia akan mengiringi peningkatan kebutuhan akan energi. Energi dikonsumsi manusia untuk berbagai keperluan. Konsumsi energi dapat diklasifikasikan dalam empat sektor umum (1): perumahan, untuk peralatan dan pencahayaan, pemanas ruangan, pemanas air, AC, dan lain-lain (2); komersial, untuk penerangan, pemanas ruangan, peralatan kantor, pemanas air, pendingin ruangan, ventilasi, pendingin, dan lain-lain (3); industri, untuk boiler air dan uap, energi proses langsung, penggerak mesin, dan lain-lain; dan (4) transportasi, untuk mobil pribadi, truk ringan dan berat, transportasi udara, air, pipa, dan kereta api, dan lain-lain [10].

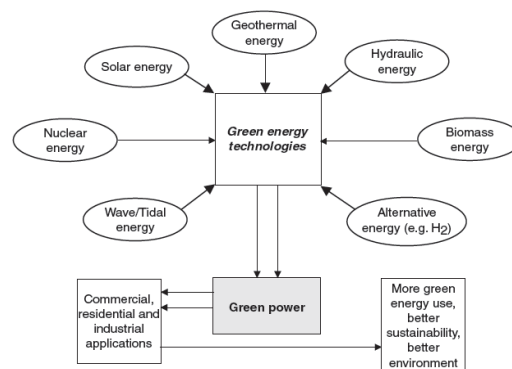
Pemanfaatan sumber energi terutama energi fosil diikuti dengan risiko terkurasnya sumber daya alam dan kerusakan lingkungan akibat pencemaran baik udara, air, maupun tanah. Disamping tentunya, cadangan yang semakin menipis. Oleh karena itu diperlukan upaya untuk memanfaatkan energi baru dan terbarukan. Energi matahari adalah salah satu teknologi terbarukan yang paling menjanjikan. Ini berlimpah, tidak habis-habisnya, ramah lingkungan, dan tersedia secara luas. Energi matahari memiliki potensi tidak hanya untuk memainkan peran yang sangat penting dalam menyediakan sebagian besar kebutuhan pemanasan, pendinginan, dan listrik dunia, tetapi juga untuk memecahkan masalah lingkungan global [11].

Selain sebagai sumber energi terbarukan, matahari termasuk sumber energi yang bersih dan hijau. Energi hijau dapat didefinisikan sebagai sumber energi yang memiliki nol atau minimal dampak lingkungan, lebih ramah lingkungan dan lebih berkelanjutan, dan diproduksi dari energi surya, air, biomassa, angin, dan panas bumi, dan lain-lain [15].

Energi hijau dapat diperoleh dari berbagai sumber yang tersedia di bumi. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa energi dan teknologi hijau, yang banyak tersedia, dapat membantu [15]:

1. Memberikan lebih ramah lingkungan dan lebih banyak kesempatan buat masa depan yang berkelanjutan.
2. Meningkatkan keamanan energi.
3. Memfasilitasi atau mengharuskan pengembangan teknologi baru yang bersih.
4. Mengurangi polusi udara, air, dan tanah serta hilangnya hutan.
5. Mengurangi penyakit dan kematian terkait energi.
6. Mengurangi atau menghentikan konflik antar negara terkait cadangan energi.

Gambar 2.1 di bawah ini menggambarkan rute menggunakan sumber energi hijau berkelanjutan untuk produksi tenaga hijau [15].



Gambar 2.1 Rute produksi tenaga dari sumber energi hijau berkelanjutan [15]

Sistem PV merupakan penghasil energi bersih yang besar dan merupakan peredam emisi bersih CO₂, mewakili suatu metode pemeliharaan yang bermanfaat bagi lingkungan dan energi berkelanjutan bagi standar kehidupan yang intensif [16]. Penyebaran panel surya baik secara global untuk menghasilkan energi terbarukan (dan karenanya membatasi pemanasan iklim) dan secara lokal, untuk mengurangi *UHI* (*urban heat island*) terutama di musim panas yang dapat menjadi ancaman kesehatan [17].

2.3 Konversi Radiasi Matahari

Matahari adalah sumber utama untuk energi alternatif baru dan terbarukan. Sayangnya, sumber ini tidak dikonsumsi secara memadai di setiap tempat di dunia [18]. Untuk memanfaatkan energi matahari dengan mengeksploitasinya melalui langkah-langkah fungsional penangkapan, konversi, dan penyimpanan. Energi tersebut tiba di bumi ketika radiasi didistribusikan melintasi spektrum warna dari inframerah ke ultraviolet [19].

Sinar matahari yang berasal dari matahari berkurang sekitar 30% sebelum mencapai bumi, disebabkan [20]:

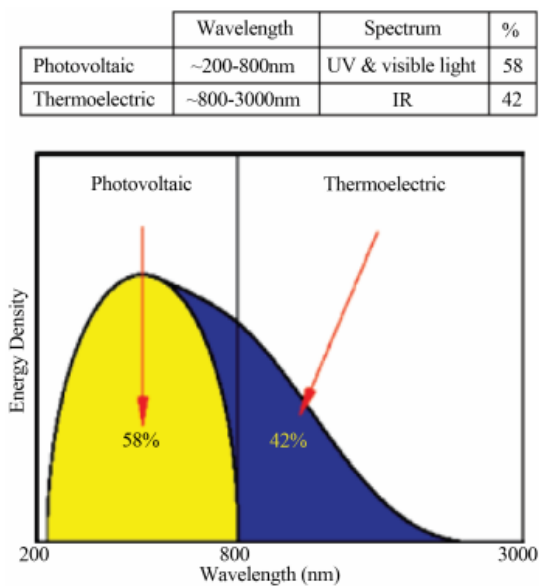
1. Hamburan oleh partikel atmosfer.
2. Hamburan dengan aerosol, partikel debu dan lain-lain.
3. Penyerapan oleh gas atmosfer.

Ada tiga jenis teknologi yang digunakan dalam mengumpulkan energi surya, yaitu [20],[21]:

1. *Flat Plate Arrays.*
2. *Tracking Arrays.*
3. *Concentrator Arrays.*

Energi radiasi ini ditangkap sebagai energi pasangan lubang-elektron yang tereksitasi dalam semikonduktor, pewarna, kromofor, atau sebagai kalor dalam media penyimpanan termal. Elektron dan lubang yang tereksitasi dapat dimanfaatkan untuk konversi langsung menjadi tenaga listrik atau ditransfer menjadi molekul biologis atau kimia untuk dikonversi menjadi bahan bakar [19].

Energi radiasi matahari yang digunakan oleh sistem PV dan TE berada pada spektrum yang berbeda, seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.2 di bawah ini [22].



Gambar 2.2 Matahari memancarkan energi sebagai radiator benda hitam pada 6000 K dengan bagian dari energi dalam spektrum ultraviolet (UV) dan bagian dalam spektrum inframerah (IR) [22]

Penggunaan energi matahari untuk keperluan pengeringan dan penguapan adalah melalui radiasi termalnya. Energi matahari dapat dieksploitasi melalui rute termal matahari dan fotovoltaik surya (PV) untuk berbagai aplikasi [11]. Radiasi matahari

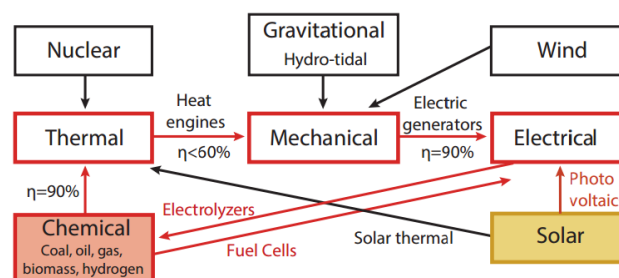
dapat dikonversi langsung menjadi listrik dalam perangkat fotovoltaik. Energi matahari juga dapat dikumpulkan sebagai panas dan digunakan untuk proses termal seperti pemanasan ruang dan air atau terkonsentrasi untuk digunakan dalam pemanasan temperatur tinggi dan pembangkit listrik termal [14].

Beberapa sumber energi juga dapat dikonversi menjadi energi listrik seperti pada tabel di bawah ini [14].

Tabel 2.1 Siklus hidup sumber energi dan metode menghasilkan listrik [14]

Method and energy source	Energy-conversion processes in the life cycle
Fossil fuel-based methods	
Natural gas	Extraction via gas well → transport → processing → natural gas-fired power plant
Coal	Coal mining → transport → processing → coal-fired power plant
Oil	Extraction via oil well → transport (tanker or pipeline) → refining → oil-fired power plant
Nonfossil-based methods	
Nuclear	Uranium mining → transport → processing → nuclear power plant
Hydro	Hydraulic turbine
Wind	Wind generator
Solar (thermal)	Solar energy collection → thermal power plant
Solar (non-thermal)	Solar photovoltaic panels
Geothermal	Well to geothermal source → geothermal power plant
Ocean (thermal)	Ocean thermal energy conversion (OTEC) power plant

Tabel 2.1 di atas menjelaskan berbagai sumber energi yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Tampak bahwa energi matahari dapat dikonversi tidak langsung melalui energi termal lebih dahulu dan langsung menggunakan panel PV. Berbagai konversi energi dapat digunakan untuk masing-masing kebutuhan manusia. Konversi energi untuk sumber yang berbeda dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini [23].



Gambar 2.3 Jenis pembawa energi dan konversinya [23]

Listrik dapat dibuat oleh tenaga nuklir atau panas matahari dengan turbin uap, sementara PV menghasilkan elektron secara langsung. Biomassa dapat dikonversi menjadi bahan bakar cair seperti etanol melalui fermentasi atau dengan gasifikasi diikuti dengan sintesis bahan bakar. Hidrogen dapat dibuat dengan elektrolisis atau dengan gasifikasi biomassa. Elektron dapat diangkut oleh *grid* ke pengguna atau dikonversi menjadi hidrogen. Hidrogen dalam tangki (atau berbagai bahan penyimpanan) atau elektron dalam baterai dapat disimpan pada kendaraan dan kemudian dikonversi menjadi listrik oleh sel bahan bakar atau dibakar langsung di mesin pembakaran dalam [24].

Untuk meningkatkan keandalan dan kualitas daya sistem berbasis energi terbarukan, perangkat penyimpanan energi dan generator konvensional umumnya digunakan sebagai sistem cadangan. Namun, pembangkit terdistribusi menggunakan dua atau lebih sumber energi terbarukan juga dapat secara signifikan meningkatkan keandalan [25].

2.4 Sistem Fotovoltaik

Sistem PV terdiri dari beberapa sel PV. Sel PV dibagi menjadi tiga kategori: (1) sel anorganik, berbasis semikonduktor anorganik *solid-state*; (2) sel organik, berbasis semikonduktor organik; dan (3) sel fotoelektrokimia (*PEC*), berbasis antarmuka antara semikonduktor dan molekul [19].

Sel-sel PV dikemas ke dalam modul-modul yang menghasilkan tegangan dan arus spesifik saat pencahayaan. Modul PV dapat dihubungkan secara seri atau paralel untuk menghasilkan tegangan atau arus yang lebih besar. Sistem fotovoltaik dapat digunakan secara independen atau bersamaan dengan sumber daya listrik lainnya. Aplikasi yang

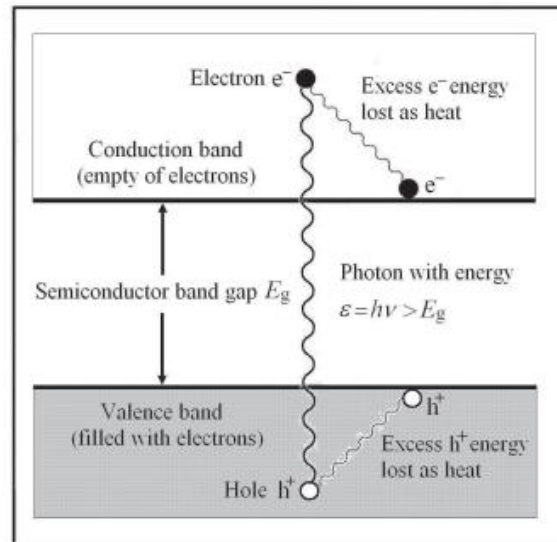
diberdayakan oleh sistem PV meliputi komunikasi (baik di bumi maupun di ruang angkasa), daya jarak jauh, pemantauan jarak jauh, penerangan, pemompaan air, dan pengisian baterai [26]. Sistem PV dapat diletakkan pada atap gedung atau terintegrasi ke fasade gedung [27]. Performa energi bangunan ditingkatkan dengan menggunakan berbagai teknik, seperti melalui program kesadaran di antara pengguna bangunan, meningkatkan manajemen energi bangunan perumahan [28] dan komersil [29], menggabungkan langkah-langkah teknis untuk energi efisiensi, dan penggunaan energi terbarukan [28] terutama penggunaan sistem PV.

2.4.1 Sistem Fotovoltaik dan Radiasi Matahari

Radiasi matahari merupakan sumber energi bagi sistem PV. Sistem PV mengkonversi rata-rata kurang dari 20% radiasi matahari menjadi listrik, sedangkan sisanya 80% diubah menjadi kalor [30]. Radiasi matahari yang berupa panas adalah bagian dari spektrum matahari yang memancarkan energi foton. Teknologi PV adalah teknologi yang menggunakan adaptasi dari semikonduktor [12]. Teknologi ini menghasilkan daya listrik hanya dari transfer energi yang dikandung dalam foton [12] dengan energi lebih tinggi dari energi pita celah dari bahan penyerapnya. Foton dengan energi lebih rendah dari energi pita celah tidak diserap oleh sel PV dan berkontribusi untuk memanaskan sel surya ketika diserap oleh kontak balik logam [31].

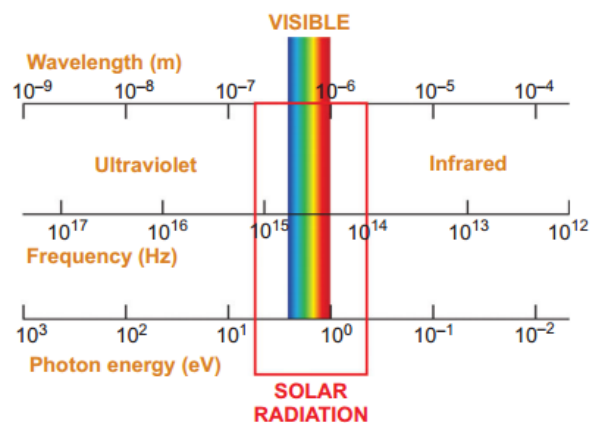
Energi foton yang lebih besar dari energi pita celah semikonduktor dapat membangkitkan elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Energi pasangan elektron-lubang yang melebihi energi pita celah akan terlepas menjadi energi termal elektron dengan cepat ($\sim 10^{-11}$ s). Energi berguna dari energi foton yang mengkonversi

menjadi listrik adalah yang sama dengan energi pita celah. Pembangkitan energi dari pasangan elektron-lubang, digambarkan pada gambar 2.4 di bawah ini [13].



Gambar 2.4 Pembangkitan energi pasangan elektron-lubang [13]

Teknologi PV menggunakan radiasi matahari hanya sebagian kecil dari keseluruhan spektrum elektromagnetik. Gambar 2.5 di bawah ini menunjukkan demikian [32].



Gambar 2.5 Spektrum matahari dalam spektrum elektromagnetik, sebagai fungsi panjang gelombang, frekuensi, dan energi. [32]

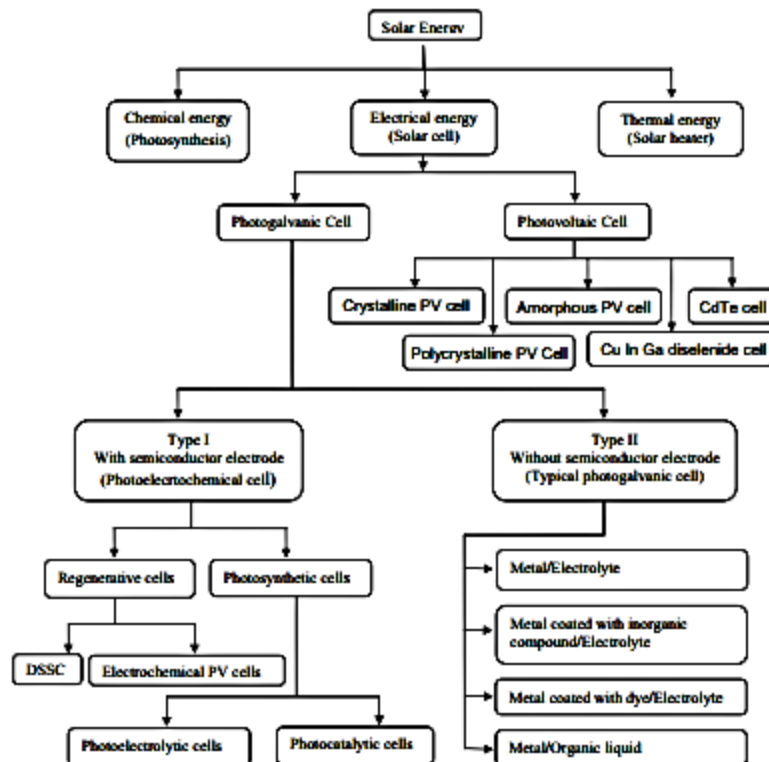
Sistem PV yang memanfaatkan konversi energi matahari menjadi energi listrik secara langsung jika dibandingkan dengan jenis energi lain memiliki efisiensi yang

rendah. Namun, hal ini menjadi tantangan dalam pengembangan teknologi PV ke depan. Pengembangan teknologi dalam PV saat ini difokuskan pada peningkatan efisiensi sel, meningkatkan daya tahan, dan mengurangi biaya untuk mencapai paritas *grid* [31]. Tabel 2.2 di bawah ini menggambarkan perbandingan efisiensi berbagai proses konversi energi.

Tabel 2.2 Efisiensi konversi energi [10]

Engine/process	Efficiency %
Otto (gasoline) engine	20–30
Diesel engine	30–40
Gas turbine	30–40
Steam turbine	35–45
Nuclear, steam turbine	30–40
Combined gas/steam turbines	40–60+
Fuel cell (hydrogen, etc.)	40–60+
Photovoltaic cell	10–25
Geothermal plant	5–15
Windmill	30–40 (59% limit)
Hydro turbine	80–85
Electro-mechanical motor/ generator	70–98

Keterkaitan sistem PV atau sel surya dengan energi surya secara menyeluruh dan klasifikasi sistem PV sendiri digambarkan dalam bentuk skema di bawah ini [33].



Gambar 2.6 Klasifikasi sel surya (sistem PV)[33]

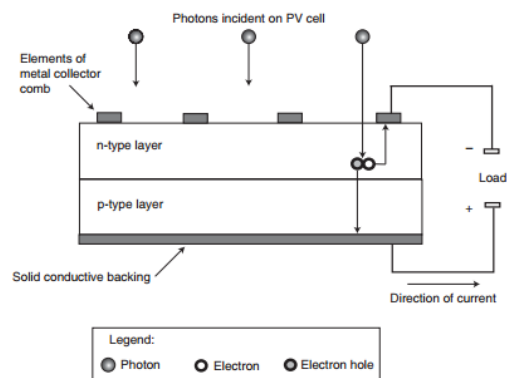
Dari gambar 2.6 di atas tampak bahwa, energi matahari terdiri dari energi kimia matahari (bahan bakar), energi listrik matahari (sel surya), dan energi termal matahari [33], [34].

2.4.2 Prinsip Dasar Sistem Fotovoltaik

Kata “fotovoltaik” terdiri dari dua kata yaitu “*photo*” dan “*voltaic*”. Foto yang berarti cahaya dan voltaik yang mengacu pada listrik adalah konversi langsung sinar matahari menjadi potensial listrik (*photovoltage*) yang dapat digunakan untuk menyediakan tenaga listrik [35] dan melalui perangkat semikonduktor yang disebut sel surya [11].

Sistem PV memiliki perangkat dengan prinsip dasar yang tidak kompleks. Perangkat paling sederhana terdiri dari dua material yang berbeda dalam sifat elektronik (satu kaya elektron dan lainnya kekurangan elektron) [31].

Untuk mendorong konversi foton menjadi elektron menggunakan efek fotolistrik pada sistem PV terdapat dua lapisan silikon yang membentuk sel PV sehingga dapat menghasilkan (1) elektron lepas, atau (2) lubang-lubang pada struktur molekul tempat elektron dapat berikatan kembali. Atom silikon memiliki 4 elektron valensi di kulit terluarnya. Dalam satu desain sel PV, lapisan atas atau tipe-n didoping dengan fosfor dengan 5 elektron valensi, sedangkan lapisan tipe-p lebih rendah didoping dengan boron yang memiliki 3 elektron valensi. Gambar 2.7 di bawah ini dapat membantu dalam penjelasan [12].



Gambar 2.7 Penampang melintang sel PV [12]

Pada sel PV ada sejumlah sumber kerugian yang mengurangi jumlah energi yang sebenarnya tersedia, diantaranya [12]:

1. Kerugian kuantum:

Foton dengan $E < E_G$ tidak dapat memproduksi efek fotolistrik, sehingga energi yang dikandungnya tidak tersedia untuk sistem. Setiap foton hanya dapat menghasilkan satu elektron, sehingga "kelebihan" energi juga tidak tersedia untuk memproduksi arus.

2. Kerugian refleksi (pantulan):

Foton yang tiba di permukaan sel PV mengalami refleksi fraksional $\rho(E)$, di mana $0 < \rho < 1$; jumlah refleksi bervariasi dengan energi foton. Sel-sel PV biasanya dilapisi dengan pelapisan antireflektif untuk mengurangi $\rho(E)$.

3. Kerugian transmisi:

Sel PV memiliki lebar, dimungkinkan bagi foton untuk melewatinya tanpa bertabrakan dengan atom dalam struktur. Foton telah "ditransmisikan" melalui sel yang menyebabkan kehilangan transmisi. Kerugian ini adalah fungsi dari lebar sel dan energi foton, dan dituliskan $\tau(E,W)$, di mana $0 < \tau < 1$. Salah satu cara mengatasinya dengan memanfaatkan panas matahari yang terakumulasi di bawah sel-sel panel PV.

4. Kerugian koleksi (pengumpulan):

Sebagian kecil elektron yang lepas akan menyerap kembali ke dalam struktur sebelum meninggalkan sel, sehingga efisiensi koleksi kurang dari 100%. Pada foton berenergi sangat tinggi akan mengakibatkan elektron yang lepas akan menyerap kembali sehingga efisiensi koleksi jatuh mendekati nol.

2.4.2.1 Kinerja Sel Surya (PV)

Semua parameter yang diekstraksi dari karakteristik I-V dapat dipengaruhi oleh kondisi sekitar seperti temperatur dan intensitas serta spektrum cahaya yang datang [32]. Faktor-faktor ini mempengaruhi kinerja sel PV sehingga menyebabkan bervariasi nilai-nilai yang diturunkan secara teoritis. Utamanya antara lain adalah [12]:

1. Temperatur.

Temperatur operasi modul PV ditentukan oleh keseimbangan energi. Energi matahari yang diserap modul sebagian dikonversi menjadi energi panas dan sebagian menjadi energi listrik yang dikeluarkan dari sel melalui sirkuit eksternal [11]. Energi panas dihamburkan oleh kombinasi mekanisme perpindahan panas [36]. Kinerja sel PV konvensional dipengaruhi oleh kerugian termalisasi karena hanya mengubah sebagian energi matahari dalam beberapa rentang frekuensi tertentu menjadi listrik [37].

Temperatur operasi panel PV tergantung pada banyak faktor, diantaranya radiasi matahari, temperatur lingkungan, kecepatan dan arah angin, komposisi material panel, dan struktur pemasangan [38].

Pada awalnya luaran sel PV meningkat akibat meningkatnya temperatur dari temperatur kriogenik mendekati 0 K dan mencapai puncak pada kisaran 50 °C hingga 100 °C dan menurun setelahnya [12]. Pada temperatur modul PV sebesar 50 °C dapat kehilangan daya rata-rata 0,3 – 0,4% per Kelvin (K) yang mengakibatkan penurunan kinerja sebesar 7,5 – 10% [39].

2. Konsentrasi.

Untuk meningkatkan luaran dari sel PV dengan memusatkan jumlah cahaya yang mencapai sel relatif terhadap insulasi ambien. Konsentrasi dicapai dengan menggunakan cermin datar atau lengkung untuk memfokuskan cahaya. Konsentrasi hingga 15 hingga 20 kali akan meningkatkan luaran sel. Namun, di atas kisaran ini luaran menurun dengan meningkatnya konsentrasi [11].

Faktor-faktor lain yang mempengaruhi kinerja termasuk resistensi secara seri dan paralel dengan sel-sel PV di panel, serta usia perangkat, karena kinerja menurun secara bertahap seiring bertambahnya umur pakai.

2.4.2.2 Arus dan Tegangan PV

Pada sistem PV besarnya arus dan tegangan dipengaruhi beberapa faktor. Jumlah arus (dan tegangan) yang dapat diharapkan dari bahan sel surya yang diberikan umumnya tergantung pada (a) celah energi material, (b) laju pembangkitan pembawa, dan (c) laju rekombinasi pembawa. Nilai energi pita celah bergantung pada material, karena merupakan sifat semikonduktor intrinsik yang terkait dengan struktur kristal, komposisi kimia, dan pada tingkat yang lebih kecil yaitu sifat struktur material (misalnya: tegangan dan ukuran partikel) [31].

2.4.2.3 Daya PV

Daya (P) adalah produk arus dan tegangan [12] yang dihasilkan oleh sel dan dikirim ke beban. Daya dihitung dengan menerapkan persamaan $P = IV$ [32].

2.4.2.4 Faktor pengisian (FF)

Fill factor (FF) adalah ukuran kualitas sel surya. FF dihitung dengan membandingkan daya maksimum dengan kekuatan teoretis (P_T) yang akan dihasilkan jika sel secara bersamaan dapat menghasilkan tegangan rangkaian terbuka dan arus hubung singkat [32]. FF juga digunakan untuk mengevaluasi nilai maksimum aktual daya relatif terhadap batas atas [12].

Faktor pengisian khas berkisar 0,5 hingga 0,82 [32]. Pada perangkat aktual nilai faktor pengisian, $FF > 0,7$ dapat diterima [12]. Faktor pengisian dapat direpresentasikan sebagai persentase.

2.4.2.5 Efisiensi PV

Efisiensi perangkat tipe penelitian dalam kisaran 20% - 24,7% telah dicapai dalam kristal tunggal dan multikristalin sel surya berbasis silikon; efisiensi sel surya film tipis telah mencapai 20%; efisiensi sangat tinggi lebih dari 40% telah dicapai dalam perangkat *multijunction* berdasarkan semikonduktor III-V; dan sel surya organik yang berpotensi lebih murah telah menunjukkan efisiensi lebih dari 6% [31].

Efisiensi konversi tenaga surya ke listrik, η adalah rasio keluaran daya listrik P_{out} , terhadap *input* tenaga surya, P_{in} , ke dalam sel PV. P_{in} adalah produk dari iradiasi cahaya yang terjadi, diukur dalam Wm^{-2} dan luas permukaan sel surya dalam m^2 . Efisiensi maksimum terjadi ketika sel dioperasikan pada V_{mp} dan I_{mp} dengan $P_{out} = P_{MAX}$.

Dalam penelitian ini, daya listrik masukan yang berasal dari intensitas cahaya matahari diukur dan dihitung besarnya menurut Persamaan [42],[44]:

$$P_{in} = I_v \cdot A \quad (2.1)$$

Sementara daya listrik keluaran diperoleh dari pengukuran tegangan dan arus listrik, yang dihitung dengan Persamaan[44],[49]:

$$P_{out} = V \cdot I \quad (2.2)$$

Dimana:

I_v = intensitas cahaya matahari

A = luas permukaan sel surya yang digunakan

Masih rendahnya efisiensi sistem PV, maka pilihan alternatif adalah integrasi sel PV dengan konverter energi panas ke listrik dalam bentuk generator termoelektrik (TEG), yang dapat langsung mengubah energi panas menjadi listrik [40]. Penyerapan radiasi matahari sangat penting untuk sistem PV-TE. Namun, dalam merancang perlu mempertimbangkan fitur limbah panas yang dihasilkan dalam sel PV dan daya serap matahari [41].

2.5 Energi Termal Surya

Teknologi panas matahari memanfaatkan energi panas dari matahari untuk berbagai tujuan. Teknologi panas matahari cukup beragam dalam hal karakteristik operasional dan aplikasinya — mencakup teknologi yang cukup sederhana seperti pengeringan tanaman hasil pertanian, pemanasan ruang bangunan perumahan dan komersil, pemanasan air, menanam tanaman dalam rumah kaca, produksi garam dari penguapan air laut, memasak makanan, dan mengendarai mesin kalor dalam siklus tenaga [15] pemanas ruang matahari dan kompor matahari serta peralatan yang rumit dan canggih seperti pendingin udara matahari dan pembangkit listrik tenaga surya [14]. Teknologi termal matahari berdasarkan temperatur kerja diklasifikasikan ke dalam tiga jenis berikut:

1. Teknologi temperatur rendah (temperatur kerja $< 70^{\circ}\text{C}$) — pemanasan ruang surya, kolam tenaga surya, pemanas air tenaga surya, dan pengeringan tanaman surya.
2. Teknologi temperatur sedang ($70^{\circ}\text{C} < \text{temperatur kerja} < 200^{\circ}\text{C}$) — distilasi surya, pendinginan dengan matahari, dan pemasakan dengan matahari.

3. Teknologi temperatur tinggi (temperatur kerja $> 200^{\circ}\text{C}$) - teknologi pembangkit listrik tenaga termal seperti palung parabola, menara surya, dan parabola [14].

Komponen kolektor surya meliputi beberapa atau semua hal berikut ini [15]:

1. Permukaan (biasanya lembaran logam) berwarna hitam untuk menyerap hampir semua energi matahari yang terjadi (insulasi).
2. Satu atau lebih lembaran kaca untuk mentransmisikan radiasi matahari dengan mudah ke plat penyerap sambil memotong dan mengurangi radiasi termal dan kehilangan panas konveksi ke lingkungan.
3. Tabung atau saluran untuk mengangkut fluida melalui kolektor untuk mengumpulkan panas matahari dan mentransfer panas keluar dari kolektor.
4. Struktur (pada dasarnya, sebuah kotak) untuk memegang dan melindungi komponen dan menahan cuaca.
5. Isolasi ditempatkan di sisi dan di belakang plat absorber untuk mengurangi kehilangan panas parasit.

Pembangkit listrik tenaga panas matahari dapat dirancang untuk operasi hanya sistem surya tunggal atau *hybrid*, di mana bahan bakar fosil digunakan pada intensitas radiasi yang lebih rendah untuk mengamankan pasokan beban puncak yang andal. Lima konsep pembangkit listrik tenaga surya yang berbeda tersedia [10]:

1. Kolam surya
2. Cerobong surya
3. *Rough* palung parabola surya
4. *Receiver* penerima sentral surya atau menara surya
5. Parabola surya

Kolam surya dan cerobong surya jenis teknologi tidak terkonsentrasi. Tiga jenis teknologi panas matahari terkonsentrasi yakni palung parabola surya, penerima pusat surya, dan piringan parabola surya. Ketiga teknologi ini digunakan untuk memproduksi kalor atau listrik. Sistemnya menggunakan lensa atau kaca serta sistem penjejakan yang memfokuskan sinar matahari menjadi terkonsentrasi dan digunakan sebagai sumber panas untuk pembangkit tenaga (*solar thermoelectricity*) [19].

Sistem pembangkit listrik tenaga surya memiliki tiga elemen penting yang diperlukan untuk menghasilkan listrik: sebuah konsentrator (untuk mengumpulkan dan memfokuskan radiasi matahari), sebuah penerima (untuk mengubah radiasi matahari pekat menjadi panas), dan siklus mesin (untuk menghasilkan listrik) [11].

Energi termal berguna yang diperoleh dari kolektor surya adalah perbedaan antara radiasi matahari yang terjadi ditransmisikan melalui kaca dan diserap sebagai panas, dan panas hilang kembali ke lingkungan sekitar. Perbedaannya adalah panas yang ditransfer ke fluida kerja.

2.6 Sistem Termoelektrik

Secara harfiah termoelektrik terkait fenomena termal dan listrik. Termoelektrik secara langsung dapat mengubah energi termal menjadi energi listrik [42]. Sistem ini bermula pada fenomena material yang memiliki perilaku seperti halnya pada termokopel [43].

Berkaitan dengan perilaku termokopel ada empat mekanisme berbeda yang perlu diperhatikan, yaitu [44]:

1. Konduksi panas.
2. Kerugian Joule.
3. Efek Seebeck.
4. Efek Peltier.
5. Efek Thomson.

Konduksi Panas.

Panas diakibatkan gerakan pembawa dan getaran kisi kristal. Konduksi panas menimbulkan kerugian dalam kinerja termokopel [44].

Kerugian Joule.

Ketika arus mengalir melalui perangkat akan menghadapi hambatan yang berakibat menghasilkan panas. Kerugian Joule dihasilkan dari hamburan pembawa oleh ketidaksempurnaan kisi (getaran termal, kotoran, dislokasi, dan lain-lain) [44]. Medan listrik menimbulkan pemanasan joule [45].

Efek Seebeck.

Efek Seebeck menjelaskan adanya gaya gerak listrik atau perbedaan potensial dapat dihasilkan oleh sirkuit yang terbuat dari dua kabel berbeda ketika salah satu persimpangan dipanaskan. Efek Seebeck adalah konversi perbedaan temperatur menjadi listrik [43] melalui pengembangan tegangan pada konduktor [13].

Efek Peltier.

Kebalikan dari efek Seebeck, dimana arus listrik yang melalui termokopel dapat menghasilkan pemanasan atau pendinginan yang tergantung arahnya [42]. Penyerapan atau pelepasan panas pada persimpangan konduktor yang berbeda karena perubahan kapasitas panas pembawa [44].

Berkaitan dengan material termoelektrik yang baik merupakan gabungan pembangkit listrik termoelektrik (α) besar dengan resistivitas listrik (ρ) rendah dan konduktivitas termal (λ) yang rendah.

Efek Peltier berada dalam pengangkutan panas oleh arus listrik. Aliran panas akan berubah pada persimpangan material yang berbeda dengan melepaskan atau menyerap panas. Di setiap cabang arus Peltier menghantarkan panas dan bukannya menghasilkan panas [43].

Efek Thomson.

Efek termoelektrik ketiga adalah penyerapan pembebasan atau panas yang dapat dibalik dalam konduktor homogen ketika gradien temperatur dan arus listrik dikenakan secara bersamaan [46].

Dalam perangkat pembangkit listrik termoelektrik, aliran panas difusif dan efek Peltier adalah aditif. Keduanya mengurangi gradien temperatur yang dikenakan. Penurunan tegangan resistif perangkat juga mengurangi tegangan yang tersedia dari efek Seebeck [43]. Konverter daya termoelektrik tidak memiliki bagian yang bergerak, dan kompak, tenang, sangat andal dan ramah lingkungan [47]. Pada dasarnya termoelektrik terdiri dari dua perangkat, yaitu generator termoelektrik (TEG) dan pendingin termoelektrik (TEC) [42].

2.6.1 Generator Termoelektrik (TEG)

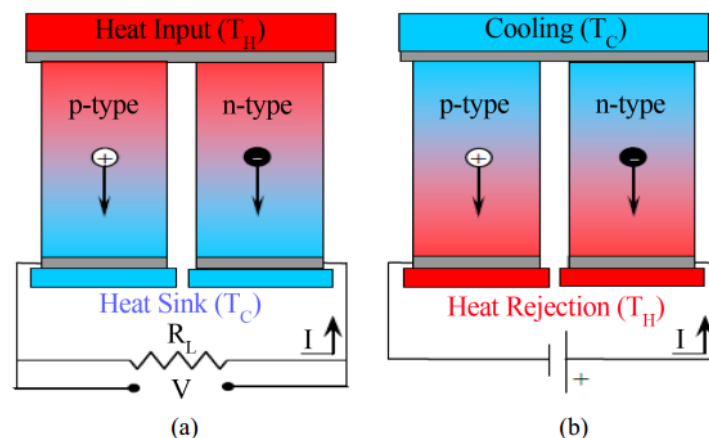
Generator termoelektrik adalah termoelektrik yang bekerja dengan prinsip efek Seebeck, dimana adanya perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin

termoelektrik menghasilkan perbedaan potensial listrik. Pada sisi panas diberikan kalor, sedang pada sisi dingin adanya penyerapan kalor sehingga menjadi dingin.

2.6.2 Pendingin Termoelektrik (TEC)

Proses kebalikan dari generator termoelektrik adalah dalam menghasilkan panas atau dingin dengan memasok energi listrik pada perangkat termoelektrik. Jika sisi dingin dikondisikan dan energi listrik diberikan, maka termoelektrik dapat memompa panas yang keluar dari sisi panasnya. Sebaliknya bila sisi panas yang dikondisikan dan energi listrik dipasok ke termoelektrik, maka akan terjadi penyerapan panas pada sisi dingin yang menyebabkan lingkungan sekitar menjadi dingin. Proses terakhir ini yang dilakukan oleh Peltier, sehingga untuk mengoperasikan pendingin termoelektrik menggunakan efek Peltier.

Perbedaan antara TEG dan TEC dapat ditampilkan pada gambar 2.8 di bawah ini [22].



Gambar 2.8 Pengaturan modul termoelektrik untuk (a) pembangkit listrik oleh efek Seebeck dan (b) pendinginan oleh efek Peltier [22]

Bismuth telluride dan *lead telluride* menjadi bahan inti yang digunakan generator TE komersial untuk pembangkit listrik rendah dan sedang serta pendinginan TE dan material baru diperlukan untuk keberlanjutan [48].

Material termoelektrik yang digunakan bermaterial dasar Bi_2Te_3 dengan spesifikasi berikut[42].

Tabel 2.3 Sifat termoelektrik bermaterial dasar Bi_2Te_3 [42]

Description	Value
Seebeck coefficient, α_p	200 $\mu\text{V/K}$
Seebeck coefficient, α_n	-200 $\mu\text{V/K}$
Thermal conductivity, $k_p = k_n$	1.4 W/m·K
Electrical resistivity, $\rho_p = \rho_n$	1.0 m Ω ·cm
Thermal contact conductivity ratio, $r = k/k_c$	0.1
Electrical contact resistivity ratio, $s = \rho_c/\rho$	0.1mm
Ceramic plate thickness, l_c	0.7 mm
Thermoelement length, l	2.8 mm

Perhitungan koefisien Seebeck pada termoelektrik ditentukan dengan persamaan [42]:

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n$$

Kinerja termoelektrik untuk beberapa material diperlihatkan pada tabel 2.4 berikut [11]:

Tabel 2.4 Kinerja beberapa material termoelektrik

MATERIAL	Z ($\text{K}^{-1} \times 10^3$)	T_H (K)	ZT_H	η
Bi_2Te_3	2.0	450	0.9	5.4%
$\text{BiSb}_4\text{Te}_{7.5}$	3.3	450	1.5	7.6%
$\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$	2.3	600	1.38	11.1%
PbTe	1.2	900	1.08	12.6%
CeS(+Ba)	0.8	1300	1.04	14.3%

Perbedaan temperatur menentukan besarnya perbedaan tegangan dan arah aliran panas menentukan polaritas tegangan [42].

Pada pendingin termoelektrik tenaga listrik yang dipasok dan masuk melintasi pasangan material termoelektrik memberikan besarnya tegangan [48]:

$$V = \alpha (T_h - T_c) + IR \quad (2.3)$$

Perbedaan temperatur yang maksimum terjadi ketika arus mencapai maksimum dan pada *cold junction* terjadi kehilangan panas hingga mencapai nol. Besarnya arus maksimum adalah [48]:

$$I_{max} = \frac{\alpha T_c}{R} \quad (2.4)$$

Arus yang maksimum diikuti tak adanya beban kalor menimbulkan tegangan yang maksimum, sebesar [48]:

$$V_{max} = \alpha(\Delta T_{max} + T_c) \quad (2.5)$$

2.7 Sistem Sambungan Modul Termoelektrik

Pada penelitian ini menggunakan 21 modul termoelektrik yang disusun sedemikian rupa untuk menghasilkan perbedaan temperatur yang besar. Susunan sambungan modul termoelektrik menentukan besarnya arus listrik yang harus dipasok dari sumber tegangan menuju sistem termoelektrik tersebut.

Ada tiga kemungkinan sistem sambungan antar modul termoelektrik, yaitu:

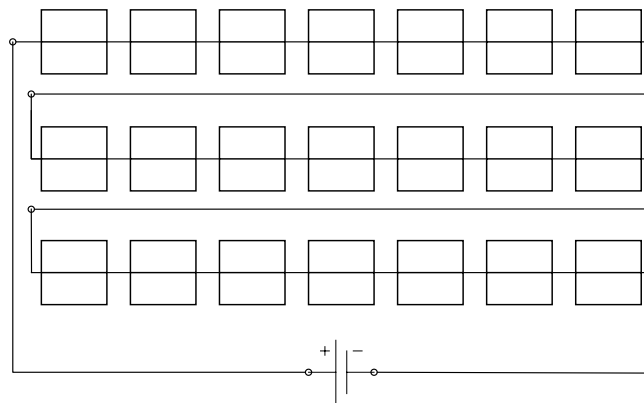
1. Sistem sambungan seri.
2. Sistem sambungan seri-paralel.
3. Sistem sambungan paralel.

Untuk masing-masing sistem sambungan diuraikan berikut.

2.7.1 Sistem Sambungan Seri antar Modul Termoelektrik

Sistem sambungan antar modul termoelektrik disusun secara seri sebanyak 21 modul. Kutub positif modul pertama akan berhubungan dengan kutub positif sumber tegangan, sedangkan kutub negatifnya akan berhubungan dengan kutub positif modul kedua. Kutub negatif modul kedua akan berhubungan dengan kutub positif modul ketiga dan seterusnya, sehingga kutub negatif modul ke-21 akan berhubungan dengan kutub negatif sumber tegangan.

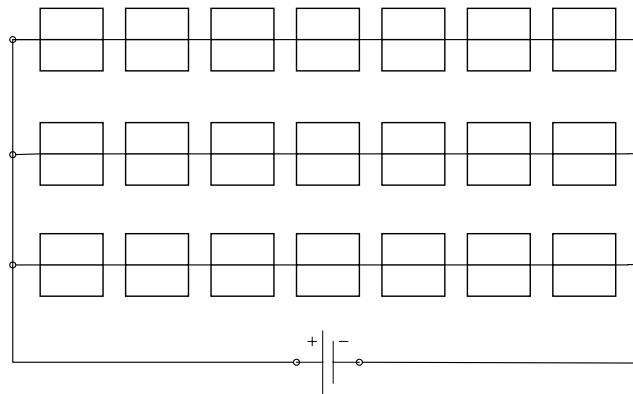
Lebih jelasnya sistem sambungan seri diperlihatkan pada gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Sistem sambungan seri model termoelektrik

2.7.2 Sistem Sambungan Seri-Paralel antar Modul Termoelektrik

Pada sistem sambungan ini adalah kombinasi seri dan paralel. Modul-modul termoelektrik dibagi menjadi tiga baris yang masing-masing baris sebanyak tujuh modul dihubungkan secara seri. Kutub positif modul pertama, kedelapan, dan kelima belas dihubungkan dengan kutub positif sumber tegangan. Pada modul ketujuh, keempat belas, dan kedua puluh satu kutub negatifnya dihubungkan dengan kutub negatif sumber tegangan. Gambar 2.10 di bawah ini memperlihatkan demikian.

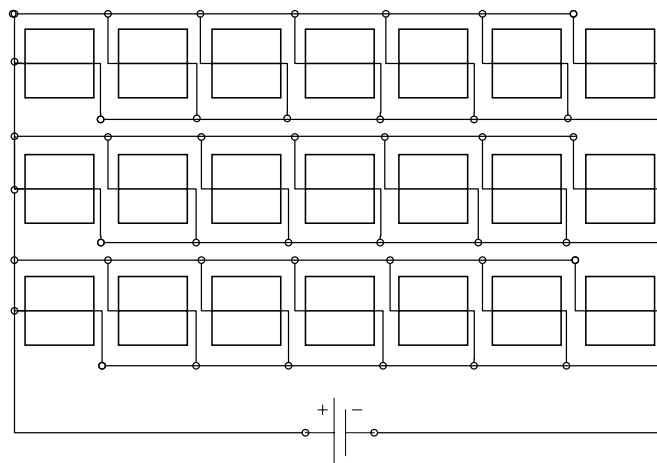


Gambar 2.10 Sistem sambungan seri-paralel model termoelektrik

2.7.3 Sistem Sambungan Paralel antar Modul Termoelektrik

Untuk sistem sambungan paralel antar modul termoelektrik diperhatikan kutub-kutub sejenis dikumpulkan untuk disambungkan ke kutub yang sesuai dengan kutub pada sumber tegangan. Semua kutub positif modul termoelektrik dihubungkan ke kutub positif sumber tegangan, sementara semua kutub negatif modul termoelektrik dihubungkan dengan kutub negatif sumber tegangan.

Sistem sambungan paralel ke-21 modul termoelektrik ditampilkan pada gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Sistem sambungan paralel model termoelektrik

2.8 Sistem Pendingin

Pemenuhan kebutuhan pendingin udara dan bangunan membutuhkan ketersediaan mesin pendingin yang digerakkan secara termal dan listrik. Teknologi pendinginan konvensional didominasi sistem pendingin kompresi [39]. Adanya teknologi termoelektrik yang dapat mengkonversi energi termal menjadi energi listrik atau sebaliknya memberi kontribusi dalam pengembangan teknologi pendinginan, terutama untuk pendingin ruang. Oleh karena itu ada tiga sistem pendingin ruang, yaitu sistem pendingin yang menggunakan *vapour compression*, *absorption air compression*, dan termoelektrik. Secara umum, ada dua jenis teknologi pendinginan yang saat ini digunakan, yaitu kompresi uap bertenaga listrik (menggunakan gas Freon) dan pendinginan melalui penyerapan kalor [50].

Jika dibandingkan dalam kinerja sistem pertama lebih unggul memiliki koefisien kinerja (CoP) paling tinggi, sedangkan dalam biaya perawatan yang terkecil adalah sistem kedua. Untuk sistem pendingin termoelektrik memiliki keunggulan dalam hal ramah lingkungan [51].

Energi panas matahari dapat digunakan untuk pendinginan dan *dehumidification* [11]. Integrasi energi matahari ke dalam proses produksi 'dingin' dilakukan dengan menggunakan sumber energi panas yang dipasok dari kolektor surya atau listrik yang dipasok dari sistem PV. Hal ini dicapai dengan menggunakan unit adsorpsi termal, penyerapan atau peralatan pendinginan konvensional yang didukung oleh sistem PV. Pendinginan surya digunakan terutama untuk mendinginkan toko vaksin di daerah tanpa listrik utama dan untuk pendinginan ruang matahari [22].

Kolektor memainkan peran penting dalam mengekstraksi energi dari radiasi matahari untuk mengoperasikan perangkat pendingin. Kolektor yang digunakan dalam pendinginan panas matahari terdiri dari berbagai jenis, seperti pelat datar temperatur rendah dan tabung dan konsentrator temperatur tinggi yang dievakuasi. Prinsip dasar dibalik pendinginan panas matahari adalah proses termokimia dari penyerapan — suatu zat cair atau gas dapat melekat pada bahan berpori padat (adsorpsi) atau diambil oleh bahan cair atau padat (penyerapan). Fluida perpindahan panas dipanaskan di kolektor surya ke temperatur jauh di atas sekitar dan digunakan untuk menyalakan perangkat pendingin-jenis pompa yang digerakkan oleh panas. Fluida transfer panas mungkin udara, air, atau cairan lain yang dapat disimpan dalam keadaan panas untuk digunakan pada saat tidak ada sinar matahari. Panas diekstraksi oleh perangkat pendingin dari ruang yang dikondisikan dan dari sumber energi matahari ke lingkungan menggunakan udara sekitar atau air dari menara pendingin [11].

Proses pendinginan panas matahari secara luas diklasifikasikan dalam sistem siklus terbuka dan sistem siklus tertutup. Sistem siklus terbuka adalah sistem dimana refrigeran bersentuhan langsung dengan atmosfer dan dibuang dari sistem setelah memberikan efek pendinginan dan refrigeran baru disuplai dalam *loop* terbuka. Dalam sistem tertutup refrigeran tidak bersentuhan langsung dengan udara atmosfer. Sistem siklus terbuka dan tertutup selanjutnya dapat dibedakan berdasarkan jenis sorben yang digunakan, yang dapat berbentuk cair atau padat. Tiga desain utama dari teknologi pendingin panas matahari yang telah mendapatkan daya tarik paling banyak termasuk adsorpsi matahari, penyerapan matahari, dan pengering surya [11].

Beberapa perancangan sistem pendingin panas matahari diperlihatkan pada tabel 2.5 berikut [11]:

Tabel 2.5 Gambaran ikhtisar proses tenaga termal untuk pendinginan dan pendingin udara [11]

Solar thermal cooling system design	Adsorption refrigeration	Absorption refrigeration	Desiccant air conditioning
Solar collector	Vacuum tube collector, flat plate collector	Vacuum tube collector	Flat plate collector, solar air collector
Coolant circulation process	Closed refrigerant circulation systems	Closed refrigerant circulation systems	Open refrigerant circulation systems (in contact with the atmosphere)
Process basic principle	Cold water production	Cold water production	Air dehumidification and evaporative cooling
Sorbent type (Refrigerant/sorbent)	Solid Water-silica gel ammonia-salt	Liquid Water-water-lithium bromide, ammonia-water	Solid Water-silica gel water-lithium chloride-cellulose
Typical operating temp.	60°C-95°C	80°C-110°C (one step) 130°C-160°C (two step)	45°C-95°C

Sistem pendinginan bertenaga termal surya dan proses pengkondisian udara memiliki beberapa teknologi yang sudah dikembangkan yang dikelompokkan menjadi [39]:

1. *Open cycle desiccant cooling.*
2. *Closed cycle adsorption water-silica gel.*
3. *Absorption cooling with ammonia-water.*
4. *Absorption cooling with water-lithiumbromid.*

Proses pendinginan dapat dirancang menggunakan tiga aliran udara yang terpisah: aliran udara pasokan atau primer, aliran udara sekunder, dan aliran udara regeneratif [52]. Energi panas disimpan dengan menambahkan atau menghilangkan panas dari suatu zat. Perubahan yang dialami oleh zat membantu menentukan jenis sistem penyimpanan [53].

Sistem pendingin pada penelitian ini menggunakan termoelektrik yang memanfaatkan efek Peltier pada modul termoelektrik. Tenaga listrik yang diberikan ke

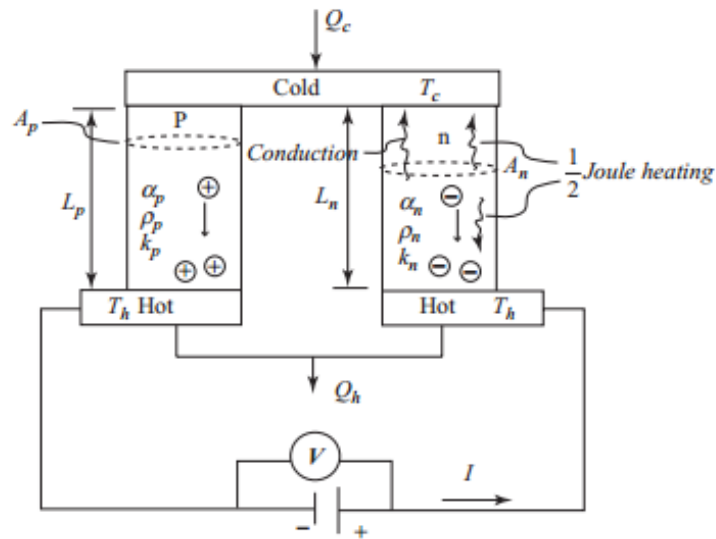
sistem TEC dipasok dari energi cahaya matahari yang dikonversi oleh generator PV. Energi listrik yang diberikan sistem PV membuat perbedaan temperatur pada model termoelektrik. Matahari menyediakan energi termal secara langsung ke sisi panas, maka efek pendinginan akan terjadi pada sisi dingin sistem TEC tersebut yang didistribusikan *heatsink*.

Pada sistem pendingin tidak terkecuali sistem pendingin termoelektrik untuk mengetahui performansi (unjuk kerja) sistem digunakan koefisien kinerja (CoP). Efisiensi energi dari sistem pendingin udara ditentukan oleh koefisien kinerja (CoP), yang didefinisikan sebagai rasio energi pendingin terhadap energi yang dipasok ke sistem [50].

2.9 Sistem Pendingin Ruang Termoelektrik

Pendingin termoelektrik (*thermoelectric cooler*) adalah alat pendingin yang menggunakan elemen Peltier dalam sistemnya sebagai pompa kalor. Efek Peltier timbul apabila dua buah logam yang berbeda disambungkan dan kedua ujung logam tersebut dijaga pada temperatur yang berbeda [51].

Sistem pendingin termoelektrik dengan rangkaian listriknya digambarkan pada gambar 2.12 di bawah ini [42].



Gambar 2.12 Rangkaian listrik pendingin termoelektrik[42]

Prinsip kerjanya sistem pendingin termoelektrik, dimulai ketika arus DC dialirkan ke elemen peltier yang terdiri dari beberapa pasang sel semikonduktor tipe p (semikonduktor yang mempunyai tingkat energi yang lebih rendah) dan tipe n (semikonduktor dengan tingkat energi yang lebih tinggi), akan mengakibatkan salah satu sisi elemen Peltier menjadi dingin (kalor diserap) dan sisi lainnya menjadi panas (kalor dilepaskan) [51].

Hal yang menyebabkan sisi dingin elemen peltier menjadi dingin adalah mengalirnya elektron dari tingkat energi yang lebih rendah pada semikonduktor tipe-p ke tingkat energi yang lebih tinggi yaitu semikonduktor tipe-n. Agar elektron tipe-p yang mempunyai tingkat energi lebih rendah dapat mengalir maka elektron menyerap kalor yang mengakibatkan sisi tersebut menjadi dingin. Sedangkan pelepasan kalor ke lingkungan terjadi pada sambungan sisi panas, dimana elektron mengalir dari tingkat energi yang lebih tinggi (semikonduktor tipe-n) ke tingkat energi energi yang lebih rendah (semikonduktor tipe-p), untuk dapat mengalir ke semikonduktor tipe-p, kelebihan energi pada tipe-n dibuang ke lingkungan sisi tersebut menjadi panas [51].

Penyerapan kalor dari lingkungan terjadi pada sisi dingin yang kemudian akan dibuang pada sisi panas dari modul Peltier, sehingga nilai kalor yang dilepaskan pada sisi panas sama dengan nilai kalor yang diserap ditambah dengan daya yang diberikan ke modul.

Elektron mengalir dari semikonduktor pada tipe-p yang kekurangan energi, menyerap kalor pada bagian yang didinginkan kemudian mengalir ke semikonduktor tipe-n. Semikonduktor tipe-n yang kelebihan energi membuang energi tersebut ke lingkungan dan mengalir ke semikonduktor tipe-p dan seterusnya [51].

Di dalam penggunaan elemen termoelektrik pada sistem pendingin terdapat tiga parameter penting yang perlu diperhatikan, yaitu [51]:

1. Temperatur permukaan sisi panas/*hot side* (T_h)
2. Temperatur permukaan sisi dingin/*cold side* (T_c)
3. Beban kalor yang dapat ditransfer dari ruangan dingin (q_c)

Pada sistem termoelektrik ada dua ΔT yaitu, ΔT sistem dan ΔT elemen. ΔT sistem adalah perbedaan temperatur antara beban pendinginan dan lingkungan, sedangkan ΔT elemen adalah perbedaan temperatur antara sisi dingin termoelektrik dan sisi panas termoelektrik. Pada umumnya pencapaian ΔT ($T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}}$) termoelektrik mendekati konstan. Jika T_{panas} semakin rendah maka T_{dingin} semakin dingin, bila T_{panas} semakin tinggi maka T_{dingin} menjadi kurang dingin [51].

Pada pendingin termoelektrik ini terjadi pembuangan kalor pada sisi panas dan penyerapan kalor ke sisi dingin.

Kinerja termoelektrik dipengaruhi oleh irreversibilitas internal dan eksternal. Irreversibilitas internal disebabkan oleh kerugian ohm dan perpindahan panas konduksi, sedangkan irreversibilitas eksternal disebabkan oleh perbedaan temperatur antara persimpangan panas dan dingin serta antara sumber panas dan *heatsink* dalam termoelektrik [54].

2.10 Perpindahan Kalor pada Sistem Pendingin Ruang

Perpindahan kalor yang terjadi pada sistem pendingin ruang termoelektrik adalah mekanisme perpindahan kalor konduksi dan konveksi. Konduksi terjadi dari pelat aluminium sebagai penyerap panas menuju sisi panas termoelektrik dan dari sisi dingin termoelektrik ke *heatsink*.

Perpindahan kalor konveksi terjadi dari sirip-sirip *heatsink* ke ruang pendingin. Konveksi yang terjadi adalah konveksi alamiah (bebas) yang hanya dipengaruhi oleh gaya apung pergerakan fluida karena perbedaan temperatur dan tidak ada gaya luar yang ikut terlibat. Bentuk dan dimensi *heatsink* yang dipergunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada gambar 2.13.

Perpindahan kalor konduktif dari sirip [55]:

$$q_{fin} = \left[\sqrt{hPkA_c} \tanh \left(\sqrt{\frac{hP}{kA_c}} L \right) \right] (T_b - T_\infty) \quad (2.6)$$

Dimana:

h = koefisien perpindahan kalor konveksi yang melintasi sirip.

P = perimeter sirip

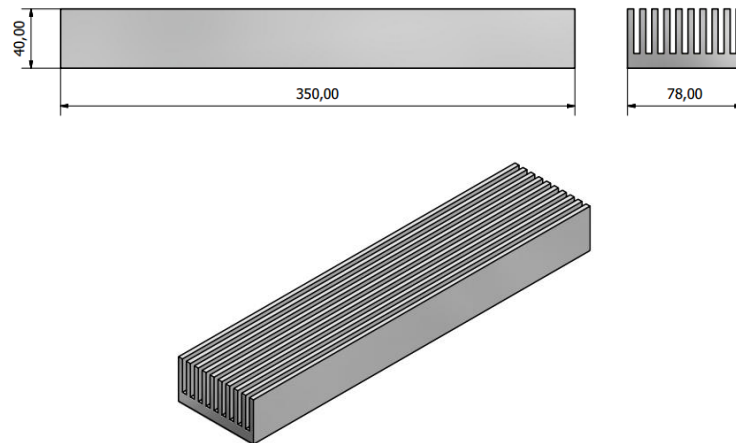
k = konduktivitas termal heatsink.

A_c = luas penampang sirip.

L = panjang masing-masing sirip.

T_b = temperatur sirip

T_∞ = temperatur ambien



Gambar 2.13 *Heatsink*

Perpindahan penyerapan kalor dari ruang pendingin ke *heatsink* sebesar:

$$q = 10 q_{fin} \quad (2.7)$$

2.10.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor konduksi adalah perpindahan kalor pada benda (material) yang tidak diikuti oleh perpindahan partikel material tersebut. Konduksi terjadi disebabkan adanya perbedaan temperatur antara satu sisi dengan sisi lain dalam sebuah material. Ada dua benda dikontakkan akan terjadi transfer energi termal dari benda yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju ke benda yang memiliki temperatur yang lebih rendah.

Persamaan yang digunakan dalam perpindahan kalor konduksi dikenalkan oleh Fourier sebagai berikut [56]:

$$q = -k.A.\frac{T_1-T_0}{\Delta x} \quad (2.8)$$

Jika suatu benda disusun beberapa lapis material yang berbeda, maka perhitungan perpindahan kalor yang terjadi digunakan analogi rangkaian resistensi listrik. Besarnya hambatan termal dalam konduksi adalah perbandingan perbedaan temperatur antara permukaan dengan laju aliran kalor.

Persamaan yang digunakan adalah [56]:

$$R_t = \frac{T_1-T_0}{q} = \frac{1}{k.A} \quad (2.9)$$

2.10.2 Perpindahan Kalor Konveksi

Perpindahan kalor konveksi adalah perpindahan kalor yang terjadi pada zat alir (fluida) akibat pergerakan partikel fluida tersebut. Proses konveksi diiringi pergerakan massa partikel, sehingga pada konveksi ada transfer termal dan transfer massa.

Persamaan yang digunakan berasal dari Hukum Pendinginan Newton, yaitu [56]:

$$q = h.A.(T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

Dalam sistem pendingin ruang (kabin), konveksi yang terjadi adalah konveksi alamiah (konveksi bebas). Pada konveksi jenis ini terjadi gerakan gaya apung yang disebabkan berkurangnya densitas fluida di dekat permukaan perpindahan kalor akibat proses pemanasan [56]. Pada perpindahan kalor konveksi terdapat tiga bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Prandtl (Pr), bilangan Nusselt (Nu), bilangan Grashof (Gr), dan bilangan Rayleigh (Ra). Untuk bilangan Nusselt dihitung dengan Persamaan (2.11) [56]:

$$Nu_x = \frac{hx}{k} \quad (2.11)$$

Untuk analisis konveksi bebasnya adalah konveksi bebas dari pelat vertikal, baik untuk beban kalor transmisi antar dinding dalam ruang pendingin maupun beban kalor transmisi antara dinding dalam dengan lingkungan luar.

Pada konveksi bebas berlaku tiga persamaan berikut, yakni Persamaan (2.12), (2.13), dan (2.14) [56]:

$$Gr_x = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_\infty) \cdot x^3}{\nu^2} \quad (2.12)$$

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} \quad (2.13)$$

$$Ra = GrPr \quad (2.14)$$

Sementara untuk konveksi bebas pada pelat vertikal ditentukan dua persamaan berikut, yakni persamaan (2.15) dan (2.16) dengan penggunaannya ditentukan rentang nilai Ra [56]:

$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,670Ra^{1/4}}{[1 + (\frac{0,492}{Pr})^{16}]^{4/9}} \quad \text{untuk } Ra_L < 10^9 \quad (2.15)$$

$$\overline{Nu}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (\frac{0,492}{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \quad \text{untuk } 10^{-1} < Ra_L < 10^{12} \quad (2.16)$$

2.10.3 Hambatan Kontak Termal

Pada pemasangan penyerap panas pelat aluminium dan termoelektrik, antara sisi pelat aluminium dengan isolator *styrofoam* yang mengelilingi termoelektrik, antara termoelektrik dengan *heatsink*, dan antara isolator *styrofoam* dengan *heatsink* terjadi hambatan kontak termal (*thermal contact resistance*). Kekasaran permukaan sisi-sisi

bidang kontak akan menyebabkan penurunan temperatur pada persinggungan kedua sisi sehingga mempengaruhi laju perpindahan kalor.

Ada dua hal yang menentukan perpindahan kalor antar sambungan, yaitu [51]:

1. Konduksi antara zat padat dengan zat padat pada titik-titik persinggungan (*contact spot*).
2. Konduksi melalui gas yang terkurung pada ruang-ruang lowong yang terbentuk karena persinggungan (*air gap*).

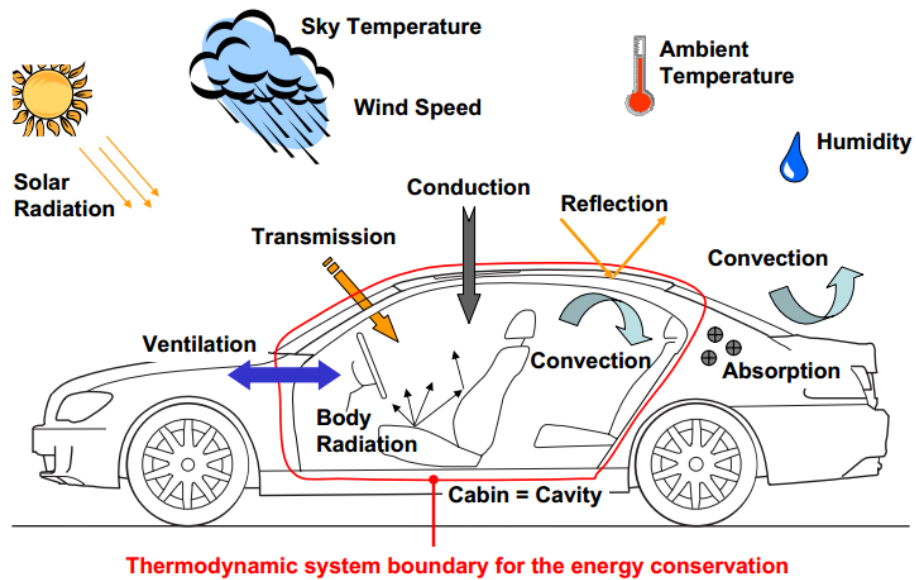
2.11 Sistem Pendingin Kabin *City Car*

City car adalah mobil dengan spesifikasi: dimensi panjang tidak lebih 2,5 m, lebar 1,5 m, tinggi 1,6 m; tenaga motor 2 kW; berat maksimum 400 kg; kecepatan 50 km/jam – 70 km/jam; konsumsi bahan bakar 1 liter/25 jam; dan kapasitas 2 – 4 orang (2). *City car* memiliki kapasitas kabin 2,5 m³ [57]. Temperatur kabinnya 25 °C dengan kelembaban relatif 60% [58].

Tidak seperti sistem *HVAC* (*Heating, Ventilation, and Air-Conditioning*) pada bangunan, perkantoran, dan perumahan, sistem HVAC pada otomotif keempat sisinya terdapat kaca dengan sumber pemanasan dari mesin, dan hal ini menjadi sensitif terhadap beban termal yang disebabkan sedikit insulasi [59].

Sistem *HVAC* pada kabin mobil dipengaruhi faktor material, geometri, jumlah manusia di dalam mobil, kondisi cuaca (temperatur udara, temperatur permukaan dalam dan luar, kecepatan angin, kelembaban relatif, dan intensitas sinar matahari), dan perpindahan kalor yang terjadi (konveksi di dalam dan di luar, konduksi, dan radiasi) [60], [61], [62], [63].

Keseimbangan termal yang terjadi dalam kabin mobil dijelaskan dengan gambar 2.14 di bawah ini.



Gambar 2.14 Keseimbangan termal dalam kabin mobil [62]

Perpindahan kalor dalam kabin mobil dipengaruhi beberapa mekanisme antara lain adalah [63]:

1. Tranmisi kalor melalui kaca mobil.
2. Konduksi melalui bodi mobil.
3. Konveksi udara dalam kabin mobil.
4. Radiasi yang dipancarkan interior mobil.
5. Ventilasi udara dalam mobil.

BAB 3

METODE PENELITIAN

Masalah sistem PV dan sistem TE yang dipadukan untuk diteliti terdapat banyak variabel baik pada sistem itu sendiri maupun terkait kondisi lingkungan sekitarnya. Dalam penelitian hibridisasi PV-TE yang diterapkan sebagai model sistem pendingin kabin mobil ini dibatasi pada hal-hal berikut ini.

1. Model sistem terpisah antara sistem PV dan sistem TE (pendingin) yang dibuat dalam bentuk kotak pendingin dengan volume $0,43 \text{ m}^3$ (menyesuaikan sisi atasnya dengan luas modul PV yang digunakan).
2. Sistem PV dan kotak pendingin miring 30° menghadap ke arah utara (posisi optimal mendapat sinar matahari untuk bagian bumi di Lintang Selatan).
3. Kotak pendingin berukuran: panjang 1014 mm, lebar 869 mm, tinggi belakang 790 mm dan tinggi depan 190 mm.
4. Sistem PV menggunakan modul *Solar Cell 100 Wp Polycrystalline* 1005 mm x 665 mm x 30 mm.
5. Termoelektrik yang digunakan berjenis TEC 1-12706 dengan material BiSn dan berukuran 40 mm x 40 mm x 3,8 mm yang memiliki spesifikasi[9]:

T_h [°C]	27	50
ΔT_{maks} [°C]	70	79
V_{maks} [volt]	16,0	17,2
I_{maks} [ampere]	6,1	6,1
Q_{maks} [watt]	61,4	66,7
Hambatan [ohm]	2.0	2,2
Toleransi [%]	± 10	

6. *Heatsink* terbuat dari aluminium dengan ukuran 350 mm x 78 mm x 40 mm: 10 sirip

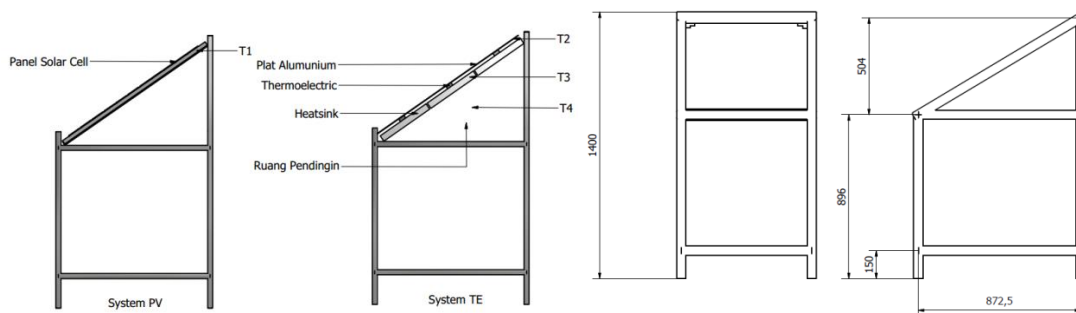
7. Pasangan TE-*heatsink* sebanyak 21 buah disesuaikan dengan luas modul sel surya, supaya energi cahaya matahari yang diterima sel surya sama dengan energi panas matahari yang diterima pelat aluminium (sisi panas TE) persatuan luas.
8. Pasangan TE-*heatsink* disusun dengan susunan paralel untuk sistem termal, sedangkan sistem listrik diuji coba lebih dahulu dengan baterai untuk setiap sambungan seri, seri-paralel, dan paralel dan kemudian dipasang pada sistem.
9. Sebagai pemodelan kabin *city car* yang dikelingi material logam dan bukan logam, maka pada dinding-dinding kotak pendingin dilapisi pelat aluminium dan *styrofoam*, kecuali bagian bawah hanya ditutup pelat aluminium yang tidak terpancar panas matahari langsung.
10. Selama sistem PV beroperasi energi cahaya matahari yang diterima modul sel surya diubah menjadi energi listrik lalu dialirkan ke *Solar Charge Contoller* yang kemudian energi tersebut disimpan dalam batrey (*energy storage*) dan dari *Solar Charge Contoller* energi listrik juga diberikan kepada beban (sistem pendingin).
11. Pengambilan data dilakukan di atas gedung (*roof top*) untuk mendapat sebanyak mungkin sinar matahari dan dilakukan sepanjang hari (pukul 08.00 – 16.00).

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

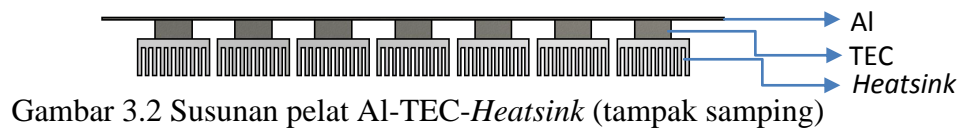
Penelitian dilakukan pada bulan Juni 2019 sampai Januari 2020 di Laboratorium Fakultas Teknik UHAMKA.

3.2 Desain Penelitian

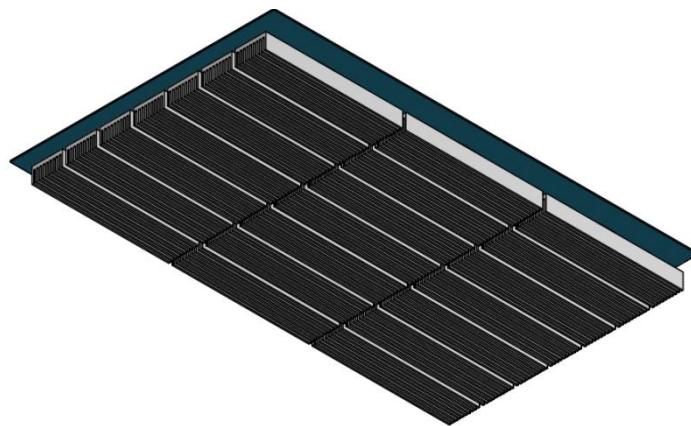
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimentasi, dengan desain penelitian yang dapat dijelaskan dari gambar berikut. Pada gambar 3.1 tampak perangkat sistem PV dan sistem TE.



Gambar 3.1 Perangkat sistem PV dan TE



Gambar 3.2 Susunan pelat Al-TEC-Heatsink (tampak samping)



Gambar 3.3 Susunan pelat Al-TEC-Heatsink (bentuk 3 dimensi)

Spesifikasi fungsi setiap komponen dijelaskan berikut ini:

1. Panel *solar cell*

Panel ini berfungsi untuk mengkonversi langsung energi radiasi matahari menjadi energi listrik.

2. Pelat Aluminium (Al)

Pelat aluminium digunakan sebagai penyerap panas matahari.

3. Pendingin termoelektrik (TEC)

Termoelektrik digunakan sebagai sumber pendingin yang dibangkitkan tenaga listrik dan panas aluminium.

4. *Heatsink*

Heatsink lebih tepatnya *coldsink* digunakan sebagai pendistribusi proses penyerapan kalor melalui sirip-siripnya yang memperbesar luas permukaan.

3.3 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan dua sistem sehingga terjadi dua kali perhitungan, maka variabel penelitian dibuat masing-masing sistem.

1. Untuk sistem PV.

Variabel dalam sistem ini adalah:

- a. Variabel bebas: intensitas radiasi matahari dan kondisi lingkungan (kecepatan angin, kelembaban udara, temperatur ambien).

Intensitas radiasi matahari adalah masukan dalam sistem PV sebagai pemasok energi untuk dikonversi menjadi energi listrik. Besaran intensitas matahari ditentukan oleh radiasi yang datang dan diukur langsung. Kondisi lingkungan mempengaruhi intensitas radiasi yang sampai pada permukaan

modul sel surya dan hal ini berpengaruh dalam proses konversi energi pada sistem PV.

b. Variabel tergantung: daya sistem PV

Daya sistem PV adalah daya luaran yang dihasilkan hasil konversi energi. Daya luaran ini bergantung langsung pada radiasi yang datang ke permukaan sel surya dan diukur dalam bentuk tegangan listrik dan arus listrik lebih dahulu lalu dihitung.

2. Untuk sistem TE dan pendingin.

Sistem TE dan sistem pendingin berada dalam satu rangka, dimana sistem TE yang terdiri dari pelat aluminium menempel pada sisi panas dan *heatsink* yang menempel pada sisi dingin. *Heatsink* menghadap ke ruang pendingin, sehingga posisinya ada di bagian atas ruang pendingin.

Variabel dalam sistem ini adalah:

a. Variabel bebas: daya sistem PV sebagai daya masukan sistem TE.

Daya luaran dari sistem PV dipergunakan oleh sistem TE sebagai pemasok energi untuk menghasilkan perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin TE. Daya ini ditetapkan sebagai suatu kesatuan sistem (PV dan TE) yang mempengaruhi kemampuan sisi dingin (*heatsink*) menyerap kalor sekeliling ruang untuk memproduksi kondisi dingin.

b. Variabel tergantung: temperatur ruang pendingin.

Temperatur ruang pendingin serendah mungkin adalah capaian akhir yang diinginkan dalam penelitian ini. Temperatur ini bergantung pada perbedaan

temperatur dan menurut kebalikan efek Seebeck dan efek Peltier perbedaan temperatur ini ditentukan oleh besarnya tegangan listrik dan arus listrik.

3.4 Bahan atau Material

Bahan atau material yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Pelat Aluminium #3mm 700mm x 1000mm (1 lembar).
2. *Heatsink* 350 mm x 78 mm x 40 mm: 10 sirip (21 buah).
3. Isolator *styrofoam* tebal 18 mm (1 buah).
4. Rangka besi (2 buah) terdiri dari rangka sistem PV serta rangka sistem TE dan pendingin.

3.5 Alat atau Instrumen

Alat atau instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Panel Solar Cell 100 Wp Polycrystalline 1005mm x 665mm x 30 mm (1 buah)
dengan spesifikasi:
 - a. Jenis panel surya Polycrystalline
 - b. Model no. SW100P
 - c. Product date : 13 April 2018
 - d. Peak power/Pmax (W) : 100
 - e. Power tolerance range (W) : 0 – 3
 - f. Open circuit voltage/Voc (V) : 22,1
 - g. Rated voltage/Vmpp (V) : 18,2
 - h. Short circuit current/Isc (A) : 6,00
 - i. Rated current/Impp (A) : 5,49
 - j. Max. System voltage (V) : 800
 - k. Wiegth (kg) : 7,5
 - l. Series fuse rating (A) : 10
 - m. Module efisiensi (%) : 14,9
2. Solar Charge Contoller PWM 20 (1 buah).

3. Power Inverter 12V 500W (1 buah).
4. Battery VOZ (12V65Ah) (1buah).
5. Digital Thermometer OMHA1TBK (31 buah).
6. Termoelektrik TEC 1-12706 (21 buah).
7. Solar Power Meter (1 buah).
8. Digital AVO Meter (1 buah).
9. Anemometer (1 buah).
10. Multimeter (1 buah).
11. Hygrometer (1 buah).

3.6 Prosedur Pengambilan dan Pengumpulan Data

Pengambilan data dilakukan dengan pengukuran, kemudian dikumpulkan dengan mentabulasikan. Mengingat penelitian ini terdiri dari dua perangkat, yaitu sistem PV dan sistem TE maka data yang diperoleh awalnya secara terpisah masing-masing sistem ketika sistem masih dalam eksperimen untuk mendapatkan hasil yang valid. Kemudian data diperoleh setelah sistem dipadukan ketika sistem sudah dioperasikan.

Sistem PV menggunakan sebuah sel surya jenis *Polycrystalline* dengan daya luaran 100 W yang spesifikasinya secara rinci diuraikan di sub bab 3.5 tentang Alat atau Instrumentasi. Mengingat Jakarta ada di bumi bagian Lintang Selatan dan untuk mendapatkan radiasi matahari yang optimal, maka sel surya dipasang menghadap ke Utara dengan sudut kemiringan 30° seperti yang terlihat pada gambar 4.1 sebelah kiri.

Pada sel surya di bagian permukaan dilakukan pengukuran temperatur dengan satu termometer digital, demikian juga pada sisi bawah sel surya juga dilakukan pengukuran

dengan satu termometer digital. Temperatur lingkungan diukur dengan meletakkan satu termometer digital yang diposisikan sejauh 10 cm dari sel surya. Anemometer yang digunakan mengukur kecepatan angin diletakkan pada rangka juga dengan satu alat saja.

Intensitas radiasi matahari yang sampai di permukaan sel surya diukur dengan Solar power meter dengan menerawangkan alat tersebut ke arah matahari setinggi 20 -30 cm di atas sel surya yang memungkinkan tak ada lagi penghalang radiasi menuju permukaan sel surya. Pengukuran berlangsung setiap 30 menit sepanjang waktu pengukuran dari pukul 08.00 sampai 17.00 WIB (tergantung kondisi cuaca).

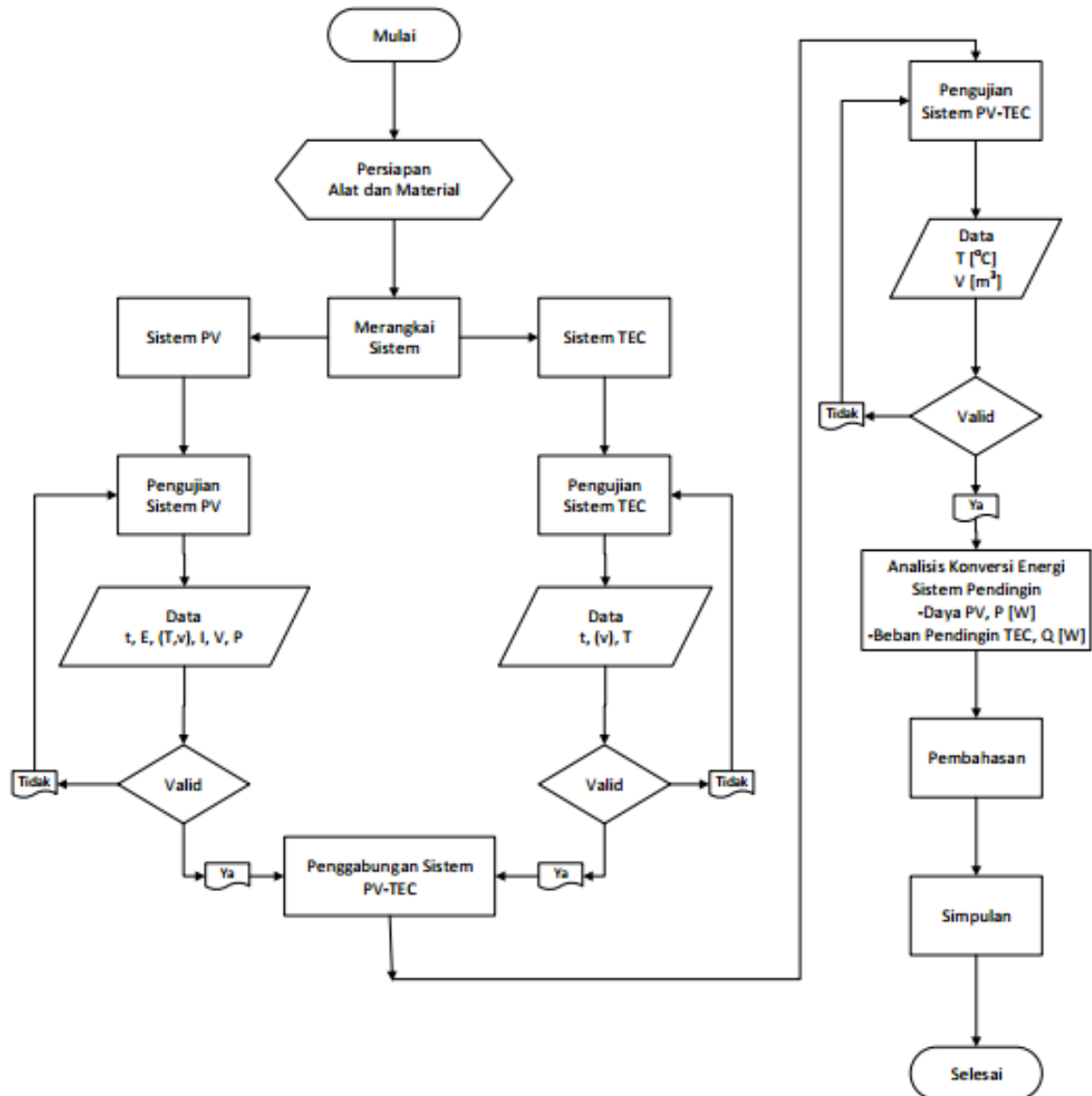
Kedua besaran listrik tegangan dan kuat arus diukur dengan pengukur Digital AVO Meter yang dipasang pada kerangka sistem PV. Untuk mendapatkan ukuran yang akurat juga digunakan pengukuran dengan Multimeter secara manual setiap 30 menit sekali.

Sesuai dasar pemikiran untuk mendapatkan sebanyak mungkin radiasi cahaya matahari dan radiasi panas matahari, maka luasan pelat aluminium disesuaikan dengan luasan sel surya. Konsekuensinya pasangan modul TE-*heatsink* harus menyesuaikan, sehingga dibutuhkan pasangan modul TE-*heatsink* sebanyak 21 buah, yang juga dibuat miring 30° menghadap Utara untuk mendapatkan radiasi panas seoptimal mungkin, seperti tampak pada gambar 4.1 sebelah kanan.

Pengukuran temperatur pada sisi panas menggunakan satu termometer digital yang diletakkan pada permukaan aluminium, sedangkan pengukuran temperatur sisi dingin dengan meletakkan sensor termometer digital pada setiap sisi ke-21 *heatsink*.

Pengukuran temperatur pada ruang pendingin dengan meletakkan sensor pada ruang tengah (tergantung) serta menempel pada sisi dalam sebelah depan, kiri, kanan, belakang, dan alas bawah dengan masing-masing satu sensor termometer digital.

3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.4 Diagram alir penelitian

Penelitian yang dilakukan berdasarkan langkah-langkah yang digambarkan oleh diagram alir penelitian pada gambar 3.4 di atas. Secara rinci langkah-langkah penelitian ini diuraikan sebagai berikut, dengan urutan:

1. Memulai penelitian dengan studi literatur, yakni menelaah sejumlah jurnal yang berkaitan dengan sistem PV, sistem TE, dan sistem pendingin, yang juga merujuk pada buku teks yang relevan.
2. Kemudian dilakukan persiapan alat dan material. Alat atau instrumen dan bahan atau material sebagaimana yang diuraikan pada sub bab 3.5 dan sub bab 3.4.
3. Langkah berikutnya adalah melakukan rangkaian sistem baik sistem PV maupun sistem TE secara terpisah.
4. Setelah masing-masing sistem dirangkai dilakukan pengujian terhadap kinerja sistem.
 - a. Pada sistem PV yang kinerjanya dipengaruhi oleh intensitas radasi matahari, temperatur (lingkungan dan sel surya) selama waktu pengukuran untuk menghasilkan arus listrik, tegangan listrik, dan daya listrik. Dalam pengukuran variabel tergantung dicermati valid tidaknya yaitu kesesuaiannya dengan spesifikasi modul sel surya. Jika nilai yang diperoleh tidak sesuai atau berbeda jauh, maka hasil uji dikatakan tidak valid dan peralatan, perangkat, dan sistem penyambungan terkait variabel bebas dilakukan pemeriksaan atau perbaikan. Sebaliknya, jika hasilnya sesuai atau masih masuk dalam toleransi, maka data dikatakan valid yang kemudian perangkat dipersiapkan untuk diintegrasikan.
 - b. Seperti halnya sistem PV, langkah pengambilan keputusan data yang diperoleh valid tidaknya dilakukan langkah serupa, tetapi dengan perbedaan variabel. Pada sistem TE variabel tergantung adalah temperatur pendingin, dengan terlebih dahulu mengetahui perbedaan temperatur. Perbedaan

temperatur ini disesuaikan signifikansinya dengan spesifikasi modul termoelektrik. Perbedaan temperatur yang tidak signifikan, maka data dikatakan tidak valid sehingga peralatan sistem TE-*heatsink* perlu ditinjau sambungan dan pemasangannya. Sebaliknya, jika perbedaan temperatur sudah signifikan, maka data dikatakan valid dan perangkat dipersiapkan untuk dipadukan.

5. Mengintegrasikan atau memadukan kedua sistem, yakni melakukan penggabungan sistem PV dengan sistem TE menjadi sistem pendingin bertenaga matahari.
6. Perangkat sistem diuji dengan meninjau temperatur ruang pendingin. Jika temperatur yang diperoleh masih jauh dari target temperatur, maka dikatakan data ini tidak valid dan sistem diperiksa atau diganti perangkat temperatur dan diperiksa ruang (volume) pendinginnya terkait dengan sistem isolasinya. Jika temperatur hasil sudah masuk dalam toleransi temperatur yang ditargetkan, maka data dikatakan valid dan sistem akan dianalisis.
7. Sistem dianalisis konversi energi yang berlangsung dan dihitung kinerja sistem pendingin.
8. Penelitian diakhiri dengan pelaporan yang berisikan pembahasan dan simpulannya.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Penelitian eksperimentasi terhadap sistem pendingin termoelektrik bertenaga sel surya ini menghasilkan data penelitian yang disajikan dalam bentuk tabel-tabel di bawah ini. Data-data tersebut diperoleh dari pengukuran terhadap alat penelitian yang dibuat sebelumnya.

4.1.1 Spesifikasi Sistem Pendingin

Alat penelitian yang merupakan sistem pendingin termoelektrik bertenaga sel surya diperlihatkan pada gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4.1 Alat penelitian sistem pendingin termoelektrik bertenaga sel surya
a. Sebelah kiri adalah sistem pendingin termoelektrik
b. Sebelah kanan adalah sel surya

4.1.2 Hasil Pengukuran pada Sel Surya

Pengukuran pada sel surya menghasilkan data-data yang disajikan untuk setiap sambungan TE, diantaranya:

1. Untuk sambungan TE seri

Untuk sambungan TE seri, pengukuran pada sistem PV sepanjang 19 kali pengukuran menghasilkan data yang disajikan pada tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil pengukuran pada sel surya (TE seri)

No.	Pukul	T _i [°C]	T _{SC ON} [°C]	T _{SC UNDER} [°C]	ΔT [°C]	I _v [W/m ²]	A [m ²]	Q [W]	v [m/s]	Kelembaban Udara		V (volt)	I (ampere)
										Dry bulb	Wet bulb		
1	08.00	34,80	38,60	37,80	0,80	1011	0,68407	691,59	0,70	30,50	21,00	10,50	3,75
2	08.30	35,60	39,30	38,70	0,60	1024	0,68407	700,49	1,00	31,00	21,50	10,50	3,75
3	09.00	37,60	44,40	43,20	1,20	1151	0,68407	787,36	1,50	33,00	23,00	10,30	3,81
4	09.30	40,10	46,90	47,60	-0,70	1156	0,68407	790,78	1,50	34,00	22,50	10,20	4,15
5	10.00	39,20	48,60	47,50	1,10	1182	0,68407	808,57	1,70	34,50	23,50	10,20	4,54
6	10.30	41,80	50,90	47,60	3,30	1178	0,68407	805,83	0,60	35,50	24,50	10,20	4,39
7	11.00	40,70	49,90	48,60	1,30	1174	0,68407	803,10	2,10	35,00	24,00	10,20	4,78
8	11.30	40,20	49,30	47,20	2,10	1190	0,68407	814,04	2,40	35,50	24,00	10,20	4,78
9	12.00	39,30	47,10	45,20	1,90	1160	0,68407	793,52	2,50	36,50	23,50	10,20	4,58
10	12.30	39,80	48,10	45,90	2,20	1083	0,68407	740,85	3,70	36,50	23,50	10,20	4,26
11	13.00	52,10	49,30	45,70	3,60	1128	0,68407	771,63	3,30	36,50	24,00	10,20	4,30
12	13.30	37,70	47,70	46,20	1,50	1111	0,68407	760,00	3,70	37,00	24,50	10,20	4,04
13	14.00	38,70	43,30	42,80	0,50	984	0,68407	673,12	3,10	34,50	25,00	10,30	3,49
14	14.30	39,90	40,60	40,50	0,10	941	0,68407	643,71	3,50	34,00	25,00	10,40	3,10
15	15.00	37,90	40,40	40,20	0,20	928	0,68407	634,82	2,10	34,50	25,00	10,20	2,54
16	15.30	36,60	39,20	35,60	3,60	922	0,68407	630,71	2,00	33,00	25,50	10,20	2,45
17	16.00	37,00	40,10	36,00	4,10	913	0,68407	624,56	2,70	33,50	25,50	10,40	2,65
18	16.30	30,50	38,90	29,80	9,10	908	0,68407	621,14	2,90	30,00	24,00	10,30	2,58
19	17.00	31,50	38,20	30,50	7,70	897	0,68407	613,61	2,50	30,50	24,50	10,30	2,70

2. Untuk sambungan TE seri-paralel

Pada sambungan TE seri-paralel, sistem PV yang digunakan memberikan data pengukuran sebanyak 16 kali pengukuran (sore hari terjadi hujan) yang ditampilkan pada tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.2 Hasil pengukuran pada sel surya (TE seri-paralel)

No.	Pukul	T_L [°C]	$T_{SC ON}$ [°C]	$T_{SC UNDER}$ [°C]	ΔT [°C]	I_v [W/m ²]	A [m ²]	Q [W]	v [m/s]	Kelembaban Udara		V (volt)	I (ampere)
										Dry bulb	Wet bulb		
1	08.00	31,50	43,20	42,10	1,10	453,00	0,68407	309,88	0,40	29,30	25,50	10,40	4,89
2	08.30	31,30	42,80	43,20	-0,40	389,00	0,68407	266,10	0,30	29,50	29,50	10,40	4,68
3	09.00	31,10	42,10	43,20	-1,10	352,00	0,68407	240,79	0,60	30,00	30,00	10,40	3,98
4	09.30	31,80	45,80	46,70	-0,90	329,00	0,68407	225,06	0,10	29,50	29,50	10,40	4,85
5	10.00	32,80	46,70	47,90	-1,20	406,00	0,68407	277,73	0,80	30,50	30,50	10,50	4,93
6	10.30	33,30	49,00	48,70	0,30	471,00	0,68407	322,20	0,40	30,50	25,00	10,30	2,23
7	11.00	33,90	46,60	45,80	0,80	404,00	0,68407	276,36	0,20	31,50	26,00	10,30	2,03
8	11.30	34,00	51,80	50,20	1,60	518,00	0,68407	354,35	0,10	31,50	25,50	10,30	2,46
9	12.00	35,40	55,30	54,00	1,30	628,00	0,68407	429,60	0,80	32,50	25,50	10,30	2,92
10	12.30	34,90	54,30	53,00	1,30	682,00	0,68407	466,54	0,60	32,00	25,00	10,30	3,05
11	13.00	35,80	55,10	53,40	1,70	673,00	0,68407	460,38	0,80	32,50	25,00	10,30	3,02
12	13.30	34,40	45,10	44,50	0,60	324,00	0,68407	221,64	0,60	32,00	25,00	10,20	1,66
13	14.00	32,60	38,60	38,20	0,40	208,00	0,68407	142,29	2,80	31,50	24,50	10,00	0,96
14	14.30	32,10	35,70	36,00	-0,30	131,00	0,68407	89,61	1,70	30,50	25,50	9,89	0,67
15	15.00	32,00	36,50	36,80	-0,30	210,00	0,68407	143,65	1,80	30,50	25,50	10,10	1,03
16	15.30	31,70	33,70	34,20	-0,50	110,00	0,68407	75,25	2,30	31,50	25,00	9,87	0,64

3. Untuk sambungan TE paralel

Sistem sambungan ketiga adalah sambungan TE paralel, dimana sistem PV

menghasilkan data-data sepanjang 17 kali pengukuran (sore hari mendung) yang dapat dilihat pada tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.3 Hasil pengukuran pada sel surya (TE paralel)

No.	Pukul	T_L [°C]	$T_{SC ON}$ [°C]	$T_{SC UNDER}$ [°C]	ΔT [°C]	I_v [W/m ²]	A [m ²]	Q [W]	v [m/s]	Kelembaban Udara		V (volt)	I (ampere)
										Dry bulb	Wet bulb		
1	08.00	31,00	33,90	34,20	-0,30	355	0,68407	242,84	1,10	26,50	24,00	32,70	1,60
2	08.30	33,10	39,70	38,90	0,80	432	0,68407	295,52	1,40	27,50	24,50	36,20	2,40
3	09.00	33,50	46,40	43,40	3,00	877	0,68407	599,93	1,40	29,00	25,00	34,00	1,86
4	09.30	32,70	40,50	39,60	0,90	945	0,68407	646,45	0,70	28,50	24,00	37,20	3,86
5	10.00	33,70	41,60	39,20	2,40	372	0,68407	254,47	2,60	29,00	24,00	34,30	1,58
6	10.30	31,70	38,30	37,10	1,20	324	0,68407	221,64	3,10	29,00	24,00	35,60	1,64
7	11.00	32,00	37,00	36,20	0,80	296	0,68407	202,48	5,10	29,50	24,00	27,40	1,67
8	11.30	32,00	37,10	36,70	0,40	265	0,68407	181,28	6,40	29,00	23,50	25,60	1,47
9	12.00	33,20	41,90	40,50	1,40	382	0,68407	261,31	4,40	30,00	24,00	25,70	1,96
10	12.30	34,00	50,40	46,80	3,60	867	0,68407	593,09	1,10	30,50	23,50	25,40	2,49
11	13.00	38,00	53,90	49,20	4,70	1160	0,68407	793,52	4,00	31,50	23,50	24,70	5,15
12	13.30	34,80	46,30	44,00	2,30	864	0,68407	591,04	4,90	31,00	23,50	23,70	2,81
13	14.00	35,40	42,00	40,10	1,90	428	0,68407	292,78	5,70	31,00	23,50	21,80	2,16
14	14.30	33,80	39,50	38,30	1,20	444	0,68407	303,73	2,50	30,00	23,50	20,80	1,72
15	15.00	33,00	36,00	36,00	0,00	228	0,68407	155,97	5,40	30,00	24,00	20,20	1,08
16	15.30	34,80	43,60	41,80	1,80	691	0,68407	472,69	1,20	31,00	24,50	20,20	2,14
17	16.00	32,70	37,00	37,00	0,00	390	0,68407	266,79	3,90	30,00	24,00	19,50	1,24

4.1.3 Susunan Sambungan Seri antar Modul Termoelektrik

4.1.3.1 Hasil Pengukuran Temperatur pada *Heatsink*

Data-data berikut diperlihatkan sebagai hasil pengukuran temperatur pada *heatsink* yang dilekatkan pada sisi dingin termoelektrik.

Tabel 4.4 Hasil pengukuran temperatur pada *heatsink* (sambungan seri)

No.	Pukul	T ₁ [°C]	T ₂	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	T ₄ [°C]	T ₅ [°C]	T ₆ [°C]	T ₇ [°C]	T ₈ [°C]	T ₉ [°C]	T ₁₀ [°C]	T ₁₁ [°C]	T ₁₂ [°C]	T ₁₃ [°C]	T ₁₄ [°C]	T ₁₅ [°C]	T ₁₆ [°C]	T ₁₇ [°C]	T ₁₈ [°C]	T ₁₉ [°C]	T ₂₀ [°C]	T ₂₁ [°C]
1	08.00	34,80	36,80	32,50	33,00	30,50	32,40	32,00	30,10	30,30	30,20	29,90	30,10	30,00	30,00	30,90	31,30	31,30	31,60	30,00	28,90	30,90	29,80	33,60
2	08.30	35,60	37,70	33,70	34,10	32,70	34,00	34,40	33,70	33,60	33,60	32,30	32,80	32,60	32,00	32,20	33,30	33,30	33,80	32,90	31,80	32,10	31,60	34,70
3	09.00	37,60	42,80	37,80	38,20	37,00	38,30	38,30	37,30	38,90	37,40	36,70	37,20	37,90	37,30	37,90	38,90	39,10	40,00	39,70	37,80	37,90	37,50	39,20
4	09.30	40,10	48,40	42,90	43,40	42,10	43,30	43,20	42,30	41,80	42,70	42,50	43,10	43,80	43,30	43,70	44,40	44,90	45,80	46,00	44,50	44,20	4,37	44,40
5	10.00	39,20	49,10	46,10	46,60	45,40	46,60	46,60	45,60	44,90	46,10	46,20	46,80	47,40	47,20	47,20	47,70	48,10	49,10	49,50	48,00	47,70	47,30	47,70
6	10.30	41,80	50,60	47,70	48,10	47,20	48,30	48,20	47,20	46,40	47,60	47,90	48,30	49,20	49,30	48,80	49,10	49,50	50,50	51,00	49,80	49,30	48,90	48,90
7	11.00	40,70	49,70	47,40	47,90	46,80	48,10	48,00	47,00	46,30	47,40	47,80	48,30	48,90	49,40	48,50	48,50	48,90	50,00	50,50	49,40	48,80	48,60	48,70
8	11.30	40,20	51,20	48,20	48,70	47,70	49,00	49,10	48,00	47,70	48,50	48,80	49,20	49,90	50,10	49,30	49,20	49,80	50,90	51,70	50,40	50,10	49,80	49,90
9	12.00	39,30	48,70	47,70	48,10	47,50	48,50	48,50	47,60	46,70	48,10	48,40	48,70	49,50	30,00	48,70	48,70	43,70	50,40	51,00	49,90	49,40	49,20	49,20
10	12.30	39,80	45,10	43,90	43,60	41,00	42,40	43,50	43,80	44,60	45,90	45,30	47,30	46,10	45,40	46,00	46,30	46,90	47,30	48,30	47,60	47,40	47,20	47,90
11	13.00	52,10	43,60	41,60	40,80	38,00	39,40	40,60	41,30	42,70	45,30	44,70	43,90	44,40	45,20	43,70	44,30	46,40	47,50	48,00	47,20	47,00	46,90	47,40
12	13.30	37,70	45,70	39,50	39,30	37,30	39,10	40,80	41,80	42,40	44,40	43,70	42,30	42,20	43,10	40,40	41,00	44,50	45,50	45,60	45,10	45,10	44,80	45,70
13	14.00	38,70	42,70	42,80	43,60	42,60	44,20	44,60	44,10	43,70	44,60	44,50	44,20	44,60	44,70	43,50	43,60	44,20	45,30	45,10	44,30	44,20	45,50	42,80
14	14.30	39,90	45,60	41,80	42,50	41,70	43,40	43,70	42,90	42,30	43,30	43,40	43,20	43,70	44,20	42,60	42,80	43,20	44,30	44,50	43,50	43,60	43,40	44,10
15	15.00	37,90	50,00	41,40	42,20	41,40	43,00	43,30	42,50	42,00	43,00	43,00	42,90	43,20	43,60	42,20	42,30	42,10	44,00	44,20	43,50	43,30	43,10	43,90
16	15.30	36,60	48,20	37,50	38,40	37,70	39,10	39,60	38,70	38,00	39,10	39,10	38,40	39,30	39,50	38,00	38,10	38,00	40,30	40,00	39,00	39,10	30,00	39,70
17	16.00	37,00	49,50	38,30	40,00	39,40	41,20	41,50	40,60	40,00	41,50	41,80	40,30	40,60	40,70	40,30	40,10	39,80	41,50	41,20	39,90	39,40	39,70	39,90
18	16.30	30,50	32,70	33,10	33,40	32,20	36,50	35,70	34,90	34,60	34,80	35,20	34,70	35,00	36,30	33,50	33,90	34,20	34,20	35,50	34,20	34,30	34,60	35,40
19	17.00	31,50	33,70	35,10	33,70	34,80	36,50	36,80	35,90	35,30	35,90	35,30	35,60	36,00	37,00	34,90	35,40	35,50	36,50	36,50	36,00	36,80	35,40	36,50

Pada penelitian ini menggunakan 21 termoelektrik dan 21 *heatsink*, maka pengukuran temperturnya dilakukan sebanyak susunan termoelektrik-*heatsink* yang disusun secara seri.

4.1.3.2 Hasil Pengukuran Temperatur pada Ruang Pendingin

Ruang pendingin berada di bawah susunan termoelektrik-*heatsink*, sehingga susunan *heatsink* menjadi sisi-sisi atasnya. Berikut adalah hasil pengukuran temperatur pada ruang pendingin yang disajikan pada tabel 4.5 di bawah ini.

Tabel 4.5 Hasil pengukuran temperatur pada ruang pendingin (sambungan TE-*heatsink* seri)

No.	Pukul	T _{kiri} [°C]	T _{tengah} [°C]	T _{atas} [°C]	T _{belakang} [°C]	T _{kanan} [°C]	T _{depan} [°C]	T _{luar} [°C]
1	08.00	33,80	33,10	33,00	34,80	36,60	33,60	
2	08.30	34,90	34,30	34,10	35,90	37,20	34,30	
3	09.00	37,40	37,90	30,20	37,90	39,40	37,00	28,90
4	09.30	40,90	42,60	38,40	41,10	42,50	39,80	30,30
5	10.00	43,40	45,90	39,50	43,20	44,60	41,40	37,80
6	10.30	44,60	46,60	40,30	44,20	45,40	42,40	38,70
7	11.00	44,50	45,20	39,40	44,70	44,70	41,50	39,80
8	11.30	45,30	47,10	40,20	44,60	45,40	42,60	39,40
9	12.00	45,10	46,70	39,80	44,30	44,80	41,90	43,90
10	12.30	44,70	44,50	40,40	44,00	44,40	42,20	44,50
11	13.00	44,70	43,70	40,10	43,60	43,90	41,70	36,20
12	13.30	44,00	42,50	39,70	43,00	43,10	40,50	44,90
13	14.00	43,30	37,80	42,20	42,20	42,50	39,90	41,10
14	14.30	41,50	42,70	37,70	41,00	40,90	38,60	34,50
15	15.00	41,20	41,80	37,70	40,50	40,60	38,50	33,00
16	15.30	36,60	36,40	37,60	40,30	40,20	38,50	
17	16.00	38,00	38,40	35,50	40,00	40,10	39,30	
18	16.30	33,00	33,20	30,40	36,70	32,40	34,20	
19	17.00	34,10	24,90	32,70	36,90	33,50	33,60	

4.1.4 Susunan Sambungan Seri-Paralel antar Modul Termoelektrik

4.1.4.1 Hasil Pengukuran Temperatur pada *Heatsink*

Pasangan termoelektrik dan *heatsink* disusun secara seri-paralel, dimana hasil pengukuran temperatur ke-21 *heatsink* ditampilkan pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Hasil pengukuran temperatur pada *heatsink* (sambungan seri-paralel)

No.	Pukul	T ₁ [°C]	T ₂	T ₁₁ [°C]	T ₁₂ [°C]	T ₁₃ [°C]	T ₁₄ [°C]	T ₁₅ [°C]	T ₁₆ [°C]	T ₁₇ [°C]	T ₁₈ [°C]	T ₁₉ [°C]	T ₁₀ [°C]	T ₁₁ [°C]	T ₁₂ [°C]	T ₁₃ [°C]	T ₁₄ [°C]	T ₁₅ [°C]	T ₁₆ [°C]	T ₁₇ [°C]	T ₁₈ [°C]	T ₁₉ [°C]	T ₂₀ [°C]	T ₂₁ [°C]	
1	07.00	29,0	28,2	25,6	26,2	25,2	26,7	26,9	26,2	25,6	25,8	25,7	25,3	26,0	26,6	25,2	26,0	26,9	26,4	25,6	25,5	25,2	26,8		
2	07.30	29,2	28,6	26,1	26,7	25,6	27,2	27,3	26,6	26,7	26,3	26,1	25,9	26,4	26,9	25,7	26,5	26,7	27,5	26,9	26,1	26,1	25,8	25,5	
3	08.00	31,5	30,6	30,9	31,6	30,6	32,2	32,2	31,4	30,6	31,4	31,3	31,1	31,9	31,8	31,2	32,0	32,1	33,1	32,8	31,8	31,9	31,5	32,9	
4	08.30	31,3	35,9	31,1	33,4	31,3	33,3	33,3	32,3	31,8	32,4	32,4	32,8	33,2	32,9	33,1	33,1	32,4	34,8	33,1	33,1	33,8	32,9	33,3	
5	09.00	31,1	37,1	33,7	34,5	33,5	35,1	35,1	34,4	33,5	34,3	34,0	34,1	35,0	34,6	34,0	34,7	34,8	36,0	35,7	34,1	34,9	34,4	35,9	
6	09.30	31,8	37,6	34,5	35,6	34,5	36,1	36,1	35,4	34,5	35,5	35,3	35,3	36,1	35,8	35,2	35,8	35,3	37,1	36,3	35,3	36,0	35,5	36,9	
7	10.00	32,8	39,1	35,6	36,5	35,4	37,0	36,9	36,3	35,4	36,4	36,4	36,3	37,2	37,0	36,2	36,5	38,1	37,8	36,8	37,0	36,4	37,7	39,3	
8	10.30	33,3	41,9	37,8	38,7	37,6	39,2	39,2	38,4	37,5	38,5	38,5	38,5	39,4	39,1	38,5	39,1	39,0	40,3	40,0	39,1	39,1	38,7	40,0	
9	11.00	33,9	41,7	38,4	39,3	38,2	39,8	39,8	39,1	37,9	38,9	39,0	38,9	39,9	39,8	38,9	39,8	39,1	40,5	40,3	39,5	39,6	31,9	40,3	
10	11.30	34,0	43,7	39,6	40,0	39,5	41,1	41,1	40,4	39,2	40,2	40,2	40,2	41,2	41,0	40,1	40,8	40,4	41,8	41,6	40,6	40,8	40,3	41,6	
11	12.00	35,4	45,1	40,6	41,6	40,5	42,3	42,4	41,6	40,2	41,5	41,6	41,5	42,6	42,2	41,2	41,7	41,4	42,9	42,8	42,0	42,2	41,7	43,0	
12	12.30	34,9	46,3	41,8	42,8	41,7	43,4	43,4	42,6	41,5	42,5	42,6	42,7	43,7	43,5	42,5	43,0	42,7	44,3	44,0	43,2	43,4	42,8	43,9	
13	13.00	35,8	47,3	42,8	43,6	42,4	44,0	44,1	43,0	42,9	43,0	43,5	43,8	44,5	44,5	43,3	43,3	43,5	43,6	45,0	44,8	44,6	43,9	44,1	
14	13.30	34,4	41,2	39,5	40,4	39,5	41,4	41,3	40,7	39,4	40,2	40,5	40,1	41,1	41,5	39,6	39,6	39,5	41,1	41,0	40,5	40,6	40,0	41,1	
15	14.00	32,6	38,7	38,3	39,2	38,3	40,0	40,2	39,5	38,5	39,1	39,3	38,9	39,7	40,2	38,5	38,5	40,0	39,8	39,2	39,3	38,7	40,1		
16	14.30	32,1	37,0	36,6	37,4	36,5	38,1	38,3	37,6	36,5	37,2	37,3	37,0	37,7	38,2	36,5	36,5	36,8	38,1	37,8	37,3	37,2	36,7	38,2	
17	15.00	32,0	36,2	34,9	35,7	34,7	36,4	36,5	34,8	34,8	35,4	35,5	35,3	36,0	36,5	34,9	34,9	35,4	36,6	36,1	35,6	35,6	35,1	36,6	
18	15.30	31,7	35,0	34,2	35,0	33,9	35,6	35,8	35,1	33,9	34,8	34,8	34,6	35,3	35,9	34,2	34,2	34,9	36,1	35,7	35,1	35,1	34,5	36,0	

4.1.4.2 Hasil Pengukuran Temperatur pada Ruang Pendingin

Pada susunan pasangan termoelektrik-*heatsink* yang disusun secara seri-paralel menghasilkan temperatur di sisi-sisi dan tengah ruang pendingin, yang disajikan pada tabel 4.7 di bawah ini.

Tabel 4.7 Hasil pengukuran temperatur pada ruang pendingin (sambungan TE-*heatsink* seri-paralel)

No.	Pukul	T _{kiri} [°C]	T _{tengah} [°C]	T _{alas} [°C]	T _{belakang} [°C]	T _{kanan} [°C]	T _{depan} [°C]	T _{luar} [°C]
1	07.00	26,60	26,50	25,70	27,40	26,40	27,60	
2	07.30	27,10	27,00	25,60	27,80	26,90	27,90	30,10
3	08.00	30,90	31,20	28,40	31,30	30,80	30,80	34,00
4	08.30	32,90	32,40	28,80	32,80	31,40	31,80	33,10
5	09.00	33,10	33,60	29,60	33,90	32,80	32,70	33,30
6	09.30	33,80	34,20	30,00	34,20	33,30	31,90	32,90
7	10.00	35,40	34,60	30,80	33,60	33,80	33,60	33,60
8	10.30	35,80	36,50	31,30	36,00	35,70	35,00	34,80
9	11.00	36,10	36,80	31,70	36,20	35,80	35,10	36,80
10	11.30	37,10	37,80	32,90	37,00	36,80	36,10	37,40
11	12.00	37,90	38,80	33,30	37,80	37,70	36,70	37,70
12	12.30	39,10	40,00	33,80	38,90	38,70	37,40	37,80
13	13.00	41,00	41,00	34,40	39,50	39,80	38,10	38,00
14	13.30	36,90	38,00	31,80	37,60	36,80	35,40	36,10
15	14.00	36,30	37,20	31,40	36,80	35,80	35,20	34,60
16	14.30	35,00	35,70	31,10	35,50	34,50	34,20	33,30
17	15.00	33,70	34,40	30,30	34,20	33,40	33,40	33,00
18	15.30	33,40	33,90	29,70	33,80	33,00	33,10	32,50

4.1.5 Susunan Sambungan Paralel antar Modul Termoelektrik

4.1.5.1 Hasil Pengukuran Temperatur pada *Heatsink*

Pasangan termoelektrik-*heatsink* yang disambungkan secara paralel menghasilkan temperatur pada ke-21 *heatsink*, diperlihatkan pada tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.8 Hasil pengukuran temperatur pada *heatsink* (sambungan paralel)

No.	Pukul	T ₁ [°C]	T ₂	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]	T9 [°C]	T10 [°C]	T11 [°C]	T12 [°C]	T13 [°C]	T14 [°C]	T15 [°C]	T16 [°C]	T17 [°C]	T18 [°C]	T19 [°C]	T20 [°C]	T21 [°C]
1	08.00	31	33,4	27,3	25,6	26,9	27,1	27,9	26,3	26,2	26,5	27,8	26,2	27	27,7	25,2	29,5	29,7	30,9	27,8	28,8	26,9	26,3	29,4
2	08.30	33,1	33,9	28,8	28,1	28,3	29,6	29,7	28,7	28,2	28,8	29,2	28,6	29,3	27,1	27,2	30,2	31,4	30,8	30,7	29,3	29,1	28,9	30,9
3	09.00	33,5	36,8	31,9	31,1	31,4	33,5	32,9	32	31,3	32,2	32,3	32,1	32,7	32,3	31,7	33,2	33,6	34,2	33,8	32,2	32,7	32,2	33,8
4	09.30	32,7	38,4	34,8	33,9	34,5	35,7	35,9	35,1	34	35,1	35,4	35,3	36,1	35,2	34,4	36,2	36,8	37,3	37,2	36	36,1	35,2	37,7
5	10.00	33,7	40	34,7	34,3	34,4	37,8	35,9	35,4	34,4	35,3	36	36,1	36,6	36,7	34,8	36,4	36,5	37,7	37,6	36,8	36,9	36,3	38,1
6	10.30	31,7	36	33,8	33,4	33,7	34,9	34,8	34,3	33,4	35	35,6	35,3	35,9	35,3	35,1	36,4	36,3	35,7	35,6	35,2	35,6	35,2	36,8
7	11.00	32	35,3	32,7	32,3	32,1	33,9	33,9	33,2	32,6	33,6	33,9	33,6	34,1	31	32,3	33,7	34,8	35	34	34	33,6	35,3	35,3
8	11.30	32	35,8	33,1	33,1	33,2	34,4	34,3	33,7	33	33,9	34,7	33,9	34,6	31,2	32,7	34	44,4	45,3	35,2	34,3	34,4	33,9	35,7
9	12.00	33,2	37,1	33,5	33,4	33,2	34,8	34,9	34,1	33,3	34,3	34,5	34,4	35,1	31,5	33,1	34,5	35,1	35,9	36	35	35,1	36,9	36,2
10	12.30	34	39,3	34,9	35	34,5	36,3	36,2	35,6	34,9	36	36,2	36,2	36,9	36,9	34,9	36,2	37,7	37,7	37,6	36,8	37	36,5	37,9
11	13.00	38	43,8	36,7	36,8	36,3	38,3	38,1	37,2	36,8	38,1	38,2	38,5	39,2	39	37	38,2	39,1	40	39,8	39,1	39,6	39	40,4
12	13.30	34,8	39,2	37,4	32,3	37,1	38,8	38,7	38,2	37,3	38,5	38,9	38,9	39,3	38,9	37,1	38,3	38,4	39,8	39,5	39,3	39,4	38,9	40,3
13	14.00	35,4	41,1	38,5	38,6	38,6	40,1	40,1	39,6	38,7	40,1	40,4	40,5	41	40,2	38,7	39,7	40,1	41,5	41,4	40,9	41,3	40,1	42,1
14	14.30	33,8	38,1	36,1	36	35,8	37,5	37,4	36,9	36	37,1	37,7	37,3	37,7	37,8	35,5	36,7	36,6	37,9	37,9	37,5	37,6	37	38,5
15	15.00	33	35,7	34,2	33,9	33,9	35,5	35,7	35	33,9	34,9	35,4	35	35,5	35,8	33,9	34,7	34,5	35,8	35,7	35,3	35,2	34,7	36,4
16	15.30	34,8	37,5	33,4	33,4	33,2	34,8	34,8	34,2	33,4	34,3	34,5	34,3	34,8	31,5	32,9	34,2	34,4	35,5	35,4	34,7	34,8	34,7	36,1
17	16.00	32,7	35,5	33,9	33,8	33,7	35,4	35,5	34,9	33,9	35	35,1	34,8	35,4	33	33,4	34,7	34,8	36,1	35,8	35,3	35,4	34,8	36,6

4.1.5.2 Hasil Pengukuran Temperatur pada Ruang Pendingin

Pada sambungan paralel antar ke-21 pasangan termoelektrik-*heatsink* memberikan data temperatur pada sisi-sisi dan ruang pendingin, yang diperlihatkan pada tabel 4.9 berikut.

Tabel 4.9 Hasil pengukuran temperatur pada ruang pendingin (sambungan TE-*heatsink* paralel)

No.	Pukul	T _{kiri} [°C]	T _{tengah} [°C]	T _{alas} [°C]	T _{belakang} [°C]	T _{kanan} [°C]	T _{depan} [°C]	T _{luar} [°C]
1	08.00	27,70	27,80	23,40	28,60	28,10	28,10	32,30
2	08.30	29,10	29,30	24,60	29,80	29,80	29,30	34,50
3	09.00	31,60	32,10	26,60	32,20	32,20	31,30	38,40
4	09.30	33,60	34,40	26,90	34,30	34,10	32,70	37,40
5	10.00	33,00	33,30	26,90	34,00	34,10	32,60	34,90
6	10.30	32,20	33,20	26,60	33,00	32,80	31,90	32,40
7	11.00	31,20	32,10	26,10	31,90	31,60	31,40	32,00
8	11.30	31,50	32,60	26,10	32,00	32,00	31,70	33,10
9	12.00	31,80	33,10	26,70	32,60	32,50	32,20	34,10
10	12.30	33,20	34,20	27,90	33,80	37,70	32,90	36,40
11	13.00	34,50	36,10	28,50	35,40	35,20	34,10	40,40
12	13.30	34,70	36,10	28,00	35,60	35,00	33,80	37,50
13	14.00	36,10	37,30	28,20	36,50	36,10	34,40	35,40
14	14.30	33,70	34,90	27,40	34,60	33,70	33,00	34,60
15	15.00	32,20	33,30	26,30	33,30	32,40	32,20	33,80
16	15.30	32,80	33,20	26,90	33,10	32,30	32,50	37,90
17	16.00	32,90	33,70	26,80	33,40	32,60	32,70	33,40

4.2 Pembahasan

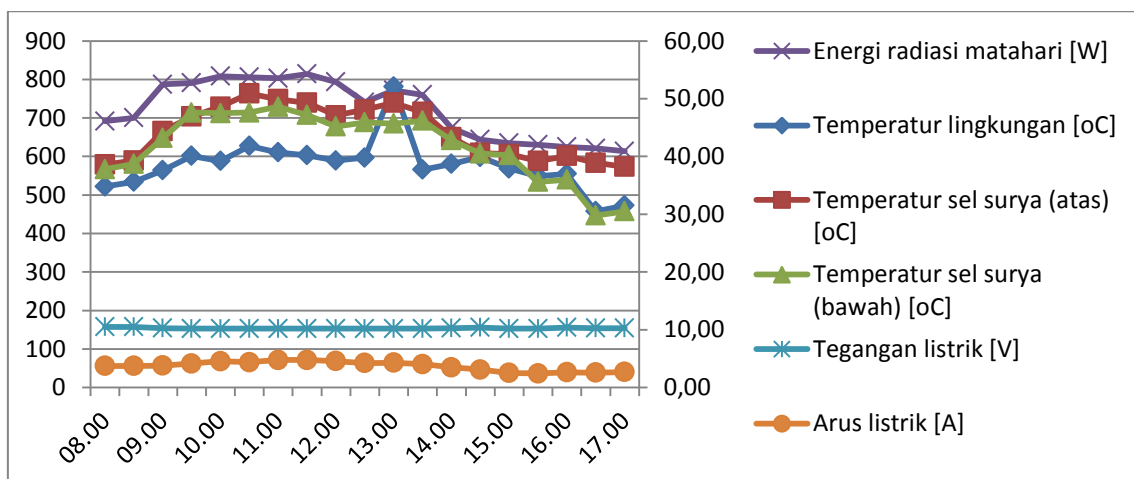
Pada sistem pendingin ini terdiri dari tiga alat yang berkaitan, sehingga pembahasannya juga demikian. Ketiga alat tersebut adalah sel surya, termoelektrik, dan ruang pendingin. Untuk sel surya yang memberikan tenaga listrik yang dibahas seputar tentang kinerjanya, sedangkan termoelektrik dan ruang pendingin dibahas perubahan temperatur dan analisis konversi energi.

4.2.1 Distribusi Temperatur, Energi Radiasi, Tegangan dan Arus pada Sel Surya

Pada sistem pendingin ini sel surya berfungsi sebagai penyedia energi listrik yang diperolehnya dari hasil konversi radiasi cahaya matahari. Masukan energi dan luaran energi pada sel surya serta temperatur yang mempengaruhinya diuraikan di bawah ini.

1. Sambungan TE seri

Pada sambungan TE seri, sistem PV mendapat energi masukan dan pengaruh temperatur serta luaran yang dihasilkan diperlihatkan pada gambar 4.2 berikut.



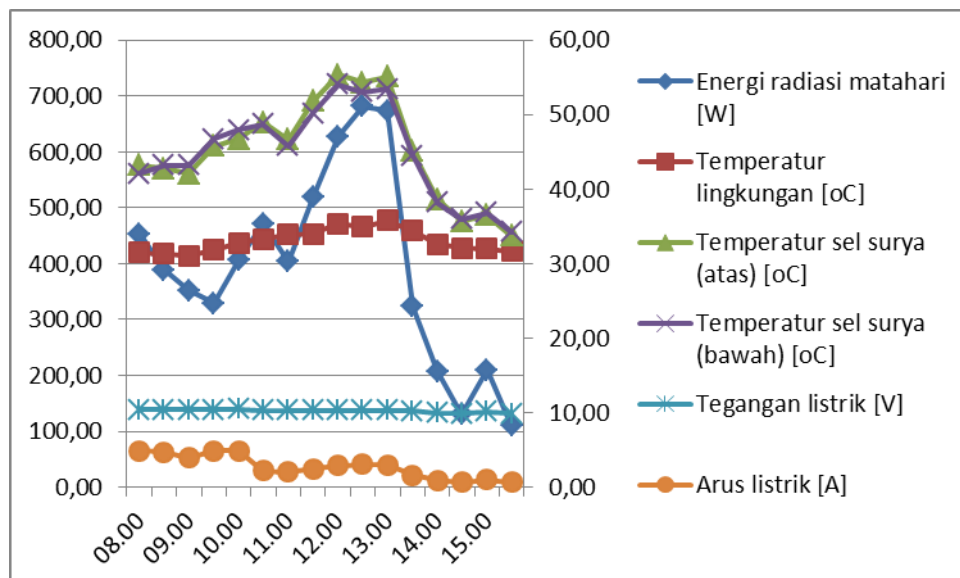
Gambar 4.2 Distribusi radiasi, temperatur, tegangan, dan arus listrik (TE seri)

Grafik pada gambar 4.2 di atas menampilkan hasil pengukuran selama sembilan jam, dengan kecenderungan hampir sama pada radiasi dan temperatur. Temperatur lingkungan pada pukul 13.00 meningkat tajam disebabkan menurunnya kecepatan angin dan radiasi matahari yang meningkat. Tabel 4.1 dapat membantu dalam penjelasan. Temperatur lingkungan yang mengalami perubahan seketika ini mempengaruhi juga temperatur sel surya. Radiasi cahaya matahari masih tinggi, sehingga temperatur sel surya mengikutinya.

Tegangan listrik dan arus listrik tidak mengalami perubahan yang signifikan, karena konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik sudah mendekati stabil.

2. Sambungan TE seri-paralel

Pada sambungan TE seri-paralel, sistem PV mendapat masukan energi dengan pengaruh temperatur dapat menghasilkan luaran, seperti yang digambarkan pada gambar 4.3 di bawah ini.

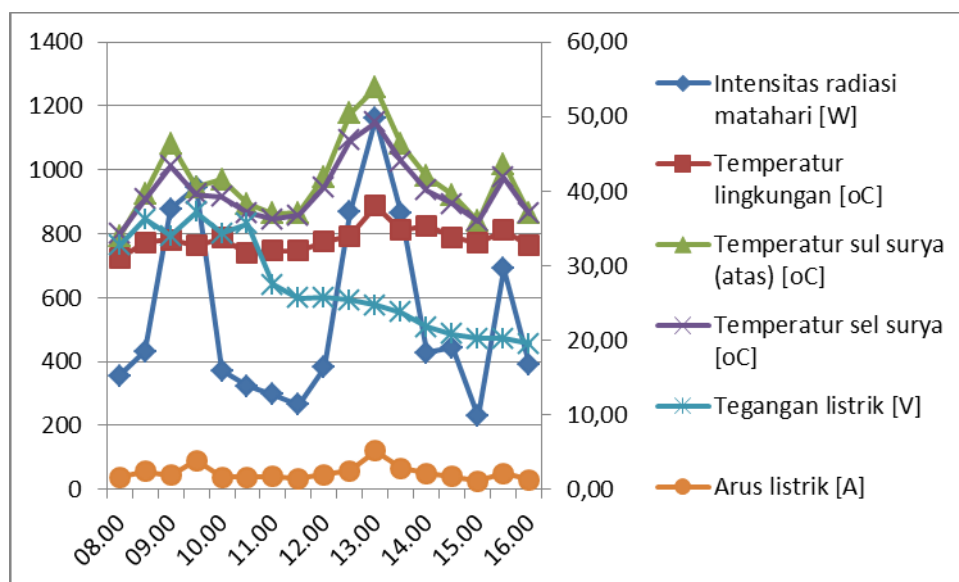


Gambar 4.3 Distribusi radiasi, temperatur, tegangan, dan arus listrik (TE seri-paralel)

Energi yang dihasilkan sistem PV pada sambungan TE seri-paralel ini, tampak ditunjukkan dengan stabilnya tegangan listrik dan fluktuasi arus listrik seiring dengan fluktuasi dari intensitas radiasi matahari. Temperatur lingkungan cukup stabil, akibat kecepatan angin yang juga stabil. Hal ini tampak pada tabel 4.2. Akibatnya, intensitas radiasi matahari yang sampai ke permukaan sel surya tidak dipengaruhi. Perbedaan yang tipis antara perbedaan temperatur atas sel surya dan temperatur bawah sel surya, menunjukkan bahwa energi panas matahari tidak terlalu terik dan kelembaban udara cukup menjelang turunnya hujan, sehingga pengambilan data terbatas.

3. Sambungan TE paralel

Jenis sambungan TE ketiga yaitu sambungan paralel, dimana sistem PV diamati memberikan informasi masukan energi, catatan temperatur, dan hasil luaran yang dipresentasikan pada gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4.4 Distribusi radiasi, temperatur, tegangan, dan arus listrik (TE paralel)

Luaran dari sistem PV adalah arus listrik yang cenderung stabil dan fluktuasinya tegangan listrik, sedemikian pula intensitas radiasi energi matahari. Data tabel 4.3 menunjukkan bahwa temperatur lingkungan cukup tinggi, sehingga memberikan efek pemanasan pada sel surya. Tampak temperatur sel surya cukup tinggi baik sisi atas maupun sisi bawah. Kinerja sel surya akan dipengaruhi oleh temperatur sel. Temperatur sel meningkat, maka tegangan listrik cenderung akan menurun. Menurut pengamatan saat pengukuran, langit terkadang tertutup awan lalu tanpa awan dan seterusnya bergantian, hingga pengukuran dihentikan ketika mendung tanda akan turun hujan.

4.2.2 Kinerja Sel Surya

Kinerja sel surya terdiri dari daya luaran dan efisiensi. Hasil perhitungan kinerja sel surya untuk berbagai sambungan TE diuraikan di bawah ini.

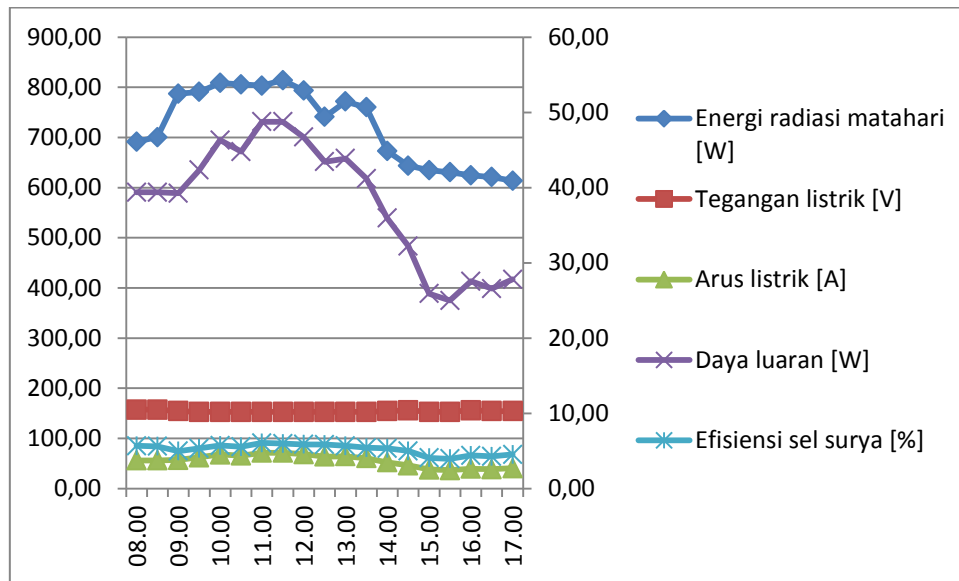
1. Untuk sambungan TE seri

Untuk memperoleh kinerja sel surya digunakan data pada tabel 4.1 yang diolah dengan persamaan (2.1) dan (2.2) sehingga didapatkan hasil perhitungan.

Tabel 4.10 Hasil perhitungan daya luaran dan efisiensi sel surya (TE seri)

No.	Pukul	P _{in} [W]	V	I	P _{out} [W]	η
			(volt)	(ampere)		(%)
1	08.00	691,59	10,50	3,75	39,38	5,69
2	08.30	700,49	10,50	3,75	39,38	5,62
3	09.00	787,36	10,30	3,81	39,24	4,98
4	09.30	790,78	10,20	4,15	42,33	5,35
5	10.00	808,57	10,20	4,54	46,31	5,73
6	10.30	805,83	10,20	4,39	44,78	5,56
7	11.00	803,10	10,20	4,78	48,76	6,07
8	11.30	814,04	10,20	4,78	48,76	5,99
9	12.00	793,52	10,20	4,58	46,72	5,89
10	12.30	740,85	10,20	4,26	43,45	5,87
11	13.00	771,63	10,20	4,30	43,86	5,68
12	13.30	760,00	10,20	4,04	41,21	5,42
13	14.00	673,12	10,30	3,49	35,95	5,34
14	14.30	643,71	10,40	3,10	32,24	5,01
15	15.00	634,82	10,20	2,54	25,91	4,08
16	15.30	630,71	10,20	2,45	24,99	3,96
17	16.00	624,56	10,40	2,65	27,56	4,41
18	16.30	621,14	10,30	2,58	26,57	4,28
19	17.00	613,61	10,30	2,70	27,81	4,53
Rata-rata		721,55	10,27	3,72	38,17	5,29

Dari tabel 4.10 di atas dibuat grafik di bawah ini, yang menggambarkan hasil perolehan daya luaran dan efisiensi sel surya selama sembilan jam pengukuran.



Gambar 4.5 Distribusi energi radiasi, tegangan, arus, daya, dan efisiensi (TE seri)

Dari grafik gambar 4.5 di atas tampak bahwa besarnya energi radiasi yang diterima sel surya menghasilkan daya luaran yang sesuai dan efisiensi yang cenderung konstan.

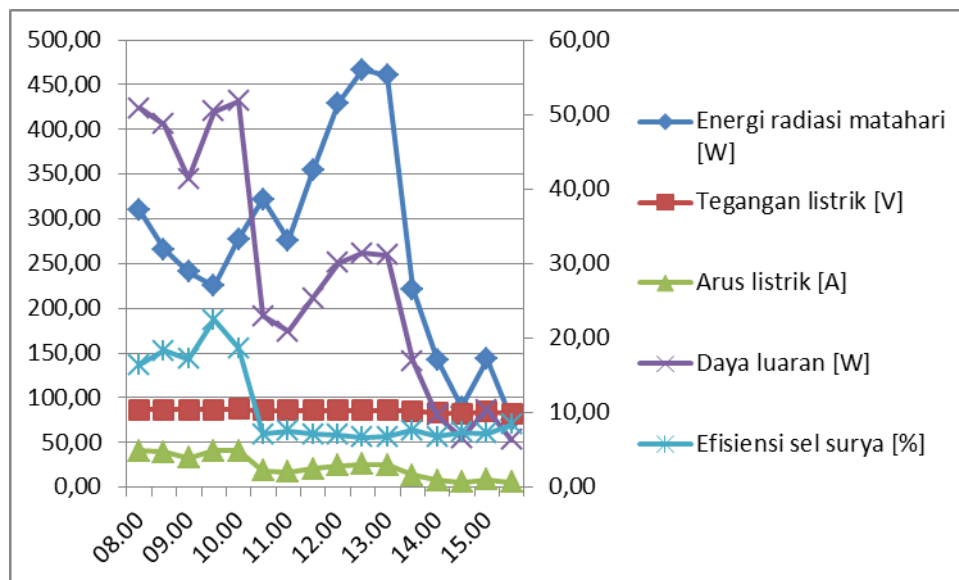
2. Untuk sambungan TE seri-paralel

Untuk memperoleh kinerja sel surya digunakan data pada tabel 4.1 yang diolah dengan persamaan (2.1) dan (2.2) sehingga didapatkan hasil perhitungan.

Tabel 4.11 Hasil perhitungan daya luaran dan efisiensi sel surya (TE seri-paralel)

No.	Pukul	P_{in} [W]	V	I	P_{out} [W]	η
			(volt)	(ampere)		(%)
1	08.00	309,88	10,40	4,89	50,86	16,41
2	08.30	266,10	10,40	4,68	48,67	18,29
3	09.00	240,79	10,40	3,98	41,39	17,19
4	09.30	225,06	10,40	4,85	50,44	22,41
5	10.00	277,73	10,50	4,93	51,77	18,64
6	10.30	322,20	10,30	2,23	22,97	7,13
7	11.00	276,36	10,30	2,03	20,91	7,57
8	11.30	354,35	10,30	2,46	25,34	7,15
9	12.00	429,60	10,30	2,92	30,08	7,00
10	12.30	466,54	10,30	3,05	31,42	6,73
11	13.00	460,38	10,30	3,02	31,11	6,76
12	13.30	221,64	10,20	1,66	16,93	7,64
13	14.00	142,29	10,00	0,96	9,60	6,75
14	14.30	89,61	9,89	0,67	6,63	7,39
15	15.00	143,65	10,10	1,03	10,40	7,24
16	15.30	75,25	9,87	0,64	6,32	8,39
Rata-rata		268,84	10,25	2,75	28,43	10,57

Dari tabel 4.11 di atas dibuat grafik di bawah ini, yang menggambarkan hasil perolehan daya luaran dan efisiensi sel surya selama sembilan jam pengukuran.



Gambar 4.6 Distribusi energi radiasi, tegangan, arus, daya, dan efisiensi (TE seri-paralel)

Dari grafik gambar 4.6 di atas tampak bahwa besarnya energi radiasi yang diterima sel surya menghasilkan daya luaran yang sesuai dan efisiensi yang cenderung konstan.

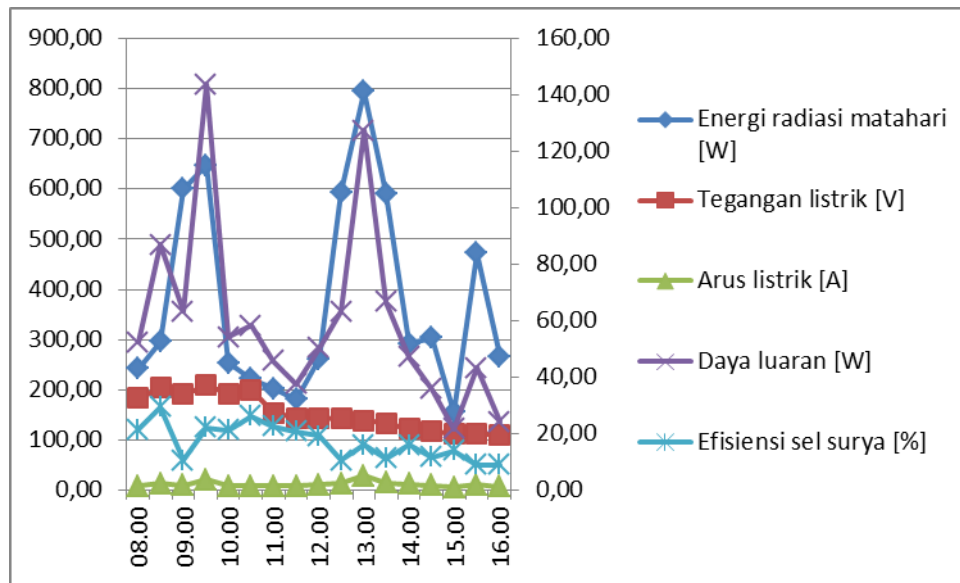
3. Untuk sambungan TE paralel

Untuk memperoleh kinerja sel surya digunakan data pada tabel 4.1 yang diolah dengan persamaan (2.1) dan (2.2) sehingga didapatkan hasil perhitungan.

Tabel 4.12 Hasil perhitungan daya luaran dan efisiensi sel surya (TE paralel)

No.	Pukul	P_{in} [W]	V	I	P_{out} [W]	η
			(volt)	(ampere)		(%)
1	08.00	242,84	32,70	1,60	52,32	21,54
2	08.30	295,52	36,20	2,40	86,88	29,40
3	09.00	599,93	34,00	1,86	63,24	10,54
4	09.30	646,45	37,20	3,86	143,59	22,21
5	10.00	254,47	34,30	1,58	54,19	21,30
6	10.30	221,64	35,60	1,64	58,38	26,34
7	11.00	202,48	27,40	1,67	45,76	22,60
8	11.30	181,28	25,60	1,47	37,63	20,76
9	12.00	261,31	25,70	1,96	50,37	19,28
10	12.30	593,09	25,40	2,49	63,25	10,66
11	13.00	793,52	24,70	5,15	127,21	16,03
12	13.30	591,04	23,70	2,81	66,60	11,27
13	14.00	292,78	21,80	2,16	47,09	16,08
14	14.30	303,73	20,80	1,72	35,78	11,78
15	15.00	155,97	20,20	1,08	21,82	13,99
16	15.30	472,69	20,20	2,14	43,23	9,15
17	16.00	266,79	19,50	1,24	24,18	9,06
Rata-rata		375,03	27,35	2,17	60,09	16,02

Dari tabel 4.12 di atas dibuat grafik di bawah ini, yang menggambarkan hasil perolehan daya luaran dan efisiensi sel surya selama sembilan jam pengukuran.



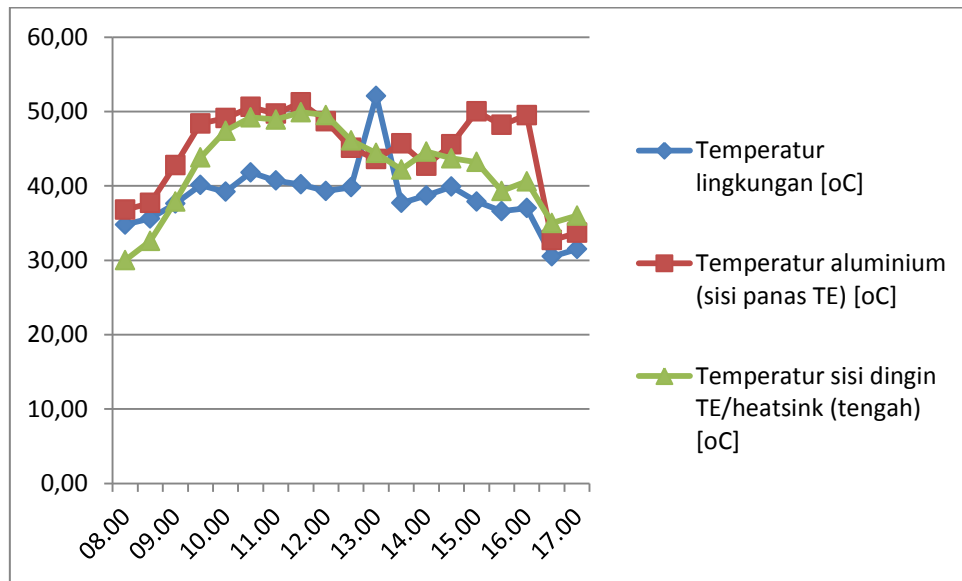
Gambar 4.7 Distribusi energi radiasi, tegangan, arus, daya, dan efisiensi (TE paralel)

Dari grafik gambar 4.7 di atas tampak bahwa besarnya energi radiasi yang diterima sel surya menghasilkan daya luaran yang sesuai dan efisiensi yang cenderung konstan.

4.2.3 Analisis Distribusi Temperatur pada Termoelektrik

4.2.3.1 Susunan Sambungan Seri antar Modul Termoelektrik

Sistem termoelektrik terdiri dari aluminium, termoelektrik, dan *heatsink*. Panas dari matahari diserap oleh aluminium dan memanaskan sisi panas termoelektrik. Kemudian dengan pasokan energi listrik dari sel surya, termoelektrik mengubah panas menjadi dingin pada sisi dingin yang dilekatkan *heatsink*. Distribusi temperatur lingkungan, temperatur aluminium, dan temperatur *heatsink* yang posisinya di tengah diambil sebagai sampel, diperlihatkan pada grafik gambar 4.8 di bawah ini.

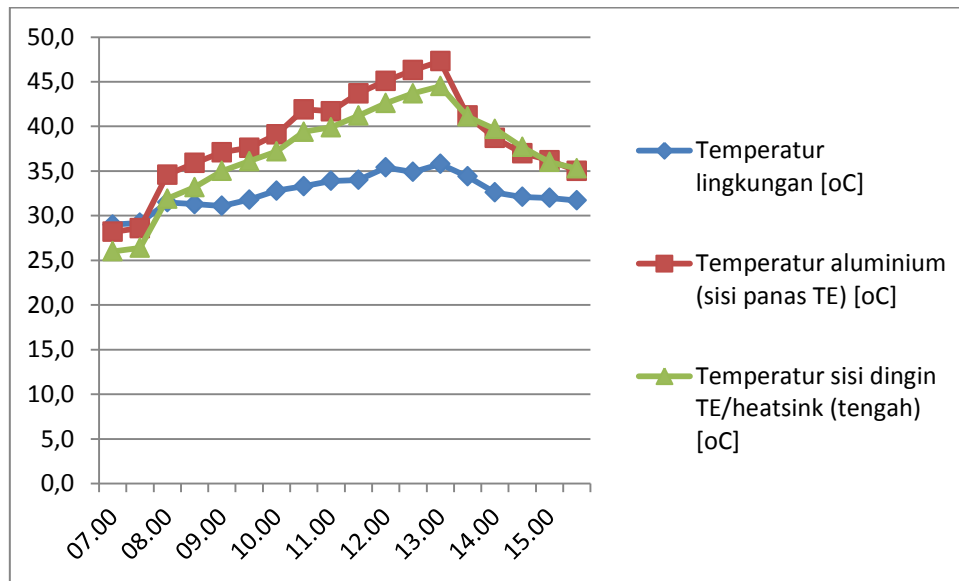


Gambar 4.8 Distribusi temperatur pada sistem termoelektrik (seri)

Temperatur aluminium terlihat lebih tinggi dari temperatur lingkungan, karena aluminium menyerap panas yang diterimanya. Sementara temperatur *heatsink* lebih rendah dari temperatur aluminium. Hal ini membuktikan proses penyerapan panas sudah berjalan tetapi belum signifikan. Masih cukup tingginya temperatur *heatsink* diakibatkan pemanasan berlangsung lebih dahulu, sebelum proses pengukuran dilakukan.

4.2.3.2 Susunan Sambungan Seri-Paralel antar Modul Termoelektrik

Pada susunan sambungan seri-paralel antar modul termoelektrik perubahan temperatur dari pukul 07.00 sampai 15.00 yang diperlihatkan pada grafik gambar 4.9 di bawah ini.

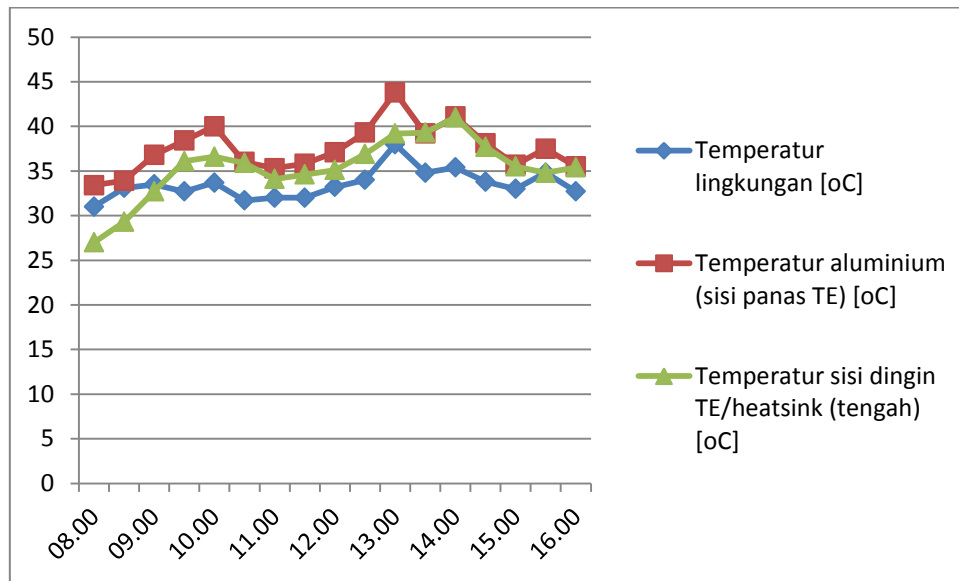


Gambar 4.9 Distribusi temperatur pada sistem termoelektrik (seri-paralel)

Dari gambar 4.9 di atas distribusi temperatur lingkungan, temperatur aluminium (sisi panas termoelektrik), dan temperatur *heatsink* (sisi dingin termoelektrik) menunjukkan kecenderungan yang sama. Ketika panas diterima aluminium dan diserapnya, maka sebagai konduktor yang baik temperaturnya meningkat melebihi temperatur lingkungan. Dengan pasokan energi listrik yang masuk ke susunan seri-paralel ini belum mampu memberikan perbedaan sisi panas dan sisi dingin yang besar, sehingga temperatur sisi dingin masih lebih tinggi dari temperatur lingkungan.

4.2.3.3 Susunan Sambungan Paralel antar Modul Termoelektrik

Susunan sambungan paralel antar modul termoelektrik dengan *heatsink* sebanyak 21 pasang memberikan data distribusi temperatur seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.10 berikut di bawah ini.



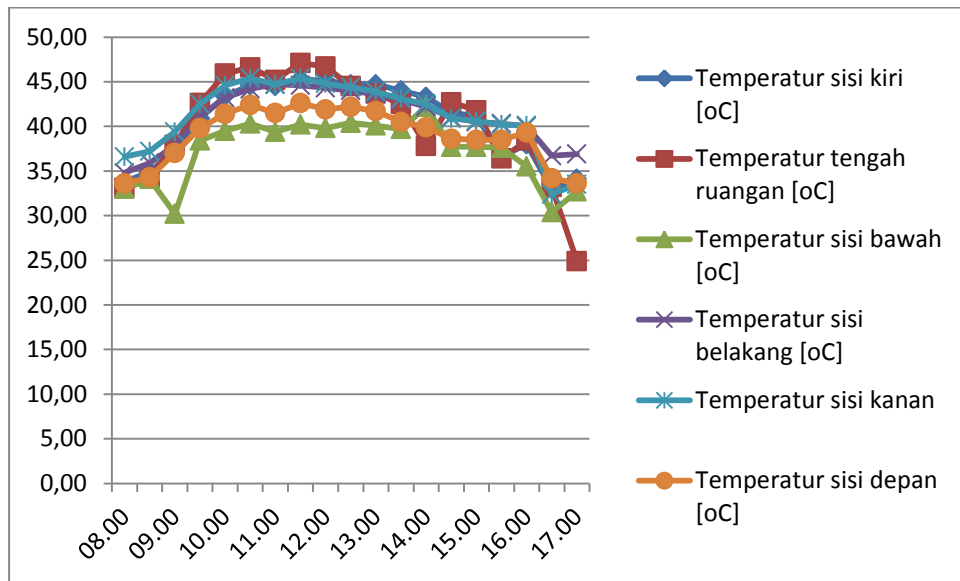
Gambar 4.10 Distribusi temperatur pada sistem termoelektrik (paralel)

Pada gambar 4.10 di atas, grafik temperatur lingkungan, temperatur aluminium (sebagai sisi panas termoelektrik) dan temperatur *heatsink* (sebagai sisi dingin termoelektrik) menggambarkan pola yang cenderung sama. Tingginya temperatur aluminium akibat radiasi termal matahari yang diserapnya dapat mencapai di atas temperatur lingkungan. Sementara pasokan listrik yang masuk tidak membuat termoelektrik menghasilkan perbedaan temperatur yang besar, sehingga temperatur sisi dingin masih terlihat lebih tinggi dari temperatur lingkungan.

4.2.4 Analisis Temperatur Ruang Pendingin

4.2.4.1 Susunan Sambungan Seri antar Modul Termoelektrik

Berikut adalah distribusi temperatur dalam ruang pendingin dengan temperatur pada sisi-sisi dan ruang.

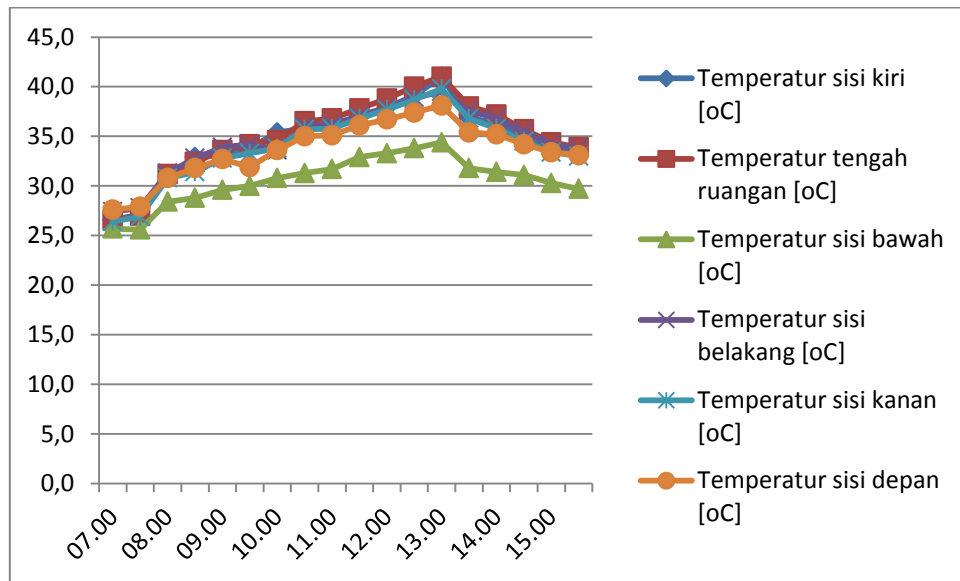


Gambar 4.11 Distribusi temperatur ruang pendingin (TE seri)

Dari grafik gambar 4.11 di atas temperatur dalam ruang pendingin mendekati kesamaan. Namun, temperatur sisi bawah tampak lebih rendah dibanding temperatur sisi yang lain. Untuk sebuah ruang pendingin temperatur masih tinggi, karena alat sudah menerima panas lebih dahulu sebelum pengukuran dan masih adanya kebocoran panas dari luar pada sistem isolasi alat.

4.2.4.2 Susunan Sambungan Seri-Paralel antar Modul Termoelektrik

Pada susunan sambungan seri-paralel pasangan termoelektrik dan *heatsink* memberikan hasil temperatur di ruang pendingin seperti ditampilkan gambar 4.12 berikut.

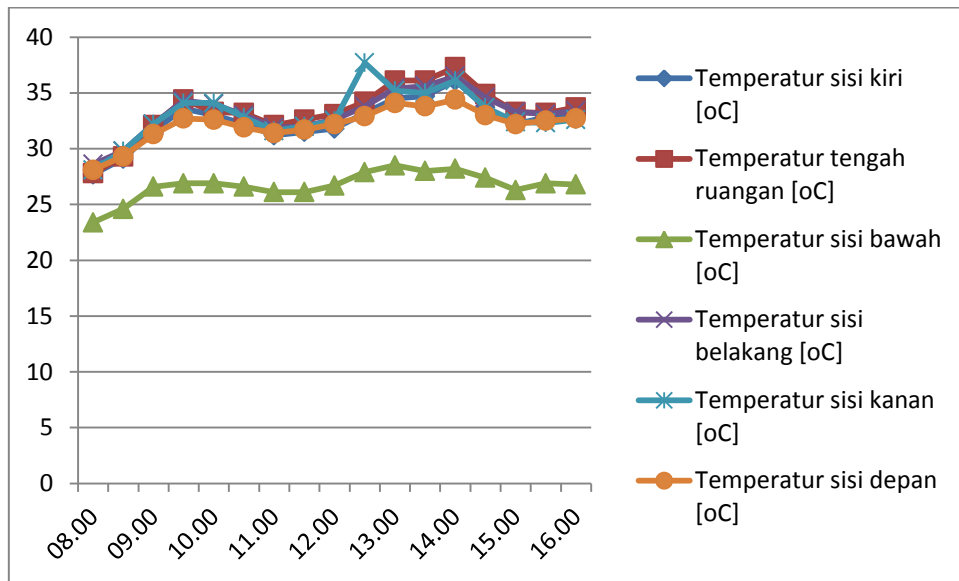


Gambar 4.12 Distribusi temperatur ruang pendingin (TE seri-paralel)

Pada gambar 4.12 di atas, tampak grafik menunjukkan bahwa distribusi temperatur masing-masing sisi dan ruang tengah pendingin cenderung mendekati kesamaan. Hanya temperatur sisi bawah yang jauh lebih rendah dari sisi lainnya, karena sisi bawah tidak menerima pancaran panas matahari.

4.2.4.3 Susunan Sambungan Paralel antar Modul Termoelektrik

Untuk sambungan pasangan termoelektrik-*heatsink* yang disusun secara paralel, temperatur ruang pendingin yang dicapai disajikan dalam data yang diolah dalam bentuk grafik gambar 4.13 di bawah ini.



Gambar 4.13 Distribusi temperatur ruang pendingin (TE paralel)

Pada gambar 4.13 di atas, grafik temperatur sisi-sisi dinding dan temperatur tengah ruangan secara signifikan seragam. Akan tetapi, temperatur sisi bawah (alas) jauh lebih rendah, bahkan lebih rendah dari sambungan termoelektrik seri dan seri-paralel. Alas pendingin berhadapan langsung dengan *heatsink* sebagai penyerap kalor dan tidak dilapisi *styrofoam* (tak ada penyerapan kalor oleh insulasi) serta tidak dipengaruhi pancaran panas matahari.

4.2.5 Perhitungan Beban Susunan Modul Termoelektrik

Pada bagian sebelumnya sudah dijelaskan bahwa ada tiga kemungkinan susunan sambungan modul termoelektrik. Di bawah ini diuraikan perhitungan beban listrik yang dibutuhkan oleh sistem TEC yang terdiri dari 21 modul termoelektrik.

1. Susunan sambungan seri antar modul

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_{21}$$

Untuk menentukan hamb

atan termoelektrik digunakan informasi dari tabel 2.3 dimana nilai ρ sebesar 1,0 m Ω .cm dan tebal 3,8 mm dan luas modul 40 mm x 40 mm (1600 mm).

Berdasarkan persamaan: $R = \frac{\rho L}{A}$, maka didapatkan nilai R termoelektrik sebesar $2,375 \times 10^{-5} \Omega$

Ke-21 termoelektrik dipasang seri, maka R totalnya adalah $4,9875 \times 10^{-4} \Omega$.

2. Susunan sambungan seri-paralel antar modul

Untuk sambungan seri-paralel, dihitung lebih dahulu sambungan seri masing-masing yang terdiri dari tujuh termoelektrik, maka didapatkan R total sambungan serinya adalah:

$$R_A = R_1 + R_2 + \dots + R_7 = 1,6625 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_B = R_8 + R_9 + \dots + R_{14} = 1,6625 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_C = R_{15} + R_{16} + \dots + R_{21} = 1,6625 \times 10^{-4} \Omega$$

Setiap baris terdiri dari masing-masing tujuh termoelektrik disambung secara paralel, maka dihitung dengan persamaan:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} = \frac{1}{1,6625^{-4}} + \frac{1}{1,6625^{-4}} + \frac{1}{1,6625^{-4}}$$

Dari perhitungan didapatkan nilai R total sambungan seri-paralel termoelektrik sebesar $5,54167 \times 10^{-5} \Omega$

3. Susunan sambungan paralel antar modul

Pada sambungan seluruh termoelektrik dirangkai secara paralel, maka digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{21}} = \frac{1}{1,6625^{-4}} + \frac{1}{1,6625^{-4}} + \dots + \frac{1}{1,6625^{-4}}$$

Hasil perhitungan menghasilkan nilai R total sambungan paralel termoelektrik sebesar $1,13095 \times 10^{-6} \Omega$

Dari ketiga jenis susunan sambungan termoelektrik, maka sambungan paralel memiliki beban listrik yang paling rendah, sehingga dengan pasokan tegangan yang sama akan mendapat arus yang lebih besar. Konsekuensinya, capaian temperatur di ruang pendingin paling rendah dihasilkan dari susunan sambungan termoelektrik-*heatsink* paralel tersebut.

4.2.6 Konversi Energi Sistem Pendingin

Dalam sistem pendingin bertenaga matahari yang menggabungkan sistem PV dan sistem TEC ini terjadi konversi energi dari cahaya matahari menjadi energi listrik (dalam sistem PV), pemanfaatan energi termal matahari untuk proses pendinginan (dalam sistem TEC), serta proses konversi dalam ruang pendingin itu sendiri.

Hal-hal yang berkaitan dengan konversi energi dalam ruang pendingin diuraikan berikut ini, diantaranya adalah:

1. Beban Pendingin

Pada penelitian ini tidak ada parameter yang dijadikan beban pendingin pada ruang pendingin dan temperatur terendah yang dapat dicapai ruang pendingin adalah tujuannya. Proses pendinginan berlangsung ketika sisi dingin termoelektrik yang dilekatkan *heatsink* menyerap kalor dari udara yang ada dalam ruang.

2. Analisis Konversi Energi

Pada sistem pendingin termoelektrik bertenaga sel surya ini terjadi konversi energi pada sistem sebagai berikut. Daya listrik yang digunakan termoelektrik diperoleh dari sel

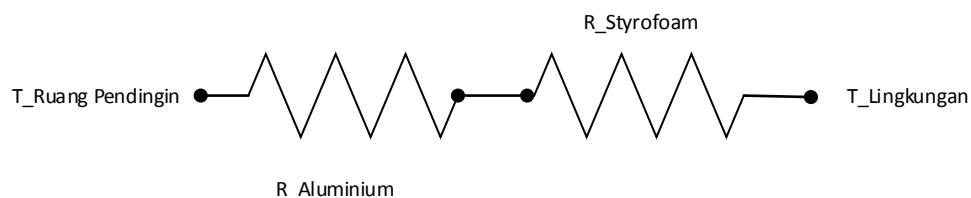
surya yang memasok energi, sehingga terjadi pelepasan kalor pada sisi panas termoelektrik melalui aluminium dan penyerapan panas pada sisi dinginnya melalui *heatsink*, seperti yang ditunjukkan secara matematika oleh persamaan (2.22). Sementara pada ruang pendingin terjadi konversi energi dengan diserapnya panas oleh *heatsink* dari ruangan. Selain itu juga adanya perpindahan kalor transmisi dari ruang pendingin ke sisi-sisi dinding ruang dan panas yang hilang antara ruang pendingin dan lingkungan.

3. Analisis Kalor yang Hilang

Antara ruang pendingin dengan lingkungan luar terjadi kalor yang hilang secara konduksi. Asumsi yang digunakan dalam perhitungan nilai kalor konduksi adalah:

1. Konduksi dalam keadaan tunak (*steady state*).
2. Konduksi satu dimensi.
3. Besarnya hambatan kontak termal antar lapisan dinding diabaikan.
4. Konduktivitas termal material lapisan dinding tidak berubah terhadap proses pendinginan.
5. Permukaan dinding bagian dalam dianggap adiabatik.

Hambatan termal antara ruang pendingin, dinding dan lingkungan digambarkan seperti berikut.



Besarnya tebal, luas permukaan keseluruhan dinding ruang pendingin, dan konduktivitas termal material lapisan dinding diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

Material pelapis dinding	Δx [m]	A [m ²]	k [W/m.K]
Aluminium	0,003	2,728306	202
Styrofoam	0,018	2,728306	0,033

Kalor yang hilang dapat dihitung dengan persamaan perpindahan kalor pada dinding datar dengan persamaan berikut:

$$q = \frac{T_{lingkungan} - T_{ruang pendingin}}{\left(\frac{\Delta x}{k \cdot A}\right)_{Aluminium} + \left(\frac{\Delta x}{k \cdot A}\right)_{Styrofoam}}$$

a. Sambungan TE seri

Untuk $T_{ruang pendingin}$ diambil dari pengukuran ke-9 pada pukul 12.00, dimana temperatur ruang pendingin = 39,80 °C, sedangkan $T_{lingkungan}$ sebesar 45,70 °C.

Nilai kalor yang hilang dari ruang pendingin ke lingkungan sebesar:

$$q = \frac{45,70 - 39,80}{\left(\frac{0,003}{(202)(2,728306)}\right)_{Aluminium} + \left(\frac{0,018}{(0,033)(2,728306)}\right)_{Styrofoam}}$$

$$q = 24,48936 \text{ W}$$

b. Sambungan TE seri-paralel

Untuk $T_{ruang pendingin}$ diambil dari pengukuran ke-9 pada pukul 12.00, dimana temperatur ruang pendingin = 38,80 °C, sedangkan $T_{lingkungan}$ sebesar 34,40 °C.

Nilai kalor yang hilang dari ruang pendingin ke lingkungan sebesar:

$$q = - \frac{34,40 - 38,80}{\left(\frac{0,003}{(202)(2,728306)}\right)_{Aluminium} + \left(\frac{0,018}{(0,033)(2,728306)}\right)_{Styrofoam}}$$

$$q = 21,99321624 \text{ W}$$

c. Sambungan TE paralel

Untuk $T_{\text{ruang pendingin}}$ diambil dari pengukuran ke-9 pada pukul 12.00, dimana temperatur ruang pendingin = 33,10 °C, sedangkan $T_{\text{lingkungan}}$ sebesar 33,20 °C.

Nilai kalor yang hilang dari ruang pendingin ke lingkungan sebesar:

$$q = \frac{33,20 - 33,10}{\left(\frac{0,003}{(202)(2,728306)}\right)_{\text{Aluminium}} + \left(\frac{0,018}{(0,033)(2,728306)}\right)_{\text{Styrofoam}}}$$

$$q = 0,499845824 \text{ W}$$

4.2.7 Kinerja Sistem Pendingin

$$CoP = \frac{q_c}{P_{in}}$$

q_c = beban kalor yang diserap ruang pendingin [W]

P_{in} = daya *input* (dari sel surya) yang membangkitkan TEC [W]

Untuk menghitung kinerja sistem pendingin diperlukan data dan perhitungan yang berurutan.

1. Untuk sambungan TE seri

a. Data yang diperlukan untuk perhitungan adalah:

$$P_{in} = 38,17 \text{ W}$$

$$A_{\text{dinding sisi kiri}} = 0,49686 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{dinding depan}} = 0,16511 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{dinding sisi kanan}} = 0,49686 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{dinding belakang}} = 0,68651 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{sisi bawah}} = 0,881166 \text{ m}^2$$

Untuk menentukan koefisien konveksi dalam ruang pendingin dan di luar, diasumsikan udara dengan temperatur 25 °C [278 K] ~ 300 K, yang memiliki karakteristik seperti pada tabel berikut.

T [K]	ρ [kg/m ³]	Cp[kJ/kg.°C]	μ [x10 ⁻⁵ kg/m.s]	ν [x10 ⁻⁶ m ² /s]	k [W/m.°C]	α [x10 ⁻⁴ m ² /s]	Pr
300	1,1774	1,0057	1,8462	15,69	0,02624	0,22160	0,708

b. Untuk menghitung h_i

Untuk perpindahan kalor konveksi bebas pada pelat vertikal berlaku:

$$Gr_{\delta} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2) \cdot x^3}{\nu^2}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

T_1 = temperatur dinding dalam belakang = 44,30 °C

T_2 = temperatur dinding dalam depan = 41,90 °C

x = jarak dinding dalam belakang- depan = 1014 mm – 2x(3mm+18mm)

$$= 972 \text{ mm} = 0,972 \text{ m}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Hasil perkalian bilangan Grashof dan bilangan Prandtl, didapatkan dengan persamaan:

$$Gr_f \cdot Pr = \frac{g \cdot \rho^2 \beta \cdot (T_1 - T_2) \cdot x^3}{\mu^2} \cdot Pr$$

Hasil perhitungannya didapatkan pada tabel berikut.

g [m/s^2]	T_1 [$^{\circ}\text{C}$]	T_2 [$^{\circ}\text{C}$]	T_f [K]	β [K^{-1}]	x [m]	$Gr_f \cdot Pr$
9,8	44,30	41,90	316,1	$3,164 \cdot 10^{-3}$	0,972	$1,968 \cdot 10^8$

Hasil perkalian $Gr_f Pr = Ra$ disesuaikan dengan persyaratan persamaan

2.15, sehingga hasil perhitungan menghasilkan:

Nu_f	h [$\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$]
61,56587	1,662

Besarnya h_i adalah $1,662 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

c. Untuk menghitung h_o

Pada perhitungan ini berlaku perpindahan kalor konveksi bebas pada pelat vertikal juga, dengan keterangan:

T_w = temperatur dinding luar belakang = $43,80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

T_{∞} = temperatur lingkungan = $39,30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

x = jarak dinding luar ke letak termometer = $10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Seperti halnya perhitungan di atas, maka didapatkan hasil:

T_w [$^{\circ}\text{C}$]	T_{∞} [$^{\circ}\text{C}$]	T_f [K]	β [K^{-1}]	x [m]	$Gr_f \cdot Pr_f$	Nu_f	h [$\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$]
43,80	39,30	314,55	0,00318	0,10	403.713,993	13,638	3,579

Besarnya h_o adalah $3,579 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

d. Perhitungan beban transmisi.

Beban transmisi adalah beban yang diakibatkan adanya perpindahan kalor secara konduksi dan konveksi dari ruang pendingin melalui dinding menuju lingkungan luar. Dinding yang dimaksud terdiri atas dinding depan, sisi kanan, sisi kiri, belakang, dan sisi bawah ruang pendingin.

Persamaan yang digunakan dalam perhitungan beban transmisi adalah:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

q = beban kalor transmisi [W]

U = koefisien perpindahan kalor menyeluruh [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

A = luas penampang perpindahan kalor melalui dinding/sisi [m^2]

ΔT = perbedaan temperatur antara temperatur ruang pendingin dengan udara luar (lingkungan) [K]

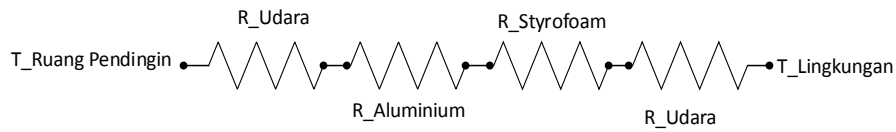
Untuk koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U) dari dinding dan sisi dihitung dengan persamaan:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$

Perhitungan beban transmisi terdiri dari:

1). Dinding/sisi samping (kanan dan kiri)

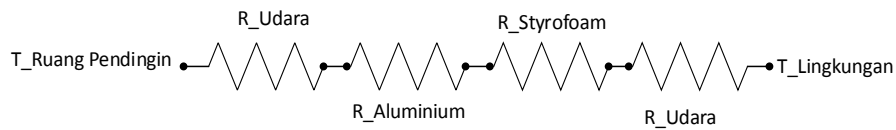
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}}$ [m]	$\Delta X_{\text{Styrofoam}}$ [m]	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{kanan dan kiri} [W]
0,003	0,018	0,99372	0,70097956	6,269196703

2). Dinding depan

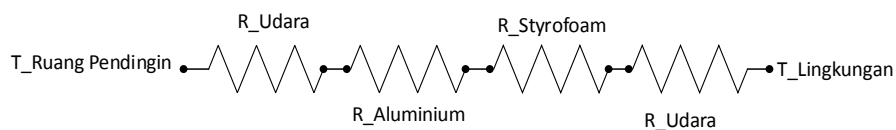
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}}$ [m]	$\Delta X_{\text{Styrofoam}}$ [m]	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{depan} [W]
0,003	0,018	0,16511	0,70097956	0,520824311

3). Dinding belakang

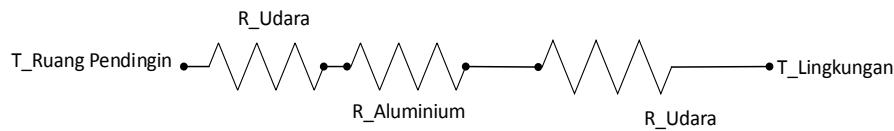
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}} [\text{m}]$	$\Delta X_{\text{Styrofoam}} [\text{m}]$	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{belakang} [W]
0,003	0,018	0,68651	0,70097956	2,16553266

4). Sisi bawah

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}} [\text{m}]$	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{bawah} [W]
0,003	0,881166	1,13491846	4,500232026

Dari perhitungan di atas, maka dapat dihitung total beban transmisi:

$$q_{\text{transmisi}} = q_{\text{dinding kiri dan kanan}} + q_{\text{dinding depan}} + q_{\text{dinding belakang}} + q_{\text{sisi bawah}}$$

$$q_{\text{transmisi}} = 6,269196703 \text{ W} + 0,520824311 \text{ W} + 2,16553266 \text{ W} + 4,500232026 \text{ W}$$

$$q_{\text{transmisi}} = 13,4557857 \text{ W}$$

e. Perhitungan penyerapan kalor oleh *heatsink*.

Heatsink yang berimpit dengan sisi dingin termoelektrik menyerap panas dari ruang pendingin melalui sejumlah 10 siripnya yang ditampilkan pada gambar 2.13. Perhitungan kalor yang diserap digunakan persamaan 2.6 dan 2.7 dengan data yang ditampilkan berikut hasil perhitungannya.

h [W/m ² .°C]	P [m]	k [W/m.°C]	A_c [m ²]	L (m)	T_b [°C]	T_∞ [°C]	q_{fin} [W]	$q_{heatsink}$ [W]
1,662025231	0,072	202	0,00035	0,03	49,5	46,7	0,0100468	0,10046828

Kalor yang diserap *heatsink* sebesar 0,10046828 W

Perhitungan beban keseluruhan:

$$q = q_{transmisi} + q_{hilang} + q_{diserap\ heatsink}$$

$$q = 13,4557857\ W + 34,48936183\ W + 0,100468276\ W$$

$$q = 48,045616\ W$$

Perhitungan CoP sistem pendingin adalah:

$$CoP = \frac{q_c}{P_{in}}$$

$$CoP = \frac{48,045616\ W}{38,17\ W} = 1,259$$

CoP sistem pendingin untuk sambungan TE seri sebesar 1,259

2. Untuk sambungan TE seri-paralel

a. Data yang diperlukan untuk perhitungan adalah:

$$P_{in} = 28,43\ W$$

b. Untuk menghitung h_i

$$T_1 = \text{temperatur dinding dalam belakang} = 37,80\ ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = \text{temperatur dinding dalam depan} = 36,70\ ^\circ\text{C}$$

Hasil perhitungannya didapatkan pada tabel berikut.

g [m/s ²]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_f [K]	β [K ⁻¹]	x [m]	$Gr_f \cdot Pr$
9,8	37,80	36,70	310,25	$3,223 \cdot 10^{-3}$	0,972	$9,118 \cdot 10^7$

Hasil perkalian $Gr_f Pr = Ra$ disesuaikan dengan persyaratan persamaan

2.15, sehingga hasil perhitungan menghasilkan:

Nu_f	h [W/m ² .°C]
51,01152	1,377

Besarnya h_i adalah 1,377 W/m².K

c. Untuk menghitung h_o

Pada perhitungan ini berlaku perpindahan kalor konveksi bebas pada pelat vertikal juga, dengan keterangan:

T_w = temperatur dinding luar belakang = 37,70 °C

T_∞ = temperatur lingkungan = 35,40 °C

Seperti halnya perhitungan di atas, maka didapatkan hasil:

T_w [°C]	T_∞ [°C]	T_f [K]	β [K ⁻¹]	x [m]	$Gr_f \cdot Pr_f$	Nu_f	h [W/m ² .°C]
37,70	35,40	309,55	0,003230	0,10	209.675,135	11,680	3,065

Besarnya h_o adalah 3,065 W/m².K

d. Perhitungan beban transmisi.

Untuk koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U) dari dinding dan sisi dihitung

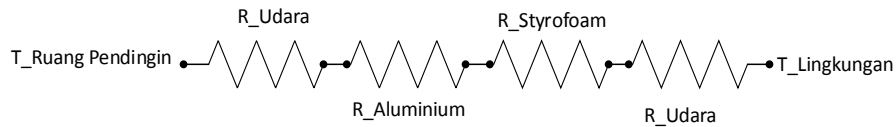
dengan persamaan:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$

Perhitungan beban transmisi terdiri dari:

1). Dinding/sisi samping (kanan dan kiri)

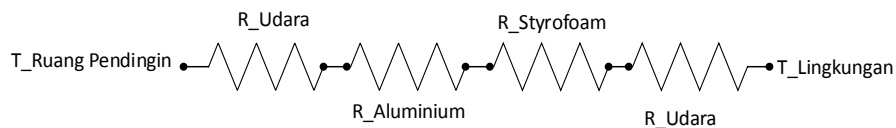
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}}$ [m]	$\Delta X_{\text{Styrofoam}}$ [m]	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{kanan dan kiri} [W]
0,003	0,018	0,99372	0,62582308	2,860707406

2). Dinding depan

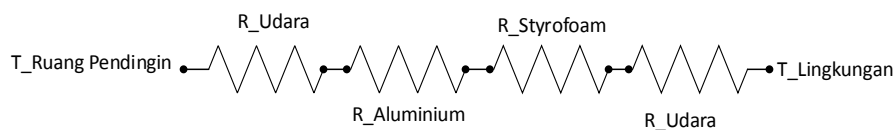
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}}$ [m]	$\Delta X_{\text{Styrofoam}}$ [m]	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{depan} [W]
0,003	0,018	0,16511	0,62582308	0,237658193

3). Dinding belakang

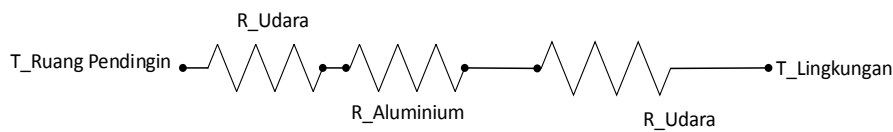
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}} [\text{m}]$	$\Delta X_{\text{Styrofoam}} [\text{m}]$	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{belakang} [W]
0,003	0,018	0,68651	0,62582308	0,988157751

4). Sisi bawah

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}} [\text{m}]$	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{bawah} [W]
0,003	0,881166	0,95017191	1,925696115

Dari perhitungan di atas, maka dapat dihitung total beban transmisi:

$$q_{\text{transmisi}} = q_{\text{dinding kiri dan kanan}} + q_{\text{dinding depan}} + q_{\text{dinding belakang}} + q_{\text{sisi bawah}}$$

$$q_{\text{transmisi}} = 2,860707406 \text{ W} + 0,237658193 \text{ W} + 0,988157751 \text{ W} + 1,925696115 \text{ W}$$

$$q_{\text{transmisi}} = 6,012219465 \text{ W}$$

e. Perhitungan penyerapan kalor oleh *heatsink*.

Perhitungan kalor yang diserap digunakan persamaan 2.6 dan 2.7 dengan data yang ditampilkan berikut hasil perhitungannya.

h [W/m ² .°C]	P [m]	k [W/m.°C]	Ac [m ²]	L (m)	T _b [°C]	T _∞ [°C]	q _{fin} [W]	q _{heatsink} [W]
1,37710122	0,072	202	0,00035	0,03	42,6	38,8	0,0112985	0,11298494

Kalor yang diserap *heatsink* sebesar 0,11298494 W

Perhitungan beban keseluruhan:

$$\begin{aligned}
 q &= q_{transmisi} + q_{hilang} + q_{diserap\ heatsink} \\
 q &= 6,012219465\ W + 21,99321624\ W + 0,112984936\ W \\
 q &= 28,118421\ W
 \end{aligned}$$

Perhitungan CoP sistem pendingin adalah:

$$\begin{aligned}
 CoP &= \frac{q_c}{P_{in}} \\
 CoP &= \frac{28,118421\ W}{28,43\ W} = 0,989
 \end{aligned}$$

CoP sistem pendingin untuk sambungan TE seri-paralel sebesar 0,989

3. Untuk sambungan TE paralel

a. Data yang diperlukan untuk perhitungan adalah:

$$P_{in} = 60,09\ W$$

b. Untuk menghitung h_i

$$T_1 = \text{temperatur dinding dalam belakang} = 32,60\ ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = \text{temperatur dinding dalam depan} = 32,20\ ^\circ\text{C}$$

Hasil perhitungannya didapatkan pada tabel berikut.

g [m/s^2]	T_1 [$^\circ\text{C}$]	T_2 [$^\circ\text{C}$]	T_f [K]	β [K^{-1}]	x [m]	$Gr_f \cdot Pr$
9,8	32,60	32,20	305,4	$3,274 \cdot 10^{-3}$	0,972	$3,394 \cdot 10^7$

Hasil perkalian $Gr_f \cdot Pr = Ra$ disesuaikan dengan persyaratan persamaan

2.15, sehingga hasil perhitungan menghasilkan:

Nu_f	h [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]
39,91897	1,078

Besarnya h_i adalah $1,078 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

c. Untuk menghitung h_o

Pada perhitungan ini berlaku perpindahan kalor konveksi bebas pada pelat vertikal juga, dengan keterangan:

T_w = temperatur dinding luar belakang = $34,10 \text{ }^\circ\text{C}$

T_∞ = temperatur lingkungan = $33,20 \text{ }^\circ\text{C}$

Seperti halnya perhitungan di atas, maka didapatkan hasil:

T_w [$^\circ\text{C}$]	T_∞ [$^\circ\text{C}$]	T_f [K]	β [K^{-1}]	x [m]	$Gr_f \cdot Pr_f$	Nu_f	h [$\text{W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$]
34,10	33,20	306,65	0,003261	0,10	82.822,711	9,4011	2,467

Besarnya h_o adalah $2,467 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

d. Perhitungan beban transmisi.

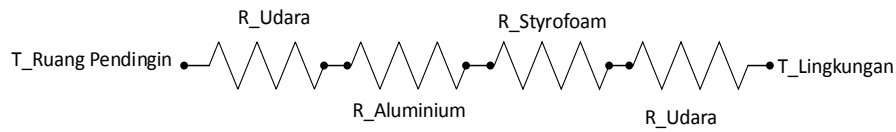
Untuk koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U) dari dinding dan sisi dihitung dengan persamaan:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$

Perhitungan beban transmisi terdiri dari:

1). Dinding/sisi samping (kanan dan kiri)

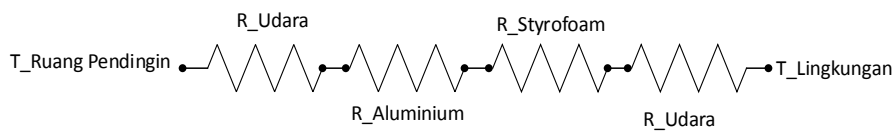
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}}$ [m]	$\Delta X_{\text{Styrofoam}}$ [m]	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{kanan dan kiri} [W]
0,003	0,018	0,99372	0,53225666	0,952045364

2). Dinding depan

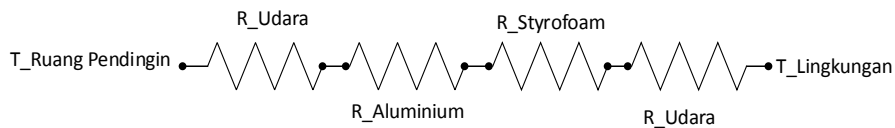
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}}$ [m]	$\Delta X_{\text{Styrofoam}}$ [m]	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{depan} [W]
0,003	0,018	0,16511	0,53225666	0,079092808

3). Dinding belakang

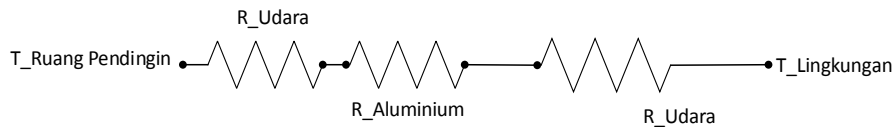
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}}$ [m]	$\Delta X_{\text{Styrofoam}}$ [m]	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{belakang} [W]
0,003	0,018	0,68651	0,53225666	0,32885957

4). Sisi bawah

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{1}{h_o}}$$



$\Delta X_{\text{Aluminium}}$ [m]	A [m ²]	U [W/m ² .K]	Q _{bawah} [W]
0,003	0,881166	0,74999722	0,594784843

Dari perhitungan di atas, maka dapat dihitung total beban transmisi:

$$q_{\text{transmisi}} = q_{\text{dinding kiri dan kanan}} + q_{\text{dinding depan}} + q_{\text{dinding belakang}} + q_{\text{sisi bawah}}$$

$$q_{\text{transmisi}} = 0,952045364 \text{ W} + 0,079092808 \text{ W} + 0,32885957 \text{ W} + 0,594784843 \text{ W}$$

$$q_{\text{transmisi}} = 1,954782585 \text{ W}$$

e. Perhitungan penyerapan kalor oleh *heatsink*.

Perhitungan kalor yang diserap digunakan persamaan 2.6 dan 2.7 dengan data yang ditampilkan berikut hasil perhitungannya.

h [W/m ² .°C]	P [m]	k [W/m.°C]	Ac [m ²]	L (m)	T _b [°C]	T _∞ [°C]	q _{fin} [W]	q _{heatsink} [W]
1,077647906	0,072	202	0,00035	0,03	35,1	33,1	0,0046539	0,04653907

Kalor yang diserap *heatsink* sebesar 0,04653907 W

Perhitungan beban keseluruhan:

$$q = q_{\text{transmisi}} + q_{\text{hilang}} + q_{\text{diserap heatsink}}$$

$$q = 1,954782585 \text{ W} + 0,499845824 \text{ W} + 0,046539068 \text{ W}$$

$$q = 2,5011675 \text{ W}$$

Perhitungan CoP sistem pendingin adalah:

$$CoP = \frac{q_c}{P_{in}}$$
$$CoP = \frac{2,5011675 \text{ W}}{60,09 \text{ W}} = 0,042$$

CoP sistem pendingin untuk sambungan TE paralel sebesar 0,042

BAB 5

KESIMPULAN

Setelah dilakukan pengujian, perhitungan, dan analisis serta pembahasan di atas, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Sel surya dalam penelitian ini mampu mengkonversi rata-rata energi radiasi matahari sebesar 375,03 W dengan kinerja daya keluaran sebesar 60,09 W dan efisiensi sebesar 16,03%.
2. Ruang pendingin memiliki capaian terbesar CoP adalah 1,259 untuk sambungan termoelektrik seri, sedangkan temperatur ruang pendingin paling rendah sebesar 23,40°C dicapai oleh sambungan termoelektrik paralel.
3. Dengan capaian temperatur terendah 23,40 °C penelitian model ruang pendingin mobil jenis *city car* ini dapat dilakukan pada tempat dan kondisi sebenarnya.
4. Sistem pendingin kabin ini tidak dipengaruhi tenaga listrik dari mesin, maka dapat berfungsi juga selama mobil berhenti atau sedang parkir

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diberikan saran dan rekomendasi sebagai berikut.

1. Sebagai penelitian model pemanfaatan energi panas matahari tidak diperlukan untuk menekan temperatur serendah mungkin, karena perbedaan temperatur termoelektrik cenderung tetap untuk pasokan energi listrik yang tetap.
2. Daya input yang masuk ke sistem pendingin termolektrik berasal dari daya luaran sistem fotovoltaik, diperlukan untuk mengukur daya input yang sebenarnya yang

masuk ke dalam sistem pendingin termolektrik sehingga dapat diketahui koefisien kinerja sistem pendingin yang lebih tepat.

3. Model penelitian lebih representatif dari ukuran volume ruang dan material sisi ruang dengan yang sesungguhnya.
4. Untuk mempertahankan aerodinamis dan nilai estetika mobil *city car* yang digunakan lebih tepat menggunakan sel surya selaput tipis.
5. Pendingin kabin *city car* ini dapat dikembangkan pada mobil berukuran lebih besar dan kendaraan/alat transportasi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. S. Gaos *et al.*, “The performance of solar collector CPC (compound parabolic concentrator) type with three pipes covered by glass tubes,” in *Renewable Energy Technology and Innovation for Sustainable Development*, 2017, pp. 020022–1–020022–9.
- [2] D. Enescu and F. Spertino, “Applications of Hybrid Photovoltaic Modules with Thermoelectric Cooling,” *Energy Procedia*, vol. 111, no. September 2016, pp. 904–913, 2017.
- [3] H. Najafi and K. A. Woodbury, “Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells,” *Sol. Energy*, vol. 91, pp. 152–160, 2013.
- [4] A. Kane, V. Verma, and B. Singh, “Optimization of thermoelectric cooling technology for an active cooling of photovoltaic panel,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. September, pp. 1295–1305, 2017.
- [5] T. C. Cheng, C. H. Cheng, Z. Z. Huang, and G. C. Liao, “Development of an energy-saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications,” *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 133–140, 2011.
- [6] M. Benganem, A. A. Al-Mashraqi, and K. O. Daffallah, “Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites,” *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 51–59, 2016.
- [7] Z. Liu, L. Zhang, G. Gong, H. Li, and G. Tang, “Review of solar thermoelectric cooling technologies for use in zero energy buildings,” *Energy Build.*, vol. 102, pp. 207–216, 2015.
- [8] W. He, J. Zhou, C. Chen, and J. Ji, “Experimental study and performance analysis of a thermoelectric cooling and heating system driven by a photovoltaic/thermal system in summer and winter operation modes,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 84, pp. 41–49, 2014.
- [9] T. Module, “Specification of Thermoelectric Module TEC1-12706.”
- [10] M. M. Kostic, “Energy: Global and Historical Background,” in *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology, Second Edition*, B. L. Capehart, Ed. 2015, pp. 644–657.
- [11] M. Asif and T. Muneer, “Solar Thermal Technologies,” in *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology - 3 Volume Set (Print Version)*, B. L. Capehart, Ed. Boca Raton: CRC Press, 2010, pp. 1321–1330.
- [12] A. Montecucco, J. Siviter, and A. R. Knox, “The effect of temperature mismatch

- on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel,” *Appl. Energy*, vol. 123, pp. 47–54, 2014.
- [13] C. J. Chen, *Physics of Solar Energy*. 2011.
- [14] M. A. Rosen, “Natural Energy versus Additional Energy,” in *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, B. L. Capehart, Ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, pp. 1088–1110.
- [15] I. Dincer and A. Midilli, “Green Energy,” in *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, B. L. Capehart, Ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, pp. 771–786.
- [16] Z. Abdin, C. J. Webb, and E. M. A. Gray, “Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: A critical review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1791–1808, 2015.
- [17] V. Masson, M. Bonhomme, J.-L. Salagnac, X. Briottet, and A. Lemonsu, “Solar panels reduce both global warming and urban heat island,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 2, no. June, pp. 1–10, 2014.
- [18] Z. Şen, “Solar energy in progress and future research trends,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 4, pp. 367–416, 2004.
- [19] N. S. Lewis, Ed., *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization*. California: U.S. Department of Energy, 2005.
- [20] P. Jayakumar, “Solar Energy Resource Assessment Handbook,” *Asian Pacific Cent. Transf. Technol. United Nations – Econ. Soc. Comm. Asia Pacific*, no. September, pp. 1–117, 2009.
- [21] Y. Chu, “Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies, Global Energy Network Institute (GENI), 2011,” no. August, 2011.
- [22] 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.
- [23] K. Jager, O. Isabella, A. H. M. Smets, R. A. C. M. M. van Swaaij, and M. Zeman, *Solar energy Fundamentals, Technology, and Systems*. Delft, 2014.
- [24] J. Franklin M. Orr and S. M. Benson, “Sustainability and energy conversions,” in *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*, D. S. Ginley and D. Cahen, Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, pp. 36–47.
- [25] B. Bhandari, K. T. Lee, C. S. Lee, C. K. Song, R. K. Maskey, and S. H. Ahn, “A novel off-grid hybrid power system comprised of solar photovoltaic, wind, and hydro energy sources,” *Appl. Energy*, vol. 133, pp. 236–242, 2014.

- [26] S. A. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, vol. 30, no. 3. 2004.
- [27] F. Sehar, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, “An energy management model to study energy and peak power savings from PV and storage in demand responsive buildings,” *Appl. Energy*, vol. 173, pp. 406–417, 2016.
- [28] R. Ruparathna, K. Hewage, and R. Sadiq, “Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1032–1045, 2016.
- [29] D. Lazos, A. B. Sproul, and M. Kay, “Optimisation of energy management in commercial buildings with weather forecasting inputs: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 587–603, 2014.
- [30] A. del Amo, A. Martínez-Gracia, A. A. Bayod-Rújula, and J. Antoñanzas, “An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring,” *Appl. Energy*, vol. 186, pp. 140–151, 2017.
- [31] M. A. Contreras and S. Deb, “Solar energy overview,” in *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*, D. S. Ginley and D. Cahen, Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, pp. 206–215.
- [32] D. S. Ginley, R. Collins, and D. Cahen, “Direct solar energy conversion with photovoltaic devices,” in *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*, D. S. Ginley and D. Cahen, Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, pp. 216–237.
- [33] A. Malviya and P. P. Solanki, “Photogalvanics: A sustainable and promising device for solar energy conversion and storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 662–691, 2016.
- [34] G. W. Crabtree and N. S. Lewis, “Solar energy conversion,” no. March 2007, 2007.
- [35] M. Ropp, “Photovoltaic Systems,” in *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, B. L. Capehart, Ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, pp. 1147–1159.
- [36] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [37] Q. Dong, T. Liao, Z. Yang, X. Chen, and J. Chen, “Performance characteristics and parametric choices of a solar thermophotovoltaic cell at the maximum efficiency,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 136, pp. 44–49, 2017.
- [38] S. Armstrong and W. G. Hurley, “A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 11–12, pp. 1488–1495, 2010.
- [39] U. Eicker, *Solar Technologies for Buildings*. Chichester, West Sussex: John

Wiley & Sons, 2003.

- [40] Y. Li, S. Witharana, H. Cao, M. Lasfargues, Y. Huang, and Y. Ding, “Wide spectrum solar energy harvesting through an integrated photovoltaic and thermoelectric system,” *Particuology*, vol. 15, pp. 39–44, 2014.
- [41] J. Zhang and Y. Xuan, “An integrated design of the photovoltaic-thermoelectric hybrid system,” *Sol. Energy*, vol. 177, no. November 2018, pp. 293–298, 2019.
- [42] H. Lee, *Heat Sinks , Thermoelectrics , Heat Pipes , Compact Heat Exchangers , and Solar Cells*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- [43] G. S. Nolas, J. Sharp, and H. J. Goldsmid, *Basic Principles and New Materials Developments*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- [44] A. V. da Rosa, *Fundamentals of Renewable Energy Processes*. Burlington: Elsevier Inc., 2005.
- [45] V. Zlatic and R. Monnier, *Modern Theory of Thermoelectricity*, First. Oxford: Oxford University Press, 2014.
- [46] H. Fan, “Power Generation from Thermoelectric Cells by Using Solar Parabolic Concentration Dish,” RMIT University, 2011.
- [47] C. Liu, P. Chen, and K. Li, “A 500 W low-temperature thermoelectric generator: Design and experimental study,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 28, pp. 15497–15505, 2014.
- [48] I. Nandhakumar, N. M. White, and S. Beeby, *Thermoelectric Materials and Devices*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2017.
- [49] F. M. Vanek and L. D. Albright, *Energy Systems Engineering Evaluation & Implementation*. United States: McGraw Hill, 2008.
- [50] P. Gevorkian, “Solar Power in Building Design,” p. 506, 2008.
- [51] F. T. UI, “Universitas Indonesia Penerapan Sistem Pendinginan Bertingkat Berbasis Termoelektrik Dan Heat Pipe Depok,” 2009.
- [52] E. Oliver, K. Baker, M. Babcock, and J. Archibald, “Solar Heating and Air Conditioning: Case Study,” in *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, B. L. Capehart, Ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, pp. 1317–1320.
- [53] B. Silvetti, “Thermal Energy Storage,” in *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, B. L. Capehart, Ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, pp. 1412–1421.
- [54] A. Bitschi, “Modelling of thermoelectric devices for electric power generation,” Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2009.
- [55] F. L. Chua, B. Ohara, and B. Tong, “Quikchill : thermoelectric water cooler,”

2013.

- [56] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [57] K. Gładyszewska-Fiedoruk, “Concentrations of carbon dioxide in the cabin of a small passenger car,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 16, no. 4, pp. 327–331, 2011.
- [58] V. C. Mei, F. C. Chen, B. Mathiprakasham, and P. Heenan, “Study of solar-assisted thermoelectric technology for automobile air conditioning,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 115, no. 4, pp. 200–205, 1993.
- [59] D.W. Lee, “Impact of a Three-Dimensional Air-Conditioning System on Thermal Comfort: An Experimental Study,” *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 16, no. 3, p. 411–416, 2015.
- [60] J. Fiser, J. Pokorny, D. Podola, and M. Jicha, “Experimental Investigation of Car Cabin Environment During Real Traffic Conditions,” *Eng. Mech.*, vol. 20, no. 3, pp. 229–236, 2013.
- [61] J. Pokorny, J. Fiser, and M. Jicha, “Operational heat balance model with parameterized geometry for the prediction of car cabin heat loads,” *Int. J. Vent.*, vol. 11, no. 4, pp. 393–406, 2013.
- [62] S. Paulke and M. Ellinger, “Air Conditioning Cabin Simulation of Passengers,” no. November, pp. 29–30, 2007.
- [63] I. I. Hakim and A. Samgita, “Development of Car Cabin Cooler Based on Thermoelectric,” no. Snttm Xii, pp. 23–24, 2013.