



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KINERJA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK MIKRO HIBRIDA
SEDERHANA BERBASIS *PHOTOVOLTAIC* DAN MODUL TERMOELEKTRIK**

SKRIPSI

**MUHAMMAD SYARIIFI MUFLIH
1806149210**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK 2022**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KINERJA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK MIKRO HIBRIDA
SEDERHANA BERBASIS *PHOTOVOLTAIC* DAN MODUL TERMOELEKTRIK**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**

MUHAMMAD SYARIIFI MUFLIH

1806149210

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
JUNI 2022**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Muhammad Syariifi Muflih

NPM : 1806149210

Tanda Tangan : _____

Tanggal : 22 Juni 2022

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Muhammad Syariifi Muflih

NPM : 1806149210

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Analisis Kinerja Sistem Pembangkit Listrik Mikro Hibrida Sederhana Berbasis *Photovoltaic* dan Modul Termoelektrik

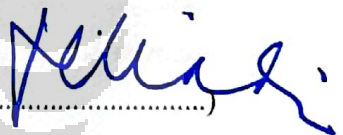
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Imansyah Ibnu Hakim M.Eng.

()

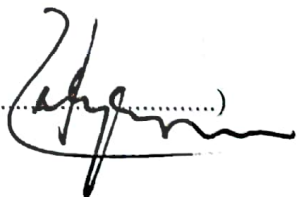
Penguji I : Prof. Dr. -Ing. Nandy Setiadi Djaya Putra

()

Penguji II : Prof. Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M.T.

()

Penguji III : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koester, DEA

()

Ditetapkan di : Fakultas Teknik

Tanggal : 6 Juli 2022

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena dengan izin-Nya saya dapat menyelesaikan tugas akhir skripsi ini. Skripsi ini dibuat untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Pada halaman ini penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya karena telah memiliki peran tertentu dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orang tua dan keluarga atas doa, dukungan finansial, dan dukungan emosional yang diperlukan untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Ir. Imansyah Ibnu Hakim M.Eng., selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberi ilmu, membimbing, dan mengajari saya dalam penelitian skripsi ini selama 2 semester.
3. Kak Reski Septiana atas ilmu dan bantuannya dalam mengajari saya pembuatan sistem *data logging* arduino.
4. Teman-teman sebimbingan (Fakhri Hawari, Hafizh Bramantya, Rizkananda Salsabila) yang telah membantu dan berjuang bersama-sama dalam pembuatan skripsi.
5. Seluruh mahasiswa Departemen Teknik Mesin UI angkatan 2018 yang telah banyak membantu selama menjalani proses perkuliahan bersama-sama selama 4 tahun.
6. Seluruh pihak yang telah membantu, memberikan dukungan dan doa selama masa perkuliahan dan penulisan skripsi yang penulis tidak bisa sebutkan satu persatu.

Jakarta, 22 Juni 2022

Muhammad Syariifi Muflih

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Syariifi Muflih

NPM : 1806149210

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Analisis Kinerja Sistem Pembangkit Listrik Mikro Hibrida Sederhana Berbasis
Photovoltaic dan Modul Termoelektrik

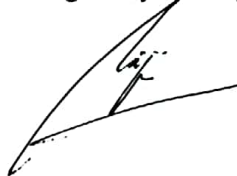
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 22 Juni 2022

Yang menyatakan,



(Muhammad Syariifi Muflih)

ABSTRAK

Nama : Muhammad Syariifi Muflih

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Analisis Kinerja Sistem Pembangkit Listrik Mikro Hibrida Sederhana Berbasis *Photovoltaic* dan Modul Termoelektrik

Pembimbing : Dr. Ir. Imansyah Ibnu Hakim M.Eng.

Energi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sel surya *photovoltaic* (*solar PV*). Rentang spektrum matahari dalam jumlah yang signifikan tidak digunakan dalam konversi *photovoltaic* dan terdisipasi sebagai panas selama pengoperasian sel surya. Teknologi inovatif untuk meningkatkan kinerja sistem *photovoltaic* adalah menggabungkan panel PV dengan modul termoelektrik untuk lebih meningkatkan efisiensi konversi daya. Modul termoelektrik mampu mengubah energi panas dalam bentuk perbedaan temperatur menjadi energi listrik melalui efek *Seebeck*. Sel *photovoltaic* dan generator termoelektrik (*thermoelectric generator/TEG*) memiliki tujuan yang sama untuk menghasilkan tenaga listrik. Konfigurasi hibrida *photovoltaic-thermoelectric* (PV-TE) gabungan bisa menjadi sistem potensial yang menghasilkan lebih banyak listrik daripada desain PV saja. Teknologi yang menggabungkan sel PV dan TEG untuk memperbanyak pembangkitan daya listrik dari radiasi matahari dapat dilakukan dengan menambahkan TEG ke sisi belakang panel surya. Energi panas yang terdisipasi oleh sel PV dapat digunakan oleh TEG untuk pembangkit tenaga listrik tambahan. TEG memanfaatkan energi panas yang terdisipasi oleh sel PV untuk bagian *hot side*, dan menggunakan *heat sink* untuk bagian *cold side*. Terjadinya perbedaan temperatur membuat TEG menghasilkan energi listrik tambahan.

Kata kunci: *Photovoltaic (PV)*, *Thermoelectric Generator (TEG)*, *temperatur*, *daya*

ABSTRACT

Name : Muhammad Syariifi Muflih

Study Program : Mechanical Engineering

Title : Performance Analysis of Simple Hybrid Micro Electric Generator System Based of Photovoltaic and Thermoelectric Module

Counselor : Dr. Ir. Imansyah Ibnu Hakim M.Eng.

Solar energy can be converted into electrical energy using photovoltaic solar cells (solar PV). A significant amount of the solar spectrum is not used in photovoltaic conversion and is dissipated as heat during the operation of the solar cell. An innovative technology to improve the performance of photovoltaic systems is to combine PV cells with thermoelectric modules to further improve power conversion efficiency. The thermoelectric module is able to convert heat energy into electrical energy through the Seebeck effect. Photovoltaic cells and thermoelectric generators have the same purpose of generating electric power. A combined photovoltaic-thermoelectric (PV-TE) hybrid configuration could be a potential system that generates more electricity than a PV design alone. The technology that combines PV cells and thermoelectric generator/TEG to increase the generation of electrical power from solar radiation can be done by adding TEG to the back side of the solar panel. The heat energy dissipated by the PV cells can be used by the TEG for additional electric power generation. TEG utilizes heat energy dissipated by PV cells for the hot side, and uses a heat exchanger for the cold side. The occurrence of a temperature difference makes the TEG generate additional electrical energy.

Keywords: Photovoltaic (PV), Thermoelectric Generator (TEG), temperature, power

DAFTAR ISI

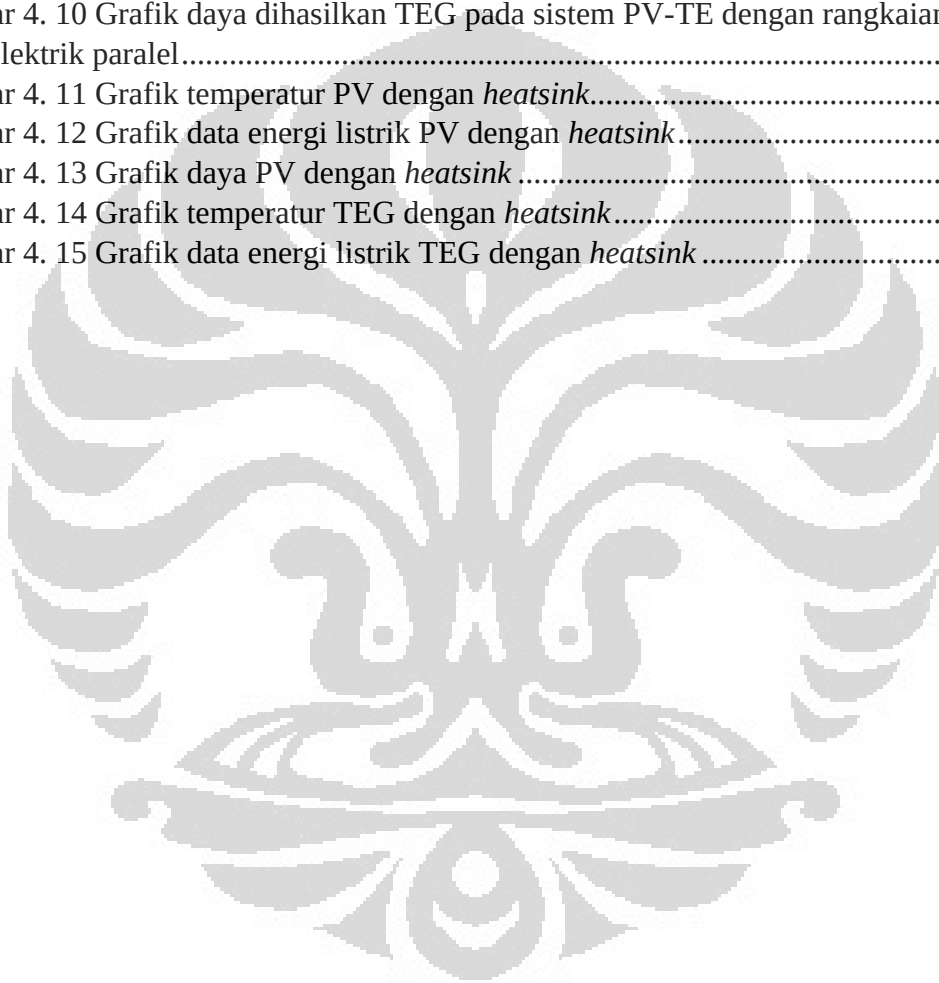
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR NOTASI.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya	6
2.2 Panel Surya.....	7
2.3 Generator Termoelektrik	8
2.4 Heat Exchanger	12
2.5 Sistem Hibrida <i>Solar Photovoltaic-Thermoelectric</i>	13
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Alur Penelitian	18
3.2 Eksperimen Penelitian.....	19
3.3 <i>Setup</i> Komponen Eksperimen	20
3.3.1 Sistem PV-TE	20
3.3.1.1 Solar panel	20
3.3.1.2 Termoelektrik.....	21
3.3.1.3 <i>Heatsink</i>	22
3.3.1.4 <i>Thermal paste</i>	22
3.3.1.5 <i>Thermal adhesive</i>	23

3.3.2	Komponen Sistem <i>Data Logging</i>	23
3.3.2.1	Arduino Uno	23
3.3.2.2	Modul MAX6675.....	23
3.3.2.3	Modul MAX471.....	24
3.3.2.4	SD Card.....	26
3.3.2.5	Termokopel tipe K	26
3.3.2.6	Modul DS18B20	27
3.3.3	Sistem <i>Data Logging</i>	27
3.3.3.1	Rangkaian Arduino 1	27
3.3.3.2	Rangkaian Arduino 2	28
3.3.3.3	Kalibrasi termokopel.....	28
3.4	Metode Eksperimen.....	33
3.4.1	Variasi suhu pada berbagai titik permukaan PV	35
3.4.1.1	Sisi atas PV	35
3.4.1.2	Sisi bawah PV	36
3.4.2	Letak Penempatan Termokopel.....	37
3.4.3	Rangkaian Termoelektrik.....	37
3.4.3.1	Rangkaian Seri Termoelektrik	38
3.4.3.2	Rangkaian Paralel Termoelektrik	38
3.4.4	Pengujian PV dan TEG secara Terpisah.....	39
BAB 4	PEMBAHASAN	40
4.1	Data Hasil Penelitian	40
4.1.1	Rangkaian Seri Termoelektrik.....	40
4.1.2	Rangkaian Paralel Termoelektrik.....	42
4.2	Pengolahan Data	43
4.2.1	Rangkaian Seri Termoelektrik.....	45
4.2.2	Rangkaian Paralel Termoelektrik.....	45
4.3	Pengujian PV dan TEG secara Terpisah.....	48
4.3.1	PV dengan <i>heatsink</i>	49
4.3.2	TEG dengan <i>heatsink</i>	49
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA		52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Efek fotoelektrik.	6
Gambar 2. 2. Skema sistem PV pada perumahan.....	8
Gambar 2. 3. Prinsip generator termoelektrik	9
Gambar 2. 4. Perbandingan efisiensi total dengan konsentrasi matahari dalam <i>suns</i>	16
Gambar 2. 5. Representasi skema contoh sistem PV-TE dengan pendingin air	17
Gambar 3. 1. Diagram alur penelitian	18
Gambar 3. 2. Ilustrasi sistem PV-TE.....	19
Gambar 3. 3. Sistem PV-TE yang digunakan: (a) tampak atas, (b) tampak bawah	19
Gambar 3. 4. <i>VISERO Monocrystal Solar Module</i> 10W: (a) tampak bawah, (b) tampak atas.....	21
Gambar 3. 5. Modul termoelektrik SP1848 27145 SA.....	22
Gambar 3. 6. <i>Heatsink</i> aluminium.....	22
Gambar 3. 7 Modul MAX6675	23
Gambar 3. 8. Modul MAX471	25
Gambar 3. 9. SD card shield arduino	26
Gambar 3. 10. Skema rangkaian arduino 1	27
Gambar 3. 11. Skema rangkaian arduino 2.....	28
Gambar 3. 12. Proses kalibrasi pada suhu 50°C menggunakan CTB.	29
Gambar 3. 13. Proses kalibrasi pada suhu 90°C menggunakan CTB.	29
Gambar 3. 14. Grafik kalibrasi termokopel 1.....	30
Gambar 3. 15. Grafik kalibrasi termokopel 2.....	30
Gambar 3. 16. Grafik kalibrasi termokopel 3.....	31
Gambar 3. 17. Grafik kalibrasi termokopel 4.....	31
Gambar 3. 18. Grafik kalibrasi termokopel 5.....	32
Gambar 3. 19. Skema <i>setup</i> eksperimen.....	33
Gambar 3. 20. Letak 5 titik termokopel untuk mengetahui variasi suhu pada sisi atas PV.....	35
Gambar 3. 21. Grafik data 5 titik suhu pada sisi atas PV.....	35
Gambar 3. 22. Letak 5 titik termokopel untuk mengetahui variasi suhu pada sisi bawah PV.....	36
Gambar 3. 23. Grafik data 5 titik suhu pada sisi bawah PV.....	36
Gambar 3. 24 Penempatan termokopel sistem PV-TE	37
Gambar 3. 25. Rangkaian termoelektrik seri.....	38
Gambar 3. 26. Rangkaian termoelektrik paralel.....	38
Gambar 3. 27 Pengujian PV dan TEG secara Terpisah.....	39
Gambar 4. 1 Grafik data temperatur sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri	40
Gambar 4. 2 Grafik data PV sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri.....	41
Gambar 4. 3 Grafik data TEG sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri	41

Gambar 4. 4 Grafik data temperatur sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel	42
Gambar 4. 5 Grafik data PV sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel....	42
Gambar 4. 6 Grafik data TEG sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel .	43
Gambar 4. 7 Grafik daya yang dihasilkan PV pada sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri.....	45
Gambar 4. 8 Grafik daya yang dihasilkan TEG pada sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri.....	45
Gambar 4. 9 Grafik daya dihasilkan PV pada sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel.....	46
Gambar 4. 10 Grafik daya dihasilkan TEG pada sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel.....	47
Gambar 4. 11 Grafik temperatur PV dengan <i>heatsink</i>	48
Gambar 4. 12 Grafik data energi listrik PV dengan <i>heatsink</i>	48
Gambar 4. 13 Grafik daya PV dengan <i>heatsink</i>	49
Gambar 4. 14 Grafik temperatur TEG dengan <i>heatsink</i>	49
Gambar 4. 15 Grafik data energi listrik TEG dengan <i>heatsink</i>	50



DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Kapasitas Terpasang PLN menurut Jenis Pembangkit listrik	2
Tabel 2. 1 Klasifikasi material termoelektrik berdasarkan <i>range</i> temperatur.	12
Tabel 2. 2 Kinerja dari berbagai penelitian sistem PV-TE terintegrasi.....	15
Tabel 3. 1 Spesifikasi panel surya	20
Tabel 3. 2 Spesifikasi modul termoelektrik.....	21
Tabel 3. 3 Spesifikasi modul MAX6675.....	24
Tabel 3. 4 Spesifikasi modul MAX471	25
Tabel 3. 5 Parameter-parameter yang diukur (suhu)	34
Tabel 3. 6 Parameter-parameter yang diukur (tegangan dan kuat arus).....	34
Tabel 3. 7 <i>Boundary condition</i>	34
Tabel 4. 1 Daya maksimum dari TEG pada sistem PV-TE dengan rangkaian seri.....	46
Tabel 4. 2 Daya maksimum dari TEG pada sistem PV-TE dengan rangkaian paralel...	47

DAFTAR NOTASI

Simbol	Deskripsi	Satuan
S	Koefisien <i>Seebeck</i>	V/K
ΔV	tegangan yang dihasilkan	V
ΔT	perbedaan suhu	K
ZT	<i>Figure of Merit</i>	-
σ	konduktivitas listrik	A/(V.m)
T	suhu rata-rata	K
k	konduktivitas termal	W/(m.K)
P	daya	W
V	tegangan	V
I	kuat arus	A
W	energi	Joule
t	waktu	s

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan kebutuhan penting bagi kehidupan manusia sehari-hari. Saat ini mayoritas energi listrik yang digunakan sehari-hari dibangkitkan dari hasil konversi energi bahan bakar fosil (meliputi minyak, batubara, dan gas alam). Efek samping dari penggunaan bahan bakar fosil secara besar-besaran seperti yang terjadi saat ini adalah proses tersebut menghasilkan emisi gas rumah kaca (CO_2 , CH_4 , NO_x) dan polusi udara. Efek rumah kaca adalah fenomena terperangkapnya panas matahari di atmosfer bumi akibat menumpuknya gas rumah kaca. Gas rumah kaca tersebut mencegah panas matahari untuk keluar dari atmosfer dan memantulkan panas kembali ke permukaan bumi. Ini yang menjadi penyebab pemanasan global, yang dalam jangka panjang akan menyebabkan iklim yang tidak stabil, peningkatan permukaan air laut, suhu global yang meningkat, gangguan ekologis, dan dampak-dampak sosial seperti penyakit, bencana alam, dan gagal panen.

Untuk menghindari kondisi-kondisi yang tidak diinginkan tersebut di masa yang akan datang, manusia perlu mencari alternatif sumber energi terbarukan yang berkelanjutan (*sustainable*). Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber yang tidak akan habis jika digunakan secara terus-menerus (karena itu dinamakan terbarukan/*renewable*). Energi terbarukan ini tidak akan habis karena memiliki siklus daur ulang energi yang relatif cepat atau memang sumbernya yang mengandung jumlah energi yang sangat banyak sehingga tidak akan habis.

Pemerintah menargetkan penggunaan energi baru terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025. Salah satu sumber energi bersih *renewable* yang dapat dimanfaatkan adalah energi matahari. Indonesia sebagai negara tropis yang wilayahnya disinari oleh sinar matahari sepanjang tahun dapat memanfaatkan sumber energi matahari ini untuk membangkitkan energi listrik. Menurut data BPS hingga pada tahun 2019, Indonesia masih sedikit dalam memanfaatkan energi matahari dibandingkan energi lainnya termasuk bahan bakar fosil.

Tabel 1. 1 Kapasitas Terpasang PLN menurut Jenis Pembangkit listrik (sumber: BPS,2019)

Jenis Pembangkit Listrik	Kapasitas Terpasang PLN menurut Jenis Pembangkit listrik (MW)		
	2017	2018	2019
Tenaga Air	4.853	5.436	5.690
Tenaga Uap	29.129	32.226	34.814
Tenaga Gas	3.674	5.467	5.639
Tenaga Gas Uap	11.567	11.249	11.525
Tenaga Panas Bumi	1.503	1.986	1.986
Tenaga Diesel	6.919	6.384	4.878
Tenaga Mesin Gas	299	886	1.745
Tenaga Mikro Hidro	137	152	170
Tenaga Surya	11	14	18
Tenaga Lainnya	265	146	143
Total Kapasitas Terpasang	58.387	63.947	66.608

Rasio elektrifikasi di Indonesia pada tahun 2021 tercatat mencapai 99,30 persen (PLN, 2021). Rasio elektrifikasi adalah perbandingan jumlah rumah tangga yang telah teraliri listrik dengan jumlah total rumah tangga. Kementerian ESDM menargetkan akan menuntaskan rasio elektrifikasi 100% pada tahun 2022 (Kementerian Energi dan Sumber Daya Manusia, 2021). Adapun tiga provinsi yang rasio elektrifikasi cukup rendah yakni Papua 94,55 persen, Maluku 92,03 persen, dan Nusa Tenggara Timur 88,19 persen. Target tersebut dapat dicapai dengan perkembangan pembangkitan listrik di daerah-daerah yang belum terjangkau listrik.

Banyak daerah terpencil Indonesia tidak mendapatkan listrik melalui jaringan PLN karena sedikitnya penduduk di daerah tersebut, lokasi sulit dijangkau dan jauh dari kota, sehingga jika dibuat masuk dalam jaringan akan membuat biaya yang mahal. Terjangkaunya akses energi listrik di Indonesia juga terkait kualitas listrik yang diterima masyarakat. Masyarakat yang sudah memiliki akses listrik belum tentu merasakan listrik dengan kualitas yang mumpuni, seperti listrik yang hanya bisa diakses dalam beberapa jam dalam sehari atau tegangan listrik yang rendah, yang umumnya terjadi pada daerah-daerah terpencil.

Pembangkitan listrik secara mandiri merupakan salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah terpencil yang belum tersuplai listrik. Pembangkit listrik secara mandiri adalah pembangkit yang memaksimalkan

potensi energi-energi terbarukan dengan melakukan suatu rekayasa sehingga energi tersebut dapat menghasilkan energi listrik. Salah satu energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan adalah energi sinar matahari.

Energi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sel surya *photovoltaic* (*solar PV*). Untuk menghasilkan daya listrik dalam jumlah yang semakin besar, dibutuhkan area lahan yang semakin luas untuk penempatan panel-panel surya. Teknologi yang dapat mengatasi masalah ini adalah menggunakan *optical concentrator*/konsentrator optik. Penggunaan konsentrator optik untuk mengkonsentrasikan radiasi matahari dan memfokuskannya ke sel *photovoltaic* dapat memungkinkan lebih banyak iradiasi insiden sehingga membuat lebih banyak daya keluaran per unit area sel PV. Dengan penggunaan konsentrator optik yang ekonomis, area PV yang mahal dapat diminimalkan dan oleh karena itu biaya keseluruhan listrik tenaga surya dapat dikurangi (Sharaf, 2015).

Sistem *concentrating photovoltaic* masih memiliki ruang untuk dilakukan improvisasi. Rentang spektrum matahari dalam jumlah yang signifikan tidak digunakan dalam konversi *photovoltaic* dan terdisipasi sebagai panas selama pengoperasian sel surya. Teknologi inovatif untuk meningkatkan kinerja sistem *photovoltaic* adalah menggabungkan sel PV dengan modul termoelektrik untuk lebih meningkatkan efisiensi konversi daya (Kil, 2017). Modul termoelektrik mampu mengubah energi panas menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Oleh karena itu, modul termoelektrik dapat digunakan sebagai generator termoelektrik (*thermoelectric generator*/TEG) untuk menghasilkan tenaga listrik ketika terjadi perbedaan suhu.

Sel *photovoltaic* dan generator termoelektrik memiliki tujuan yang sama untuk menghasilkan tenaga listrik. Konfigurasi hibrida *photovoltaic-thermoelectric* (PV-TE) gabungan bisa menjadi sistem potensial yang menghasilkan lebih banyak listrik daripada desain PV saja. Teknologi yang menggabungkan sel PV dan *thermoelectric generator*/TEG untuk memperbanyak pembangkitan daya listrik dari radiasi matahari dapat dilakukan dengan menambahkan TEG ke sisi belakang sel surya. Energi panas yang terdisipasi oleh sel PV dapat digunakan oleh TEG untuk pembangkit tenaga listrik tambahan (Shittu, 2019). TEG memanfaatkan energi panas yang terdisipasi oleh sel PV

untuk bagian *hot side*, dan menggunakan *heat exchanger* untuk bagian *cold side*. Terjadinya perbedaan temperatur membuat TEG menghasilkan energi listrik tambahan.

Studi ini akan membandingkan pengaruh penggunaan modul termoelektrik terhadap efisiensi dan unjuk kerja pada sistem *photovoltaic*.

1.2 Perumusan Masalah

1. Apa pengaruh dari penambahan modul termoelektrik pada kinerja sistem *photovoltaic*?
2. Bagaimana unjuk kerja yang dihasilkan sistem *photovoltaic* dengan penambahan modul termoelektrik?
3. Bagaimana pengaruh dari rangkaian termoelektrik secara seri dan paralel pada sistem PV-TE?
4. Apa faktor-faktor yang memengaruhi sistem *photovoltaic-thermoelectric* sehingga memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan sistem *photovoltaic*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditentukan, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Menginvestigasi pengaruh penggunaan modul termoelektrik terhadap kinerja sistem *photovoltaic*.
- b. Menganalisis kinerja sistem *photovoltaic* dengan penambahan modul termoelektrik dibandingkan tanpa menggunakan termoelektrik.
- c. Menganalisis pengaruh dari rangkaian termoelektrik secara seri dan paralel pada sistem PV-TE.
- d. Mengetahui faktor-faktor yang memengaruhi kinerja sistem *photovoltaic* dengan penambahan modul termoelektrik.

1.4 Batasan Masalah

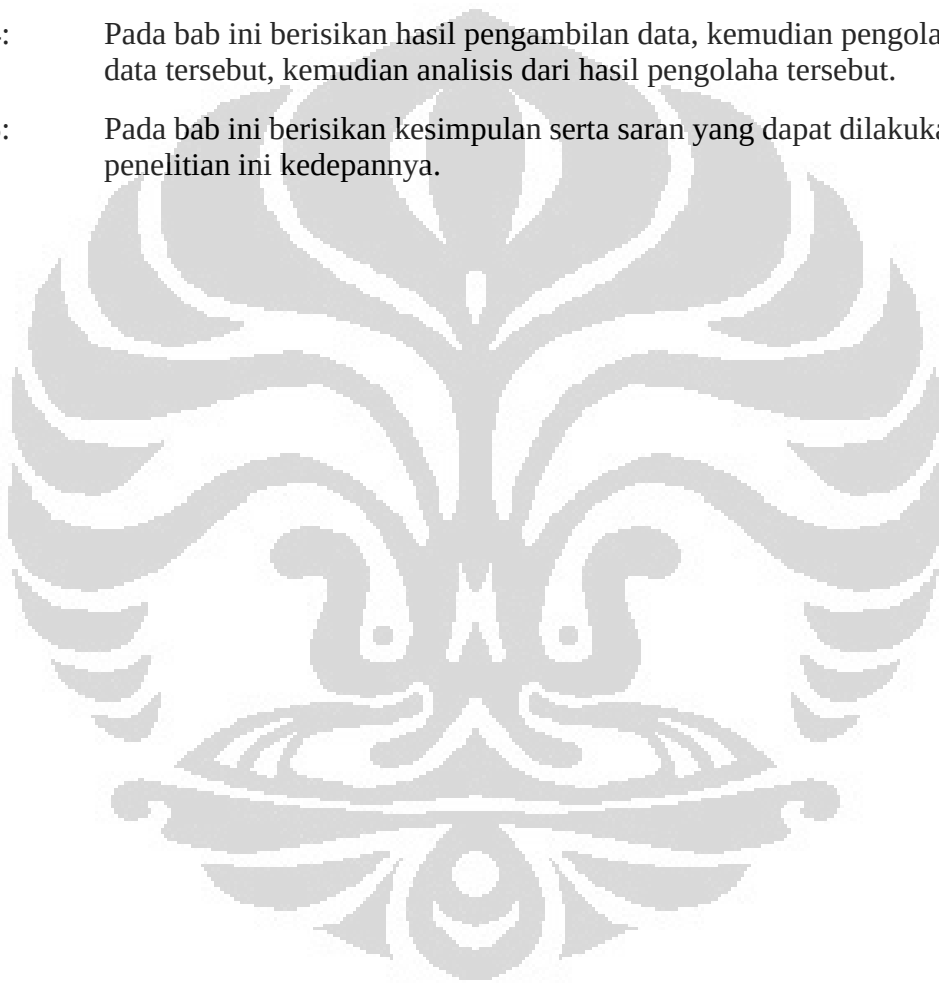
Pada studi ini batasan-batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut

- a. Panel surya yang digunakan adalah tipe *mono crystalline*.
- b. Modul termoelektrik yang digunakan adalah tipe TEG SP1848 27145 SA.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada karya tulis ini terdiri dari beberapa bagian berikut,

- BAB 1: Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan dari penelitian serta batasan-batasan masalah pada penelitian ini.
- BAB 2: Pada bab ini berkaitan dengan dasar-dasar teori yang berkaitan dengan penelitian ini.
- BAB 3: Pada bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan. Bab ini juga menjelaskan alur penelitian yang akan digunakan.
- BAB 4: Pada bab ini berisikan hasil pengambilan data, kemudian pengolahan dari data tersebut, kemudian analisis dari hasil pengolahan tersebut.
- BAB 5: Pada bab ini berisikan kesimpulan serta saran yang dapat dilakukan untuk penelitian ini kedepannya.

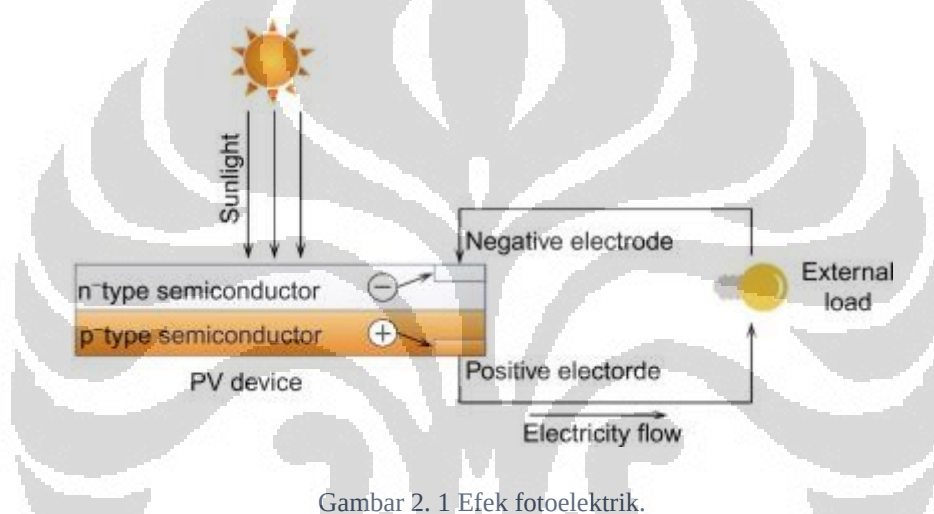


BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit listrik tenaga surya adalah pembangkit listrik yang mengubah energi surya menjadi energi listrik. Pembangkitan listrik dengan energi surya dapat dilakukan secara langsung menggunakan *photovoltaic*, atau secara tidak langsung dengan pemusatan energi surya. *Photovoltaic* mengubah secara langsung energi surya menjadi energi listrik menggunakan efek fotolistrik. Komponen utama di dalam pembangkit listrik tenaga surya meliputi modul panel surya, inverter, dan baterai listrik.



Gambar 2. 1 Efek fotoelektrik.

(sumber: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/photovoltaic-effect>)

Pembangkit listrik tenaga surya tipe *photovoltaic* adalah pembangkit listrik yang menggunakan perbedaan tegangan akibat efek fotoelektrik untuk menghasilkan listrik. Solar panel terdiri dari 3 lapisan, lapisan panel P di bagian atas, lapisan pembatas di tengah, dan lapisan panel N di bagian bawah. Efek fotoelektrik adalah di mana sinar matahari menyebabkan elektron di lapisan panel P terlepas, sehingga hal ini menyebabkan proton mengalir ke lapisan panel N di bagian bawah dan perpindahan arus proton ini adalah arus listrik.

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya Tak Terhubung Jaringan

Pembangkit listrik tenaga surya tak terhubung jaringan disebut juga sebagai pembangkit listrik tenaga surya berdiri sendiri. Pengelolaannya dilakukan secara bersama oleh para pemakai energi listrik hasil transformasi energi dari energi surya. Pembangkit

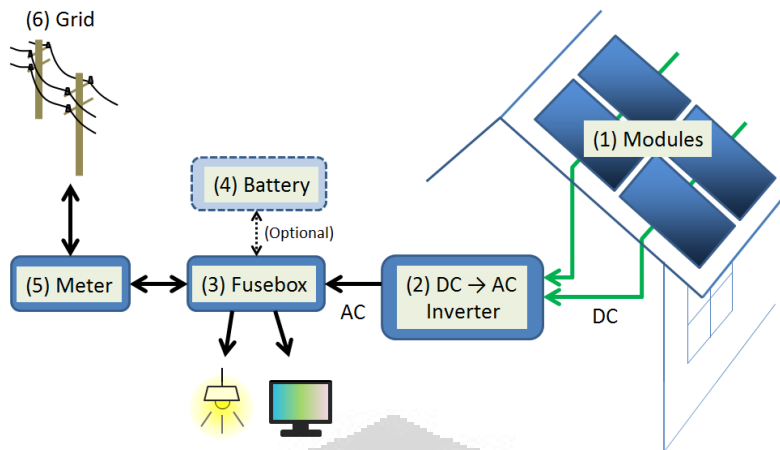
listrik tenaga surya ini beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik. Penyimpanan energi listriknya membutuhkan baterai. Energi listrik yang disimpan dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari. Pengaturan pembangkitan listrik dengan sistem yang tidak terhubung dengan jaringan listrik terbagi menjadi kopel arus searah atau kopel arus bolak-balik. Sistem penyambungan arus searah menggunakan modul surya yang terhubung ke pengatur pengisian energi menuju ke sistem arus searah pada pembangkit listrik tenaga surya. Sementara itu, sistem penyambungan arus bolak-balik menggunakan *inverter* jaringan dan *inverter* baterai untuk menghubungkan rangkaian modul surya dan baterai ke sisi arus bolak-balik dari pembangkit listrik tenaga surya. Kelebihan daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga surya akan disimpan di dalam baterai dengan terlebih dahulu diubah menjadi arus searah oleh *inverter* baterai.

2.1.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya Tersebar

Pembangkit listrik tenaga surya tersebar atau sistem penerangan individu merupakan sistem pencahayaan listrik sederhana yang dibuat menggunakan modul surya. Tegangan kerja yang dibutuhkannya hanya sebesar 12 Volt dengan arus searah. Keseimbangan energi surya menjadi faktor terpenting dalam perhitungan kapasitas sistem pembangkit listrik tenaga surya, meliputi tiga hal yaitu potensi sumber energi surya, kurva beban harian yang menggambarkan keadaan normal dari kebutuhan beban harian serta spesifikasi peralatan pembangkitan energi surya.

2.2 Panel Surya

Panel surya merupakan alat yang digunakan untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik. Dalam pembangkit listrik tenaga surya, panel surya merupakan komponen terpenting untuk transformasi energi. Panel surya menghasilkan arus listrik dengan jenis arus searah (*direct current/DC*). Umumnya, pemakai energi listrik menggunakan arus bolak-balik (*alternating current/AC*). Karenanya, arus searah diubah terlebih dahulu menjadi arus bolak-balik menggunakan *inverter* agar dapat digunakan oleh pemakai energi listrik. Energi listrik dari panel surya dapat disimpan di dalam baterai atau ultrakapasitor. Panel surya tersusun dari sel surya dalam jumlah yang banyak. Spesifikasi panel surya dinyatakan sesuai dengan kemampuannya menghasilkan daya listrik dalam Watt.



Gambar 2. 2. Skema sistem PV pada perumahan. (sumber: Fraas & Partain, 2010)

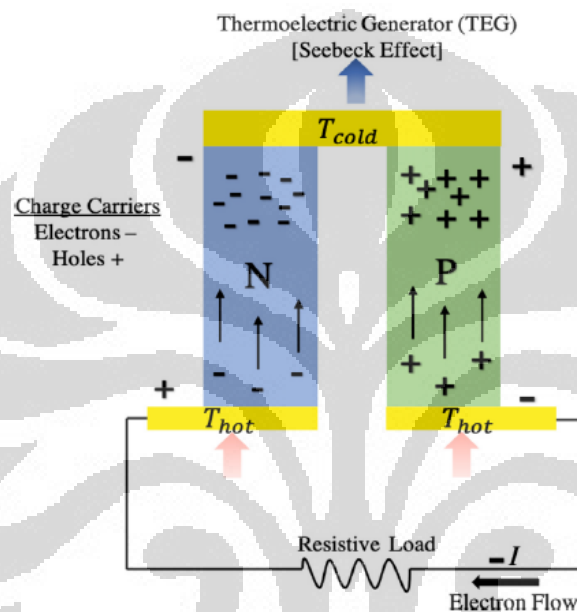
Sel surya atau sel *photovoltaic* adalah alat yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik menggunakan efek fotoelektrik. Dalam photovoltaic, sel surya merupakan unit terkecil. Ukuran sel surya beragam mulai dari 0,5 sampai 4 inci. Sel surya terbuat dari bahan semikonduktor antara lain Silikon monokristalin, Silikon polikristalin, Silikon mikrokristalin, Kadmium telurida, Indium selenida, atau Sulfida. Sel surya tidak menghasilkan gas rumah kaca ketika beroperasi sehingga termasuk ramah lingkungan (Iskandar, 2020).

2.3 Generator Termoelektrik

Efek termoelektrik adalah suatu fenomena fisika dalam bentuk perubahan energi listrik menjadi energi kalor atau sebaliknya. Berdasarkan fenomena yang dihasilkan, kegunaan efek termoelektrik dibagi menjadi generator termoelektrik dan pendingin termoelektrik. Efek termoelektrik mengubah tegangan listrik arus searah untuk menghasilkan perbedaan temperatur (pendingin termoelektrik). Sebaliknya, perbedaan temperatur akibat efek termoelektrik dapat digunakan untuk menghasilkan tegangan listrik arus searah (generator termoelektrik).

Generator termoelektrik adalah perangkat generator listrik yang mengkonversi panas (perbedaan suhu) langsung menjadi energi listrik, menggunakan fenomena yang disebut efek Seebeck (bentuk efek termoelektrik). Efek seebeck merupakan fenomena yang mengubah perbedaan temperatur menjadi energi listrik. Jika ada dua bahan yang berbeda yang kemudian kedua ujungnya disambungkan satu sama lain maka akan terjadi dua sambungan dalam satu *loop*. Jika terjadi perbedaan temperatur di antara kedua

sambungan ini, maka akan menyebabkan aliran elektron sehingga terjadi aliran arus listrik. Prinsip inilah yang digunakan termoelektrik sebagai generator (pembangkit listrik). Setiap bahan memiliki koefisien seebeck yang berbeda-beda. Semakin besar koefisien seebeck ini, maka beda potensial yang dihasilkan juga semakin besar. Untuk menghasilkan listrik, material termoelektrik cukup diletakkan sedemikian rupa dalam rangkaian yang menghubungkan sumber panas dan dingin. Dari adanya perbedaan temperatur akan dihasilkan sejumlah listrik sesuai dengan jenis bahan yang dipakai.



Gambar 2. 3. Prinsip generator termoelektrik (sumber: Alferd, 2020)

Untuk keperluan pembangkitan listrik umumnya bahan yang digunakan adalah bahan semikonduktor. Semikonduktor yang digunakan adalah semikonduktor tipe n dan tipe p. Bahan semikonduktor yang digunakan adalah bahan semikonduktor ekstrinsik. Terdapat tiga sifat bahan termoelektrik yang penting, yaitu: Koefisien Seebeck (S), Konduktifitas panas (K), Resistivitas (ρ).

Efek Seebeck menjelaskan pembentukan beda potensial (ΔV) melalui semikonduktor (atau konduktor) karena terjadinya gradien suhu ($\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$). Hal ini terjadi jika salah satu sisi termoelektrik dipanaskan atau didinginkan. Koefisien Seebeck (S) dinyatakan dengan:

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

dengan ΔV adalah tegangan yang dihasilkan, ΔT adalah perbedaan suhu. Gradien suhu (ΔT) harus dihasilkan antara dua sisi sampel dan tegangan yang dihasilkan (ΔV) harus diukur dengan mengambil sambungan listrik dari dua titik.

Sistem *thermoelectric generator* (TEG) telah menarik pertimbangan besar dalam pemulihan limbah panas karena kelebihanannya, yaitu mampu untuk menghasilkan energi listrik dari energi panas tanpa perlu bagian yang bergerak seperti turbin, yang menghilangkan biaya tambahan yang dihasilkan dari pemeliharaan dan penggantian (Sugiarta, 2017). TEG juga ramah lingkungan karena beroperasi tanpa polusi suara (Enescu, 2019). Sebaliknya, TEG memiliki efisiensi konversi energi yang rendah dan membutuhkan sumber panas yang relatif konstan, yang merupakan kelemahan (Chen et al., 2017).

Pada umumnya, sistem TEG terdiri dari tiga elemen utama:

1. *Heat exchanger* (HEX); untuk menyerap panas dan mentransfernya ke modul termoelektrik.
2. Modul termoelektrik (TEM); TEM menghasilkan listrik ketika ada perbedaan suhu di antara ujungnya. Sebuah TEM berisi banyak pasangan *thermoelectric couples*, dan setiap pasangan umumnya menggabungkan sepasang semikonduktor tipe-p dan n.
3. *Heat sink*; untuk menghilangkan panas tambahan dari modul termoelektrik.

Perbedaan suhu antara dua sisi generator adalah yang menentukan operasi TEG. Jika satu sisi sepotong logam dapat dipanaskan sekaligus mendinginkan sisi lainnya, elektron yang mengelilingi atom logam di sisi panas akan memiliki energi lebih besar daripada elektron ekuivalen di sisi yang lebih dingin, ini berarti elektron panas akan memiliki energi kinetik lebih banyak. daripada di sisi yang lebih dingin. Oleh karena itu, elektron panas bergerak lebih cepat menuju sisi dingin daripada elektron dingin bergerak menuju sisi panas, dan akhirnya ujung dingin generator termoelektrik menjadi bermuatan negatif, dan ujung panas bermuatan positif (Jouhara et al., 2018).

Produk termoelektrik yang efektif harus memiliki sifat-sifat berikut:

- Konduktivitas listrik yang tinggi untuk meminimalkan pemanasan Joule (kenaikan suhu dari hambatan arus listrik yang mengalir).
- Koefisien Seebeck yang baik untuk konversi panas maksimum ke daya listrik atau daya listrik untuk kinerja pendinginan.
- Konduktivitas termal rendah untuk menghindari konduksi termal melalui material.

Dan tiga properti tersebut digabungkan menjadi satu metrik yang mengkuantifikasi output keseluruhan perangkat termoelektrik, yang disebut "*Figure-of-Merit*" atau z . Karena z memiliki satuan per derajat suhu, dapat digunakan *Figure-of-Merit* tak berdimensi zT , di mana T (K) adalah suhu rata-rata. Ini adalah parameter penting yang mengatur besarnya efisiensi konversi daya maksimum untuk perangkat termoelektrik (Terry & Choate, 2006). *Figure of Merit* tidak berdimensi dan agar generator termoelektrik memiliki efisiensi tinggi, nilai zT harus setinggi mungkin.

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{k} \quad (2.2)$$

di mana S adalah koefisien Seebeck, σ adalah konduktivitas listrik, dan T adalah suhu rata-rata, dan k adalah konduktivitas termal. Pada pembilang, besaran $S^2 \sigma$ juga disebut sebagai faktor daya/*power factor* (PF), merupakan elemen vital untuk memaksimalkan *Figure of Merit*. Nilai ZT yang tinggi menunjukkan efisiensi konversi yang tinggi, yang membutuhkan $S^2 \sigma$ yang tinggi dan k yang rendah.

Di masa lalu, satu-satunya bahan yang digunakan secara komersial untuk modul termoelektrik adalah Bismuth Telluride (Bi_2Te_3), dimana nilai Fig. of Merit untuk bahan tipe-p dan tipe-n masing-masing adalah 1,35 dan 0,9 (Lan et al., 2010). Produktivitas yang buruk dari bahan berbasis Bismuth Telluride tipe-n dibandingkan dengan bahan tipe-p sangat membatasi efektivitasnya sebagai unit termoelektrik (Han et al., 2017). Kecuali untuk industri luar angkasa, modul Bismuth Telluride (Bi_2Te_3) adalah satu-satunya bahan yang tersedia untuk industri dengan harga yang wajar.

Tabel 2. 1 Klasifikasi material termoelektrik berdasarkan *range* temperatur.

(sumber: S. Sripadmanabhan Indira, et al., 2020)

Thermoelectric Materials	Temperature Range
Bismuth Telluride (Bi_2Te_3)	< 500 K
Lead Telluride (PbTe), Germanium Telluride (GeTe), Tin Telluride (SnTe)	500–900 K
Silicon-Germanium alloys	> 900 K

Material PbTe dan SiGe telah digunakan secara luas dalam aplikasi pembangkit listrik suhu tinggi, sebagian besar dalam produksi daya pesawat ruang angkasa, dengan kisaran suhu yang wajar masing-masing 500 hingga 900 K dan 800 hingga 1300 K (Terry & Choate, 2006). Penelitian telah menunjukkan bahwa material tersebut umumnya memiliki *Figure of Merit* sekitar 1.

2.4 Heat Exchanger

Hal penting dalam generator termoelektrik adalah desain termal *heat exchanger* karena dapat meningkatkan kinerjanya dengan meningkatkan panas yang diserap atau yang terdisipasi oleh modul termoelektrik. Heat exchanger bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pada termoelektrik generator, dengan mereduksi hambatan termal antara sumber panas dan sisi panas modul termoelektrik serta antara sisi dingin modul dan lingkungan. Dengan cara ini, perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik mendekati gradien suhu maksimum yang mungkin, yaitu perbedaan suhu antara sumber panas dan lingkungan, meningkatkan efisiensi generator. Kebutuhan untuk mengurangi hambatan termal ini dan untuk mengoptimalkan desain *heat exchanger* telah terbukti oleh penelitian He et al. (2016).

Berbagai macam jenis *heat exchanger* dapat ditempatkan di sisi dingin modul untuk mengurangi hambatan termal antara sisi dingin dan lingkungan. *Heat sink* bersirip banyak digunakan karena kesederhanaannya serta biayanya yang relatif rendah dibandingkan dengan jenis *heat exchanger* lainnya. Jenis *heat exchanger* lainnya adalah yang berbasis cairan, seperti air, yang meningkatkan kinerja sistem karena memiliki koefisien konveksi yang lebih tinggi. Dalam hal ini, ada konsumsi tambahan karena daya listrik yang dibutuhkan untuk memberi daya kepada kipas yang membuat udara melewati sirip atau pompa yang memindahkan cairan di dalam sistem (Elghool et al., 2017).

Ada penelitian pada *heat exchanger* dengan perubahan fasa yang dapat lebih meningkatkan perpindahan panas, dengan penurunan suhu yang kecil, karena penggunaan panas laten dari fluida internal (Shabgard et al., 2015). Pipa panas (*heat pipe*) adalah disipator yang paling umum digunakan. *Heat pipe* memiliki evaporator yang bersentuhan dengan sisi dingin modul termoelektrik untuk menyerap panas yang perlu dibuang. Panas yang diserap ini menguapkan cairan di dalamnya, yang mengalir ke kondensor. Begitu sampai di kondensor, cairan mengembun, karena melepaskan panas ke lingkungan, dan kembali ke evaporator. Beberapa aplikasi generator termoelektrik menggunakan *heat pipes* dengan kipas untuk membantu panas dipindahkan dari kondensor ke lingkungan (Remeli et al., 2015) sedangkan yang lainnya memanfaatkan konveksi bebas untuk menghilangkan konsumsi tambahan kipas (Huang et al., 2015). Dalam kedua kasus, aliran fluida dicapai tanpa pompa hanya dengan efek kapiler dari sumbu yang ada di dalam evaporator. Hal ini memungkinkan *heat pipes* untuk bekerja dalam orientasi apapun tetapi menimbulkan dua kelemahan: tekanan kapiler yang disebabkan oleh sumbu mungkin tidak cukup untuk memompa cairan kembali ke evaporator dan resistensi termal ekstra harus diperhitungkan karena konduksi melalui sumbu (Shabgard et al., 2015).

2.5 Sistem Hibrida Solar Photovoltaic-Thermoelectric

Rentang spektrum matahari dalam jumlah yang signifikan tidak digunakan dalam konversi *photovoltaic* dan terdisipasi sebagai panas selama pengoperasian sel surya. Berbagai cara dapat diterapkan untuk meningkatkan kinerja sistem *photovoltaic*. Teknologi inovatif untuk meningkatkan kinerja sistem *photovoltaic* adalah menggabungkan sel PV dengan modul termoelektrik untuk lebih meningkatkan efisiensi konversi daya (Kil et al., 2017). Modul termoelektrik mampu mengubah energi panas menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Oleh karena itu, modul termoelektrik dapat digunakan sebagai generator termoelektrik untuk menghasilkan tenaga listrik ketika terdapat perbedaan suhu. Sel *photovoltaic* dan generator termoelektrik memiliki tujuan yang sama untuk menghasilkan tenaga listrik. Konfigurasi hibrida *photovoltaic-thermoelectric* (PV-TE) gabungan bisa menjadi sistem potensial yang menghasilkan lebih banyak listrik daripada desain PV saja. Teknologi yang menggabungkan sel PV dan *thermoelectric generator*/TEG untuk memperbanyak pembangkitan daya listrik dari radiasi matahari dapat dilakukan dengan menambahkan TEG ke sisi belakang sel surya.

Energi panas yang terdisipasi oleh sel PV dapat digunakan oleh TEG untuk pembangkit tenaga listrik tambahan (Shittu, 2019). Secara umum, penerapan TEG, bersama dengan sistem PV (*photovoltaic*) dan PV/T (*photovoltaic thermal*) meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan dengan mengubah kelebihan panas sel PV menjadi listrik. Dalam kasus sistem PV/T-TEG, *thermal recovery* dilakukan melalui fluida perpindahan panas. Untuk beberapa sistem, *concentrator* biasanya digunakan untuk meningkatkan fluks panas dari penyinaran matahari. TEG memanfaatkan energi panas yang terdisipasi oleh sel PV untuk bagian *hot side*, dan menggunakan *heat exchanger* untuk bagian *cold side*. Terjadinya perbedaan temperatur membuat TEG menghasilkan energi listrik tambahan.

Liao et al. (2014) meneliti model teoritis perangkat pembangkit listrik hibrida yang terdiri dari modul *low concentrated photovoltaic* (CPV) dan *thermoelectric generator* (TEG), dengan kesimpulan terdapat kondisi operasi optimum untuk beberapa parameter kunci, seperti konduktansi termal antara CPV dan TEG, arus CPV, penyinaran matahari, rasio konsentrasi, dan *figure of merit* dari TEG.

Xu et al. (2014) menganalisis sistem gabungan yang terdiri dari *concentrating photovoltaic/thermal collector* dan generator termoelektrik. Sistem memiliki pendingin untuk mendinginkan sisi dingin TEG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dibandingkan dengan sistem PV/T, sistem dengan termoelektrik PV-TE/T menghasilkan peningkatan efisiensi sekitar 8%. Ditemukan bahwa untuk mencapai keluaran listrik yang lebih baik, pendinginan sisi dingin termoelektrik harus dilakukan. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa *figure of merit* dari modul termoelektrik yang digunakan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi sistem secara keseluruhan.

Berdasarkan studi Lamba dan Kaushik (2016), kontribusi TEG terhadap output daya total sistem *concentrated photovoltaic-thermoelectric* (CPV-TE) lebih berpengaruh pada rasio konsentrasi yang lebih tinggi. Kelayakan integrasi modul *concentrated* PV dengan TEG diteliti oleh Rezanian dan Rosendahl (2017), disimpulkan bahwa sistem PV-TEG memiliki peningkatan efisiensi daripada sel PV murni hanya terutama pada konsentrasi matahari yang tinggi. Kesimpulan serupa pada penelitian Li et al. (2017), sistem hibrida CPV-TE dapat menunjukkan daya listrik keluaran yang lebih tinggi daripada sistem sel PV dan peningkatannya menjadi lebih besar seiring dengan meningkatnya rasio konsentrasi. Yin et al. (2018) melaporkan bahwa kinerja satu hari dari sistem PV-TE

gabungan lebih tinggi daripada sistem PV murni ketika mengoptimalkan rasio konsentrasi dan memperbesar nilai *figure of merit* termoelektrik. Yin et al. (2019) menemukan bahwa daya keluaran modul termoelektrik memungkinkan daya keluaran total sistem hibrida CPV-TE menjadi lebih tinggi daripada sistem CPV, dan keunggulan sistem CPV-TE lebih signifikan dengan meningkatnya rasio konsentrasi.

Tabel 2. 2 Kinerja dari berbagai penelitian sistem PV-TE terintegrasi

(sumber: Guiqiang et al., 2018)

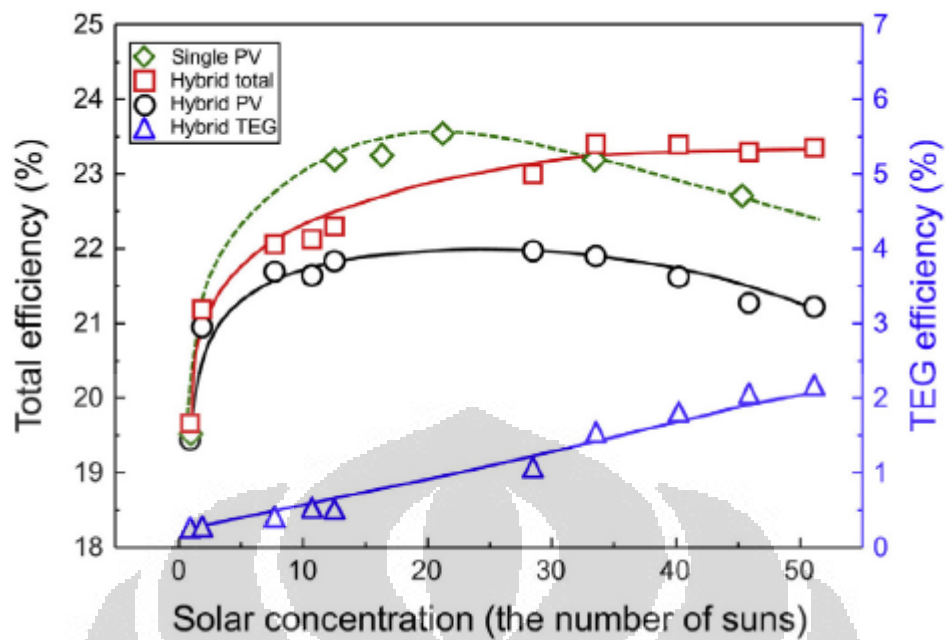
Publication year	Affiliation Country	PV type	TE type	PV-TE Efficiency
2018	Iran	c-Si	TEC1-12706	~8.25%
2018	Denmark	c-Si, a-Si, CIGS and CdTe	N/A	~34.2%
2018	China	N/A	N/A	16.70%
2018	China/UK	c-Si	N/A	11.04%
2018	China/UK	GaAs	N/A	22.94%
2017	China	CIGS	N/A	21.60%
2017	China	Thin film silicon	N/A	13.10%
2017	China	a-Si (Amorphous silicon)	N/A	9.10%
2017	China	Polymer	N/A	8.80%
2017	Iran/China/UK	c-Si	TEC-1206	~15.5
2017	China	GaN/P2/GaAs/Ge	Bi2Te3	N/A
2017	Italy	a-Si	N/A	~11%
2017	Italy	Cu ₂ ZnSnS ₄ (CZTS)	N/A	~12.25%
2017	China	GaAs	Bi2Te3 (TEC1-03103)	19.10%
2016	India	Siemens SP75	N/A	5.80%
2016	China	GaAs	N/A	18.51%
2016	Denmark	Silicon (Si) solar cell	Bi2Te3	~16.6%
2016	India	MAX60 solar cell	Be2Te3	N/A

Untuk penelitian lainnya, efisiensi total sistem hibrida *photovoltaic-thermoelectric* tidak meningkat karena efisiensi konversi modul termoelektrik yang rendah. Beberapa bahkan menunjukkan penurunan output listrik dari seluruh sistem jika kondisi pertukaran panas dari modul generator termoelektrik buruk. Oleh karena itu, sangat penting untuk mendinginkan sisi dingin termoelektrik karena hal ini dapat sangat mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan.

2.5.1 Optimisasi Sistem Hibrida Solar Photovoltaic-Thermoelectric

2.5.1.1 Concentration Ratio

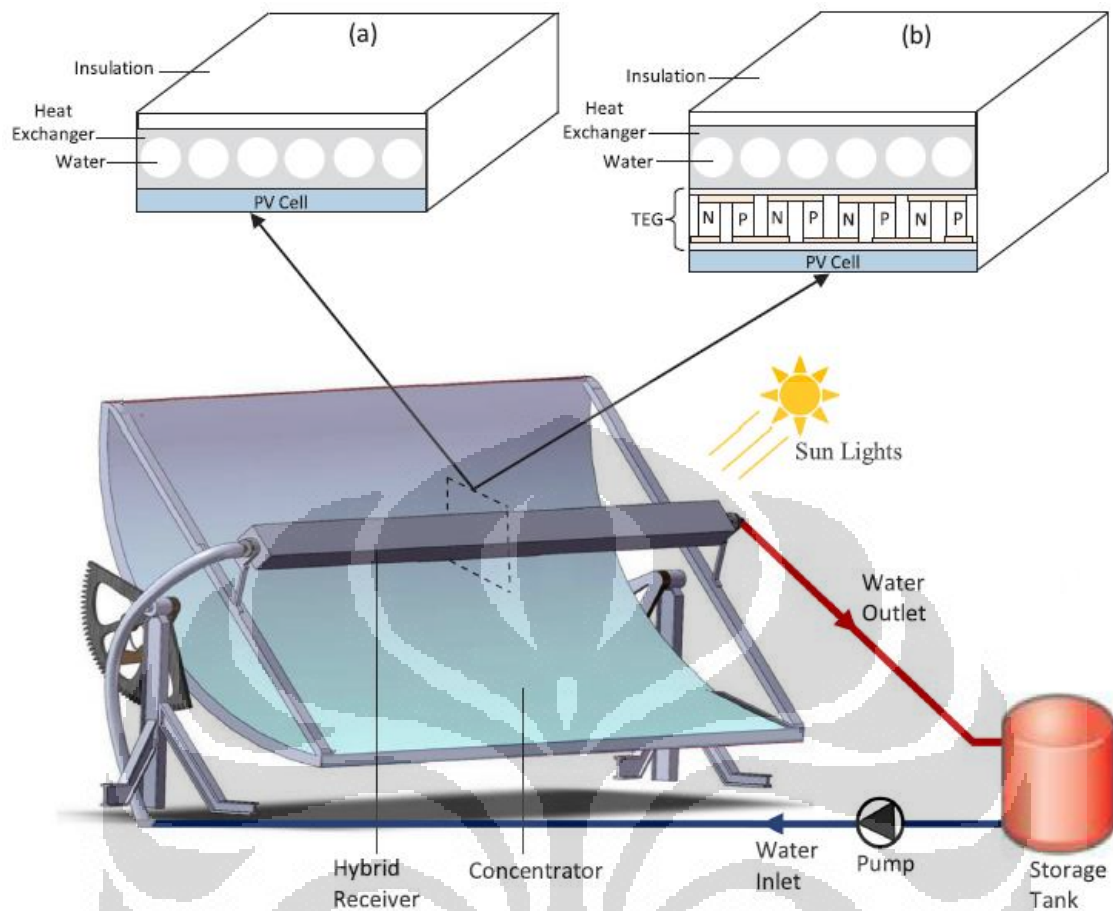
Ju et al. (2012) menemukan bahwa sistem PV-TE lebih cocok untuk bekerja di bawah konsentrasi tinggi dibandingkan dengan sistem PV saja. Temuan ini sesuai dengan penelitian Kil et al. (2018), diketahui bahwa sistem PV-TE berkinerja lebih baik daripada sistem PV tunggal di kondisi konsentrasi tinggi. Peningkatan rasio konsentrasi optik dapat menyebabkan peningkatan kinerja sistem. Hal ini karena peningkatan rasio konsentrasi optik menyebabkan peningkatan output daya maksimum dari sistem PV-TE hybrid (Liao et al., 2014).



Gambar 2. 4. Perbandingan efisiensi total dengan konsentrasi matahari dalam suns.
(sumber: Kil et al., 2017)

2.5.1.2 Sistem Pendingin

Pendinginan sel PV adalah hal yang diutamakan karena sel dapat mengalami degradasi jangka pendek (kehilangan efisiensi) dan jangka panjang (kerusakan ireversibel) karena suhu tinggi (Royne et al., 2005). Media pendingin yang paling umum adalah pendingin air dan pendingin udara. Kil et al. (2017) menemukan bahwa pendinginan aktif di suhu lingkungan tidak disarankan karena mengkonsumsi energi ekstra. Biasanya, media pendingin (air, udara) dan perangkat pendingin (*heat sink*) diimplementasikan di bagian bawah modul termoelektrik. Yin et al. (2017) melakukan penelitian sistem CPV-TE dengan tiga metode pendinginan, termasuk pendinginan alami, pendinginan udara paksa, dan pendinginan air, hasilnya menunjukkan keunggulan yang signifikan dari pendinginan air.



Gambar 2. 5. Representasi skema contoh sistem PV-TE dengan pendingin air tersikulasi dan skema penampang receiver (a) *concentrated photovoltaic* dan (b) *concentrated photovoltaic-thermoelectric*.

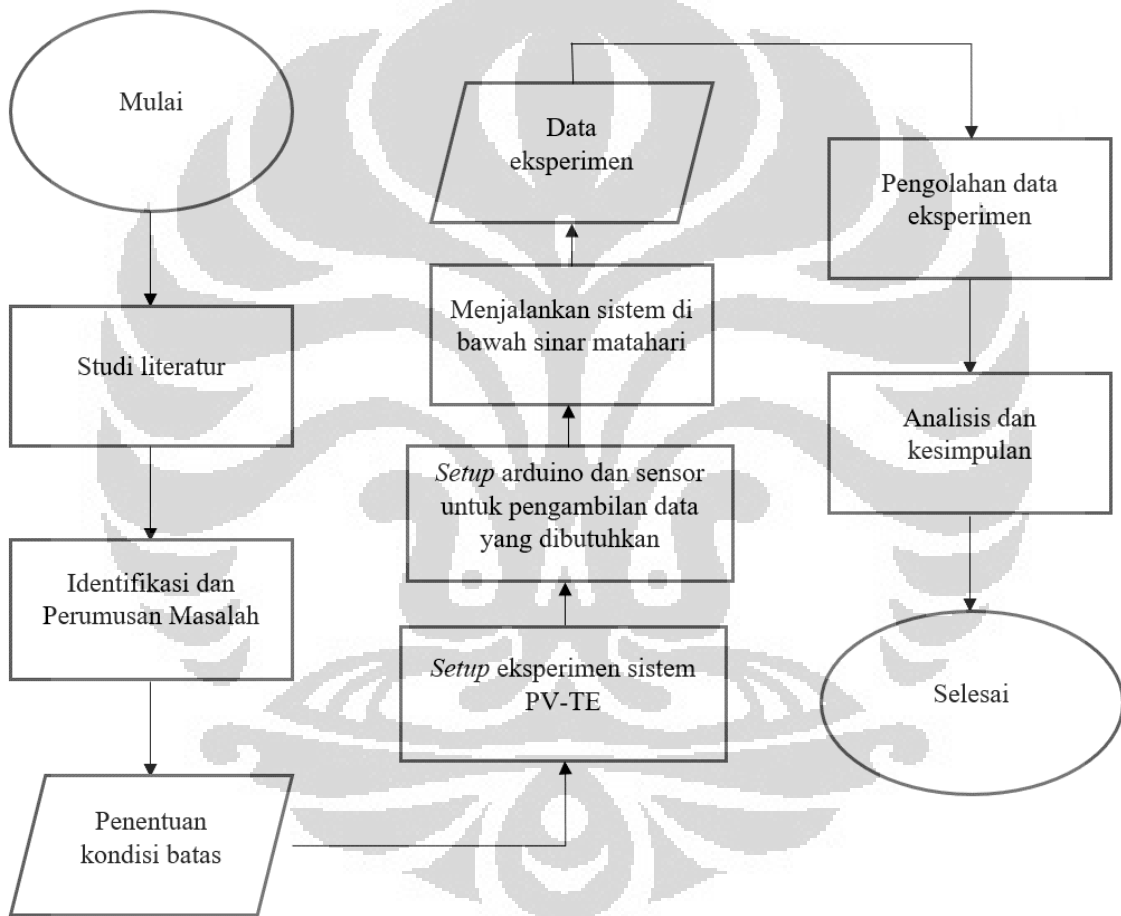
(sumber: Afifa et al., 2020)

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Berikut merupakan diagram alur penelitian yang akan dilakukan untuk melakukan analisis terhadap pengaruh penggunaan modul termoelektrik terhadap unjuk kerja pada sistem *photovoltaic*.



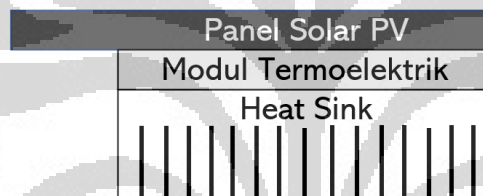
Gambar 3. 1. Diagram alur penelitian

Penelitian dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan dan metode yang akan digunakan, kemudian dilanjutkan dengan mencari studi literatur yang berkaitan dan dapat membantu dalam penelitian ini. Setelah studi literatur, ditentukan kondisi batas kemudian desain yang selanjutnya dilakukan eksperimen dan pengambilan data. Data kemudian

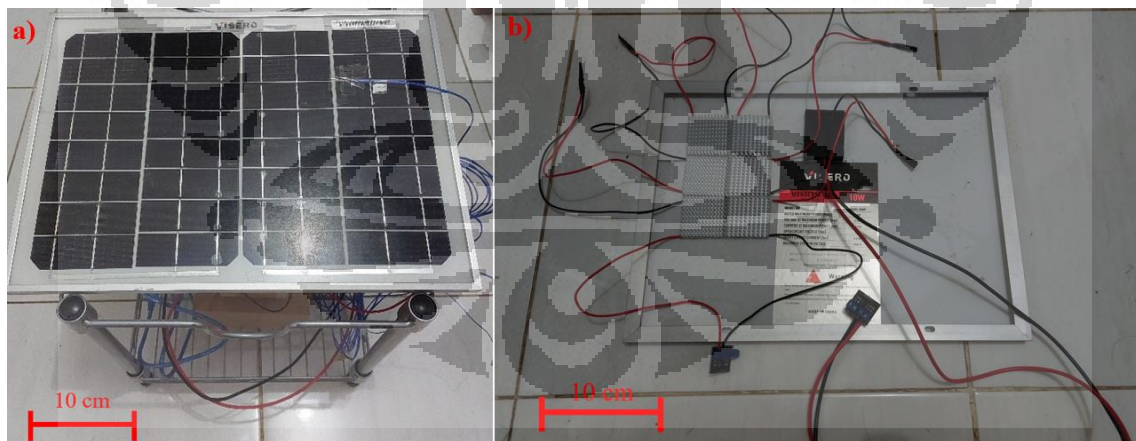
diolah dan dianalisis hingga dapat ditarik kesimpulan dari eksperimen yang telah dilakukan.

3.2 Eksperimen Penelitian

Eksperimen dilakukan pada sistem *photovoltaic-thermoelectric* (PV-TE) yang merupakan integrasi dari panel PV monokristalin, generator termoelektrik, dan *heat sink*. Terdapat pasta konduktif termal (*thermal paste*) di sisi belakang panel PV yang digunakan untuk memastikan perpindahan panas yang baik antara panel PV dengan modul termoelektrik, mengekstrak panas yang terdisipasi panel dan mentransfernya ke sisi panas termoelektrik. Modul termoelektrik terletak di antara sisi belakang panel PV dan *heat sink* bersirip. Digunakan 6 buah modul termoelektrik yang terhubung seri atau paralel secara elektrik. Sisi panas modul termoelektrik menerima panas yang terdisipasi panel PV, dan sisi dingin terhubung pada *heat sink* berpendingin udara.



Gambar 3. 2. Ilustrasi sistem PV-TE



Gambar 3. 3. Sistem PV-TE yang digunakan: (a) tampak atas, (b) tampak bawah

Pada pengoperasian sistem PV-TE, tenaga listrik dihasilkan oleh sel surya dan panas yang dikeluarkan oleh sel surya digunakan oleh generator termoelektrik yang terpasang untuk menghasilkan tenaga listrik tambahan. Sel PV yang digunakan adalah jenis silikon mono-kristal (*monocrystalline*). Selain biayanya yang lebih rendah, jenis *monocrystalline*

dapat mencapai efisiensi tertinggi dibandingkan dengan silikon *polycrystalline* dan silikon amorf (Karathanassis, 2019). Generator termoelektrik (TEG) yang dipilih adalah modul TEG SP1848 27145 SA yang ketersediaannya di pasar cukup mudah.

Dari sistem PV-TE kemudian diukur temperatur, tegangan, dan kuat arus yang dihasilkan. Untuk pengukuran temperatur digunakan termokopel tipe K di 5 titik, yaitu sisi permukaan atas PV, sisi permukaan bawah PV, sisi dingin termoelektrik pada *heatsink*, suhu di bawah PV, dan suhu udara ambien. Untuk pengukuran tegangan dan kuat arus digunakan multimeter dan modul MAX471 Arduino untuk mengukur volt PV, ampere PV, volt TEG, dan ampere TEG. Beban yang digunakan adalah resistor dengan ukuran 1Ω sebagai *load*. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan rangkaian Arduino untuk melakukan *data logging* selama waktu siang hari.

3.3 Setup Komponen Eksperimen

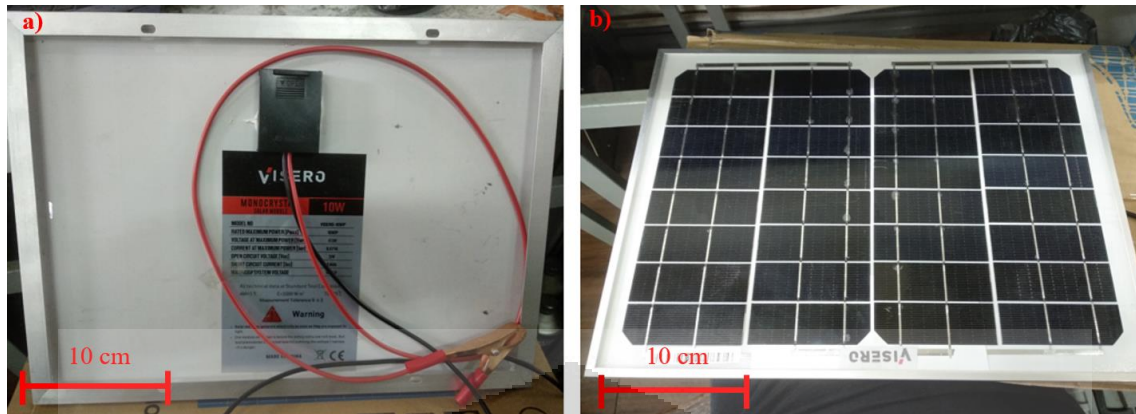
3.3.1 Sistem PV-TE

3.3.1.1 Solar panel

Spesifikasi panel surya *monocrystalline* yang digunakan:

Tabel 3. 1 Spesifikasi panel surya

<i>Brand</i>	Visero
<i>Type</i>	Monocrystalline Solar Module
<i>Model</i>	Visero-10w
<i>Rated Maximum Power</i>	10wp
<i>Voltage At Maximum Power</i>	17.5V
<i>Current At Maximum Power</i>	0.571A
<i>Open Circuit Current</i>	21V
<i>Short Circuit Voltage</i>	0.64A
<i>Maximum system voltage</i>	1000V
<i>Dimension</i>	26cm x 36cm x 1.5cm



Gambar 3. 4. VISERO Monocrystal Solar Module 10W: (a) tampak bawah, (b) tampak atas

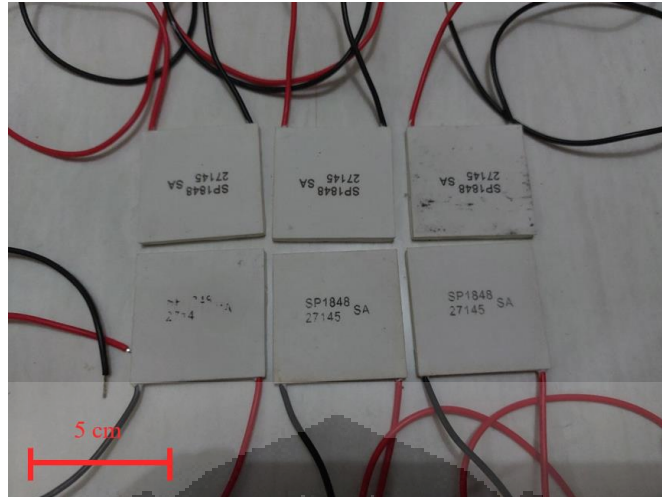
3.3.1.2 Termoelektrik

Modul termoelektrik generator (TEG) yang digunakan adalah SP1848 27145 SA. Pada penelitian ini digunakan 6 buah modul termoelektrik, dengan dua jenis rangkaian yaitu seri dan paralel secara elektrik.

Spesifikasi dari modul termoelektrik yang digunakan:

Tabel 3. 2 Spesifikasi modul termoelektrik

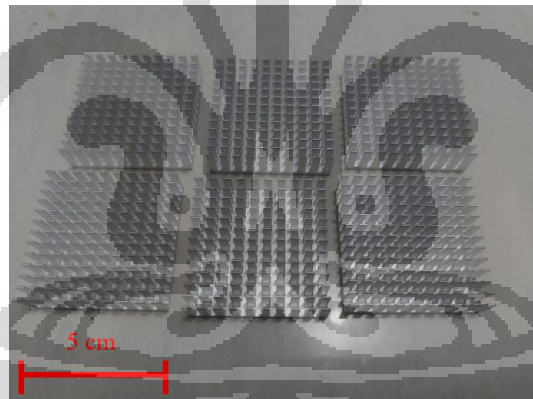
<i>Optimum value (Z)</i>	(2.5~3)x10 ⁻³ W/K	
<i>Thermal conductivity (K)</i>	1.5~1.6 W/m K	
<i>Working Environment</i>	up to 125°C	
<i>Cable Length</i>	about 30CM	
<i>Color</i>	White	
<i>Material</i>	Ceramic / Bismuth Telluride	
<i>Weight</i>	25g	
<i>Dimension</i>	4 x 4 x 0.34 cm (LxWxH)	
<i>Thermoelectric Parameter</i>		
<i>Temperature difference</i>	<i>Open circuit voltage (V)</i>	<i>Generated Current (mA)</i>
20°C	0.97	225
40°C	1.8	368
60°C	2.4	469
80°C	3.6	558
100°C	4.8	669



Gambar 3. 5. Modul termoelektrik SP1848 27145 SA

3.3.1.3 Heatsink

Heatsink berbahan aluminium berukuran (40 x 40 x 11)mm (panjang x lebar x tinggi) ditempatkan di sisi dingin tiap-tiap modul termoelektrik untuk mengurangi hambatan termal antara sisi dingin dan lingkungan.



Gambar 3. 6. *Heatsink* aluminium

3.3.1.4 Thermal paste

Pasta konduktif termal digunakan di bagian belakang panel PV untuk menjaga perpindahan panas yang baik antara panas yang terdisipasi panel PV dengan sisi panas modul termoelektrik, dan juga digunakan di antara sisi dingin termoelektrik dengan *heatsink* aluminium. *Thermal paste* yang digunakan diproduksi HALNZIYE Shenzhen dengan spesifikasi *thermal conductivity*: 1,93 W/m K; *thermal impedance*: 0,225°C-in²/W.

3.3.1.5 Thermal adhesive

Thermal adhesive adalah lem konduktif berupa pasta perekat yang digunakan untuk melekatkan sisi panas modul termoelektrik dengan bagian belakang panel PV dan juga sisi dingin dengan *heatsink*. *Thermal adhesive* yang digunakan adalah model STARS-922 dengan *thermal conductivity* 0,671 W/m K; *thermal impedance*: 0,246°C-in²/W.

3.3.2 Komponen Sistem Data Logging

3.3.2.1 Arduino Uno

Arduino sebagai mikrokontroler digunakan untuk memproses data-data yang diperoleh dari sensor-sensor yang digunakan. Data yang diperoleh dari sensor kemudian tercatat setiap detik dan tersimpan ke dalam sebuah SD card pada Arduino untuk dapat dibaca di komputer.

Pada penelitian ini digunakan 2 buah Arduino Uno. Arduino 1 digunakan untuk menerima 4 buah data yaitu 4 titik pengukuran temperatur oleh 4 termokopel. Arduino 2 digunakan untuk menerima 5 buah data yaitu 1 titik pengukuran temperatur oleh 1 termokopel, volt dan ampere PV, dan volt dan ampere TEG.

3.3.2.2 Modul MAX6675

Modul MAX6675 digunakan untuk melakukan *cold junction compensation* dan mendigitalkan sinyal dari termokopel tipe K ke Arduino, dengan *output* data dalam resolusi 12-bit, 0,25°C, dan mampu melakukan pembacaan hingga 1024°C.



Gambar 3. 7 Modul MAX6675

Spesifikasi dari modul MAX6675:

Tabel 3. 3 Spesifikasi modul MAX6675

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Error		$T_{\text{THERMOCOUPLE}} = +700^{\circ}\text{C}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ (Note 2)	$V_{\text{CC}} = +3.3\text{V}$	-5	+5	LSB
			$V_{\text{CC}} = +5\text{V}$	-6	+6	
		$T_{\text{THERMOCOUPLE}} = 0^{\circ}\text{C}$ to $+700^{\circ}\text{C}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ (Note 2)	$V_{\text{CC}} = +3.3\text{V}$	-8	+8	
			$V_{\text{CC}} = +5\text{V}$	-9	+9	
		$T_{\text{THERMOCOUPLE}} = +700^{\circ}\text{C}$ to $+1000^{\circ}\text{C}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ (Note 2)	$V_{\text{CC}} = +3.3\text{V}$	-17	+17	
			$V_{\text{CC}} = +5\text{V}$	-19	+19	
Thermocouple Conversion Constant				10.25		$\mu\text{V}/\text{LSB}$
Cold-Junction Compensation Error		$T_A = -20^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$ (Note 2)	$V_{\text{CC}} = +3.3\text{V}$	-3.0	+3.0	$^{\circ}\text{C}$
			$V_{\text{CC}} = +5\text{V}$	-3.0	+3.0	
Resolution				0.25		$^{\circ}\text{C}$
Thermocouple Input Impedance				60		$\text{k}\Omega$
Supply Voltage	V_{CC}		3.0		5.5	V
Supply Current	I_{CC}			0.7	1.5	mA
Power-On Reset Threshold		V_{CC} rising	1	2	2.5	V
Power-On Reset Hysteresis				50		mV
Conversion Time		(Note 2)		0.17	0.22	s
SERIAL INTERFACE						
Input Low Voltage	V_{IL}				$0.3 \times V_{\text{CC}}$	V
Input High Voltage	V_{IH}		$0.7 \times V_{\text{CC}}$			V
Input Leakage Current	I_{LEAK}	$V_{\text{IN}} = \text{GND or } V_{\text{CC}}$			± 5	μA
Input Capacitance	C_{IN}			5		pF

3.3.2.3 Modul MAX471

Modul MAX471 digunakan untuk mengukur besaran tegangan dalam volt dan kuat arus dalam ampere dari sumber listrik DC ke Arduino. MAX471 memiliki resistor sensor arus internal $35\text{m}\Omega$ dan dapat mengukur arus hingga 3A. Perangkat ini memiliki *output* arus yang dapat diubah menjadi tegangan yang dirujuk ke ground dengan resistor tunggal, yang memungkinkan pengukuran tegangan dan arus sumber DC.



Gambar 3. 8. Modul MAX471

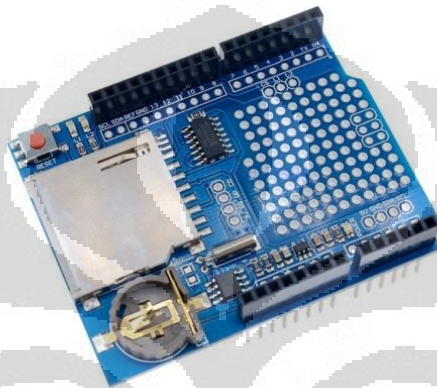
Spesifikasi dari modul MAX471:

Tabel 3. 4 Spesifikasi modul MAX471

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{RS+}		3		36	V
Supply Current	I_{RS+}	$I_{LOAD} = 0A$, excludes I_{SIGN}		50	113	μA
Sense Current	I_{LOAD}				± 3	ARMS
Sense Resistor	R_{SENSE}			35	70	$m\Omega$
Current-Sense Ratio	I_{OUT}/I_{LOAD}	$I_{LOAD} = 1A$, $R_{S+} = 10V$	MAX471C 0.490	0.500	0.510	mA/A
			MAX471E 0.4875	0.500	0.5125	
No-Load OUT Error		$I_{LOAD} = 0A$, $R_{S+} = 10V$			2.5 3.0	μA
			MAX471C		± 2.5	μA
			MAX471E		± 3.0	
Low-Level OUT Error		$I_{LOAD} = 30mA$, $R_{S+} = 10V$			± 2.5 ± 3.0	μA
			MAX471C		± 2.5	μA
			MAX471E		± 3.0	
Power-Supply Rejection Ratio	PSRR	$3V \leq R_{S+} \leq 36V$, $I_{LOAD} = 1A$			0.1	%/V
SIGN Threshold (I_{LOAD} required to switch SIGN)		MAX471C		± 4.0	± 6.0	mA
		MAX471E			± 7.0	
SIGN Output Leakage Current		$V_{SIGN} = 36V$			1.0	μA
SIGN Sink Current	I_{OL}	$V_{SIGN} = 0.3V$	0.1			μA
Shutdown Supply Current	$I_{RS+}(SHDN)$	$V_{SHDN} = 2.4V$; $V_{CC} = 3V$ to $20V$		1.5	18.0	μA
SHDN Input Low Voltage	V_{IL}				0.3	V
SHDN Input Low Current	I_{IL}	$V_{SHDN} = 0V$			1.0	μA
SHDN Input High Voltage	V_{IH}		2.4			V
SHDN Input High Current	I_{IH}	$V_{SHDN} = 2.4V$			1.0	μA
OUT Output Voltage Range	V_{OUT}		0	$V_{RS+} - 1.5$		V
OUT Output Resistance	R_{OUT}	$I_{LOAD} = 3.0A$, $V_{OUT} = 0V$ to $(V_{RS+} - 1.5V)$	1	3		$M\Omega$
OUT Rise, Fall Time	t_R , t_F	$I_{LOAD} = 50mA$ to $3.0A$, $R_{OUT} = 2k\Omega$, $C_{OUT} = 50pF$, 10% to 90%		4		μs
OUT Settling Time to 1% of Final Value	t_s	$I_{LOAD} = 100mA$ to $3.0A$, $R_{OUT} = 2k\Omega$, $C_{OUT} = 50pF$		15		μs

3.3.2.4 SD Card

SD card digunakan sebagai media penyimpanan selama pengambilan data menggunakan arduino. Data-data yang tersimpan (temperatur, tegangan, dan kuat arus) berbentuk format TXT yang kemudian dapat dibaca di komputer. Pada arduino uno, *SD card* ini dapat dipasang dengan menggunakan perangkat *SD card shield*. Pada *SD card shield* terdapat baterai yang mempertahankan jam internal sehingga data memiliki waktu jam dan tanggal yang sesuai.



Gambar 3. 9. SD card shield arduino

3.3.2.5 Termokopel tipe K

Termokopel digunakan sebagai sensor temperatur. Termokopel merupakan perangkat terdiri dari dua konduktor listrik berbeda yang membentuk sambungan listrik. Termokopel menghasilkan tegangan yang bergantung pada suhu sebagai akibat dari efek *Seebeck*, dan tegangan ini dapat diinterpretasikan untuk mengukur suhu.

Termokopel tipe K (nickel-chromel/nickel-alumel) merupakan termokopel dengan sensitivitas $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, memiliki *range* pengukuran suhu dari -270°C hingga $+1260^\circ\text{C}$. Salah satu logam penyusunnya, nikel, bersifat magnetis. Karakteristik termokopel yang dibuat dengan bahan magnetis adalah dapat mengalami penyimpangan output ketika bahan mencapai titik *Curie*, yang terjadi untuk termokopel tipe K pada suhu sekitar 185°C .

3.3.2.6 Modul DS18B20

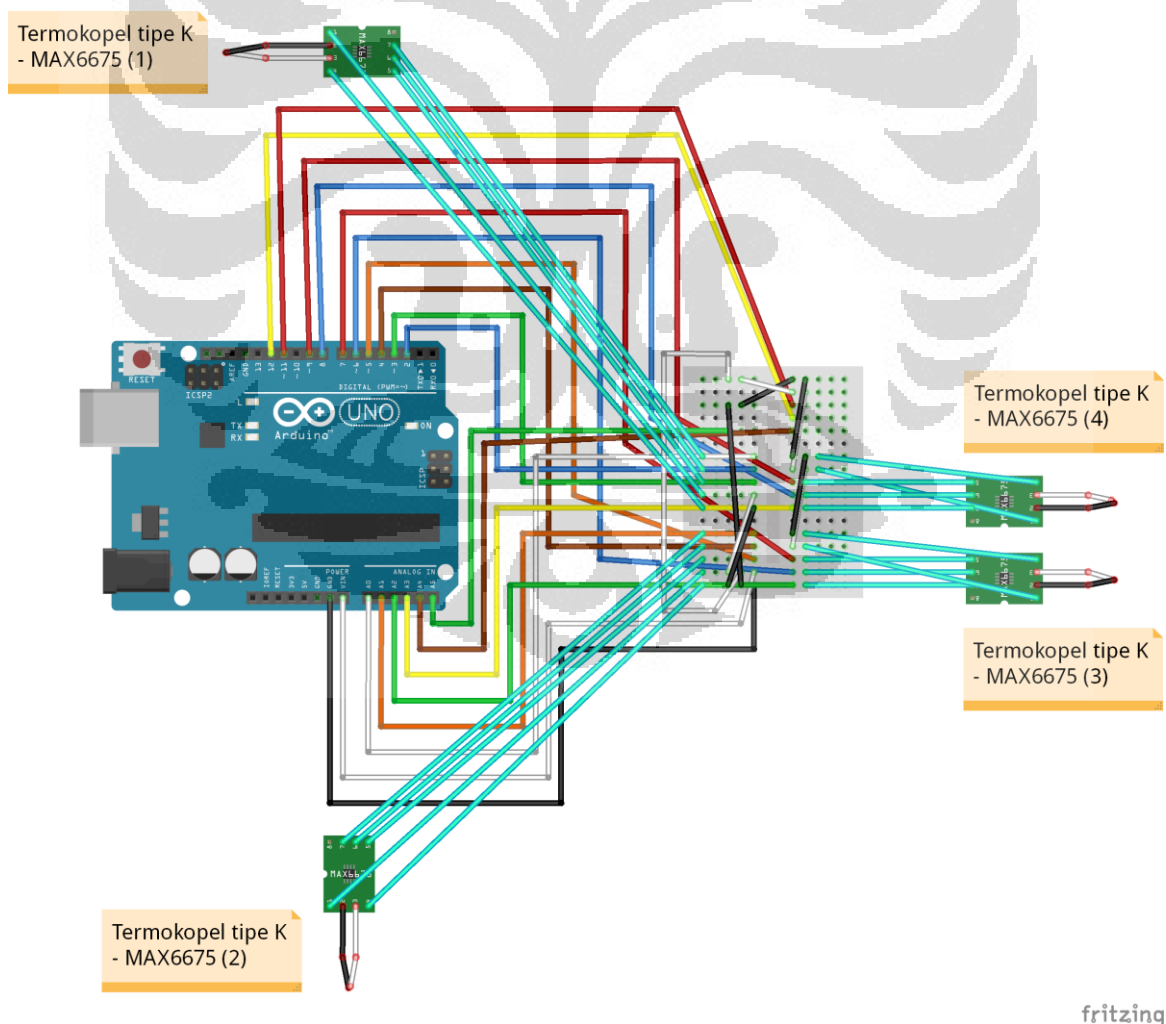
DS18B20 adalah termometer digital yang sudah terkalibrasi dan tersertifikasi (terdapat pada lampiran) sehingga dapat mengkalibrasi termokopel-termokopel yang tersambung ke modul-modul MAX6675, yang terhubung ke arduino. DS18B20 dapat mengukur temperatur dari -55°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$, dengan akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada suhu -10°C hingga $+85^{\circ}\text{C}$.

3.3.3 Sistem Data Logging

3.3.3.1 Rangkaian Arduino 1

Pada penelitian ini, digunakan 2 buah arduino untuk *data logging*. Arduino 1 digunakan untuk mencatat 4 jenis data, yaitu 4 titik pengukuran temperatur oleh 4 termokopel (dengan modul MAX6675 untuk tiap-tiap termokopel).

Berikut adalah skema dari rangkaian arduino 1:

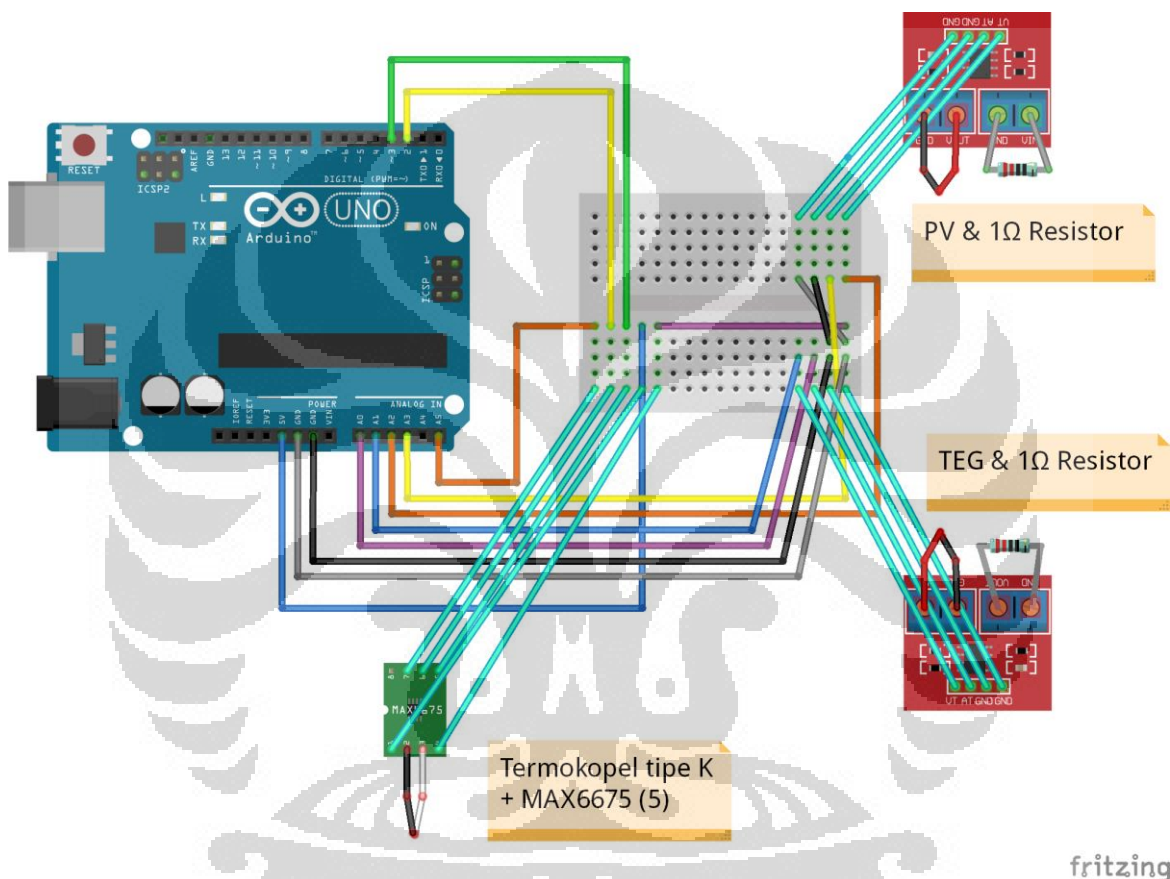


Gambar 3. 10. Skema rangkaian arduino 1

3.3.3.2 Rangkaian Arduino 2

Arduino 2 digunakan untuk menerima 5 jenis data, yaitu 1 titik pengukuran temperatur oleh 1 termokopel (1 buah MAX6675), volt dan ampere PV (1 buah MAX471), dan volt dan ampere TEG (1 buah MAX 471 lainnya). Rangkaian PV dan TEG masing-masing terhubung ke resistor berukuran 1Ω sebagai beban *load*.

Berikut adalah skema dari rangkaian arduino 2:

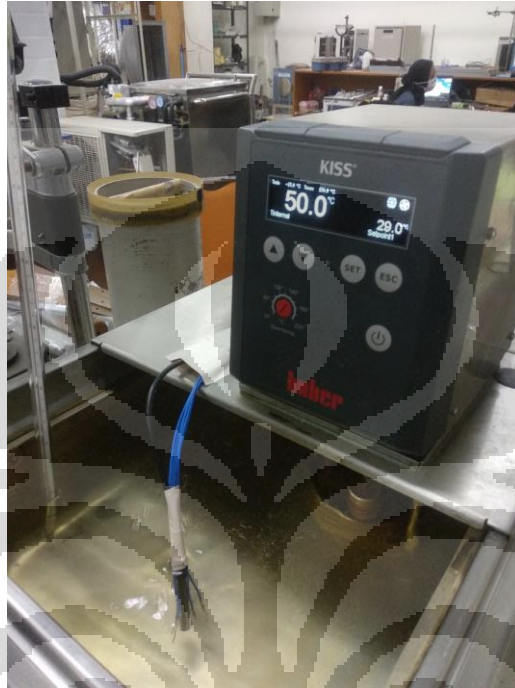


Gambar 3. 11. Skema angkaian arduino 2

3.3.3.3 Kalibrasi termokopel

Pembacaan temperatur oleh MAX6675 secara bawaan yang terhubung ke termokopel tipe K harus dikalibrasi agar dapat menghasilkan pembacaan besaran temperatur yang akurat. Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan termometer kalibrator DS18B20 untuk menyesuaikan pembacaan temperatur di 5 buah modul MAX6675 (5 buah termokopel).

Proses kalibrasi dilakukan pada 3 titik, yaitu suhu ambien, suhu 50°C, dan suhu 90°C. Kalibrasi pada suhu 50°C dan 90°C dilakukan pada alat *constant temperature bath* (CTB) dengan medium air. Masing-masing proses kalibrasi dilakukan pencatatan suhu setiap detik selama 1 jam, yang dilakukan menggunakan arduino.

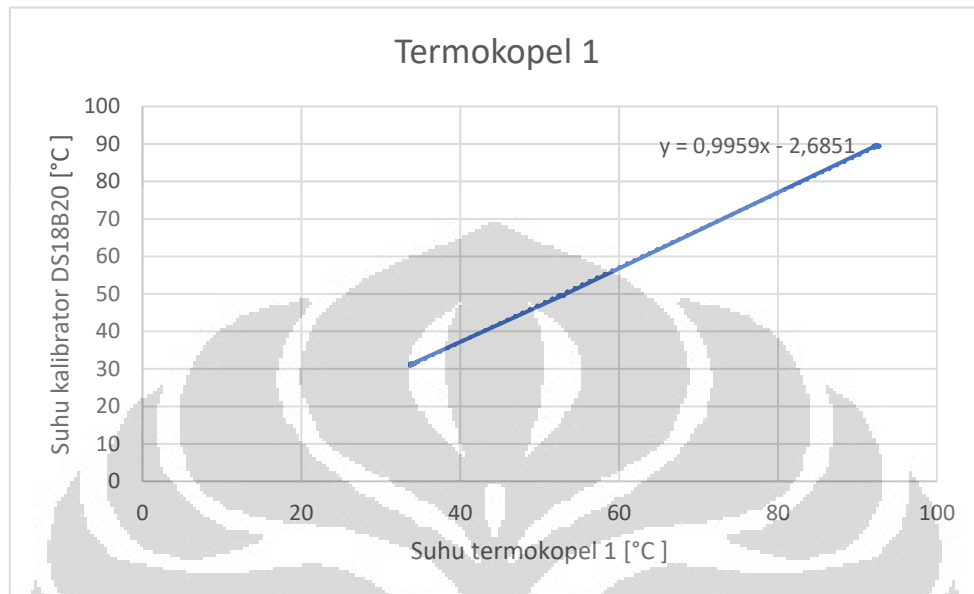


Gambar 3. 12. Proses kalibrasi pada suhu 50°C menggunakan CTB.



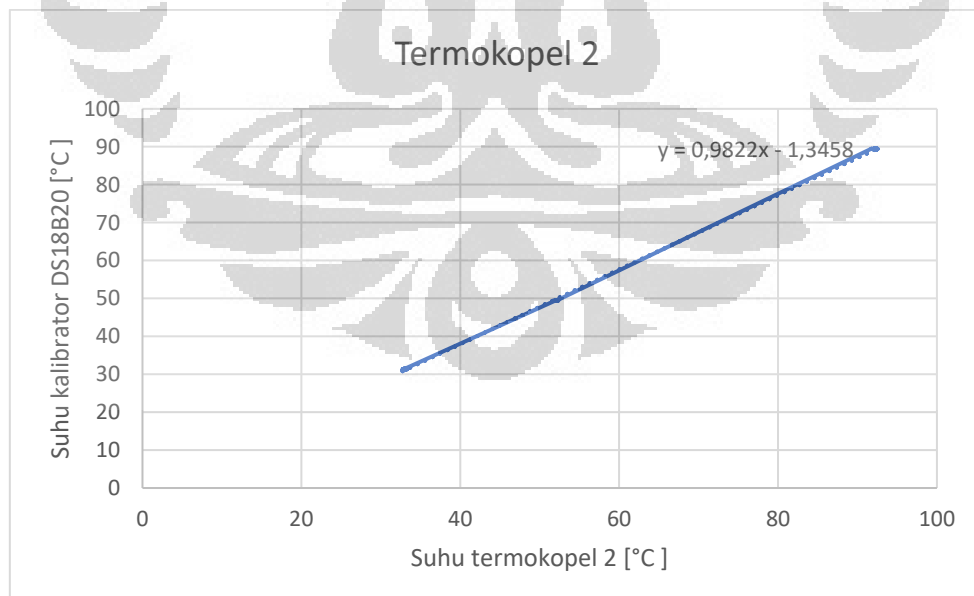
Gambar 3. 13. Proses kalibrasi pada suhu 90°C menggunakan CTB.

Data-data dari proses kalibrasi kemudian diproses di *microsoft excel* untuk dibuat grafik sehingga diperoleh persamaan kalibrasi. Persamaan kalibrasi yang diperoleh kemudian diterapkan pada *code* arduino sehingga pembacaan data termokopel akurat.



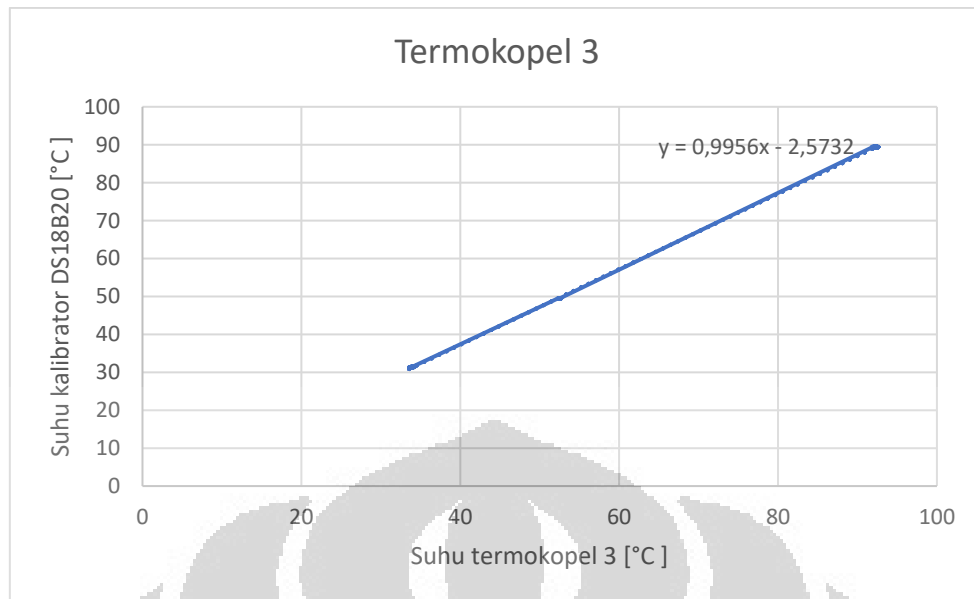
Gambar 3. 14. Grafik kalibrasi termokopel 1

Dari termokopel 1, diperoleh persamaan $y = 0,9959x - 2,6851$.



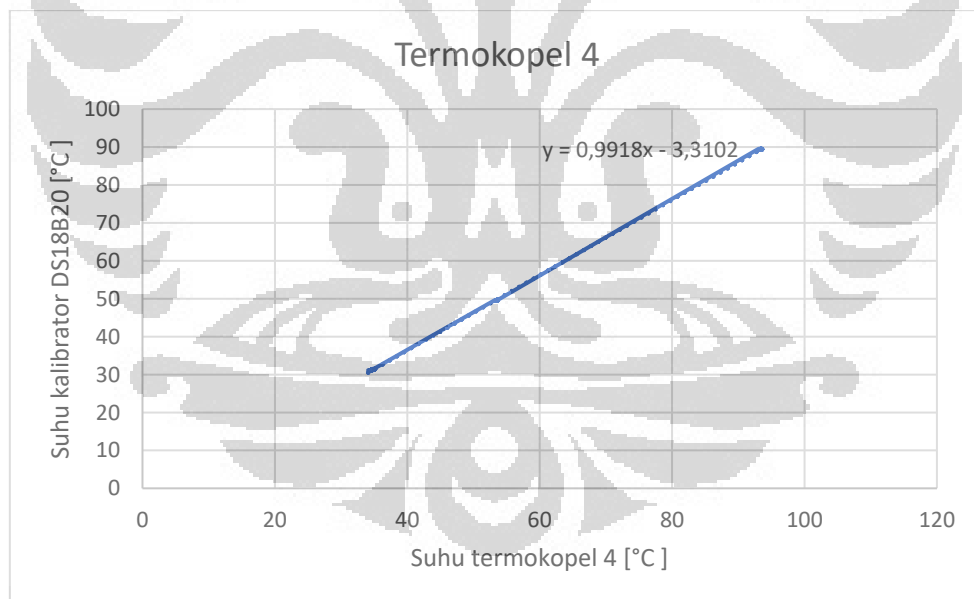
Gambar 3. 15. Grafik kalibrasi termokopel 2

Dari termokopel 2, diperoleh persamaan $y = 0,9822x - 1,3458$.



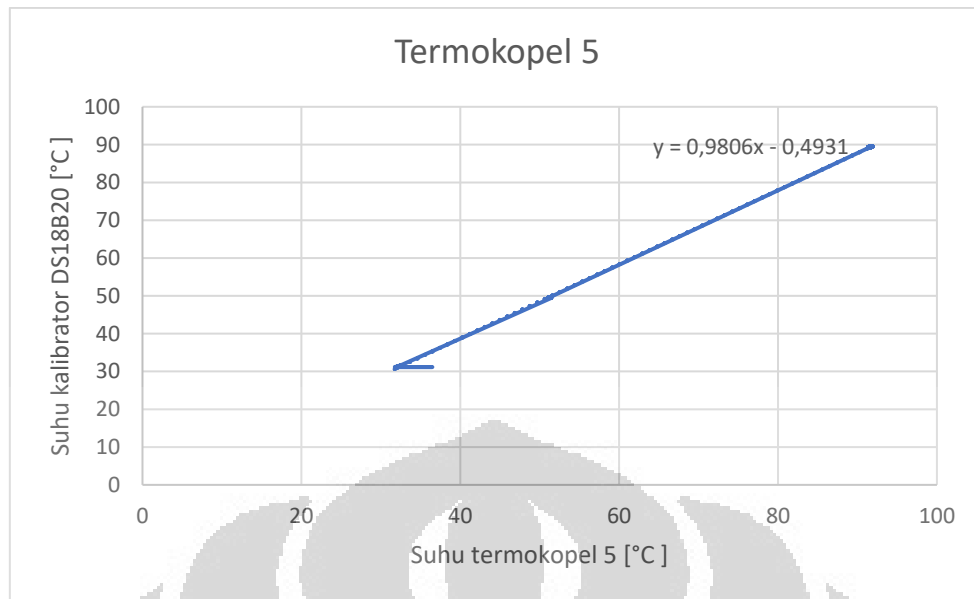
Gambar 3. 16. Grafik kalibrasi termokopel 3

Dari termokopel 1, diperoleh persamaan $y = 0,9956x - 2,5732$.



Gambar 3. 17. Grafik kalibrasi termokopel 4

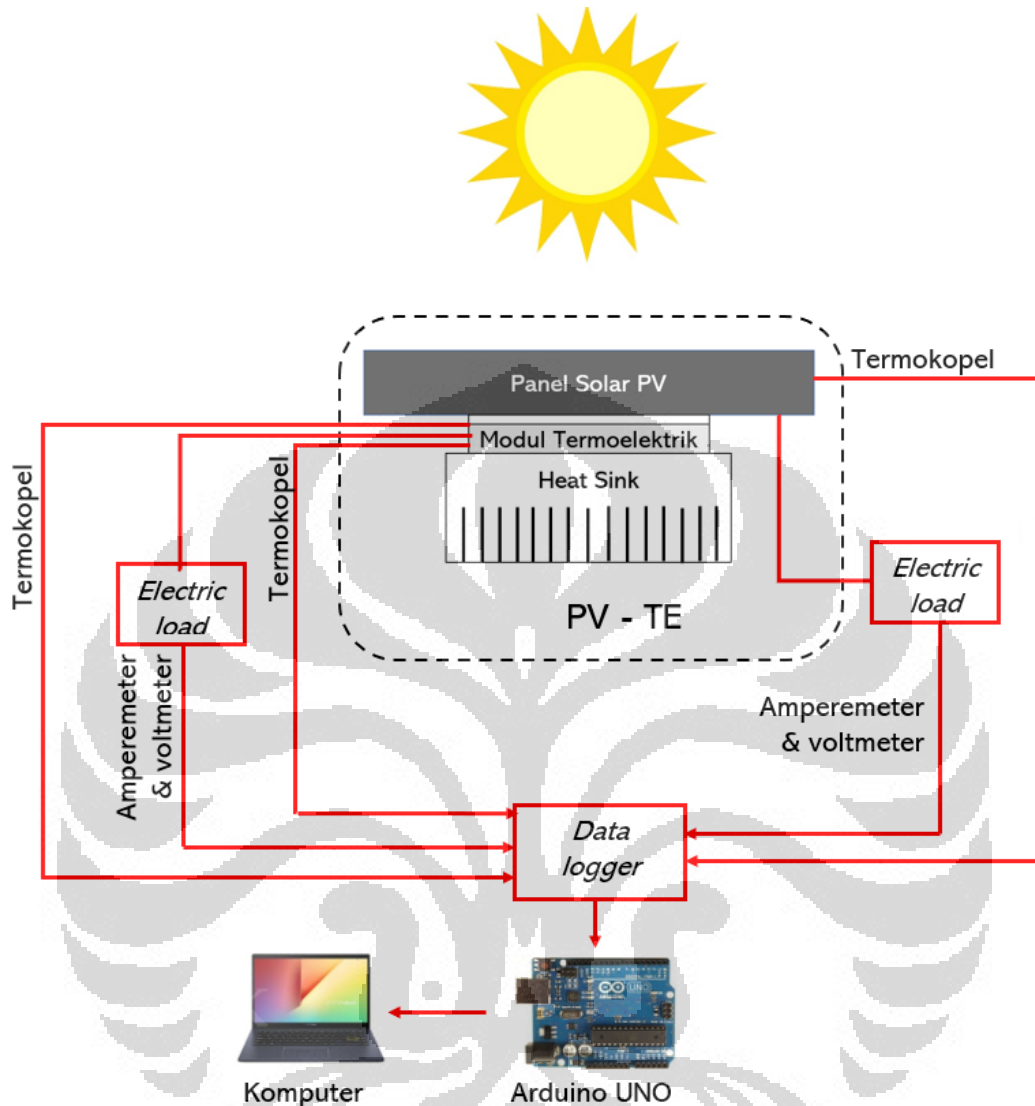
Dari termokopel 1, diperoleh persamaan $y = 0,9918x - 3,3102$.



Gambar 3. 18. Grafik kalibrasi termokopel 5

Dari termokopel 5, diperoleh persamaan $y = 0,9806x - 0,4931$.

3.4 Metode Eksperimen



Gambar 3. 19. Skema *setup* eksperimen

Pengujian sistem pada penelitian ini dilakukan dengan mengukur parameter-parameter kinerja sistem yaitu temperatur, arus listrik, voltase listrik. Termokopel tipe K digunakan untuk mengukur profil temperatur di 5 titik:

1. Sisi permukaan bawah panel surya
2. Sisi dingin termoelektrik pada *heatsink*
3. Sisi permukaan atas panel surya
4. Suhu udara di bawah panel surya
5. Suhu udara ambien

Untuk pengukuran tegangan dan kuat arus digunakan multimeter dan modul MAX471 Arduino. Resistor dengan ukuran 1Ω digunakan sebagai *load*. Besaran yang diukur:

1. Tegangan TEG (Volt)
2. Kuat arus TEG (Ampere)
3. Tegangan PV (Volt)
4. Kuat arus PV (Ampere)

Berikut tabel dari parameter yang diukur:

Tabel 3. 5 Parameter-parameter yang diukur (suhu)

Tanggal Eksperimen					
Waktu	Suhu 1 (°C)	Suhu 2 (°C)	Suhu 3 (°C)	Suhu 4 (°C)	Suhu 5 (°C)

Tabel 3. 6 Parameter-parameter yang diukur (tegangan dan kuat arus)

Tanggal Eksperimen				
Waktu	Voltage TEG (V)	Ampere TEG (A)	Voltage PV (V)	Ampere PV (A)

Berikut merupakan *boundary condition* dari penelitian ini:

Tabel 3. 7 *Boundary condition*

Jam Eksperimen	Siang hari selama tidak hujan (umumnya 12.00-14.00)
Lokasi Eksperimen	Jakarta Selatan & Depok
Waktu Eksperimen	Mei - Juni 2022

3.4.1 Variasi suhu pada berbagai titik permukaan PV

Sebelum menentukan titik diletakkan termokopel, dilakukan *preliminary experiment* untuk dapat menentukan titik representatif *bulk temperature* pada permukaan sisi atas dan sisi bawah panel PV.

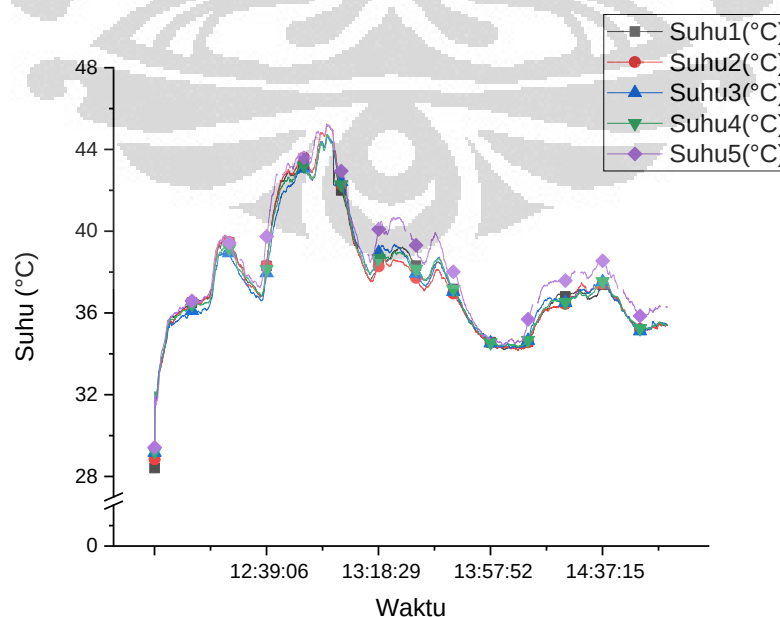
3.4.1.1 Sisi atas PV

Berikut merupakan gambar letak 5 titik termokopel yang diletakkan di sisi permukaan atas PV:



Gambar 3. 20. Letak 5 titik termokopel untuk mengetahui variasi suhu pada sisi atas PV.

Berikut merupakan data hasil pengukuran suhu pada 5 titik termokopel setelah PV dijemur di bawah sinar matahari dalam bentuk grafik:

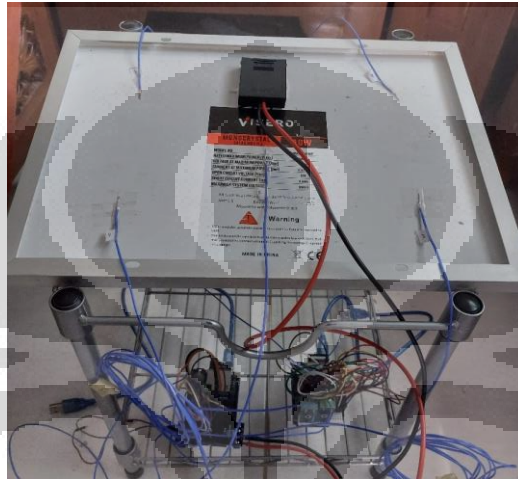


Gambar 3. 21. Grafik data 5 titik suhu pada sisi atas PV.

Dapat dilihat dari grafik, perbedaan suhu di antara kelima titik tidak signifikan ($<1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Oleh karena itu, baik titik 1, 2, 3, 4, atau 5 dapat menjadi representasi *bulk temperature* dari permukaan atas PV.

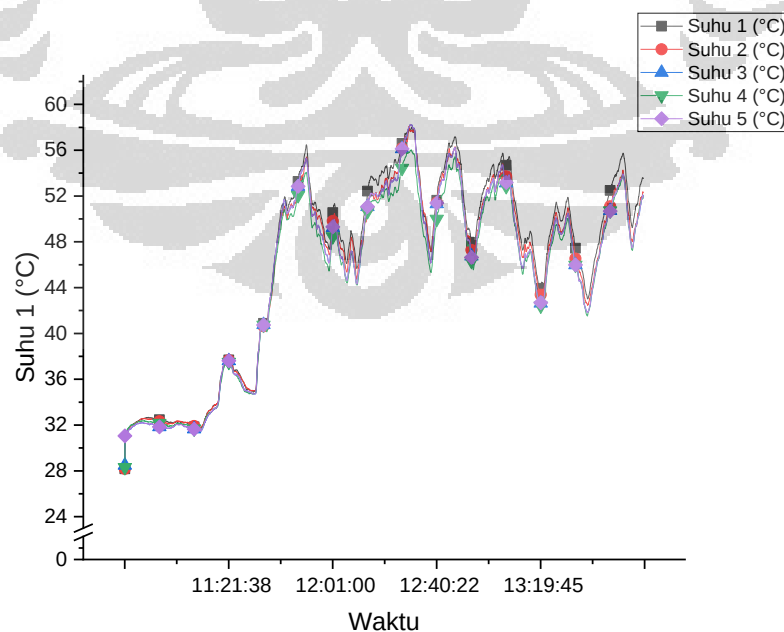
3.4.1.2 Sisi bawah PV

Berikut merupakan gambar letak 5 titik termokopel yang diletakkan di sisi permukaan atas PV:



Gambar 3. 22. Letak 5 titik termokopel untuk mengetahui variasi suhu pada sisi bawah PV.

Berikut merupakan data hasil pengukuran suhu pada 5 titik termokopel setelah PV dijemur di bawah sinar matahari dalam bentuk grafik:

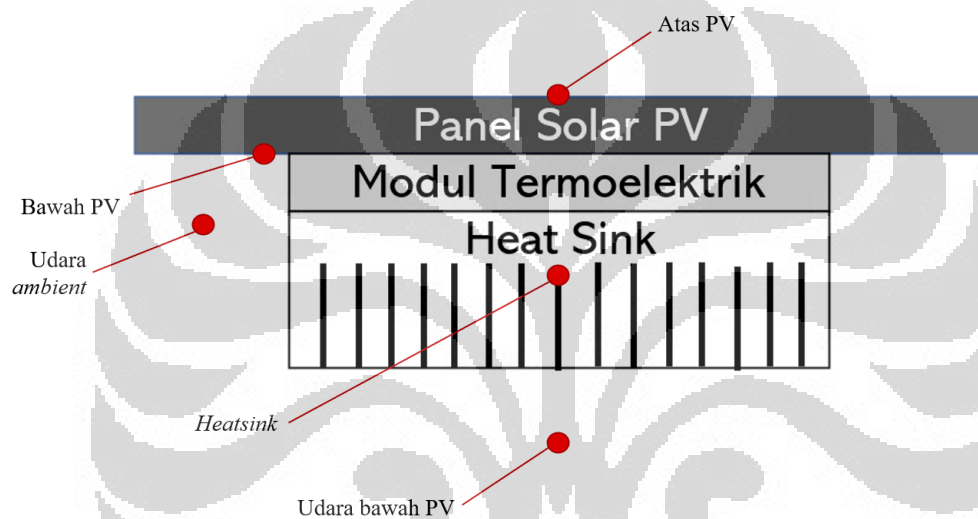


Gambar 3. 23. Grafik data 5 titik suhu pada sisi bawah PV.

Dapat dilihat dari grafik, perbedaan suhu di antara kelima titik tidak signifikan. Oleh karena itu, baik titik 1, 2, 3, 4, atau 5 dapat menjadi representasi *bulk temperature* dari permukaan atas PV. Titik 1 (pojok kiri-atas pada gambar) memiliki temperatur tertinggi sehingga titik ini ditentukan sebagai letak dari modul generator termoelektrik.

3.4.2 Letak Penempatan Termokopel

Penempatan termokopel ada di beberapa titik yaitu di sisi permukaan atas panel surya, sisi permukaan bawah panel surya, *heatsink* termoelektrik, udara di bawah panel surya, dan udara *ambient*.



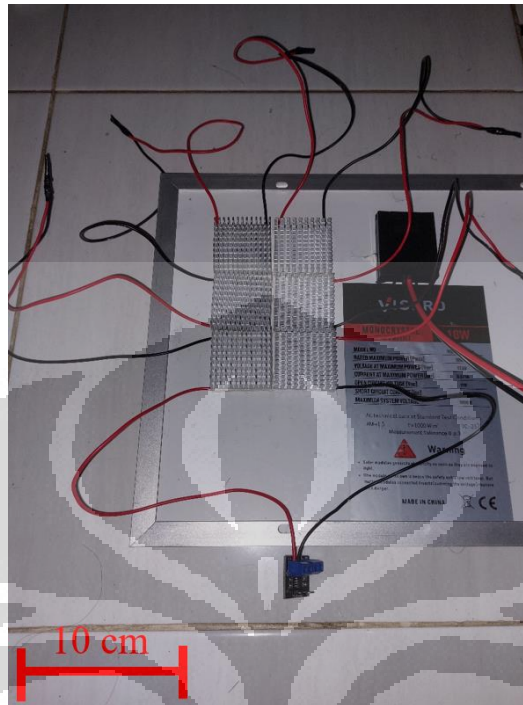
Gambar 3. 24 Penempatan termokopel sistem PV-TE

3.4.3 Rangkaian Termoelektrik

Termoelektrik pada prinsipnya seperti sebuah baterai dalam rangkaian elektronik. Pada penelitian ini digunakan 6 buah modul termoelektrik, yang kemudian dirangkai secara dua jenis, yaitu rangkaian seri dan rangkaian paralel secara elektrik.

3.4.3.1 Rangkaian Seri Termoelektrik

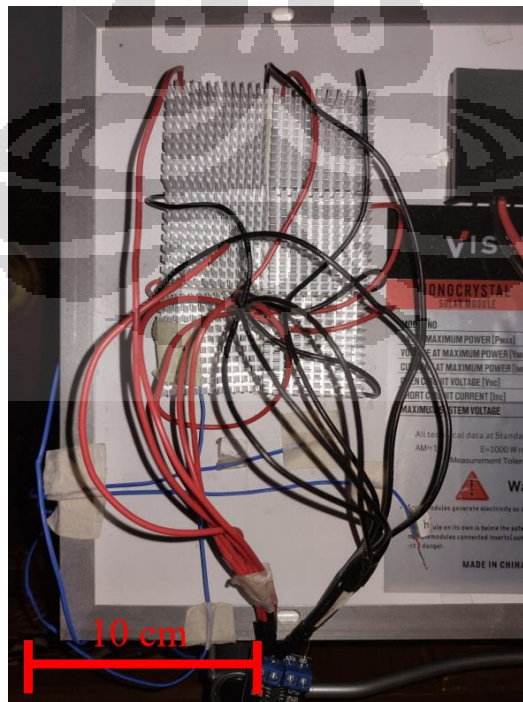
Berikut merupakan rangkaian termoelektrik yang disusun seri secara elektrik.



Gambar 3. 25. Rangkaian termoelektrik seri

3.4.3.2 Rangkaian Paralel Termoelektrik

Berikut merupakan rangkaian termoelektrik yang disusun paralel secara elektrik.



Gambar 3. 26. Rangkaian termoelektrik paralel

3.4.4 Pengujian PV dan TEG secara Terpisah

Pengambilan data juga dilakukan pada solar PV dan TEG yang terpisah untuk mengetahui perbedaan kinerja dari masing-masing PV dan TEG dengan sistem PV-TE. Solar PV dipasang *heatsink* untuk memindahkan *heat* pada sisi bawah PV ke lingkungan, untuk mengetahui apakah ada peningkatan kinerja dari PV. Digunakan 2 buah *heatsink* yang masing-masing bermaterial aluminium, berukuran (200 x 120 x 30 x 2,45)mm (panjang x lebar x tinggi x ketebalan).



Gambar 3. 27 Pengujian PV dan TEG secara Terpisah

Untuk TEG, bagian *hot side* dijemur untuk menerima *heat* dari sinar matahari, dengan bagian *cold side* terendam air. Pada bagian *cold side* TEG tetap menggunakan *heatsink* aluminium berukuran (40 x 40 x 11)mm (panjang x lebar x tinggi), tetapi juga terendam air dengan tujuan untuk menurunkan temperatur *cold side*.

BAB 4

PEMBAHASAN

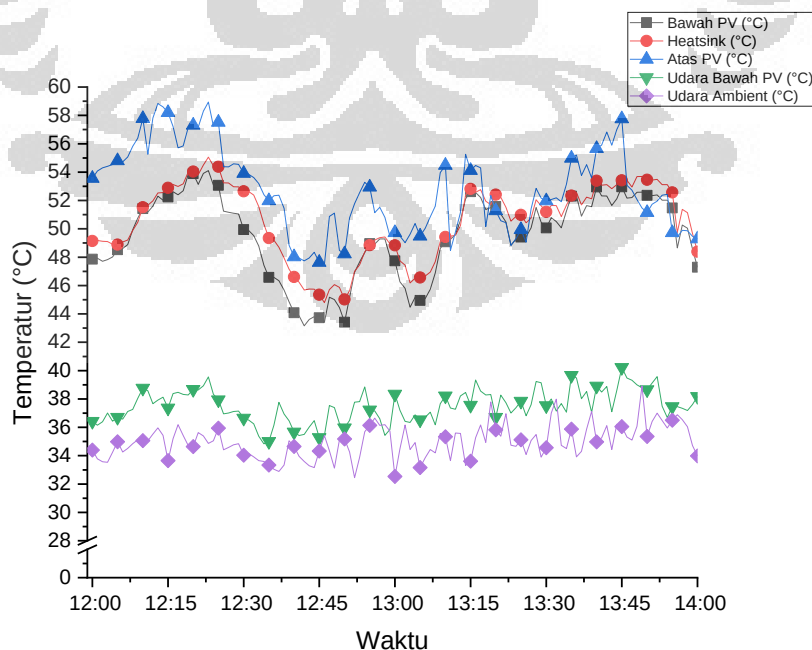
4.1 Data Hasil Penelitian

Pengambilan data dilakukan pada dua variasi rangkaian termoelektrik, yaitu termoelektrik dengan rangkaian seri dan rangkaian paralel. Sistem PV-TE dijemur di bawah sinar matahari untuk dicatat data temperatur, tegangan, dan arus yang dihasilkan, dengan kondisi intensitas radiasi matahari yang berbeda-beda setiap harinya. Pencatatan data dilakukan oleh sistem *data logging* arduino secara otomatis setiap detik selama waktu siang hari. Sistem *data logging* tersebut terhubung ke sebuah *power bank* sebagai penyedia daya arduino. Data tertulis dan tersimpan ke sebuah SD card, untuk kemudian dapat dibaca dan diolah di komputer.

Pengambilan data eksperimen sistem PV-TE dilakukan setiap hari pada bulan Mei hingga Juni 2022. Jika terjadi hujan, pengambilan data tidak dilakukan. Data kemudian dipilih yang memiliki *output* energi listrik tertinggi dari termoelektrik pada sistem PV-TE, untuk selanjutnya diketahui seberapa besar persentase *output* energi listrik yang dihasilkan modul termoelektrik terhadap energi listrik yang dihasilkan PV.

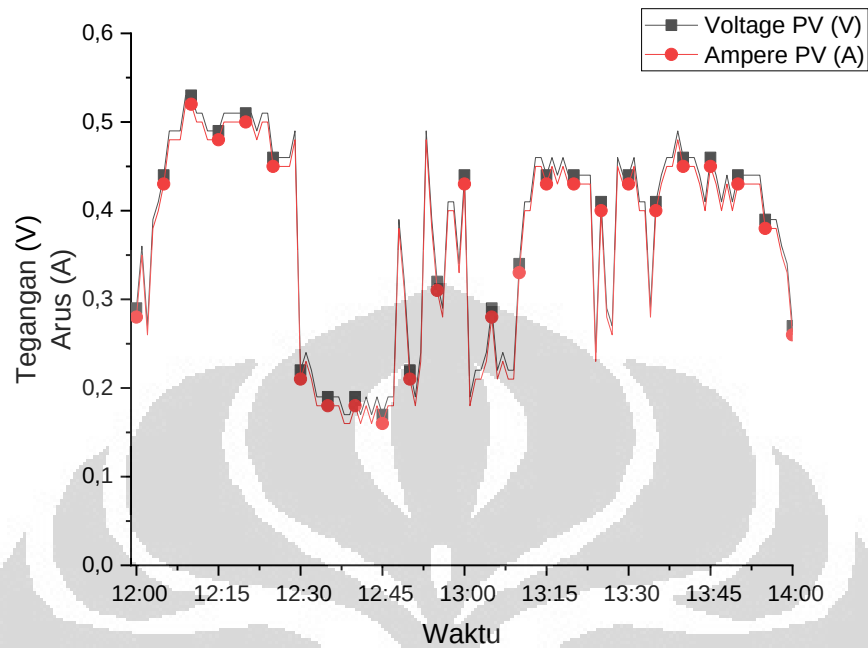
4.1.1 Rangkaian Seri Termoelektrik

Data temperatur:



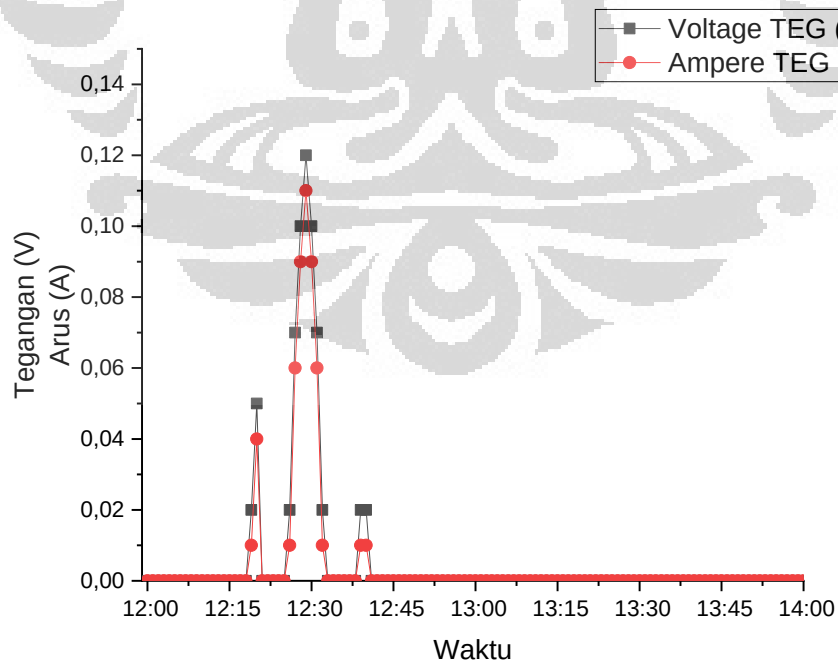
Gambar 4. 1 Grafik data temperatur sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri

Data PV:



Gambar 4. 2 Grafik data PV sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri

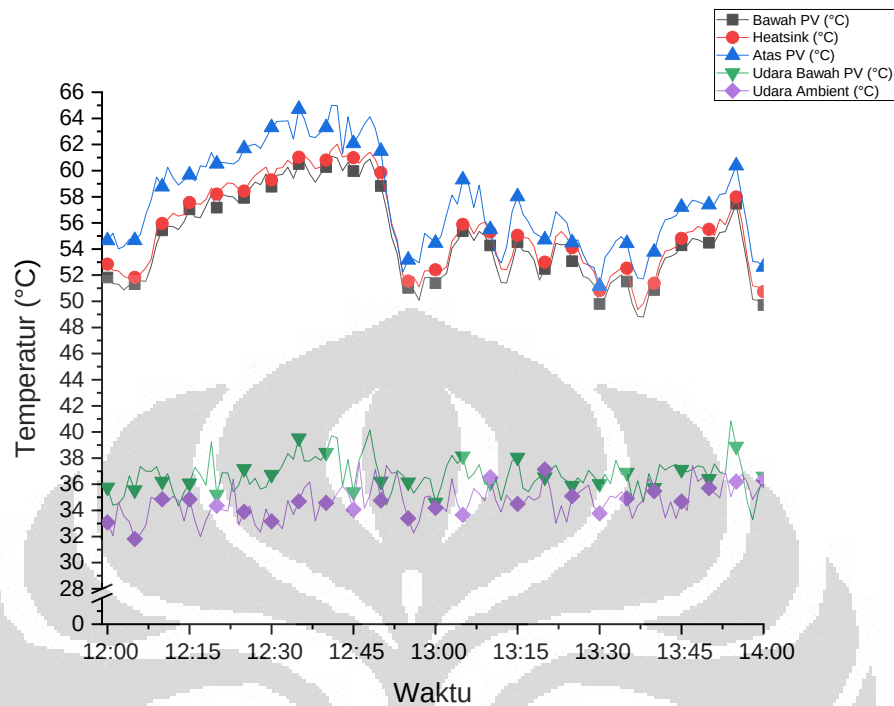
Data TEG:



Gambar 4. 3 Grafik data TEG sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri

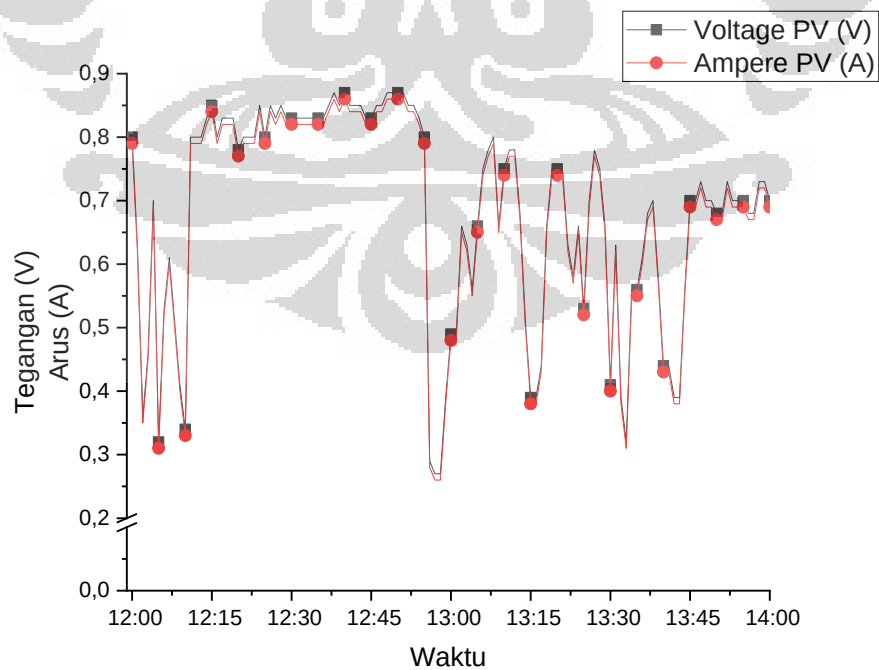
4.1.2 Rangkaian Paralel Termoelektrik

Data temperatur:



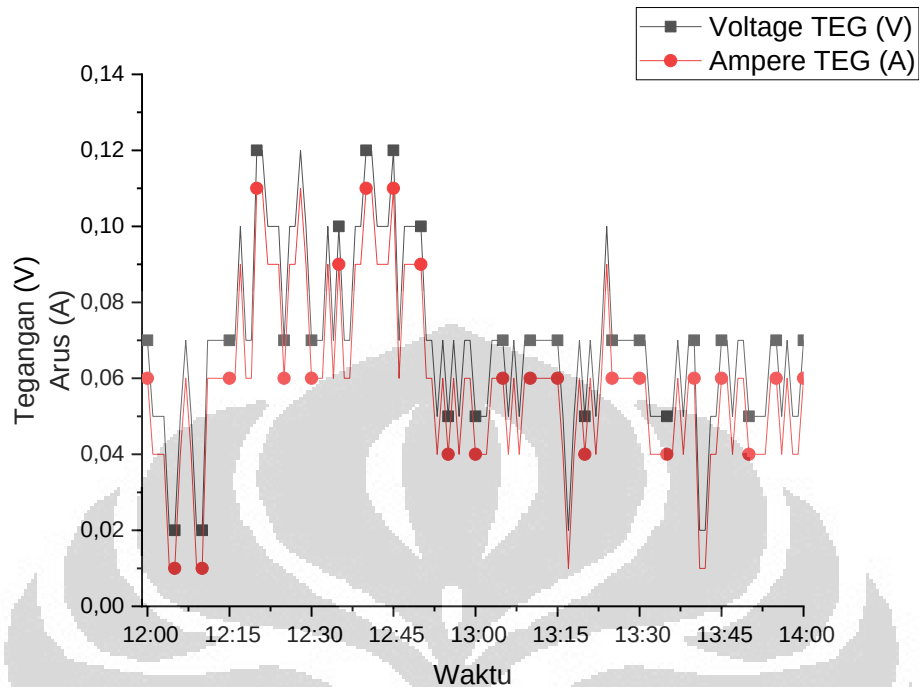
Gambar 4. 4 Grafik data temperatur sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel

Data PV:



Gambar 4. 5 Grafik data PV sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel

Data TEG:



Gambar 4. 6 Grafik data TEG sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel

4.2 Pengolahan Data

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan menggunakan *microsoft excel* untuk menghitung:

- Output* daya listrik yang dihasilkan oleh sistem PV-TE

Besar daya listrik (P) dapat dihitung dengan persamaan:

$$P = V \times I \quad (4.1)$$

dengan

P = daya listrik (Watt)

V = tegangan (volt)

I = kuat arus (ampere)

b. Energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PV-TE

Besar energi listrik (W) yang dihasilkan selama pengoperasian sistem dapat dihitung dengan persamaan:

$$W = V \times I \times t \quad (4.2)$$

dengan

W = energi listrik (Watt)

V = tegangan (volt)

I = kuat arus (ampere)

t = waktu (s)

yang mana besar energi listrik ini juga dapat diketahui dengan menjumlah data daya per 1 detik.

c. Perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik

Perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik ditentukan dengan menghitung selisih antara suhu permukaan bawah PV dengan suhu udara bawah PV.

$$\Delta T = T_{hot} - T_{cold} = T_{suhu\ permukaan\ bawah\ PV} - T_{suhu\ udara\ bawah\ PV} \quad (4.3)$$

d. % Energi TE terhadap PV

Untuk mengetahui seberapa besar persentase *output* energi listrik yang dihasilkan modul termoelektrik terhadap energi listrik yang dihasilkan PV pada sistem PV-TE dapat menggunakan persamaan:

$$\%W_{TE} = \frac{W_{TE}}{W_{PV}} \times 100\% \quad (4.4)$$

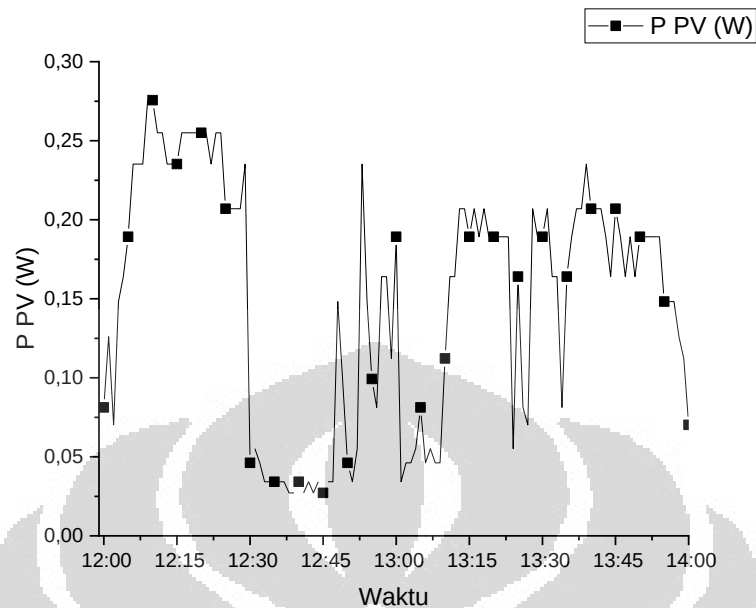
dengan

$\%W_{TE}$ = Perbandingan *output* energi TE terhadap PV dalam %

W_{TE} = *Output* energi listrik termoelektrik

W_{PV} = *Output* energi listrik *photovoltaic*

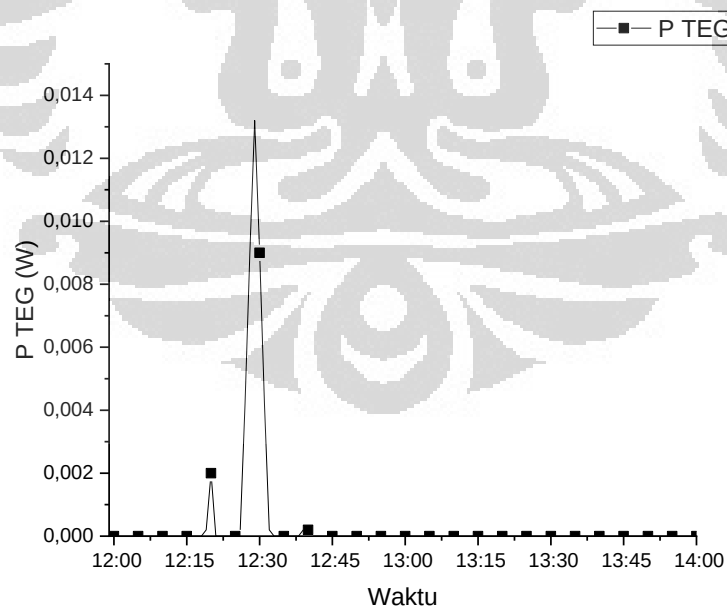
4.2.1 Rangkaian Seri Termoelektrik



Gambar 4. 7 Grafik daya yang dihasilkan PV pada sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri

Energi listrik yang dihasilkan PV selama 2 jam (pukul 12.00-14.00):

$$W = 1080,12 \text{ Joule} = 0,3 \text{ Wh}$$



Gambar 4. 8 Grafik daya yang dihasilkan TEG pada sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik seri

Energi listrik yang dihasilkan TEG selama 2 jam (pukul 12.00-14.00):

$$W = 2,56 \text{ Joule} = 0,71 \times 10^{-3} \text{ Wh}$$

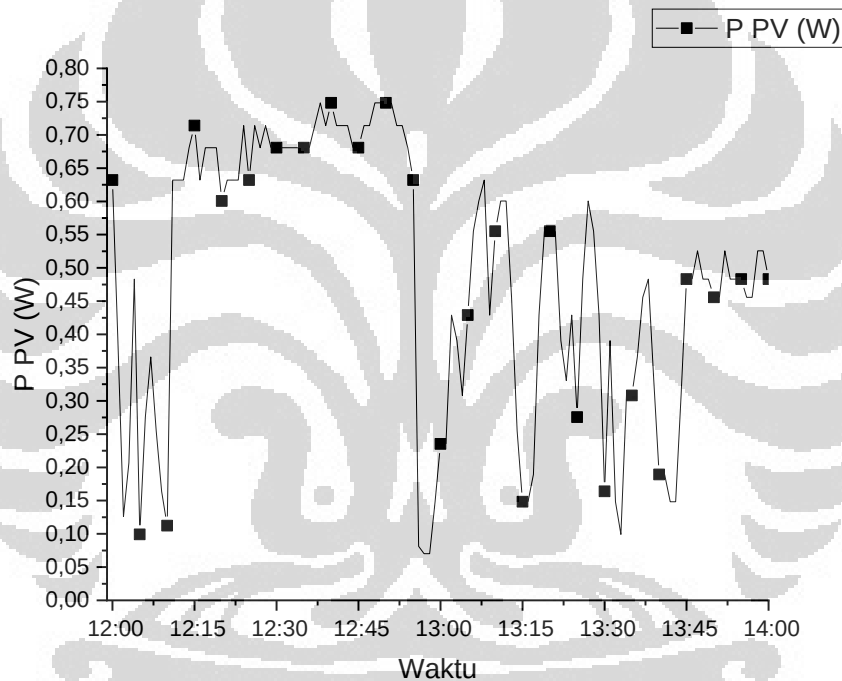
Tabel 4. 1 Daya maksimum dari TEG pada sistem PV-TE dengan rangkaian seri

Waktu	Bawah PV (°C)	Udara Bawah (°C)	ΔT (°C)	Voltage TEG (V)	Ampere TEG (A)	Daya TEG (W)
12:26:28	51,05	37,15	13,9	0,12	0,11	0,0132

% Energi TE terhadap PV (dirangkai seri):

$$\%W_{TE} = \frac{W_{TE}}{W_{PV}} \times 100\% = 0,24\%$$

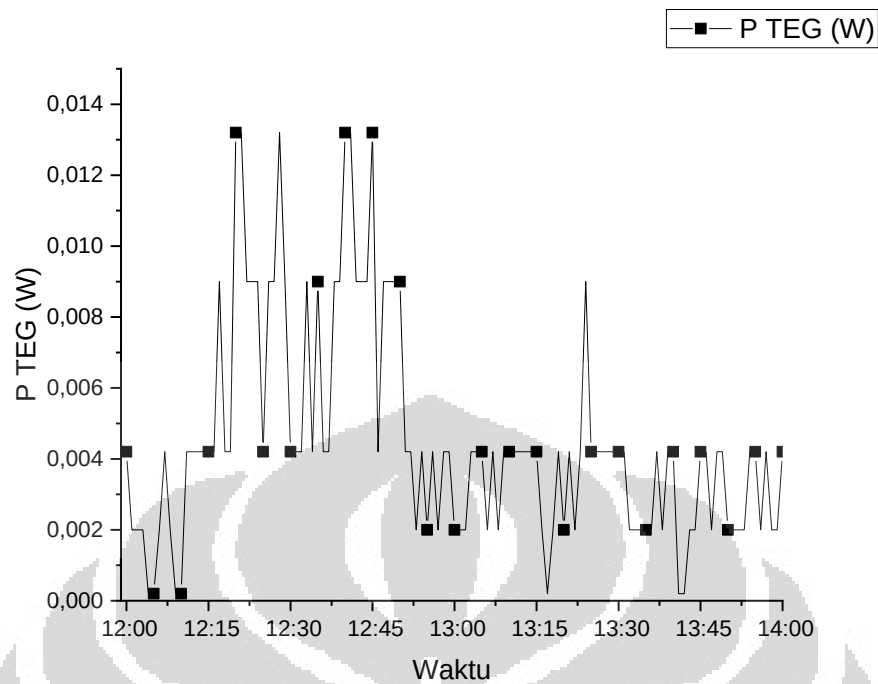
4.2.2 Rangkaian Paralel Termoelektrik



Gambar 4. 9 Grafik daya dihasilkan PV pada sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel

Energi listrik yang dihasilkan PV selama 2 jam (pukul 12.00-14.00):

$$W = 3542,28 \text{ Joule} = 0,98 \text{ Wh}$$



Gambar 4. 10 Grafik daya dihasilkan TEG pada sistem PV-TE dengan rangkaian termoelektrik paralel

Energi listrik yang dihasilkan TEG selama 2 jam (pukul 12.00-14.00):

$$W = 33,17 \text{ Joule} = 9,21 \times 10^{-3} \text{ Wh}$$

Tabel 4. 2 Daya maksimum dari TEG pada sistem PV-TE dengan rangkaian paralel

Waktu	Bawah PV (°C)	Udara Bawah (°C)	ΔT (°C)	Voltage TEG (V)	Ampere TEG (A)	Daya TEG (W)
12:19:05	54,18	40,54	13,64	0,12	0,12	0,0144

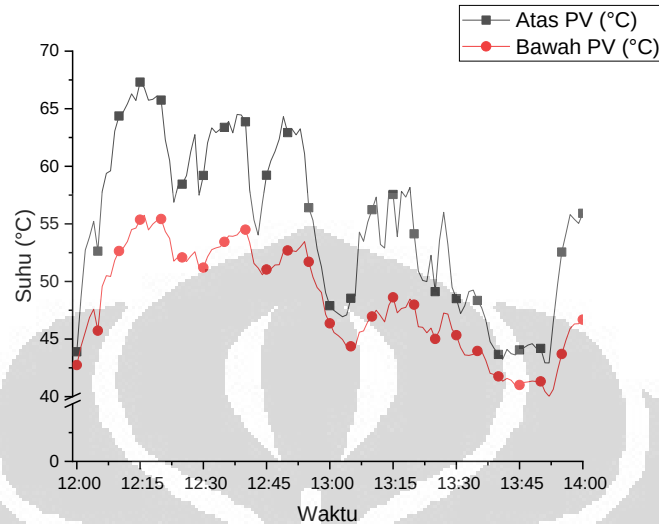
% Energi TE terhadap PV (dirangkai paralel):

$$\%W_{TE} = \frac{w_{TE}}{w_{PV}} \times 100\% = 0,94\%$$

4.3 Pengujian PV dan TEG secara Terpisah

4.3.1 PV dengan *heatsink*

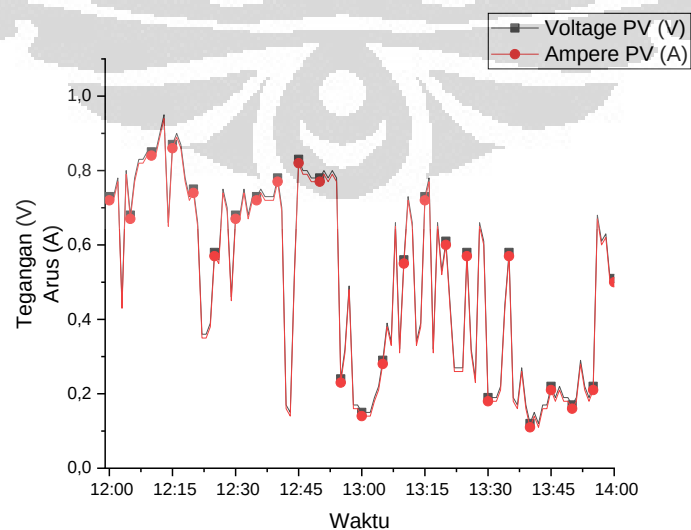
Data temperatur PV:



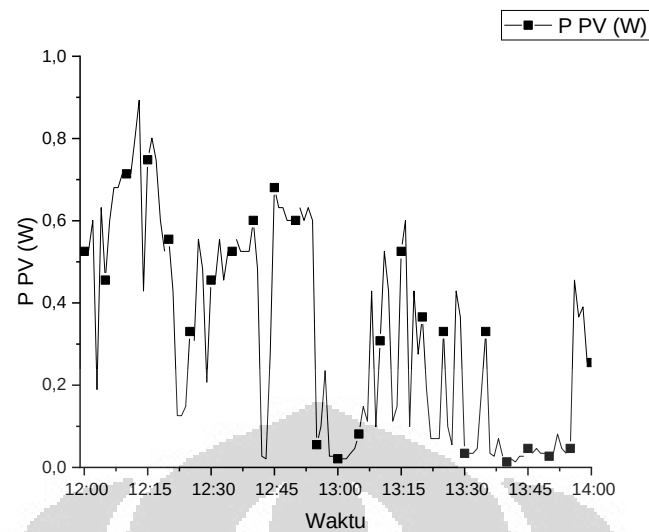
Gambar 4. 11 Grafik temperatur PV dengan *heatsink*

Dibandingkan dengan data PV pengujian sebelumnya yang tanpa menggunakan *heatsink*, PV dengan *heatsink* memiliki perbedaan temperatur antara bagian atas dan bagian bawah yang lebih tinggi. Tanpa *heatsink*, perbedaan temperatur tertinggi adalah $5,11^{\circ}\text{C}$ dengan rata-rata perbedaan temperatur sebesar $2,92^{\circ}\text{C}$. Sedangkan dengan *heatsink*, perbedaan temperatur tertinggi mencapai $11,95^{\circ}\text{C}$, dengan rata-rata perbedaan temperatur sebesar $6,86^{\circ}\text{C}$.

Data energi listrik PV:



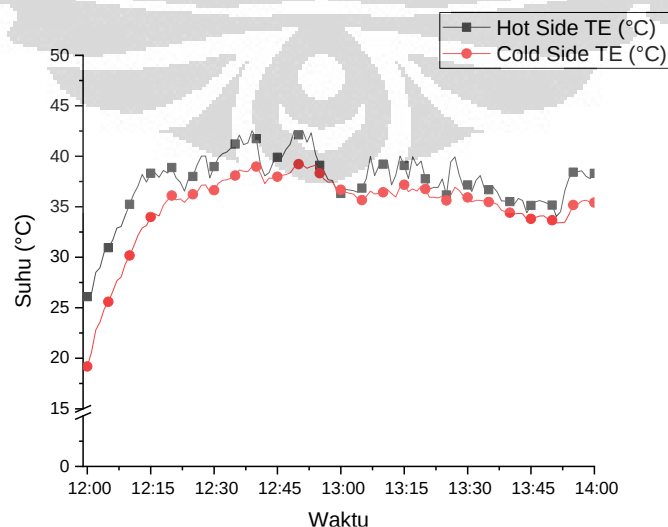
Gambar 4. 12 Grafik data energi listrik PV dengan *heatsink*



Gambar 4. 13 Grafik daya PV dengan *heatsink*

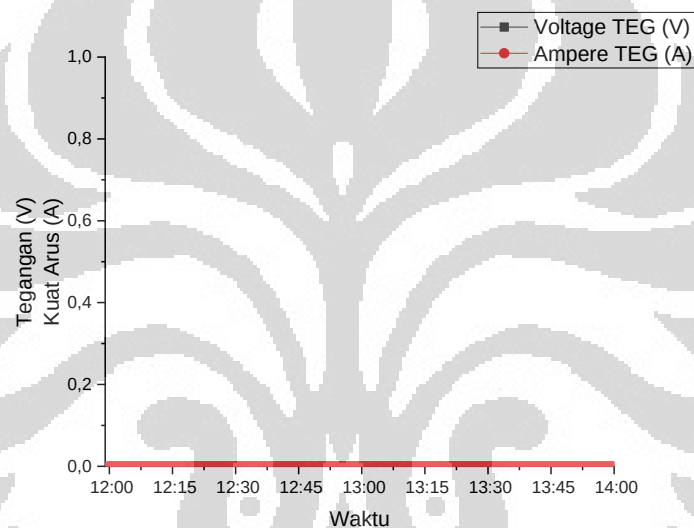
Dengan menggunakan *heatsink*, daya tertinggi mencapai 0,89 W, yang mana ini adalah data tertinggi daripada pengujian-pengujian sebelumnya pada sistem PV-TEG yang maksimal hanya mencapai 0,75 W. PV yang dipasang *heatsink* memiliki peningkatan daya tertinggi sebesar 18,6% dibandingkan tanpa *heatsink*. Sedangkan untuk energi listrik yang dihasilkan selama 2 jam (pukul 12.00-14.00) adalah 2318,53 Joule = 0,64 Wh. Walaupun memiliki peningkatan pada daya tertinggi, nilai energi listrik yang dihasilkan PV ini tidak konsisten lebih tinggi dibandingkan beberapa data pengujian sebelumnya pada sistem PV-TE.

4.3.2 TEG dengan *heatsink*



Gambar 4. 14 Grafik temperatur TEG dengan *heatsink*

Pada TEG yang dijemur secara langsung dan terpisah dengan PV, *hot side* terkena sinar matahari secara langsung dan *cold side* dengan *heatsink* dikondisikan terendam air. Perbedaan temperatur (ΔT) antara *hot side* dan *cold side* tertinggi adalah $5,81^{\circ}\text{C}$. Terlihat dalam grafik, air yang berada pada *cold side* lama-kelamaan akan terjadi peningkatan suhu sehingga berhimpit dengan temperatur *hot side*. Hal ini disebabkan air juga terkena sinar matahari. Oleh karena ini, perbedaan temperatur (ΔT) antara *hot side* dan *cold side* termoelektrik tidak sebesar pada sistem PV-TE yang digabung pada pengujian sebelumnya.



Gambar 4. 15 Grafik data energi listrik TEG dengan *heatsink*

Oleh karena TEG yang dijemur secara langsung dan terpisah dengan PV memiliki nilai perbedaan temperatur antara *hot side* dan *cold side* yang kecil, TEG tidak dapat menghasilkan energi listrik. Hal ini terjadi karena air pada *cold side* tidak dapat menjaga temperaturnya tetap rendah jika terjemur sinar matahari.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Penggunaan modul termoelektrik yang disematkan pada sistem *photovoltaic* (sistem PV-TE) dapat meningkatkan *output* energi listrik, disebabkan adanya perbedaan temperatur antara sisi bawah panel *photovoltaic* dengan suhu udara yang menghasilkan energi listrik pada modul termoelektrik.
2. Rangkaian termoelektrik yang disusun secara paralel lebih efisien untuk diterapkan pada sistem PV-TE daripada disusun secara seri. Penambahan termoelektrik dapat meningkatkan *output* energi listrik sebesar 0,24% dari sistem PV jika termoelektrik dirangkai seri, dan 0,94% jika termoelektrik dirangkai paralel.
3. Faktor yang memengaruhi kinerja modul termoelektrik yang diterapkan pada sistem *photovoltaic* (sistem PV-TE) adalah intensitas radiasi matahari dan suhu udara lingkungan, di mana intensitas radiasi memengaruhi suhu *hot side* termoelektrik dan suhu udara lingkungan memengaruhi suhu *cold side*.
4. PV yang disematkan *heatsink* menghasilkan peningkatan daya tertinggi sebesar 18,6% dibandingkan sistem PV-TE. Walaupun memiliki peningkatan pada daya tertinggi, nilai energi listrik yang dihasilkan PV dengan *heatsink* tidak konsisten lebih tinggi dibandingkan sistem PV-TE.

5.2 Saran

Penulis memiliki beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya untuk sistem hibrida PV-TEG:

1. *Cold side* modul termoelektrik dapat diterapkan *heat exchanger* lain seperti PCM atau pendingin air tersirkulasi agar dapat lebih meningkatkan perbedaan temperatur pada termoelektrik.
2. *Solar concentrator* yang memfokuskan sinar matahari dapat disematkan untuk dapat menghasilkan perbedaan temperatur yang lebih tinggi pada modul termoelektrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifa, dkk. (2020). *Performance investigation of a concentrating photovoltaic thermal hybrid solar system combined with thermoelectric generators*. Energy Conversion and Management, 205:112377. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112377>
- Angel, dkk. (2019). *Integration of Thermoelectric generators (TEG) in Solar PVT panels*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'19) Tenerife (Spain), 10th-12th April, 2019. <https://doi.org/10.24084/repqj17.355>
- Araiz, dkk. (2017). *Experimental and computational study on thermoelectric generators using thermosyphons with phase change as heat exchangers*. Energy Conversion and Management 137:155–164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.046>
- Baamrongkhan, dkk. (2021) *Experimental performance of a photovoltaic-assisted solar parabolic dish thermoelectric system*. Case Studies in Thermal Engineering 27:101280. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101280>
- Chen, dkk. (2017). *Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures*. Energies 10:1329. <https://doi.org/10.3390/en10091329>
- Coventry, Joe. (2005). *Performance of a concentrating photovoltaic/thermalsolar collector*. Solar Energy 78: 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.014>
- Fraas, Lewis & Partain, Larry. (2010). *Solar Cells and their Applications* (2nd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- George, dkk. (2019). *Concentrated photovoltaic thermal systems: A component-by-component view on the developments in the design, heat transfer medium and applications*. Energy Conversion and Management 186:15-41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.052>
- Guiqiang, dkk. (2018). *A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation*. Energy 158:41-58. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.021>

- He, dkk. (2016). *Structural size optimization on an exhaust exchanger based on the fluid heat transfer and flow resistance characteristics applied to an automotive thermoelectric generator*. *Energy Conversion and Management* 129:240–249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.032>.
- Hussam, dkk. (2021). *Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications*. *International Journal of Thermofluids* 9:100063. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100063>
- Kil, dkk. (2017) *A highly-efficient, concentrating-photovoltaic/thermoelectric hybrid generator*. *Nano Energy* 37: 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.05.023>
- Lamba, R. & Kaushic, S.C. (2018). *Solar driven concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid system: numerical analysis and optimization*. *Energy Conversion and Management* 170:34–49. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.048>.
- Li, dkk. (2011). *Performance investigation and optimization of the trough concentrating photovoltaic thermal system*. *Solar Energy* 85:1028–1034. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.020>
- Li, dkk. (2011). *The performance analysis of the trough concentrating solar photovoltaic/thermal system*. *Energy Conversion and Management* 52:2378–2383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.039>
- Li, dkk. (2011). *Performance study of solar cell arrays based on a trough concentrating photovoltaic/thermal system*. *Applied Energy* 88:3218–3227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.030>
- Liuyang, dkk. (2021). *Performance analysis of a new hybrid system composed of a concentrated photovoltaic cell and a two-stage thermoelectric generator*. *Sustainable Energy, Grids and Networks* 27:100481. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100481>

- Miljkovic, Nenad & Wang, Evelyn. (2011). *Modeling and optimization of hybrid solar thermoelectric systems with thermosyphons*. Solar Energy 85:2843–2855. <https://doi:10.1016/j.solener.2011.08.021>
- Paulina, dkk. (2021). *Experimental study of a hybrid solar thermoelectric generator energy conversion system*. Energy Conversion and Management 238:113997. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113997>
- Rezania, A. & Rosendahl, L.A. (2017). *Feasibility and parametric evaluation of hybrid concentrated photovoltaic-thermoelectric system*. Applied Energy 187:380–389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.064>.
- Sridhar, dkk. (2020) *A review on various configurations of hybrid concentrator photovoltaic and thermoelectric generator system*. Solar Energy 201:122–148. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.090>
- Yin, dkk. (2017). *Thermal resistance analysis and optimization of photovoltaic thermoelectric hybrid system*. Energy Conversion and Management 143:188–202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.004>
- Yin, dkk. (2018). *One-day performance evaluation of photovoltaic-thermoelectric hybrid system*. Energy 143:337–346. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.011>
- Yin, dkk. (2019). *Experimental optimization of operating conditions for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system*. Journal of Power Sources 422:25–32. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.03.034>

Lampiran 1 – Sertifikat Kalibrasi DS18B20



Calibration Certificate



NVLAP lab code: 200948-0
Laboratory management system
accredited to ISO/IEC

Thermodata Corporation
40 South Street, Suite 101
Marblehead MA 01945
USA

tel: 781 990 0122

fax: 781 990 1192

Date received: Jun 19, 2012

Date item calibrated: Jun 20, 2012

Calibration due: Sep 20, 2013

Calibration method: Comparison

Uncertainty of
measurement ($k = 2$) $\pm 0.07^\circ\text{C}$

Certificate Number DF0000041DB5CB28-59

Date issued: Jul 09, 2012

Issued to: Sample Customer
123 Main Street
New York, NY 10349
USA

Device type: 1-Wire® temperature sensor

Manufacturer: Maxim Integrated Products

Model number DS18B20

Serial number DF0000041DB5CB28

The following Test Equipment was used in this calibration:

Description	Model No.	Serial No.	Calibration date	Calibration due date
Hart Scientific RTD thermometer module	2560	BOA256	Sep 20, 2011	Sep 20, 2012
Hart Scientific RTD thermometer module	2560	BOA257	Sep 20, 2011	Sep 20, 2012
Hart Scientific RTD temperature probe	5628-20	2077	Feb 15, 2012	Feb 15, 2013
Hart Scientific RTD temperature probe	5628-20	2078	Feb 15, 2012	Feb 15, 2013

Calibration records for the above Test Equipment include traceability to standards maintained by the National Institute for Standards and Technology (NIST), an agency of the United States Department of Commerce, and direct comparison with fixed points by a laboratory accredited to ISO/IEC 17025.

Laboratory conditions during calibration: Temperature: 22.7 Relative humidity 34%

Calibration
test results:

Temperature set point	Reference temperature	As found reading
0	-0.001	0.125
8	7.996	8.050
25	24.977	24.850

All temperature measurements are expressed in degrees Celsius ($^\circ\text{C}$)

Calibration performed and certificate issued by:

Robert Keith,
Technical manager

This certificate and the information contained herein are not valid unless this certificate is reproduced in its entirety.
End of Report

Lampiran 2 – Code Arduino 1

```

#include <max6675.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <RTCLib.h>
#include <SimpleKalmanFilter.h>

MAX6675 thermocouple[4] =
{MAX6675(3,2,A0),MAX6675(5,4,A1),MAX6675(7,6,A2),MAX6675(9,8,A3)};
///

```

Lampiran 2 – Code Arduino 1 (lanjutan)

```

}
/*
 * Validasi Pembuatan File
 */
if (!formatTXT)
{Serial.println("Tidak dapat membuat file");}
else
{Serial.println("File TXT berhasil di buat");}
Serial.println("");
/*
 * Validasi Modul Pembuat Waktu
 */
if (!RTC.begin())
{
  Serial.println("RTC gagal terhubung.");
  formatTXT.println("RTC gagal terhubung.");
}
else
{
  if (!RTC.isrunning())
  {
    Serial.println("RTC tidak berjalan (tanggal belum disesuaikan).");
    //sesuaikan waktu dan tanggal
    RTC.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }
  delay(2000);
  Serial.print("Tanggal, ");
  Serial.print("Waktu, ");
  formatTXT.print("Tanggal, ");
  formatTXT.print("Waktu, ");
}
Serial.print("Suhu 1 (°C), ");
Serial.print("Suhu 2 (°C), ");
Serial.print("Suhu 3 (°C), ");
Serial.print("Suhu 4 (°C), ");
Serial.print("Suhu 5 (°C), ");
Serial.println("Suhu DS (°C)");
formatTXT.print("Suhu 1 (°C), ");
formatTXT.print("Suhu 2 (°C), ");
formatTXT.print("Suhu 3 (°C), ");
formatTXT.print("Suhu 4 (°C), ");
formatTXT.print("Suhu 5 (°C), ");
formatTXT.println("Suhu DS (°C)");
}

void loop()
{
  DateTime now = RTC.now();
  delay(2000);
  /*

```

Lampiran 2 – Code Arduino 1 (lanjutan)

```

* Pencetakan Tanggal dan Waktu
*/
if (now.month() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.month(), DEC);
Serial.print("/");
formatTXT.print(now.month(), DEC);
formatTXT.print("/");
if (now.day() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.day(), DEC);
Serial.print("/");
formatTXT.print(now.day(), DEC);
formatTXT.print("/");
Serial.print(now.year(), DEC);
Serial.print(", ");
formatTXT.print(now.year(), DEC);
formatTXT.print(", ");
if (now.hour() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.hour(), DEC);
Serial.print(":");
formatTXT.print(now.hour(), DEC);
formatTXT.print(":");
if (now.minute() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.minute(), DEC);
Serial.print(":");
formatTXT.print(now.minute(), DEC);
formatTXT.print(":");
if (now.second() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.second(), DEC);
formatTXT.print(now.second(), DEC);
delay(500);

for (int i = 0; i < 4; i++)
{

  tcmentah[i] = thermocouple[i].readCelsius();

```


Lampiran 2 – Code Arduino 1 (lanjutan)

```

//Serial.print(" ");
//Serial.print(tcmentah[i], 2);
//Serial.print(" ");
//formatTXT.print(" ");
//formatTXT.print(tcmentah[i], 2);
//formatTXT.print(" ");

}

for (int i = 0; i < 4; i++)
{
  switch (i)
  {
    case 0:
      tckalman[i] = KF1.updateEstimate(tcmentah[i]);
      tckalmankalibrasi[i] = (0.9959 * tckalman[i]) - 2.6581;
      break;
    case 1:
      tckalman[i] = KF2.updateEstimate(tcmentah[i]);
      tckalmankalibrasi[i] = (0.9822 * tckalman[i]) - 1.3458;
      break;
    case 2:
      tckalman[i] = KF3.updateEstimate(tcmentah[i]);
      tckalmankalibrasi[i] = (0.9956 * tckalman[i]) - 2.5732;
      break;
    case 3:
      tckalman[i] = KF4.updateEstimate(tcmentah[i]);
      tckalmankalibrasi[i] = (0.9918 * tckalman[i]) - 3.3102;
      break;
  }

  /*Serial.print(" ");
  Serial.print(tckalman[i], 2);
  formatTXT.print(" ");
  formatTXT.print(tckalman[i], 2);*/
  Serial.print(" ");
  Serial.print(tckalmankalibrasi[i], 2);
  formatTXT.print(" ");
  formatTXT.print(tckalmankalibrasi[i], 2);

}
Serial.println(" ");
formatTXT.println(" ");

formatTXT.flush();
delay(1000);

}

```

Lampiran 3 – Code Arduino 2

```

#include <max6675.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <RTCLib.h>
#include <SimpleKalmanFilter.h>

MAX6675 thermocouple[1] = {MAX6675(3,2,A5)};
float tcmentah[1] = {0};
float tckalman[1] = {0};
float tckalmankalibrasi[1] = {0};
SimpleKalmanFilter KF1(0.9, 10, 0.3);

float A;
float V;
float A_2;
float V_2;
float h;

const int SD_pin = 10;
RTC_DS1307 RTC;
File formatTXT;

void setup ()
{
  Serial.begin (9600);
  pinMode (A0, INPUT);
  pinMode (A1, INPUT);
  pinMode (A2, INPUT);
  pinMode (A3, INPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);

  if (!SD.begin(SD_pin))
  {
    Serial.println("SD card tidak terbaca / belum dimasukkan.");
    return;
  }
  else
  { Serial.println("SD card telah terdeteksi."); }
  /*
   * Pembuatan File
   */
  char filename[] = "TEMPC00.txt";
  for (uint8_t i = 0; i < 100; i++)
  {
    filename[5] = i/10 + '0';
    filename[6] = i%10 + '0';
    if (! SD.exists(filename))
    {
      formatTXT = SD.open(filename, FILE_WRITE);
      break;
    }
  }
}

```

Lampiran 3 – Code Arduino 2 (lanjutan)

```

    }
}
/*
 * Validasi Pembuatan File
 */
if (!formatTXT)
{Serial.println("Tidak dapat membuat file");}
else
{Serial.println("File TXT berhasil di buat");}
Serial.println("");
/*
 * Validasi Modul Pembuat Waktu
 */
if (!RTC.begin())
{
    Serial.println("RTC gagal terhubung.");
    formatTXT.println("RTC gagal terhubung.");
}
else
{
    if (!RTC.isrunning())
    {
        Serial.println("RTC tidak berjalan (tanggal belum disesuaikan).");
        //sesuaikan waktu dan tanggal
        RTC.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
    }
    delay(2000);
    Serial.print("Tanggal, ");
    Serial.print("Waktu, ");
    formatTXT.print("Tanggal, ");
    formatTXT.print("Waktu, ");
}
Serial.print("Voltage TEG, ");
Serial.print("Ampere TEG, ");
Serial.print("Voltage PV, ");
Serial.print("Ampere PV,");
Serial.println("Suhu TC5 (°C)");

formatTXT.print("Voltage TEG, ");
formatTXT.print("Ampere TEG, ");
formatTXT.print("Voltage PV, ");
formatTXT.print("Ampere PV,");
formatTXT.println("Suhu TC5 (°C)");

}

void loop ()
{
    DateTime now = RTC.now();
    delay(2000);
}
/*

```

Lampiran 3 – Code Arduino 2 (lanjutan)

```

* Pencetakan Tanggal dan Waktu
*/
if (now.month() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.month(), DEC);
Serial.print("/");
formatTXT.print(now.month(), DEC);
formatTXT.print("/");
if (now.day() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.day(), DEC);
Serial.print("/");
formatTXT.print(now.day(), DEC);
formatTXT.print("/");
Serial.print(now.year(), DEC);
Serial.print(", ");
formatTXT.print(now.year(), DEC);
formatTXT.print(", ");
if (now.hour() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.hour(), DEC);
Serial.print(":");
formatTXT.print(now.hour(), DEC);
formatTXT.print(":");
if (now.minute() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.minute(), DEC);
Serial.print(":");
formatTXT.print(now.minute(), DEC);
formatTXT.print(":");
if (now.second() < 10) {
  Serial.print(0, DEC);
  formatTXT.print(0, DEC);
}
Serial.print(now.second(), DEC);
formatTXT.print(now.second(), DEC);
delay(500);

for (int i = 0; i < 1; i++)
  {tcmentah[i] = thermocouple[i].readCelsius();}
for (int i = 0; i < 1; i++)
{
  switch (i)

```

Lampiran 3 – Code Arduino 2 (lanjutan)

```

{
  case 0:
    tckalman[i] = KF1.updateEstimate(tcmentah[i]);
    tckalmankalibrasi[i] = (0.9806 * tckalman[i]) - 0.4931;
    break;
}

V= analogRead (A1)/41.2; //-----calibrate
A= analogRead (A0)/183.3; //-----calibrate
V_2= analogRead (A2)/41.2; //-----calibrate
A_2= analogRead (A3)/183.3; //-----calibrate

Serial.print (" ");
Serial.print (V);
Serial.print (" V,");
//Serial.print ("\t");
Serial.print (A);
Serial.print (" A,");
Serial.print (V_2);
Serial.print (" V,");
//Serial.print ("\t");
Serial.print (A_2);
Serial.print (" A");

Serial.print(", ");
Serial.println(tckalmankalibrasi[i], 2);

formatTXT.print ("");
formatTXT.print (V);
formatTXT.print (" V,");
//formatTXT.print ("\t");
formatTXT.print (A);
formatTXT.print (" A, ");
formatTXT.print (V_2);
formatTXT.print (" V, ");
//formatTXT.print ("\t");
formatTXT.print (A_2);
formatTXT.print (" A");
formatTXT.print(", ");
formatTXT.println(tckalmankalibrasi[i], 2);

}
formatTXT.flush();
delay(1000);
}

```