



**ANALISA VARIASI LUASAN *HEATSINK* TERHADAP UNJUK KERJA  
MODUL GENERATOR TERMOELEKTRIK (TEG) MEMANFAATKAN  
PANAS BUANGAN KONDENSOR KULKAS**

**SKRIPSI**

Oleh

**Yudha Wiradika  
NIM 141910101020**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

**2019**



**ANALISIA VARIASI LUASAN *HEATSINK* TERHADAP UNJUK KERJA  
MODUL GENERATOR TERMOELEKTRIK (TEG) MEMANFAATKAN  
PANAS BUANGAN KONDENSOR KULKAS**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1) dan mencapai gelar sarjana

Oleh

**Yudha Wiradika**

**NIM 141910101020**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS JEMBER**

**2019**

## PERSEMBAHAN

Segala puji serta syukur kehadirat Allah SWT, Tuhan yang maha esa pemilik seluruh alam semesta baik dunia maupun akhirat. Tidak lupa pula shalawat serta salam turunkan kepada junjunganku Nabi Muhammad SAW. Bersama dengan ini saya persembahkan skripsi ini kepada:

1. Keluargaku, Ayahanda Ahmad Boaz Nursasongko, Ibunda Ratna Yuliasuti, Nenek Moedjiati, Adik Satria Wiradika, serta keluarga yang lainnya yang telah memberikan doa, pengorbanan, *support*, kasih sayang, serta motivasi;
2. Dosen – dosen dari Jurusan Teknik Mesin UNEJ dan dosen lain pada saat mata kuliah umum yang telah memberikan ilmu serta bimbingan hingga saya bisa menyelesaikan studi saya.
3. Teman – teman dari *Thermoelectric and Condenser Research Team*, Mas Dirga, Gilang, dan Boma yang memberikan pengorbanan waktu dan bantuan serta hiburan “*push rank Mobile Legend*” nya dikala pikiran lagi kacau;
4. Keluarga Besar Teknik Mesin UNEJ 2014 (M16) yang selalu membantu, memberi semangat, serta memberikan warna – warni kehidupan dan suka – duka semasa kuliah;
5. Teman – Teman Apart Squad, HMM FT UJ, METIC, KKN UMD 16 desa Kapuran, IKAPEMMA serta teman – teman organisasi lainnya yang telah meberikan ilmu yang sangat berharga selama berkuliah di Universitas Jember;
6. Teman – temanku di Madiun, baik teman TK, SD, SMP, dan SMA serta teman ngopi yang sudah memberi semangat dan wejangan hidup.
7. Setra seluruh pihak – pihak yang mendukung dan tidak bisa saya sebutkan satu – persatu.

## MOTTO HIDUP

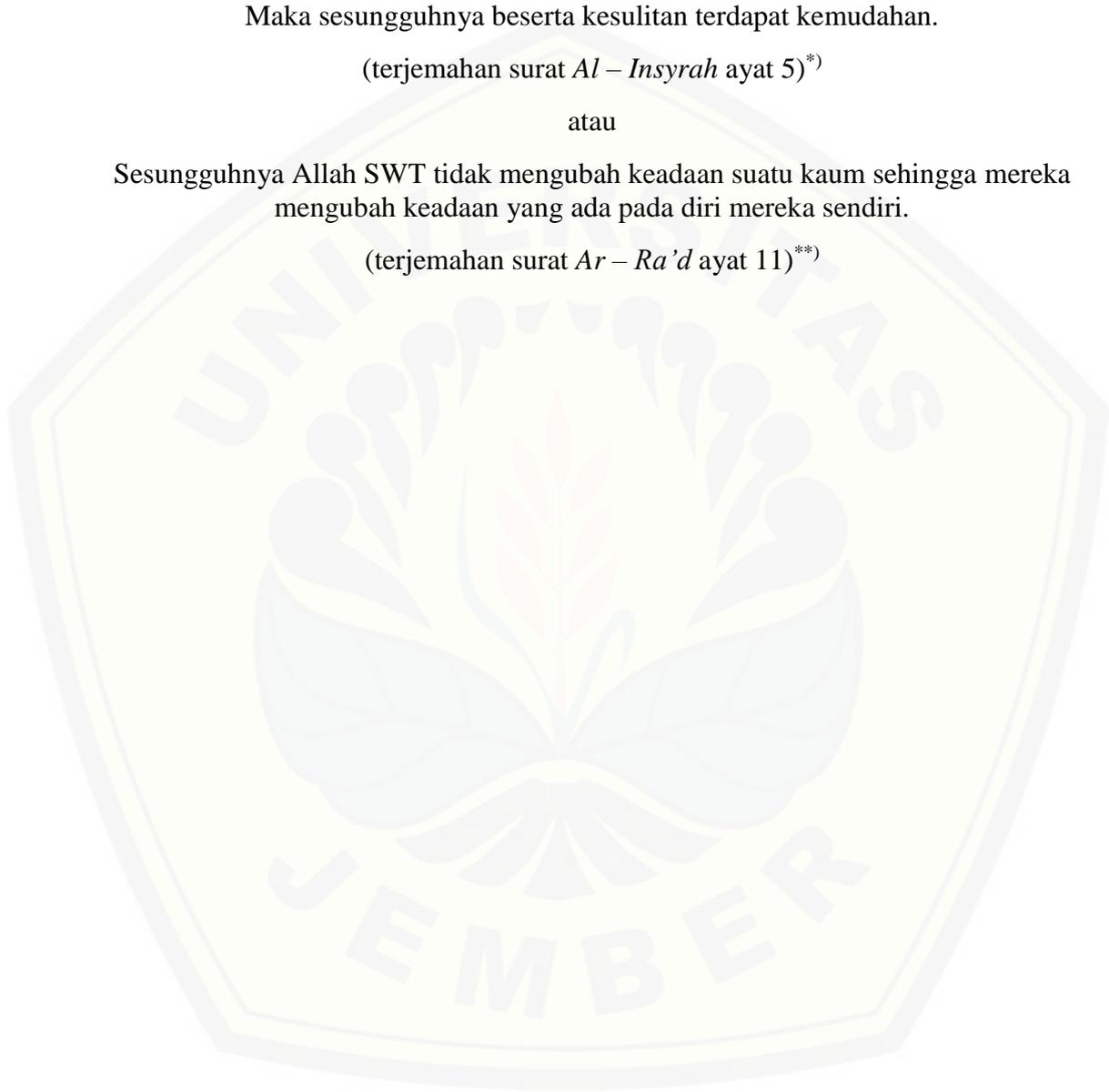
Maka sesungguhnya beserta kesulitan terdapat kemudahan.

(terjemahan surat *Al – Insyrah* ayat 5)<sup>\*)</sup>

atau

Sesungguhnya Allah SWT tidak mengubah keadaan suatu kaum sehingga mereka mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri.

(terjemahan surat *Ar – Ra'd* ayat 11)<sup>\*\*)</sup>



---

<sup>\*)\*\*)</sup> Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT. Kumudasmoro Grafindo.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yudha Wiradika

NIM : 141910101020

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisa Variasi Luasan *Heatsink* Terhadap Unjuk Kerja Modul Generator Termoelektrik (TEG) Memanfaatkan Panas Buangan Kondensor Kulkas” adalah benar – benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Januari 2019

Yang menyatakan,

Yudha Wiradika

NIM 141910101020

**SKRIPSI**

**ANALISIA VARIASI LUASAN *HEATSINK* TERHADAP UNJUK KERJA  
MODUL GENERATOR TERMOELEKTRIK (TEG) MEMANFAATKAN  
PANAS BUANGAN KONDENSOR KULKAS**

Oleh:

Yudha Wiradika

NIM 141910101020

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Nasrul Ilminnafik S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Hari Arbiantara Basuki S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Analisa Variasi Luasan *Heatsink* Terhadap Unjuk Kerja Modul Generator Termoelektrik (TEG) Memanfaatkan Panas Buangan Kondensor Kulkas” karya Yudha Wiradika telah diuji dan disahkan pada :

hari, tanggal : Senin, 21 Januari 2019

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tim Penguji :

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

Dr. Nasrul Iminnafik S.T., M.T

Hari Arbiantara Basuki S.T., M.T.

NIP 197111141999031002

NIP 196709241994121001

Dosen Penguji I,

Dosen Penguji II,

Ir. Digo Listyadi S., M.Sc.

Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T.

NIP 19680617199501001

NIP 196812071995121002

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M. UM.

NIP 196612151995032001

## RANGKUMAN

**Analisa Variasi Luasan *Heatsink* Terhadap Unjuk Kerja Modul Generator Termoelektrik (TEG) Memanfaatkan Panas Buangan Kondensor Kulkas;** Yudha Wiradika, 141910101020; 2019; 56 Halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Energi panas merupakan sebuah energi yang sangat umum diketahui oleh masyarakat luas dan sering dijumpai di seluruh dunia. Dengan adanya sumber panas, maka akan mempermudah kegiatan – kegiatan yang dilakukan manusia. Energi panas pada umumnya hanya digunakan manusia untuk memanaskan suatu benda dan kemudian energi tersebut tebuang sia – sia ke lingkungan tanpa dikonversi menjadi energi lainnya. Seiring dengan meningkatnya permintaan energi yang sangat tinggi, mulai timbul pemikiran untuk megembangkan teknologi baru dengan memanfaatkan energi panas yang terbuang percuma sebagai proses untuk mengurangi dampak pencemaran lingkungan. Perkembang teknologi terbarukan yang dimaksud merujuk kepada pemanfaatan suatu perangkat *solid-state* untuk menghasilkan energi listrik dari suatu limbah panas yang terbuang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performa modul termoelektrik untuk memanfaatkan limbah panas hasil buangan dari kondensor kulkas tipe 6U.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan membandingkan variasi luasan *heatsink*  $120\text{ cm}^2$ ,  $96\text{ cm}^2$ , dan  $72\text{ cm}^2$  untuk mengetahui daya yang dihasilkan serta efisiensinya terhadap panas buangan kondensor kulkas tipe 6U. Data yang diperoleh pada penelitian ini meliputi, temperatur, tegangan, dan arus yang dihasilkan modul termoelektrik. Pengambilan data dilakukan selama 120 menit pengujian dan dilakukan pengulangan 3 kali pengambilan data.

Pada penelitian ini diperoleh hasil daya *output* dan nilai efisiensi pada variasi luasan *heatsink*  $120\text{ cm}^2$  lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Hal itu dikarenakan luasan tersebut paling besar membuang panas ke lingkungan sehingga menyebabkan temperatur sisi dingin termoelektrik terjaga rendahnya. Oleh karena

itu perbedaan temperatur sisi dingin dan sisi panas modul termoelektrik yang dihasilkan variasi luasan *heatsink*  $120\text{cm}^2$  menjadi besar dan menghasilkan tegangan yang besar pula.

Pada penelitian ini tren yang dihasilkan pada setiap grafik menurun. Hal itu dikarenakan tidak kuatnya *heatsink* sisi dingin yang digunakan untuk membuang panas ke lingkungan sehingga temperatur di sisi dingin modul ikut panas sehingga menyebabkan perbedaan temperatur turun terus – menerus setiap menitnya. Diperlukan kipas untuk membantu mendinginkan heatsik sisi dingin modul supaya perbedaan temperaturnya menjadi lebih besar. Akan tetapi, jika menambahkan kipas pendingin *heatsik* daya *input* akan ditambahkan sehingga mendapatkan efisiensi yang lebih kecil.

## SUMMARY

*Analysis of the Variation of Heatsink's Area Toward the Performance of Thermoelectric Generator Module (TEG) By Using Refrigerator's Condenser Disposal Heat; Yudha Wiradika, 141910101020; 2019; 56 Pages; Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Jember University.*

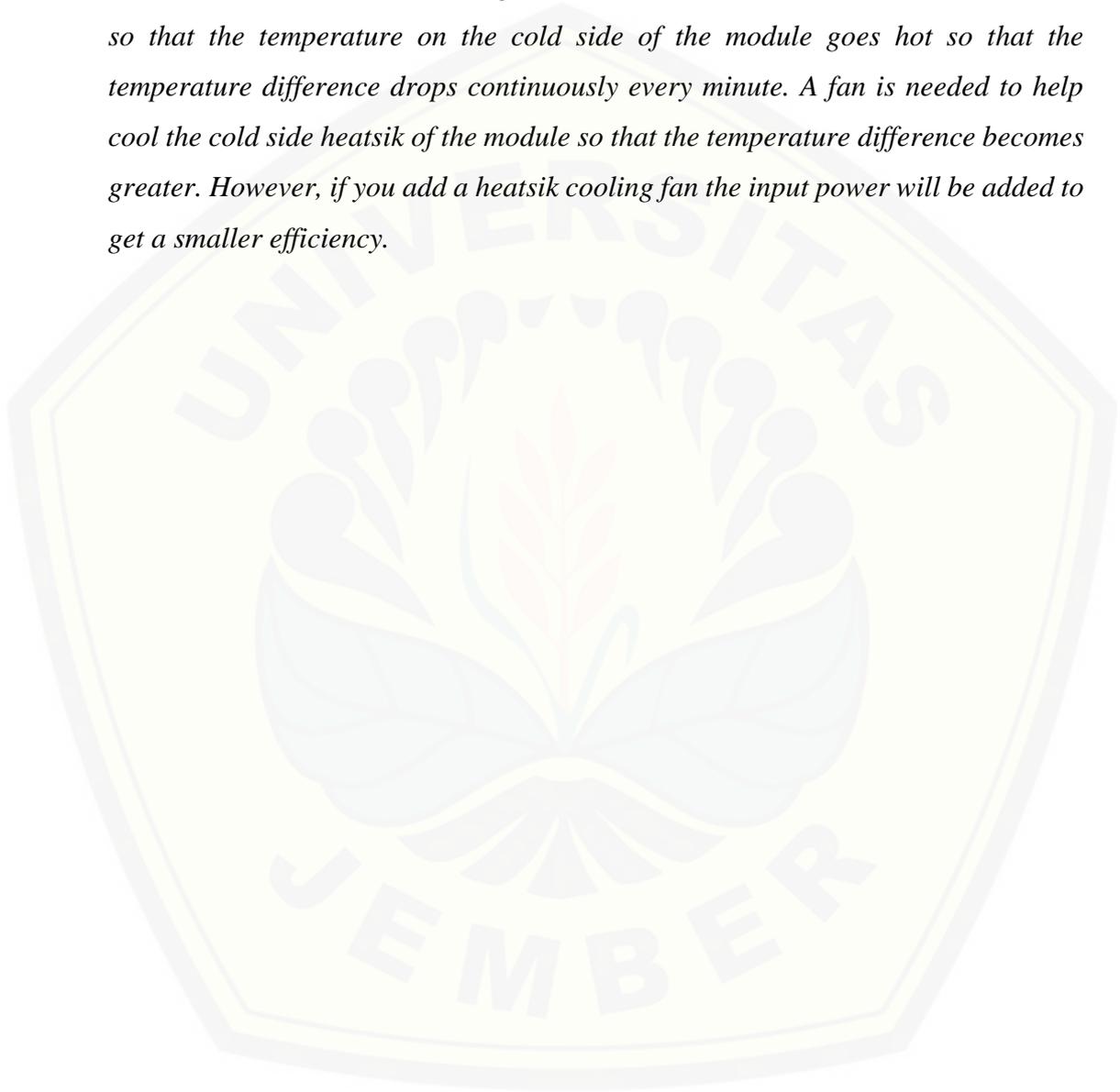
*Heat energy is an energy that is very commonly known by the universal people and is often found throughout the world. With the existence of heat source, it will facilitate activities carried out by humans. Heat energy is generally only used by humans to heat an object and then the energy is wasted into the environment without being converted to other energy. As the demand for energy increases very high, the idea arises to develop new technology by utilizing waste heat energy as a process to reduce the impact of environmental pollution. The development of renewable technology in question refers to the use of a solid-state device to produce electrical energy from waste heat that is wasted. This study aims to determine the performance of thermoelectric modules to utilize waste heat from waste products from type 6U refrigerator's condensers.*

*This study used an experimental method by comparing variations in the heatsink area of 120 cm<sup>2</sup>, 96 cm<sup>2</sup>, and 72 cm<sup>2</sup> to find out the power produced and the efficiency of the heat sink type 6U refrigerator's condenser. The data obtained in this study include, temperature, voltage, and current produced by the thermoelectric module. Data retrieval was carried out for 120 minutes of testing and repeated by 3 times data retrieval.*

*In this study the results of the output power and efficiency values on the variation of the heatsink area were 120 cm<sup>2</sup> higher than the other variations. That is because the area has the highest heat dissipation to the environment, causing the thermoelectric cold side temperature to be maintained low. Therefore the difference in cold side temperature and the heat side of the thermoelectric module resulting in*

*a variation of the 120cm<sup>2</sup> heatsink area becomes large and produces a large voltage as well.*

*In this study the trends generated on each graph decreased. This is because the cold side heatsink is not strong which is used to throw heat into the environment so that the temperature on the cold side of the module goes hot so that the temperature difference drops continuously every minute. A fan is needed to help cool the cold side heatsink of the module so that the temperature difference becomes greater. However, if you add a heatsink cooling fan the input power will be added to get a smaller efficiency.*



## PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisa Variasi Luasan *Heatsink* Terhadap Unjuk Kerja Modul Generator Termoelektrik (TEG) Memanfaatkan Panas Buangan Kondensor Kulkas”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusun skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Dr. Nasrul Iminnafik, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama, Hari Arbiantara Basuki S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
1. Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
2. Bapak/Ibu dan keluarga yang telah memberikan dorongan dan doanya demi terselesaikannya skripsi ini;
3. semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	ii
HALAMAN MOTTO.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN.....	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
RINGKASAN / <i>SUMMARY</i> .....	vii
RINGKASAN / <i>SUMMARY</i> .....	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
DAFTAR SIMBOL.....	xix
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Tujuan dan Manfaat.....</b>	<b>4</b>
1.3.1 Tujuan.....	4
1.3.2 Manfaat.....	4
<b>1.4 Batasan Masalah.....</b>	<b>5</b>
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Termoelektrik.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Efek Termoelektrik.....</b>	<b>6</b>
2.2.1 Efek <i>Seebeck</i> .....	7
2.2.2 Efek <i>Peltier</i> .....	8
2.2.3 Efek <i>Joule</i> .....	10

2.2.4	Efek <i>Thomson</i> .....	10
2.2.5	Efek Konduktivitas Panas.....	12
<b>2.3</b>	<b>Generator termoelektrik (TEG)</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>Material Penyusun Termoelektrik</b> .....	<b>14</b>
<b>2.5</b>	<b><i>Heatsink</i></b> .....	<b>16</b>
<b>2.6</b>	<b>Jenis – Jenis <i>Heatsink</i></b> .....	<b>18</b>
<b>2.7</b>	<b>Mesin Pendingin (<i>Refrigerator</i>)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.8</b>	<b>Komponen Utama Kulkas</b> .....	<b>22</b>
<b>2.9</b>	<b>Daya Listrik</b> .....	<b>25</b>
<b>2.10</b>	<b>Efisiensi Pada Sistem Generator Termoelektrik</b> .....	<b>26</b>
<b>2.11</b>	<b>Penelitian Terdahulu</b> .....	<b>29</b>
2.11.1	Penelitian oleh Date, et al., (2014) .....	29
2.11.2	Penelitian oleh Yilbas, et al., (2014) .....	31
2.11.3	Penelitian Oleh Prasetyo, H.; Setyawan, D. L.; & Muttaqin, A. Z., (2017) .....	32
2.11.4	Penelitian Oleh Arumsari, A. A.; Setyawan, D. L.; & Ramadhan, (2017).....	32
<b>2.12</b>	<b>Hipotesis Penelitian</b> .....	<b>34</b>
<b>BAB 3</b>	<b>METODE PENELITIAN</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Waktu dan Tempat Penelitian</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Alat dan Bahan</b> .....	<b>35</b>
3.2.1	Alat dan Instrumen Penelitian .....	35
3.2.2	Bahan Penelitian.....	35
<b>3.3</b>	<b>Metode Penelitian</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Variabel Penelitian</b> .....	<b>36</b>
3.4.1	Variabel Bebas.....	36
3.4.2	Variabel Terikat .....	37
3.4.3	Variabel Kontrol .....	37
<b>3.5</b>	<b>Prosedur Penelitian</b> .....	<b>38</b>
3.5.1	Tahapan Persiapan dan Pemeriksaan Alat Uji.....	38
3.5.2	Tahapan Pembuatan Variasi Luasan <i>Heatsink</i> .....	39

3.6	<b>Metode Pengambilan Data</b> .....	39
3.7	<b>Rencana Analisa Data</b> .....	40
3.8	<b>Sketsa Rangkaian Alat Uji</b> .....	41
	3.8.1 Desain Alat yang Diujikan .....	41
	3.8.2 Gambar Skema Pengambilan Data .....	42
3.9	<b>Diagram Alur Pengujian</b> .....	44
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	45
4.1	<b>Data Hasil Percobaan</b> .....	45
	4.1.1 Tabel Hasil Pengujian Daya <i>Output</i> (P) .....	45
	4.1.2 Tabel Hasil Pengujian Pelepasan Kalor (q) dan Efisiensi ( $\eta$ ) .....	46
4.2	<b>Analisa Perbedaan Temperatur Generator Termoelektrik</b> .....	47
4.3	<b>Analisa <i>Output</i> Modul Generator Termoelektrik (TEG)</b> .....	48
	4.3.1 Analisa Tegangan <i>Output</i> (V) .....	48
	4.3.2 Analisa Arus yang Dihasilkan (A) .....	49
	4.3.3 Analisa Daya <i>Output</i> (P) .....	51
4.4	<b>Analisa Efisiensi Modul Generator Termoelektrik</b> .....	53
	4.4.1 Analisa Nilai Laju Pelepasan Kalor Kondensor (q) .....	53
	4.4.2 Analisa Nilai Efisiensi Modul Termoelektrik Generator ( $\eta$ ) .....	55
<b>BAB 5</b>	<b>PENUTUP</b> .....	58
5.1	<b>Kesimpulan</b> .....	58
5.2	<b>Saran</b> .....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	60

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Peristiwa efek <i>Seebeck</i> pada logam A dan B .....	7
Gambar 2.2 Efek <i>Peltier</i> yang ditimbulkan dari logam A ke B.....	9
Gambar 2.3 Dua sambungan pada dua suhu beda yang dihubungkan kembali ke belakang dengan menggunakan kabel .....	12
Gambar 2.4 Struktur termoelektrik .....	13
Gambar 2.5 Proses perubahan energi panas menjadi energi listrik .....	14
Gambar 2.6 Jenis – jenis <i>heatsink</i> .....	19
Gambar 2.7 Siklus refrigerasi .....	21
Gambar 2.8 Kompresor .....	22
Gambar 2.9 Kondensor .....	23
Gambar 2.10 Evaporator .....	24
Gambar 2.11 Katup ekspansi .....	25
Gambar 2.12 Hubungan berbagai macam logam semikonduktor tipe-P terhadap temperatur .....	27
Gambar 2.13 Hubungan berbagai macam logam semikonduktor tipe-N terhadap temperatur .....	28
Gambar 2.14 Daya <i>output</i> yang dihasilkan pada keseluruhan variasi .....	30
Gambar 2.15 Besarnya nilai COP terhadap variasi peletakan TEG.....	31
Gambar 2.16 Hasil penelitian variasi panjang pipa kondensor.....	33
Gambar 3.1 Alat uji.....	41
Gambar 3.2 Desain kondensor 6U .....	41
Gambar 3.3 Skema pengambilan temperatur menggunakan <i>data logger</i> .....	42
Gambar 3.4 Skema pengambilan arus dan tegangan <i>output</i> .....	43
Gambar 3.5 Skema diagram alur penelitian .....	44
Gambar 4.1 Perbandingan perbedaan temperatur terhadap waktu.....	47
Gambar 4.2 Perbandingan tegangan <i>output</i> terhadap waktu.....	49
Gambar 4.3 Perbandingan arus terhadap waktu.....	50

Gambar 4.4	Hasil pengujian daya <i>output</i> terhadap waktu .....	51
Gambar 4.5	Hasil daya <i>output</i> pada variasi bahan pendinginan TEG .....	52
Gambar 4.6	Perbandingan nilai <i>figure of merit</i> kondensator terhadap waktu .....	54
Gambar 4.7	Perbandingan nilai efisiensi terhadap waktu .....	55
Gambar 4.8	Efisiensi berbagai macam sumber pembangkit listrik.....	56



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
Tabel 4.1 Hasil pengujian daya <i>output</i> pada variasi luasan <i>heatsink</i> 120 cm <sup>2</sup> .....	45
Tabel 4.2 Hasil perhitungan efisiensi pada variasi luasan <i>heatsink</i> 120 cm <sup>2</sup> .....	46



**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
Lampiran A. Data Hasil Pengujian Daya <i>Output</i> .....	62
Lampiran B. Data Hasil Pengujian Nilai Efisiensi.....	65
Lampiran C. Contoh Perhitungan .....	68
Lampiran D. Desain Kondensor.....	72
Lampiran E. Desain Alat Penelitian.....	73
Lampiran F. Spesifikasi TEG SP-1848-27145 SA .....	76
Lampiran G. Spesifikasi Data <i>Logger</i> .....	77
Lampiran H. Dokumentasi Penelitian.....	78

DAFTAR SIMBOL

SIMBOL	ARTI	SATUAN
A	Luasan	m <sup>2</sup>
$\alpha_{pm} / C$	Koefisien <i>Seebeck</i>	Volt/ °C
$c_p$	Panas spesifik	J/kg °C
$\sigma$	Konduktivitas elektrik bahan	$\Omega^{-1} m^{-1}$
h	Koefisien konveksi	J/ms °C
I	Arus	Ampere
k	Konduktivitas termal	J/ms °C
m	Laju aliran massa	Kg/s
$\eta$	Efisiensi	%
P	Daya <i>output</i>	Watt (J/s)
$\pi_{AB}$	Koefisien <i>Peltier</i>	Volt/ °C
R	Hambatan	$\Omega$
$\Delta T$	Perbedaan temperatur	°C
T1	Temperatur kondensor	°C
T2	Temperatur <i>hot side</i> TEG	°C
T3	Temperatur <i>cold side</i> TEG	°C
T4	Temperatur <i>heatsink</i>	°C
T5	Temperatur masuk kondensor	°C
T6	Temperatur keluar kondensor	°C
T7	Temperatur lingkungan	°C
Tm	Temperatur rata – rata pada kedua sisi TEG	°C
t	Waktu	s
U	Koefisien kalor total	J/s °C
V	Tegangan <i>output</i>	Volt
Z	<i>Figure of Merit</i>	Tidak ada satuan

## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi panas merupakan sebuah energi yang sangat umum diketahui oleh masyarakat luas dan sering dijumpai di seluruh dunia. Dengan adanya sumber panas, maka akan mempermudah kegiatan – kegiatan yang dilakukan manusia. Energi panas diartikan sebagai suatu energi yang terjadi akibat sumber panas sehingga terjadi perubahan temperatur dari panas ke dingin terhadap benda – benda yang dikenainya. Sumber panas adalah sebuah benda yang menghasilkan panas. Sumber panas dapat dihasilkan secara alami maupun buatan. Contoh sumber panas alami adalah panas yang dihasilkan oleh sinar matahari, sedangkan contoh sumber panas buatan berasal dari benda – benda buatan manusia semisal korek api, knalpot kendaraan, gas elpiji, dan juga panas yang dihasilkan oleh kondensor mesin refrigerator (Daehler, Folsom, & Shinohara, 2011).

Energi panas pada umumnya hanya digunakan manusia untuk memanaskan suatu benda dan kemudian energi tersebut tebuang sia – sia ke lingkungan tanpa dikonversi menjadi energi lainnya. Seiring dengan meningkatnya permintaan energi yang sangat tinggi, mulai timbul pemikiran untuk megembangkan teknologi baru dengan memanfaatkan limbah panas yang terbuang percuma sebagai proses untuk mengurangi dampak pencemaran lingkungan. Perkembang teknologi terbarukan yang dimaksud merujuk kepada pemanfaatan suatu perangkat *solid-state* untuk menghasilkan energi listrik dari suatu limbah panas yang terbuang seperti halnya panas *refrigerant* yang dibuang kondensor ke lingkungan sekitar. Perangkat *solid-state* yang dimaksud adalah menggunakan modul generator termoelektrik (TEG) (Yilbas & Sahin, 2014).

Generator termoelektrik (TEG) adalah pilihan yang tepat yang digunakan untuk pemanfaatan limbah panas menjadi energi listrik. Generator termoelektrik (TEG) adalah sebuah perangkat generator listrik yang dapat mengubah energi panas dengan memanfaatkan perbedaan suhu dan langsung berubah menjadi energi listrik

menggunakan cara yang dinamakan fenomena efek *Seebeck*. Prinsip kerja dari termoelektrik adalah dengan berdasarkan efek *Seebeck* yaitu "jika 2 buah logam yang berbeda disambungkan salah satu ujungnya, kemudian diberikan suhu yang berbeda pada sambungan, maka terjadi perbedaan tegangan pada ujung yang satu dengan ujung yang lain" (Muhaimin, 2007). Sifat generator termoelektrik (TEG) yang ramah lingkungan, desain yang sederhana, dan mudah digunakan menjadikannya pilihan utama untuk pemanfaatan limbah panas yang tak terpakai untuk dikonversikan menjadi energi listrik (Yilbas & Sahin, 2014).

Dalam proses pemanfaatan limbah panas, penelitian untuk mendapatkan daya *output* setinggi mungkin terus dilakukan. Agar menghasilkan daya output yang tinggi maka beda temperatur antara panas keluaran kondensor dan lingkungan luar sangatlah berpengaruh. Limbah panas hasil keluaran kondensor pendingin ruangan (AC) dengan menerapkan prinsip perpindahan panas konveksi menghasilkan beda temperatur rata – rata sebesar 34 °C dan dapat menghasilkan listrik bertegangan 3,14 Volt (Ryanurago, Anwar, & Sari, 2013). Selain itu semakin panjang luas penampang *heatsink* yang digunakan, maka semakin besar pula tegangan yang dihasilkan (Date, et al., 2014).

Disisi lain, semakin pendek jumlah U yang digunakan pada kondensor kulkas, semakin besar nilai laju pelepasan kalornya (Arumsari, et al., 2017). Pemasangan generator termoelektrik (TEG) pada sisi kondensor dan pemasangan generator termoelektrik (TEG) di antara kondensor dan evaporator pada mesin pendingin (*refrigerator*). Hasil dari penelitian ini membuktikan bahwa pemasangan generator termoelektrik (TEG) antara kondensor dan evaporator sangat mengganggu kinerja dari mesin pendingin (*refrigerator*) yang mengakibatkan transfer panas hasil panas yang ditolak oleh generator termoelektrik (TEG) ikut berpindah pada sistem pendingin (*refrigerant*). Namun pada pemasangan generator termoelektrik (TEG) pada bagian kondensor tidak mengganggu kinerja mesin pendinginan karena panas yang ditolak generator termoelektrik (TEG) akan terbuang langsung ke lingkungan (Yilbas & Sahin, 2014).

Selain itu, pada analisis nilai energi dan eksergi pada *double-pass* termoelektrik generator (TEG) kolektor surya menunjukkan bahwa efisiensi eksergi dari sistem termal bervariasi dari minimum 7,4% hingga maksimum 8,4% (Khasee, et al., 2013). Sedangkan pada penelitian lain, analisis eksergetik sistem pemulihan limbah panas berdasarkan generator termoelektrik dan siklus *Rankine* organik menunjukkan bahwa sistem *thermoelectric organic* pada siklus *Rankine* cocok untuk memulihkan panas limbah dari mesin karena fakta bahwa generator termoelektrik dapat dioperasikan pada rentang suhu sumber panas dan dengan demikian meningkatkan ekonomi bahan bakar (Shu, et al., 2012). Pengaruh linear dan komponen non-linear dalam ketergantungan suhu thermoelectric properti pada efisiensi konversi energi menunjukkan bahwa itu ketergantungan suhu sifat generator termoelektrik (TEG) memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi termal pada modul (Yamashita, 2009). Kinerja generator termoelektrik pada hidraulik *multistage* menunjukkan bahwa penambahan modul akan menghasilkan peningkatan yang signifikan terhadap daya yang dihasilkan (Reddy, et al., 2014).

Berdasarkan kondisi yang ada di atas, penelitian guna memanfaatkan panas buangan agar bisa digunakan kembali akan diteliti. Memanfaatkan panas hasil buangan kondensor ke lingkungan dan merubahnya menjadi energi listrik dengan menggunakan perangkat generator termoelektrik (TEG) secara konduksi. Dengan menggunakan proses perpindahan panas secara konduksi diharapkan panas buangan dari kondensor dapat diserap maksimal oleh generator termoelektrik (TEG) sehingga menghasilkan beda temperatur yang tinggi agar dapat menghasilkan *output* berupa daya listrik yang maksimal. Pada penelitian ini juga digunakan *heatsink* sebagai penghantar panas supaya sisi dingin yang berasal dari suhu lingkungan tidak ikut panas sebagai antisipasi memperoleh beda temperatur yang kecil.

## 1.2 Rumusan Masalah

Sesuai kondisi yang sering dialami pada permasalahan yang ada di atas, maka muncul berbagai rumusan masalah pada penelitian ini yang diantaranya sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi ukuran *heatsink* terhadap beda temperatur yang didapatkan pada sisi dingin dan sisi panas modul generator termoelektrik generator (TEG)?
2. Bagaimana pengaruh variasi ukuran *heatsink* terhadap *output* yang dihasilkan dari modul generator termoelektrik (TEG)?
3. Bagaimana pengaruh variasi *heatsink* terhadap generator termoelektrik (TEG) terhadap efisiensi sistem termoelektrik generator (TEG)?

## 1.3 Tujuan dan Manfaat

### 1.3.1 Tujuan

Dari rumusan masalah di atas muncul tujuan yang mendasari penulis melakukan penelitian tersebut, di antaranya adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi ukuran *heatsink* terhadap beda temperatur yang didapatkan pada sisi dingin dan sisi panas modul generator termoelektrik generator (TEG).
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi ukuran *heatsink* terhadap *output* yang dihasilkan dari modul generator termoelektrik (TEG).
3. Untuk mengetahui pengaruh variasi *heatsink* terhadap generator termoelektrik (TEG) terhadap efisiensi sistem termoelektrik generator (TEG).

### 1.3.2 Manfaat

Manfaat yang diharapkan setelah melakukan penelitian tersebut adalah :

1. Memeroleh informasi tentang cara memanfaatkan limbah panas hasil buangan kondensor kulkas menjadi energi listrik dengan menerapkan prinsip generator termoelektrik (TEG).

2. Sebagai bahan pertimbangan dan masukan bagi peningkatan kinerja perangkat generator termoelektrik (TEG) dan mesin pendingin (*refrigeration*).
3. Sebagai bahan acuan atau sumber informasi bagi penelitian selanjutnya dalam proses pemanfaatan limbah energi panas yang tidak terpakai serta pengembangan teknologi perangkat termoelektrik generator (TEG).

#### 1.4 Batasan Masalah

Adapun beberapa batasan masalah yang digunakan untuk pengambilan data dan analisa sehingga mempermudah menganalisa permasalahan, di antaranya sebagai berikut:

1. Sistem terisolasi sempurna.
2. Semua alat dianggap sudah terkalibrasi.
3. Kecepatan udara dianggap konstan.
4. Performa sistem refrigerasi diabaikan.
5. Kelembaban spesifik diabaikan.
6. Hanya menghitung pelepasan kalor pada kondensor kulkas dan daya output yang dihasilkan modul TEG untuk mencari nilai efisiensi.
7. Kondisi steady pada mesin pendingin (*refrigerator*) diperkirakan tiga jam setelah penyalaan.
8. Hasil pada tiap variasi diperoleh dari nilai rata – rata tiga kali pengambilan data.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Termoelektrik

Termoelektrik adalah sebuah perangkat yang prinsip kerjanya berdasarkan suatu prinsip yang dinamakan *Seebeck Effect*, dimana “jika dua logam dengan jenis yang berbeda – beda disatukan dibagian ujungnya dan selanjutnya diberi suhu yang berbeda pada sambungan maka akan menghasilkan beda tegangan pada kedua ujungnya” (Muhaimin, 2007). Termoelektrik memiliki ukuran yang simpel sehingga membuat alat ini menjadi sangat kompetitif karena modelnya yang sederhana, murah dan mudah diukur dibandingkan dengan mesin pemanas tradisional berukuran besar. Termoelektrik memiliki efisiensi yang lebih rendah dan sistem dari termoelektrik dapat dengan mudah dirancang untuk beroperasi dengan sumber panas kecil dan beda temperatur kecil. Generator kecil semacam itu dapat diproduksi massal untuk digunakan dalam pemulihan panas limbah otomotif atau pembangkit listrik tenaga panas dari rumah tangga. Termoelektrik di era sekarang bahkan sudah berukuran sederhana yang berfungsi untuk memanaskan panas tubuh untuk menyalakan arloji (Snyder, 2008).

### 2.2 Efek Termoelektrik

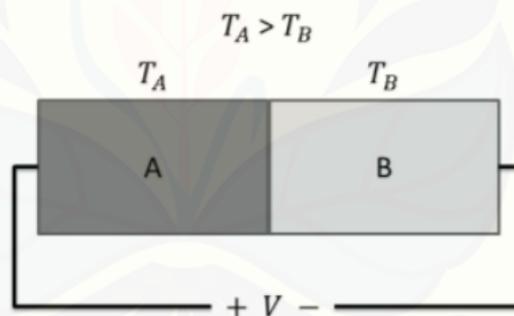
Efek termoelektrik adalah sebuah fenomena dari proses perpindahan panas dengan gerak gaya listrik (GGL). Jika perpindahan panas yang terjadi hanya searah, seperti halnya gerak gaya listrik GGL menjadi panas dan tidak dapat kembali menjadi energi listrik, peristiwa tersebut dapat dikatakan sebagai proses tak mampu balik. Jika arus melewati sebuah termokopel maka akan terjadi lima proses termoelektrik.

Kelima efek termoelektrik tersebut antara lain: efek Seebeck, efek konduksi panas, efek Tompson, efek Joulean, dan efek Peltier. Pada kelima efek termoelektrik tersebut akan muncul secara bersamaan pada proses dari sebuah sistem termoelektrik berlangsung (Tambunan, 2000).

### 2.2.1 Efek *Seebeck*

Konsep efek *Seebeck* menggambarkan bahwa jika terdapat dua buah material berbahan logam (biasanya bersifat semikonduktor) yang tersambung berada di lingkungan dengan dua temperatur yang berbeda, maka pada material logam akan menghasilkan arus listrik atau gaya gerak listrik (GGL). Kelebihan dari prinsip kerja efek *Seebeck* yaitu dapat digunakan untuk pembangkit listrik termoelektrik (Medina, 2017).

Prinsip kerja dari efek *Seebeck* dapat menjadi cara alternatif pembangkit listrik termoelektrik yang menghasilkan energi listrik yang cukup besar serta penghematan energi listrik yang cukup tinggi. Sehingga efek *Seebeck* dapat menjadi solusi untuk memenuhi keperluan energi listrik yang semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk (Medina, 2017).



Gambar 2.1 Peristiwa efek *Seebeck* pada logam A dan B (Sulistyanto, 2014)

Pada pengaplikasiannya, efek *Seebeck* sering dipergunakan pada sistem alat termokopel karena dua logam yang saling bersimpangan dan bertujuan untuk mengukur beda temperature langsung dan temperatur mutlak. Terdapat gerak gaya listrik (GGL) yang dihasilkan oleh efek *Seebeck* dan sering juga disebut dengan istilah GGL termal *Seebeck* (Sulistyanto, 2014).

Hubungan temperature dan GGL termal *Seebeck* dapat ditemukan pada Persamaan 2.1 berikut ini:

$$V = \alpha_{pn}(T_h - T_c) \quad (2.1)$$

Dimana:

$V$  = GGL termal *Seebeck* (V)

$\alpha_{pn}$  = Koefisien *Seebeck* (V/°C)

$T_h$  = Temperatur panas (°C)

$T_c$  = Temperatur dingin (°C)

### 2.2.2 Efek *Peltier*

Efek *Peltier* merupakan fenomena utama yang diterapkan dalam modul termoelektrik yang dikemukakan oleh Jean Peltier. Fenomena ini merupakan kebalikan dari efek *Seebeck*, dimana terjadinya aliran kalor pada dua jenis logam yang tersusun seperti dalam Gambar 2.2 sebagai akibat adanya aliran arus listrik (Sulistyanto, 2014).

Besarnya aliran kalor pada kedua logam tersebut sebanding dengan besar arus yang mengalir, yaitu:

$$q = \pi_{AB}I \quad (2.2)$$

Dimana:

$q$  = Laju aliran kalor (J/s)

$\pi_{AB}$  = Koefisien *Peltier* (V/°C)

$I$  = Arus listrik (A)

Lebih lanjut, hubungan koefisien *Peltier* dengan koefisien *Seebeck* telah dirumuskan oleh hubungan *Kelvin* sebagai berikut:

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB}T \quad (2.3)$$

Dimana:

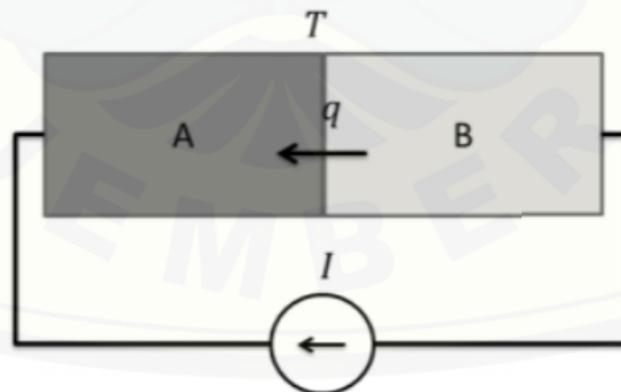
$T$  = Suhu logam ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\pi_{AB}$  = Koefisien *Peltier* ( $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha_{AB}$  = Koefisien *Seebeck* ( $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ )

Hal ini menunjukkan bahwa koefisien *Peltier* bergantung pada suhu logam yang terdapat pada modul termoelektrik. Semakin tinggi suhu logam maka makin cepat laju aliran kalor, seperti dalam Persamaan 2.4.

$$q = \alpha_{AB}IT \quad (2.4)$$



Gambar 2.2 Efek *Peltier* yang ditimbulkan dari logam A ke B (Sulistyanto, 2014)

### 2.2.3 Efek Joulean

Efek *Joulean* adalah timbulnya panas yang diakibatkan dari aliran arus listrik dikarenakan gaya gerak listrik (GGL) terhadap efek *Seebeck*. Jika arus listrik yang mengalir semakin besar, maka akan semakin tinggi temperatur pada terminal panas termoelektrik. Panas *Joulean* dapat diketahui menggunakan Persamaan 2.5 berikut:

$$q = I^2 R \quad (2.5)$$

Dimana:

q = Panas Joulean (J/s)

$I^2$  = Electric current (A)

R = Hambatan ( $\Omega$ )

### 2.2.4 Efek Thomson

Efek *Thomson* menjelaskan bahwa tiap konduktor yang membawa arus dengan beda temperatur pada dua titik yang berbeda baik menyerap ataupun melepas energi panas tergantung pada bahan termoelektrik yang digunakan.

Bahan yang memiliki konduktivitas rendah akan berdampak kepada konsumsi listrik yang besar pada proses pendinginan karena waktu yang dibutuhkan dalam proses pendinginan semakin lama.

Karena pembawa muatan pada model semikonduktor dianggap partikel bebas, masing-masing pembawa dikaitkan dengan energi panas  $(3/2) kT$ . Jadi, ketika sebuah partikel bergerak dari bawah ke suhu yang lebih tinggi, ia akan menyerap panas dari sekitarnya, dan ketika bergerak ke arah lain, ia akan memberikan panas ke dalamnya (Lachish, 2017).

Ketika pembawa muatan bergerak bolak-balik antara dua titik dengan suhu yang berbeda, panas yang diserap pada titik yang lebih panas akan dipancarkan pada titik dingin tanpa aliran muatan bersih, sehingga berkontribusi terhadap konduksi panas. Bila arus bersih pembawa muatan tidak nol, karena di bawah pengaruh medan listrik, akan terjadi emisi bersih atau penyerapan panas di

sepanjang konduktor yang bergantung pada arah aliran. Dengan demikian, konduksi termal dan efek *Thomson* adalah hasil dari perubahan kandungan panas pembawa muatan saat mereka bergerak sepanjang gradien suhu. Konduksi termal adalah hasil pergerakan pembawa seimbang dengan arus rata-rata nol, dan efek *Thomson* adalah hasil penyimpangan dari keseimbangan ini. Kerapatan arus dalam sebuah kawat adalah  $J = n v$ , di mana  $n$  adalah densitas pembawa muatan dan  $v$  adalah kecepatan sepanjang kawat (Lachish, 2017).

Selama waktu  $\Delta t$ ,  $J\Delta t$  pembawa memasukkan segmen kawat pada  $x$  dimana suhunya adalah  $T(x)$ , pindahkan jarak  $\Delta x = v \Delta t$ , dan nomor yang sama tinggalkan di  $x + \Delta x$  dimana suhunya adalah  $T(x + \Delta x)$ . Energi kinetik rata-rata pembawa adalah  $(3/2) kT$ , sehingga  $\Delta q$ , jumlah energi yang ditransfer di segmen kawat  $\Delta x$  ke sekitarnya selama  $\Delta t$  adalah:

$$\Delta q = (3/2)k(T(x+\Delta x) - T(x))J\Delta t \quad (2.6)$$

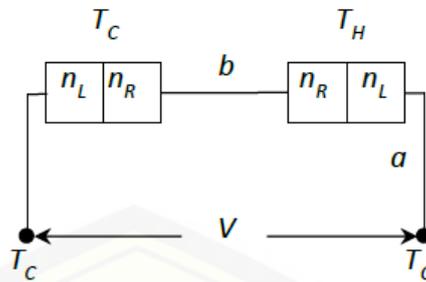
Tingkat aliran panas ke sekitarnya adalah:

$$\Delta q / \Delta t = (3/2)kJ\Delta T \quad (2.7)$$

Jadi koefisien Thomson adalah:

$$K = (3/2)k \quad (2.8)$$

Gambar 2.3 menunjukkan konfigurasi klasik dua sambungan pada dua suhu yang berbeda TC dan TH yang dihubungkan kembali ke belakang, dan dua kabel, a dan b, di bawah gradien suhu TH-TC.



Gambar 2.3 Dua sambungan pada dua suhu beda yang dihubungkan kembali ke belakang dengan menggunakan kabel (Lachish, 2017)

Tegangan output EMF dari rangkaian sama dengan jumlah perbedaan potensial pada keempat segmen. Wire-a terbuat dari bahan  $n_L$  dan wire-b terbuat dari bahan  $n_R$ . Menurut penurunan voltase sepanjang kabel tidak bergantung pada konsentrasi pembawa muatan, jadi sama pada kedua kabel. Karena kabel berada di bawah gradien suhu yang berlawanan, perbedaan potensial mereka akan dibatalkan. Dengan menggunakan tegangan keluaran keseluruhan,  $eV = k (T_H - T_C) \ln (n_L/n_R)$ , sama dengan yang dihitung untuk efek *Seebeck* reversibel dalam (Lachish, 2017).

### 2.2.5 Efek Konduktivitas Panas

Efek konduksi panas dapat terjadi pada saat sebuah ujung jembatan termokopel dipertahankan pada temperature yang lebih tinggi dari ujung lainnya, maka terjadi aliran panas ke ujung yang temperaturnya lebih rendah.

Efek konduksi pada termoelektrik ini bersifat tidak dapat balik . Konduksi yang terjadi secara elektrik dapat dilihat pada Persamaan 2.9 berikut ini:

$$Q_k = U(T_h - T_c) \quad (2.9)$$

Dimana:

$q_k$  = Kalor konduksi (J/s)

$T_h$  = Temperatur panas termoelektrik ( $^{\circ}\text{C}$ )

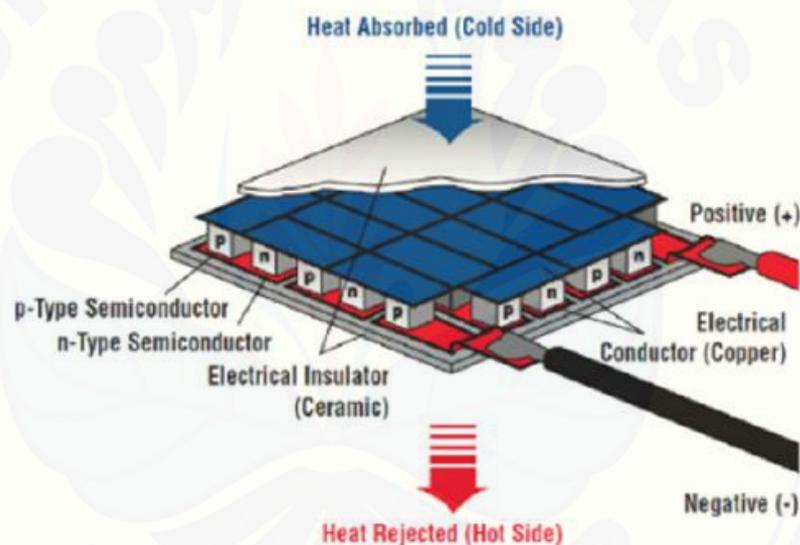
$T_c$  = Temperatur dingin termoelektrik ( $^{\circ}\text{C}$ )

$U$  = Koefisien panas total ( $\text{W}/^{\circ}\text{C}$ )

Efek konduksi panas dapat terjadi pada saat sebuah ujung jembatan termokopel dipertahankan pada temperature yang lebih tinggi dari ujung lainnya, maka terjadi aliran panas ke ujung yang temperaturnya lebih rendah.

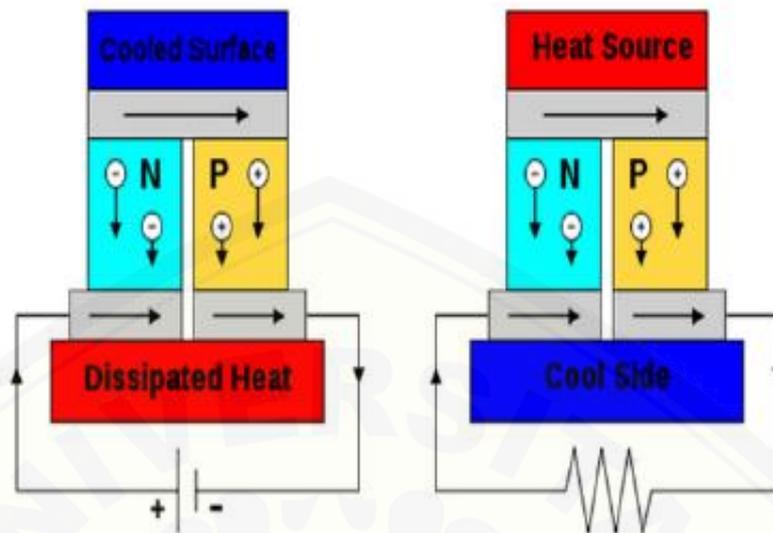
### 2.3 Generator termoelektrik (TEG)

Generator termoelektrik (TEG) merupakan sebuah perangkat yang memiliki prinsip kerjanya mengacu kepada efek *Seebeck*. Tegangan yang dihasilkan dari perangkat ini bergantung pada beda temperatur pada kedua sisi perangkat serta karakterisasi dari material konduksi, namun distribusi panas pada konduktor tidak berpengaruh terhadap nilai tegangan yang dihasilkan perangkat (Muhaimin, 2007).



Gambar 2.4 Struktur termoelektrik (Ryanurago, Anwar, & Sari, 2013)

Pada Gambar 2.4 menerangkan bahwa modul termoelektrik terdiri dari beberapa termokopel yang dibuat dari dua jenis logam semikonduktor. Logam yang sering digunakan untuk bahan termoelektrik ini biasanya adalah logam semikonduktor jenis *Bismut Telluride* ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ).



Gambar 2.5 Proses perubahan energi panas menjadi energi listrik (Ryanurago, Anwar, & Sari, 2013)

Pada Gambar 2.5 menjelaskan bahwa saat terjadi beda potensial, elektron dilepas dari logam semikonduktor Tipe-P dan dialirkan menuju logam semikonduktor Tipe-N dan juga elektron tersebut akan menyerap kalor yang ada pada sisi dingin. Sebaliknya, ketika elektron mengalir dari logam semikonduktor Tipe-N menuju ke logam semikonduktor Tipe-P elektron akan dilepaskan menuju ke sisi panas termoelektrik. Selain itu, logam semikonduktor Tipe-N diberi elektron tambahan dari impurities, sehingga jumlah elektron yang dimiliki logam semikonduktor Tipe-N ini menjadi lebih banyak. Kebalikan dari logam semikonduktor Tipe-N, pada logam semikonduktor Tipe-P diberikan impurities yang menjadikan jumlah elektronnya berkurang (Ryanurago, Anwar, & Sari, 2013).

#### 2.4 Material Penyusun Termoelektrik

Termoelektrik tersusun atas dua jenis logam semikonduktor yang menjadi tipe-n dan tipe-p. Adapun material logam semikonduktor yang sering digunakan untuk penyusunan perangkat generator termoelektrik (TEG) adalah:

a. *Silicon Germanium (SiGe)*

*Silicon Germanium (SiGe)* adalah sebuah logam semikonduktor yang dapat menyerap panas dengan temperatur yang berkisar antara 750° C sampai dengan 1000° C. Logami ini dapat menyerap panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan logam semikonduktor lain yang sering digunakan sebagai penyusun perangkat generator termoelektrik (TEG). Akan tetapi, logam ini harganya terbilang sangat mahal sehingga untuk biaya perakitan perangkat generator termoelektrik (TEG) juga teramat besar.

b. *Lead Telluride (PbTe)*

*Lead Telluride (PbTe)* adalah sebuah logam semikonduktor yang memiliki nilai unjuk kerja menengah dibandingkan dengan logam semikonduktor lainnya untuk digunakan sebagai penyusun perangkat generator termoelektrik (TEG). Logam ini memiliki kinerja untuk penyerapan panas yang berkisar pada temperatur 400° C sampai dengan 650° C.

c. *Bismuth Telluride (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)*

*Bismuth Telluride (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)* adalah logam semikonduktor yang sangat sering dijumpai sebagai logam penyusun perangkat generator termoelektrik (TEG). Logam ini dapat menyerap panas pada temperatur yang berkisar antara 300° C sampai dengan 350° C. Material ini biasanya digunakan sebagai pelapis elemen sisi dingin perangkat generator termoelektrik (TEG). Selain itu, kombinasi dari proses pendinginan dan pemanasan yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur yang timbul setelah adanya gaya gerak listrik (GGL) yang timbul pada perangkat. Efisiensi dari daya keluaran yang dihasilkan dari material ini lebih kecil, namun dengan tersedianya sumber panas yang tidak terlalu besar maka daya yang diinginkan akan tercapai.

Perangkat generator termoelektrik (TEG) memiliki beberapa karakteristik yang diantaranya adalah *thermal conductivity*, *thermoelectric power*, dan *internal resistance* yang memiliki hubungan yang diakibatkan kecepatan dari elektron yang berpindah pada dua logam semikonduktor. Panas yang dilepaskan menuju ke sisi dingin akan sebanding terhadap temperatur absolut pada sisi tersebut serta jumlah elektron yang berpindah juga sebanding. Apabila pada kedua sisi perangkat termoelektrik memiliki beda temperatur maka panas pada sisi panas akan berpindah menuju ke sisi dingin sehingga mengakibatkan *power loss*. *Power loss* harus dihindari demi kelancaran kinerja perangkat dengan cara mengurangi kapasitas panas yang diberikan pada sisi panas perangkat.

Perangkat generator termoelektrik (TEG) tersusun atas lapisan keramik pada permukaannya. Keramik ini memiliki fungsi sebagai isolator pada perangkat. Selain itu keramik juga berguna sebagai media perpindahan panas dari sumber panas menuju logam semikonduktor yang ada pada perangkat. Setelah keramik terdapat konduktor listrik yang menghubungkan tipe-P dan tipe-N yang terpasang secara beriringan. Konduktor listrik ini biasanya terbuat dari bahan logam diantaranya timah dan tembaga namun ada juga yang menggunakan perak.

## 2.5 *Heatsink*

Suatu bagian yang terpenting pada suatu sistem pendingin termoelektrik adalah alat yang dapat digunakan untuk menukar panas (*heat exchanger*). Alat penukar panas (*heat exchanger*) yang biasa digunakan adalah *heatsink*. *Heatsink* dapat diartikan sebagai material yang digunakan untuk menyerap panas yang dibuat dari material yang memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi. Pada umumnya, material yang digunakan untuk pembuatan *heatsink* dapat dibedakan menjadi beberapa jenis. Jenis – jenis material tersebut antara lain adalah :

### a. *Aluminium*

*Heatsink* yang terbuat dari material aluminium biasanya memiliki nilai konduktivitas termal dibawah emas, perak, ataupun tembaga. Hal ini mengakibatkan penyerapan panasnya kurang sempurna dan juga kemampuan

pelepasan kalor ke lingkungan sangat cepat tetapi saat penyerapan kalor masih kurang maksimal. Keunggulan lain dari material ini adalah berat material yang lebih ringan dari tembaga dan harganya yang murah.

b. Tembaga

Material Tembaga memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dari aluminium. Hal ini mengakibatkan penyerapan panasnya lebih unggul dari pada material aluminium. Kekurangan dari material ini adalah tidak dapat melepas kalor secara cepat ke lingkungan, lebih berat ketimbang *aluminium*, serta proses produksi yang terbilang rumit.

c. Perpaduan Tembaga dan *Aluminium*

Material heatsink ini merupakan perpaduan dari dua buah material yang memiliki kekuatan dan kelemahan pada masing – masing material. Proses perpaduan tersebut dilakukan agar heatsink memiliki hasil unggul dimana dapat menerima dan melepas kalor lebih baik dan cepat.

d. Emas dan Perak

Material pembuat heatsink ini memiliki nilai konduktivitas termal paling tinggi namun sering tidak jumpai di pasaran. Hal itu dikarenakan karena mahalnya material dan juga proses produksinya yang terbilang sangat rumit. Oleh karena itu heatsink dengan material ini jarang diminati oleh masyarakat yang ingin menggunakan *heatsink*.

*Heatsink* bekerja dengan cara menyerap kalor dari suatu sumber panas atau yang memiliki temperatur tinggi dan tersebar di keseluruhan sirip heatsink yang memiliki temperatur rendah sehingga pada bagian sumber yang memiliki temperatur tinggi menjadi berkurang. Bagian heatsink yang dipasang pada sisi panas modul pendingin termoelektrik terjadi dua jenis proses perpindahan kalor antara lain adalah konduksi dan konveksi. Perpindahan kalor dari sumber panas menuju heatsink dijalankan dengan cara sistem konduksi atau menggunakan hantaran sehingga nilai konduktivitas dan luas pada heatsink memiliki pengaruh besar terhadap proses perindahan kalor. Proses perpindahan kalor dari heatsink menuju ke lingkungan luar bisa dilakukan dengan cara konveksi baik secara paksa

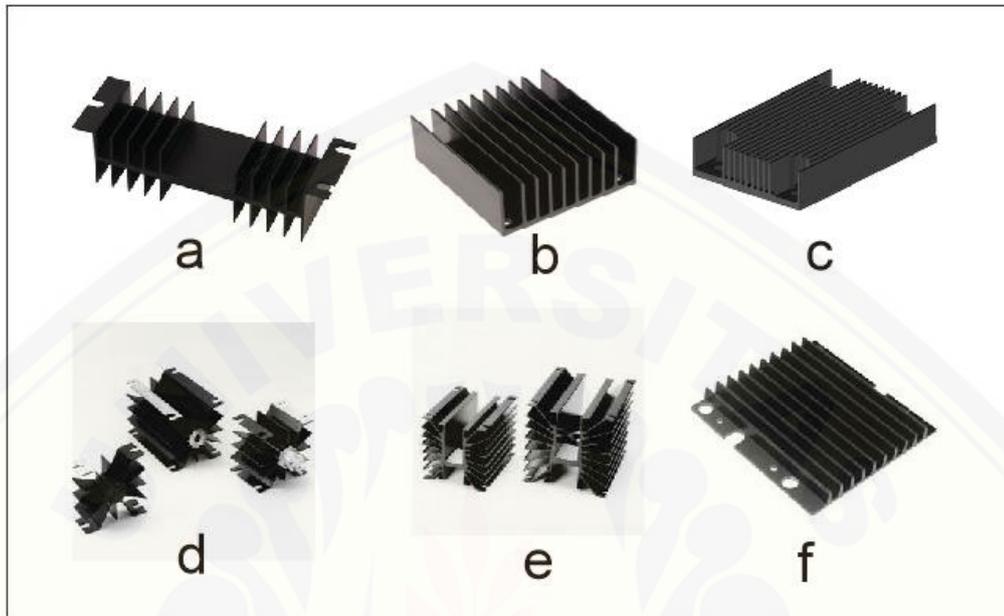
maupun bebas. Pada proses penerapannya, heatsink sering digunakan sebagai sistem pendingin sebuah CPU, Water Cooling System (WCS) dan komponen elektroknika lainnya. Dilain halnya untuk memaksimalkan kerja heatsink, maka perlu mengetahui 4 karakteristik *heatsink*. Keempat karakteristik tersebut diantaranya:

- 1) Luasan *heatsink* yang mengakibatkan disipasi panas menjadi lebih baik karena akan memperluas area pendinginan guna dapat mempercepat proses pelepasan kalor hasil serapan *heatsink*.
- 2) Bentuk *heatsink* yang aerodinamik sangat baik dan mempermudah aliran udara panas agar keluaran pada sirip – sirip *heatsink* menjadi sangat cepat. Selain itu, pada *heatsink* yang memiliki jumlah sirip banyak namun jarak antar sirip sangat dekat akan mengakibatkan aliran udara tidak sempurna sehingga diperlukan tambahan sistem pendingin lain yang berupa mini fan (kipas kecil) yang fungsinya untuk memperlancar aliran udara pada jenis *heatsink* yang siripnya sangat berdekatan.
- 3) Pemindahan kalor yang baik pada setiap *heatsink* juga akan mempermudah pelepasan panas dari sumber panas ke bagian – bagian sirip pendingin. Sirip – sirip pada *heatsink* didesain guna memiliki sifat konduktivitas yang lebih baik.
- 4) Desain permukaan dasar *heatsink* sampai pada *mirror finish* atau tingkat kedatarannya tinggi sehingga dapat menyentuh permukaan sumber panas lebih baik dan merata. Hal ini dapat menyebabkan penyerapan panas lebih sempurna, tetapi untuk menghindari resistensi dengan sumber panas *heatsink* tetap harus menggunakan suatu pasta atau *thermal compound* dan agar luas permukaan sentuh juga lebih merata.

## 2.6 Jenis – Jenis *Heatsink*

*Heatsink* adalah suatu bahan yang dapat menyerap sekaligus menyerap kalor yang dibuat dari material yang memiliki nilai konduktivitas termal tinggi. Pada prosesnya tiap jenis *heatsink* sangat berpengaruh terhadap temperatur kotak pendingin dan. Jenis profil *heatsink* terbagi menjadi enam jenis. Enam jenis tersebut

memiliki fungsi memaksimalkan perpindahan panas (Sauriol, 2003). Jenis dan manfaat pada *heatsink* dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2.6 Jenis – jenis *heatsink* (Sauriol, 2003)

a. *Double Surface TO-3 Case Style Heatsink*

Bentuk dari tipe *heatsink* ini memiliki struktur fin yang disusun kosong pada tengahnya. Fin pada tipe ini terdapat pada sisi depan, belakang dan bagian samping sehingga perpindahan kalor yang terjadi sangat maksimal. *Heatsink* tipe ini berguna sekali pada pendinginan alat elektronik jenis vertikal dengan perpindahan panas maksimal.

b. *Half Brick Heatsink*

Bentuk dari jenis *heatsink* ini adalah memiliki fin hanya pada satu permukaan saja. Jenis ini banyak digunakan pada sistem pendinginan jenis horizontal namun juga pernah dijumpai pada sistem pendinginan jenis vertikal. Nilai konduktivitas pada jenis *heatsink* ini adalah jenis terbaik karena jenis ini melakukan pendinginan pada suatu sistem secara konveksi paksa.

c. *Quarter Brick Heatsink*

Bentuk pada jenis *heatsink* ini hampir mirip dengan tipe half brick namun pada jenis ini bentuknya memiliki tinggi fin yang lebih rendah serta pada tiap ujung jenis *heatsink* ini memiliki lubang yang digunakan untuk pemasangan baut. Jenis ini digunakan pada sistem pendinginan alamiah dimana temperatur sumber tidak terlalu tinggi.

d. *Dual Stud-mounted Heatsink*

Pada jenis ini, bentuk dan konduktivitas termal lebih tinggi dari pada jenis *heatsink flat back heatsink*. Jenis ini memiliki lubang ditengah yang dapat digunakan untuk mengalirkan air pendingin. Jenis ini biasanya ditemui pada sistem pendinginan yang digunakan pada CPU computer.

e. *H-style Heatsink*

Bentuk ini menyerupai huruf H dengan kosong pada bagian tengah. Nilai konduktivitas ini lebih tinggi daripada bentuk sebelumnya karena fin-finnya lebih tebal dan banyak. Penggunaan bentuk ini digunakan untuk pendinginan vertikal dengan perpindahan panas maksimal.

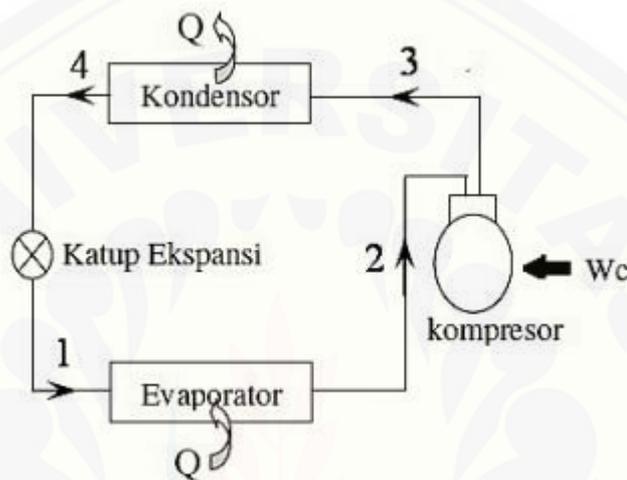
f. *Flate Back Heatsink*

Merupakan bentuk *heatsink* berbentuk *flate* yang biasa digunakan untuk pendingin komponen elektronik seperti: IC, dioda, regulator, dan lain-lain. bentuk ini memiliki nilai konduktivitas termal yang baik dalam memindahkan panas baik secara alamiah maupun paksa.

## 2.7 Mesin Pendingin (*Refrigerator*)

Mesin pendingin (*refrigerator*) adalah sebuah mesin yang umum diketahui oleh semua manusia di kehidupan sehari – hari. Pada umumnya, mesin pendingin yang sering dijumpai adalah mesin pendingin yang menggunakan sistem refrigerasi absorpsi dan kompresi uap (Anwar, E., & Piarah, 2010). Kulkas atau bisa disebut dengan *refrigerator* adalah salah satu contoh mesin pendingin yang sering digunakan pada perabotan rumah tangga sebagai penyimpan makanan agar bertahan lebih lama. Kulkas umumnya memiliki empat komponen utama yaitu : kompresor, kondensor, katup ekspansi serta evaporator.

Pada kulkas diketahui terdapat fluida yang bekerja pada komponen utama yang menyusun kulkas yang biasa kita sebut sebagai *refrigerant*. *Refrigerant* adalah suatu senyawa yang dapat berganti fasa dari gas ke cair, *refrigerant* akan melepas panas menuju lingkungan sekitarnya (Tampubolon & Samosir, 2005). Perbedaan suhu bola kering dan perbedaan tekanan uap merupakan penyebab utama terjadinya proses perpindahan panas (Stoecker & Jones, 1982).



Gambar 2.7 Siklus refrigerasi (Anwar, E., & Piarah, 2010)

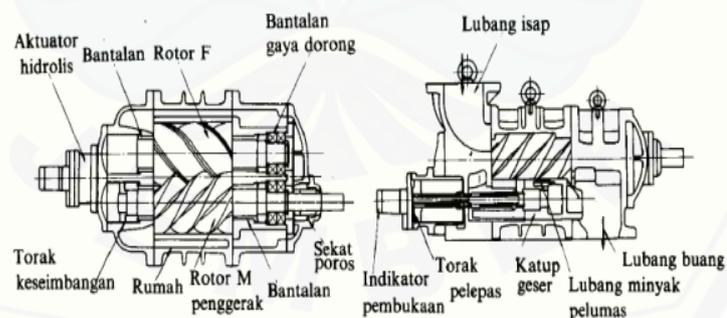
Pada bagian evaporator, refrigerant diuapkan untuk menyerap kalor di dalam mesin pendingin atau lemari pendingin karena perpindahan panas melalui dinding lemari pendingin dan infiltrasi melalui pintu maupun pada saat pintu terbuka. Refrigerant akan mendidih pada suhu  $-18^{\circ}\text{C}$  sampai  $-20^{\circ}\text{C}$  ketika tekanan 0,9 – 1 bar, sehingga suhu pada evaporator akan bekerja pada suhu tersebut bila evaporator bekerja dengan baik. Refrigerant akan berubah fasa menjadi gas dengan menyerap panas dari lingkungan evaporator tersebut. Pada tahap selanjutnya, motor listrik akan menggerakkan kompresor dan memampatkan refrigerant tersebut. Hal ini akan meningkatkan tekanan dan suhu yang kemudian akan dipindahkan ke kondensor. Kondensor akan menurunkan suhu dengan melepas kalor ke lingkungan tanpa menurunkan tekanan refrigerant. Dari kondensor, refrigerant akan melalui saringan untuk menyaring kotoran yang bercampur pada refrigerant. Selanjutnya,

refrigerant akan melalui pipa kapiler, dimana tekanan dan suhu berkurang serta fasa refrigerant berubah menjadi cair. Refrigerant akan masuk kembali ke dalam evaporator untuk mendinginkan mesin pendingin tersebut. Seluruh proses beroperasi secara terus menerus dengan memindahkan panas dari bagian evaporator (di dalam mesin pendingin) ke bagian kondensor (bagian luar mesin pendingin) dengan mengalirkan refrigerant melalui kompresor sesuai sistem yang dijelaskan di atas (Stoecker & Jones, 1982).

## 2.8 Komponen Utama Kulkas

### a. Kompresor

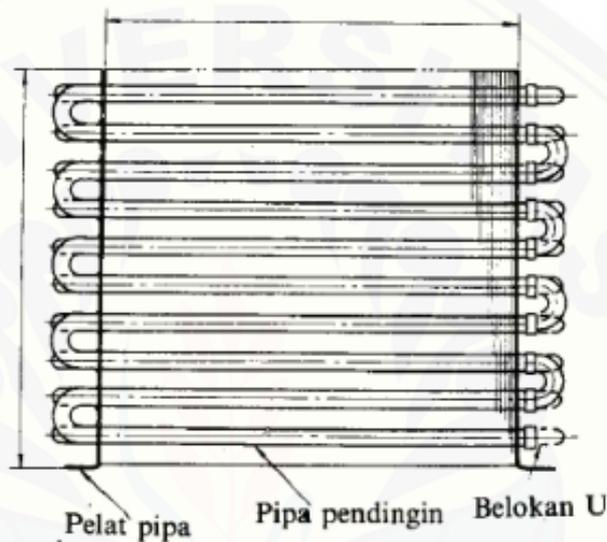
Kompresor merupakan komponen mesin pendingin yang digunakan untuk memampatkan refrigerant sehingga tekanan dan suhu akan meningkat (Farid, 2010). Suhu yang meningkat seiring dengan meningkatkan tekanan pada refrigerant akan mempermudah perpindahan panas pada saat melalui kondensor. Suhu refrigerant harus diatas suhu lingkungan mesin pendingin tersebut. Tingkat suhu yang harus dicapai tergantung pada jenis refrigerant dan suhu lingkungannya (Widodo & Hasan, 2008).



Gambar 2.8 Kompresor (Anwar, E., & Piarah, 2010)

b. Kondensor

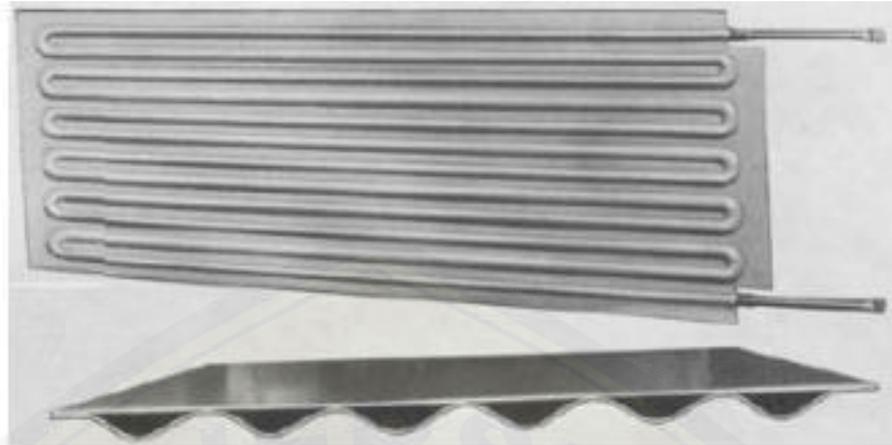
Kondensor merupakan komponen mesin pendingin yang fungsinya untuk merubah wujud refrigerant dari gas yang bertekanan dan bersuhu tinggi dari discharge kompresor menjadi cair dengan suhu rendah dan bertekanan tinggi. Kondensor harus mampu melepas kalor tersebut ke lingkungan atau cooling medium yang digunakan pada mesin pendingin tersebut (Widodo & Hasan, 2008).



Gambar 2.9 Kondensor (Anwar, E., & Piarah, 2010)

c. Evaporator

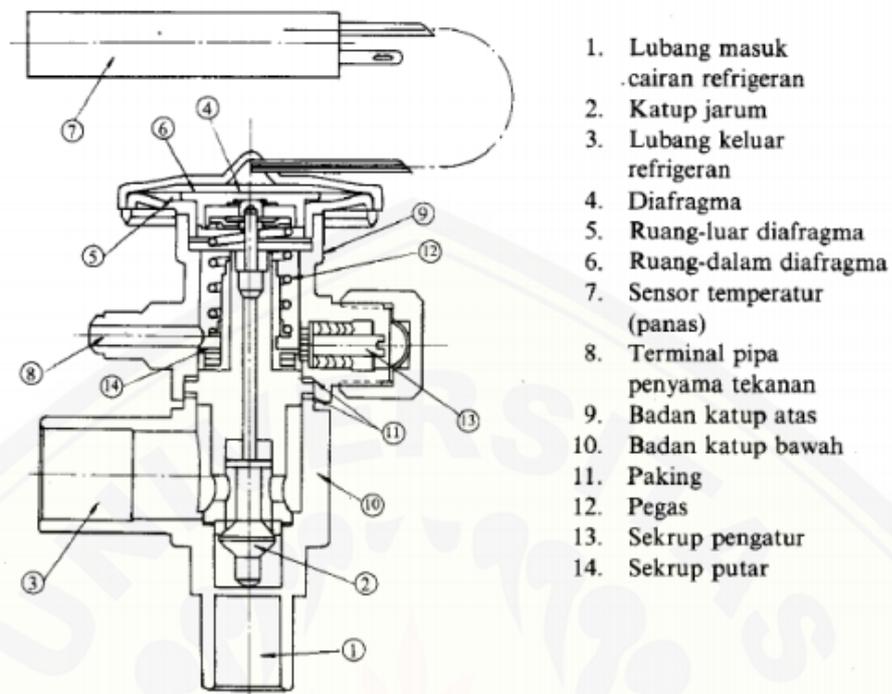
Evaporator ini terbuat dari permukaan plat dan dirancang dengan beberapa jenis. Evaporator tersebut diantaranya terbuat dari dua plat tipis yang dipres dan dilas sehingga membentuk alur untuk mengalirkan refrigerant dan ada juga menggunakan pipa yang dipasang di antara dua plat tipis kemudian dipres dan dilas (Widodo & Hasan, 2008).



Gambar 2.10 Evaporator (Widodo & Hasan, 2008)

d. Katup Ekspansi

Katup ekspansi dipergunakan untuk ekspansikan refrigerant secara adiabatik yang bertekanan dan bersuhu tinggi sampai dengan temperatur dan bertekanan rendah. Katup ekspansi akan mengatur pemasukan refrigerant sesuai dengan beban pendingin yang harus dilayani oleh evaporator sehingga evaporator mencapai efisiensi yang maksimal. Apabila beban pendinginan bertambah besar atau katup terbuka bertambah kecil maka cairan refrigerant akan menguap sempurna sehingga pada kondisi superpanas ketika mencapai sisi keluar evaporator. Kalor yang diserap akan semakin besar sehingga temperatur uap refrigerant makin lebih tinggi dari pada temperatur penguapannya. Derajat superpanas yang rendah tidak akan mengganggu tetapi, derajat superpanas yang terlampau besar akan menyebabkan temperatur gas refrigerant keluar dari kompresor akan semakin tinggi yang akan menyebabkan kompresor cepat rusak (Anwar, E., & Piarah, 2010).



Gambar 2.11 Katup ekspansi (Anwar, E., & Piarah, 2010)

## 2.9 Daya Listrik

Daya listrik adalah suatu energi dalam bentuk listrik yang mengalir setiap satuan waktu. Nilai daya listrik dapat ditentukan dengan menggunakan rumus yang tertera pada Persamaan 2.10 berikut ini:

$$P = V \times I \quad (2.10)$$

Dimana:

P = Daya listrik (J/s)

I = Arus listrik (Ampere)

V = Tegangan (Volt)

### 2.10 Efisiensi Pada Sistem Generator Termoelektrik

Dalam penelitian ini, nilai efisiensi yang dihasilkan oleh generator termoelektrik (TEG) dihitung dengan menggunakan persamaan efisiensi mesin karnot sebagai parameternya. Saat ideal, suatu alat atau mesin akan memiliki efisiensi 100% pada kondisi tertentu. Pada hal lain, dalam hukum kedua termodinamika yang menyatakan bahwa tidak semua dari keseluruhan kalor akan dikonversi menjadi energi kerja. Oleh karena itu efisiensi karnot sangat tepat digunakan guna penetapan nilai batas fraksi kalor yang dapat dikonversikan pada sistem (Hermawan, 2017).

Generator termoelektrik hanya cocok jika digunakan pada pembangkitan listrik kondisi skala rendah dengan memanfaatkan panas buangan. TEG yang baik pada umumnya terbuat dari suatu material dengan karakteristik sebagai berikut:

- 1) Konduktivitas elektrik ( $\sigma$ ) yang tinggi guna meminimalisir kenaikan temperatur sehingga hambatan dalam TEG tidak terlalu tinggi yang menyebabkan arus yang mengalir sangat kecil.
- 2) Nilai koefisien *Seebeck* ( $S$ ) yang membuat panas dapat terkonversi menjadi listrik secara maksimal.
- 3) Konduktivitas termal ( $k$ ) yang rendah, sehingga meminimalisir terjadinya konduksi termal antar material yang tinggi.

Ketiga parameter diatas digunakan untuk mengukur besarnya keseluruhan kinerja dari modul TEG atau yang sering disebut juga *figure of merit* ( $Z$ ). *Figure of merit* sebenarnya tidak memiliki satuan, akan tetapi ada yang berpendapat bahwa satuannya adalah satuan per derajat temperatur  $Z \cdot T$ , dimana  $T$  ini disebut sebagai temperatur rata – rata pada kedua sisi modul TEG. Temperatur rata – rata dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 2.11.

$$T_m = \frac{T_c + T_h}{2} \quad 2.11$$

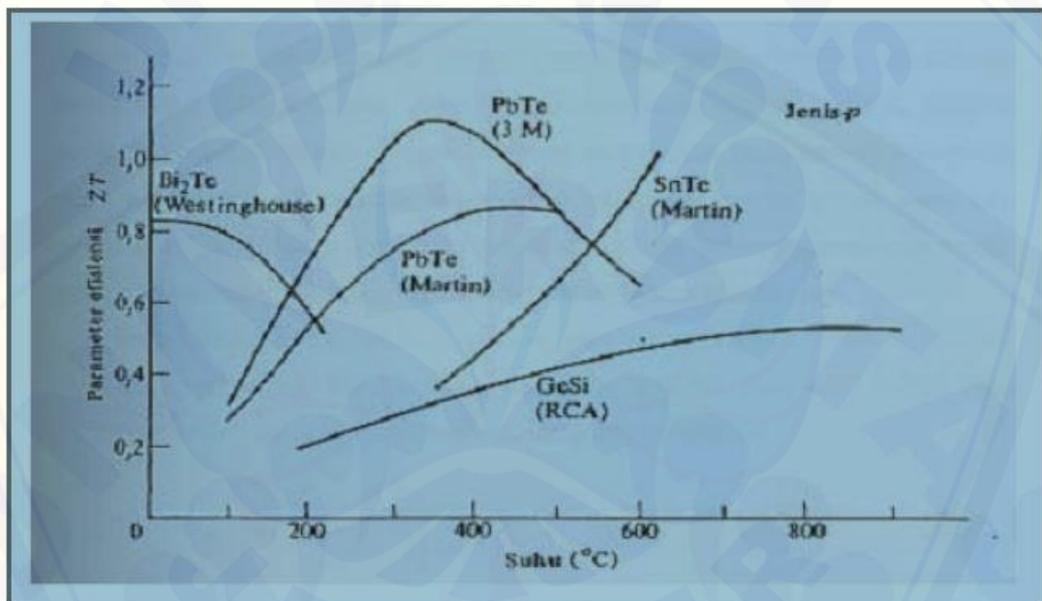
Dimana:

$T_h$  = Temperatur sisi panas modul TEG ( $^{\circ}\text{C}$ )

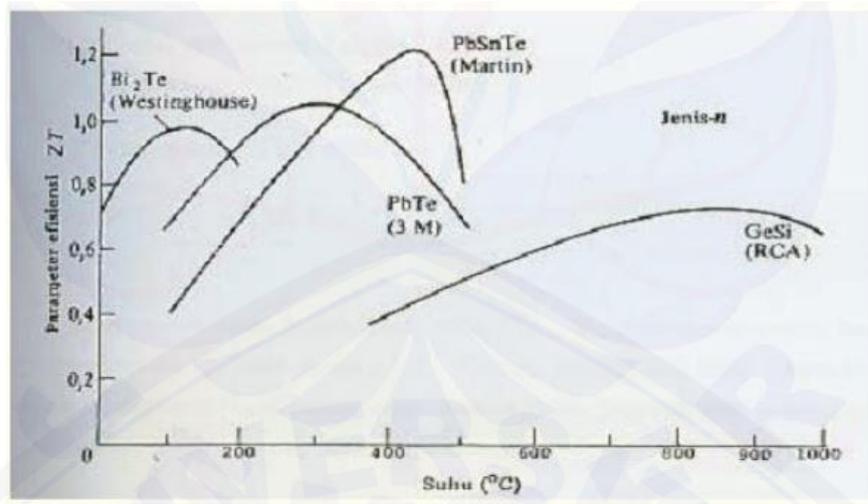
$T_c$  = Temperatur sisi dingin modul TEG ( $^{\circ}\text{C}$ )

Parameter *figure of merit* juga sering digunakan untuk menentukan nilai efisiensi modul TEG. Semakin tinggi nilai *figure of merit* maka semakin tinggi nilai efisiensi modul TEG (Untoro, 2012).

Berikut adalah jenis – jenis logam semikonduktor tipe-P dan tipe-N berdasarkan nilai *figure of merit* terhadap satuan temperatur.



Gambar 2.12 Hubungan berbagai macam logam semikonduktor tipe-P terhadap temperatur (Oktorina, 2006)



Gambar 2.13 Hubungan berbagai macam logam semikonduktor tipe-N terhadap temperatur (Oktorina, 2006)

Menurut Untoro (2012), figure of merit ( $Z$ ) dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 2.12 berikut.

$$Z = \frac{\sigma S^2}{k} \quad 2.12$$

Dimana:

$Z$  = Figure of merit

$\sigma$  = Konduktivitas elektrik bahan ( $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ )

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

$k$  = Konduktivitas thermal bahan ( $\text{W}/\text{m } ^\circ\text{C}$ )

Koefisien Seebeck ( $S$ ) diketahui jika terdapat perbedaan temperatur ( $\Delta T$ ) yang diketahui pada kedua sisi modul sehingga ada tegangan ( $\Delta V$ ) yang terjadi. Pernyataan tersebut dapat dituliskan dengan Persamaan 2.13 berikut.

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad 2.13$$

Setelah seluruhnya terpenuhi, maka selanjutnya menentukan nilai efisiensi pada modul TEG. Menurut Olsen et. Al (2013), perhitungan efisiensi maksimal yang digunakan untuk menghitung efisiensi pada modul TEG dapat diketahui dengan Persamaan 2.14 berikut.

$$\eta = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \frac{\sqrt{1+Z T_m}-1}{\sqrt{1+Z T_m} + \frac{T_h}{T_c}} \times 100\% \quad 2.14$$

Dimana:

$Z$  = *Figure of Merit*

$T_m$  = Temperatur rata – rata (°C)

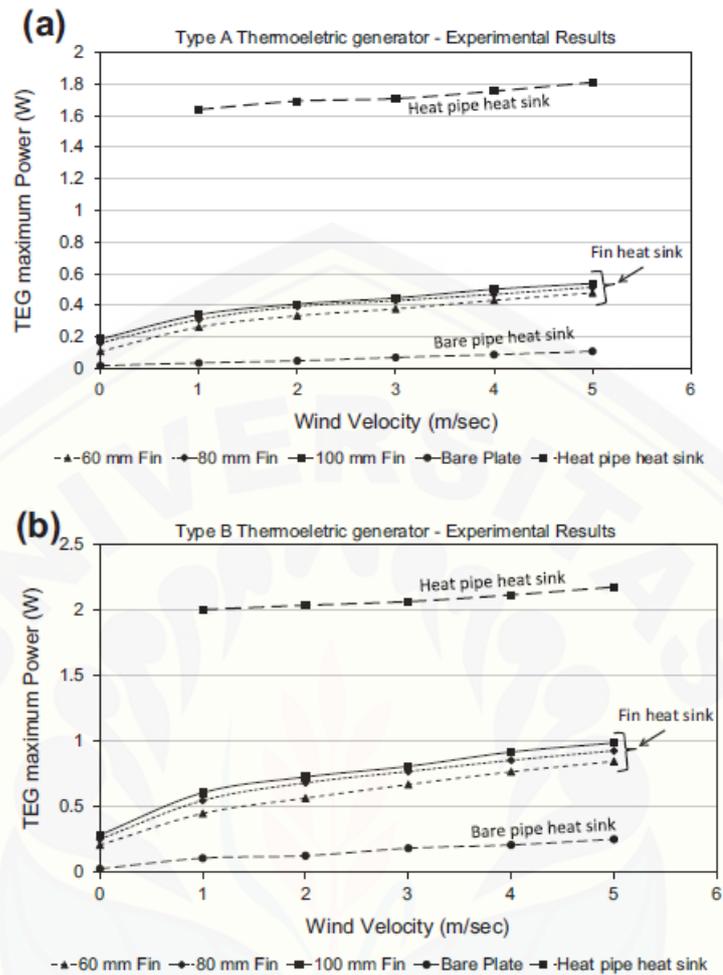
$T_c$  = Temperatur sisi dingin modul TEG (°C)

$T_h$  = Temperatur sisi panas modul TEG (°C)

## 2.11 Penelitian Terdahulu

### 2.11.1 Penelitian oleh Date, et al., (2014)

Date, et al., 2014 melakukan penelitian tentang teori eksperimen untuk mencari nilai fluks pada pendinginan generator termoelektrik. Pada penelitian tersebut, memiliki variasi yang digunakan antara lain adalah: variasi panjang sirip yang berukuran 6 cm, 8 cm, 10 cm, *bare plate*, serta *heat pipe heatsink*. Variasi ini dipasang pada bagian sisi dingin modul TEG. Selain itu keseluruhan variasi diuji pada sumber panas 120 °C dan 250 °C serta dicoba dengan batuan kecepatan angin 0-5 m/s. Setelah diamati, daya *output* yang dihasilkan pada masing – masing variasi ditunjukkan pada Gambar



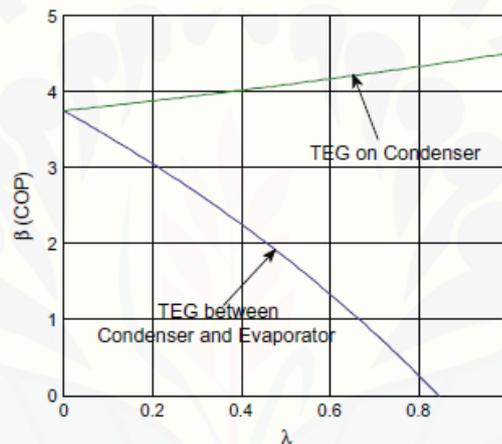
Gambar 2.14 Daya *output* yang dihasilkan pada keseluruhan variasi

(Date, et, al., 2014)

Berdasarkan Gambar 2.12, variasi panjang *fin heatsink* berukuran 10 cm menghasilkan daya *output* lebih besar dari pada variasi panjang *fin heatsink* berukuran 6 cm yang diuji pada kecepatan udara 0 – 5 m/s. Variasi kecepatan udara inilah yang menjadikan daya *output* yang dihasilkan generator termoelektrik menjadi naik. Pada penelitian ini, dapat dibuktikan bahwa semakin besar luas penampang yang digunakan untuk membuang panas ke lingkungan, maka semakin besar pula daya *output* yang dihasilkan.

### 2.11.2 Penelitian oleh Yilbas, et al., (2014)

Penelitian ini dilakukan oleh Yilbas, et al., (2014) yang diterbitkan oleh jurnal *Energy Convention and Management* 83 mengenai karakteristik termal dari gabungan generator termoelektrik (TEG) dan siklus refrigerasi. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti apakah pemasangan sistem TEG akan mengganggu kinerja dari siklus refrigerasi atau tidak. Pada penelitian ini parameter yang digunakan adalah variasi peletakan TEG, dimana variasi pertama TEG diletakkan diantara kondensor dan kompresor dan variasi kedua TEG diletakkan tepat ditengah kondensor.



Gambar 2.15 Besarnya nilai COP terhadap variasi peletakan TEG (Yilbas & Sahin, 2014)

Pada penelitian ini ditemukan bahwa lokasi generator termoelektrik (TEG) di antara evaporator dan kondensor menghasilkan koefisien kinerja rendah dari penggabungan sistem. Hal ini disebabkan panas yang ditolak dari TEG yang meningkatkan perpindahan panas ke sistem pendingin. Oleh karena itu, koefisien kinerja sistem pendinginan berkurang serta menurunkan koefisien kinerja keseluruhan dari sistem gabungan. Di sisi lain, lokasi generator termoelektrik (TEG) di antara kondensor meningkatkan koefisien kinerja sistem gabungan.

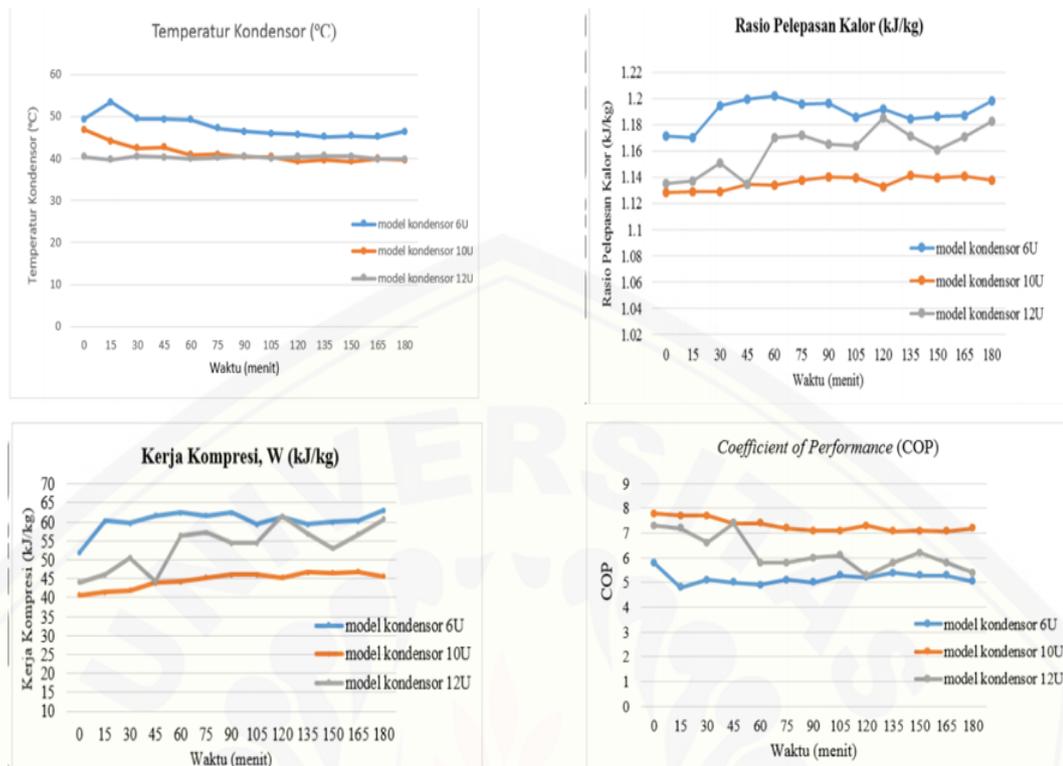
### 2.11.3 Penelitian Oleh Prasetyo, H.; Setyawan, D. L.; & Muttaqin, A. Z., (2017)

Penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo, H.; Setyawan, D. L.; & Muttaqin, A. Z., (2017) adalah tentang analisa pengaruh luasan heatsink terhadap kinerja portabel mini refrigerator. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah variasi luasan heatsink yang diletakkan pada sisi panas modul peltier dengan masing – masing bernilai  $0,12\text{m}^2$ ,  $0,15\text{m}^2$ , dan  $0,19\text{m}^2$ . Penelitian tersebut dilakukan dengan temperatur kontrol yang masing – masing bernilai  $18^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $22^\circ\text{C}$ , dan  $24^\circ\text{C}$  yang dilakukan untuk mencari besarnya kinerja yang dilakukan modul peltier untuk sistem mini *refrigerator*. Dalam penelitian ini termoelektrik bertujuan untuk mengubah energi listrik menjadi energi panas dan dingin.

Dari penelitian yang dilakukan pada penelitian ini, efisiensi sistem *mini refrigerator* yang terbaik ada pada variasi luasan *heatsink*  $0.19\text{m}^2$  dan temperatur kontrol sebesar  $24^\circ\text{C}$ . Sehingga dapat disimpulkan luasan sangat mempengaruhi proses penyerapan maupun pelepasan kalor. Semakin besar luasan yang digunakan, maka semakin besar pula kalor yang dilepas maupun serap oleh termoelektrik.

### 2.11.4 Penelitian Oleh Arumsari, A. A.; Setyawan, D. L.; & Ramadhan, (2017)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Arumsari, A. A.; Setyawan, D. L.; & Ramadhan, (2017) yang diterbitkan oleh Jurnal Teknik Mesin Universitas Jember mengenai pengaruh panjang rangkuman pipa kondensor refrigerator terhadap unjuk kerja mesin pendingin menggunakan parameter variasi panjang rangkum pipa kondensor kulkas tipe 6U (mm), 10U (mm), dan 12U (mm) dan LPG yang menjadi *refrigerant* pada mesin pendingin. Penelitian ini bertujuan untuk mencari performa mesin pendingin yang diterapkan dari ketiga parameter tersebut.



Gambar 2.16 Hasil penelitian variasi panjang pipa kondensor (Arumsari, A. A.; Setyawan, D. L.; Ramadhan, M. E., 2017)

Berdasarkan grafik hasil penelitian yang dijabarkan pada gambar 2.17, dimana performa mesin pendingin paling baik diperoleh pada kondensor bertipe 10U dan terendah adalah tipe 6U. Semakin panjang rangkuman pipa kondensor, maka kerja kompresor lebih ringan karena volume ruang refrigerant yang luas dan pelepasan kalor yang sedikit. Sebaliknya, semakin pendek rangkuman pipa kondensor, maka kerja kompresor makin berat karena volume ruang refrigerant yang sempit dan butuh melepas banyak kalor ke lingkungan.

### 2.12 Hipotesis Penelitian

Setelah diamati dari berbagai tinjauan pustaka dan beberapa penelitian terdahulu, maka peneliti menarik sebuah hipotesis awal pada penelitian ini yang diantaranya adalah:

1. Semakin besar beda temperatur yang didapat pada sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik, maka akan semakin besar daya *output* yang dihasilkan.
2. Lokasi yang baik untuk memanfaatkan secara maksimal panas kondensor untuk dijadikan energi listrik adalah di bagian permukaan kondensor.
3. Semakin kecil lintasan yang dilalui refrigerant untuk mencapai perubahan fasa, maka semakin besar pula kalor yang dilepaskan dari kondensor ke lingkungan.
4. Luasan mempengaruhi penyerapan panas sehingga berpengaruh terhadap daya dan efisiensi yang dihasilkan. Semakin besar luasan yang digunakan maka semakin besar panas yang dapat terserap.

## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara eksperimen yang telah disusun secara terorganisir. Penelitian ini akan dilakukan pada Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember yang bertempat di Jalan Slamet Riyadi nomor 62, Kecamatan Patrang, Kabupaten Jember pada selang waktu antara September 2018 sampai dengan November 2018.

### 3.2 Alat dan Bahan

#### 3.2.1 Alat dan Instrumen Penelitian

- a. *Data logger.*
- b. Potensiometer.
- c. Multimeter.
- d. Termokopel.
- e. *Stopwatch.*
- f. Anemometer.
- g. Baut dan mur.
- h. Burner.
- i. Las tembaga (*filler*).

#### 3.2.2 Bahan Penelitian

- a. Modul generator termoelektrik (TEG) tipe SP 1848-27145 SA.
- b. Kulkas (*Refrigerator*).
- c. Kondensor kulkas 6U.
- d. *Heatsink* (10cm x 12cm, 8cm x 12cm, dan 6cm x 12cm).
- e. *Light Pretolium Gas* (LPG).

### 3.3 Metode Penelitian

Pada penelitian ini, peneliti menggunakan metode penelitian yang berupa metode eksperimental. Metode penelitian eksperimental adalah sebuah penelitian yang memiliki tujuan untuk menyelidiki atau mengetahui adanya sebuah kemungkinan dari hubungan sebab dan akibat yang dilakukan secara kontrol atau kendali. Metode penelitian eksperimental yang dilakukan pada penelitian ini adalah mengubah limbah panas diperoleh dari panas buangan kondensor pendingin kulkas (refrigerator) menjadi energi listrik menggunakan peranan modul pendingin termoelektrik (TEG).

### 3.4 Variabel Penelitian

Variabel pada umumnya adalah segala sesuatu yang bentuknya apa saja dan ditetapkan oleh peneliti untuk dipahami dan dikaji, sehingga memperoleh sebuah informasi tentang sebuah penelitian yang nantinya akan dilakukan dan dapat diambil sebuah kesimpulan. Variasi dari pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai daya listrik *output* yang dihasilkan oleh modul generator termoelektrik (TEG) dalam suatu sistem pemodelan. Variabel yang digunakan peneliti pada penelitian kali ini dibagi menjadi tiga jenis variabel pengujian diantaranya adalah:

#### 3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas atau yang bisa juga disebut sebagai *independent variable* dapat diartikan sebagai variabel yang berpengaruh terhadap hasil yang diperoleh dari variabel terikat yang ditentukan secara bebas oleh peneliti. Variabel bebas akan menjadi patokan utama peneliti untuk memperoleh hasil dari penelitian ini. Pada penelitian kali ini, variabel bebas yang akan digunakan oleh peneliti adalah variasi luasan *heatsink* berjenis *aluminium* (Al) yang berukuran 10cm x 12cm, 8cm x 12cm, dan 6cm x 12cm. Variasi penelitian tersebut akan dijabarkan sebagai berikut:

1. Variabel pertama adalah pengujian menggunakan *heatsink* seluas  $120 \text{ cm}^2$  yang diletakkan pada sisi dingin modul termoelektri generator (TEG) yang diambil sebanyak tiga kali pengambilan data.
2. Variabel kedua adalah pengujian menggunakan *heatsink* seluas  $96 \text{ cm}^2$  yang diletakkan pada sisi dingin modul termoelektri generator (TEG) yang diambil sebanyak tiga kali pengambilan data
3. Variabel ketiga adalah pengujian menggunakan *heatsink* berukuran  $72 \text{ cm}^2$  yang diletakkan pada sisi dingin modul termoelektri generator (TEG) yang diambil sebanyak tiga kali pengambilan data.

#### 3.4.2 Variabel Terikat

Variabel terikat atau sering disebut dengan *dependent variable* dapat diartikan sebagai variabel yang besar nilai yang dihasilkan mengikuti besarnya variabel bebas sehingga besarnya nilai variabel ini tidak bisa ditentukan oleh peneliti. Variabel terikat yang digunakan pada penelitian ini meliputi perbedaan temperatur pada kedua sisi modul generator termoelektrik ( $\Delta T$ ), selain itu terdapat pula output yang dihasilkan dari modul termoelektrik diantaranya tegangan (V), arus (I), serta kecepatan udara (v) dan luas *duct* (A) sehingga diperoleh besarnya daya yang dihasilkan (P), dan efisiensi pada modul termoelektrik ( $\eta$ ).

#### 3.4.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol dapat diartikan sebagai variabel yang ditentukan secara tetap (*constant*) sehingga antara variabel bebas dan variabel terikat pada penelitian ini tidak terpengaruh oleh faktor – faktor lain yang tidak digunakan pada metode penelitian. Pada penelitian ini, variabel kontrol yang termasuk didalamnya adalah:

1. Pengujian dilakukan disaat kulkas dalam kondisi steady yang diperkikakan membutuhkan waktu 3 jam penyalaan.
2. Pengambilan data dilakukan selama 2 jam dan diambil setiap 5 menit sekali.
3. Mengatur nilai hambatan pada potensiometer sebesar  $80,5 \Omega$ .

### 3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang akan dilakukan kali ini memerlukan berbagai tahapan pelaksanaan. Tahapan pelaksanaan pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

#### 3.5.1 Tahapan Persiapan dan Pemeriksaan Alat Uji

Pada tahap ini, persiapan – persiapan yang dilakukan adalah proses perakitan alat uji yang dipasang sesuai konsep yang telah disiapkan sebelumnya. Tahap selanjutnya adalah melakukan pemeriksaan pada kesiapan alat uji dan komponen untuk memastikan alat – alat tersebut dapat berjalan atau tidaknya pada sistem pengujian. Adapun hal – hal yang perlu dilakukan dan diperhatikan dalam tahapan ini, antara lain:

- a. Menguji kinerja modul generator termoelektrik (TEG). Hal ini perlu dilakukan supaya peneliti dapat mengetahui berfungsi atau tidaknya modul generator termoelektrik (TEG) yang akan digunakan sebagai perangkat utamanya.
- b. Pemasangan modul generator termoelektrik (TEG) yang sesuai terhadap sifat dari sisi – sisinya. Pada sisi panas modul akan berdekatan langsung dengan kondensor kulkas (*refrigerator*) berukuran 6U. Selanjutnya, pada sisi dingin akan ditemukan dengan *heatsink* dengan luas yang telah ditentukan pada variabel bebas.
- c. Memastikan sisi permukaan pada modul generator termoelektrik (TEG) tidak memiliki celah dengan perekatan menggunakan pasta termal agar perpindahan panas yang terjadi dapat lebih baik.
- d. Memastikan sistem pada termoelektrik terisolasi sempurna dengan menambahkan isolator panas sehingga tidak terpengaruh oleh radiasi ataupun konveksi yang terjadi dari lingkungan ke sistem.
- e. Memastikan perangkat dan komponen yang diujikan sudah terpasang dengan baik dan benar.

- f. Pemasangan multimeter dan termokopel yang sesuai pada titik yang telah ditentukan telah sesuai dan terkalibrasi dengan benar agar menghindari kesalahan – kesalahan pada saat proses pengambilan data.

### 3.5.2 Tahapan Pembuatan Variasi Luasan *Heatsink*

Pada tahap ini, peneliti menggunakan *heatsink* berjenis *aluminium* (Al) yang akan divariasikan menjadi tiga model dengan luasan yang berbeda yakni ukuran 10cm x 12cm, 8cm x 12cm, dan 6cm x 12cm.

## 3.6 Metode Pengambilan Data

Pada penelitian ini proses pengambilan data menggunakan dua jenis metode pengambilan data yaitu tipe data primer dan tipe data sekunder. Tipe data sekunder merupakan data yang dihasilkan dengan melakukan studi literatur yang tujuannya untuk proses analisa perhitungan data yang dihasilkan dari suatu penelitian atau percobaan.

Tipe data primer merupakan sebuah data yang diperoleh dari proses penelitian langsung. Metode pengambilan data pada tipe ini dilakukan dengan mengukur variabel bebas dan variabel tetap pada proses pengujian berlangsung. Adapun tahapan – tahapan yang harus dilakukan peneliti pada proses pengambilan data sekunder adalah sebagai berikut:

- a. Memastikan rangkaian komponen generator termoelektrik (TEG) sudah sesuai pada rancangan.
- b. Memastikan multimeter dan termokopel telah terpasang dengan benar pada daerah – daerah yang sesuai pada rancangan.
- c. Menjalankan sistem pada generator termoelektrik (TEG) dan mengambil data berupa temperatur, arus, tegangan, dan daya listrik yang dihasilkan oleh sistem.
- d. Melakukan pengulangan percobaan dengan melakukan pengambilan data sebanyak tiga kali.

- e. Melakukan pengumpulan total data yang telah dihasilkan pada keseluruhan variasi penelitian.

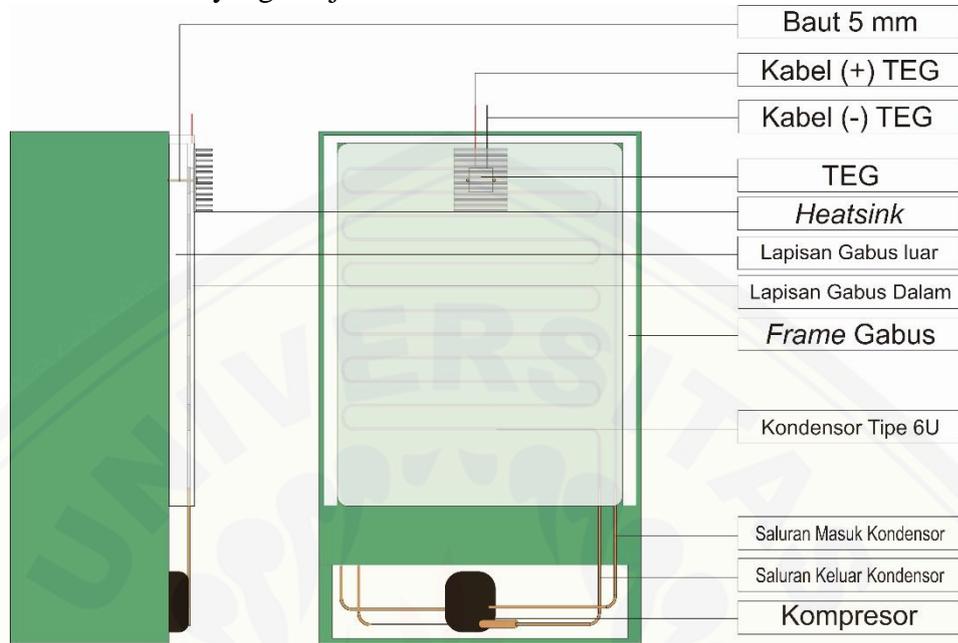
### 3.7 Rencana Analisa Data

Dalam tahap ini, data yang telah dikumpulkan pada masing – masing percobaan akan dihitung yang nantinya hasil dari perhitungan tersebut akan dianalisis dan diambil kesimpulannya. Adapun perhitungan analisa yang digunakan oleh peneliti menggunakan cara sebagai berikut:

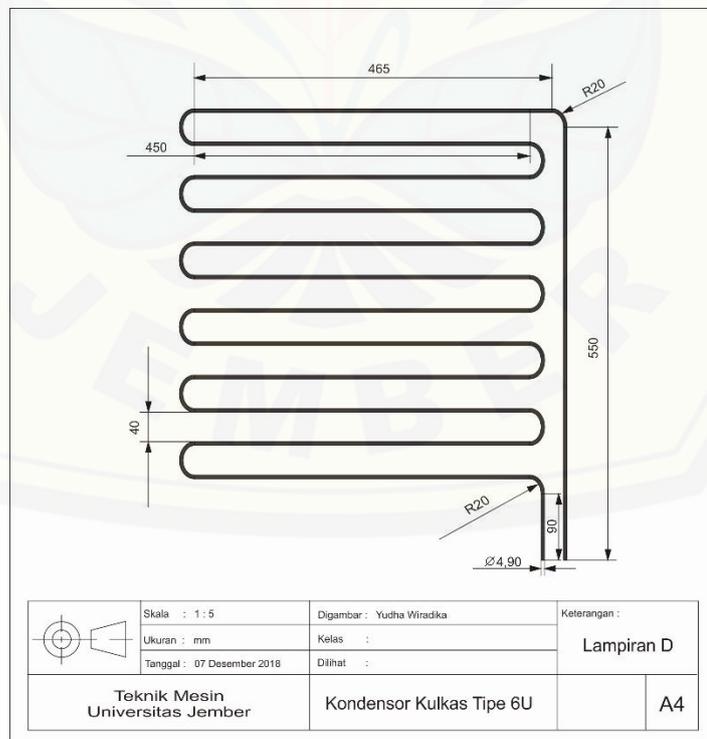
- a. Menghitung besarnya daya *output* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik (TEG). Perhitungan ini dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 2.10.
- b. Menghitung besarnya nilai *figure of merit* sesuai Persamaan 2.12.
- c. Menghitung efisiensi kinerja sistem generator termoelektrik (TEG) pada tiap variabel bebas yang digunakan sesuai Persamaan 2.14.
- d. Dari data yang diperoleh mengenai beda temperatur dari kedua sisi generator termoelektrik (TEG), tegangan yang diperoleh, daya, dan efisiensi dapat dianalisis dari perbandingan masing – masing variasi penelitian.
- e. Pembuatan tabel data hasil penelitian pada tiap variasi penelitian.
- f. Setelah data – data terisi pada tabel, langkah selanjutnya ada melakukan perbandingan terhadap hasil dari penelitian. Perbandingan tersebut disusun dengan menggunakan grafik perbandingan. Adapun hasil penelitian yang akan dibandingkan diantara adalah:
  - 1) Grafik nilai beda temperatur terhadap variasi luasan *heatsink*.
  - 2) Grafik nilai tegangan, arus, dan daya *output* terhadap variasi luasan *heatsink*.
  - 3) Grafik nilai efisiensi terhadap variasi luasan *heatsink*.

### 3.8 Sketsa Rangkaian Alat Uji

#### 3.8.1 Desain Alat yang Diujikan

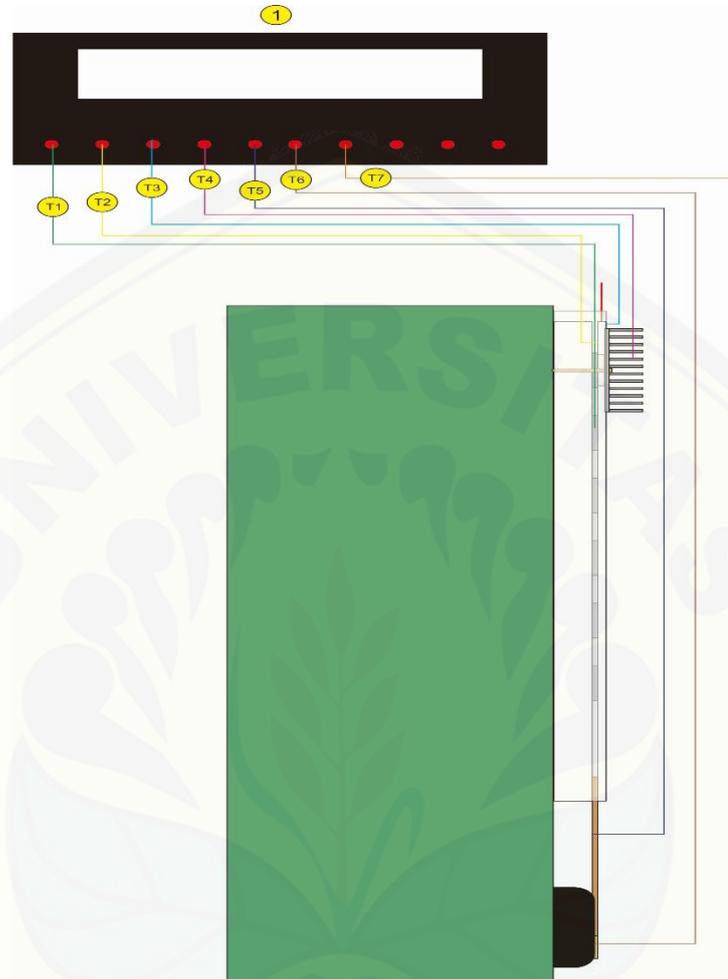


Gambar 3.1 Alat uji



Gambar 3.2 Desain kondensor 6U

## 3.8.2 Gambar Skema Pengambilan Data



Gambar 3.3 Skema pengambilan temperatur menggunakan *data logger*

Keterangan:

T1 = Temperatur kondensator dan ( $^{\circ}\text{C}$ )

T2 = Temperatur sisi panas modul generator termoelektrik ( $^{\circ}\text{C}$ )

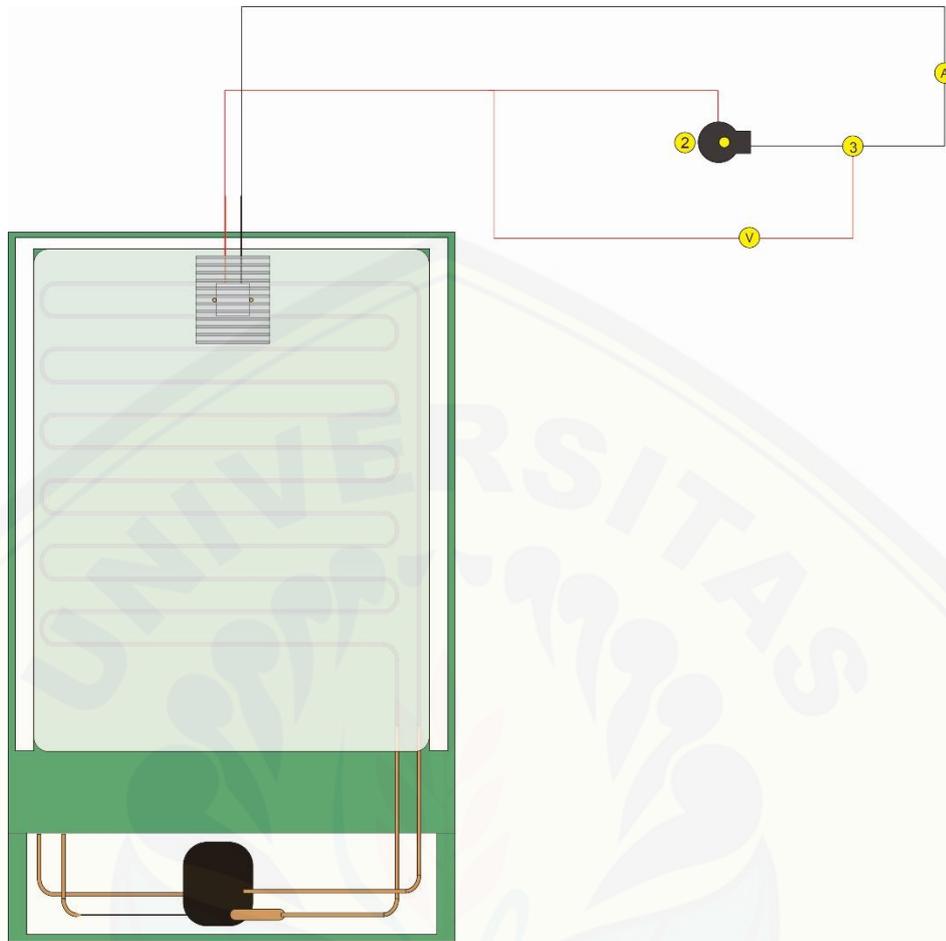
T3 = Temperatur sisi dingin modul generator termoelektrik ( $^{\circ}\text{C}$ )

T4 = Temperatur *heatsink* ( $^{\circ}\text{C}$ )

T5 = Temperatur pipa masuk kondensator ( $^{\circ}\text{C}$ )

T6 = Temperatur pipa keluar kondensator ( $^{\circ}\text{C}$ )

T7 = Temperatur lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ )



Gambar 3.4 Skema pengambilan arus dan tegangan *output*

Keterangan:

V = Tegangan *output* (Volt)

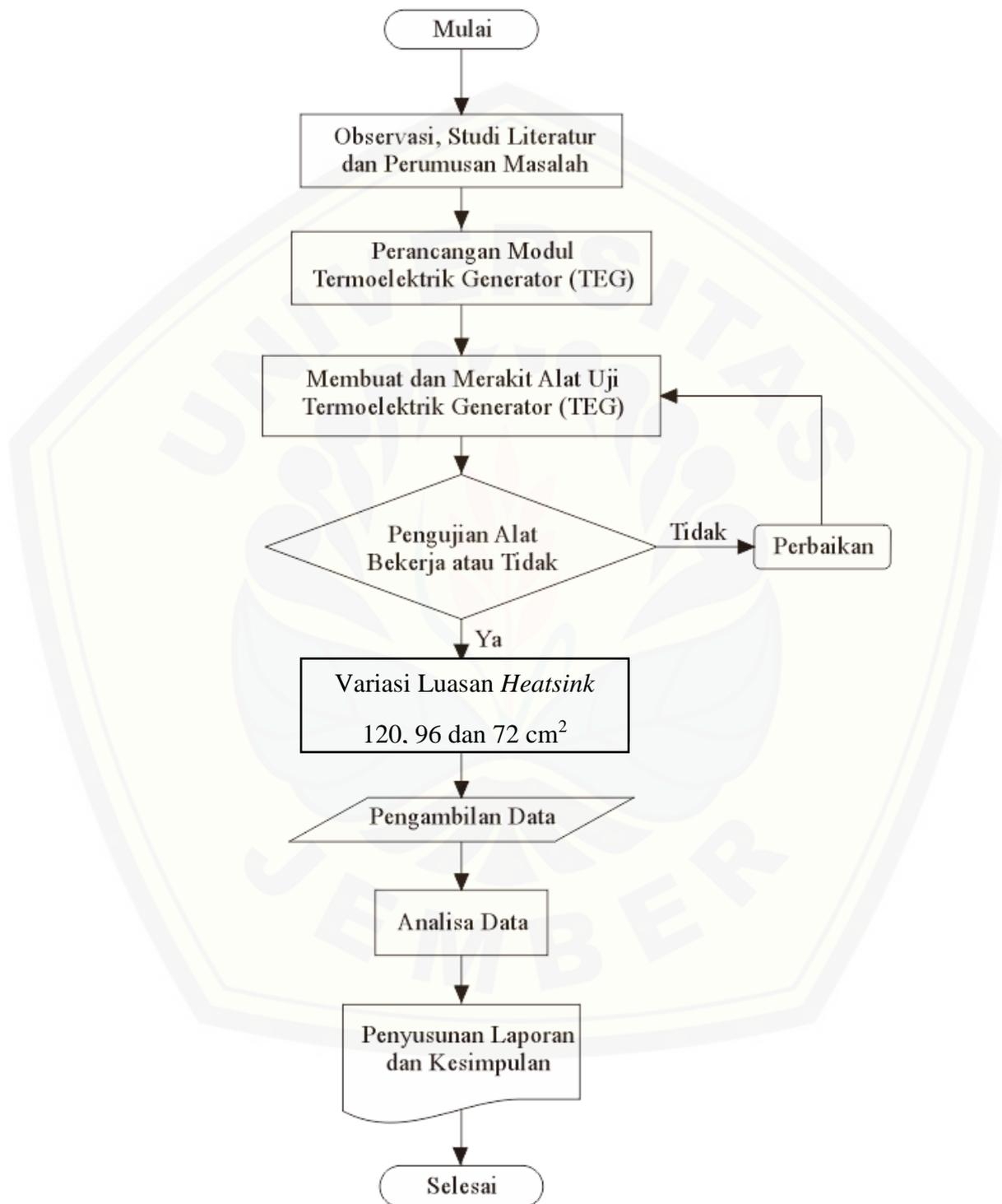
A = Arus yang dihasilkan (A)

1 = *Data logger*

2 = Potensiometer

3 = Multimeter

### 3.9 Diagram Alur Pengujian



Gambar 3.5 Skema diagram alur penelitian

## BAB 5 PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil pembahasan yang telah dipaparkan pada Bab 4, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Semakin besar luas permukaan *heatsink*, maka semakin besar pula panas yang terbuang menuju lingkungan. Hal inilah yang menyebabkan pada sisi dingin modul generator termoelektrik menjadi rendah sehingga perbedaan temperatur pada kedua sisi modul generator termoelektrik menjadi tinggi. Dari pengujian yang dilakukan terhadap keseluruhan variasi luasan *heatsink*, variasi 120 cm<sup>2</sup> menghasilkan perbedaan temperatur tertinggi yang terus menurun pada temperatur 12 °C menjadi 9 °C.
2. Semakin besar perbedaan temperatur antara sisi panas modul dan sisi dingin modul generator termoelektrik, maka semakin besar tegangan yang dihasilkan. Oleh karena itu, tegangan dan arus yang mengalir yang dihasilkan semakin besar sehingga nilai daya *output* yang dihasilkan menjadi besar. Pada pengujian menggunakan luasan *heatsink* 120 cm<sup>2</sup> menghasilkan daya *output* paling tinggi namun mengalami penurunan dari 0,0012 J/s menjadi 0,00068 J/s.
3. Semakin tinggi tegangan *output* dan beda temperatur yang dihasilkan, maka semakin besar pula nilai efisiensi yang diperoleh. Pada pengujian menggunakan luasan *heatsink* 120 cm<sup>2</sup> efisiensi yang diperoleh menurun pada angka 0,014% sampai 0,011% adalah hasil yang paling bagus pada keseluruhan variasi.

## 5.2 Saran

Dari kesimpulan tersebut, saran yang diberikan oleh peneliti mengenai penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Peletakan modul generator termoelektrik yang kurang tepat dapat menurunkan COP dari modul tersebut. Hal itu disebabkan karena panas dari sumber panas tidak dapat berpindah dengan sempurna karena terhalang oleh modul TEG, disarankan pada penelitian selanjutnya untuk selalu mengecek pemasangan TEG dengan benar serta mengetahui nilai COP dari hasil penelitiannya.
2. Untuk mendapatkan kinerja yang maksimal pada penggunaan modul generator termoelektrik, diperlukan sumber panas yang lebih tinggi lagi dan penstabilan *heatsink* sisi dingin modul tetap terjaga pada suhu lingkungan sehingga menghasilkan perbedaan temperatur yang tinggi supaya daya yang dihasilkan oleh modul meningkat.
3. Dalam pemasangan modul TEG terdapat celah antara sisi dingin dan sisi panas modul terhadap sumber panas dan *heatsink* yang disebabkan karena pemasangan termokopel. Diharapkan adanya penelitian lanjutan mengenai celah tersebut sehingga dapat memaksimalkan lagi *output* yang dihasilkan oleh modul TEG.
4. Penggunaan variabel bebas yang terbatas, karena hanya menggunakan 3 variasi saja. Pada penelitian selanjutnya disarankan menambah variasi rangkaian seri, paralel, dan casade dengan catatan tetap tidak menambah daya kipas untuk mendinginkan *heatsink* sisi dingin. Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai efisiensi yang dihasilkan jika menggunakan variasi – variasi tersebut.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Anwar, K., E., A., & Piarah, W. (2010). Efek Temperatur Pipa Kapiler Terhadap Kinerja Mesin Pendingin. *Jurnal Mekanikal*. 1(1), 30-39.
- Arumsari, A. A.; Setyawan, D. L.; Ramadhan, M. E.; (2017). Pengaruh Variasi Panjang Rangkum Pipa Kondensor Paralel Terhadap Unjuk Kerja Mesin Pendingin Dengan Refrigeran LPG. *UNEJ Journal*, 1-8.
- Daehler, K. L., Folsom, J., & Shinohara, M. (2011). *Making Sense of Science: Energy: For Teacher of Grade 6 - 8*. San Francisco: WestEd.
- Date, Ashwin; Date, Abhijit; Dixon, Chris; Singh, Randeep; Akbarzadeh, Aliakbar. (2014). Theoretical and experimental estimation of limiting input heat flux. *Solar Energy*, 201-217.
- Hermawan, N. T. (2017). *Analisa Variasi Temperatur Dan Rangkaian Modul Thermoelectric SP 1848-27145 SA Terhadap Daya Listrik Yang Dihasilkan Thermoelectric Generator*. Jember: Universitas Jember.
- Holman, J., & Jasjfi, E. (1984). *Perpindahan Kalor (Heat Transfer)*. Jakarta: Erlangga.
- Khasee, N., Lertsatitthanakorn, C., & Bubphachot, B. (2013). Energy and Exergy analysis of a Double-pass Thermoelectric Solar Air Collector. *Int J Exergy* 12(1), 1-10.
- Lachish, U. (2017). *Thermoelectric Effect Peltier Seebeck and Thomson*. Tel Aviv: Guma Science.
- Medina, I. A. (2017). *Pengaruh Efek Seebeck pada Pembangkitan Listrik dengan Termoelektrik*. Jimbaran: Fakultas Teknik Elektro Universitas Udayana.
- Muhaimin, M. (2007). *Bahan - Bahan Listrik (Edisi Ketiga)*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Oktorina, D. H. (2006). *Kajian Karakteristik Modul Termoelektrik Untuk Sistem Penyimpanan Dingin*. Bogor: Teknologi Pertanian IPB.
- Olsen, L. M., Warren, E. M., Parilla, P. A., Toberre, E. S., Kennedy, C. E., Snyder, G. J., . . . Ginley, D. S. (2013). A High-temperature, High-efficiency Solar Thermoelectric Generator Prototype. *Energy Procedia* 9, 1460-1469.
- Powerchip. *Powerchips Technology Corporation*. <http://www.powerchips.gi>. [Diakses pada tanggal 4 Januari 2019].

- Prasetyo, H.; Setyawan, D. L.; Muttaqin, A. Z.; (2015). Pengaruh Luasan Heatsink Terhadap Unjuk Kerja Portabel Mini Refrigerator. *UNEJ Teknik Mesin*, 1-7.
- Reddy, B., Barry, M., John, C., & Minking, K. (2014). Thermoelectric–hydraulic Performance of a Multistage Integrated Thermoelectric Power Generator. *Energy Convers Manage Vol. 77*, 458-468.
- Ryanurago, Anwar, S., & Sari, S. P. (2013). Generator Mini dengan Prinsip Termoelektrik dari Uap Panas Kondensor pada Sistem Pendingin. *Rekayasa Elektriika Vol. 10 No. 4*, 180-185.
- Sauriol, C. (2003, Januari 2003). Extruded Heatsink for Power Semiconductor. *Wakefield Engineering*, hal. 1-19.
- Shu, G., Zhao, J., Tian, H., Liang, X., & Wei, H. (2012). Parametric and Exergetic Analysis of Waste Heat Recovery System Based on Thermoelectric Generator and Organic Rankine Cycle Utilizing R123. *Energy 45 (1)*, 806-816.
- Snyder, G. J. (2008, Juni 16). Small Thermoelectric Generators. *The Electrochemical Society Interface*, hal. 54-56.
- Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1982). *Refrigeration and Air Conditioning (Second Edition)*. New York: McGraw-Hill Inc.
- Sulistiyanto, N. (2014). Pemodelan Sistem Pendingin Termoelektrik pada Modul Superluminescence LED. *Jurnal EECCIS 8(1)*, 67-72.
- Tambunan, A. (2000). *Diktat Teknik Pendinginan*. Bogor: Teknik Pertanian Bogor.
- Tampubolon, D., & Samosir, R. (2005). Pemahaman tentang sistem refrigerasi. *Jurnal Teknik SIMETRIKA 4(1)*, 312-216.
- Untoro, N. (2012). Pengaruh Beda Temperatur Terhadap Daya Modul Termolistrik. *Jurnal Aplikasi Fisika Vol 8; No.1;*, 1-10.
- Widodo, S., & Hasan, S. (2008). *Sistem Refrigerasi dan Tata Udara (Edisi Pertama)*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Yamashita, O. (2009). Effect of Linear and Non-linear Components in the Temperature Dependences of Thermoelectric Properties on the Energy Conversion Efficiency. *Energy Convers Manage 50(8)*, 1968-1975.
- Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2014). Thermal Characteristics of Combined Thermoelectric Generator. *Energy Conversion and Management 83*, 42-47.

## Lampiran A. Data Hasil Pengujian Daya Output

### Tabel Hasil Pengujian Daya Output Pada Ketiga Variasi Luasan Heatsink

Tabel A 1 Hasil pengujian daya output pada variasi luasan heatsink 120 cm<sup>2</sup>

Waktu (Menit)	Temperatur (°C)							Tegangan (Volt)	Arus (A)	Daya (J/s)	
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7				$\Delta T$ (T2-T3)
0	63,2	48,57	36,17	30,43	75,40	55,1	27,63	12,40	0,33	$3,60 \times 10^{-3}$	$1,19 \times 10^{-3}$
5	62	48,40	36,33	30,27	74,97	54,6	27,60	12,07	0,32	$3,53 \times 10^{-3}$	$1,14 \times 10^{-3}$
10	61,7	48,17	36,10	30,37	74,40	54,7	27,70	12,07	0,32	$3,48 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-3}$
15	61,2	48,07	36,03	30,43	74,57	53,4	27,77	12,03	0,32	$3,48 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$
20	60,2	48,03	36,23	30,00	73,73	53,4	27,77	11,80	0,31	$3,42 \times 10^{-3}$	$1,07 \times 10^{-3}$
25	60,1	47,97	36,17	30,00	73,37	53,6	27,67	11,80	0,31	$3,38 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-3}$
30	59,7	47,63	36,10	30,00	73,40	53,5	27,67	11,53	0,31	$3,34 \times 10^{-3}$	$1,02 \times 10^{-3}$
35	59,7	47,57	36,20	29,93	72,80	53,4	27,60	11,37	0,30	$3,31 \times 10^{-3}$	$1,01 \times 10^{-3}$
40	59,4	47,37	35,90	29,77	73,23	53,1	27,60	11,47	0,30	$3,27 \times 10^{-3}$	$0,98 \times 10^{-3}$
45	58,7	47,10	35,70	29,73	72,53	52,5	27,63	11,40	0,30	$3,23 \times 10^{-3}$	$0,96 \times 10^{-3}$
50	58,6	46,87	35,67	29,73	72,57	52,4	27,60	11,20	0,29	$3,22 \times 10^{-3}$	$0,94 \times 10^{-3}$
55	58	46,63	35,60	29,90	71,20	51,3	27,67	11,03	0,29	$3,16 \times 10^{-3}$	$0,92 \times 10^{-3}$
60	57	46,20	35,33	30,07	70,67	50,3	27,63	10,87	0,28	$3,10 \times 10^{-3}$	$0,88 \times 10^{-3}$
65	56,8	46,07	35,37	29,80	70,37	50,3	27,67	10,70	0,28	$3,08 \times 10^{-3}$	$0,87 \times 10^{-3}$
70	56,1	45,83	35,30	29,80	70,27	49,9	27,73	10,53	0,28	$3,02 \times 10^{-3}$	$0,83 \times 10^{-3}$
75	56,1	45,70	35,27	29,87	70,00	50	27,80	10,43	0,28	$3,01 \times 10^{-3}$	$0,83 \times 10^{-3}$
80	56,1	45,53	35,23	29,80	69,47	49,8	27,80	10,30	0,27	$2,98 \times 10^{-3}$	$0,81 \times 10^{-3}$
85	55,6	45,33	35,10	29,87	68,83	48,9	27,70	10,23	0,27	$2,92 \times 10^{-3}$	$0,78 \times 10^{-3}$
90	55,1	45,07	35,00	29,57	68,93	48,9	27,60	10,07	0,27	$2,90 \times 10^{-3}$	$0,77 \times 10^{-3}$
95	54,6	44,90	34,93	29,73	68,77	48,7	27,60	9,97	0,26	$2,87 \times 10^{-3}$	$0,75 \times 10^{-3}$
100	54,3	44,70	34,83	29,67	68,10	49,2	27,57	9,87	0,26	$2,83 \times 10^{-3}$	$0,74 \times 10^{-3}$
105	54,3	44,53	34,77	29,80	68,00	48,8	27,57	9,77	0,26	$2,80 \times 10^{-3}$	$0,72 \times 10^{-3}$
110	53,4	44,30	34,77	29,63	67,67	47,6	27,53	9,53	0,25	$2,76 \times 10^{-3}$	$0,70 \times 10^{-3}$
115	53	44,13	34,53	29,63	67,50	47	27,53	9,60	0,25	$2,73 \times 10^{-3}$	$0,69 \times 10^{-3}$
120	52,8	43,83	34,40	29,70	67,03	47,1	27,47	9,43	0,25	$2,71 \times 10^{-3}$	$0,68 \times 10^{-3}$

Tabel A 2 Hasil pengujian daya *output* pada variasi luasan *heatsink* 96 cm<sup>2</sup>

Waktu (Menit)	Temperatur (°C)							$\Delta T$ (T2-T3)	Tegangan (Volt)	Arus (A)	Daya (J/s)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7				
0	63,40	48,00	39,90	32,87	71,97	55,13	26,97	8,10	0,22	2,48 x 10 <sup>-3</sup>	0,55 x 10 <sup>-3</sup>
5	62,63	47,77	39,80	32,30	71,27	54,77	27,00	7,97	0,22	2,45 x 10 <sup>-3</sup>	0,55 x 10 <sup>-3</sup>
10	62,30	47,03	39,47	32,60	70,17	54,67	26,97	7,57	0,21	2,39 x 10 <sup>-3</sup>	0,51 x 10 <sup>-3</sup>
15	61,90	46,70	39,37	32,63	70,07	53,77	27,03	7,33	0,21	2,35 x 10 <sup>-3</sup>	0,49 x 10 <sup>-3</sup>
20	61,37	46,60	39,17	31,67	69,20	53,57	27,10	7,43	0,21	2,32 x 10 <sup>-3</sup>	0,48 x 10 <sup>-3</sup>
25	61,17	46,30	38,97	31,30	68,47	53,60	27,00	7,33	0,21	2,29 x 10 <sup>-3</sup>	0,47 x 10 <sup>-3</sup>
30	60,70	46,00	38,80	31,60	69,07	53,50	26,97	7,20	0,20	2,25 x 10 <sup>-3</sup>	0,45 x 10 <sup>-3</sup>
35	60,47	45,83	38,70	31,17	68,37	53,40	26,87	7,13	0,20	2,19 x 10 <sup>-3</sup>	0,43 x 10 <sup>-3</sup>
40	60,20	45,57	38,53	31,00	69,47	53,07	26,87	7,03	0,20	2,17 x 10 <sup>-3</sup>	0,43 x 10 <sup>-3</sup>
45	59,67	45,33	38,43	30,90	68,17	52,57	26,90	6,90	0,20	2,14 x 10 <sup>-3</sup>	0,42 x 10 <sup>-3</sup>
50	59,47	45,17	38,50	31,00	67,63	52,40	26,87	6,67	0,19	2,09 x 10 <sup>-3</sup>	0,39 x 10 <sup>-3</sup>
55	58,90	44,90	38,23	31,60	67,13	51,43	26,97	6,67	0,19	2,08 x 10 <sup>-3</sup>	0,39 x 10 <sup>-3</sup>
60	58,33	44,77	38,10	32,10	66,30	50,83	26,83	6,67	0,19	2,03 x 10 <sup>-3</sup>	0,38 x 10 <sup>-3</sup>
65	58,07	44,67	38,20	31,50	65,67	50,37	26,87	6,47	0,18	2,00 x 10 <sup>-3</sup>	0,37 x 10 <sup>-3</sup>
70	57,50	44,57	38,23	31,43	65,97	50,07	26,90	6,33	0,18	1,96 x 10 <sup>-3</sup>	0,35 x 10 <sup>-3</sup>
75	57,13	44,37	38,10	31,80	65,67	49,97	26,87	6,27	0,18	1,94 x 10 <sup>-3</sup>	0,34 x 10 <sup>-3</sup>
80	56,87	44,17	38,00	31,40	65,57	49,73	26,87	6,17	0,17	1,90 x 10 <sup>-3</sup>	0,33 x 10 <sup>-3</sup>
85	56,47	43,87	37,83	31,50	64,97	49,17	26,77	6,03	0,17	1,85 x 10 <sup>-3</sup>	0,31 x 10 <sup>-3</sup>
90	56,13	43,70	37,70	30,90	64,87	48,90	26,77	6,00	0,17	1,85 x 10 <sup>-3</sup>	0,31 x 10 <sup>-3</sup>
95	55,73	43,43	37,47	31,23	64,53	48,70	26,77	5,97	0,17	1,83 x 10 <sup>-3</sup>	0,31 x 10 <sup>-3</sup>
100	55,30	42,63	36,90	31,10	64,33	48,67	26,77	5,73	0,16	1,79 x 10 <sup>-3</sup>	0,29 x 10 <sup>-3</sup>
105	55,10	42,43	36,80	31,60	64,13	48,30	26,77	5,63	0,16	1,76 x 10 <sup>-3</sup>	0,28 x 10 <sup>-3</sup>
110	54,40	42,17	36,77	31,10	63,90	47,60	26,80	5,40	0,15	1,68 x 10 <sup>-3</sup>	0,25 x 10 <sup>-3</sup>
115	54,13	41,70	36,40	31,27	63,83	47,00	26,80	5,30	0,15	1,67 x 10 <sup>-3</sup>	0,25 x 10 <sup>-3</sup>
120	53,63	41,40	36,07	31,60	63,73	47,10	26,80	5,33	0,15	1,66 x 10 <sup>-3</sup>	0,25 x 10 <sup>-3</sup>

Tabel A 3 Hasil pengujian daya *output* pada variasi luasan *heatsink* 72 cm<sup>2</sup>

Waktu (Menit)	Temperatur (°C)							$\Delta T$ (T2-T3)	Tegangan (Volt)	Arus (A)	Daya (J/s)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7				
0	63,63	48,97	42,10	38,00	72,20	55,10	27,70	6,87	0,19	2,16 x 10 <sup>-3</sup>	0,42 x 10 <sup>-3</sup>
5	63,17	48,43	41,73	37,77	71,47	54,90	27,50	6,70	0,19	2,13 x 10 <sup>-3</sup>	0,41 x 10 <sup>-3</sup>
10	62,67	48,03	41,43	37,77	70,87	54,70	27,80	6,60	0,19	2,11 x 10 <sup>-3</sup>	0,39 x 10 <sup>-3</sup>
15	62,47	47,73	41,27	37,63	70,53	54,00	27,60	6,47	0,18	2,05 x 10 <sup>-3</sup>	0,38 x 10 <sup>-3</sup>
20	62,20	47,47	41,00	37,63	69,87	53,90	27,70	6,47	0,18	2,04 x 10 <sup>-3</sup>	0,37 x 10 <sup>-3</sup>
25	62,00	47,27	40,90	37,50	69,20	53,67	27,30	6,37	0,18	2,01 x 10 <sup>-3</sup>	0,36 x 10 <sup>-3</sup>
30	61,50	47,00	40,77	37,03	69,20	53,50	27,40	6,23	0,17	1,91 x 10 <sup>-3</sup>	0,33 x 10 <sup>-3</sup>
35	61,17	46,73	40,57	36,80	68,47	53,40	27,20	6,17	0,17	1,90 x 10 <sup>-3</sup>	0,33 x 10 <sup>-3</sup>
40	60,93	46,53	40,43	36,47	68,47	53,10	27,20	6,10	0,17	1,89 x 10 <sup>-3</sup>	0,33 x 10 <sup>-3</sup>
45	60,50	46,33	40,37	36,30	67,80	52,50	27,00	5,97	0,17	1,82 x 10 <sup>-3</sup>	0,30 x 10 <sup>-3</sup>
50	60,27	46,07	40,17	36,30	67,83	52,13	27,00	5,90	0,16	1,80 x 10 <sup>-3</sup>	0,29 x 10 <sup>-3</sup>
55	59,67	45,80	40,00	36,20	66,80	51,50	27,00	5,80	0,16	1,78 x 10 <sup>-3</sup>	0,29 x 10 <sup>-3</sup>
60	59,30	45,23	39,53	36,20	66,43	50,87	27,00	5,70	0,16	1,77 x 10 <sup>-3</sup>	0,29 x 10 <sup>-3</sup>
65	59,00	45,10	39,47	36,00	66,20	50,50	26,90	5,63	0,16	1,73 x 10 <sup>-3</sup>	0,27 x 10 <sup>-3</sup>
70	58,50	44,87	39,30	36,00	65,57	50,30	26,90	5,57	0,15	1,72 x 10 <sup>-3</sup>	0,26 x 10 <sup>-3</sup>
75	58,03	44,63	39,20	36,10	65,27	50,00	26,90	5,43	0,15	1,70 x 10 <sup>-3</sup>	0,26 x 10 <sup>-3</sup>
80	57,63	44,23	38,93	35,90	64,90	49,80	27,00	5,30	0,15	1,67 x 10 <sup>-3</sup>	0,25 x 10 <sup>-3</sup>
85	57,30	43,93	38,77	35,97	64,57	49,40	26,70	5,17	0,15	1,65 x 10 <sup>-3</sup>	0,24 x 10 <sup>-3</sup>
90	57,03	43,63	38,67	35,90	64,20	48,90	26,50	4,97	0,14	1,62 x 10 <sup>-3</sup>	0,23 x 10 <sup>-3</sup>
95	56,63	43,13	38,27	35,80	64,00	48,63	26,50	4,87	0,14	1,60 x 10 <sup>-3</sup>	0,22 x 10 <sup>-3</sup>
100	56,03	42,93	38,17	35,77	63,80	48,30	26,60	4,77	0,14	1,59 x 10 <sup>-3</sup>	0,22 x 10 <sup>-3</sup>
105	55,70	42,70	38,00	35,90	63,33	48,00	26,60	4,70	0,14	1,58 x 10 <sup>-3</sup>	0,22 x 10 <sup>-3</sup>
110	55,27	42,43	37,80	35,80	63,13	47,70	26,50	4,63	0,13	1,56 x 10 <sup>-3</sup>	0,21 x 10 <sup>-3</sup>
115	54,97	42,20	37,63	35,80	62,70	47,27	26,70	4,57	0,13	1,54 x 10 <sup>-3</sup>	0,20 x 10 <sup>-3</sup>
120	54,40	41,90	37,43	36,03	62,50	47,10	26,80	4,47	0,13	1,52 x 10 <sup>-3</sup>	0,19 x 10 <sup>-3</sup>

## Lampiran B. Data Hasil Pengujian Nilai Efisiensi

### Tabel Hasil Pengujian Laju Pelepasan Kalor dan Efisiensi Pada Ketiga Variasi Luasan *Heatsink*

Tabel B. 1 Hasil perhitungan terhadap nilai efisiensi pada variasi luasan *heatsink* 120 cm<sup>2</sup>

Waktu (Menit)	Temperatur (°C)				Tegangan (Volt)	S (V/°C)	k (W/m°C)	$\sigma$ ( $\alpha^{-1}\text{m}^{-1}$ )	z (x 10 <sup>-3</sup> )	$\eta$ (%)
	T2	T3	$\Delta T$	Tm						
0	48,57	36,17	12,4	42,37	0,33	0,0266	0,8	0,053	0,0469	0,014
5	48,4	36,33	12,07	42,37	0,32	0,0265	0,8	0,053	0,0466	0,014
10	48,17	36,1	12,07	42,14	0,32	0,0265	0,8	0,053	0,0466	0,014
15	48,07	36,03	12,04	42,05	0,32	0,0266	0,8	0,053	0,0468	0,014
20	48,03	36,23	11,8	42,13	0,31	0,0263	0,8	0,053	0,0457	0,013
25	47,97	36,17	11,8	42,07	0,31	0,0263	0,8	0,053	0,0457	0,013
30	47,63	36,1	11,53	41,87	0,31	0,0269	0,8	0,053	0,0479	0,014
35	47,57	36,2	11,37	41,89	0,30	0,0264	0,8	0,053	0,0461	0,013
40	47,37	35,9	11,47	41,64	0,30	0,0262	0,8	0,053	0,0453	0,013
45	47,1	35,7	11,4	41,40	0,30	0,0263	0,8	0,053	0,0459	0,013
50	46,87	35,67	11,2	41,27	0,29	0,0259	0,8	0,053	0,0444	0,012
55	46,63	35,6	11,03	41,12	0,29	0,0263	0,8	0,053	0,0458	0,013
60	46,2	35,33	10,87	40,77	0,28	0,0258	0,8	0,053	0,0440	0,012
65	46,07	35,37	10,7	40,72	0,28	0,0262	0,8	0,053	0,0454	0,012
70	45,83	35,3	10,53	40,57	0,28	0,0266	0,8	0,053	0,0468	0,012
75	45,7	35,27	10,43	40,49	0,28	0,0268	0,8	0,053	0,0477	0,012
80	45,53	35,23	10,3	40,38	0,27	0,0262	0,8	0,053	0,0455	0,012
85	45,33	35,1	10,23	40,22	0,27	0,0264	0,8	0,053	0,0461	0,012
90	45,07	35	10,07	40,04	0,27	0,0268	0,8	0,053	0,0476	0,012
95	44,9	34,93	9,97	39,92	0,26	0,0261	0,8	0,053	0,0451	0,011
100	44,7	34,83	9,87	39,77	0,26	0,0263	0,8	0,053	0,0460	0,011
105	44,53	34,77	9,76	39,65	0,26	0,0266	0,8	0,053	0,0470	0,011
110	44,3	34,77	9,53	39,54	0,25	0,0262	0,8	0,053	0,0456	0,011
115	44,13	34,53	9,6	39,33	0,25	0,0260	0,8	0,053	0,0449	0,011
120	43,83	34,4	9,43	39,12	0,25	0,0265	0,8	0,053	0,0466	0,011

Tabel B. 2 Hasil perhitungan terhadap nilai efisiensi pada variasi luasan *heatsink* 96 cm<sup>2</sup>

Waktu (Menit)	Temperatur (°C)				Tegangan (Volt)	S (V/°C)	k (W/m°C)	$\sigma$ ( $\Omega^{-1}m^{-1}$ )	z ( $\times 10^{-3}$ )	$\eta$ (%)
	T2	T3	$\Delta T$	Tm						
0	48	39,9	8,1	43,95	0,22	0,0272	0,8	0,053	0,0489	0,010
5	47,77	39,8	7,97	43,79	0,22	0,0276	0,8	0,053	0,0505	0,010
10	47,03	39,47	7,56	43,25	0,21	0,0278	0,8	0,053	0,0511	0,010
15	46,7	39,37	7,33	43,04	0,21	0,0286	0,8	0,053	0,0544	0,010
20	46,6	39,17	7,43	42,89	0,21	0,0283	0,8	0,053	0,0529	0,010
25	46,3	38,97	7,33	42,64	0,21	0,0286	0,8	0,053	0,0544	0,010
30	46	38,8	7,2	42,40	0,2	0,0278	0,8	0,053	0,0511	0,009
35	45,83	38,7	7,13	42,27	0,2	0,0281	0,8	0,053	0,0521	0,009
40	45,57	38,53	7,04	42,05	0,2	0,0284	0,8	0,053	0,0535	0,009
45	45,33	38,43	6,9	41,88	0,2	0,0290	0,8	0,053	0,0557	0,010
50	45,17	38,5	6,67	41,84	0,19	0,0285	0,8	0,053	0,0538	0,009
55	44,9	38,23	6,67	41,57	0,19	0,0285	0,8	0,053	0,0538	0,009
60	44,77	38,1	6,67	41,44	0,19	0,0285	0,8	0,053	0,0538	0,009
65	44,67	38,2	6,47	41,44	0,18	0,0278	0,8	0,053	0,0513	0,008
70	44,57	38,23	6,34	41,40	0,18	0,0284	0,8	0,053	0,0534	0,008
75	44,37	38,1	6,27	41,24	0,18	0,0287	0,8	0,053	0,0546	0,009
80	44,17	38	6,17	41,09	0,17	0,0276	0,8	0,053	0,0503	0,008
85	43,87	37,83	6,04	40,85	0,17	0,0281	0,8	0,053	0,0525	0,008
90	43,7	37,7	6	40,70	0,17	0,0283	0,8	0,053	0,0532	0,008
95	43,43	37,47	5,96	40,45	0,17	0,0285	0,8	0,053	0,0539	0,008
100	42,63	36,9	5,73	39,77	0,16	0,0279	0,8	0,053	0,0517	0,007
105	42,43	36,8	5,63	39,62	0,16	0,0284	0,8	0,053	0,0535	0,008
110	42,17	36,77	5,4	39,47	0,15	0,0278	0,8	0,053	0,0511	0,007
115	41,7	36,4	5,3	39,05	0,15	0,0283	0,8	0,053	0,0531	0,007
120	41,4	36,06	5,33	38,74	0,15	0,0281	0,8	0,053	0,0525	0,007

Tabel B. 3 Hasil perhitungan terhadap nilai efisiensi pada variasi luasan *heatsink* 72 cm<sup>2</sup>

Waktu (Menit)	Temperatur (°C)				Tegangan (Volt)	S (V/°C)	k (W/m°C)	$\sigma$ ( $\alpha^{-1}\text{m}^{-1}$ )	z ( $\times 10^{-3}$ )	$\eta$ (%)
	T2	T3	$\Delta T$	Tm						
0	48,97	42,1	6,87	45,54	0,19	0,0277	0,8	0,053	0,0507	0,009
5	48,43	41,73	6,7	45,08	0,19	0,0284	0,8	0,053	0,0533	0,009
10	48,03	41,43	6,6	44,73	0,19	0,0288	0,8	0,053	0,0549	0,009
15	47,73	41,27	6,46	44,50	0,18	0,0279	0,8	0,053	0,0514	0,008
20	47,47	41	6,47	44,24	0,18	0,0278	0,8	0,053	0,0513	0,008
25	47,27	40,9	6,37	44,09	0,18	0,0283	0,8	0,053	0,0529	0,008
30	47	40,77	6,23	43,89	0,17	0,0273	0,8	0,053	0,0493	0,008
35	46,73	40,57	6,16	43,65	0,17	0,0276	0,8	0,053	0,0505	0,008
40	46,53	40,43	6,1	43,48	0,17	0,0279	0,8	0,053	0,0515	0,008
45	46,33	40,37	5,96	43,35	0,17	0,0285	0,8	0,053	0,0539	0,008
50	46,07	40,17	5,9	43,12	0,16	0,0271	0,8	0,053	0,0487	0,007
55	45,8	40	5,8	42,90	0,16	0,0276	0,8	0,053	0,0504	0,007
60	45,23	39,53	5,7	42,38	0,16	0,0281	0,8	0,053	0,0522	0,007
65	45,1	39,47	5,63	42,29	0,16	0,0284	0,8	0,053	0,0535	0,008
70	44,87	39,3	5,57	42,09	0,15	0,0269	0,8	0,053	0,0480	0,007
75	44,63	39,2	5,43	41,92	0,15	0,0276	0,8	0,053	0,0506	0,007
80	44,23	38,93	5,3	41,58	0,15	0,0283	0,8	0,053	0,0531	0,007
85	43,93	38,77	5,16	41,35	0,15	0,0291	0,8	0,053	0,0560	0,007
90	43,63	38,67	4,96	41,15	0,14	0,0282	0,8	0,053	0,0528	0,007
95	43,13	38,27	4,86	40,70	0,14	0,0288	0,8	0,053	0,0550	0,007
100	42,93	38,17	4,76	40,55	0,14	0,0294	0,8	0,053	0,0573	0,007
105	42,7	38	4,7	40,35	0,14	0,0298	0,8	0,053	0,058	0,007
110	42,43	37,8	4,63	40,12	0,13	0,0281	0,8	0,053	0,0522	0,006
115	42,2	37,63	4,57	39,92	0,13	0,0284	0,8	0,053	0,0536	0,006
120	41,9	37,43	4,47	39,67	0,13	0,0291	0,8	0,053	0,0560	0,006

**Lampiran C. Contoh Perhitungan**

1. Perhitungan pada variasi luasan *heatsink* 120 cm<sup>2</sup>

a) Perhitungan daya *output* (P)

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 0,33 \text{ Volt} \times 3,6 \times 10^{-3} \text{ A} \\ &= 1,19 \times 10^{-3} \text{ Watt} \text{ atau } 1,19 \times 10^{-3} \text{ J/s} \end{aligned}$$

b) Perhitungan koefisien *Seebeck* bahan (S)

$$T_2 = 48,57 \text{ }^\circ\text{C}; \quad T_3 = 36,17 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta T = 12,4 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta V = 0,22 \text{ Volt};$$

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

$$S = \frac{0,22}{8,1}$$

$$S = 0,0266 \text{ V/}^\circ\text{C}$$

c) Temperatur rata – rata antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG (T<sub>m</sub>)

$$T_m = \frac{T_2 + T_3}{2}$$

$$T_m = \frac{48,57 + 36,17}{2}$$

$$T_m = 42,37 \text{ }^\circ\text{C}$$

d) Perhitungan *Figure of Merit* (Z)

$$\sigma = 0,053 \text{ } \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}; \quad k = 0,8 \text{ W/m }^\circ\text{C};$$

$$Z = \frac{\sigma S^2}{k}$$

$$Z = \frac{0,053 \times 0,0266^2}{0,8}$$

$$Z = 0,0469 \times 10^{-3}$$

e) Perhitungan Nilai Efisiensi Modul TEG ( $\eta$ )

$$\eta = \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{\sqrt{1 + Z T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z T_m} + \frac{T_3}{T_2}} \times 100\%$$

$$\eta = \left(\frac{T_2}{T_2} - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{\sqrt{1 + Z T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z T_m} + \frac{T_3}{T_2}} \times 100\%$$

$$\eta = \left( \frac{48,57}{48,57} - \frac{36,17}{48,57} \right) \frac{\sqrt{1 + 0,0469 \times 10^{-3} \times 42,37} - 1}{\sqrt{1 + 0,0469 \times 10^{-3} \times 42,37} + \frac{36,17}{48,57}} \times 100\%$$

$$\eta = 0,14 \%$$

2. Perhitungan pada variasi luasan *heatsink* 96 cm<sup>2</sup>

a) Perhitungan daya output (P)

$$= P = V \times I$$

$$= 0,22 \text{ Volt} \times 2,48 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$= 0,55 \times 10^{-3} \text{ Watt} \text{ atau } 0,55 \times 10^{-3} \text{ J/s}$$

b) Perhitungan koefisien *Seebeck* bahan (S)

$$T_2 = 48 \text{ }^\circ\text{C}; \quad T_3 = 39,9 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta T = 8,1 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta V = 0,22 \text{ Volt};$$

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

$$S = \frac{0,33}{12,4}$$

$$S = 0,0272 \text{ V}^\circ\text{C}$$

c) Temperatur rata – rata antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG (T<sub>m</sub>)

$$T_m = \frac{T_2 + T_3}{2}$$

$$T_m = \frac{48 + 39,9}{2}$$

$$T_m = 43,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

d) Perhitungan *Figure of Merit* (Z)

$$\sigma = 0,053 \text{ } \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}; \quad k = 0,8 \text{ W/m }^\circ\text{C};$$

$$Z = \frac{\sigma S^2}{k}$$

$$Z = \frac{0,053 \times 0,0272^2}{0,8}$$

$$Z = 0,0489 \times 10^{-3}$$

- e) Perhitungan Nilai Efisiensi Modul TEG ( $\eta$ )

$$\eta = \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{\sqrt{1 + Z T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z T_m} + \frac{T_3}{T_2}} \times 100\%$$

$$\eta = \left(\frac{T_2}{T_2} - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{\sqrt{1 + Z T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z T_m} + \frac{T_3}{T_2}} \times 100\%$$

$$\eta = \left(\frac{48}{48} - \frac{39,9}{48}\right) \frac{\sqrt{1 + 0,0489 \times 10^{-3} \times 43,95} - 1}{\sqrt{1 + 0,0489 \times 10^{-3} \times 43,95} + \frac{39,9}{48}} \times 100\%$$

$$\eta = 0,10 \%$$

3. Perhitungan pada variasi luasan *heatsink* 72 cm<sup>2</sup>

- a) Perhitungan daya output (P)

$$P = V \times I$$

$$= 0,19 \text{ Volt} \times 2,16 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$= 0,42 \times 10^{-3} \text{ Watt} \text{ atau } 0,42 \times 10^{-3} \text{ J/s}$$

- b) Perhitungan koefisien *Seebeck* bahan (S)

$$T_2 = 48,97 \text{ }^\circ\text{C}; \quad T_3 = 42,1 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta T = 6,87 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta V = 0,19 \text{ Volt};$$

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

$$S = \frac{0,19}{6,87}$$

$$S = 0,0277 \text{ V}^\circ\text{C}$$

- c) Temperatur rata – rata antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG ( $T_m$ )

$$T_m = \frac{T_2 + T_3}{2}$$

$$T_m = \frac{48,97 + 42,1}{2}$$

$$T_m = 45,54 \text{ }^\circ\text{C}$$

d) Perhitungan *Figure of Merit* ( $Z$ )

$$\sigma = 0,053 \, \Omega^{-1} \, \text{m}^{-1}; \quad k = 0,8 \, \text{W/m } ^\circ\text{C};$$

$$Z = \frac{\sigma S^2}{k}$$

$$Z = \frac{0,053 \times 0,0277^2}{0,8}$$

$$Z = 0,0507 \times 10^{-3}$$

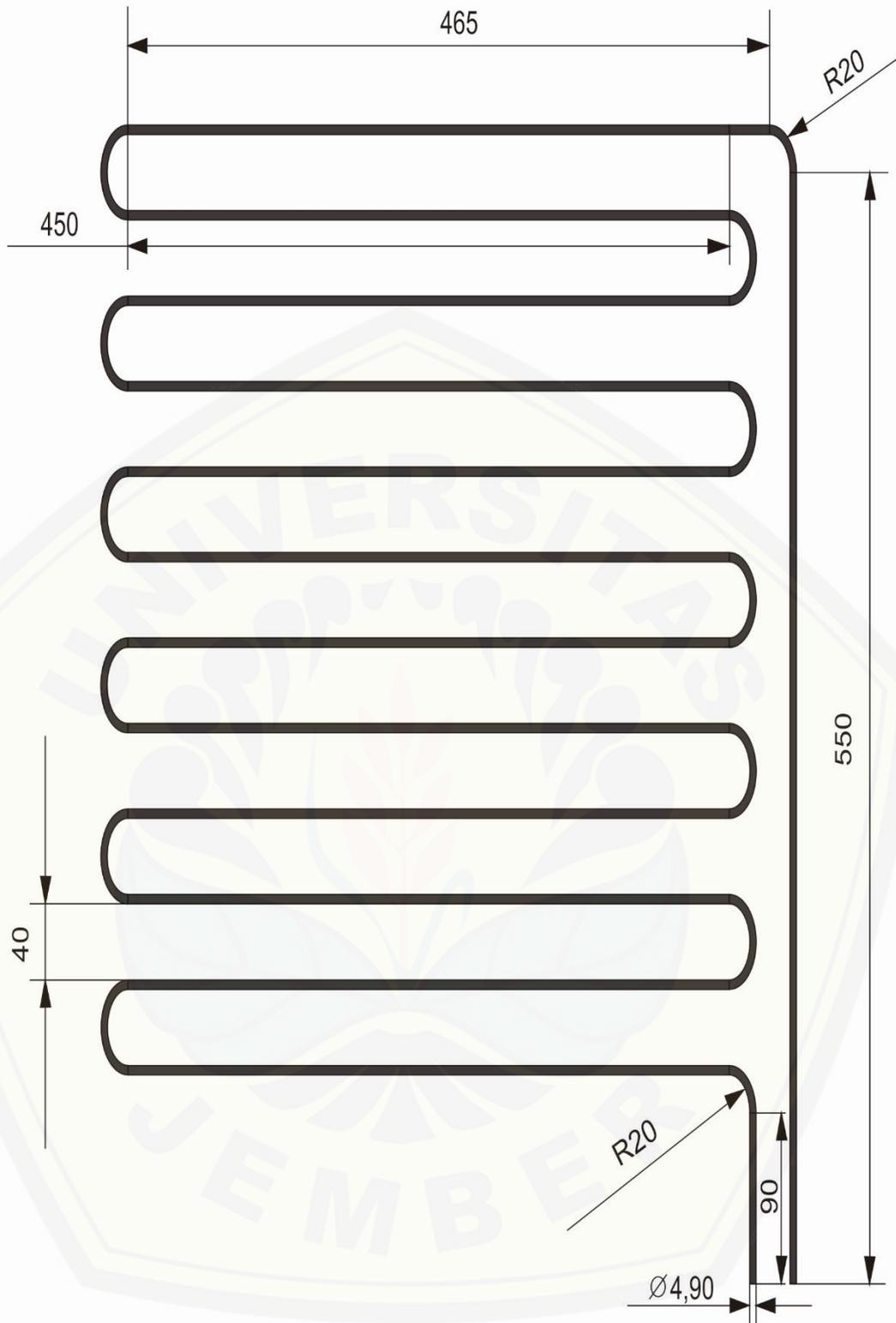
e) Perhitungan Nilai Efisiensi Modul TEG ( $\eta$ )

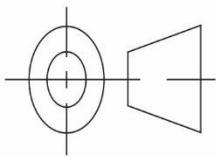
$$\eta = \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{\sqrt{1 + Z T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z T_m} + \frac{T_3}{T_2}} \times 100\%$$

$$\eta = \left(\frac{T_2}{T_2} - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{\sqrt{1 + Z T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z T_m} + \frac{T_3}{T_2}} \times 100\%$$

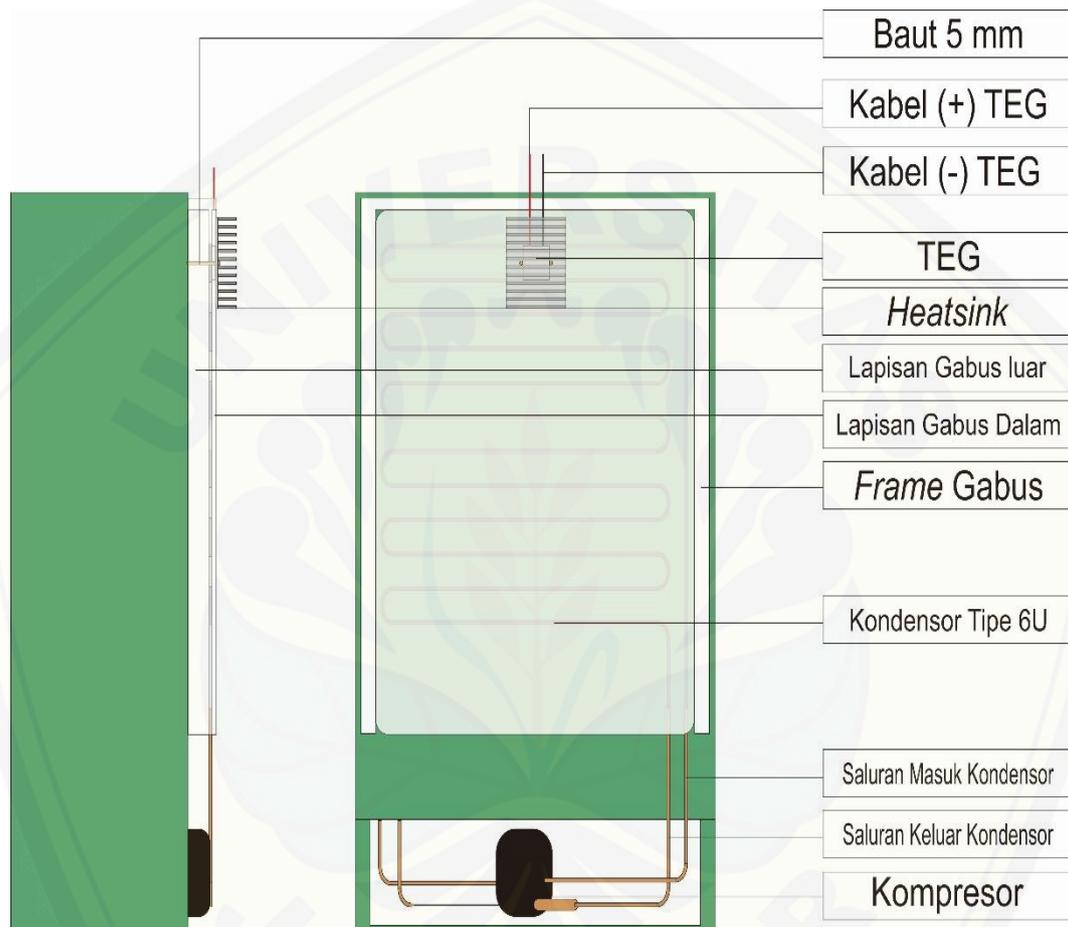
$$\eta = \left(\frac{48,97}{48,97} - \frac{42,1}{48,97}\right) \frac{\sqrt{1 + 0,0507 \times 10^{-3} \times 45,54} - 1}{\sqrt{1 + 0,0507 \times 10^{-3} \times 45,54} + \frac{42,1}{48,97}} \times 100\%$$

$$\eta = 0,009 \%$$

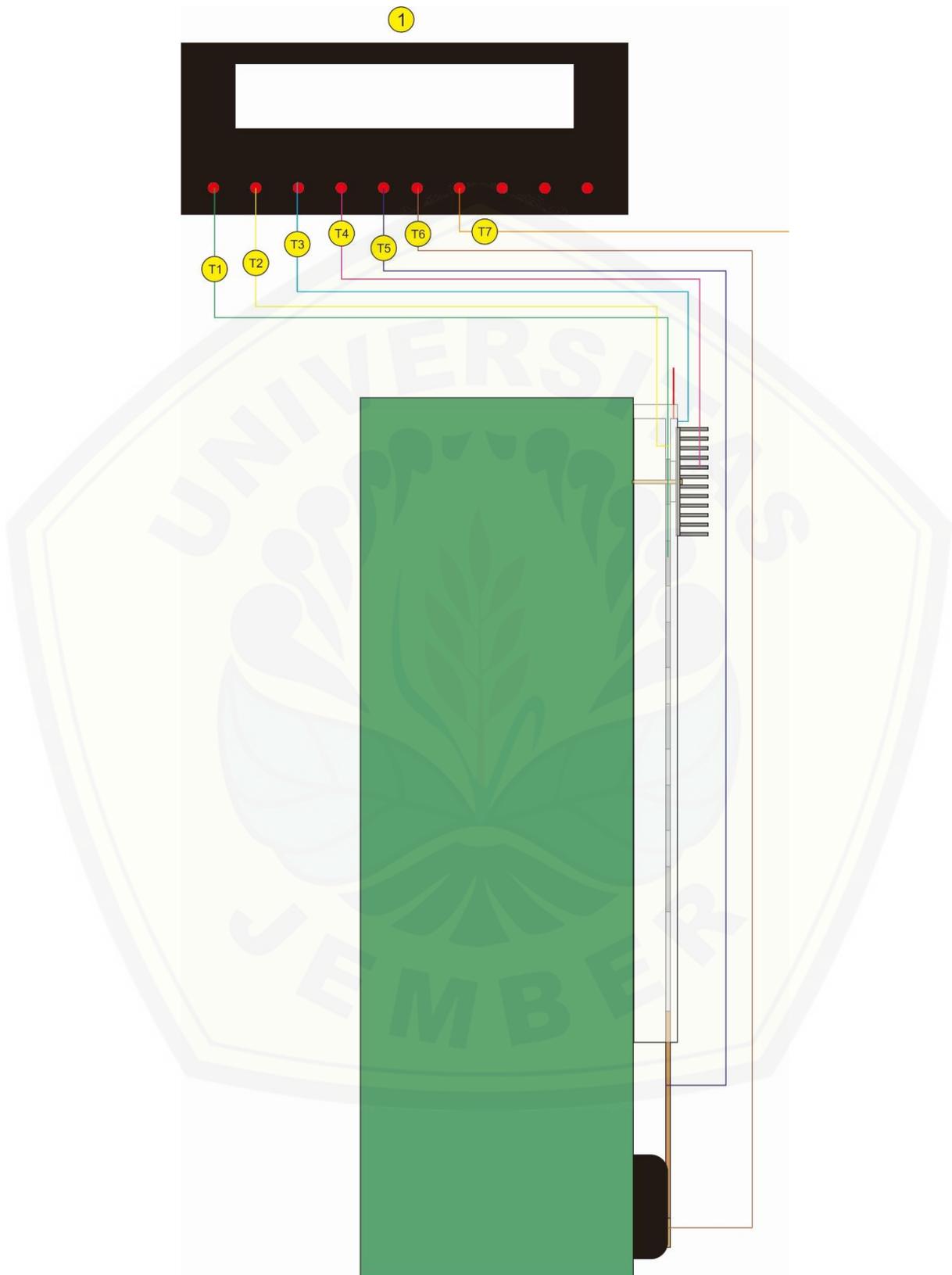


	Skala : 1 : 2	Digambar : Yudha Wiradika	Keterangan :  <b>Lampiran D</b>		
	Ukuran : mm	Kelas :			
	Tanggal : 07 Desember 2018	Dilihat :			
Teknik Mesin Universitas Jember		Kondensor Kulkas Tipe 6U		Halaman 72	A4

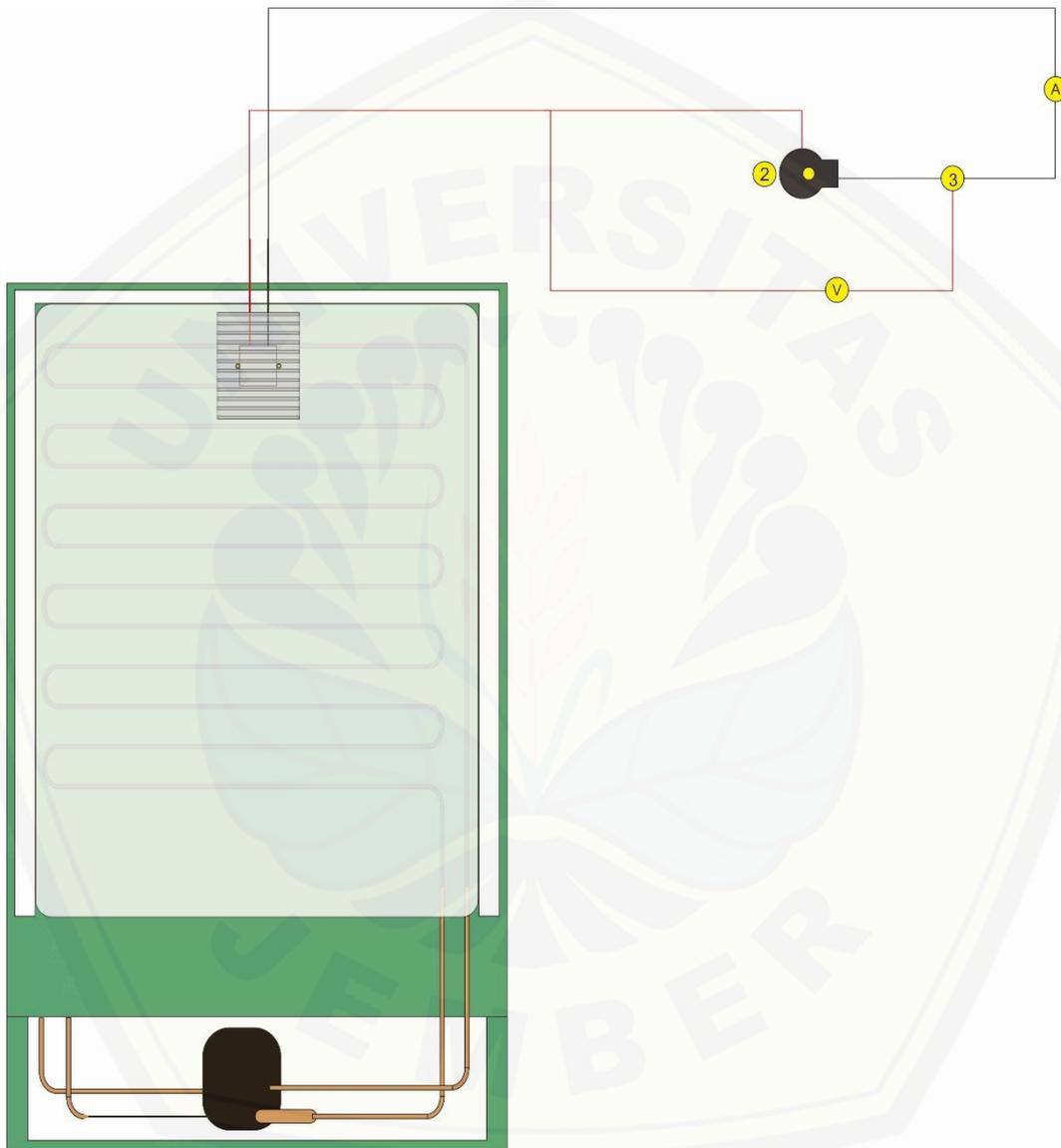
## Lampiran E Desain Alat Penelitian



Gambar E. 1 Alat penelitian



Gambar E. 2 Skema pengambilan data nilai temperatur



Gambar E. 3 Skema pengambilan data arus dan tegangan *output*

**Lampiran F Spesifikasi TEG SP-1848-27145 SA**

Gambar F. 1 TEG SP 1848-27145 SA

Tabel F. 1 Spesifikasi TEG SP 1848-27145 SA

Luas TEG	40 mm x 40 mm
$\Delta T_{Max}$	62° C
$I_{Max}$	9,36 A
$V_{Max}$	3,48 V
$Q_{Max}$	21,3 Watt
Hambatan Dalam	0,323 $\Omega$
Jumlah Pasang Kaki	128 Pasang

## Lampiran G Spesifikasi Data Logger

### Midi LOGGER GL200A



Gambar I.1 Midi LOGGER GL200A

Tabel G. 1 Spesifikasi Midi LOGGER GL200A

Item	Description
Number of Channels	Analog 10ch, Logic 1ch, Pulse 1ch, (RPM, Instant, Count), Alarm output 1ch
Input Method	Isolated input
Display unit	3,5" TFT color LCD
Input type	DC voltage 20 mV to 50V, 1-5V
	Temperature
Recording interval	Humidity used an optional humidity sensor
	10 ms to 1h (there is a limitation on no. of channels for 100ms or faster sampling, Volt range only)
Internal memory	3.5MB (Flash memory) Hold data after put off the power
External recording medium	USB memory enable to save data directly
PC I/F	USB
Display	Waveform display/ Digital display switching, Review display
Power supply	AC adapter, DC drive, battery pack (Battery life: 6 hours with optional B-517, depending on our criteria specified)
Dimensions, weight	194" x 122" x 41mm, 480g
Accessories	AC power adapter, cable 1set, CD-ROM 1pc PC software PDF user manual, quick start guide

**Lampiran H Dokumentasi Penelitian**



Gambar H. 1 Variasi luasan *heatsink* 120 cm<sup>2</sup>



Gambar H. 2 Variasi luasan *heatsink* 96 cm<sup>2</sup>



Gambar H. 3 Variasi luasan *heatsink* 72 cm<sup>2</sup>



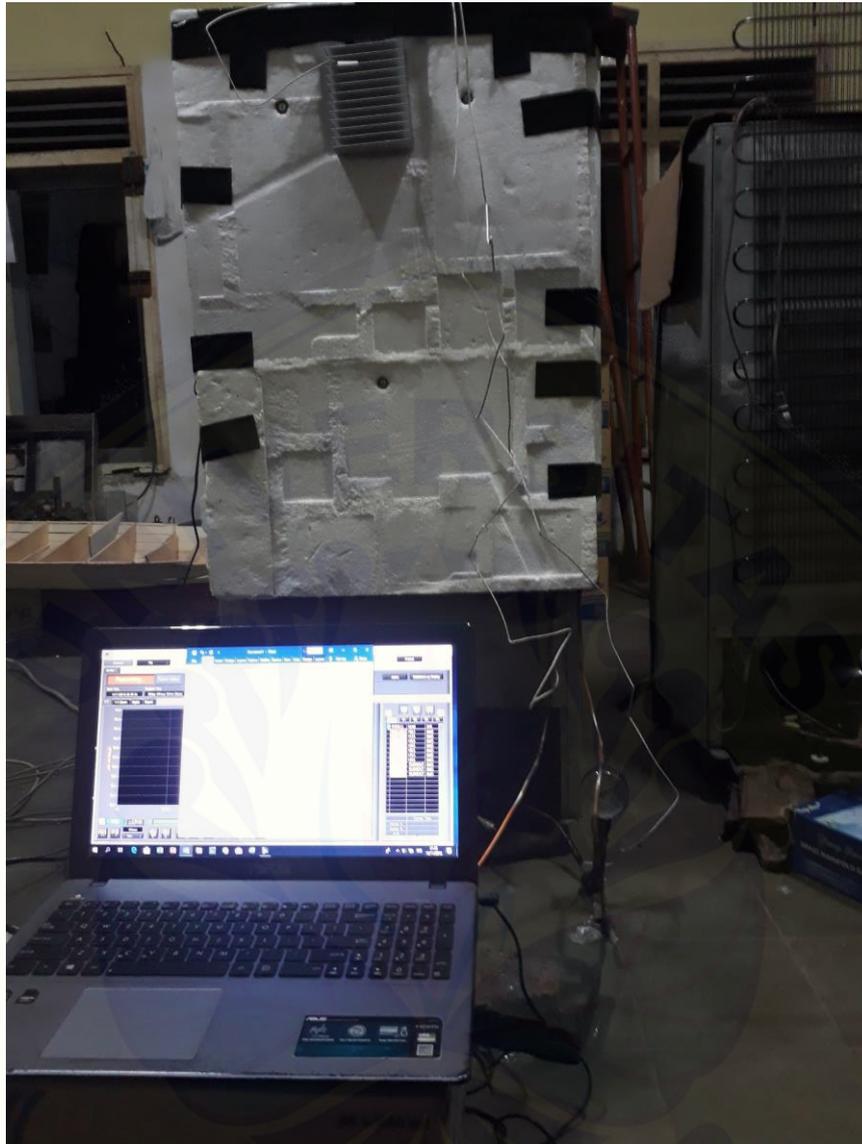
Gambar H. 4 Penggunaan *data logger* untuk pengukuran keseluruhan temperatur



Gambar H. 5 Penggunaan dua buah multimeter untuk mengukur arus dan tegangan



Gambar H. 6 Penggunaan potensiometer untuk menentukan jumlah hambatan yang digunakan



Gambar H. 7 Proses pengambilan data