

**SKRIPSI**

**KINERJA PEMBANGKIT DAYA BERBASIS  
*THERMOELECTRIC GENERATOR (TEG) PADA STEAMER***

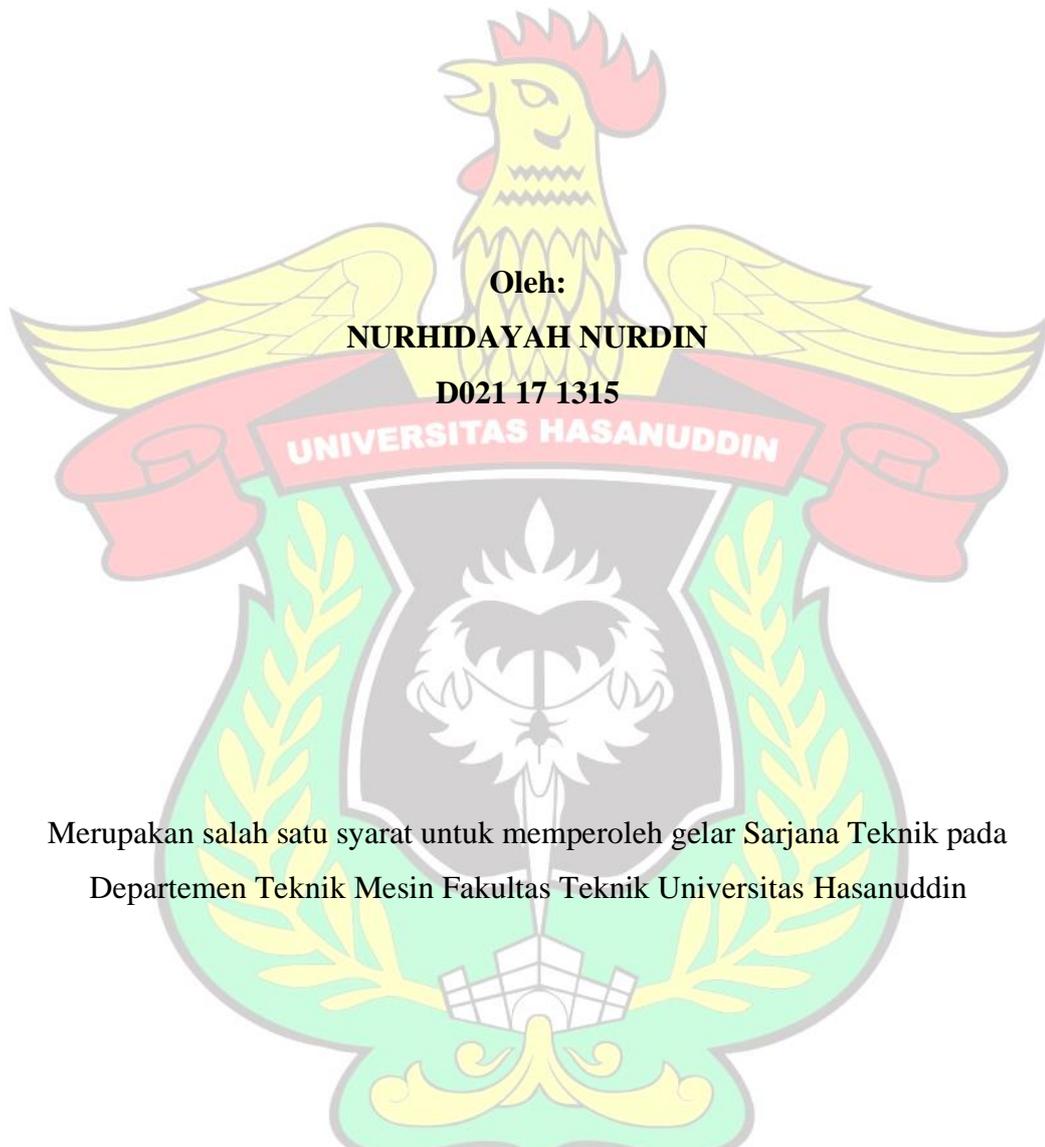
**OLEH :  
NURHIDAYAH NURDIN  
D021 17 1315**



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

**SKRIPSI**

**KINERJA PEMBANGKIT DAYA BERBASIS  
*THERMOELECTRIC GENERATOR (TEG) PADA STEAMER***



**Oleh:**

**NURHIDAYAH NURDIN**

**D021 17 1315**

Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2022**

## LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

**JUDUL:**

### **KINERJA PEMBANGKIT DAYA BERBASIS THERMOELECTRIC GENERATOR (TEG) PADA STEAMER**

**NURHIDAYAH NURDIN**

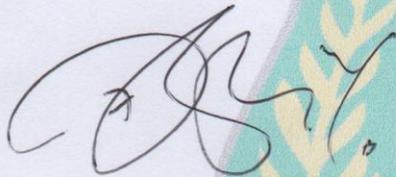
**D021 17 1315**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



**Dr. Ir. Zurvati Djafar, MT.**  
NIP. 19680301 199702 2 001



**Prof. Dr-Ing Ir. Wahyu H Piarah, MSME**  
NIP. 19600302 198609 1 001

Mengetahui,  
Ketua Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



**Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT.**  
NIP. 19720825 200003 1 001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nurhidayah Nurdin

NIM : D021171315

Program Studi : Teknik Mesin

Jenjang : S-1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis saya berjudul

### **KINERJA PEMBANGKIT DAYA BERBASIS *THERMOELECTRIC* GENERATOR (TEG) PADA STEAMER**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil-alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 09 April 2022

Yang membuat pernyataan,



Nurhidayah Nurdin

## ABSTRAK

**NURHIDAYAH NURDIN.,** *Kinerja Pembangkit Daya Berbasis Thermoelectric Generator (TEG) pada Steamer (dibimbing oleh Wahyu H. Piarah dan Zuryati Djafar)*

*Thermoelectric Generator (TEG)* adalah teknologi dengan peralatan *solid state* atau semi konduktor yang mampu mengubah suatu energi panas menjadi energi listrik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh modul TEG sebagai sumber energi alternatif dengan menggunakan sumber dari panas buangan yang dihasilkan oleh steamer. Pengambilan data menggunakan *National Instrument Labview* untuk mengukur temperature dan tegangan yang dihasilkan. Pengujian dilakukan dengan berbagai variasi susunan TEG yaitu menggunakan modul tunggal, modul ganda modul susun tiga dan modul susun empat tanpa dan menggunakan bantuan kipas. Adapun hasil penelitian ini yaitu untuk variasi susunan TEG tanpa menggunakan bantuan kipas masing-masing menghasilkan beda temperatur 14.78°C, 16°C, 22.35°C, dan 221.48°C dan tegangan sebanyak 1.65 V, 2.62 V, 4.06 V, dan 3.63 V. Sedangkan untuk variasi susunan TEG dengan menggunakan bantuan kipas masing-masing menghasilkan beda temperatur 19.93°C, 25.39°C, 32.1°C, dan 26.41°C dan tegangan sebanyak 2.14 V, 4.14 V, 6.15 V, dan 5,13 V.

**Kata Kunci:** *Steamer, Thermoelectric Generator (TEG), Perbedaan Temperatur, Perbedaan Tegangan*

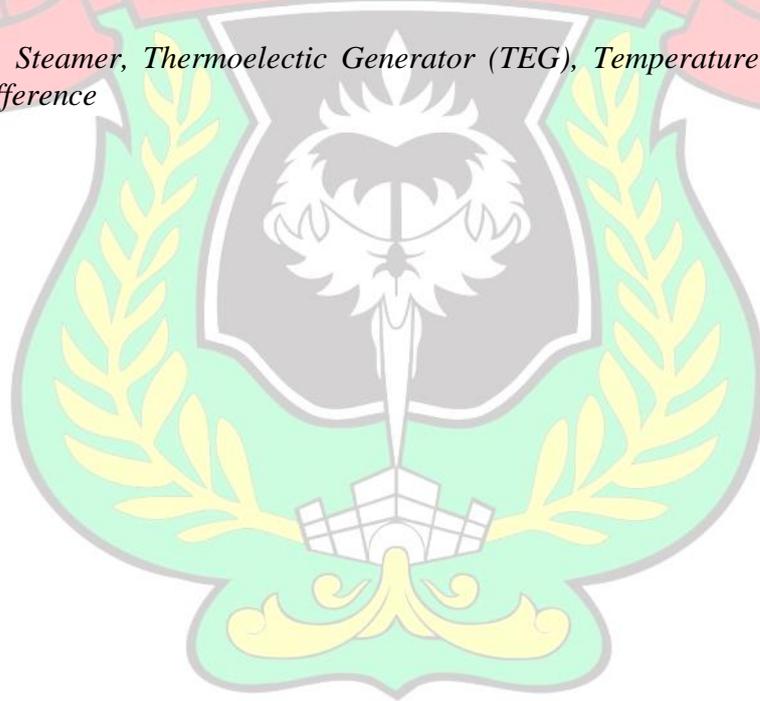


## ABSTRAC

**NURHIDAYAH NURDIN**, The Performance of Power Generator Based on Thermoelectric Generator (TEG) of Steamer (supervised by Wahyu H. Piarah and Zuryati Djafar)

Thermoelectric Generator (TEG) is a technology with solid state or semiconductor equipment that converting heat to electrical power. This research was conducted to determine the potential of electrical energy that can be generated by the TEG module as an alternative energy source by using a source of waste heat energy by steamer. Data retrieval using the National Instrument Labview to measure the temperature and the voltage. The test are carried out with a variations using single module, double module, triple stacking module and fourstacking module without and using a fan. The results of this study show that for variations in the TEG arrangement without using a fan, the temperature difference of each produces 14.78°C, 16°C, 22.35°C, and 221.48°C and the voltage 1.65 V, 2.62 V, 4.06 V, and 3.63 V. And for TEG using a fan the temperature difference of each produces 19.93°C, 25.39°C, 32.1°C, and 26.41°C and the voltage 2.14 V, 4.14 V, 6.15 V, and 5.13 V.

**Keywords:** *Steamer, Thermoelectric Generator (TEG), Temperature Difference, Voltage Difference*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul **“Kinerja Pembangkit Daya Berbasis *Thermoelectric Generator* (TEG) pada *Steamer*”**. Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Sarjana pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan skripsi ini, berbagai pihak telah banyak memberikan dorongan, bantuan serta masukan sehingga dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada orang tua ayahanda **H. Nurdin Laoki, S.H.** dan ibunda tersayang **Hj. Kartini Dollah, S.H.** dan juga kepada saudara penulis yaitu **Nurbiah Permatasari Nurdin, B.Eng, Nurul Nisah Nurdin, S.Ak, MA, Muh. Idris Nurdin** dan **Muh. Nur Ilham Nurdin**.

Penulis juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan petunjuk, terutama kepada:

1. **Prof. Dr. -Ing. Wahyu H Piarah, MSME** dan **Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT** selaku pembimbing atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari penyusunan proposal, pelaksanaan penelitian sampai dengan penyusunan skripsi ini.
2. **Dr. Eng. Jalaluddin., ST., MT.,** selaku Ketua Tim Penguji sekaligus Ketua Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin dan **Ir. Andi Mangkau, MT.,** selaku anggota tim penguji atas waktu dan segala masukan yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi ini.
3. Seluruh dosen dan staf pada Program Studi Teknik Mesin Universitas Hasanuddin atas segala ilmu dan masukan selama penulis kuliah.
4. Keluarga besar **PMR Wismu 05, PMR Madya 8, KOWISMU** dan **KSR Markas Unit 118 Makassar** sebagai keluarga kedua penulis serta atas

support ilmu dan pengalaman yang sangat bermanfaat dalam menjalani proses-proses yang telah dilalui hingga saat ini.

5. Seluruh sahabat tercinta penulis Andi Tenri Nurunnisa, Nur Ainun Annisa, A. Rafika Rezky, Adriani Phady, Nur Amalia, Nurul Syafira, Aqilah Mardiah Alqaf, Fakhry F. Rahman, Siti Fatimah Amaliah, Aryl Furqan Aswar, Andi Rich Ainul Fiqrah, Mohammad Alief Anshary dan Zulfadly Hamzah yang selalu ada dan memberi motivasi, inspirasi dan acuan sehingga penulis tidak patah semangat dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Saudara-saudara seperjuangan **ZYNCROMEZH 2017** dan **TEKNIK 2017** yang setia menemani, membantu, dan mendukung penulis dari awal kuliah dan seterusnya. Semoga kesuksesan selalu menyertai kita semua.
7. Organisasi kemahasiswaan **HMM FT-UH**, **OKFT-UH** dan **ART09 SMFT-UH** sebagai wadah pembentukan karakter penulis hingga saat ini.
8. Teman-teman dan kakak-kakak seperjuangan **Laboratorium Mesin Pendingin dan Pemanas** yang telah bersedia menemani dan membantu selama masa penelitian dan penyusunan tugas akhir
9. Last but not least, I wanna thank me for believing in me, for doing all this hard work, for having no days off, for never quitting, I wanna thank me for just being me at all times.
10. Serta semua pihak yang tidak bisa disebut satu persatu dalam membantu penulis.

Penulis menyadari bahwa naskah skripsi ini masih banyak kekurangan oleh karena itu segala kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan demi perbaikan dalam skripsi ini. Akhirnya semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan energi terbarukan.

Gowa, Maret 2022

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAC.....</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Tinjauan Pustaka .....	4
2.2 Thermoelectric Generator.....	5
2.3 Efek Termoelektrik.....	9
2.4 Perhitungan Termoelektrik.....	19
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>21</b>
3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian.....	21
3.2 Alat Dan Bahan .....	21
3.3 Metode Pengujian.....	24
3.4 Skema Rancangan Instalasi Pengujian dan Sistem Pengukuran .....	24
3.5 Metode Pengambilan Data .....	24
3.6 Jadwal Penelitian.....	25
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>26</b>
4.1 Analisis Data Dan Perhitungan .....	26
4.2 Pembahasan .....	27
4.2.1 Tanpa Bantuan Kipas .....	27

4.2.2 Dengan Bantuan Kipas.....	31
<b>BAB 5 PENUTUP.....</b>	<b>36</b>
5.1 Kesimpulan.....	36
5.2 Saran.....	37
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>38</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>40</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Desain Alat (Usman, 2018).....	4
Gambar 2.2 Penelitian yang dilakukan Nuwayhid.....	5
Gambar 2.3 Skema Termoelektrik (Putra, 2009).....	7
Gambar 2.4 Skema Termoelektrik (Nuwayhid, 2005).....	8
Gambar 2.5 Skema Ilustrsi Efek Seebeck (S.B. Rifat, dkk. 2003) .....	9
Gambar 2.6 Skema Perpindahan Panas Konduksi (Cengel. Y.A. 2003) .....	12
Gambar 2.7 Skema Perpindahan Panas Konveksi (Cengel. Y.A. 2003).....	15
Gambar 3.1 Steamer Aluminium .....	21
Gambar 3.2 Dudukan TEG .....	21
Gambar 3.3 Termokopel .....	22
Gambar 3.4 Modul <i>Thermoelectric Generator</i> (TEG).....	22
Gambar 3.5 Chassis dan Modul <i>National Instrument</i> .....	22
Gambar 3.6 Multimeter digital.....	23
Gambar 3.7 <i>Heatsink</i> .....	23
Gambar 3.8 Termal Pasta.....	23
Gambar 3.9 Desain dan Rancangan Instalasi <i>Steamer</i> .....	24
Gambar 4.1 Sejarah Temperatur Api ( $T_{Api}$ ) Variasi Susunan TEG Tanpa Bantuan Kipas .....	27
Gambar 4.2 Temperatur rata-rata sisi panas ( $T_H$ ) dan Temperatur rata-rata sisi dingin ( $T_C$ ) Variasi Susunan TEG Tanpa Bantuan Kipas .....	28
Gambar 4.3 Beda Temperatur Rerata ( $\Delta T$ ) dan Beda Tegangan ( $\Delta V$ ) Variasi Susunan TEG Tanpa Bantuan Kipas .....	29
Gambar 4.4 Panas yang Diserap Variasi Susunan TEG Tanpa Bantuan Kipas....	28
Gambar 4.5 Daya Listrik ( $P$ ) dan Efisiensi ( $\eta$ ) Variasi Susunan TEG Tanpa Bantuan Kipas .....	28
Gambar 4.6 Sejarah Temperatur Api ( $T_{Api}$ ) Variasi Susunan TEG dengan Bantuan Kipas .....	31
Gambar 4.7 Temperatur rata-rata sisi panas ( $T_H$ ) dan Temperatur rata-rata sisi dingin ( $T_C$ ) Variasi Susunan TEG dengan Bantuan Kipas .....	32
Gambar 4.8 Beda Temperatur Rerata ( $\Delta T$ ) dan Beda Tegangan ( $\Delta V$ ) Variasi Susunan TEG dengan Bantuan Kipas .....	33
Gambar 4.9 Panas yang Diserap Variasi Susunan TEG dengan Bantuan Kipas .	34
Gambar 4.10 Daya Listrik ( $P$ ) dan Efisiensi ( $\eta$ ) Variasi Susunan TEG dengan Bantuan Kipas .....	34

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konduktivitas Termal Material pada Suhu Ruangan.....	14
Tabel 2.2 Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (Chengel. Y.A. 2003).....	16
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian.....	25



## DAFTAR SIMBOL

Notasi	Keterangan	Satuan
$\alpha$	Koefisien Seebeck	V/°C
$\Delta V$	Perbedaan tegangan	V
$\Delta T$	Perbedaan temperatur	°C
$T_h$	Temperatur sisi panas modul	°C
$T_c$	Temperatur sisi dingin modul	°C
$T_{Api}$	Temperatur Api	°C
$T_A$	Temperatur Air	°C
$T_L$	Temperatur lingkungan	°C
$I$	Arus listrik	A
$R_i$	Beban internal modul	$\Omega$
$R_L$	Beban eksternal modul	$\Omega$
$Q_h$	Panas yang diserap	W
$k$	konduktifitas termal bahan	W/m.°C
$P$	Daya yang dihasilkan	W
$\eta$	Efisiensi	%

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. LATAR BELAKANG**

Berdasarkan Badan Pusat Statistika hasil sensus penduduk tiap 10 tahun menyatakan bahwa penduduk Indonesia terus bertambah hingga Desember 2020 telah mencapai 271.349 Jiwa. Sedangkan, Permintaan energi saat ini terus meningkat, seiring kemajuan peradaban, teknologi, gaya hidup dan pertumbuhan ekonomi. Pemerintah pun berkewajiban menyediakan energi dalam jumlah yang cukup, merata, terjangkau, dan dapat diakses oleh seluruh lapisan masyarakat, sehingga tercapai energi yang berkeadilan. Tetapi, pemanfaatan energi di Indonesia saat ini masih mengandalkan energi fosil, baik yang disubsidi maupun yang berasal dari impor. Di sisi lain, potensi Energi Baru dan Terbarukan (EBT) Indonesia sangat melimpah. Berdasarkan data yang dirilis Dewan Energi Dunia, Indonesia dalam ketahanan energi berada di peringkat ke-69 dari 129 negara pada tahun 2014. Terdapat 3 aspek yang menjadi penilaian ketahanan energi yaitu ketersediaan sumber energi, keterjangkauan pasokan energi dan kelanjutan pengembangan energi baru terbarukan. Sejauh ini Indonesia telah memiliki 8 sumber energi baru terbarukan yang masih belum dimanfaatkan secara maksimal. Sehingga, dibutuhkan penelitian dengan dasar pemanfaatan sumber energi baru terbarukan yang dapat menghasilkan energi listrik guna menanggulangi kemungkinan akan habisnya sumber daya di masa mendatang.

Indonesia juga dikenal sebagai negara dengan sejuta budaya, mulai dari Sabang hingga Merauke memiliki ragam budayanya masing-masing. Terutama dalam hal kuliner khas. Misalnya saja Yogyakarta dengan, Gudeg dan Ciloknya, Jakarta dengan Soto Betawi, dan Nasi Kebulinya, Makassar dengan Sop Saudara, Sop Konro dan Coto Makassar, serta banyak lagi daerah lain yang memiliki makanan khasnya sendiri. Meski demikian, Indonesia tetap memiliki satu selera terhadap makanan yang sama, yaitu bakso.

Bakso termasuk salah satu makanan jalanan paling populer di kota-kota dan desa-desa di Indonesia. Tidak hanya karena mudah dibuat tetapi juga karna

harganya yang terjangkau untuk setiap kalangan. Sehingga, semakin banyak bermunculan penjual bakso baik di restoran, kafe maupun warung kaki lima. Hal ini dapat dilihat dari banyaknya kafe serta warung kaki lima yang terdapat hampir disetiap sudut kota. Untuk warung-warung kaki lima sendiri biasanya lebih cenderung menggunakan gerobak karena dipikir lebih praktis apalagi mereka biasanya membangun tenda-tenda di pinggir jalan. Tenda-tenda ini tentu saja membutuhkan energi listrik untuk menyalakan lampu di malam hari. Selain itu, bakso juga harus tetap panas sehingga dapat menjaga cita rasa bakso tetap terasa enak.

Dari beberapa wawancara dari penjual bakso di lapangan, penjual bakso umumnya menggunakan aki untuk menyalakan lampu pada malam hari atau untuk penjual gerobak keliling hanya menggunakan powerbank untuk mengisi baterai hp mereka. Tetapi, aki ini hanya dapat bertahan selama 4 hari dengan 20 jam waktu untuk pengisian ulang. Hal ini tentu saja membutuhkan waktu dan biaya yang lebih mahal. Padahal, terdapat energi panas dari dinding-dinding panci kuah bakso tersebut yang dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi listrik. Energi panas tersebut dapat dikonversi (diubah) menjadi energi listrik dengan menggunakan teknologi elemen *Thermoelectric Generator* (TEG).

Teknologi termoelektrik ini sebelumnya telah pernah dibuat oleh Hasrah Rafika, Rahmat Imam Mainil dan Azridjal Aziz pada tahun 2016. Dalam jurnalnya, mereka menggunakan sumber panas yang berbeda yaitu dengan memanfaatkan panas dari knalpot motor dan suhu ruangan. Hanya saja, kami berpendapat bahwa hal ini belum maksimal dikarenakan penggunaan kendaraan bermotor yang jarang sehingga alat ini hanya bisa dilakukan pada saat-saat tertentu saja.

Berdasarkan uraian di atas, *Steamer* sebagai Pembangkit Daya berbasis *Thermoelectric Generator* (TEG) adalah salah satu inovasi teknologi masa kini yang sangat berguna bagi masyarakat luas karena energi panas dapat disimpan dan digunakan pada waktu yang dibutuhkan. *Steamer* akan didesain sedemikian rupa agar dapat digunakan secara optimal mengingat bahwa elemen termoelektrik ini selain praktis dibawa kemana-mana juga mudah diperoleh.

## 1.2. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang di atas, terdapat beberapa masalah yang dapat dirumuskan pada kegiatan ini, yaitu:

1. Bagaimana karakteristik temperatur dari *steamer* sebagai pembangkit daya?
2. Seberapa besar unjuk kerja (Daya Listrik dan Efisiensi) pada *steamer* yang terjadi?

## 1.3. TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan rumusan masalah di atas dapat diperoleh beberapa tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk menentukan karakteristik temperatur dari *steamer* sebagai pembangkit daya.
2. Untuk menghitung unjuk kerja (Daya Listrik dan Efisiensi) pada *steamer*.

## 1.4. BATASAN MASALAH

Adapun Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Temperatur lingkungan dalam pengambilan data berada pada range 28-32°C
2. Jenis termoelektrik yang digunakan adalah jenis tanpa spek atau *no brand*.
3. *Steamer* yang digunakan adalah *steamer* aluminium berkapasitas 15 liter.

## 1.5. MANFAAT

Manfaat yang diperoleh dari penelitian adalah sebagai berikut :

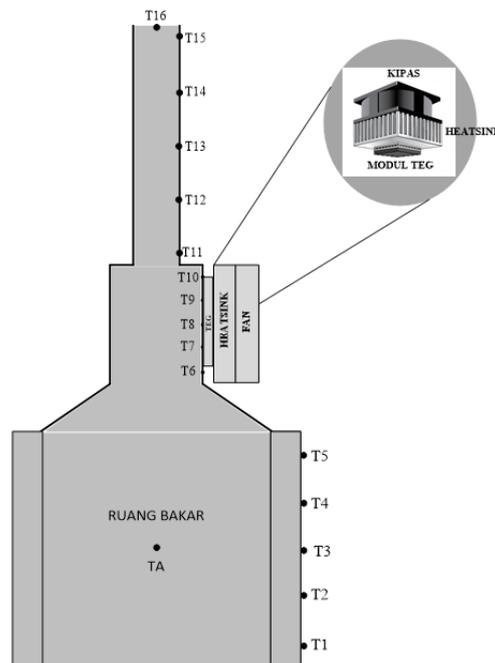
1. Memberikan suatu inovasi dalam bidang teknologi untuk pembangkit daya berbasis *thermoelectric generator* (TEG)
2. Memudahkan para pedagang warung kaki lima/penjual bakso dalam menyimpan energi agar dapat digunakan secara terus menerus.
3. Untuk meminimalisir biaya yang diperlukan dalam penggunaan listrik sehari-hari ketika sedang berdagang.
4. Untuk mengembangkan penggunaan prinsip termoelektrik dalam kehidupan sehari-hari.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Aplikasi *thermoelectric generator* (TEG) sudah pernah diujikan pada cerobong dari suatu insinerator untuk sampah non organik rumah tangga yang dilakukan oleh Usman Syamsuddin (2018). Usman melakukan penelitian dengan variasi tinggi cerobong 1, 2, dan 3 m dengan menggunakan 12 modul TEG yang disusun secara seri. Sehingga dapat menghasilkan potensi daya listrik hingga 24,22W (3m) dengan tegangan 9,09 Volt dan beda temperatur 41,5°C (3 m).



Gambar 2.1 Desain Alat (Usman, 2018)

Penelitian lain yang memanfaatkan penggunaan modul termoelektrik untuk pembangkitan energi listrik diaplikasikan pada kompor kayu yang dilakukan Nuwayhid (2002) dengan menggunakan modul termoelektrik pendingin, kompor mampu membangkitkan daya 1W pada temperatur permukaan kompor 100°C–300°C. Nuwayhid (2005) melanjutkan penelitian dengan pendinginan modul termoelektrik menggunakan pendinginan konveksi alami. Diterapkan pada kompor

kayu rumah tangga menggunakan modul tunggal. Hasilnya daya listrik 4,2W mampu dibangkitkan pada sistem ini.

Authors	Heatsink (Cold sink)	Type of module	Power/module
Nuwayhid 2003	Natural air cooling	Peltier	1W
Nuwayhid 2005	Natural air cooling	Seebeck	4.2W
Nuwayhid 2007	Heat pipes cooling	Seebeck	3.4W

Gambar 2.2 Penelitian yang Dilakukan oleh Nuwayhid

## 2.2. Thermoelectric Generator

Termoelektrik pertama kali ditemukan pada tahun 1822 oleh Thomas Johan Seebeck, yang melakukan observasi tentang aliran listrik ketika bertemunya dua logam yang berbeda, bergabung dalam dua tempat dimana logam yang satu dipanaskan dan logam yang satunya dibiarkan tetap pada suhu rendah. Tenaga yang dihasilkan pada awalnya kecil dan tidak ada pembangkit listrik. Dengan ditemukannya semikonduktor, ditemukan bahwa tenaga yang dihasilkan dapat diperbesar secara signifikan dan akhirnya menjadi minat baru pada pertengahan abad ke-20 (Nuwayhid, 2005).

Pada percobaan yang dilakukan Thomas Johan Seebeck, ia menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian. Di antara kedua logam tersebut lalu diletakkan jarum kompas. Ketika sisi logam tersebut dipanaskan, jarum kompas ternyata bergerak. Hal ini terjadi oleh karena aliran listrik yang terjadi pada logam menimbulkan medan magnet. Medan magnet inilah yang menggerakkan jarum kompas tersebut. Fenomena tersebut kemudian dikenal dengan efek Seebeck (Putra, 2009). Sehingga, *thermoelectric generator* bagaimanapun dapat menghasilkan daya listrik bahkan dari sumber energi panas berkualitas rendah (Xuan, 2003).

Pada tahun 1834 Jean Charles Peltier, seorang berkebangsaan Perancis, penemuan Seebeck ini memberikannya inspirasi untuk melihat kebalikan dari fenomena tersebut. Dia mengalirkan listrik pada dua buah logam yang direkatkan dalam sebuah rangkaian. Ketika arus listrik dialirkan, terjadi penyerapan panas pada sambungan kedua logam tersebut dan pelepasan panas pada sambungan yang

lainnya. Pelepasan dan penyerapan panas ini saling berbalik begitu arah arus dibalik. Penemuan yang terjadi pada tahun 1934 ini kemudian dikenal dengan efek Peltier. Efek Seebeck dan Peltier inilah yang kemudian menjadi pengembangan teknologi termoelektrik (Poetro, 2011).

Dua puluh tahun kemudian, sekitar tahun 1851 William Thomson (Lord Kelvin), memberikan penjelasan secara komprehensif mengenai keterkaitan efek Seebeck dan efek Peltier dengan termodinamika. Koefisien Peltier merupakan perkalian dari koefisien seebeck. Thomson akhirnya mengeluarkan efek ketiga yang dikenal dengan efek Thomson. Panas dapat diserap atau diciptakan mengalir di dalam material. Panas sebanding dengan arah arus listrik yang dialirkan. Konstanta perbandingan ini disebut dengan koefisien Thomson, yang secara termodinamika berkaitan dengan koefisien Seebeck. Salah satu aplikasi fenomena termoelektrik adalah sebagai pompa kalor yang bisa difungsikan sebagai pompa kalor yang dapat digunakan sebagai pemanas atau pendingin suatu produk.

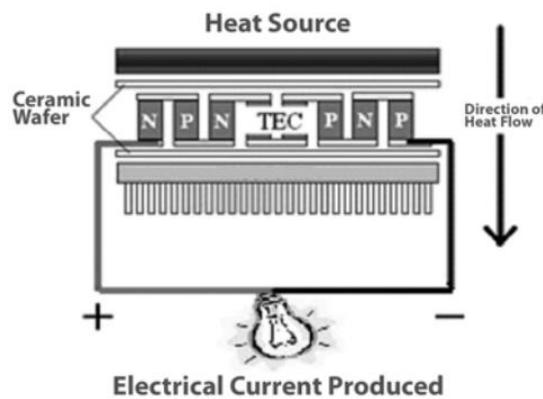
#### 2.2.1. Prinsip Kerja

Termoelektrik adalah teknologi dengan peralatan *solid state* atau semi konduktor yang mampu mengubah suatu energi panas menjadi energi listrik dengan menerapkan "Efek Seebeck" (Djafar, 2014). Konsep Seebeck menggambarkan bahwa jika dua buah material logam (biasanya semi konduktor) yang tersambung berada di lingkungan dengan dua temperatur berbeda, maka di material tersebut akan mengalir arus listrik atau gaya gerak listrik. Konsep ini apabila diterapkan pada steamer dengan panas buang pada *steamer* berkisar antara 200-300°C dan temperatur lingkungan bekisar antara 30-35°C, akan menghasilkan gaya gerak listrik yang kemudian dapat disimpan di dalam baterai (Putra, 2009).

Termoelektrik mempunyai kemampuan mendinginkan dan memanaskan sekaligus dimana perubahan polaritas tegangan akan membalikkan fungsi dari panas ke dingin dan sebaliknya. Jika sebuah elemen termoelektrik dialiri arus listrik DC maka kedua sisi elemen ini akan menjadi

panas dan dingin. Sisi dingin inilah yang dimanfaatkan sebagai pendingin udara ruangan dengan bantuan heatsink dan fan atau blower (Jaspalshin, 2012).

Ketika peltier di alirkan arus listrik, elektron–elektron pada mengalir dari kutub negatif ke kutub positif dalam rangkaian. Elektron dari material yang kekurangan elektron (*P-Type Semiconductor*) berpindah ke material yang kelebihan elektron (*N-Type Semiconductor*). Dalam keadaan ini, konektor akan menyerap energi sehingga sisi ini akan bersuhu dingin. Di sisi lain, ketika elektron berpindah dari tipe-n ke tipe-p, konektor akan melepaskan energi sehingga pada sisi ini akan bersuhu panas. Cara kerja dari peltier dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.3 Skema Termoelektrik (Putra, 2009)

Hasilnya, nilai kalor yang dilepaskan pada sisi panas sama dengan nilai kalor yang diserap di sisi dingin ditambah dengan daya yang diberikan ke modul termoelektrik, sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$q_h = q_c + P_{in} \quad (2.1)$$

Keterangan :

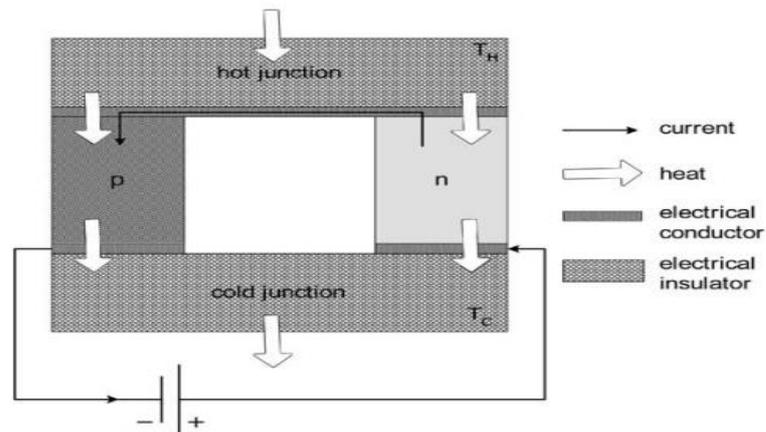
$q_h$  = kalor yang dilepaskan pada bagian sisi panas elemen Peltier (Watt)

$q_c$  = kalor yang diserap pada bagian sisi dingin elemen Peltier (Watt)

$P_{in}$  = daya input (Watt)

Pada kondisi ideal, jumlah kalor yang diserap pada sisi dingin dan dilepas pada sisi panas bergantung pada koefisien Peltier dan arus listrik yang

digunakan. Pada saat dioperasikan jumlah kalor yang diserap pada sisi dingin akan berkurang dikarenakan dua faktor, yaitu kalor yang terbentuk pada material semikonduktor dikarenakan perbedaan temperatur antara sisi dingin dan sisi panas modul dan *Joule Heat* yang nilainya akan sama dengan kuadrat dari arus listrik yang digunakan. Arah dari aliran listrik yang terjadi di termoelektrik seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.4 Skema Termoelektrik (Nuwayhid, 2005)

### 2.2.2. Parameter Penggunaan Modul Termoelektrik

Pada modul termoelektrik yang digunakan untuk aplikasi pemanas dikarakterisasikan kedalam beberapa parameter penggunaan yang menentukan pemilihan modul yang lebih akurat diantara banyak pilihan modul yang tersedia. Berikut beberapa parameter yang menjadi dasar pemilihan modul termoelektrik :

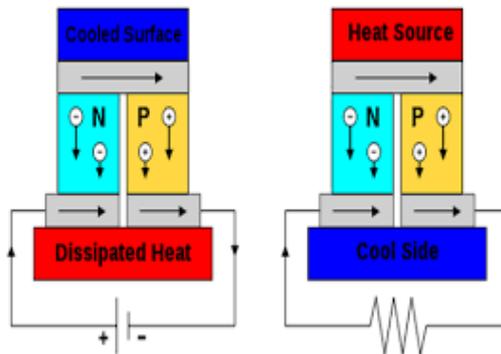
1. Jumlah kalor yang akan diserap oleh sisi panas modul.
2. Perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul ketika beroperasi
3. Arus listrik yang digunakan oleh modul.
4. Tegangan listrik yang digunakan oleh modul.
5. Temperatur tertinggi dan terendah lingkungan dimana modul beroperasi.

### 2.3. EFEK TERMOELEKTRIK

Efek termoelektrik adalah proses perubahan energi panas (perubahan temperatur) menjadi energi listrik atau sebaliknya dari energi listrik menjadi perbedaan temperatur. Ada tiga efek utama dalam efek termoelektrik yaitu Seebeck, Peltier, dan Thomson.

#### 2.3.1. Efek Seebeck

Efek seebeck terjadi ketika suatu logam dengan beda temperatur antara kedua ujungnya. Seperti gambar 2.3 Ketika logam tersebut di sambung, maka akan terjadi beda potensial diantara kedua ujungnya. Panas dipompa ke satu sisi pasangan dan ditolak dari sisi berlawanan. Sebuah arus listrik yang dihasilkan, sebanding dengan gradien suhu antara sisi panas dan sisi dingin. Perbedaan suhu dingin diseluruh converter menghasilkan arus searah ke beban menghasilkan tegangan terminal dan arus terminal. Tidak ada energi mencegah proses konversi. Untuk alasan ini, pembangkit listrik termoelektrik diklasifikasikan langsung sebagai daya konversi.



Gambar 2.5 Skema ilustrasi efek Seebeck (S.B. Rifat, dkk. 2003)

Koefisien seebeck ( $\alpha$ ) disebut juga daya termoelektrik, seperti pada persamaan berikut :

$$\alpha = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{hot} - v_{cold}}{t_{hot} - t_{cold}} \quad (2.2)$$

Keterangan :

$\alpha$  = Koefisien Seebeck (Volt/°C)

$\Delta v$  = Beda Tegangan (Volt)

$\Delta t$  = Beta Temperatur (°C)

### 2.3.2. Efek Peltier

Pada saat arus mengalir melalui *thermocouple*, *temperature junction* akan berubah dan panas akan diserap pada satu permukaan, sementara permukaan yang lainnya akan membuang panas. Jika sumber arus dibalik, maka permukaan yang panas menjadi dingin dan sebaliknya. Gejala ini disebut efek peltier yang merupakan dasar pendinginan termoelektrik. Dari percobaan diketahui bahwa perpindahan panas sebanding terhadap arus yang mengalir. Dari percobaan diketahui bahwa perpindahan panas sebanding terhadap arus yang mengalir. Persamaan dari efek peltier ( $\pi_{ab}$ ) adalah sebagai berikut:

$$\pi_{ab} = \frac{Q}{I_{ab}} \quad (2.3)$$

Keterangan :

$\pi_{ab}$	= Koefisien Peltier	(Volt)
Q	= Beban Perpindahan Panas dari <i>Junction</i>	(Watt)
$I_{ab}$	= Arus	(Ampere)

### 2.3.3. Efek Thomson

Pada tahun 1854 seorang berkebangsaan Inggris yang bernama William Thomson mengemukakan hasil penelitiannya bahwa terdapat penyerapan atau pengeluaran panas bolak-balik dalam konduktor homogen yang terkena perbedaan panas dan perbedaan listrik secara simultan. Persamaan dari efek thomson ( $\tau$ ) adalah sebagai berikut:

$$\tau = \frac{qh}{I} \Delta t \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\tau$	= Koefisien Thomson	(Volt/°K)
qh	= Laju Aliran kalor sisi panas	(Watt)
$\Delta t$	= Beta Temperatur	(°K)
I	= Arus	(Ampere)

### 2.3.4. Efek-Efek Perpindahan Panas

Perpindahan panas yang terjadi pada sistem pendingin termoelektrik adalah dengan cara konduksi dan konveksi. Konduksi terjadi mulai dari

*heatsink* sisi dingin peltier, *bracket/coldsink*, dan *heatsink* pada sisi panas peltier. Sedangkan konveksi terjadi pada udara dalam ruangan, lingkungan sekitar alat uji *dry box*, dan udara disekitar sirip-sirip *heatsink*. Perpindahan panas adalah ilmu yang mempelajari tentang cara untuk meramalkan perpindahan (distribusi) energi berupa panas yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur di antara benda atau material. Perpindahan panas dapat dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

#### 2.3.4.1. Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah distribusi energi berupa panas yang terjadi pada benda atau medium yang diam (padat) bertemperatur tinggi ke bagian benda yang bertemperatur rendah atau terdapat gradien temperatur pada benda tersebut. Rumus dasar perpindahan panas secara konduksi adalah (Cengel. Y.A, 2003).

$$Q = \frac{k.A.\Delta T}{x} \quad (2.5)$$

Keterangan :

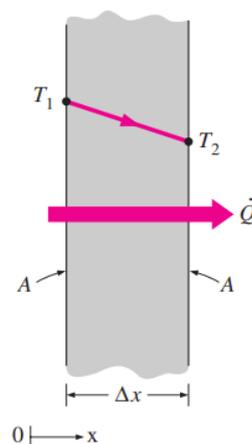
Q	= Laju Perpindahan Panas	(Watt)
k	= Konduktivitas Termal	(W/m <sup>2</sup> °C)
A	= Luas Perpindahan Panas	(m <sup>2</sup> )
Δt	= Beda Temperatur	(°C)
x	= Jarak antar Temperatur Rendah dan Tinggi	(m)

Perpindahan panas yang terjadi secara konduksi berarti perpindahan panas tanpa diikuti oleh perpindahan molekul benda tersebut. Konduksi juga dapat dikatakan sebagai transfer energi dari sebuah benda yang memiliki energi yang cukup besar menuju ke benda yang memiliki energi yang rendah.

Ada suatu perbedaan antara kalor (*heat*) dan energi dalam dari suatu bahan. Kalor hanya digunakan bila menjelaskan perpindahan energi dari satu tempat ke yang lain. Kalor adalah energi yang dipindahkan akibat

adanya perbedaan temperatur. Sedangkan energi dalam (termis) adalah energi karena temperaturnya. Kalor merupakan bentuk energi yang berasal dari perubahan energi bentuk lain, seperti: (1) energi listrik berubah menjadi energi kalor, contohnya pada setrika listrik; (2) energi gerak berubah menjadi energi kalor, contohnya saat orang menggergaji logam.

Ketika salah satu bagian logam bersentuhan dengan nyala lilin atau nyala api, secara otomatis kalor mengalir dari nyala lilin (suhu tinggi) menuju bagian logam tersebut (suhu rendah). Walaupun hanya salah satu bagian logam yang bersentuhan dengan nyala api, semua bagian logam tersebut akan kepanasan juga. Tanganmu bisa terasa panas, karena kalor mengalir dari logam (suhu tinggi) menuju tanganmu (suhu rendah). Kalor itu energi yang berpindah. Kita bisa mengatakan bahwa ketika salah satu bagian benda yang bersuhu tinggi bersentuhan dengan benda yang bersuhu rendah, energi berpindah dari benda yang bersuhu tinggi menuju bagian benda yang bersuhu rendah. Ketika benda yang memiliki perbedaan suhu saling bersentuhan, terdapat sejumlah kalor yang mengalir dari benda atau tempat yang bersuhu tinggi menuju benda atau tempat yang bersuhu rendah. Ketika mengalir, kalor juga membutuhkan selang waktu tertentu. Perlu diketahui bahwa setiap benda (khususnya benda padat) yang dilewati kalor pasti mempunyai bentuk dan ukuran yang berbeda. Ada benda padat yang panjang, ada juga benda padat yang pendek. Ada yang gemuk (luas penampangnya besar), ada juga yang kurus (luas penampangnya kecil).



**Gambar 2.6 Skema Perpindahan Panas Konduksi (Cengel. Y.A. 2003)**

Persamaan yang digunakan untuk perpindahan panas konduksi dikenal dengan Hukum Fourier (Cengel. Y.A. 2003):

$$q = - K.A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (2.6)$$

Nilai minus (-) dalam persamaan diatas menunjukkan bahwa panas selalu berpindah ke arah temperatur yang lebih rendah. Jika suatu benda padat disusun berlapis dari material yang berbeda, maka untuk mengetahui nilai perpindahan panas yang terjadi dapat digunakan pendekatan sistem resistansi listrik. Besarnya tahanan termal yang terjadi adalah perbandingan selisih suhu diantara kedua permukaan ( $T_1 - T_2$ ) dengan laju aliran panas  $q$  (J/s). Untuk mencari nilai tahanan termal dari suatu material padatan digunakan persamaan :

$$R_T = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{\Delta x}{K.A} = \frac{q}{K.A} \quad (2.7)$$

Keterangan :

$q$	= Energi Panas	(W)
$k$	= Konduktivitas Termal	(W/m <sup>2</sup> °C)
$A$	= Luas Perpindahan Panas	(m <sup>2</sup> )
$\Delta x$	= Beda Tebal Penampang Permukaan	(m)
$T_1$	= Temperatur yang lebih tinggi	(°C)
$T_2$	= Temperatur yang lebih rendah	(°C)

Tetapan kesebandingan ( $k$ ) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal. Persamaan (2.5) merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapat dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat bergantung pada suhu.

**Tabel 2.1 Konduktivitas Termal Material pada suhu ruangan**

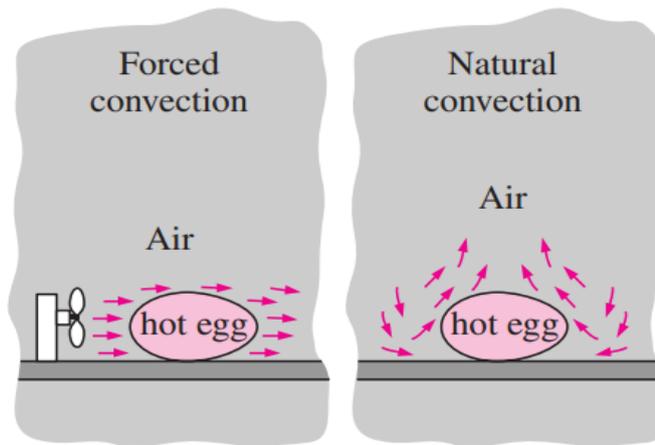
<b>Materials</b>	<b>K, W/m . °C*</b>
Diamond	2300
Silver	429
Copper	401
Gold	317
Aluminium	237
Iron	80.3
Mercury (I)	8.54
Glass	0.78
Brick	0.72
Water (I)	0.613
Human skin	0.37
Wood (oak)	0.17
Helium (g)	0.152
Sof rubber	0.13
Glass fiber	0.042
Air (g)	0.026
Urethane, rigid foam	0.026

\*multiply by 0.5778 to convert to Btu/h.ft. °F.

#### 2.3.4.2. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan Panas Konveksi adalah distribusi energi berupa panas yang terjadi karena terdapat aliran fluida. Dimana perpindahan panas terjadi karena adanya gerakan/aliran/ pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Contohnya adalah kehilangan panas dari radiator mobil, pendinginan dari secangkir kopi dll.

Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free/natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa/eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*).



Gambar 2.7. Skema Perpindahan Panas Konveksi (Cengel. Y.A. 2003)

Persamaan dasar perpindahan konveksi adalah (Cengel. Y.A. 2003):

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

Keterangan :

- Q = Laju Perpindahan Panas (W)
- h = Koefisien Perpindahan Panas pada Konveksi (W/m<sup>2</sup>°C)
- A = Luas Perpindahan Panas (m<sup>2</sup>)
- ΔT = Beda temperatur (°C)

Pada hukum Newton pendinginan, koefisien  $h$  adalah koefisien perpindahan kalor konveksi dimana merupakan konstanta proporsionalitas pada persamaan pada hukum Newton pendinginan. Pada persamaan 2.7 yang mungkin serupa dengan Hukum Fourier tentang konduksi kalor. Namun, koefisien  $h$  merupakan koefisien yang sama sekali berbeda dengan konduktivitas thermal  $k$  yang muncul sebagai konstanta proporsionalitas dalam hukum fourier. Secara khusus,  $h$  bukanlah merupakan properties material melainkan nilai koefisien  $h$  bergantung pada geometri, properties fluida, gerak, dan dalam beberapa kasus perbedaan suhu,  $\Delta T = (T_s - T_\infty)$ , dimana  $h = f(\text{geometri, gerakan fluida, sifat fluida, } \Delta T)$ .

Dalam menentukan nilai dari koefisien perpindahan kalor konveksi perlu diperhatikan beberapa parameter tak berdimensi (*dimensionless parameter*) dimana:

- a. Sejumlah besar parameter dibutuhkan untuk menjelaskan perpindahan kalor.
- b. Parameter tersebut dapat dikelompokkan bersama untuk membentuk suatu nilai kecil parameter tak berdimensi

Dalam hal ini, memberikan persamaann umum menjadi lebih sederhana dimana koefisien perpindahan kalor dapat dihitung. Adapun parameter tak berdimensi seperti bilangan Reynolds, bilangan Nusselts, dan bilangan Prandtl biasa digunakan dalam menentukan nilai koefisien perpindahan kalor.

**Tabel 2.2 Koefisien perpindahan panas konveksi (Cengel. Y.A. 2003)**

Type of convection	H, W/m <sup>2</sup> . °C*
Free convection of gases	2-25
Free convection of liquids	10-1000
Forced convection of gases	25-250
Forced convection of liquids	50-20000
Boiling and condensation	2500-100000

\*multiply by 0.5778 to convert to Btu/h.ft. °F.

#### a) Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan besaran fisis yang tak berdimensi. Bilangan ini dipergunakan sebagai acuan dalam membedakan aliran laminar dan turbulen di satu pihak, dan di lain pihak dapat dimanfaatkan sebagai acuan untuk mengetahui jenis-jenis aliran yang berlangsung dalam air. Hal ini didasarkan pada suatu keadaan bahwa dalam satu tabung/pipa atau dalam satu tempat mengalirnya air, sering terjadi perubahan bentuk aliran yang satu menjadi aliran yang lain. Perubahan bentuk aliran ini pada umumnya tidaklah terjadi secara tiba-tiba tetapi memerlukan waktu, yakni suatu waktu yang relatif pendek dengan

diketuainya kecepatan kritis dari suatu aliran. Kecepatan kritis ini pada umumnya akan dipengaruhi oleh pusaran pipa, jenis zat cair yang lewat dalam pipa tersebut.

Terdapat empat besaran yang menentukan apakah aliran tersebut digolongkan laminar atau turbulen. Keempat besaran tersebut adalah besaran massa jenis air, kecepatan aliran, kekentalan, dan diameter pipa. Kombinasi dari keempatnya akan menentukan besarnya bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan aliran fluida apakah laminar atau turbulen, dan transisi. Untuk menentukan nilai dari Reynolds number (Re) untuk aliran dalam pipa digunakan persamaan sebagai berikut (Cengel. Y.A. 2003) :

$$RE = \frac{GD}{\mu} \quad (2.9)$$

Keterangan :

RE = Bilangan Reynolds

G = Kecepatan aliran massa (kg/m<sup>2</sup>s)

D = Diameter pipa (m)

$\mu$  = Viskositas dinamik fluida (Ns/m<sup>2</sup>)

#### b) Bilangan Nusselt

Bilangan Nusselt (Nu) yang dapat didefinisikan sebagai rasio perpindahan kalor konveksi fluida dengan perpindahan kalor konduksi dalam fluida dalam kondisi yang sama. Sehingga bilangan Nusselt (Cengel. Y.A. 2003) :

$$Nu = \frac{q''(\text{konveksi})}{q''(\text{konveksi})} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/L} = \frac{hL}{k} \quad (2.10)$$

Bilangan Nusselt (Nu) untuk aliran dalam pipa dapat dituliskan:

$$Nu = \frac{hD}{k_f} \quad (2.11)$$

Keterangan :

$Nu$  = Bilangan Nusselt

$h$  = Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m<sup>2</sup>.K)

$L$  = Panjang (m)

$D$  = Diameter pipa (m)

$k_f$  = Konduktivitas termal fluida (W/m.K)

### c) Bilangan Prandtl

Bilangan Prandtl ( $Pr$ ) merupakan rasio viskositas ( $\nu$ ) fluida dengan difusifitas kalor ( $\alpha$ ), dimana bilangan Prandtl merupakan properties termodinamika dari fluida (Cengel. Y.A. 2003):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (2.12)$$

Keterangan :

$Pr$  = Bilangan Prandtl

$\nu$  = Viskositas kinematik fluida (m<sup>2</sup>/s)

$\alpha$  = *Thermal diffusivity* (m<sup>2</sup>/s)

$c_p$  = Kalor spesifik (J/kg.K)

$\mu$  = Viskositas dinamik fluida (Ns/m<sup>2</sup>)

$k_f$  = Konduktivitas termal fluida (W/m.K)

### 2.3.4.3. Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah distribusi energi berupa panas terjadi melalui pancaran gelombang cahaya dari suatu zat ke zat yang lain tanpa zat perantara. Untuk menghitung besarnya panas yang dipancarkan yaitu menggunakan rumus (Cengel. Y.A. 2003):

$$Q = \varepsilon A (\Delta T)^4 \sigma \quad (2.13)$$

Keterangan :

$Q$  = Laju Perpindahan Panas (W)

$\varepsilon$  = emisivitas permukaan benda (0 s/d 1)

$A$  = Luas Perpindahan Panas (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$	= Beda temperatur	(°K)
$\sigma$	= Konstanta Stefan Boltzman	( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

Energi radiasi dikeluarkan oleh benda karena temperatur, yang dipindahkan melalui ruang antara, dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Bila energi radiasi menimpa suatu bahan, maka sebagian radiasi dipantulkan, sebagian diserap dan sebagian diteruskan. Sedangkan besarnya energi :

$$Q_{\text{pancaran}} = \sigma A T \quad (2.14)$$

Keterangan :

Q	= Laju Perpindahan Panas	(W)
$\sigma$	= Konstanta Stefan Boltzman	( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )
A	= Luas Perpindahan Panas	( $\text{m}^2$ )
T	= Suhu absolut benda	(°C)

#### 2.4. Perhitungan Termoelektrik

Bahan termoelektrik merupakan semikonduktor yang merupakan benda padat ataupun logam yang mempunyai nilai diantara nilai resistansi konduktor dan isolator. Permukaan dingin menyerap panas dari produk dikondisikan, bagian ini mempunyai fungsi yang sama dengan evaporator pada sistem pendinginan kompresi uap. Permukaan panas mengeluarkan atau membuang panas ke luar, bagian ini mempunyai fungsi yang sama dengan kondesor.

Dalam menganalisa kinerja modul termoelektrik, koefisien Seebeck yang menggambarkan tegangan (gaya gerak listrik) timbul karena perbedaan suhu menjadi sangat penting. Koefisien Seebeck dapat dinyatakan oleh persamaan 2.1. Sementara arus listrik yang dihasilkan diberikan oleh persamaan berikut (H.J. Goldsmid. 2010):

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R_i + R_L} = \frac{\alpha (T_h - T_c)}{R_i + R_L} \quad (2.15)$$

Dimana:

I	= Arus listrik yang mengalir pada rangkaian	(A)
$\alpha$	= Koefisien seeback	(V/°C)
Ri	= Tahanan internal modul termoelektrik	(ohm)
RL	= Tahanan Eksternal	(ohm)
Th	= Temperatur sisi panas modul	(°C)
Tc	= Temperatur sisi dingin modul	(°C)

Panas yang diserap ( $Q_h$ ) dari sumber panas pada permukaan sisi panas ( $T_h$ ) ke permukaan sisi dingin ( $T_c$ ) adalah sebagai berikut (H.J. Goldsmid. 2010):

$$Q_h = (\alpha I T_h) + k(T_h - T_c) \quad (2.16)$$

Dimana k adalah konduktivitas termal modul (W/m°C).

Daya keluaran (P) dan efisiensi ( $\eta$ ) generator termoelektrik adalah sebagai berikut (H.J. Goldsmid. 2010):

$$P = I V \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_h} \quad (2.18)$$