

TUGAS AKHIR

**RANCANG BANGUN KOMPOR BIOMASSA PORTABEL
PENGHASIL ENERGI LISTRIK BERBASIS
*THERMOELECTRIC GENERATOR***

Oleh :

M. KHAIRUL OMARYADI CANGARA

D211 16 025



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

2020

TUGAS AKHIR

**RANCANG BANGUN KOMPOR BIOMASSA PORTABEL
PENGHASIL ENERGI LISTRIK BERBASIS
*THERMOELECTRIC GENERATOR***

Oleh :

M. KHAIRUL OMARYADI CANGARA

D211 16 025

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
2020**

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:

RANCANG BANGUN KOMPOR BIOMASSA PORTABEL PENGHASIL ENERGI LISTRIK BERBASIS *THERMOELECTRIC GENERATOR*

M. KHAIRUL OMARYADI CANGARA
D211 16 025

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I



Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT.
NIP. 19680301 199702 2 001

Dosen Pembimbing II



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.
19720825 200003 1 001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda – tangan dibawah ini:

NAMA : M. Khairul Omaryadi Cangara
NIM : D211 16 025
JUDUL SKRIPSI : Rancang Bangun Kompor Biomassa Portabel Penghasil Energi Listrik Berbasis *Thermoelectric Generator*

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan - bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijasah pada Universitas Hasanuddin atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Hasanuddin.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Makassar, 31/08/2020

Yang membuat pernyataan,



M. Khairul Omaryadi Cangara

ABSTRAK

Pembangki daya termoelektrik (TEG) adalah jenis pembangkit yang menggunakan perbedaan temperatur diantara sisi-sisinya untuk menghasilkan 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 yang dihasilkan oleh kompor biomassa. Pengujian dilakukan dengan berbagai variasi yaitu menggunakan batang tembaga yang dipanaskan oleh api yang berasal dari ruang bakar kompor menuju ke modul TEG adapun variasinya yaitu jumlah tembaga sebanyak 1, 2, dan 4 buah masing-masing digunakan bergantian dengan posisi tembaga berada pada di bagian bawah, tengah, dan atas kompor. Selain itu modul TEG digunakan yaitu modul tunggal dan ganda. Adapun hasil penelitian ini yaitu untuk 1 tembaga dengan modul tunggal pada posisi atas, tengah, dan bawah masing-masing menghasilkan tegangan sebanyak 1.49 V, 2.18 V, 1.68 V. untuk 2 tembaga dengan modul tunggal pada posisi atas, tengah, dan bawah masing-masing menghasilkan tegangan sebanyak 2.21 V, 5.11 V, 2.58 V. untuk 4 tembaga dengan modul tunggal pada posisi atas, tengah, dan bawah masing-masing menghasilkan tegangan sebanyak 6.37 V, 7.91 V, 5.16 V. untuk 1 tembaga dengan modul ganda pada posisi atas, tengah, dan bawah masing-masing menghasilkan tegangan sebanyak 4.35 V, 4.31 V, 2,82 V. untuk 2 tembaga dengan modul ganda pada posisi atas, tengah, dan bawah masing-masing menghasilkan tegangan sebanyak 5.32 V, 7.72 V, 4.68 V. untuk 4 tembaga dengan modul ganda pada posisi atas, tengah, dan bawah masing-masing menghasilkan tegangan sebanyak 7.94 V, 9.09 V, 7.96 V.

Kata kunci: Kompor biomassa, Tembaga, Termoelektrik generator, Perbedaan Temperatur, Perbedaan Tegangan

ABSTRACT

A thermoelectric power generator (TEG) is a type of generator that uses the temperature difference between its sides to generate electrical energy. 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 heat generated by a biomass stove. The test was carried out with various variations, namely using a copper rod that was heated by a fire from the stove combustion chamber to the TEG module. center, and stove top. In addition, the TEG module is used, namely single and multiple modules. The results of this study are 1 copper with a single module at the top, middle, and bottom positions respectively producing a voltage of 1.49 V, 2.18 V, 1.68 V. for 2 coppers with a single module in the upper, middle, and lower positions respectively. each produces a voltage of 2.21 V, 5.11 V, 2.58 V. for 4 coppers with a single module in the upper, middle and lower positions each produces a voltage of 6.37 V, 7.91 V, 5.16 V. for 1 copper with a double module in the position top, middle, and bottom each produce a voltage of 4.35 V, 4.31 V, 2.82 V. for 2 coppers with a double module in the top, middle and bottom positions each produces a voltage of 5.32 V, 7.72 V, 4.68 V. for 4 coppers with dual modules in the top, middle and bottom positions each produces a voltage of 7.94 V, 9.09 V, 7.96 V.

Key words: biomass stove, copper, thermoelectric generator, 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 **“Rancang Bangun Kompor Biomassa Portabel Penghasil Energi Listrik Berbasis *Thermoelectric Generator*”**

Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelas 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 Prof. H. Hafied Cangara, M.Sc., Ph.D dan ibunda tersayang Dra. Hj. Nuraeni Lakku

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. Pihak Yayasan Kalla terutama Direktur Eksekutif Yayasan Kalla Bapak Mohammad Zuhair, Manager Program Educare Bapak Suharto, serta Bapak

Syafei atas bantuan moral dan materil selama proses penelitian dilaksanakan.

5. Kepada seluruh teman-teman COMPREZZOR 2016 atas support canda dan tawa yang selalu menghilangkan rasa lelah dalam menjalani proses-proses yang telah dilalui hingga sampai saat ini.
6. 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.

Makassar, Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Sampul	i
Halaman Judul	ii
Lembar Pengesahan	iii
Abstrak	iv
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi	viii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	xii
Daftar Simbol	xiii
BAB I	
1.1.Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3.Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II	
2.1. Tinjauan Pustaka.....	5
2.2. Biomassa.....	7
2.3. Kompor Biomassa.....	7
2.4. Pendinginan Termoelektrik.....	8
BAB III	
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
3.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.3. Metode Penelitian.....	28
3.4. Skema Rancangan Instalasi Pengujian dan Sistem Pengukuran.....	28
3.5. Metode Pengumpulan Data.....	29
3.6. Diagram Alir Penelitian.....	30
3.7. Rencana dan Jadwal Penelitian.....	31
BAB IV	
4.1. Analisis Data dan Perhitungan.....	32
4.2. Pembahasan.....	33
BAB V	
5.1. Kesimpulan.....	74
5.2. Saran.....	74
Daftar Pustaka	75
Lampiran	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Teknologi penggunaan generator termoelektrik pada kompor kayu.....	5
Gambar 2.2.	Biolite Campstove.....	5
Gambar 2.3.	Penelitian yang Dilakukan oleh Nuwayhid.....	6
Gambar 2.4.	Kompor Tradisional.....	7
Gambar 2.5.	Struktur Kompor Biomassa Gasifikasi.....	8
Gambar 2.6.	Termoelektrik generator.....	9
Gambar 2.7.	Termoelektrik Cooling.....	10
Gambar 2.8.	Skema ilustrasi efek Seebeck.....	12
Gambar 2.9.	Skema ilustrasi efek Peltier.....	13
Gambar 2.10.	Skema Ilustrasi efek Thomson.....	13
Gambar 2.11.	Skema perpindahan panas konduksi.....	16
Gambar 2.12.	Skema perpindahan panas konveksi.....	18
Gambar 2.13.	Perpindahan panas radiasi.....	22
Gambar 3.1	Kompor Biomassa.....	24
Gambar 3.2.	Kompor Biomassa.....	25
Gambar 3.3.	Jenis Biomassa.....	25
Gambar 3.4.	Plat Aluminium.....	25
Gambar 3.5.	Batang Tembaga.....	26
Gambar 3.6.	Termokopel.....	26
Gambar 3.7.	<i>Thermoelectric Generator (TEG)</i>	26
Gambar 3.8.	<i>Chassis dan modul National Instrument</i>	27
Gambar 3.9.	Multimeter Digital.....	27
Gambar 3.10.	Heatsink.....	27
Gambar 3.11.	Termal pasta.....	28
Gambar 3.12.	Rancangan instalasi pengujian.....	28
Gambar 3.13.	Rancangan instalasi pengujian Labview.....	29
Gambar 3.14.	Diagram alir penelitian.....	30
Gambar 4.1.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Bawah (T_{rb} bawah) Untuk Satu Tembaga Modul Tunggal TEG.....	33
Gambar 4.2.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Tengah (T_{rb} tengah) Untuk Satu Tembaga Modul Tunggal TEG.....	34
Gambar 4.3.	Sejarah Temperatur Api (T_{Api}) Untuk Satu Tembaga Modul Tunggal TEG.....	35
Gambar 4.4.	Beda Temperatur Rerata (ΔT) dan Beda Tegangan (ΔV) Untuk Satu Tembaga Modul Tunggal TEG.....	36
Gambar 4.5.	Panas yang diserap (Q_h) Untuk Satu Tembaga Modul Tunggal TEG.....	37
Gambar 4.6.	Daya Listrik (P) dan Efisiensi (η) Untuk Satu Tembaga Modul Tunggal TEG.....	37
Gambar 4.7.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Bawah (T_{rb} bawah) Untuk Dua Tembaga Modul Tunggal TEG.....	38
Gambar 4.8.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Tengah (T_{rb} tengah) Untuk Dua Tembaga Modul Tunggal TEG.....	39

Gambar 4.9.	Sejarah Temperatur Api (T_{Api}) Untuk Dua Tembaga Modul Tunggal TEG.....	40
Gambar 4.10.	Beda Temperatur Rerata (ΔT) dan Beda Tegangan (ΔV) Untuk Dua Tembaga Modul Tunggal TEG.....	41
Gambar 4.11.	Panas yang diserap (Q_h) 2 Tembaga Modul Tunggal.....	42
Gambar 4.12.	Daya Listrik (P) dan Efisiensi (η) Untuk Dua Tembaga Modul Tunggal TEG.....	42
Gambar 4.13.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Bawah (T_{rb} bawah) Untuk Empat Tembaga Modul Tunggal TEG.....	43
Gambar 4.14.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Tengah (T_{rb} tengah) Untuk Empat Tembaga Modul Tunggal TEG.....	44
Gambar 4.15.	Sejarah Temperatur Api rerata (T_{Api}) Untuk Empat Tembaga Modul Tunggal TEG.....	45
Gambar 4.16.	Beda Temperatur Rerata (ΔT) dan Beda Tegangan (ΔV) Untuk Empat Tembaga Modul Tunggal TEG.....	46
Gambar 4.17.	Panas yang diserap (Q_h) Untuk Empat Tembaga Modul Tunggal TEG.....	47
Gambar 4.18.	Daya Listrik (P) dan Efisiensi (η) Untuk Empat Tembaga Modul Tunggal TEG.....	47
Gambar 4.19.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Bawah (T_{rb} bawah) Untuk Satu Tembaga Modul Ganda TEG.....	48
Gambar 4.20.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Tengah (T_{rb} tengah) Untuk Satu Tembaga Modul Ganda TEG.....	49
Gambar 4.21.	Sejarah Temperatur Api rerata (T_{Api}) Untuk Satu Tembaga Modul Ganda TEG.....	50
Gambar 4.22.	Beda Temperatur rerata (ΔT) dan beda tegangan (ΔV) Untuk Satu Tembaga Modul Ganda TEG.....	51
Gambar 4.23.	Panas yang diserap (Q_h) Untuk Satu Tembaga Modul Ganda TEG.....	52
Gambar 4.24.	Daya Listrik (P) dan Efisiensi (η) Untuk Satu Tembaga Modul Ganda TEG.....	52
Gambar 4.25.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Bawah (T_{rb} bawah) Untuk Dua Tembaga Modul Ganda TEG.....	53
Gambar 4.26.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Tengah (T_{rb} tengah) Untuk Dua Tembaga Modul Ganda TEG.....	54
Gambar 4.27.	Sejarah Temperatur Api rerata (T_{Api}) Untuk Dua Tembaga Modul Ganda TEG.....	55
Gambar 4.28.	Beda Temperatur rerata (ΔT) dan beda tegangan (ΔV) Untuk Dua Tembaga Modul Ganda TEG.....	56
Gambar 4.29.	Panas yang diserap (Q_h) 2 Tembaga Modul Ganda.....	57
Gambar 4.30.	Daya Listrik (P) dan Efisiensi (η) Untuk Dua Tembaga Modul Ganda TEG.....	57
Gambar 4.31.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Bawah (T_{rb} bawah) Untuk Empat Tembaga Modul Ganda TEG.....	58
Gambar 4.32.	Sejarah Temperatur Ruang Bakar Tengah (T_{rb} tengah) Untuk Empat Tembaga Modul Ganda TEG.....	59

Gambar 4.33. Sejarah Temperatur Api rerata (T_{Api}) Untuk Empat Tembaga Modul Ganda TEG.....	60
Gambar 4.34. Beda Temperatur rerata (ΔT) dan Beda Tegangan (ΔV) Untuk Empat Tembaga Modul Ganda TEG.....	61
Gambar 4.35. Panas yang diserap (Q_h) Untuk Empat Tembaga Modul Ganda TEG.....	62
Gambar 4.36. Daya Listrik (P) dan Efisiensi (η) Untuk Empat Tembaga Modul Ganda TEG.....	62
Gambar 4.37. T_{Api} Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Satu Tembaga.....	63
Gambar 4.38. ΔT Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Satu Tembaga...	64
Gambar 4.39. Tegangan Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Satu Tembaga.....	64
Gambar 4.40. Panas yang Diserap Pada Dua Variasi Modul Untuk Satu Tembaga.....	65
Gambar 4.41. Daya Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Satu Tembaga.....	65
Gambar 4.42. Efisiensi Pada Dua Variasi Modul Untuk Satu Tembaga.....	66
Gambar 4.43. T_{Api} Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Dua Tembaga.....	67
Gambar 4.44. ΔT Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Dua Tembaga...	67
Gambar 4.45. Tegangan Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Dua Tembaga.....	68
Gambar 4.46. Panas yang Diserap Pada Dua Variasi Modul Untuk Dua Tembaga.....	68
Gambar 4.47. Daya Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Dua Tembaga.....	69
Gambar 4.48. Efisiensi Pada Dua Variasi Modul Untuk Dua Tembaga.....	69
Gambar 4.49. T_{Api} Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Empat Tembaga.....	70
Gambar 4.50. ΔT Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Empat Tembaga.....	71
Gambar 4.51. Tegangan Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Empat Tembaga.....	71
Gambar 4.52. Panas yang Diserap Pada Dua Variasi Modul Untuk Empat Tembaga.....	72
Gambar 4.53. Daya Maksimum Pada Dua Variasi Modul Untuk Empat Tembaga.....	72
Gambar 4.54. Efisiensi Pada Dua Variasi Modul Untuk Empat Tembaga.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Konduktifitas Termal Berbagai Bahan pada 0 °C.....	17
Tabel 2.2.	Nilai koefisien perpindahan panas konveksi.....	19
Tabel 3.1.	Rencana dan jadwal penelitian.....	31

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
α	Koefisien Seebeck	V/°C
ΔV	Perbedaan tegangan	V
ΔT	Perbedaan temperatur	°C
T_h	Temperatur sisi panas modul	°C
T_c	Temperatur sisi dingin modul	°C
I	Arus listrik	A
R_I	Beban internal modul	Ω
R_L	Beban eksternal modul	Ω
T_1	Temperatur lingkungan	°C
Q_h	Laju perpindahan panas	W
k	konduktifitas termal bahan	W/m.°C
P	Daya yang dihasilkan	W
η	Efisiensi	%

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Energi listrik bagi manusia di zaman modern saat ini merupakan kebutuhan yang tidak bisa tergantikan. Setiap aktifitas yang dilakukan tidak terlepas dari peran-peran energi listrik dalam rangka memudahkan segala pekerjaan. Di Indonesia, produksi energi listrik cenderung masih memanfaatkan energi fosil khususnya batubara, minyak bumi dan gas alam sebagai bahan baku utamanya. Kenyataannya cadangan energi fosil Indonesia jumlahnya terbatas. Sementara itu konsumsi energi terus meningkat seiring dengan laju pertumbuhan ekonomi. Secara umum, cadangan minyak dan gas bumi Indonesia selama 10 tahun terakhir trend-nya cenderung mengalami penurunan. Cadangan Minyak Bumi dari 8,21 milyar barel pada 2008 turun ke kisaran 7,5 milyar barel di 2018. (Ditjen Migas ESDM. 2018)

Dalam mengantisipasi kelangkaan energi fosil, terutama minyak bumi hingga akhir abad 21, maka sejak sekarang sudah harus dipikirkan penggunaan energi alternatif melalui suatu perencanaan yang matang. Dari sekian jenis energi alternatif yang ada, untuk kondisi di Indonesia saat ini pemberdayaan energi biomassa disarankan sebagai prioritas utama di samping pengembangan energi alternatif yang lain sebagai pendukung. Pemilihan energi biomassa sebagai prioritas utama berdasarkan pertimbangan yaitu: (1) Indonesia merupakan Negara agraris yang besar dan dipastikan akan mampu memasok sumber bahan baku biomassa dari limbah pertanian, perkebunan, dan peternakan; (2) energi biomassa merupakan energi yang ramah lingkungan; (3) dalam penyediaan energi panas dapat di gabung (mix) dengan batubara. Dan total potensi Biomassa di Indonesia adalah 32,654 Mwe. (Kajian Ditjen EBTKE. 2013)

Sehingga kompor biomassa yang saat ini sedang berkembang adalah salah satu alternatif dari permasalahan diatas dan diharapkan akan mampu diterapkan dan digunakan oleh penduduk di pedalamanan untuk menggantikan tungku konvensional/tradisional yang digunakan selama ini dan dapat mendukung peningkatan penggunaan sumber energi terbaaerukan. Yang mana pada era perkembangan zaman yang begitu pesatnya saat ini pemanfaatan sumber energi terbarukan sangat penting dikembangkan demi menjaga cadangan energi dunia yang sudah mulai menipis.

Namun, perlu kita ketahui pada kompor biomassa terdapat panas terbuang disekitar sisinya dengan temperatur yang sangat tinggi. Dari hal ini terdapat potensi energi yang dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik dengan menggunakan *Thermoelectric Generator* (TEG). Teknologi ini menjanjikan alternatif pembangkitan listrik yang luar biasa karena mempunyai beberapa kelebihan, yaitu dapat diandalkan keawetannya, tanpa suara saat dioperasikan karena tidak memiliki bagian mekanik yang bergerak, tidak membutuhkan pemeliharaan, sederhana, kompak dan aman, memiliki ukuran yang sangat kecil dan sangat ringan, mampu beroperasi pada suhu tinggi, mampu beroperasi untuk skala kecil dan lokasi terpencil, ramah lingkungan, dan sumber energi yang fleksibel. Kelebihan-kelebihan tersebut menyebabkan studi mengenai aplikasi generator termoelektrik banyak dilakukan (Ismail,dkk, 2009).

Sehingga berdasarkan latar belakang di atas Kompor Biomassa Portabel Penghasil Energi Listrik Berbasis *Thermoelectric Generator* merupakan suatu inovasi teknologi yang dapat mengatasi permasalahan di atas. Kompor ini memiliki fungsi selain menjadi kompor biomassa portabel yang mudah dibawa kemana-mana juga dapat menghasilkan energi listrik yang cukup untuk meng-*charger* alat elektronik seperti *handphone*, *powerbank*, dll.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan dapat rumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan perangkat sistem Kompor Biomassa Portabel penghasil energi listrik berbasis *Thermoelectric Generator*?
2. Seberapa besar energi panas yang tersedia pada Kompor Biomassa Portabel yang dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik menggunakan *Thermoelectric Generator*?
3. Seberapa besar daya yang dapat dihasilkan dari Kompor Biomassa Portabel penghasil energi listrik berbasis *Thermoelectric Generator*?

1.3. TUJUAN PENELITIAN

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

1. Menghasilkan sebuah rancangan perangkat Kompor Biomassa Portabel penghasil energi listrik berbasis *Thermoelectric Generator*.
2. Menentukan besar energi panas dari Kompor Biomassa Portabel yang dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik menggunakan *Thermoelectric Generator*
3. Menentukan besar daya yang dapat dihasilkan dari perangkat Kompor Biomassa Portabel penghasil energi listrik berbasis *Thermoelectric Generator*.

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 yang ada dipasaran.
3. Menggunakan jenis biomassa yaitu pelet kayu.
4. Tidak memperhitungkan nilai kalor dari biomassa.
5. Jenis pendinginan yang digunakan adalah heatsink
6. Variasi pengambilan data adalah jumlah tembaga, yaitu 1, 2, dan 4 tembaga disetiap ketinggian kompor, yaitu atas, tengah, dan bawah kompor.

1.5.MANFAAT PENELITIAN

Manfaat yang diperoleh dari penelitian adalah sebagai berikut :

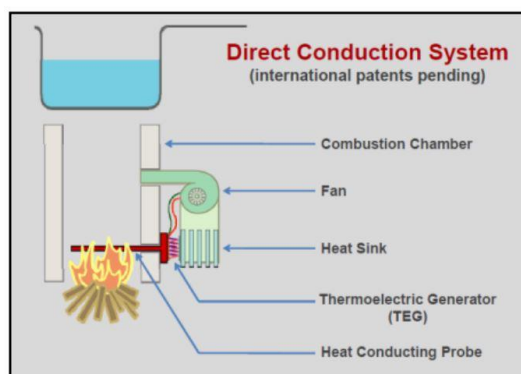
1. Untuk memanfaatkan panas yang dihasilkan dari kompor biomassa dengan menggunakan *Thermoelectric Generator*.
2. Agar dapat tercipta sebuah alat alternatif sebagai penghasil listrik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. TINJAUAN PUSTAKA

Aplikasi TEG sudah pernah diujikan pada kompor kayu. Cedar dan Drummond (2009) mempresentasikan desain untuk memperbaiki sistem perpindahan kalor kompor dengan menambahkan *blower* dan memasang generator termoelektrik untuk memanfaatkan sebagian panas hasil pembakarannya menjadi sumber energi listrik alternatif. Cedar juga menambahkan batang tembaga di dalam ruang bakar bagian atas yang berfungsi mentransfer panas dari dalam ruang bakar ke generator termoelektrik. Kemudian Cedar mempatenkan hasil karyanya dengan nama biolite. Dari kompor biolite yang telah dipatenkan oleh Cedar dapat menghasilkan daya sebesar 3 watt sesuai dengan spesifikasi yang tertera pada produk biolite.



Gambar 2.1. Teknologi penggunaan generator termoelektrik pada kompor kayu (Cedar dan Drummond, 2009)



Gambar 2.2. Biolite Campstove (Cedar dan Drummond, 2009)

Penelitian lain yang memanfaatkan penggunaan modul termoelektrik untuk pembangkitan energi listrik yang diaplikasikan di kompor kayu dilakukan Nuwayhid (2003) 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 4,2 W mampu dibangkitkan pada sistem ini.

<i>Authors</i>	<i>Heat sink (Cold sink)</i>	<i>Type of module</i>	<i>Power/ module</i>
Nuwayhid 2003	Natural air cooling	Peltier	1W
Nuwayhid 2005	Natural air cooling	See beck	4.2W
Nuwayhid 2007	Heat pipes cooling	See beck	3.4W

Gambar 2.3. Penelitian yang Dilakukan oleh Nuwayhid

Di Thailand, Lertsatitthanakorn, C (2007) menggunakan generator termoelektrik tipe TEP1-1264-3,4 untuk mengkonversi panas dari kompor berbahan bakar biomassa. Hasilnya adalah pada beda temperatur berkisar 15°C, unit bisa mencapai daya keluaran sebesar 2,4W. Efisiensi konversi 3,2 % mampu untuk menghidupkan lampu dan radio portabel kecil. Sementara di Indonesia, sistem termoelektrik yang pernah diteliti menggunakan 10 buah termoelektrik TEG-SP1848-27145 SA yang disusun seri dengan variasi media pembakaran berupa kayu bakar, gas LPG dan spirtus. Penggunaan media pembakaran yang berbeda mempengaruhi output tegangan yang diberikan oleh termoelektrik. Selisih temperatur antara sisi dingin dan sisi panas termoelektrik generator (ΔT) saat keadaan stabil adalah 35°C menggunakan bahan bakar kayu, 39°C menggunakan bahan bakar gas LPG dan 20°C menggunakan bahan bakar spirtus. Tegangan optimal yang diberikan menggunakan bahan bakar gas LPG dengan (ΔT) 39 °C dengan output 1.62 Volt. (Sumarjo, Jojo dkk. 2017)

2.2.BIOMASSA

Biomassa merupakan istilah yang biasanya digunakan untuk berbagai jenis bahan organik dalam bentuk padat yang dapat digunakan sebagai bahan bakar, seperti kayu, arang, kotoran hewan, limbah pertanian, dan limbah padat lainnya yang dapat terbiodegradasi (Fisafarani, 2010).

Secara umum bahan baku biomassa dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu pohon berkayu (woody) dan rumput-rumputan (herbaceous) . Saat ini material berkayu diperkirakan merupakan 50% dari total potensial bioenergi sedangkan 20% lainnya adalah jerami yang diperoleh dari hasil samping pertanian (Rochman, 2009).

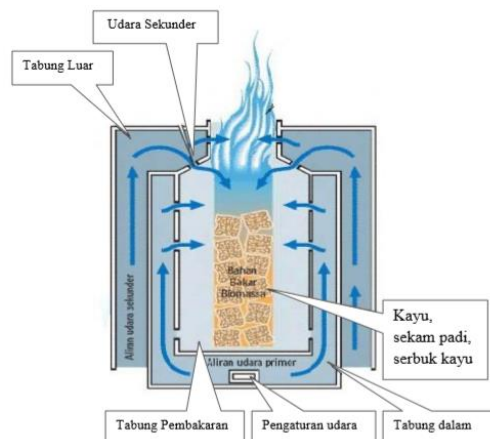
2.3.KOMPOR BIOMASSA

Kompur biomassa merupakan kompor berbahan bakar biomassa padat contohnya seperti kayu, tumbuh – tumbuhan, limbah pertanian, sampah dan lain – lainnya. Selama ini biomasa yang sudah sering digunakan untuk memasak di daerah –daerah pedesaan adalah kayu karena bahan bakar tersebut sangat mudah ditemukan. Namun kualitas pembakaran yang tidak bagus mengakibatkan efisiensi pembakaran kurang sempurna dan juga apabila pembakaran tidak bagus maka dapat menimbulkan asap yang dapat berdampak buruk jika terhirup oleh manusia.



Gambar 2.4. Kompor Tradisional (<https://www.kompasiana.com/>)

Gas – gas seperti hydrogen (H_2), metana (CH_4) dan karbon monoksida (CO) adalah gas yang dihasilkan dari pembakaran dan gas tersebut dapat terbakar sehingga dapat digunakan menjadi bahan bakar. Agar menghasilkan api yang nyalanya lebih bersih maka asap yang dihasilkan dari proses pengarangannya harus dibakar lagi untuk kedua kalinya.



Gambar 2.5. Struktur Kompor Biomassa Gasifikasi (Holil. 2016)

Komponen – komponen penting yang terdapat pada kompor biomassa adalah sebagai berikut:

1. Lubang Udara

Kompor biomassa ini memiliki 2 macam lubang udara yaitu lubang udara primer dan lubang udara sekunder, lubang udara ini memiliki fungsi yang berbeda – beda. Lubang udara primer memiliki fungsi yang membantu proses pembakaran gasifikasi yang menghasilkan gas. Sedangkan untuk lubang udara sekunder mempunyai fungsi untuk membakar sisa – sisa gas yang dihasilkan oleh gasifikasi pada lubang primer.

2. Reaktor

Reaktor berfungsi sebagai tempat pembakaran dimana proses gasifikasi dan pembakaran berlangsung. Bagian reaktor ini terdiri dari 2 lapis yaitu tabung luar dan tabung dalam.

3. Burner

Burner adalah tempat terjadinya pembakaran gas hasil gasifikasi yang akan digunakan untuk memanaskan benda yang berada diatas kompor seperti panci dll. Burner juga merupakan tempat dimana secondary combustion terjadi agar api yang dihasilkan lebih bersih dan pembakaran lebih efisien.

2.4. PENDINGINAN THERMOELEKTRIK

Modul termoelektrik adalah alat yang dapat mengubah energi panas dari perbedaan temperatur menjadi energi listrik atau sebaliknya. Modul ini memanfaatkan tiga efek termoelektrik yaitu Seebeck, Peltier, dan Thomson.

Konstruksi modul termoelektrik terdiri dari pasangan material semikonduktor tipe-p dan tipe-n.

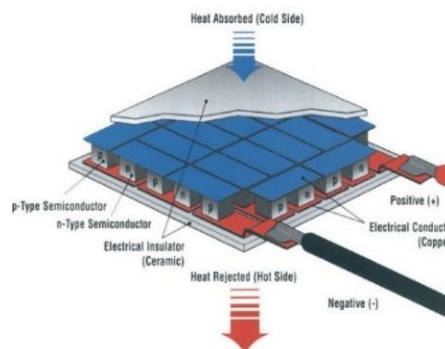
2.4.1. Parameter Penggunaan Modul Termoelektrik

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 diugunakan oleh modul.
5. Temperatur tertinggi dan terendah lingkungan dimana modul beroperasi.

2.4.2. Thermoelektrik Generator (TEG)

Thermoelektrik generator atau TEG menggunakan prinsip efek seebeck. Jika ada dua buah material logam yang berbeda, maka pada material itu akan mengalir arus gaya atau gaya gerak listrik. Thermoelektrik generator secara langsung mengubah energi panas menjadi energi listrik.



Gambar 2.6. Thermoelektrik generator (<https://topmagneticgenerator.com/>)

Dengan perbedaan temperatur panas antara sisi panas dan sisi dingin pada thermoelektrik generator, pada elemen ini akan mengalir arus sehingga terjadi beda tegangan. Secara umum thermoelektrik generator menggunakan

bahan BiTe *Bismuth Tellurid*, dengan rentang temperatur kerja hingga 350°C. Besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradient temperatur.

2.4.3. Termoelektrik Cooling (TEC)

Termoelektrik *cooling* atau TEC menggunakan prinsip yang berkebalikan dari TEG yaitu menggunakan efek peltier. Jika ada arus listrik yang mengalir melewati rangkaian dari dua buah konduktor dengan material yang berbeda, akan terjadi kenaikan dan penurunan temperatur pada *junction* yang bergantung pada aliran arus listrik. Pembuangan panas dari sisi panas akan menurunkan temperatur pada sisi dingin dengan cepat, besarnya penurunan temperatur bergantung pada arus yang diberikan.



Gambar 2.7. Termoelektrik Cooling (www.aliexpress.com/)

Modul TEC biasanya digunakan untuk sistem pendingin, seperti *dispenser*. Ketika ada aliran arus listrik, elektron bergerak dari bahan tipe-p ke bahan tipe-n menyerap energi panas *junction* sisi dingin. Elektron-elektron membuang kelebihan energi pada *junction* sisi panas.

2.4.4. Efek Termoelektrik

Fenomena penemuan ini terjadi sekitar tahun 1800-an, dengan banyaknya aplikasi potensial yang sekarang dan di masa depan, tetapi juga dengan tantangan untuk meningkatkan kinerja perangkat termoelektrik. Fenomena ini dijelaskan oleh tiga efek. Efek *Seebeck* ditemukan oleh Thomas Seebeck pada tahun 1821 tentang konversi perbedaan suhu menjadi tegangan listrik. Efek Peltier yang ditemukan oleh Jean Peltier pada tahun 1834 mengenai konversi tegangan menjadi gradient suhu. Dan efek Thomson ditemukan oleh Wiliam Thomson pada tahun 1855 mengenai aliran panas

masuk sebuah konduktor dengan terminal yang diadakan pada temperatur yang berbeda karena aliran arus.

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. Efek Seebeck mengubah perbedaan temperatur menjadi tegangan atau kekuatan listrik (EMF). Perubahan EMF sehubungan dengan perubahan temperatur disebut dengan koefisien Seebeck. Efek Peltier merupakan kebalikan dari efek Seebeck yang memberikan perbedaan temperatur dengan memberikan EMF. Untuk efek Thomson berkaitan dengan perbedaan suhu dan EMF dalam suatu pengantar homogen.

2.4.4.1. Efek Seebeck

Efek Seebeck adalah konversi langsung dari perbedaan temperatur menjadi energi listrik. Ia menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian tertutup dan di antara kedua logam tersebut diletakkan jarum kompas. Ketika pada persambungan logam dipanaskan, jarum kompas bergerak. Hal ini karena logam yang berbeda menanggapi perbedaan temperatur, yang menimbulkan loop arus dan medan magnet. Medan magnet inilah yang menggerakkan jarum kompas. Seebeck tidak menyadari ada arus yang terlibat, sehingga dia menyebut fenomena dengan efek *thermomagnetic*. Tetapi fisikawan Denmark, Hans Christian Orsted memperbaiki kesalahan itu dan menciptakan istilah untuk mengganti efek *thermomagnetic* yang disebut *thermoelectricity*.

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. Fenomena ini pertama kali ditemukan oleh Seebeck sehingga disebut efek Seebeck atau umumnya dikenal dengan nama prinsip termokopel. Tegangan yang dihasilkan ini sebanding dengan perbedaan temperatur diantara dua junction. Semakin besar perbedaan temperatur, semakin besar tegangan

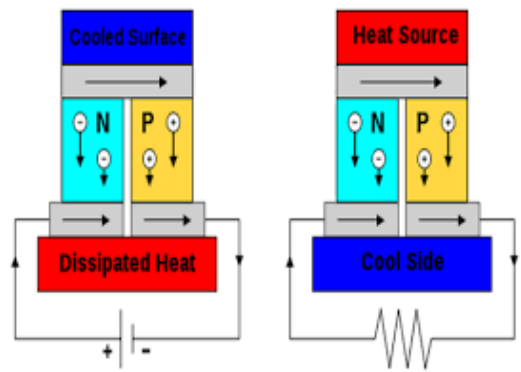
diantara junction. Dari fenomena ini, kita dapat menentukan koefisien Seebeck, yaitu:

$$\alpha = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{hot} - v_{cold}}{t_{hot} - t_{cold}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

- α = Koefisien seebeck (Volt/°C)
- Δv = Beda Tegangan (Volt)
- Δt = Beda Temperatur (°C)

Sedangkan untuk perbedaan voltage (v), kita dapat menghitung dengan menggunakan rumus persamaan:



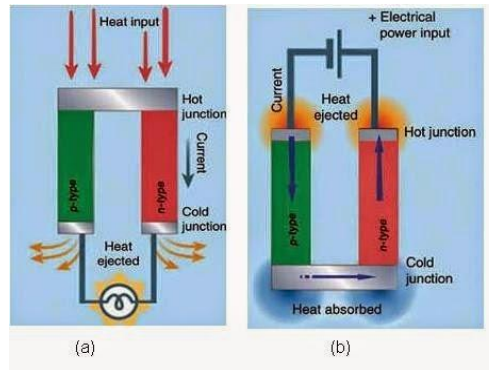
Gambar 2.8. Skema ilustrasi efek Seebeck (S.B. Rifat, dkk. 2003)

2.4.4.2. Efek Peltier

Penemuan Seebeck memberikan inspirasi pada Jean Charles Peltier 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 1834 ini kemudian dikenal dengan efek Peltier.

Pada saat arus mengalir melalui *thermocouple*, temperatur *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 thermoelektrik. Dari

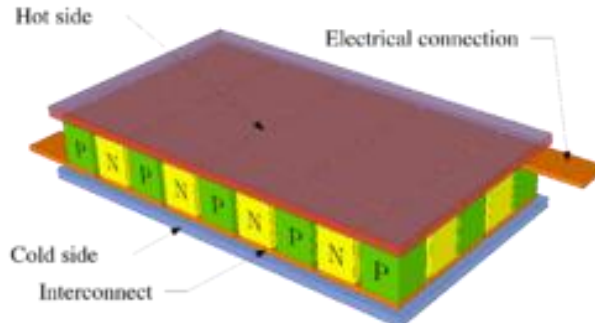
percobaan diketahui bahwa perpindahan panas sebanding terhadap arus mengalir.



Gambar 2.9. Skeka ilustrasi efek Peltier (H.J. Goldsmid. 2010)

2.4.4.3. 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.



Gambar 2.10. Skema Ilustrasi efek Thomson (H.J. Goldsmid. 2010)

2.4.5. Efek-Efek Perpindahan Panas Termoelektrik

Perpindahan panas yang terjadi pada sistem pendingin termoelektrik adalah dengan cara konduksi dan konveksi. Konduksi terjadi mulai dari *heat sink* sisi dingin *peltier, bracket/coldsink*, dan *heat sink* pada sisi panas *peltier*. Sedangkan konveksi terjadi pada udara dalam ruangan, lingkungan sekitar alat uji, dan udara disekitar sirip-sirip *heat sink*. 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:

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):

$$Q = \frac{kA\Delta T}{x} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

- Q = Laju perpindahan panas (Watt)
- K = Konduktivitas termal (W/m²°C)
- A = Luasan Perpindahan panas yang tegak lurus dengan arah Q (m²)
- ΔT = Beda temperatur (°C)
- X = Jarak antar temperatur rendah dan tinggi (m)

Perpindahan Panas Konveksi adalah distribusi energi berupa panas yang terjadi karena terdapat aliran fluida. Persamaan dasar perpindahan konveksi adalah (Cengel. Y.A. 2003):

$$Q = h \cdot A (\Delta t) \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

- Q = Laju perpindahan panas (Watt)
- h = Koefisien perpidahan panas konveksi (W/m²°C)
- A = Luas permukaan kontak dengan fluida (m²)
- Δt = Beda temperatur (°C)

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):

$$Q = \varepsilon A(\Delta t)^4 \sigma \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

Q	= Panas yang dipancarkan	(Watt)
ε	= emisivitas permukaan benda	(0 s.d. 1)
A	= Luas perpindahan panas	(m ²)
Δt	= Temperatur permukaan benda	(°K)
σ	= Konstanta Stefan Boltzman	(5,67 x 10 ⁻⁸ W/m ² .K ⁴)

2.4.5.1. Perpindahan Panas Konduksi

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

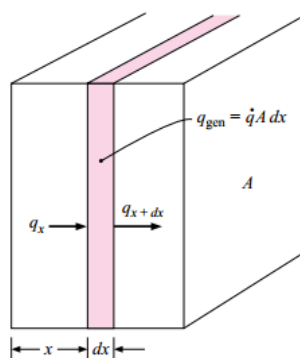
$$q = K \cdot A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \dots\dots\dots(2.5)$$

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 :

$$R_T = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{\Delta x}{K \cdot A} = \frac{q}{K \cdot A} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

- q = Energi panas (W)
- k = Konduktivitas termal (W/m.°C)
- A = Luas permukaan (m²)
- Δx = Tebal penampang permukaan (m)
- T_1 = Temperatur yang lebih tinggi (°C)
- T_2 = Temperatur yang lebih rendah (°C)



Gambar 2.11. Skema perpindahan panas konduksi (Cengel. Y.A. 2003).

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

Tabel 2.1. Konduktifitas Termal Berbagai Bahan pada 0 °C (Cengel. Y.A. 2003)

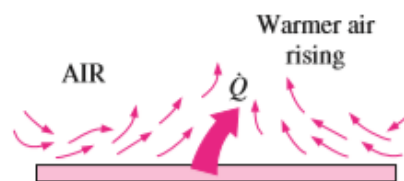
Material	Thermal conductivity k	
	W/m · °C	Btu/h · ft · °F
Metals:		
Silver (pure)	410	237
Copper (pure)	385	223
Aluminum (pure)	202	117
Nickel (pure)	93	54
Iron (pure)	73	42
Carbon steel, 1% C	43	25
Lead (pure)	35	20.3
Chrome-nickel steel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
Nonmetallic solids:		
Diamond	2300	1329
Quartz, parallel to axis	41.6	24
Magnesite	4.15	2.4
Marble	2.08–2.94	1.2–1.7
Sandstone	1.83	1.06
Glass, window	0.78	0.45
Maple or oak	0.17	0.096
Hard rubber	0.15	0.087
Polyvinyl chloride	0.09	0.052
Styrofoam	0.033	0.019
Sawdust	0.059	0.034
Glass wool	0.038	0.022
Ice	2.22	1.28
Liquids:		
Mercury	8.21	4.74
Water	0.556	0.327
Ammonia	0.540	0.312
Lubricating oil, SAE 50	0.147	0.085
Freon 12, CCl ₂ F ₂	0.073	0.042
Gases:		
Hydrogen	0.175	0.101
Helium	0.141	0.081
Air	0.024	0.0139
Water vapor (saturated)	0.0206	0.0119
Carbon dioxide	0.0146	0.00844

2.4.5.2. Perpindahan Panas Konveksi

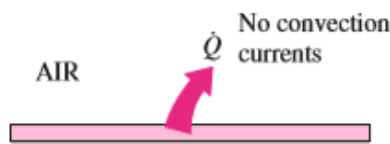
Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Contohnya adalah kehilangan panas dari radiator mobil, pendinginan dari secangkir kopi dll. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, 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).

(a) Forced convection



(b) Free convection



Gambar 2.12. Skema perpindahan panas konveksi (Cengel. Y.A. 2003)

$$q = hA (\Delta t) \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan:

q = Laju perpindahan panas (kJ/s atau W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².°C)

A = Luas bidang permukaan perpindahan panas (ft², m²)

Δt = Beda temperatur (°C, °K)

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:

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

Dalam hal ini, memberikan persamaan 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 Nilai koefisien perpindahan panas konveksi (Cengel, Y.A. 2003)

Mode	h	
	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$
Across 2.5-cm air gap evacuated to a pressure of 10^{-6} atm and subjected to $\Delta T = 100^\circ C = 30^\circ C$	0.087	0.015
<i>Free convection, $\Delta T = 30^\circ C$</i>		
Vertical plate 0.3 m [1 ft] high in air	4.5	0.79
Horizontal cylinder, 5-cm diameter, in air	6.5	1.14
Horizontal cylinder, 2-cm diameter, in water	890	157
Heat transfer across 1.5-cm vertical air gap with $\Delta T = 60^\circ C$	2.64	0.46
Fine wire in air, $d = 0.02$ mm, $\Delta T = 55^\circ C$	490	86
<i>Forced convection</i>		
Airflow at 2 m/s over 0.2-m square plate	12	2.1
Airflow at 35 m/s over 0.75-m square plate	75	13.2
Airflow at Mach number = 3, $p = 1/20$ atm, $T_\infty = -40^\circ C$, across 0.2-m square plate	56	9.9
Air at 2 atm flowing in 2.5-cm-diameter tube at 10 m/s	65	11.4
Water at 0.5 kg/s flowing in 2.5-cm-diameter tube	3500	616
Airflow across 5-cm-diameter cylinder with velocity of 50 m/s	180	32
Liquid bismuth at 4.5 kg/s and $420^\circ C$ in 5.0-cm-diameter tube	3410	600
Airflow at 50 m/s across fine wire, $d = 0.04$ mm	3850	678
<i>Boiling water</i>		
In a pool or container	2500–35,000	440–6200
Flowing in a tube	5000–100,000	880–17,600
<i>Condensation of water vapor; 1 atm</i>		
Vertical surfaces	4000–11,300	700–2000
Outside horizontal tubes	9500–25,000	1700–4400
<i>Dropletwise condensation</i>	170,000–290,000	30,000–50,000

2.4.5.2.1. 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 relative pendek dengan diketahuinya kecepatan kritis dari suatu aliran. Kecepatan kritis ini pada umumnya akan dipengaruhi oleh pusran 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) :

$$Re = \frac{GD}{\mu} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

- Re = Bilangan Reynolds
- G = kecepatan aliran massa (kg/m²s)
- D = Diameter pipa (m)
- μ = Viskositas dinamik fluida (Ns/m²)

2.4.5.2.1. 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) :

$$Nu = \frac{q''(\text{konveksi})}{q''(\text{konduksi})} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/L} = \frac{hL}{k} \dots\dots\dots(2.9)$$

Bilangan Nusselt untuk aliran dalam pipa dapat dituliskan :

$$Nu = \frac{hD}{k_f} \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

- Nu = Bilangan Nusselt
- h = Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m².K)
- L = Panjang (m)
- D = Diameter pipa (m)
- k_f = Konduktifitas kalor fluida (W/m.K)

2.4.5.2.2. Bilangan Prandtl

Bilangan Prandtl merupakan rasio viskositas (*v*) fluida dengan difusivitas kalor (*α*), dimana bilangan Prandtl merupakan properties termodinamika dari fluida (Cengel. Y.A. 2003).

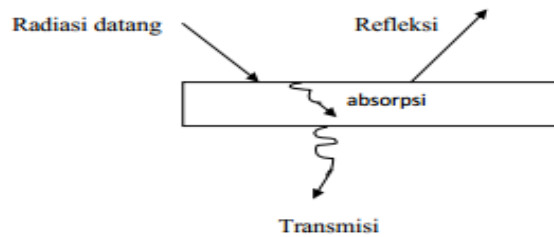
$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan:

- Pr = Bilangan Prandtl
- V = viskositas kinematik fluida (m²/s)
- α* = *thermal diffusivity* (m²/s)
- c_p* = kalor spesifik (J/kg.°K)
- μ = viskositas dinamik fluida (N.s/m²)
- k_f* = konduktivitas kalor fluida (W/m.°K)

2.4.5.3. Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah proses di mana panas mengalir dari benda yang bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang, bahkan jika terdapat ruang hampa di antara benda-benda tersebut.



Gambar 2.13. Perpindahan panas radiasi (Cengel. Y.A. 2003)

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 seperti gambar 2.13. Sedangkan besarnya energi :

$$Q_{pancaran} = \sigma A T^4 \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

- $Q_{pancaran}$ = Laju perpindahan panas (W)
- σ = Konstanta boltzman ($5.669.10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
- A = Luas permukaan benda (m^2)
- T = Suhu absolute benda ($^{\circ}\text{C}$)

2.4.6. Perhitungan Thermoelektrik

Bahan thermoelektrik 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 thermoelektrik, 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):

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R_i + R_L} = \frac{\alpha (T_h - T_c)}{R_i + R_L} \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana:

I = Arus listrik yang mengalir pada rangkaian (A)

R_i = Tahanan internal modul thermoelektrik (ohm)

R_L = Tahanan Eksternal (ohm)

T_h = Temperatur sisi panas modul (°C)

T_c = 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):

$$Q_h = (\alpha I T_h) + k(T_h - T_c) \dots \dots \dots (2.14)$$

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

Daya keluaran (P) dan efisiensi (η) generator thermoelektrik adalah sebagai berikut (H.J. Goldsmid. 2010):

$$P = I V \dots \dots \dots (2.15)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_h} \dots \dots \dots (2.16)$$