

**ANALISIS DAN SIMULASI PERPINDAHAN PANAS DARI TUNGKU
PEMBAKARAN SATE UNTUK KONVERSI ENERGI MENGGUNAKAN
*THERMOELECTRIC GENERATOR***

SKRIPSI

OLEH:

**ASIDO NAPITUPULU
218130080**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2025**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 6/5/25

Access From (repository.uma.ac.id)6/5/25

**ANALISIS DAN SIMULASI PERPINDAHAN PANAS DARI TUNGKU
PEMBAKARAN SATE UNTUK KONVERSI ENERGI MENGGUNAKAN
*THERMOELECTRIC GENERATOR***

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana di Fakultas Teknik
Universitas Medan Area

OLEH:

**ASIDO NAPITUPULU
218130080**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2025**

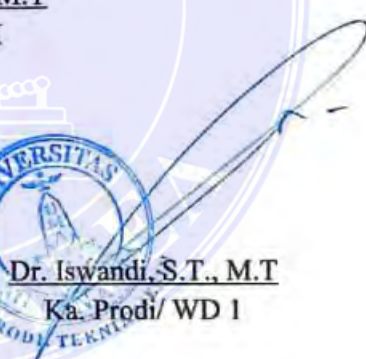
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Proposal : Analisis dan Simulasi Perindahan Panas dari
Tungku Pembakaran Sate untuk Konversi Energi
Menggunakan Thermoelectric Generator
Nama Mahasiswa : Asido Napitupulu
NIM : 21.813.0080
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing


Dr. Jufrizal S.T., M.T
Pembimbing I


Dr. Eng. Supriatno S.T., M.T
Dekan


Dr. Iswandi, S.T., M.T
Ka. Prodi/ WD I

Tanggal Lulus:

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai sorma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 26 Maret 2025



Asido Napitupulu

218130080

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Asido Napitupulu
NPM : 218130080
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul: Analisis dan Simulasi perpindahan panas dari tungku pembakaran sate untuk konversi energi menggunakan generator termoelektrik.

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis saya tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Medan
Pada tanggal: 26 Maret 2025
Yang menyatakan



Asido Napitupulu
218130080

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis perpindahan panas dari tungku pembakaran sate sebagai pemanfaatan sumber panas untuk konversi energi melalui Thermoelectric Generator (TEG). Tujuannya adalah untuk memahami distribusi suhu dan total *heat flux* pada tungku pembakaran menggunakan simulasi numerik. Data diperoleh dari literatur dan pengukuran langsung. Simulasi dilakukan dengan *software* ANSYS *student*, yang efektif untuk analisis perpindahan panas. Suhu tertinggi yang terukur pada lapisan plat TEG mencapai 95,8 °C, dengan distribusi suhu merambat hingga 40,6 °C di ujung *heatsink*. Hasil teoritis menunjukkan nilai temperatur: $T_{s1} = 95,8$ °C, $T_2 = 95,00612$ °C, $T_3 = 42,321383$ °C, $T_{s4} = 40,6$ °C. Simulasi numerik menghasilkan $T_{s1} = 95,8$ °C, $T_2 = 95,168$ °C, $T_3 = 46,741$ °C, $T_{s4} = 40,6$ °C. Total *heat flux* dari hasil simulasi menunjukkan laju aliran energi panas pada plat termoelektrik sebesar 28972 W/m², pada bagian termoelektrik 78289 W/m², dan pada *heatsink* 13834 W/m², sedangkan total *heat flux* hasil teoretisnya masing-masing adalah 28976,6 W/m², 79027,1 W/m², dan 12418 W/m².

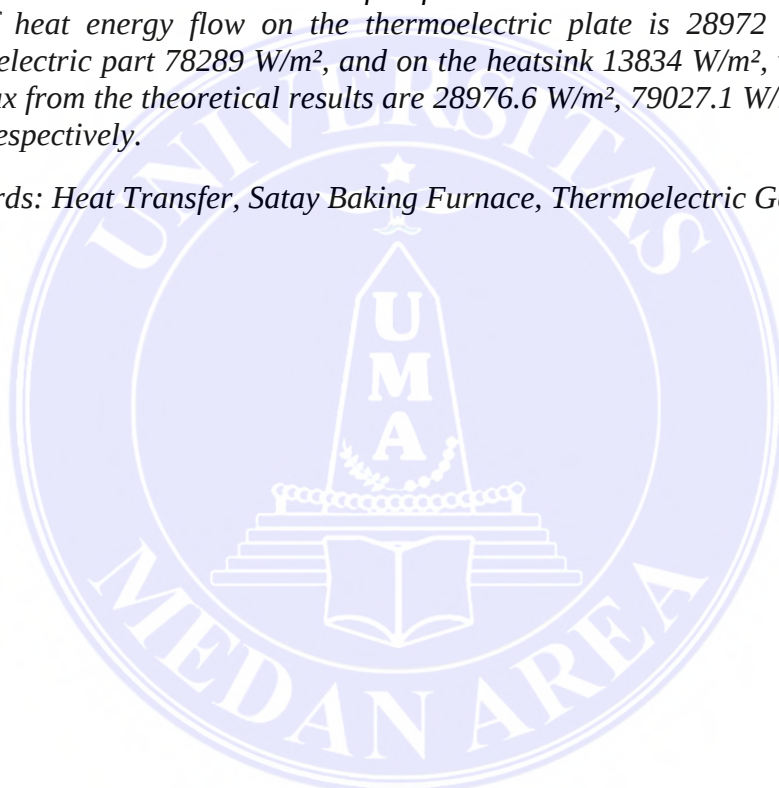
Kata Kunci: Perpindahan Panas, Tungku Pembakaran Sate, Termoelektrik Generator



ABSTRACT

This study analyzes heat transfer from a satay grill as a heat source utilization for energy conversion through a Thermoelectric Generator (TEG). The aim is to understand the temperature distribution and total heat flux in the grill using numerical simulations. Data were obtained from literature and direct measurements. Simulations were performed using ANSYS student software, which is effective for heat transfer analysis. The highest temperature measured on the TEG plate layer reached 95.8 °C, with a temperature distribution spreading up to 40.6 °C at the end of the heatsink. The theoretical results show temperature values: $T_{s1} = 95.8$ °C, $T_2 = 95.00612$ °C, $T_3 = 42.321383$ °C, $T_{s4} = 40.6$ °C. Numerical simulations produce $T_{s1} = 95.8$ °C, $T_2 = 95.168$ °C, $T_3 = 46.741$ °C, $T_{s4} = 40.6$ °C. The total heat flux from the simulation results shows that the rate of heat energy flow on the thermoelectric plate is 28972 W/m², on the thermoelectric part 78289 W/m², and on the heatsink 13834 W/m², while the total heat flux from the theoretical results are 28976.6 W/m², 79027.1 W/m², and 12418 W/m² respectively.

Keywords: Heat Transfer, Satay Baking Furnace, Thermoelectric Generator



RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Asido Napitupulu dilahirkan di Desa Nrumonda VII (Pangasean), Kec.Siantar Narumonda, Kab. Toba Samosir pada tanggal 08 November 2002 dari ayah Laut Napitupulu dan ibu Rosyah Sinambela. Penulis merupakan putra ke lima dari lima bersaudara. Tahun 2015 penulis menyelesaikan Pendidikan Dasar di SDN 177071 Narumonda, tahun 2018 penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Narumonda, tahun 2021 penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK Negeri 1 Balige jurusan Teknik Pemesinan, pada tahun 2021 penulis melanjutkan Pendidikan sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin di Universitas Medan Area. Penulis melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PT. Hari Sawit Jaya (Asian Agri) yang beralamat di Jl. Baru, Perkebunan Negeri Lama Kec.Bilah Hilir, Kab.Labuhan Batu, Sumatera Utara 21471 dan tamat di Universitas Medan Area tahun 2025.

KATA PENGANTAR

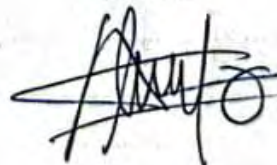
Puji syukur kehadiran Tuhan yang maha kuasa atas segala karunia-Nya sehingga Skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ini adalah dengan judul: Analisis dan Simulasi Perpindahan Panas Dari Tungku Pembakaran Sate Untuk Konversi Energi Menggunakan Thermoelektrik Generator.

Terimakasih penulis sampaikan kepada bapak Dr. Jufrizal, S.T., M.T selaku pembimbing tugas akhir serta segenap bapak/ibu dosen dan pegawai birokrasi administrasi program studi teknik mesin universitas medan area yang telah banyak membantu dan memberikan saran. Disamping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada seluruh teman-teman seperjuangan yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis selama melaksanakan penelitian. Ungkapan terimakasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna dan masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu penulis berharap kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca demi kebaikan dan kesempurnaan dimasa yang akan datang. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan pendidikan maupun masyarakat, akhir kata penulis ucapkan terimakasih.

Medan, 26 Maret 2025

Penulis



Asido Napitupulu
(218130080)

DAFTAR ISI

ANALISIS DAN SIMULASI PERPINDAHAN PANAS DARI TUNGKU PEMBAKARAN SATE UNTUK KONVERSI ENERGI MENGGUNAKAN <i>THERMOELECTRIC GENERATOR</i>	ii
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
RIWAYAT HDUP	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Batasan Masalah	6
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Hipotesis Penelitian	7
1.6. Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1. Kinerja Termoelektrik	8
2.1.1. Prinsip Kerja Termoelektrik	11
2.1.2. Efek-efek Termoelektrik	14
2.1.3. Pembangkit Listrik Termoelektrik	19
2.1.4. Konduksi Melalui Lapisan Gas Tipis.....	31
2.1.5. Konduksi Melalui Film Padat Tipis	33

2.2.	Perpindahan Kalor	34
2.2.1.	Perpindahan panas konduksi	34
2.2.2.	Perpindahan panas konveksi	36
2.2.3.	Perpindahan panas radiasi	38
2.2.4.	Tahanan Termal	39
2.3.	Simulasi	42
2.3.1.	Software Ansys	43
2.3.2.	Langkah-langkah melakukan simulasi	43
2.4.	Model Matematika Metode Elemen Hingga	45
2.4.1.	Matriks kekakuan elemen perpindahan panas (K)	46
2.4.2.	Matriks Sumber Panas	46
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		50
3.1	Waktu Dan Tempat Penelitian	50
3.1.1.	Tempat penelitian	50
3.1.2.	Waktu penelitian	50
3.2	Peralatan dan Bahan	49
3.2.1.	Peralatan	49
3.2.2.	Bahan	52
3.3	Metode Penelitian	54
3.4	Populasi dan Sampel	54
3.4.1	Populasi dan sampel	54
3.4.2	Kondisi batas	55
3.5.	Prosedur Penelitian	60
3.7.	Diagram Alir Penelitian	71
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		79
4.1.	Hasil Pengujian	79
4.1.1.	Distribusi Temperatur	77
4.1.2.	Aliran panas (<i>Heat Flux</i>)	80
4.1.	Pembahasan	83
4.1.1.	Analisis Distribusi Temperatur	83
4.2.1.	Analisis Aliran Panas (<i>Heat Flux</i>)	85
4.2.1.	Kesalahan Simulasi (Error)	87

BAB V SIMPULAN DAN SARAN	89
5.1. Simpulan	89
5.2. Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA	91
LAMPIRAN.....	93



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jadwal Tugas Akhir	50
Tabel 3. 2. Populasi.....	54
Tabel 3. 3. Sampel.....	55
Tabel 3. 4. Kondisi batas.....	56
Tabel 3. 5. Konduktivitas Thermal Material Tungku Pembakaran.....	57
Tabel 3. 6. Konduktivitas thermal berbagai material pada 0 °C	57
Tabel 3.7. Diagram alur penelitian.....	71
Tabel 3. 8. Diagram alur simulasi Ansys	72
Tabel 4. 1. Dimensi Tungku Pembakaran.....	73
Tabel 4. 2. Luas Permukaan.....	75
Tabel 4. 3. Tahanan Termal Konduksi.....	76
Tabel 4. 4. Temperatur Teoritis.....	79
Tabel 4. 5. Distribusi Temperatur Simulasi	80
Tabel 4. 6. <i>Heatflux</i> Teoritis	81
Tabel 4. 7. <i>Heatflux</i> Lapisan Tungku Pembakaran hasil simulasi	83
Tabel 4. 16. Tabel Hasil Temperatur teori dengan Simulasi.....	84
Tabel 4. 17. <i>Heatflux</i> teoritis dan simulasi	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Termoelektrik Generator	10
Gambar 2.2. Prinsip kerja termoeletrik generator	11
Gambar 2.3. Efek <i>Seebeck</i>	15
Gambar 2.4. Efek Peltier	17
Gambar 2.5. Fenomena Thermoelectric	20
Gambar 2.6. Modul Termoelektrik	24
Gambar 2. 7. Susunan Modul TEG	27
Gambar 2.8. Lintasan Molekul	32
Gambar 2. 9. Skema sederhana perpindahan panas.	34
Gambar 2.10. Konduksi	36
Gambar 2.11. Konveksi	37
Gambar 2.12. Radiasi	39
Gambar 2. 13. Rangkaian Tahanan Termal pada dinding komposit	40
Gambar 2.14. Laju kehilangan panas terhadap laju perfusi	42
Gambar 2. 15. Mesh jenis <i>Hexahedron</i>	44
Gambar 2. 16. Mesh jenis <i>Tetrahedron</i>	44
Gambar 3. 1. <i>Thermo gun</i>	49
Gambar 3. 2. Laptop	50
Gambar 3. 3. Ansys <i>Students Workbench</i> 2024	51
Gambar 3. 4. Solidwork 2023	51
Gambar 3. 5. Thermoeletrik generator	52
Gambar 3. 6. Tungku pembakaran sate	53
Gambar 3. 7. Gemoetri kondisi Batas Tungku Pembakaran	56
Gambar 3. 8. Tampilan awal solidwork	60
Gambar 3. 9. <i>Interface</i> Solidwork	61
Gambar 3. 10. Tampilan <i>view</i> gambar	61
Gambar 3. 11. Desain Bagian Lapisan Plat TEG	62
Gambar 3. 12. Desain akhir Pada Setiap Bagian	62
Gambar 3. 13. Lembar kerja Aplikasi ANSYS Workbench	63
Gambar 3. 14. Menu Analisis	64
Gambar 3. 15. Elemen tipe material	65
Gambar 3. 16. Pemberian Material Part Geometri	66
Gambar 3. 17. Tahap <i>Meshing</i>	66
Gambar 3. 18. Tahap <i>Setup</i>	67
Gambar 3. 19. Tahap <i>Solution</i>	68
Gambar 4. 1. Rangkaian Analogi Perpindahan Panas	73
Gambar 4. 2. Dimensi Pada Bagian Bawah	74
Gambar 4. 3. Geometry <i>heatsink</i>	74

Gambar 4. 4. Hasil Simulasi dengan ANSYS	79
Gambar 4. 5. Kontur <i>Heat Flux</i>	82
Gambar 4. 6. Vektor <i>Heatflux</i>	82
Gambar 4. 7. Grafik Distribusi Temperatur	84
Gambar 4. 8. Grafik Aliran panas (<i>Heatflux</i>)	86



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Proses pengujian alat	93
Lampiran 2. Hasil simulasiat Pengujian	93
Lampiran 3. Alat Pengujian	93
Lampiran 4. Distribusi Temperatur.....	94
Lampiran 5. Gambar geometry pada setiap bagian di solidworks	94
Lampiran 6. Gambar distribusi temberatur Simulasi menggunakan ANSYS.....	94



DAFTAR NOTASI

V	= Tegangan (V)
S	= Koefisien <i>seebeck</i> ($\mu V/k$)
ΔT	= Perbedaan Temperatur panas dan dingin (K)
Q_c	= Panas pada terminal dingin (W)
Q_h	= Panas pada Termal panas (W)
α_{pn}	= Koefisien <i>Seebeck</i> (V/K)
T	= Temperatur (K)
I	= Arus Listrik (A)
Q_t	= Panas thomson (W/cm)
M	= Koefisien Thomson (V/K)
dT/dx	= Gradien temperature semikonduktor (C)
P	= Daya listrik (Watt)
Q	= Laju perpindahan panas (W)
K	= Konduksi termal benda atau material ((73 W/m.°C)
A	= Luas penampang (m^2)
d_T	= Perubahan suhu (°C)
d_x	= Ketebalan bahan (m)
q_{conv}	= Laju perpindahan panas konveksi (W)
H	= Konduktivitas termal (W/m.°C)
T_s	= Suhu benda (°C)
T_∞	= Suhu fluida (°C)
Q_r	= Laju perpindahan panas radiasi (W)
σ	= Konstanta Stefan-Boltzmann ($W/m^2 \cdot K^4$)
ε	= Emisivitas bahan ($0 < \varepsilon < 1$)
R	= Tahanan termal perunit area ($m^2 \cdot k/W$)
L	= Ketebalan material (m)
K	= Konduktifitas material (W/m.k)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Permintaan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan kemajuan teknologi, termasuk dalam sektor pendidikan (Rafika, Iman Mainil, and Azridjal Aziz 2016). Menurut dalam kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), dalam bidang fisika energi dapat diartikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja, yang sejalan dengan definisi dalam ilmu fisika sebagai kemampuan untuk melakukan usaha (Kurniawan, Sutoyo, and Hartono 2020). Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan; energi hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Hal ini juga berlaku untuk energi listrik, yang dihasilkan dari konversi energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik. Oleh karena itu, pemanfaatan energi listrik ini harus dilakukan secara optimal untuk mendapatkan manfaat yang maksimal.

Kegunaan energi listrik dalam kehidupan sehari-hari sangat beragam, termasuk sebagai penerangan, pemanas, dan penggerak motor listrik (Rafika, Iman Mainil, and Azridjal Aziz 2016). Seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan kemajuan teknologi, permintaan akan tenaga listrik terus meningkat. Untuk memenuhi kebutuhan ini, sistem penyediaan tenaga listrik harus berkembang sejalan dengan peningkatan permintaan dari konsumen. Di antara konsumen tersebut adalah para pedagang yang

beroperasi di malam hari seperti pedagang sate yang merupakan salah satu makanan favorit yang banyak dinikmati pada waktu tersebut. Para pedagang ini memerlukan pencahayaan yang memadai untuk menerangi area dagang mereka agar dapat memberikan pelayanan yang baik kepada pelanggan. Selama ini, banyak dari mereka mengandalkan sumber pencahayaan yang kurang efisien, seperti lilin atau baterai portabel yang perlu diisi ulang, ini hanya mencakup sekitar 0,03% dari total penggunaan. Beberapa juga terpaksa menyewa arus listrik dari toko-toko terdekat atau rumah-rumah di sekitar lokasi mereka berjualan. Rata-rata daya listrik yang digunakan oleh pedagang kaki lima seperti pedagang sate untuk penerangan berkisar antara 10 Watt hingga 200 Watt, lampu penerangan yang digunakan dapat memiliki daya sekitar 5 hingga 82 Watt. Sementara itu, panas yang dihasilkan dari tungku pembakaran sate dapat dimanfaatkan secara efektif untuk dikonversi menjadi arus listrik menggunakan termoelektrik generator. Dengan demikian, para pedagang sate dapat memenuhi kebutuhan energi mereka di malam hari tanpa harus bergantung pada penyewaan listrik dari rumah-rumah di sekitar lokasi berdagang. Inovasi ini tidak hanya akan mengurangi biaya operasional, tetapi juga memberikan solusi berkelanjutan yang ramah lingkungan bagi para pelaku usaha kecil.

Meskipun saat ini energi yang dihasilkan oleh elemen Thermoelectric Generator (TEG) masih relatif kecil dan biaya produksinya cukup tinggi, teknologi ini memiliki potensi yang signifikan untuk konversi energi. Elemen TEG umumnya hanya mampu menghasilkan listrik dengan daya rendah. Namun, keunggulan utama dari sistem konversi menggunakan TEG adalah fleksibilitasnya; sistem ini dapat beroperasi kapan saja selama ada proses pembakaran, baik di pagi maupun malam hari, dan di berbagai lokasi.

Dalam penelitian mengenai aplikasi termoelektrik generator (TEG), berbagai studi telah menunjukkan potensi pemanfaatan limbah panas untuk menghasilkan energi listrik. Mirmanto dkk. menunjukkan bahwa limbah panas dari kompor gas dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik menggunakan TEG, dengan hasil yang menunjukkan efisiensi yang baik (Mukaddim, Wirawan, and Alit 2013).

Selanjutnya Nandy Putra dan rekan-rekan (2009) mensimulasikan sumber panas buang dengan menggunakan pemanas yang bervariasi pada tegangan 110 V dan 220 V. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dua belas elemen termoelektrik yang disusun secara seri dengan tegangan pemanas 220 V dapat menghasilkan daya output maksimum sebesar 8,11 Watt, dengan perbedaan temperatur rata-rata mencapai 42,82°C (Putra dkk., 2009)

Penelitian terbaru oleh Satria syah putra dan Habibullah (2023), berjudul Prototipe Sistem Generator Termoelektrik Sebagai Pembangkit Listrik Memanfaatkan Limbah Panas Pabrik Semen menunjukkan bahwa dengan memberikan perbedaan suhu (ΔT) sebesar 54,5 °C selama 360 menit, Modul TEG dapat menghasilkan tegangan terbuka sebesar 8,7 volt. Tegangan ini kemudian dapat disesuaikan menjadi 4,87 Volt setelah diinputkan ke dalam baterai 5 volt. Selain itu, arus sebesar 0.08 A berhasil menghasilkan kapasitas 500 mAh pada baterai (Satria dan Habibullah, 2023).

Fatma Nuraida dan kawan kawan (2020) juga meneliti Pemanfaatan Panas Pada Kompor Gas Sebagai Energi Alternatif Menggunakan Generator Termoelektrik. Dalam penelitian ini menunjukkan bahwa menggunakan dua modul termoelektrik tipe TEC1-12706 yang dihubungkan secara seri, diperoleh tegangan

maksimum sebesar 3,12 V dan arus 19,90 mA pada perbedaan temperatur sebesar 82°C.

Selain itu, Abdurrahman, Ridwan dan Utami (2023) mengusulkan pemanfaatan panas buang dari tungku gasifikasi pabrik tahu untuk menghasilkan listrik, di mana modul termoelektrik digunakan untuk mengubah panas buang menjadi energi listrik, yang berpotensi membantu mengurangi emisi gas rumah kaca (Abdurrahman, Ridwan, and Utami 2023).

Salah satu penelitian menarik dilakukan oleh Bona Pasogit Pasaribu dengan mengenai analisis perpindahan panas dari tungku pembakaran sate ke TEG. Penelitian ini mencatat laju perpindahan panas tertinggi sebesar 137,47 W dan laju perpindahan panas terendah sebesar 75,28 W. Daya terendah yang di hasilkan sebesar 0,33 W dan daya tertinggi yang di hasilkan sebesar 1,12 W (Pasaribu, 2023). Lolo Suendra Simamora (2024) melanjutkan penelitian ini dengan fokus pada pengujian generator termoelektrik menggunakan panas dari tungku pembakaran sate. Hasil Penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi perbedaan temperatur suhu yang di peroleh termoelektrik generator maka semakin besar daya yang di hasilkan (Simamora, 2024).

Tungku pembakaran sate merupakan sumber panas yang potensial untuk dimanfaatkan dalam konversi energi, khususnya melalui penggunaan Termoelektrik Generator (TEG). Dalam konteks ini, analisis dan simulasi perpindahan panas dari tungku pembakaran sate ke TEG dengan fokus pada mekanisme perpindahan panas secara radiasi menjadi sangat penting. Proses pembakaran yang terjadi pada tungku menghasilkan panas yang dapat

dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik, sehingga penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mensimulasikan laju perpindahan panas dari tungku pembakaran sate dan membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimen untuk validasi model. Simulasi perpindahan panas diperlukan untuk memahami bagaimana panas berpindah dari tungku ke TEG. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perbedaan temperatur (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin TEG sangat mempengaruhi daya yang dihasilkan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis mendalam mengenai distribusi suhu di setiap lapisan dinding tungku yang mungkin sulit diukur secara langsung.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan di dibahas dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana nilai distribusi temperatur pada permukaan Thermoelectric Generator (TEG)?
2. Bagaimana model simulasi perpindahan panas yang terjadi pada lapisan tungku pembakaran sate?

1.3. Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan permasalahan yang perlu dirumuskan, penting untuk menetapkan batasan masalah serta ruang lingkupnya. Hal ini bertujuan agar analisis yang dilakukan nantinya menjadi lebih terarah dan mudah. Berikut adalah beberapa batasan masalah yang perlu diperhatikan:

1. Penelitian ini akan membatasi analisis pada mekanisme perpindahan panas secara radiasi dari tungku pembakaran sate ke TEG, tanpa

mempertimbangkan mekanisme konduksi dan konveksi yang mungkin juga berkontribusi pada perpindahan panas.

2. Simulasi dan pengukuran laju perpindahan panas akan dilakukan dalam kondisi tertentu, seperti temperatur arang yang stabil dan jarak tetap antara tungku dan TEG. Variasi faktor lain seperti kelembapan, angin, dan kondisi lingkungan tidak akan diperhitungkan dalam penelitian ini.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian dan penulisan tugas akhir yaitu:

1. Menganalisis nilai distribusi temperature pada permukaan TEG dan memperoleh gambaran simulasi.
2. Menganalisis total *Heat flux* pada tungku pembakaran sate.

1.5. Hipotesis Penelitian

Hipotesis penelitian merupakan penjelasan sementara yang harus di uji kebenarannya mengenai masalah yang diteliti. Adapun hipotesis penelitian yang diharapkan yaitu:

1. Laju perpindahan panas dari limbah tungku pembakaran sate ke TEG dipengaruhi signifikan oleh jarak antara mereka. Semakin dekat jarak, semakin tinggi laju perpindahan panas karena intensitas radiasi yang lebih kuat.
2. Jarak optimal antara tungku pembakaran sate dan TEG yang menghasilkan laju perpindahan panas maksimum.

1.6. Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu:

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pemahaman distribusi temperatur pada permukaan Thermoelectric Generator (TEG), sehingga dapat menjadi referensi untuk penelitian lebih lanjut di bidang energi terbarukan.
2. Menambah wawasan dan pemahaman tentang pemakaian software ANSYS untuk berbagai masalah pada bidang konversi energi khususnya pada ilmu perpindahan panas dan termodinamika.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kinerja Termoelektrik

Kemajuan teknologi termoelektrik memungkinkan konversi langsung energi panas menjadi energi listrik, serta sebaliknya, dari energi listrik menjadi dingin (pendinginan). Prinsip dasar dari sistem termoelektrik ini adalah efek *Seebeck*. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Jojo Sumarjo, Aa Santosa, dan Muhammad Imron Permana pada tahun 2017, berjudul “Pemanfaatan Sumber Panas pada Kompor Menggunakan 10 Termoelektrik Generator yang Dirangkai Secara Seri untuk Aplikasi Lampu Penerangan,” digunakan 10 elemen TEG-SP1848-27145. Penelitian ini memanfaatkan berbagai media pembakaran, seperti kayu bakar, gas elpiji, dan spirtus. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan media pembakaran yang berbeda mempengaruhi output tegangan yang dihasilkan oleh sistem termoelektrik (Sumarjo, Santosa, and Permana 2017).

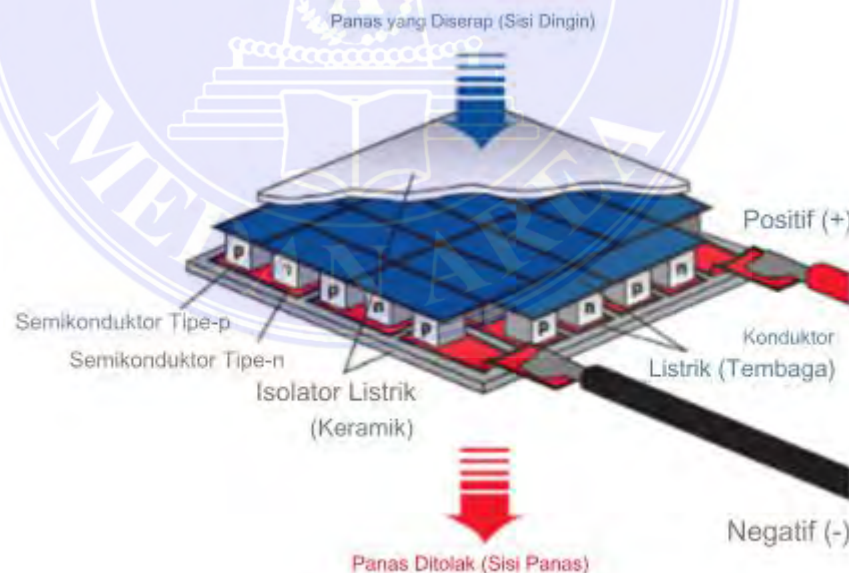
Penggunaan sumber listrik yang tidak terbarukan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi Indonesia, yang berimbas pada konsumsi energi listrik yang juga mengalami peningkatan. Diperkirakan, konsumsi listrik akan meningkat rata-rata 6,5% per tahun hingga tahun 2020. Namun, lonjakan permintaan ini menimbulkan tantangan serius, karena ketersediaan listrik tidak sebanding dengan kebutuhan yang terus berkembang.

PLN (Perusahaan Listrik Negara) sebagai BUMN yang bertanggung jawab dalam penyediaan energi listrik mulai menunjukkan kesulitan dalam memenuhi kebutuhan listrik nasional. Hal ini mengakibatkan cadangan sumber energi listrik, terutama bahan bakar fosil, semakin menipis. Dengan kondisi tersebut, penting bagi pemerintah dan PLN untuk mencari solusi yang lebih berkelanjutan dan efisien dalam pengelolaan energi, termasuk mempertimbangkan pengembangan energi baru terbarukan sebagai alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi yang tidak dapat diperbaharui. Kebijakan dan inovasi dalam sektor ketenagalistrikan perlu diperkuat untuk memastikan pasokan energi yang memadai bagi masyarakat dan mendukung pertumbuhan ekonomi secara berkelanjutan.

Pernyataan bahwa Indonesia perlu mencari bahan bakar alternatif yang terbarukan mencerminkan adanya krisis ketenagalistrikan di negara ini. Energi terbarukan merupakan pengembangan dari sumber daya yang ada, dan peneliti berupaya mengembangkan sumber daya yang dapat diperbarui untuk memenuhi permintaan energi listrik yang terus meningkat. Konsep energi terbarukan mulai dikenal secara luas sejak tahun 1970-an, sebagai respons terhadap penggunaan energi tidak terbarukan yang masif.

Salah satu solusi alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil adalah penggunaan elemen Peltier (Cekdin, Nawawi, and Faizal 2020). Elemen ini dapat menghasilkan energi listrik ketika terdapat perbedaan suhu di kedua sisinya. Peltier terdiri dari dua plat, satu dingin dan satu panas, dengan beberapa thermocouple biasanya berbahan Bismuth (Bi), Telurium (Te), antimony (Sb) atau selenium (Sb untuk membentuk TE. Kombinasi Bismuth telluride (Bi_2Te_3) dan antimony telluride (Sb_2Te_3) merupakan material TE yang paling

umum digunakan karena efisiensinya yang tinggi pada suhu ruangan. Selain itu, material ini juga mudah disimpan dalam bentuk film tipis untuk membuat modul yang fleksibel (Chen, Lin, and Fournier 2019). Ukuran standar modul TEG bervariasi dari 40x40x3 mm hingga 50x50x5 (Gould and Shammass 2009). Untuk TEG fleksibel, ketebalan bervariasi dari 10 hingga 50 μm (Francioso et al. 2010). Media pembakaran yang digunakan mempengaruhi output tegangan yang dihasilkan, namun saat ini masih mengandalkan energi konvensional yang kurang ramah lingkungan. Kondisi ini mendorong peneliti untuk merancang Prototipe Pembangkit Listrik Thermoelectric Generator Menggunakan Tungku Pembakaran sate menjadi media penelitian. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat ditemukan solusi yang lebih efisien dan berkelanjutan dalam pemanfaatan energi terbarukan.

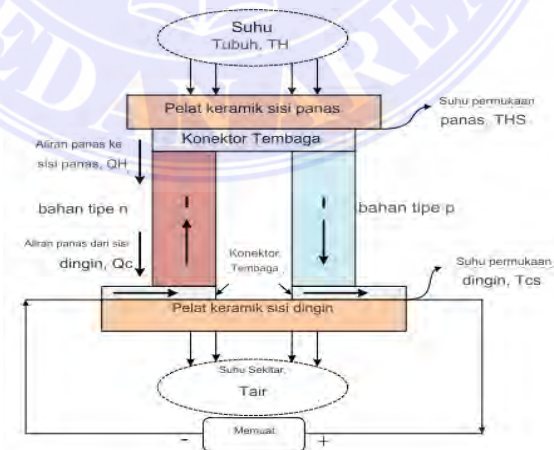


Gambar 2.1. Termoelektrik Generator (Anwar and Sari 2014).

2.1.1. Prinsip Kerja Termoelektrik

Generator termoelektrik adalah perangkat yang mengubah energi panas menjadi listrik berdasarkan efek *Seebeck*, yang pertama kali ditemukan oleh Thomas Johann *Seebeck* pada tahun 1821. Dalam eksperimennya, *Seebeck* menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian dan menempatkan jarum kompas di antara kedua logam tersebut. Ketika salah satu sisi dipanaskan, jarum kompas bergerak, menunjukkan adanya aliran listrik yang menciptakan medan magnet. Fenomena ini dikenal sebagai efek *Seebeck* (M.Rowe 1995).

Efek *Seebeck* terjadi ketika dua bahan berbeda disambungkan dan dipertahankan pada suhu yang berbeda, menghasilkan perbedaan potensial listrik (Cekdin, Nawawi, and Faizal 2020). Prinsip ini menjadi dasar bagi pengembangan teknologi termoelektrik, yang memungkinkan konversi langsung dari perbedaan temperatur menjadi energi listrik. Gambar 2.2 di bawah ini menggambarkan prinsip kerja efek *Seebeck* dalam generator termoelektrik.



Gambar 2.2. Prinsip kerja termoeletrik generator (Cekdin, Nawawi, and Faizal 2020).

Generator termoelektrik adalah perangkat yang mengubah energi panas menjadi listrik berdasarkan efek *Seebeck*, yang pertama kali ditemukan oleh Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821. Dalam eksperimennya, *Seebeck* menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian dan menempatkan jarum kompas di antara kedua logam tersebut. Ketika salah satu sisi dipanaskan, jarum kompas bergerak, menunjukkan adanya aliran listrik yang menciptakan medan magnet. Fenomena ini dikenal sebagai efek *Seebeck*.

Efek *Seebeck* terjadi ketika dua bahan berbeda disambungkan dan dipertahankan pada suhu yang berbeda, menghasilkan perbedaan potensial listrik. Prinsip ini menjadi dasar bagi pengembangan teknologi termoelektrik, yang memungkinkan konversi langsung dari perbedaan temperatur menjadi energi listrik. Gambar 2.2 di bawah ini menggambarkan prinsip kerja efek *Seebeck* dalam generator termoelektrik sebagai berikut.

Generator termoelektrik (TEG) berfungsi sebagai pembangkit listrik yang memanfaatkan efek *Seebeck*, yang pertama kali diidentifikasi oleh Thomas Johann *Seebeck* pada tahun 1821. Dalam eksperimennya, *Seebeck* menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian, dengan jarum kompas diletakkan di antara kedua logam tersebut. Ketika salah satu sisi dipanaskan, jarum kompas bergerak, menunjukkan adanya aliran listrik yang menciptakan medan magnet. Fenomena ini dikenal sebagai efek *Seebeck*.

Struktur TEG terdiri dari elemen semikonduktor tipe-n (yang memiliki kelebihan elektron) dan tipe-p (yang kekurangan elektron). Ketika panas diterapkan pada satu sisi dan dibuang dari sisi lainnya, perbedaan temperatur ini menghasilkan

tegangan yang mengalir melalui sambungan termoelektrik. Besar tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradien temperatur (Cekdin, Nawawi, and Faizal 2020).

Modul termoelektrik adalah sirkuit terintegrasi berbentuk solid yang memanfaatkan tiga prinsip termodinamika: efek *Seebeck*, *Peltier*, dan *Thomson* (Cekdin, Nawawi, and Faizal 2020). Konstruksinya melibatkan pasangan material semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang membentuk termokopel, disusun dalam bentuk sandwich antara dua wafer keramik tipis. Modul ini dapat menghasilkan panas dan dingin di masing-masing sisinya saat arus listrik diterapkan, sehingga sering digunakan dalam sistem pendingin seperti kotak pendingin vaksin atau untuk menghasilkan listrik dengan memanfaatkan perbedaan temperature (Putra et al. 2009).

Untuk meningkatkan efisiensi modul tersebut, *heat sink* digunakan untuk mempercepat pelepasan kalor pada sisi dingin. Potensi pembangkitan daya dari modul termoelektrik bervariasi tergantung pada ukuran, konstruksi, dan perbedaan temperatur. Semakin besar perbedaan suhu antara sisi panas dan dingin, semakin tinggi tegangan dan arus yang dihasilkan. Modul-modul termoelektrik juga dapat disambungkan secara seri atau paralel seperti baterai untuk meningkatkan tegangan atau arus listrik. Setiap modul mampu menghasilkan tegangan rata-rata 1-2V DC, bahkan mencapai 5V DC tergantung pada variasi delta temperaturnya, tetapi umumnya satu modul termoelektrik menghasilkan 1,5-2V DC (Putra et al. 2009)

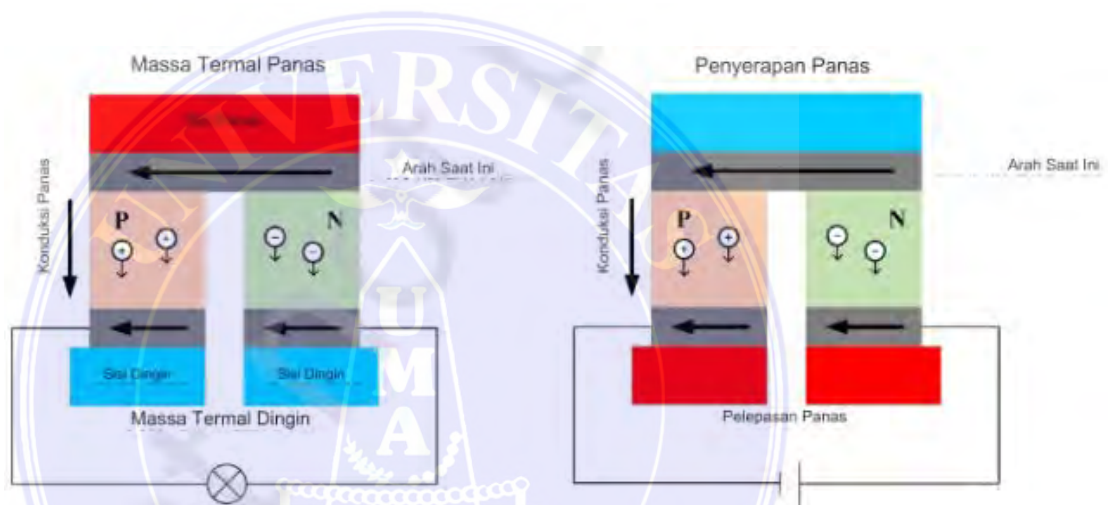
2.1.2. Efek-efek Termoelektrik

1. Efek *seebeck*

Prinsip kerja termoelektrik berlandaskan pada efek *Seebeck*, yang terjadi ketika dua logam berbeda disambungkan dan salah satu ujungnya dipanaskan, sehingga menciptakan perbedaan tegangan antara kedua ujung tersebut. Teknologi ini mengubah energi panas menjadi listrik melalui *Thermoelectric Generator* (TEG) atau sebaliknya, menghasilkan dingin dengan *Thermoelectric Cooler* (TEC). Untuk memproduksi listrik, material termoelektrik disusun dalam rangkaian yang menghubungkan sumber panas dan dingin, memungkinkan listrik dihasilkan sesuai dengan jenis material yang digunakan. Semakin besar perbedaan suhu di antara sambungan, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan. Dengan memanfaatkan prinsip ini, teknologi termoelektrik memberikan solusi inovatif untuk pembangkitan energi dan pendinginan tanpa memerlukan komponen bergerak atau refrigeran.

Sistem pendingin termoelektrik beroperasi dengan cara yang serupa. Ketika material termoelektrik dialiri arus listrik, panas dari lingkungan sekitar akan diserap, sehingga mendinginkan udara tanpa memerlukan kompresor seperti pada mesin pendingin konvensional. Efek *Seebeck* pertama kali ditemukan oleh Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821, saat ia meneliti fenomena yang menghasilkan tenaga listrik antara dua semikonduktor ketika terdapat perbedaan suhu, ia dapat mengubah energi termal menjadi energi listrik pada tahun 1821 dengan efisiensi sekitar 3% yang sangat sebanding dengan mesin uap paling efisien pada saat itu (M.Rowe 1995) . Dalam proses ini, panas dipindahkan ke satu sisi sambungan dan

ditolak dari sisi lainnya, menghasilkan arus listrik yang sebanding dengan gradien suhu antara sisi panas dan dingin. Tidak ada energi yang menghambat proses konversi ini, sehingga pembangkit listrik termoelektrik dapat dikategorikan sebagai sistem konversi daya langsung. Efek *Seebeck* muncul ketika terdapat perbedaan suhu di antara dua ujung logam yang disambungkan, menghasilkan beda potensial di antara keduanya. Fenomena ini dimanfaatkan dalam aplikasi termokopel, yang prinsip kerjanya dapat dilihat pada gambar yang relevan.



Gambar 2.3. Efek Seebeck (Liao et al. 2024).

Koefisien *Seebeck* menjelaskan bahwa ketika termokopel dipanaskan, semikonduktor yang kaya elektron memiliki koefisien *Seebeck* bertanda negatif, sedangkan semikonduktor yang kekurangan elektron menunjukkan koefisien *Seebeck* bertanda positif. Dengan demikian, setiap logam memiliki nilai koefisien *Seebeck* yang bisa positif atau negatif. Nilai koefisien *Seebeck* ini bergantung pada perbedaan suhu, dan tegangan yang dihasilkan juga tergantung pada nilai koefisien *Seebeck* serta perbedaan temperatur. Semakin besar perbedaan suhu antara dua

ujung logam, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan, menciptakan arus listrik yang sebanding dengan gradien suhu tersebut.

Perbedaan tegangan dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$V = S \times \Delta T \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

V = Tegangan (V)

S = Koefisien Seebeck (V/K)

ΔT = Perbedaan Temperatur panas dan dingin (K)

Dan Koefisien seebeck dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$S = V \Delta T \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

S = Koefisien Seebeck (V/K)

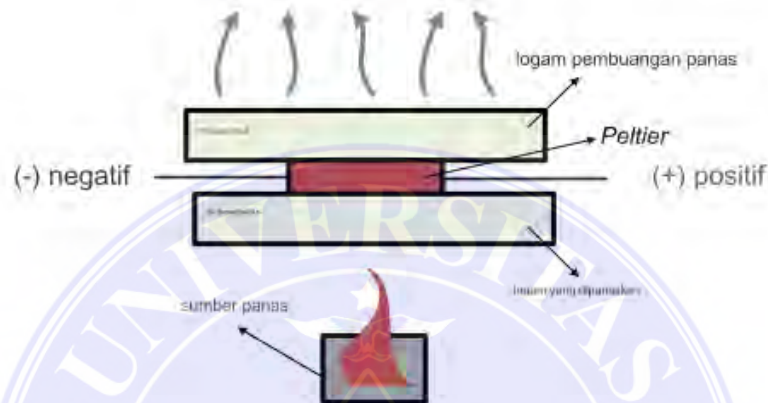
V = Tegangan (V)

ΔT = Perbedaan Temperatur panas dan dingin (K)

2. Efek Peltier

Kegunaan efek *Seebeck* menjadi dasar bagi efek Peltier, yang merupakan fenomena termoelektrik. Dalam hal ini, efek Peltier menggambarkan proses di mana energi panas diserap oleh satu sambungan konduktor dan dilepaskan pada

sambungan konduktor lainnya ketika arus listrik dialirkan dalam rangkaian tertutup. Dengan kata lain, efek Peltier mampu mengubah energi listrik menjadi perubahan suhu. Penemuan efek ini dilakukan oleh Jean Peltier, seorang peneliti asal Prancis, pada tahun 1834.



Gambar 2.4. Efek Peltier (Rowe, David Michael, 2018).

Rumus yang digunakan untuk menghitung efek Peltier adalah sebagai berikut:

$$Q_C \text{ atau } Q_h = \alpha_{pn} \cdot T \cdot I \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

Q_C = Panas Pada Terminal Dingin (W)

Q_h = Panas Pada Terminal Panas

α_{pn} = Koefisien Seebeck (V/K)

T = Temperatur (K)

I = Arus Listrik (A)

3. Efek Thompson

Dalam logam seperti seng dan tembaga, ketika ujung panas berada pada potensial yang lebih tinggi dan ujung dingin pada potensial yang lebih rendah, arus listrik yang mengalir dari ujung panas ke ujung dingin bergerak dari potensial rendah ke potensial tinggi, sehingga menghasilkan emisi panas. Fenomena ini dikenal sebagai efek Thomson positif. Sebaliknya, dalam logam seperti kobalt, nikel, dan besi, di mana ujung dingin berada pada potensial yang lebih tinggi dan ujung panas pada potensial yang lebih rendah, arus yang bergerak dari potensial rendah ke tinggi akan menyebabkan penyerapan panas. Efek *Seebeck* merupakan kombinasi dari efek Peltier dan efek Thomson.

Adapun Rumus yang digunakan untuk menghitung efek peltier tersebut adalah sebagai berikut:

$$Q_t = \mu \cdot I \cdot \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

Q_t = Panas thomson (W/cm)

μ = Koefesien thomson (V/K)

dT/dx = Gardien temperatur semikonduktor

I = Arus listrik yang mengalir (A)

4. Efek Joule

Perpindahan panas dari sisi dalam pendingin ke sisi luar akan menyebabkan timbulnya arus listrik dalam rangkaian tersebut akibat efek *Seebeck*, yang dikenal sebagai efek Joule. Dalam hal ini, sesuai dengan hukum Ohm, arus listrik yang mengalir akan menghasilkan panas. Ketika arus bergerak melalui konduktor, energi listrik yang dihasilkan akan terkonversi menjadi energi panas, mengindikasikan bahwa ada hubungan langsung antara arus yang mengalir dan jumlah panas yang dihasilkan. Efek Joule ini menunjukkan bahwa setiap kali arus listrik mengalir melalui suatu hambatan, energi akan hilang dalam bentuk panas, sehingga mempengaruhi efisiensi sistem pendingin.

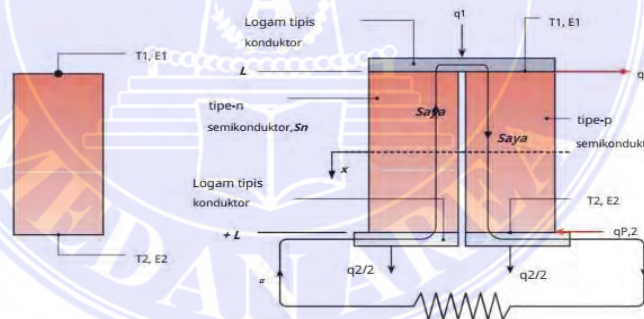
2.1.3. Pembangkit Listrik Termoelektrik

Elemen generator termoelektrik memiliki dua sisi, di mana satu sisi berfungsi sebagai bagian panas dan sisi lainnya sebagai bagian dingin. Teknologi termoelektrik beroperasi dengan cara mengonversi energi panas menjadi energi listrik secara langsung melalui generator termoelektrik, atau sebaliknya, mengubah energi listrik menjadi dingin melalui pendingin termoelektrik. Untuk menghasilkan listrik, material termoelektrik cukup diletakkan dalam rangkaian yang menghubungkan sumber panas dan dingin, sehingga menghasilkan sejumlah listrik yang sesuai dengan jenis bahan yang digunakan. Proses kerja pendingin termoelektrik tidak jauh berbeda. Ketika material termoelektrik dialiri listrik, panas dari lingkungan sekitar akan terserap, sehingga memungkinkan mendinginkan udara tanpa memerlukan kompresor seperti pada mesin pendingin konvensional. Dengan memanfaatkan prinsip dasar yang dikenal sebagai efek *Seebeck*, yaitu

bahwa perbedaan suhu antara dua titik dalam suatu bahan dapat menghasilkan gradien tegangan, teknologi ini menawarkan solusi untuk memanfaatkan energi terbuang. Efek *Seebeck* menyatakan bahwa ketika terdapat gradien suhu dalam suatu material, akan terjadi perbedaan tegangan yang diinduksi.

$$(E_1 - E_2) = S (T_1 - T_2) \dots\dots\dots (2.5)$$

Bahan penghantar listrik dapat memiliki nilai koefisien *Seebeck* yang positif atau negatif, tergantung pada cara mereka mendistribusikan elektron. Koefisien *Seebeck* cenderung sangat kecil pada logam, tetapi dapat mencapai nilai yang relatif besar pada beberapa jenis semikonduktor. Ketika bahan tersebut dihubungkan dalam rangkaian listrik, perbedaan tegangan yang dihasilkan oleh efek *Seebeck* dapat mengalirkan arus listrik I , sehingga memungkinkan produksi tenaga listrik dari limbah panas yang menciptakan perbedaan suhu di seluruh material.



Gambar 2.5. Fenomena Thermoelectric (L et al. 2019).

Rangkaian termoelektrik yang disederhanakan terdiri dari dua pelet bahan semikonduktor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Dengan menambahkan sejumlah kecil elemen sekunder ke dalam bahan pelet, arah arus yang dihasilkan oleh efek *Seebeck* dapat dimodifikasi. Proses ini menghasilkan semikonduktor tipe p dan n, yang masing-masing elemen ditandai dengan koefisien *Seebeck* yang

positif dan negatif, yang dapat disusun sesuai dengan ilustrasi (gambar) yang ada diatas. Energi panas diberikan di bagian atas dan dilepaskan dari bagian bawah rakitan. Selain itu, konduktor logam tipis menghubungkan semikonduktor ke beban eksternal, yang diwakili oleh resistansi listrik, R_e . Pada akhirnya, jumlah daya listrik yang dihasilkan ditentukan oleh laju perpindahan panas ke dan dari pasangan pelet semikonduktor.

Efek termoelektrik tidak hanya menginduksi arus listrik I , tetapi juga menyebabkan pembangkitan atau penyerapan panas di antarmuka antara dua bahan yang berbeda. Fenomena ini, yang dikenal sebagai efek Peltier, melibatkan penyerapan panas q_P yang terkait dengan koefisien *Seebeck* dari bahan-bahan tersebut melalui persamaan tertentu. Dalam ekspresi tersebut, koefisien *Seebeck* individu, S_p dan S_n , masing-masing merujuk pada semikonduktor tipe P dan N, sedangkan koefisien *Seebeck* diferensial dinyatakan sebagai $S_{p-n} = S_p - S_n$. Suhu diukur dalam Kelvin.

Penyerapan panas bersifat positif (atau pembangkitan negatif) ketika arus listrik mengalir dari semikonduktor tipe N ke tipe P. Dengan demikian, penyerapan panas Peltier terjadi pada antarmuka hangat antara pelet semikonduktor dan konduktor logam tipis di bagian atas, sedangkan pembangkitan panas Peltier terjadi pada antarmuka dingin antara pelet dan konduktor di bagian bawah. Ketika $T_1 > T_2$, laju perpindahan panas ke dan dari perangkat, masing-masing q_1 dan q_2 , dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan energi yang relevan. Untuk kondisi *steady-state*, analisis konduksi satu dimensi menghasilkan hasil sebagai berikut.

Dengan asumsi bahwa konektor logam tipis memiliki konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, disipasi Ohmik terjadi secara eksklusif di dalam pelet semikonduktor, yang masing-masing memiliki luas penampang $A_{e,s}$. Resistansi termal dari konduktor logam dianggap dapat diabaikan, begitu pula dengan perpindahan panas dalam gas yang terperangkap di antara pelet semikonduktor.

Hambatan listrik dari masing-masing pelat dapat dinyatakan sebagai $R_{e,s} = \rho_{e,s} (2L) / A_{e,s}$, di mana $\rho_{e,s}$ adalah resistivitas listrik dari bahan semikonduktor. Persamaan ini dapat digunakan untuk menentukan laju pembangkitan volumetrik yang seragam dalam setiap pelat.

$$q = \frac{I^2 \rho_{e,s}}{A^2_{c,s}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan mengasumsikan bahwa resistansi kontak dapat diabaikan dan sifat termofisik dari kedua pelat adalah identik serta konstan kecuali untuk koefisien *Seebeck* S_p dan S_n kita dapat menyusun ekspresi untuk konduksi panas yang masuk dan keluar dari bahan semikonduktor.

$$q(x = L) = 2A_{c,s} \left[\frac{k_s}{2L} (T_1 - T_2) + \frac{I^2 \rho_{e,s} L}{A^2_{c,s}} \right] \dots \dots \dots (2.7)$$

$$q(x = -L) = 2A_{c,s} \left[\frac{k_s}{2L} (T_1 - T_2) + \frac{I^2 \rho_{e,s} L}{A^2_{c,s}} \right] \dots \dots \dots (2.8)$$

Faktor 2 di luar tanda kurung berkontribusi pada perpindahan panas di kedua pelat, sehingga dapat dinyatakan bahwa $q(x, L) = q(-x, L)$. Karena adanya efek Peltier, nilai q_1 dan q_2 tidak sama dengan laju perpindahan panas yang masuk dan keluar dari pelat, seperti yang dinyatakan dalam Persamaan 2.7. Dengan menggabungkan Persamaan 2.8 ke dalam keseimbangan energi untuk permukaan

kontrol di antarmuka antara konduktor logam tipis dan bahan semikonduktor pada hasil titik x L

$$q_1 = q(x = -L) + q_{p,1} = q(x = -L) + IS_{p-n} T_1 \dots\dots\dots (2.9)$$

Demikian pula pada x = L,

$$q_2 = q(x = -L) - IS_{n-p} T_2 = q(x = L) + IS_{p-n} T_2 \dots\dots\dots (2.10)$$

Menggabungkan Persamaan diatas menghasilkan,

$$q_1 = \frac{A_{c,s} K_s}{L} (T_1 - T_2) + IS_{p-n} T_1 - 2 \frac{I^2 \rho_{e,s} L}{A_{c,s}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Demikian Pula, menggabungkannya memberikan persamaan baru

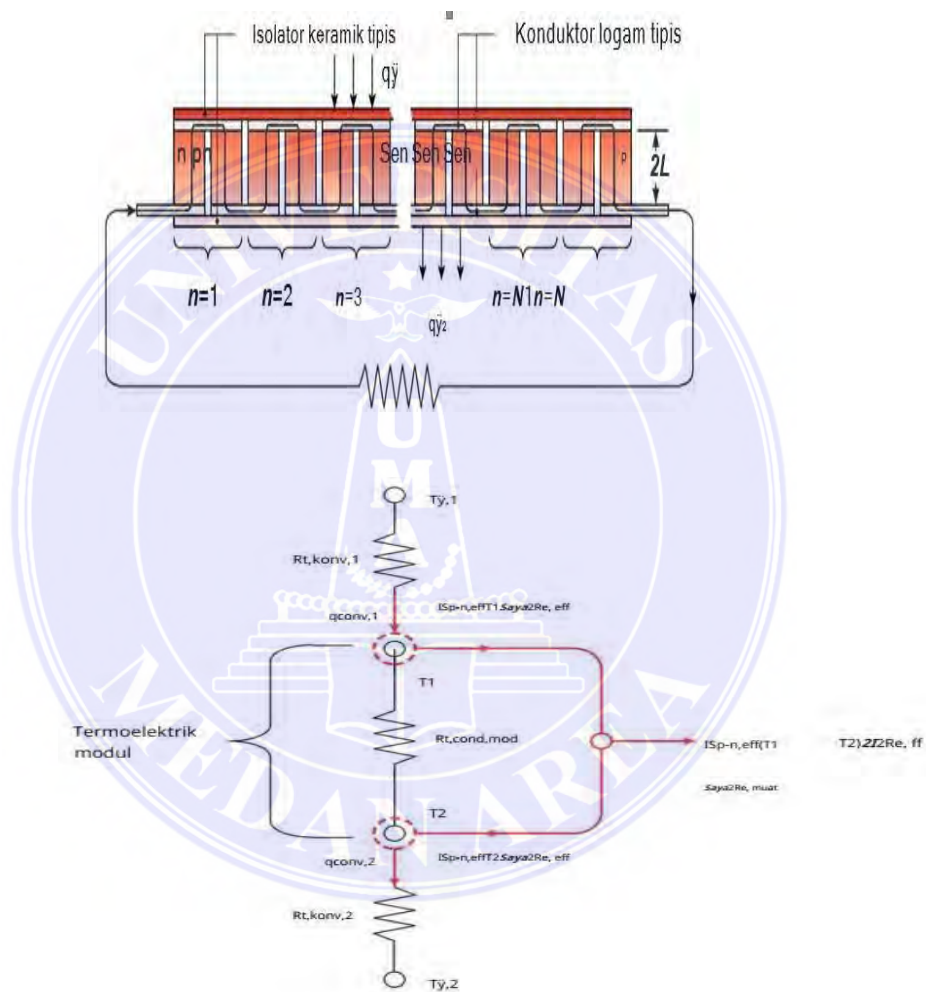
$$q_2 = \frac{A_{c,s} k_s}{L} (T_1 - T_2) + IS_{p-n} T_2 + 2 \frac{I^2 \rho_{e,s} L}{A_{c,s}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dari neraca energy keseluruhan pada perangkat termoelektrik, dihasilkan daya listrik oleh efek *seebeck* adalah

$$P = q_1 - q_2 \dots\dots\dots (2.13)$$

Perbedaan tegangan yang dihasilkan oleh efek Seebeck untuk sepasang pelat semikonduktor tunggal tergolong kecil. Untuk meningkatkan perbedaan tegangan ini, modul termoelektrik dirancang, seperti yang ditunjukkan secara skematis, di mana N1 pasang pelat semikonduktor dihubungkan secara seri. Sebuah lapisan tipis bahan dielektrik, umumnya keramik, mengapit modul tersebut untuk memberikan kekakuan struktural serta isolasi listrik dari lingkungan sekitarnya.

Material semikonduktor memainkan peran penting dalam aplikasi termoelektrik sebagai pengubah energi panas menjadi energi listrik. Terdapat dua jenis material semikonduktor: tipe P dan tipe N. Material semikonduktor dianggap tipe P jika memiliki pembawa muatan positif, sedangkan tipe N jika memiliki pembawa muatan negatif (Han et al. 2017).



Gambar 2.6. Modul Termoelektrik (L et al. 2019).

Efek termoelektrik merupakan proses konversi langsung antara energi panas dan energi listrik, yang terjadi sebagai akibat dari perbedaan sifat suatu material. Generator termoelektrik terbuat dari bahan semikonduktor yang terdiri dari tipe P dan tipe N. Material tipe P adalah jenis material yang memiliki kekurangan

elektron, sedangkan tipe N adalah material yang memiliki kelebihan elektron. Resistensi termal pada lapisan keramik tipis dapat dianggap tidak signifikan. Oleh karena itu, nilai q_1 , q_2 , dan total daya listrik modul, PN, dapat dinyatakan dengan melakukan modifikasi pada persamaan sebagai berikut.

$$q_1 = \frac{1}{R_{t,cond,mod}} (T_1 - T_2) + IS_{p-n,eff}T_1 - I^2 R_{e,eff} \dots (2.14)$$

$$q_1 = \frac{1}{R_{t,cond,mod}} (T_1 - T_2) + IS_{p-n,eff}T_2 - I^2 R_{e,eff} \dots (2.15)$$

$$P_N = q_1 - q_2 = IS_{p-n,eff}(T_1 - T_2) - 2I^2 R_{e,eff} \dots (2.16)$$

Koefisien Seebeck yang efektif dan total hambatan listrik internal modul, yang dinyatakan sebagai $S_{p-n,eff} = NS_{p-n}$, dan $R_{e,eff} = NR_{e,s}$, menunjukkan bahwa resistansi konduksi terkait dengan matriks semikonduktor p-n modul dapat diwakili oleh $R_{t,cond,mod} = L / NA_s K_s$. Untuk modul termoelektrik yang mengalami pemanasan dan pendinginan secara konvektif, sirkuit termal yang setara dapat diterapkan. Jika pemanasan atau pendinginan dilakukan melalui radiasi atau konduksi, jaringan resistansi di luar bagian modul termoelektrik akan mengalami penyesuaian sesuai dengan metode tersebut. Kembali ke rangkaian termoelektrik tunggal, efisiensi didefinisikan sebagai $TE = P/q_1$. Dari persamaan ini, terlihat bahwa efisiensi memiliki ketergantungan kompleks terhadap arus listrik. Namun, efisiensi dapat dioptimalkan dengan mengatur arus melalui perubahan resistansi beban. Nilai maksimum efisiensi yang dicapai dapat dinyatakan sebagai berikut:

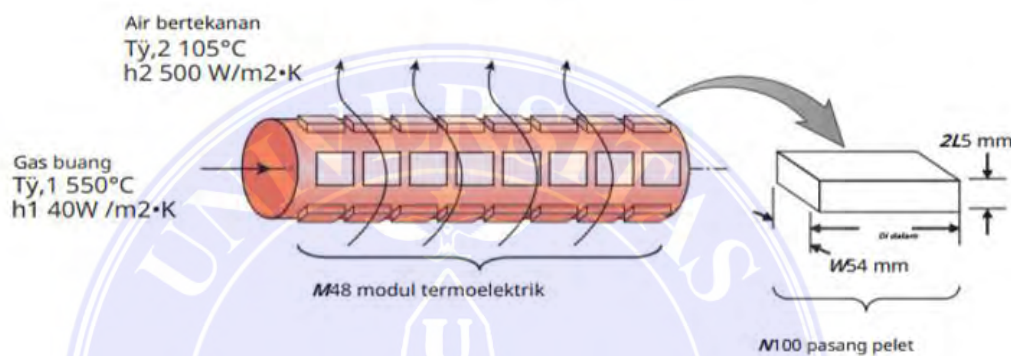
$$\eta_{TE} = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT} + T_2/T_1} \dots (2.17)$$

Karena efisiensi meningkat seiring dengan bertambahnya nilai ZT , ZT dapat dianggap sebagai ukuran tanpa dimensi yang berkaitan dengan pembangkitan termoelektrik. Seperti yang dijelaskan dalam bagian tentang efisiensi Carnot, efisiensi termoelektrik tidak dapat ditentukan hingga suhu panas dan dingin yang relevan dihitung melalui analisis perpindahan panas. ZT didefinisikan berdasarkan hubungan antara konduktivitas listrik dan termal, sehingga penelitian mendalam sedang dilakukan untuk mengoptimalkan sifat-sifat pelat semikonduktor. Ini terutama dilakukan dengan memanipulasi struktur nano bahan untuk secara terpisah mengontrol pergerakan fonon dan elektron, serta memengaruhi konduktivitas termal dan listrik material tersebut.

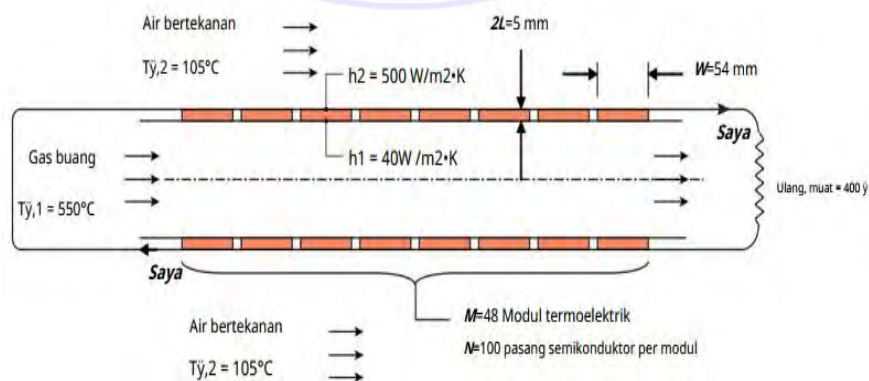
Nilai ZT saat ini dapat mencapai sekitar satu pada suhu kamar dengan relatif mudah. Selain itu, penting untuk dicatat bahwa modul termoelektrik dapat beroperasi secara terbalik. Dengan memberikan daya listrik ke modul, kita dapat mengatur laju perpindahan panas menuju atau dari permukaan keramik luar. Jenis pendingin atau pemanas termoelektrik ini digunakan dalam berbagai aplikasi. Terdapat diskusi mendalam mengenai pemodelan perpindahan panas satu dimensi dan kondisi stabil yang berkaitan dengan modul pemanas dan pendingin termoelektrik.

Susunan modul termoelektrik $M = 48$ dipasang pada knalpot mobil sport. Setiap modul memiliki koefisien *Seebeck* yang efektif dari $S_{p-n,eff} = 0,1435 \text{ V/K}$, dan hambatan listrik internal $R_{e,eff} = 4 \Omega$. Selain itu, setiap modul memiliki lebar dan panjang $W = 54 \text{ mm}$ dan berisi $N = 100$ pasang pelet semikonduktor. Setiap pelet memiliki panjang keseluruhan $2L = 5 \text{ mm}$ dan luas penampang $A_{cs} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

dan ditandai dengan konduktivitas termal $K_s = 1,2 \text{ W/m.K}$. Sisi panas setiap modul terkena gas buang pada $T_{\infty,1} = 550^\circ\text{C}$ dengan $h_1 = 40 \text{ W/m}^2\text{.K}$, sedangkan sisi berlawanan dari setiap modul didinginkan oleh air bertekanan pada $T_{\infty,2} = 105^\circ\text{C}$ dengan $h_2 = 500 \text{ W/m}^2\text{.K}$. Jika modul disambungkan secara seri, dan resistansi beban adalah beban, $R_{e,\text{load}} = 400 \Omega$, Berapa daya listrik yang dihasilkan dari gas buang panas? (L et al. 2019)



Diketahui sifat dimensi dan modul thermoelektrik, jumlah pasangan semikonduktor setiap modul dan jumlah modul pada susunan. Temperatur gas buang dan air bertekanan serta koefisien konveksi pada permukaan modul panas dan dingin. Modul dihubungkan secara seri, dan hambatan listrik dari beban diketahui. Daya Dihasilkan oleh susunan modul adalah



Gambar 2. 7. Susunan Modul TEG (L et al. 2019)

Asumsi

1. Kondisi stabil.
2. Perpindahan panas satu dimensi.
3. Sifat konstan.
4. Resistensi kontak listrik dan termal dapat diabaikan.
5. Pertukaran radiasi yang dapat diabaikan dan perpindahan panas yang dapat diabaikan dalam gas didalam modul.
6. Resistensi konduksi yang dapat diabaikan yang ditimbulkan oleh kontak logam dan isolator keramik modul.

Analisis:

Menganalisis satu modul. Resistansi konduksi dari setiap susunan semikonduktor modul adalah

$$R_{t,cond,mod} = \frac{L}{NA_{c,s} K_s} = \frac{1,2 \times 10^{-3} \text{ m}}{100 \times 1,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \times 1,2 \frac{\text{W}}{\text{m.k}}} = 1,736 \text{ K/W}$$

Dari persamaan 2.14,

$$q_1 = \frac{1}{R_{t,cond,mod}} (T_1 - T_2) + IS_{p-n,eff} T_1 - I^2 R_{e,eff} = \frac{(T_1 - T_2)}{1,736 \frac{\text{K}}{\text{W}}} + 1 \times 0,1435 \frac{\text{V}}{\text{K}} \times T_1 - I^2 \times 4 \Omega$$

Sedangkan dari persamaan 2.15,

$$q_1 = \frac{1}{R_{t,cond,mod}} (T_1 - T_2) + IS_{p-n,eff} T_2 - I^2 R_{e,eff} = \frac{(T_1 - T_2)}{1,736 \frac{\text{K}}{\text{W}}} + 1 \times 0,1435 \frac{\text{V}}{\text{K}} \times T_2 - I^2 \times 4 \Omega$$

Pada permukaan yang panas hokum pendinginan Newton dapat ditulis sebagai,

$$q_1 = h_1 W^2 (T_{\infty,1} - T_1) = 40 \text{ W/m}^2.\text{K} \times (0,054 \text{ m})^2 [(550 + 273) - T_1]$$

Sedangkan pada permukaan yang dingin,

$$q_2 = h_2 W^2 (T_{\infty,2} - T_2) = 500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times (0,054 \text{ m})^2 [T_2 - (105 + 273) \text{ K}]$$

Empat persamaan telah ditulis meliputi lima yang tidak diketahui q_1 , q_2 , T_1 , T_2 dan I . Sebuah persamaan tambahan diperoleh dari rangkaian listrik. Dengan modul yang dirangkai dengan seri, daya listrik total yang dihasilkan oleh semua modul $M = 48$ sama dengan daya listrik yang diamburkan dalam tahapan beban.

$$P_{\text{tot}} = MP_N = M[IS_{p-n,\text{eff}}(T_1 - T_2)R_{e,\text{eff}}] = 48[I \times 0,1435 \frac{\text{V}}{\text{K}} \times (T_1 - T_2) - 2I^2 \times 4 \Omega]$$

Karena daya listrik yang dihasilkan oleh modul thermoelektrik diamburkan dalam beban listrik, maka hal itu akan menjadi

$$P_{\text{tot}} = I^2 R_{\text{load}} = I^2 \times 400 \Omega$$

Persamaan 1 sampai 6 dapat diselesaikan secara bersamaan, menghasilkan $P_{\text{tot}} = 46,9 \text{ W}$

Pengamatan:

1. Persamaan 1 sampai 5 dapat dengan mudah ditulis dengan memeriksa rangkaian termal ekuivalen Gambar 2.5.
2. Suhu permukaan modul masing-masing adalah $T_1 = 173 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $T_2 = 134 \text{ }^\circ\text{C}$. Jika suhu permukaan ini ditentukan dalam pernyataan masalah, daya listrik dapat diperoleh langsung dari Persamaan 5 dan 6. Namun, dalam

setiap desain praktis generator termoelektrik, analisis perpindahan panas harus dilakukan untuk menentukan daya yang dihasilkan.

3. Pembangkit listrik sangat sensitif terhadap ketahanan perpindahan panas konveksi. Untuk $h_1 = h_2 \rightarrow \infty$, $P_{\text{tot}} = 5900 \text{ W}$. Untuk mengurangi hambatan termal antara modul dan aliran fluida, heat sink bersirip sering digunakan untuk meningkatkan perbedaan suhu di seluruh modul dan, pada gilirannya, meningkatkan output dayanya. Manajemen dan desain termal yang baik sangat penting untuk memaksimalkan pembangkit listrik.
4. Memanen energi panas yang terkandung dalam knalpot dengan termoelektrik dapat menghilangkan kebutuhan akan alternator, menghasilkan peningkatan daya bersih yang dihasilkan oleh mesin, pengurangan berat mobil, dan peningkatan jarak tempuh gas hingga 10%.
5. Modul termoelektrik, yang beroperasi dalam mode pemanasan, dapat tertanam di kursi mobil dan ditenagai oleh pemanen knalpot termoelektrik, mengurangi biaya energi yang terkait dengan pemanasan seluruh kabin penumpang. Modul kursi juga dapat dioperasikan dalam mode pendinginan, berpotensi menghilangkan kebutuhan akan AC kompresi uap. Refrigeran umum, seperti R134a, adalah gas rumah kaca yang berbahaya, dan dipancarkan ke atmosfer oleh kebocoran melalui segel dan koneksi, dan oleh kebocoran bencana karena tabrakan. Mengganti AC kompresi uap mobil dengan pendingin kursi termoelektrik yang dipersonalisasi dapat menghilangkan setara dengan 45 juta metrik ton CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer setiap tahun di Amerika Serikat saja (L et al. 2019).

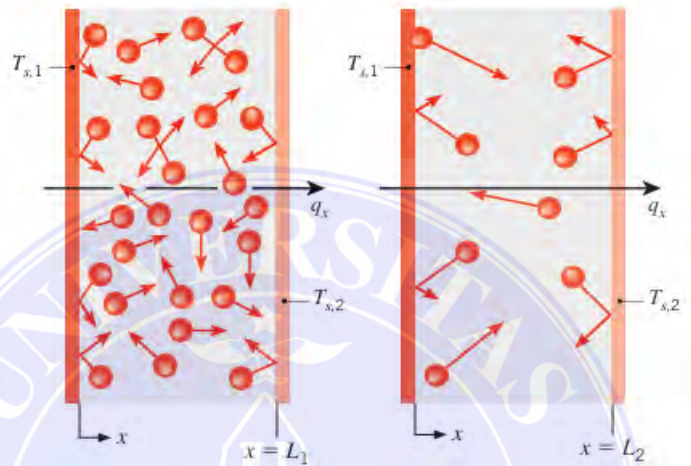
2.1.4. Konduksi Melalui Lapisan Gas Tipis

Lintasan sesaat molekul gas antara dua permukaan padat isothermal yang terpisah sejauh L dapat dianalisis. Meskipun tidak ada aliran fluida yang signifikan, molekul individu secara terus-menerus bertabrakan dengan kedua permukaan padat, yang masing-masing memiliki suhu permukaan seragam $T_{s,1}$ dan $T_{s,2}$. Molekul gas juga saling bertabrakan, bertukar energi di dalam medium gas. Ketika ketebalan lapisan gas cukup besar, molekul tertentu cenderung lebih sering berinteraksi dengan molekul gas lainnya dibandingkan dengan tabrakan dengan salah satu permukaan padat. Sebaliknya, pada lapisan gas yang sangat tipis, kemungkinan sebuah molekul untuk menabrak salah satu permukaan padat jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kemungkinannya untuk bertabrakan dengan molekul lain.

Energi yang terkandung dalam molekul gas berkaitan dengan energi kinetik translasi, rotasi, dan vibrasinya. Energi kinetik pada tingkat molekuler ini pada akhirnya menentukan suhu gas, sementara tumbukan antar molekul individu memengaruhi nilai konduktivitas termal, seperti yang telah dibahas sebelumnya. Namun, cara molekul gas dipantulkan atau dihamburkan dari dinding padat juga berperan dalam memengaruhi tingkat energi kinetiknya dan suhunya. Oleh karena itu, tumbukan molekul dengan dinding dapat menjadi faktor penting dalam menentukan laju perpindahan panas q_x terutama ketika L/λ_{mfp} menjadi kecil. Tabrakan dan hamburan molekul gas individu dari permukaan padat dapat dijelaskan melalui koefisien akomodasi termal.

$$\alpha_t = \frac{T_i - T_{sc}}{T_i - T_s} \dots\dots\dots (2.18)$$

Di mana T_i adalah suhu molekul efektif sesaat sebelum menabrak permukaan padat, T_{sc} adalah suhu molekul segera setelah dihamburkan atau dipantulkan oleh permukaan, dan T_s adalah suhu permukaan. Ketika suhu molekul yang tersebar sama dengan suhu dinding, kondisi ini dapat diobservasi.



Gambar 2.8. Lintasan Molekul (L et al. 2019).

Untuk konduksi satu dimensi dalam gas ideal yang terletak di antara dua permukaan yang dijaga pada suhu $T_{s,1}$ dan $T_{s,2} < T_{s,1}$ laju perpindahan panas melalui lapisan gas dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$q = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{(R_{t,m-m} + R_{t,m-s})} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana, pada tingkat molekuler, resistensi termal dikaitkan dengan tumbukan molekul-molekul dan molekul permukaan

$$R_{t,m-m} = \frac{L}{kA} \text{ and } R_{t,m-s} = \frac{\lambda_{mfp}}{kA} \left[\frac{2 - \alpha_t}{\alpha_t} \right] \left[\frac{9\lambda - 5}{\gamma + 1} \right] \dots (2.20)$$

Dalam pernyataan sebelumnya, $\lambda = \frac{c_p}{c_v}$ merupakan rasio panas spesifik dari gas ideal. Diasumsikan bahwa dua padatan memiliki sifat yang sama dengan nilai

dan suhu yang identik, yaitu t yang relatif terhadap dinding dingin, $(T_{s,1} - T_{s,2})/T_{s,2}$. Persamaan ini dapat digabungkan untuk menghasilkan.

$$\frac{R_{t,m-s}}{R_{t,m-m}} = \frac{\lambda_{mfp}}{L} \left[\frac{2-\alpha_t}{\alpha_t} \right] \left[\frac{9\gamma-5}{\gamma+1} \right] \dots\dots\dots (2.21)$$

Dari penjelasan sebelumnya, dapat dibuktikan bahwa $R_{t,m-s}$ dapat diabaikan jika L/λ_{mfp} besar dan mendekati nol. Dalam kondisi ini, persamaan dapat disederhanakan menjadi Persamaan 3.6. Namun, $R_{t,m-s}$ bisa menjadi signifikan ketika L/λ_{mfp} kecil. Jalur bebas rata-rata cenderung meningkat seiring dengan penurunan tekanan gas. Oleh karena itu, nilai $R_{t,m-s}$ juga meningkat seiring dengan penurunan tekanan gas, yang berarti laju perpindahan panas dapat dipengaruhi oleh tekanan ketika L/λ_{mfp} kecil.

2.1.5. Konduksi Melalui Film Padat Tipis

Konduksi satu dimensi yang terjadi di sepanjang film padat tipis dibahas dalam konteks konduktivitas termal (k). Laju perpindahan panas melalui film padat tipis dapat didekati dengan menggabungkan persamaan-persamaan yang relevan.

$$q_x = \frac{k_x A}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) = \frac{k[1-\lambda_{mfp}/(3L)]A}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \dots (2.22)$$

Ketika rasio L/λ_{mfp} menjadi besar, persamaan ini dapat direduksi menjadi berbagai ekspresi alternatif untuk konduktivitas termal k_x . Berbagai ekspresi ini tersedia dan telah dibahas secara mendalam dalam literatur.

2.2. Perpindahan Kalor

Ilmu yang mempelajari transfer energi akibat perbedaan suhu antara bahan atau objek disebut sebagai perpindahan kalor. Dari perspektif termodinamika, energi yang ditransfer ini dikenal sebagai kalor. Perpindahan panas tidak hanya mengukur laju transfer panas yang terjadi dalam kondisi tertentu, tetapi juga menjelaskan bagaimana energi panas dipindahkan dari satu objek ke objek lainnya.



Gambar 2. 9. Skema sederhana perpindahan panas.

2.2.1. Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas melalui konduksi terjadi ketika dua benda bersentuhan langsung. Umumnya, perpindahan ini terjadi pada benda padat. Dalam proses ini, energi panas akan berpindah dari area yang lebih panas ke area yang lebih dingin, namun partikel-partikel dalam benda tersebut tidak bergerak bersama dengan energi panas yang ditransfer. Hal ini menyebabkan proses perpindahan panas berlangsung lambat. Setelah membahas konsep konduksi, kita akan melanjutkan dengan pembahasan tentang persamaan yang terkait dengan konduksi:

$$q = -K.A \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(2.23)$$

Untuk menghitung laju aliran energi panas (*heat flux*) dapat dilakukan dengan persamaan:

$$q'' = K \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{k}{L} (T_1 - T_2) \dots\dots\dots(2.24)$$

Untuk menghitung luas permukaan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan bangun ruang, untuk luas permukaan bidang persegi dapat dihitung dengan persamaan:

$$A = P \times L \dots\dots\dots(2.25)$$

Sedangkan luas permukaan bidang selinder dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$A = 2\pi r t \text{ atau } A = \pi d t \dots\dots\dots(2.26)$$

Dimana:

q = Laju perpindahan panas (W)

q'' = Heat Flux (W/m^2)

K = Konduksi termal benda atau material ($73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)

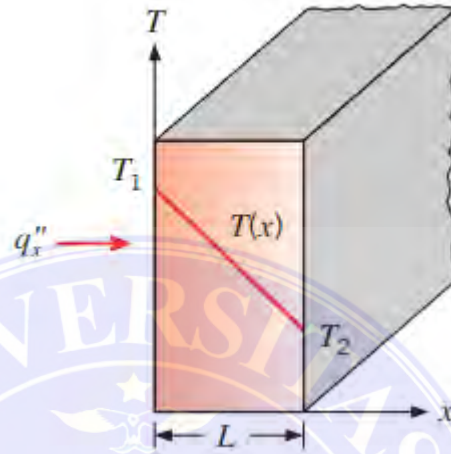
A = Luas penampang pada batang (m^2)

d_T = Perubahan Suhu ($^\circ\text{C}$)

d_x = Ketebalan bahan (m)

T_1 = Temperatur benda yang berbatasan dengan sumber panas ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = Temperatur benda berbatasan dengan udara ($^{\circ}\text{C}$)



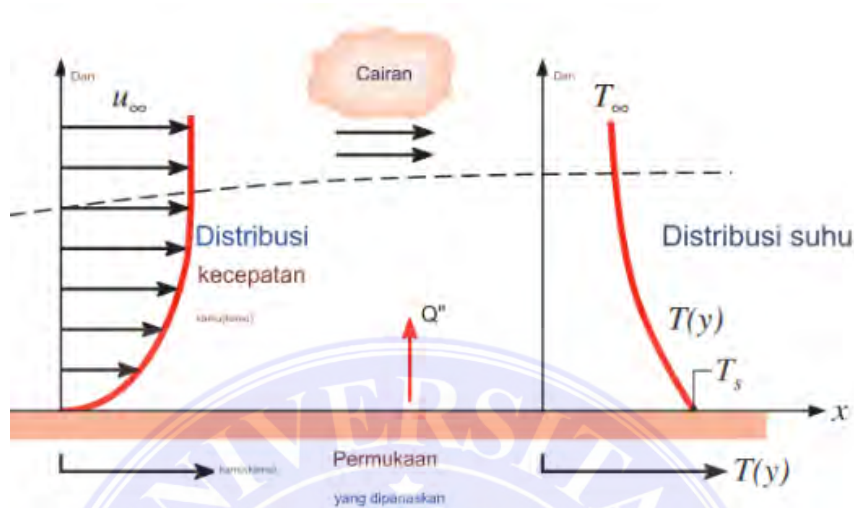
Gambar 2.10. Konduksi (L et al. 2019).

2.2.2. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas yang terjadi melalui konveksi melibatkan gerakan molekul dalam benda tersebut. Gerakan ini memfasilitasi transfer panas. Sebagai contoh, saat air dipanaskan, molekul air yang lebih panas akan bergerak naik ke permukaan, sementara molekul air yang lebih dingin akan turun ke bawah karena memiliki densitas yang lebih tinggi. Konveksi dapat dibagi menjadi dua kategori: konveksi alami dan konveksi paksa.

Konveksi alami terjadi ketika pergerakan fluida disebabkan oleh gaya apung akibat perbedaan densitas atau kerapatan fluida tersebut. Perbedaan kerapatan ini biasanya disebabkan oleh variasi suhu akibat pemanasan. Di sisi lain, pada konveksi paksa, pergerakan fluida dihasilkan oleh gaya eksternal, seperti kipas atau pompa.

Dalam proses perpindahan panas melalui konveksi, hukum pendinginan Newton berlaku, yaitu:



Gambar 2.11. Konveksi (L et al. 2019).

$$q_{conv} = h \cdot A (T_s - T_{\infty}) \dots\dots\dots (2.27)$$

Untuk menghitung laju aliran energi panas (*heat flux*) dapat dilakukan dengan persamaan:

$$q'' = h \cdot \Delta T = h \cdot (T_1 - T_{\infty}) \dots\dots\dots (2.28)$$

Nilai koefisien perpindahan panas konveksi bisa dihitung dengan persamaan berikut:

$$h = 0,664 \times \frac{K}{L} \times Re^{0,5} \times Pr^{0,333} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana persamaan bilangan *Reynold* adalah sebagai berikut:

$$Re = \frac{v \times L}{\mu} \dots\dots\dots (2.30)$$

Dimana:

q_{conv} = Laju perpindahan panas konveksi (W)

h = Konduktivitas termal (W/m.°C)

A = Luas penampang (m²)

T_s = Suhu benda (°C)

T_{∞} = Suhu fluida (°C)

2.2.3. Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas dari benda dengan suhu tinggi ke benda dengan suhu lebih rendah dapat terjadi meskipun kedua benda dipisahkan oleh ruang, termasuk ruang hampa. Proses ini berlangsung berkat fenomena radiasi, yang mirip dengan pancaran sinar dan gelombang elektromagnetik, seperti radiasi yang dihasilkan oleh matahari. Persamaan untuk menghitung perpindahan panas melalui radiasi adalah sebagai berikut:

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (\Delta T^4) \dots\dots\dots (2.31)$$

Dimana:

Q_r = Laju Perpindahan panas radiasi (W)

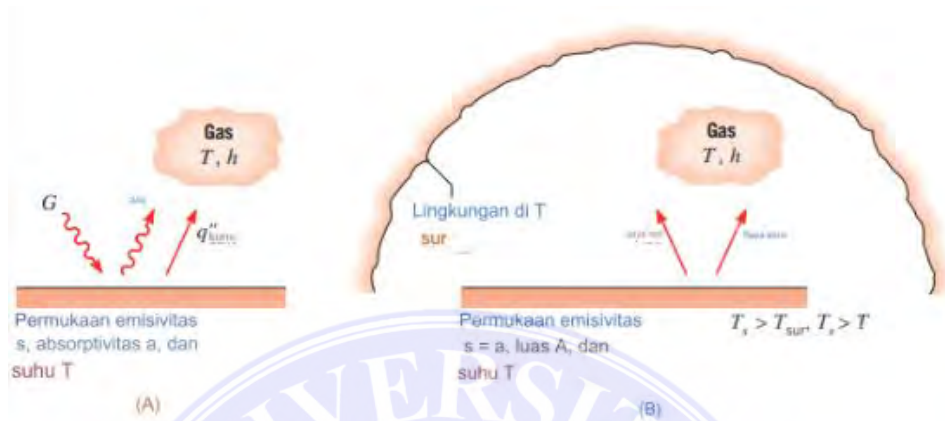
A = Luas penampang bidang (m²)

T = Temperatur (K)

σ = Konstanta Stefan-Boltzman (W/m². K⁴)

ε = Emisivitas bahan ($0 < \varepsilon < 1$)

$\varepsilon = 0$ (benda putih), $\varepsilon = 1$ (benda hitam)



Gambar 2.12. Radiasi (L et al. 2019).

2.2.4. Tahanan Termal

Tahanan termal R merujuk pada ketahanan suatu benda atau sistem terhadap aliran panas yang melintasi batas-batasnya. Tahanan ini dipengaruhi oleh sifat termal medium, termasuk konduktivitas termal.

1. Tahanan termal Konduksi

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{q} = \frac{L}{KA} \dots\dots\dots (2.32)$$

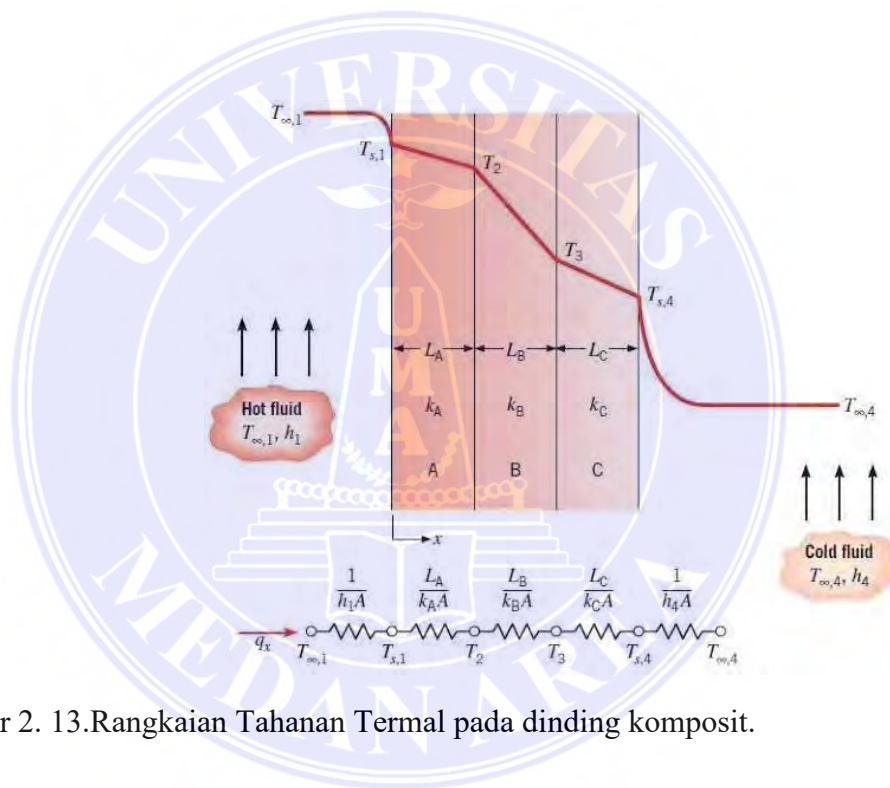
2. Tahanan termal Konveksi

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \dots\dots\dots (2.33)$$

3. Tahanan termal Radiasi

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_{sur}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \dots\dots\dots (2.34)$$

Pada kasus dinding komposit sistem tahanan termal juga digunakan, umumnya dinding komposit melibatkan sejumlah tahanan termal seri dan paralel karena lapisan material yang berbeda (Theodore.LB & AL, 2011). Dilihat pada gambar 2.18 maka laju perpindahan panas dinding komposit dapat dihitung dengan persamaan (2.13)



Gambar 2. 13.Rangkaian Tahanan Termal pada dinding komposit.

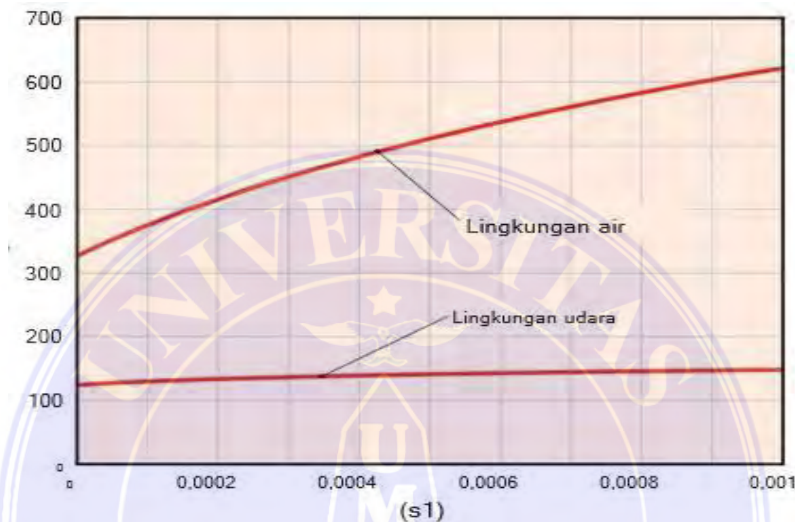
$$q_{total} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 4}}{\left[\left(\frac{1}{h_1 A} \right) + \left(\frac{L}{k_A A} \right) + \left(\frac{L}{k_B A} \right) + \left(\frac{L}{k_C A} \right) + \left(\frac{1}{h_4 A} \right) \right]} \dots\dots\dots (2.35)$$

Dimana:

- q = laju perpindahan panas (W)
 T_s = Temperatur permukaan dinding ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{∞} = Temperatur udara ($^{\circ}\text{C}$)
 k = Konduktivitas termal benda ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
 A = Luas Penampang (m^2)
 h = Koefisien perpindahan panas ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 L = ketebalan material (m)

Mengukur konduktivitas termal jaringan hidup merupakan tantangan yang signifikan. Pertama, karena pengukuran ini sering kali bersifat invasif bagi makhluk hidup, dan kedua, karena sulit untuk secara eksperimental memisahkan efek konduksi panas dari perfusi. Lebih mudah untuk mengukur konduktivitas termal efektif, yang mencakup kontribusi gabungan dari konduksi dan perfusi. Namun, nilai konduktivitas efektif ini sangat tergantung pada laju perfusi, yang bervariasi berdasarkan kondisi lingkungan termal dan fisik spesimen. Perhitungan dapat dilakukan untuk berbagai rentang nilai laju perfusi, dan ketergantungan laju kehilangan panas terhadap laju perfusi ditunjukkan di bawah ini. Efek ini lebih terlihat dalam kondisi lingkungan air, di mana suhu otot lebih rendah, sehingga pengaruh perfusi oleh darah arteri yang hangat menjadi lebih signifikan.

Perhitungan dapat dilakukan kembali untuk berbagai rentang nilai laju perfusi, dan ketergantungan laju kehilangan panas terhadap laju perfusi ditunjukkan di bawah ini. Efek ini lebih signifikan dalam kondisi lingkungan air, di mana suhu lebih rendah, sehingga pengaruh perfusi oleh darah arteri yang hangat menjadi lebih nyata, seperti yang terlihat pada gambar di bawah.



Gambar 2.14. Laju kehilangan panas terhadap laju perfusi (L et al. 2019)

2.3. Simulasi

Simulasi adalah teknik yang digunakan untuk menampilkan atau menciptakan representasi yang menyerupai kondisi nyata. Ini melibatkan penggambaran objek atau proses dalam bentuk model angka atau statistik untuk menganalisis karakteristik suatu objek. Saat ini, penggunaan perangkat lunak simulasi sangat bermanfaat dalam menyelesaikan masalah di sektor industri. Dalam bidang teknik, ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan saat membuat simulasi, termasuk pemilihan perangkat lunak pemodelan yang tepat.

2.3.1. Software Ansys

ANSYS adalah perangkat lunak komputer yang berfungsi untuk mensimulasikan objek dengan mempertimbangkan perambatan panas, pengaruh gaya dan tegangan, serta aliran fluida. ANSYS melakukan analisis terhadap perpindahan panas yang terjadi pada komponen yang terintegrasi dalam pengaturan simulasi.

2.3.2. Langkah-langkah melakukan simulasi

Dalam kegiatan simulasi pemodelan objek, ada beberapa aspek yang perlu diperhatikan untuk mencapai hasil simulasi yang optimal, seperti data objek yang akan diteliti, perangkat yang digunakan dalam proses simulasi, dan faktor lainnya. Secara umum, proses simulasi menggunakan ANSYS Student berbasis Workbench melibatkan beberapa langkah, sebagai berikut:

1. Geometri

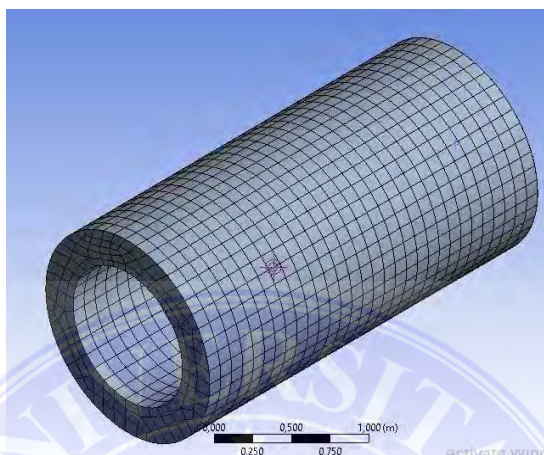
Geometri adalah bagian yang digunakan untuk merancang bentuk objek yang akan dibuat. Gambar yang dihasilkan dapat berupa representasi 2D maupun 3D. (Ismail & AL, 2017).

2. Meshing

Meshing adalah proses yang digunakan untuk membagi model menjadi bagian-bagian kecil dengan tujuan memperoleh hasil analisis yang lebih akurat dan rinci (Ismail & AL, 2017). Dalam pembuatan meshing, terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan, seperti ketelitian mesh, spesifikasi perangkat keras

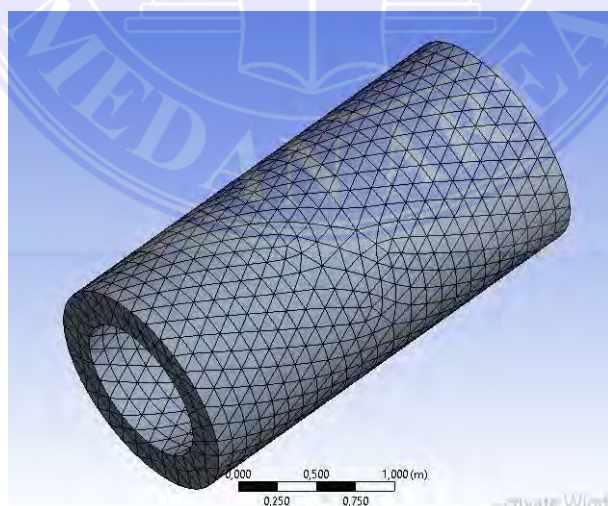
komputer yang digunakan, serta jenis mesh yang akan diterapkan. Berdasarkan hal tersebut, mesh dapat dibedakan menjadi beberapa kategori, yaitu:

1) *Hexahedron*



Gambar 2. 15. Mesh jenis Hexahedron

2) *Tetrahedron*



Gambar 2. 16. Mesh jenis *Tetrahedron*.

Setiap jenis mesh memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Secara umum, mesh jenis Hexahedron unggul dalam efisiensi dan jumlah sisi yang lebih banyak dalam satu sel dibandingkan dengan jenis Tetrahedron. Satu sel mesh Hexahedron memiliki enam sisi, sementara sel mesh Tetrahedron hanya memiliki empat sisi. Selain itu, mesh Hexahedron juga menawarkan kecepatan transfer data yang lebih baik dan visualisasi yang efektif. Namun, kekurangan dari mesh Hexahedron adalah kesulitan dalam membentuk geometri yang kompleks. Di sisi lain, mesh Tetrahedron lebih sering digunakan untuk membuat geometri yang rumit (Wiranata, 2020).

3. *Setup & Solution*

Solution adalah tahap di mana dilakukan pemberian pembebanan, perhitungan, dan pengolahan data simulasi. Pada tahap ini, beban yang diberikan meliputi temperatur dan koefisien perpindahan panas.

4. *Result*

Result adalah tahap terakhir dalam proses simulasi. Pada tahap ini, hasil dari perhitungan dan pengolahan data disajikan dalam bentuk gambar, animasi, dan kurva.

2.4. Model Matematika Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah suatu pendekatan numerik yang digunakan untuk mencari solusi dari masalah diferensial. Metode ini dapat diterapkan pada berbagai masalah di bidang teknik, termasuk mekanika fluida, perpindahan panas, elektromagnetik, getaran, tegangan, dan lain-lain. Dalam penelitian ini, model matematika MEH digunakan untuk menghitung distribusi temperatur dan

membandingkan hasilnya dengan hasil simulasi yang diperoleh melalui perangkat lunak.

2.4.1. Matriks kekakuan elemen perpindahan panas (K)

Analisis Metode Elemen Hingga untuk kasus transfer panas pada objek rambatan melibatkan tiga elemen utama yang berpengaruh, yaitu panjang objek, luas penampang objek, dan konduktivitas termal bahan (Zulfikar, 2019). Konstanta kekakuan elemen disusun menggunakan persamaan 2.39.

$$kc = \frac{A.K_{xx}}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.36)$$

Jika terjadi konveksi pada objek, maka matriks kekakuan elemennya akan dipengaruhi oleh konveksi tersebut dan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.40.

$$kh = \frac{h.P.L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.37)$$

Jika salah satu ujung elemen mengalami konveksi, maka konstanta kekakuan elemen tersebut akan ditambahkan dengan menggunakan persamaan 2.41.

$$kh_{ujung} = h.A \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.38)$$

2.4.2. Matriks Sumber Panas

Matriks sumber panas dalam analisis perpindahan panas dipengaruhi oleh tiga faktor utama: sumber panas, laju perpindahan panas, dan perpindahan panas

konveksi (Zulfikar, 2019). Oleh karena itu, matriks sumber panas dapat dinyatakan dengan persamaan 2.42.

$$f = \frac{(Q.A.L) + (h.T_{\infty}.P.L) + (Q.P.L)}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.39)$$

Begitu pula, matriks sumber panas pada ujung elemen dapat dinyatakan dengan persamaan 2.43.

$$f h_{ujung} = h.A.T_{\infty} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.40)$$

Dimana:

- k = Konduktivitas termal benda (W/m.°C)
- h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².°C)
- L = Panjang Nodel (m)
- A = Luas permukaan benda (m²)
- T_∞ = Temperatur sumber panas (°C)
- f = Sumber Panas

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian

3.1.1. Tempat penelitian

Penelitian ini dilakukan di CV. IRA Publishing Perum Graha Garuda Mas Blok II No. 39 Dusun V Desa Sigara-Gara Kecamatan Patumbak Kabupaten Deli Serdang Provinsi Sumatra Utara, Indonesia, Kode pos: 20361.

3.1.2. Waktu penelitian

Penelitian ini dilaksanakan sejak tanggal pengesahan usulan oleh pengelola program studi sampai dinyatakan selesai yang direncanakan berlangsung selama waktu yang telah ditentukan. Waktu kegiatan penelitian dapat dilihat pada table 3.1 berikut.

Tabel 3.1. Jadwal Tugas Akhir

Aktifitas	2024				2025		
	Sep	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar
Pengajuan Judul	■						
Studi Literatur		■					
Penulisan Proposal			■				
Seminar Proposal			■				
Proses Penelitian				■	■		
Pengolahan Data				■	■		
Penyelesaian Laporan				■	■		
Seminar Hasil						■	
Evaluasi Laporan							■
Sidang Sarjana							■

3.2 Peralatan dan Bahan

3.2.1. Peralatan

Adapun peralatan yang digunakan penelitian dalam penelitian yaitu sebagai berikut.

1. *Thermogun*

Thermogun merupakan salah satu jenis termometer inframerah yang dirancang khusus untuk mengukur suhu dengan cara yang efisien dan non-kontak. Alat ini memanfaatkan radiasi inframerah yang dipancarkan oleh objek, sehingga dapat memberikan hasil pengukuran suhu secara akurat. Dalam penelitian ini, *thermogun* digunakan untuk mengukur suhu di sekitar elemen Peltier, seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. Penggunaan *thermogun* dalam konteks ini sangat penting karena memungkinkan pengukuran suhu yang cepat dan tepat, serta mengurangi risiko kontaminasi atau ketidaknyamanan bagi subjek pengukuran.



Gambar 3. 1. Thermo gun.

Spesifikasi:

Jarak pengukuran = $1-2 \times 10^{-3}$ m

Rentang pengukuran= Dalam mode tubuh: 32 °C - 43 °C

Akurasi pengukuran = $\pm 0,2$ °C

Resolusi = $0,1^{\circ}\text{C}$ $0,1^{\circ}$

Shutdown otomatis = 20 detik

Memori data = 32 grup

Suhu pengoperasian = 10°C -40°C

Satu daya = DC 3.0V 2 baterai AAA

Unit tampilan = $^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C}$

Ukuran produk = $1508343 \times 10^{-3}\text{ m}$

2. Laptop

Dalam penelitian ini, laptop digunakan sebagai alat utama untuk melakukan analisis dan simulasi data. Dengan spesifikasi yang memadai, laptop memungkinkan peneliti untuk menjalankan aplikasi software engineering yang diperlukan dalam penelitian ini



Gambar 3. 2. Laptop

Spesifikasi

Device name	: DESKTOP-87F872V
Processor	: 11th Gen Intel(R) Core (TM) i5-1145G7 @ 2.60GHz 2.61GHz
Installed RAM	: 16,0 GB (15,7 GB usable)
Device ID	: A6E5C453-F4D0-48E8-A7E8-CB618D7372B0
Product ID	: 00330-54240-50906-AAOEM
System type	: 64-bit operating system, x64-based processor

Pen and touch : Pen and touch support with 10 touch points

3. *Software* Simulasi dan Permodelan

Perangkat lunak rekayasa yang digunakan dalam penelitian ini meliputi ANSYS Student 2024 R2, SolidWorks 2023, dan Microsoft Office (Word, Excel, dan PowerPoint).



Gambar 3. 3. Ansys Students Workbench 2024

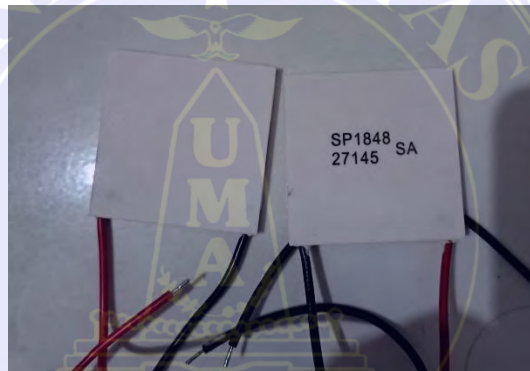


Gambar 3. 4. Solidwork 2023

3.2.2. Bahan

1. Peltier TEG

Elemen yang dikenal sebagai termoelektrik generator merupakan komponen inovatif yang memiliki kemampuan luar biasa dalam mengubah energi panas menjadi energi listrik. Dengan desain yang sederhana dan ukuran yang kompak, alat ini mampu melakukan konversi energi secara langsung, menjadikannya solusi efisien untuk pemanfaatan sumber panas yang ada di sekitar kita.



Gambar 3. 5. Thermoelektrik generator

Dimensi:

$$\text{Panjang} = 40 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Lebar} = 40 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Tebal} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Spesifikasi:

Bahan Material = Keramik

$\Delta T_{\max}$ = 62,0 – 70,6 °C- dry N₂

$Q_{\max}$ = 21,3 – 23,6 Watt

$I_{\max}$ = 9,36 – 9,24 A

$V_{\max}$ = 3,48 – 3,88 V

2. Tungku Pembakaran sate



Gambar 3. 6. Tungku pembakaran sate

Dimensi tungku:

Panjang Tungku = 400 mm

Lebar Tungku = 120 mm

Tinggi Tungku = 120 mm

Tinggi Kaki Tungku = 280 mm

3.3 Metode Penelitian

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah metode elemen hingga. Penelitian ini menggunakan dua jenis data yaitu data sekunder yang berasal dari buku serta jurnal-jurnal penelitian terdahulu, dan data primer diperoleh dari dengan melakukan pengukuran langsung terhadap objek.

Pada tahap simulasi ini, dilakukan penggambaran dari tungku pembakaran sate beserta termoelektrik generator dalam gambar tiga dimensi. Penggambaran dilakukan menggunakan *software solidwork*, lalu *software* yang digunakan dalam simulasi adalah *software ANSYS* dipilih karena kemampuannya dalam mensimulasikan proses perpindahan panas yang sangat relevan untuk analisis perpindahan panas pada sistem ini. Dengan Ansys Students, simulasi dapat dilakukan untuk memahami distribusi suhu yang dihasilkan oleh tungku tersebut.

3.4 Populasi dan Sampel

3.4.1 Populasi dan sampel

Populasi pada penelitian ini adalah Tungku pembakaran dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3. 2. Populasi

No	Deskripsi	Spesifikasi	Unit
1	Jenis Tungku	Tungku Pembakaran Sate Tradisional	-
2	Jenis Pembakaran	Pembakaran Langsung dengan Arang	-
3	Bahan Bakar	Arang Kayu	-

4	Temperatur Pembakaran	191,53	°C
5	Material Tungku	Besi, Baja Karbon	-
6	Dimensi Tungku	0,4 x 0,12 x 0,4	m
7	Area Permukaan Tungku yang Terpapar TEG	0,048	m

Tabel 3. 3. Sampel

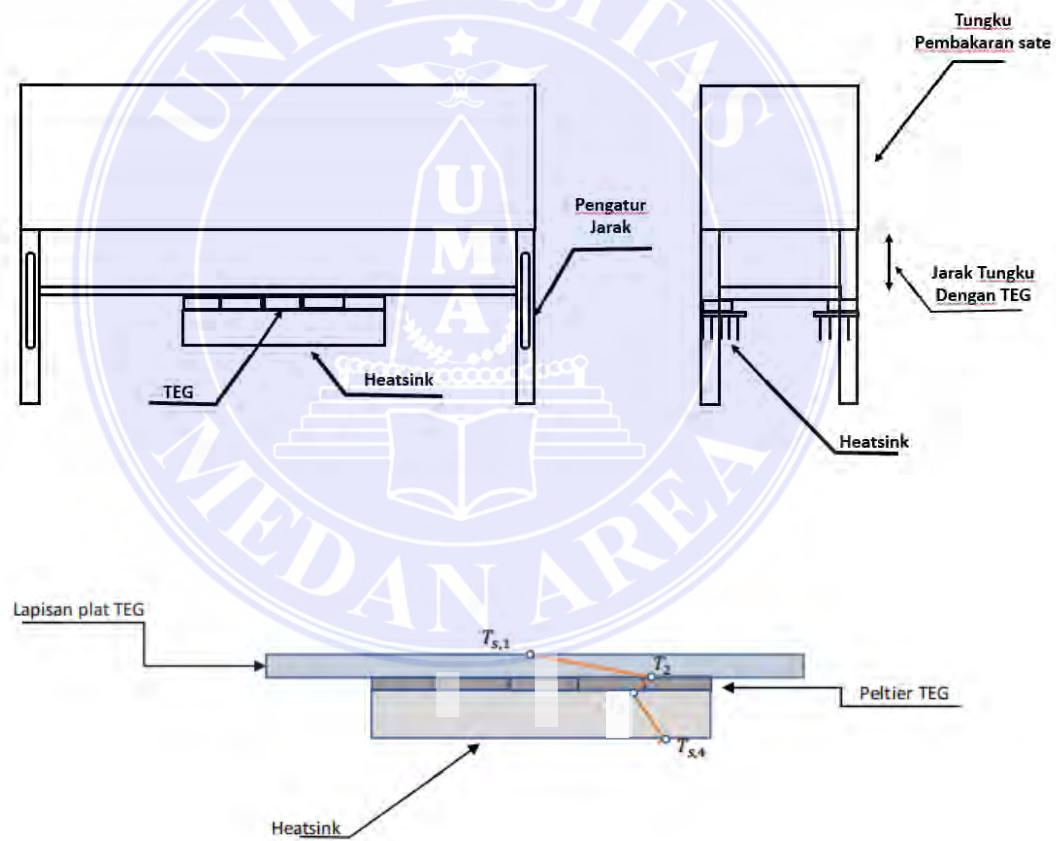
No	Deskripsi	Spesifikasi	Unit
1	Jumlah Modul TEG yang Digunakan	5	buah
2	Tipe Modul TEG	SP 1848 2711145 SA	-
3	Material TEG	Bismuth Telluride (Bi ₂ Te ₃)	-
4	Dimensi Modul	Alloys with Antimony	m
5	Material Heatsink	Aluminium	-
6	Dimensi Heatsink	0,26 x 0,0045 x 0,001	m
7	Temperatur Heatsink	37,2	°C

3.4.2 Kondisi batas

Dalam penelitian ini, kondisi batas ditetapkan dengan fokus pada satu sisi dinding ruang bakar tungku pembakaran sate, di mana analisis dilakukan pada malam hari dengan asumsi suhu lingkungan sekitar 25°C, yang merupakan suhu rata-rata malam hari di Medan, serta kelembapan relatif yang tinggi mencapai 89%. Asumsi ini mencerminkan kondisi lingkungan yang realistis dan stabil, di mana sifat material dinding yang tahan panas akan mempengaruhi perpindahan panas. Dengan demikian, hasil simulasi diharapkan dapat memberikan pemahaman yang representatif terhadap perpindahan panas yang terjadi dan dapat diterapkan pada sisi dinding lainnya.

Tabel 3. 4. Kondisi batas

No	Kondisi Batas		Keterangan
1	Plat TEG	Material : Besi	
		Perpindahan panas : Konduksi	
		T_s : 95,8 °C	
2	Termoeletrik generator	Material : Bismuth Telluride (Bi2Te3)	
		Alloys with Antimony	
		Perpindahan panas : Konduksi	
3	Heatsink	Material : Aluminium	
		Perpindahan panas : Konduksi	
		T_∞ : 40,6 °C	



Gambar 3. 7. Gemoetri kondisi Batas Tungku Pembakaran

Berdasarkan referensi dan pustaka diperoleh konduktivitas termal setiap material lapisan dinding pada tabel berikut ini:

Tabel 3. 5. Konduktivitas Thermal Material Tungku Pembakaran

No	Lapisan	Material	Konduktivitas Thermal (K)	Unit
1	Plat TEG	Besi	73	W/m.°C
2	Peltier TEG	Ceramic	4,5	W/m.°C
3	Heatsink	Alumunium	202	W/m.°C

Tabel 3. 6. Konduktivitas thermal berbagai material pada 0 °C (Holman 2010)

Material	Termal Conductivity (K)	
	W/m.°C	Btu/h.ft.°F
Metals:		
Silver (Pure)	410	237
Copper (Pure)	385	23
Alumunium (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
Ceramic	4,5	2,602
Marble	2,08 – 2,94	1,2 – 1,7
sandstone	1,83	1,06
Galss, window	0,78	0,45
Maple or oak	0,17	0,096
Hard ruber	0,15	0,087
Polyvincyl chloride	0,09	0,052
Styrofom	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	0,327
Lubricating oil, SAE 50	0,147	0,085
Freon 12, CCl ₂ F ₂	0,073	0,04
Gasses:		
Hydrogen	0,175	0,101

Helium	0,141	0,081
Air	0,024	0,0139
Water vapor (saturated)	0,0206	0,0119
Carbon dioksida	0,0146	0,00844

3.4.3 Keterbatasan Penelitian

1. Keterbatasan Model Simulasi

Model simulasi yang digunakan dalam penelitian ini dirancang untuk menyederhanakan fenomena perpindahan panas yang kompleks. Namun, model tersebut tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi nyata di lapangan. Faktor-faktor seperti ketidakraturan bentuk tungku, distribusi panas yang tidak merata, dan pengaruh lingkungan eksternal mungkin tidak terakomodasi secara detail dalam simulasi ini.

2. Variabel yang Dipertimbangkan Terbatas

Penelitian ini hanya mempertimbangkan beberapa variabel utama, seperti suhu awal tungku, jenis bahan bakar yang digunakan, dan desain tungku. Variabel lain yang juga berpotensi memengaruhi perpindahan panas, seperti kelembapan udara, turbulensi aliran udara, atau variasi kualitas bahan bakar, tidak dimasukkan dalam analisis. Hal ini dapat menyebabkan hasil simulasi memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan kondisi operasional yang lebih kompleks.

3. Skala Penelitian dan Generalisasi Hasil

Penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium atau menggunakan model tungku dengan spesifikasi tertentu. Oleh karena itu, hasil simulasi mungkin tidak dapat digeneralisasikan untuk semua jenis tungku pembakaran sate atau kondisi

operasional lainnya, seperti ukuran tungku yang lebih besar atau penggunaan bahan bakar alternatif.

4. Keterbatasan Data Validasi

Data eksperimental yang digunakan untuk memvalidasi hasil simulasi memiliki cakupan terbatas pada rentang kondisi tertentu. Data hanya diambil pada suhu tertentu atau waktu pembakaran tertentu. Hal ini dapat memengaruhi akurasi hasil simulasi jika diterapkan pada kondisi di luar rentang tersebut.

5. Asumsi Ideal dalam Perhitungan

Dalam membangun model simulasi, beberapa asumsi ideal diterapkan untuk menyederhanakan perhitungan, seperti konduktivitas termal dianggap konstan, material tungku dianggap homogen, atau kondisi batas (boundary condition) dianggap seragam. Asumsi-asumsi ini dapat mengurangi tingkat akurasi jika kondisi nyata berbeda dari asumsi tersebut.

6. Keterbatasan Waktu dan Sumber Daya Penelitian

Keterbatasan waktu dan sumber daya penelitian membatasi jumlah eksperimen atau iterasi simulasi yang dapat dilakukan. Hal ini dapat memengaruhi kedalaman analisis serta kemampuan untuk mengeksplorasi berbagai skenario operasional secara lebih komprehensif.

7. Pengaruh Lingkungan Eksternal Tidak Dipertimbangkan Secara Detail

Faktor lingkungan eksternal seperti angin, perubahan tekanan atmosfer, atau fluktuasi suhu lingkungan tidak dimasukkan ke dalam model simulasi. Padahal

faktor-faktor ini berpotensi memengaruhi efisiensi perpindahan panas dari tungku ke modul termoelektrik

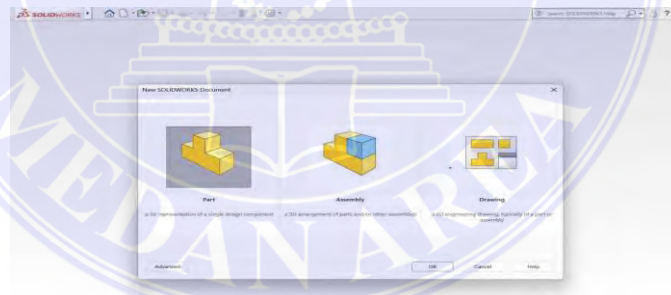
3.5. Prosedur Penelitian

3.5.1. Langkah-langkah menggambar model

Adapun tahap atau Langkah-langkah membuat model dinding tungku pembakaran dengan menggunakan solidwork sebagai berikut:

1) Buka lembar kerja solidwork

Untuk memulai pembuatan model, langkah pertama adalah membuka program SolidWorks. Caranya adalah dengan mengklik **Start**, kemudian memilih **All Programs**, dan terakhir memilih **SolidWorks**. Setelah itu, tampilan lembar kerja *SolidWorks* akan muncul seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.

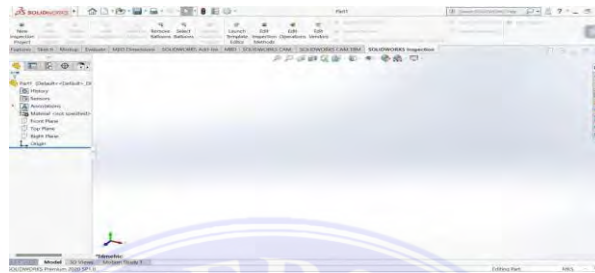


Gambar 3. 8. Tampilan awal solidwork

2) Tahap membuat model

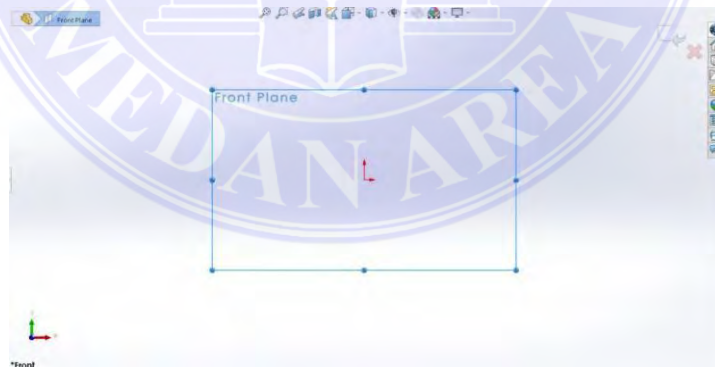
Pada tahap ini akan dijabarkan secara rinci proses membuat model tungku pembakaran sebagai berikut:

- a. Setelah lembar kerja terbuka seperti yang terlihat pada gambar 3.10, langkah selanjutnya adalah memilih menu **Part** dan mengklik OK. Kemudian, tampilan baru akan muncul seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9 berikut ini.



Gambar 3. 9. Interface Solidwork

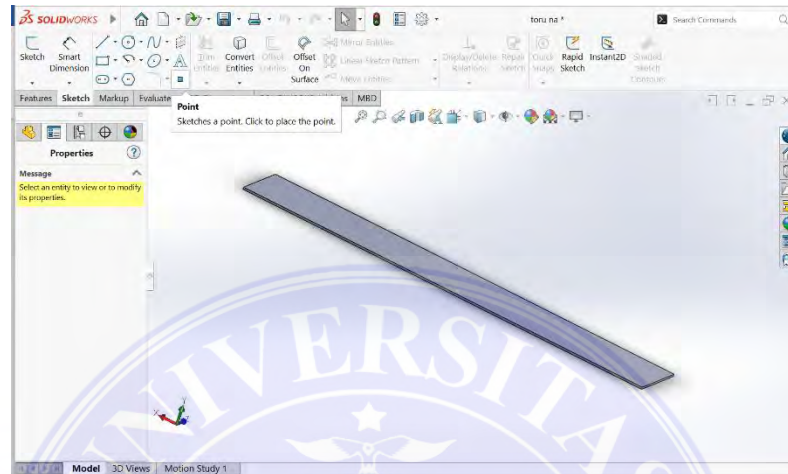
- b. Selanjutnya, kita dapat mulai membuat desain dengan terlebih dahulu menentukan sudut pandang gambar di bagian menu **FeatureManager**. Pilihlah pandangan gambar Top Plane, dan tampilan akan berubah sesuai dengan yang ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3. 10. Tampilan view gambar

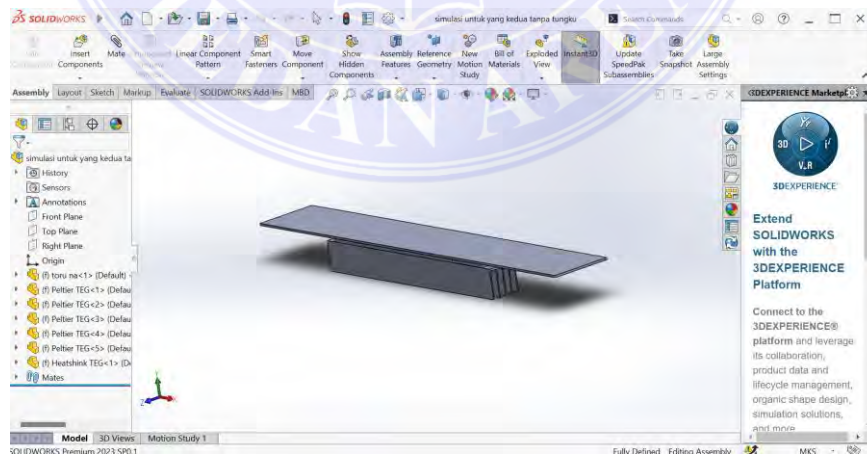
- c. Mulailah menggambar desain dengan memanfaatkan fungsi-fungsi yang terdapat di area toolbar. Langkah pertama adalah membuat persegi panjang untuk desain plat tungku bawah. Setelah itu, sesuaikan desain yang telah

dibuat. Setelah gambar 2D selesai, pilih menu **Features** dan kemudian pilih **Extrude Boss/Base** untuk menghasilkan model 3D seperti yang terlihat pada gambar 3.11 berikut ini.



Gambar 3. 11. Desain Bagian Lapisan Plat TEG

- d. Dengan mengikuti langkah-langkah yang sama seperti pada poin c untuk menggambar desain komponen selanjutnya, hasil akhir dari tungku pembakaran dapat dilihat pada gambar 3.12 berikut ini.



Gambar 3. 12. Desain akhir Pada Setiap Bagian

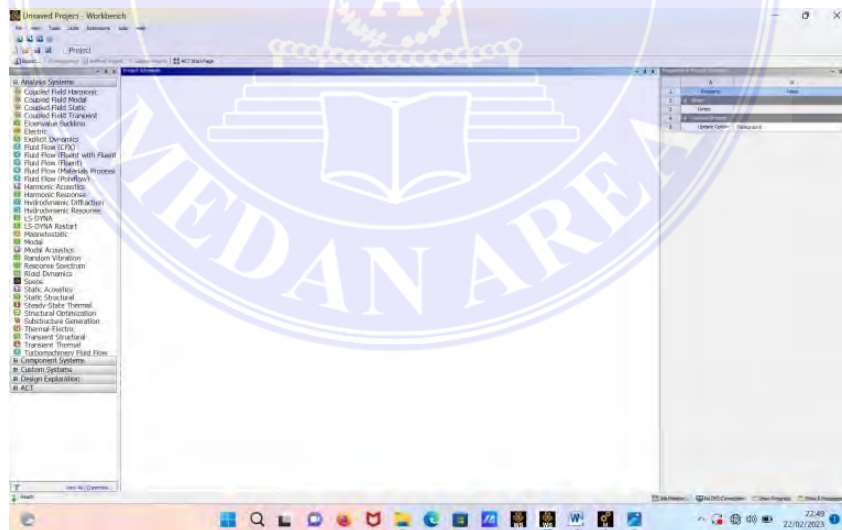
- e. Selanjutnya, simpan desain dengan memilih File, kemudian klik **Save As**.
Pilih tipe **format file** yang diinginkan; karena penelitian ini menggunakan ANSYS, simpanlah dalam format **IGES (*igs)**.

3.5.2. Langkah-langkah Analisis

Adapun tahapan atau Langkah-langkah melakukan analisis dengan software Ansys sebagai berikut:

1) Buka lembar kerja Aplikasi ANSYS Workbench

Langkah pertama untuk melakukan simulasi adalah membuka program Ansys. Caranya adalah dengan mengklik Start, kemudian memilih **All Programs**, lalu **Ansys**, dan terakhir **Ansys Workbench**. Setelah itu, tampilan lembar kerja Ansys Workbench akan muncul seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13.



Gambar 3. 13. Lembar kerja Aplikasi ANSYS Workbench

2) Proses simulasi perpindahan panas dengan aplikasi ANSYS Workbench

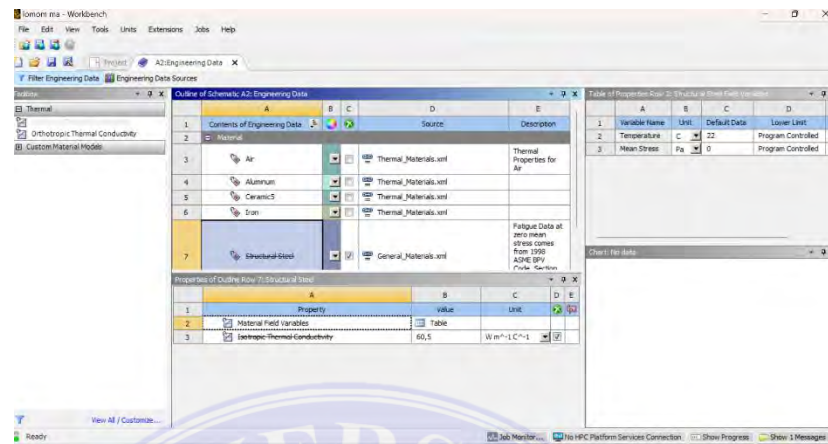
Berikut ini akan dijelaskan secara rinci langkah-langkah untuk melakukan simulasi perpindahan panas menggunakan software ANSYS Workbench

- a. Setelah membuka aplikasi ANSYS Workbench, lanjutkan dengan memilih jenis simulasi yang akan dilakukan melalui menu *Toolbox > Analysis System*. Pilih opsi *Steady State Thermal*, lalu *drag-and-drop* (seret) ke halaman *Project Schematic*. Tampilan tersebut mirip dengan apa yang digambarkan pada gambar 3.14 berikut ini.



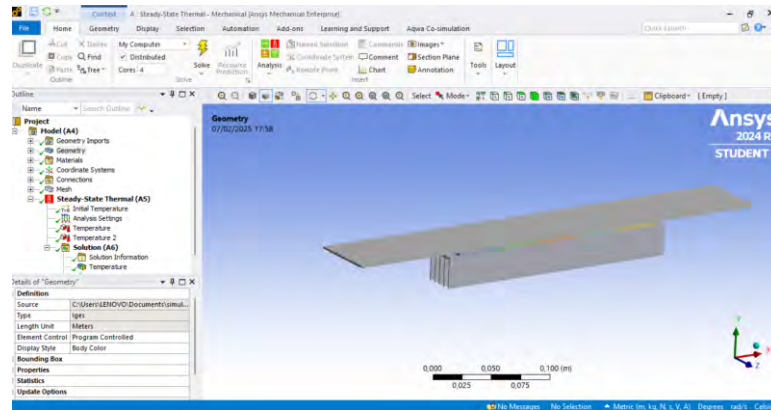
Gambar 3. 14. Menu Analisis

- b. Menentukan material dengan cara klik dua kali pada menu Engineering data maka akan muncul seperti gambar 3.15 berikut ini.



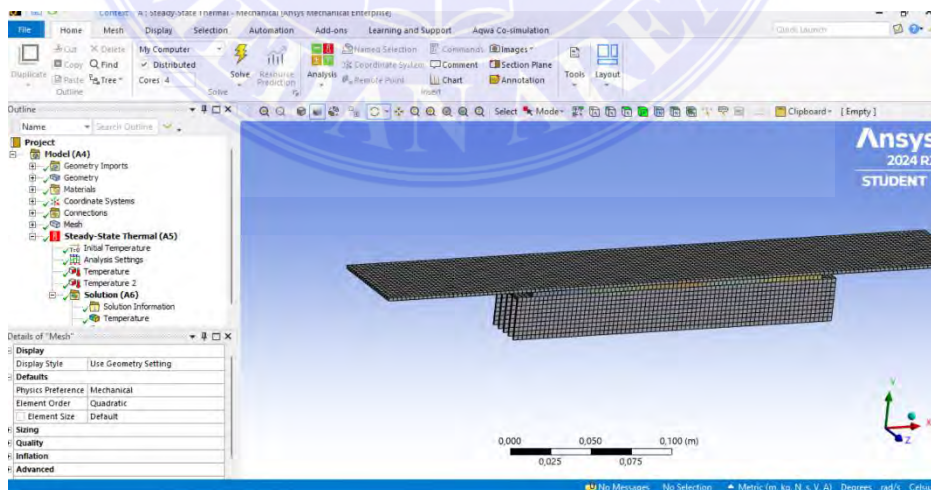
Gambar 3. 15. Elemen tipe material

- c. Setelah menentukan material untuk bagian tersebut, langkah selanjutnya adalah membuat geometri atau mengimpor geometri yang telah dirancang menggunakan perangkat lunak gambar teknik. Caranya adalah dengan mengklik kanan pada mouse, memilih opsi "*import geometry*," kemudian menjelajahi dan memilih geometri yang telah disimpan di lokasi penyimpanan.
- d. Selanjutnya, klik pada perintah Model, lalu pilih geometri di menu proyek. Tentukan material untuk setiap bagian geometri dengan cara memilih part, kemudian pilih "*material properties*," lalu "*material*," dan terakhir "*assignment*." Dalam penelitian ini, jenis material yang digunakan adalah besi, kramik, dan Aluminium. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.16 di bawah ini.



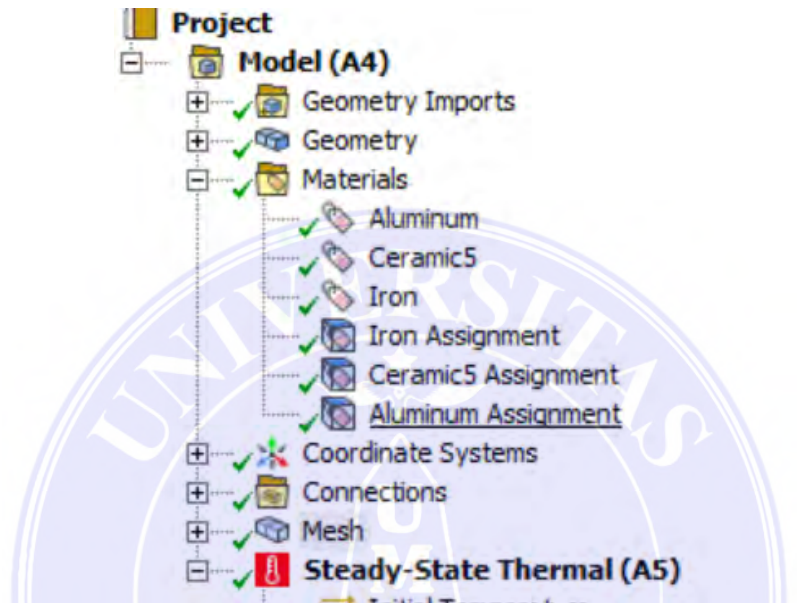
Gambar 3. 16. Pemberian Material Part Geometri

- e. Setelah menentukan property material, property berikutnya adalah membuat meshing pada *geometri*. Caranya adalah dengan memilih opsi mesh, mengklik kanan, lalu memilih *insert*. Setelah itu, pilih method dan *select geometry*, kemudian klik OK. Selanjutnya, pilih property *mesh*, klik kanan, lalu pilih insert dan *sizing*. Pilih geometri yang diinginkan dan klik *apply*, lalu atur ukuran elemen *mesh*. Tunggu hingga proses *meshing* selesai. Hasil *meshing* akan ditampilkan seperti yang terlihat pada gambar 3.17.



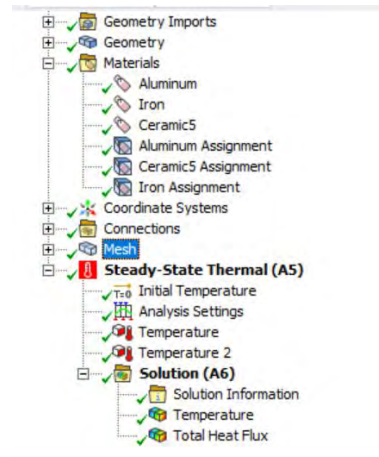
Gambar 3. 17. Tahap *Meshing*

- f. Selanjutnya, masuk ke tahap Setup dengan memilih *Steady State Thermal*. Klik insert untuk memilih parameter beban yang akan dianalisis, kemudian klik kanan dan pilih *solve*. Dalam penelitian ini, parameter yang digunakan adalah temperature. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.18 di bawah ini.



Gambar 3. 18. Tahap Setup

- g. Setelah tahap *setup* selesai, langkah berikutnya adalah tahap *Solution*, di mana Anda perlu memilih parameter-parameter yang akan ditampilkan dalam hasil simulasi. Selanjutnya, klik kanan pada *solution* dan pilih *generate*, lalu tunggu hingga proses *solution* selesai. Dalam penelitian ini, parameter yang ditampilkan adalah temperature dan total heat flux, seperti yang terlihat pada gambar 3.19 di bawah ini.



Gambar 3. 19. Tahap Solution

- h. Setelah semua tahap simulasi berhasil, hasil simulasi perpindahan panas dapat dilihat dalam bentuk distribusi temperatur dan *heat flux*.

3.6. Validasi Hasil Teori dan Simulasi

Perbandingan hasil Teori dengan hasil simulasi antara lain:

1. Pengumpulan data dari hasil pengujian

Pengumpulan data dari sistem nyata sangat penting. Data eksperimen dapat mencakup pengukuran temperatur dan total heat flux yang diperoleh dari percobaan fisik. Misalnya, pengukuran temperatur dapat dilakukan dengan menggunakan termokopel atau sensor suhu di berbagai lokasi pada permukaan tungku pembakaran sate. Ini bertujuan untuk memahami bagaimana distribusi temperatur terjadi selama proses pembakaran.

2. Melakukan Simulasi

Setelah data eksperimen terkumpul, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS. Dalam simulasi ini, model tungku

pembakaran sate perlu dibuat dengan memasukkan parameter yang akurat, seperti geometri tungku, sifat material (misalnya, konduktivitas termal dan kapasitas panas), serta kondisi batas seperti suhu awal dan laju aliran gas pembakaran. Simulasi ini memungkinkan peneliti untuk memprediksi distribusi temperatur dan heat flux dalam kondisi yang berbeda.

3. Perbandingan Hasil

Setelah simulasi selesai, penting untuk membandingkan hasil distribusi temperatur dan total heat flux dari simulasi dengan data eksperimen yang telah dikumpulkan. Metode analisis dapat dilakukan dengan membuat grafik perbandingan antara hasil simulasi dan data eksperimen. Sebagai contoh, distribusi temperatur dapat diplot pada sumbu Y dan posisi pada sumbu X. Selain itu, tabel juga bisa dibuat untuk menunjukkan nilai temperatur dan heat flux dari simulasi dibandingkan dengan nilai eksperimen di titik-titik pengukuran yang sama.

4. Analisis Kesalahan

Analisis kesalahan merupakan langkah krusial untuk menilai akurasi model simulasi. Kesalahan dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Kesalahan (error)} = \frac{[\text{Nilai Simulasi} - \text{Nilai Eksperimen}]}{\text{Nilai Eksperimen}} \times 100 \%$$

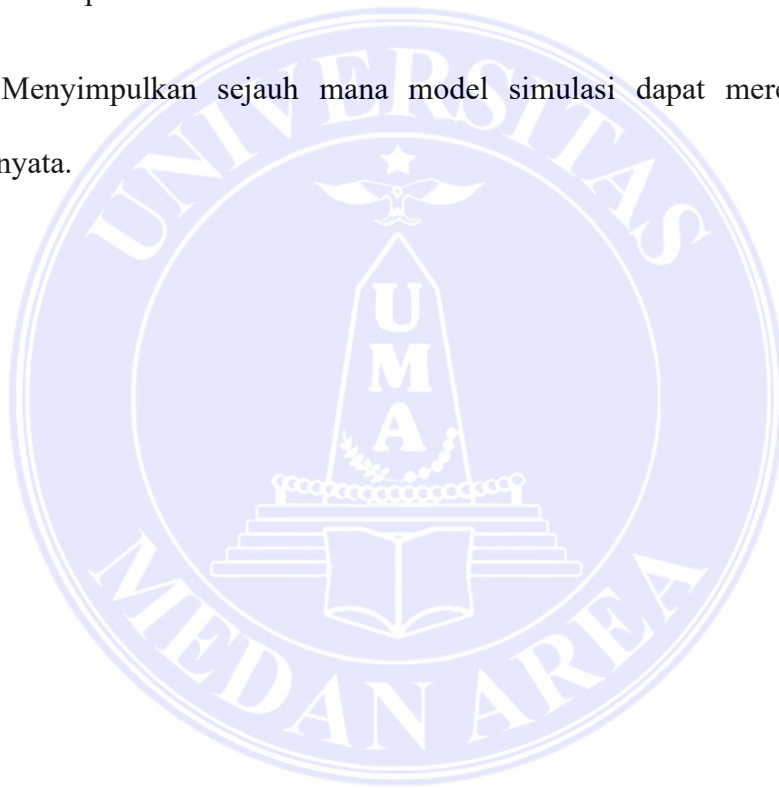
Jika kesalahan berada dalam batas yang dapat diterima (kurang dari 10%), maka model simulasi dapat dianggap valid. Dengan demikian, peneliti dapat yakin bahwa model tersebut dapat merepresentasikan sistem nyata dengan baik.

5. Revisi Model Jika Diperlukan

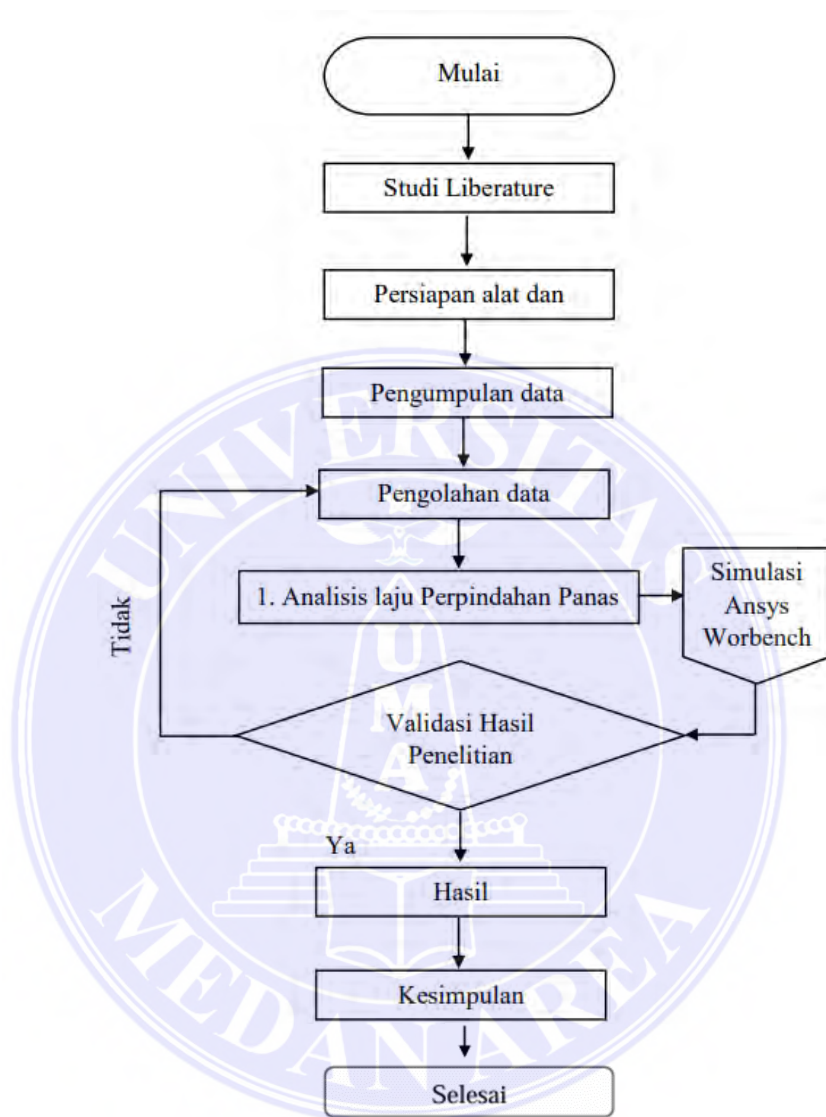
Jika terdapat perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan data eksperimen, revisi model simulasi mungkin diperlukan. Ini bisa meliputi penyesuaian parameter material atau kondisi batas untuk lebih mencerminkan kondisi nyata. Contohnya, mengubah nilai konduktivitas termal atau memperbaiki geometri model agar lebih sesuai dengan desain tungku pembakaran sate yang digunakan dalam eksperimen.

6. Kesimpulan Validasi

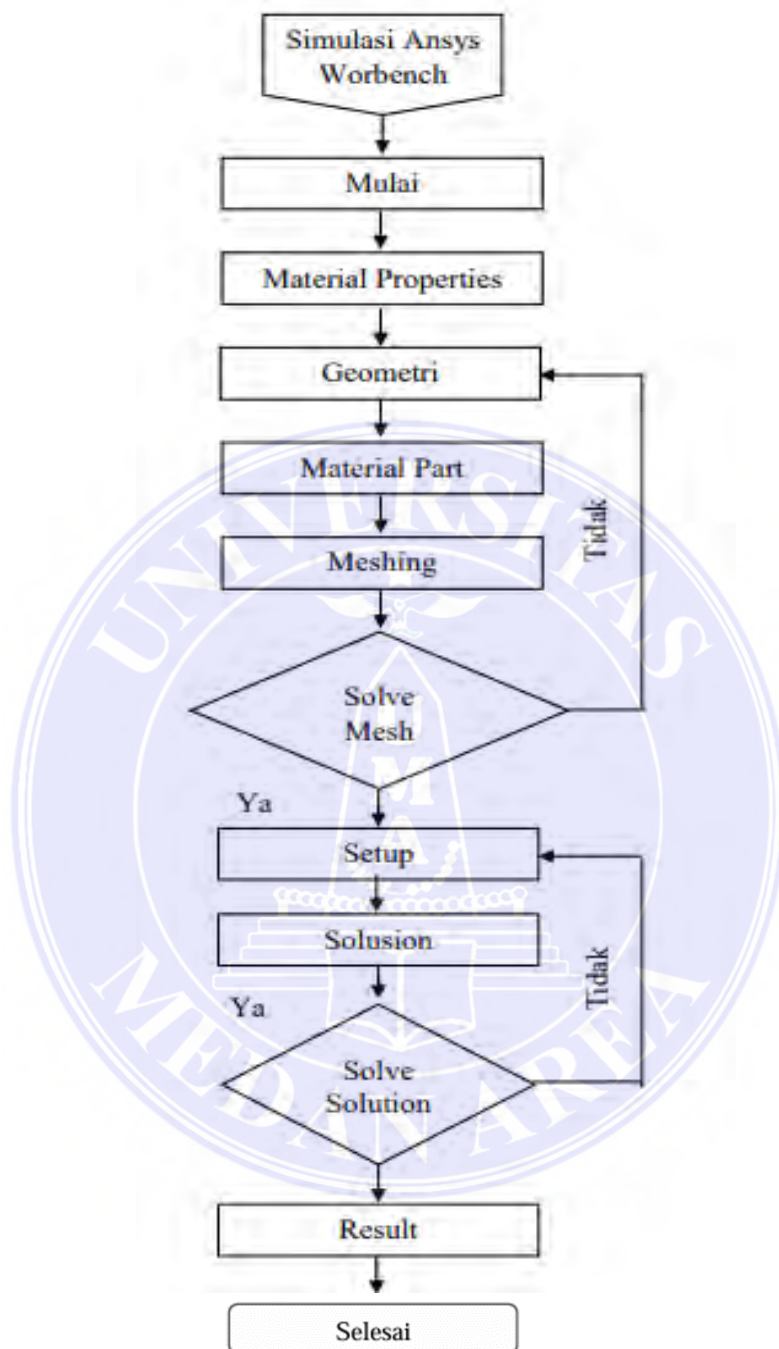
Menyimpulkan sejauh mana model simulasi dapat merepresentasikan sistem nyata.



3.7. Diagram Alir Penelitian



Tabel 3.7. Diagram alur penelitian.



Tabel 3. 8. Diagram alur simulasi Ansys

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan analisis dan simulasi yang telah dilakukan, kesimpulan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan perhitungan distribusi temperatur secara teoritis, diperoleh nilai T_{s1} 95,8 °C, T_2 = 95,00612 °C, T_3 = 42,321383 °C, dan T_{s4} = 40,6 °C. Sementara itu, hasil simulasi numerik menunjukkan T_{s1} = 95,8 °C, T_2 = 95,168 °C, T_3 = 46,741 °C, T_{s4} = 40,6 °C.
2. Dari analisis yang dilakukan, diperoleh total laju aliran energi panas (*Heat Flux*) pada bagian lapisan plat termoelektrik generator hasil simulasi sebesar 28972 W/m², bagian termoelektrik generator 78289 W/m², dan pada bagian *heatsink* 13834 W/m². Sedangkan laju aliran energi (*Heat Flux*) secara teoritis pada bagian lapisan plat termoelektrik generator 28976,6 W/m², bagian termoelektrik generator sebesar 79027,1 W/m², dan pada bagian *heatsink* sebesar 12418 W/m².

5.2. Saran

Berikut adalah beberapa saran untuk pengembangan penelitian ini:

1. Penelitian ini memberikan wawasan mendalam tentang distribusi suhu dan total heat flux pada tungku pembakaran sate. Dengan memahami bagaimana panas terdistribusi, penelitian ini dapat membantu dalam merancang sistem

TEG yang lebih efisien, di mana modul termoelektrik dapat ditempatkan pada titik optimal untuk memaksimalkan konversi energi.

2. Mengingat batasan suhu operasional TEG yang krusial untuk mencegah *overheat* dan kerusakan, inovasi dalam sistem pendingin menjadi prioritas dalam pengembangan TEG yang andal. Penelitian mendalam diperlukan untuk membandingkan efektivitas pasta termal dengan metode pendinginan inovatif lainnya, seperti penggunaan *heatsink* dengan desain optimasi dan sistem pendingin cairan, dalam menjaga suhu TEG pada tingkat yang aman.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, Ridwan, Abrar Ridwan, and Lega Putri Utami. 2023. "Pemanfaatan Panas Buang Tungku Gasifikasi Penghasil Listrik Menggunakan Termoelektrik Sebagai Solusi Limbah Pabrik Tahu Di Desa Tanah Merah Kecamatan Siak Hulu Kabupaten Kampar, Provinsi Riau." *BATOBO: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat* 1(1): 29–35. doi:10.31258/batobo.1.1.29-35.
- Anwar, Syaiful, and Sri Poernomo Sari. 2014. "Generator Mini Dengan Prinsip Termoelektrik Dari Uap Panas Kondensor Pada Sistem Pendingin." *Jurnal Rekayasa ElektriKA* 10(4). doi:10.17529/jre.v10i4.1108.
- Cekdin, Cekmas, Zainuddin Nawawi, and Muhammad Faizal. 2020. "The Usage of Thermoelectric Generator as a Renewable Energy Source." *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)* 18(4): 2186–92. doi:10.12928/TELKOMNIKA.V18I4.13072.
- Chen, Wei-hsin, Kung Lin, and J Fournier. 2019. "Performance Comparison of Thermoelectric Generators Using Different Materials." *Energy Procedia* 158(2018): 1388–93. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.339.
- Francioso, Luca, L Francioso, C De Pascali, I Farella, C Martucci, P Creti, P Siciliano, and A Perrone. 2010. "Flexible Thermoelectric Generator for Wearable Biometric Sensors Flexible Thermoelectric Generator for Ambient Assisted Living Wearable Biometric Sensors." *Journal of Power Sources* 196(6): 3239–43. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.081.
- Gould, Chris, and Noel Shammas. 2009. "A Review of Thermoelectric MEMS Devices for Micro-Power Generation, Heating and Cooling Applications." https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=teg&btnG=.
- Han, Su Ting, Liang Hu, Xiandi Wang, Ye Zhou, Yu Jia Zeng, Shuangchen Ruan, Caofeng Pan, and Zhengchun Peng. 2017. "Black Phosphorus Quantum Dots with Tunable Memory Properties and Multilevel Resistive Switching Characteristics." *Advanced Science* 4(8): 1–7. doi:10.1002/advs.201600435.
- Holman, J.P. 2010. *Heat Transfer*. 10th ed. Southern Methodist University. https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=teg&btnG=.
- Kurniawan, Deden, Edi Sutoyo, and Budi Hartono. 2020. "Analisa Energi Impak Pada Biji Melinjo Dengan Menggunakan Alat Press Primover Compressed Air System." *Jurnal ALMIKANIK* 2(3): 106–12. https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=teg&btnG=.
- L, Theodore, Adrienne S Lavbergmanine, Frank P Incopera, and David P Dewitt. 2019. 11 Sustainability (Switzerland) *FUNDEMENTALS OF HEAT and MASSTRANSFER*. http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017Eng8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_ME

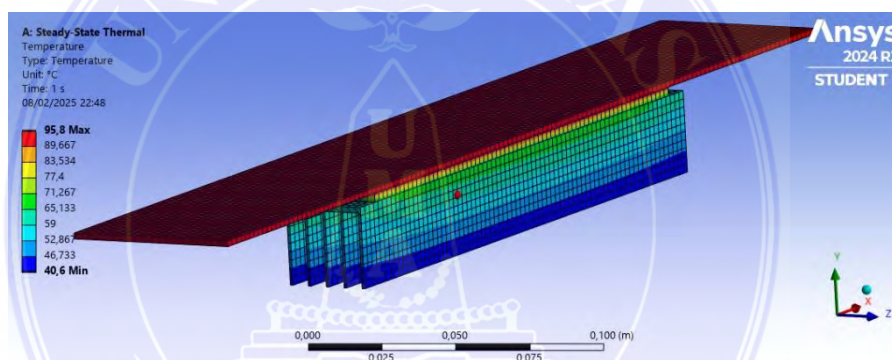
LESTARI.

- Liao, Bing, Yiping Wang, Chuqi Su, Xun Liu, and Jinliang Zeng. 2024. *Thermoelectric Generator Based Power System for Plug-in Hybrid Electric Vehicle*. <https://ssrn.com/abstract=4755733>.
- M.Rowe, David. 1995. *Thermoelec Trics*. https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=teg&btnG=.
- Mukaddim, Aldi, Made Wirawan, and Ida Bagus Alit. 2013. "Dinamika Teknik Mesin." *Dinamika Teknik Mesin* 3(2): 127–35. https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=teg&btnG=.
- Putra, Nandy, Raldi Artono Koestoer, M Adhitya, Ardian Roekettino, and Dan Bayu Trianto. 2009. 13 *Potensi Pembangkit Daya Termoelektrik Untuk Kendaraan Hibrid*. https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=teg&btnG=.
- Rafika, Hasra, Rahmat Iman Mainil, and dan Azridjal Aziz. 2016. "Kaji Eksperimental Pembangkit Listrik Berbasis Thermoelectirk Generator (TEG) Dengan Pendinginan Menggunakan Udara." *Jurnal Sains dan Teknologi* 15(1): 7–11. <http://wiwinsndrtermodinamika.blogspot.co.id/2015>.
- Sumarjo, Jojo, Aa Santosa, and Muhammad Imron Permana. 2017. "Pemanfaatan Sumber Panas Pada Kompor Menggunakan 10 Termoelektrik Generator Dirangkai Secara Seri Untuk Aplikasi Lampu Penerangan." *Jurnal Mesin Teknologi (SINTEK Jurnal)* 11(2):1228.jurnal.umj.ac.id/index.php?journal=sintek.
- Rowe D. M., "CRC Handbook of Thermoelectrics," CRC Press, 1995.
- Ismail, & AL, E. (2017). *Panduan Praktikum Ansys Fluent*. Jakarta, Indonesia.
- Wiranata, C. (2020). *Jenis-Jenis Mesh Pada CFD*. *Aeroengineering*.
- Zulfikar, S. M. (2019). *Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga Untuk Teknik Mesin*. Universitas Medan Area, Medan.

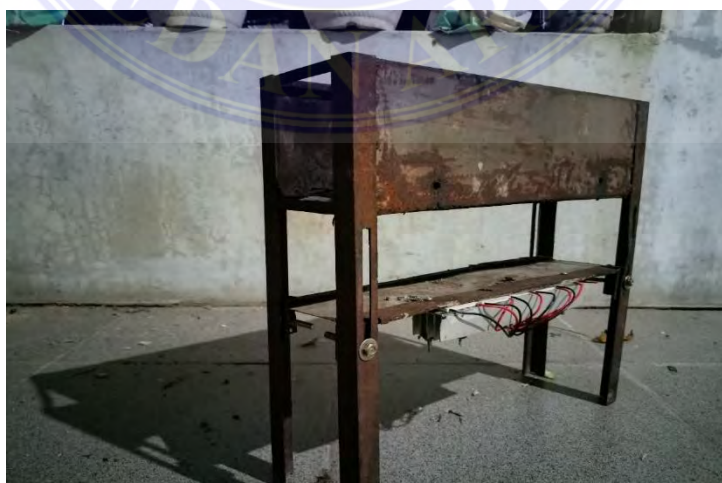
LAMPIRAN



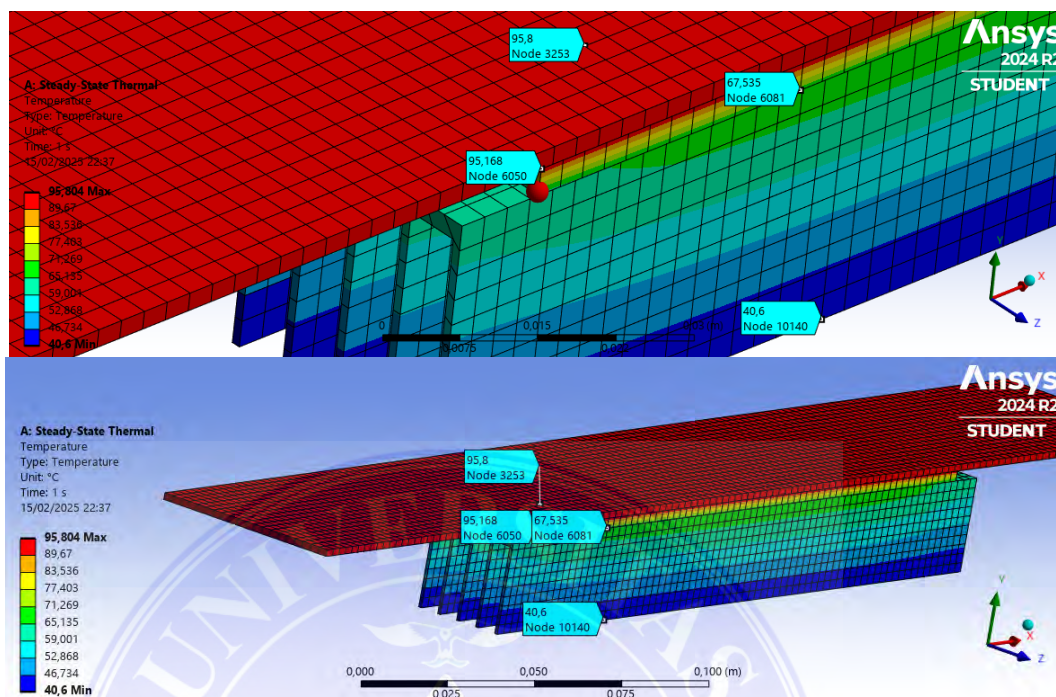
Lampiran 1. Proses pengujian alat



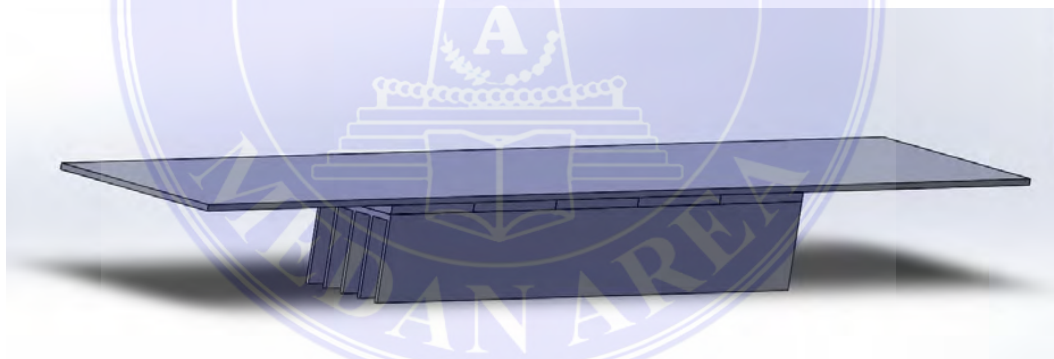
Lampiran 2. Hasil simulasiat Pengujian



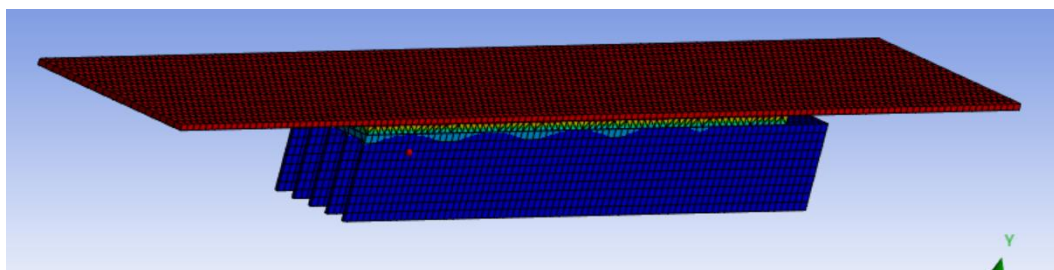
Lampiran 3. Alat Pengujian



Lampiran 4. Distribusi Temperatur



Lampiran 5. Gambar geometry pada setiap bagian di solidworks



Lampiran 6. Gambar distribusi temberatur Simulasi menggunakan ANSYS