

**ANALISIS PENGARUH BAHAN DAN KETEBALAN DINDING
HEATER TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA
MESIN *STIRLING* DENGAN METODE SIMULASI NUMERIK**

SKRIPSI

OLEH:

**AMSAL YUSUF JAYA SIMANJUNTAK
198130033**



**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 1/8/25

Access From (repository.uma.ac.id)1/8/25

HALAMAN JUDUL

ANALISIS PENGARUH BAHAN DAN KETEBALAN DINDING *HEATER* TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA MESIN *STIRLING* DENGAN METODE SIMULASI NUMERIK

SKRIPSI

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

Oleh:

**AMSAL YUSUF JAYA SIMANJUNTAK
198130033**

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

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Proposal : Analisis Pengaruh Bahan dan Ketebalan Dinding *Heater*
Terhadap Distribusi Temperatur pada Mesin *Stirling*
Dengan Metode Simulasi Numerik
Nama Mahasiswa : Amsal Yusuf Jaya Simanjuntak
NIM : 198130033
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing


Dr. Jufrizal, ST., MT.
Pembimbing I


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


Dr. Isyandi, S.T., M.T.
Ka. Prodi

Tanggal Lulus: 20 Maret 2025

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 sangsi-sangsi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 19 Mei 2025



Amsal Yusuf Jaya Simanjuntak
198130033

HALAMAN PERSETUJUAN PERNYATAAN PUBLIKASI SKRIPSI

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

Nama : Amsal Yusuf Jaya Simanjuntak
NPM : 198130033
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

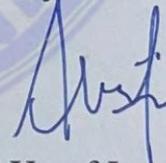
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas skripsi saya yang berjudul: Analisis Pengaruh Bahan dan Ketebalan Dinding Heater Terhadap Distribusi Temperatur pada Mesin Stirling Dengan Metode Simulasi Numerik, beserta perangkat yang ada. Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan

Pada tanggal : 19 Mei 2025

Yang menyatakan



(Amsal Yusuf Jaya Simanjuntak)

ABSTRAK

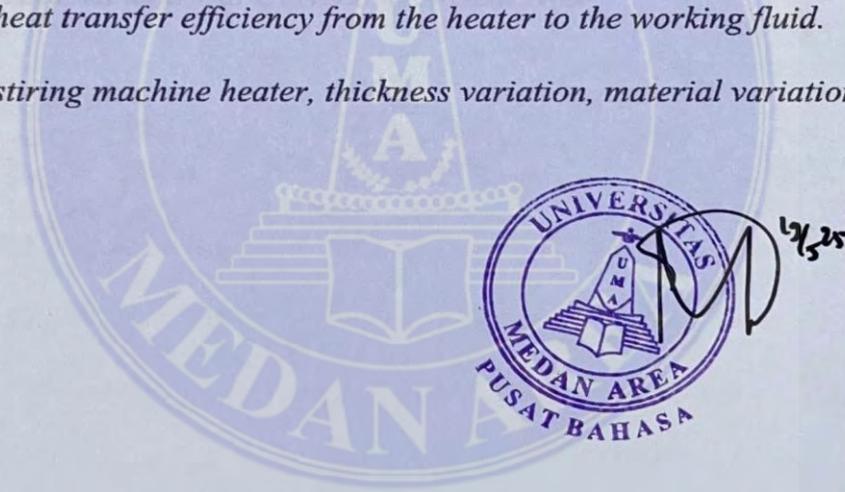
Tujuan penelitian ini yaitu (1) Menganalisis distribusi temperatur pada heater mesin stirling dengan variasi bahan (*Stainless steel* 304, tembaga, aluminium, besi) (2) Mengevaluasi pengaruh ketebalan dinding heater (2.5mm hingga 12.5mm) terhadap distribusi temperatur, dan (3) Menentukan kombinasi bahan dan ketebalan dinding heater yang memberikan performa terbaik. Metode yang digunakan ialah metode simulasi numerik. Bahan yang digunakan adalah menggunakan gambaran tentang heater pada *stirling engine* tipe mCHPSE-012021. Penelitian menggunakan alat yaitu laptop HP dengan *processor Ryzen 7* dan aplikasi yang digunakan adalah *Solidworks 2023* dan *Ansys Mechanical APDL*. Hasil penelitian ini ialah (1) gradien temperatur dengan ketebalan 5mm dengan variasi bahan yaitu *stainless steel* 304 (16.2W/m.K), tembaga (398W/m.K), aluminium (210W/m.K), dan besi (76.2W/m.K) adalah 3.684°C, 0.153°C, 0.29°C, 0.795°C, Terlihat bahwa bahan-bahan dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi memiliki gradien suhu yang lebih kecil, yang menunjukkan bahwa bahan dengan konduktivitas termal tinggi memiliki transfer panas yang lebih efisien. (2) gradien temperatur dengan bahan *stainless steel* 304 dengan ketebalan 2.5mm, 5mm, 7.5mm, 10mm, dan 12.5mm adalah 0.141°C, 0.29°C, 0.474°C, 0.697°C, dan 0.922°C, menunjukkan bahwa semakin tebal dinding heater, semakin besar gradien temperatur yang terjadi. Hal ini disebabkan oleh peningkatan hambatan termal yang mengurangi efisiensi transfer panas dari pemanas ke fluida kerja.

Kata kunci : heater mesin stiring, variasi ketebalan, variasi bahan.

ABSTRACT

The purpose of this research is (1) To analyze the temperature distribution in the Stirling engine heater with variations in materials (304 Stainless Steel, copper, aluminum, iron), (2) To evaluate the effect of the heater wall thickness (ranging from 2.5mm to 12.5mm) on temperature distribution, and (3) To determine the combination of materials and wall thickness that provides the best performance. The method used was numerical simulation. The materials used refer to the heater description of the Stirling engine type mCHPSE-012021. The research used a HP laptop with a Ryzen 7 processor, and the software applications used are Solidworks 2023 and Ansys Mechanical APDL. The results of this research showed that (1) the temperature gradient with a 5mm thickness for various materials such as 304 Stainless Steel (16.2W/m.K), copper (398W/m.K), aluminum (210W/m.K), and iron (76.2W/m.K) are 3.684°C, 0.153°C, 0.29°C, and 0.795°C respectively. It is evident that materials with higher thermal conductivity have smaller temperature gradients, indicating that materials with high thermal conductivity have more efficient heat transfer. (2) The temperature gradient with 304 Stainless Steel at wall thicknesses of 2.5mm, 5mm, 7.5mm, 10mm, and 12.5mm are 0.141°C, 0.29°C, 0.474°C, 0.697°C, and 0.922°C, indicating that as the heater wall thickness increases, the temperature gradient also increases. This is due to the increased thermal resistance that reduces heat transfer efficiency from the heater to the working fluid.

Keywords : *stirling machine heater, thickness variation, material variation.*

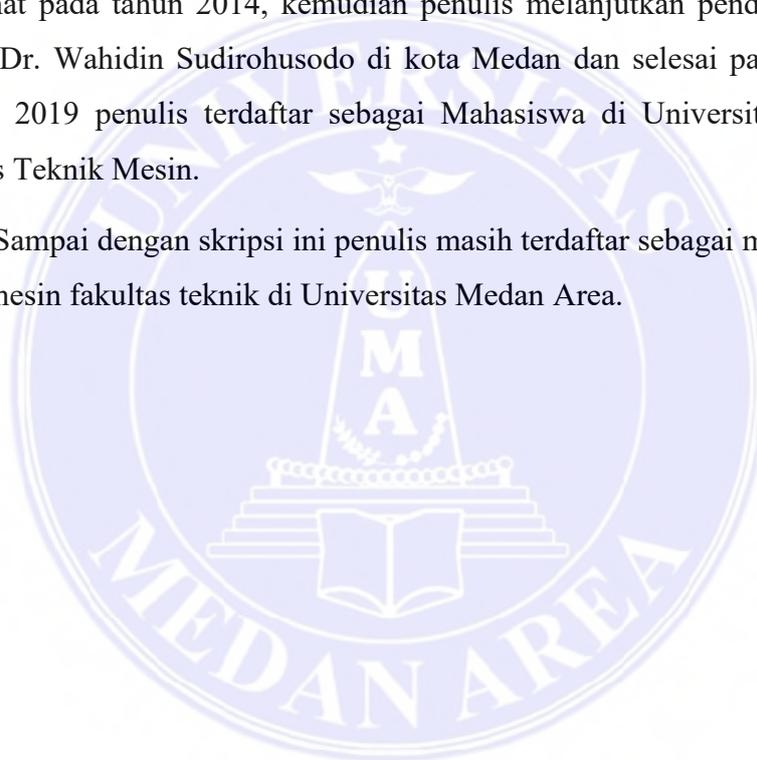


DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Medan, pada tanggal 14 Oktober 1999, putra dari pasangan Bapak Tonny Simanjuntak dan ibu Rosmalina Saulina Aritonang. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara.

Penulis memulai pendidikan di SD Swasta Dr. Wahidin Sudirohusodo di kota Medan Pada tahun 2005 dan tamat tahun 2011, pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di SMP Swasta Dr. Wahidin Sudirohusodo di kota Medan dan tamat pada tahun 2014, kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMA Swasta Dr. Wahidin Sudirohusodo di kota Medan dan selesai pada tahun 2017. Ditahun 2019 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa di Universitas Medan Area Fakultas Teknik Mesin.

Sampai dengan skripsi ini penulis masih terdaftar sebagai mahasiswa prodi teknik mesin fakultas teknik di Universitas Medan Area.

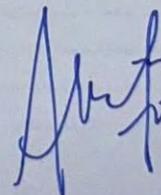


KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala karunia-Nya sehingga skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ini ialah Pengaruh Bahan dan Ketebalan Dinding Heater Terhadap Temperatur dan Tekanan Udara yang Dihasilkan Mesin Stirling Dengan Metode Simulasi Numerik. Terima kasih penulis sampaikan kepada bapak Dr. Jufrizal, S.T., M.T selaku pembimbing 1 yang telah banyak memberikan saran dan masukan kepada penulis selama proses pengerjaan penelitian ini. Di samping itu penghargaan penulis sampaikan kepada rekan-rekan satu tim dan teman-teman seangkatan yang telah membantu penulis selama melaksanakan penelitian.

Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya. Penulis menyadari bahwa tugas akhir/skripsi/tesis ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tugas akhir/skripsi/tesis ini. Penulis berharap tugas akhir/skripsi/tesis ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan pendidikan maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Penulis



(Amsal Yusuf Jaya Simanjuntak)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN PERNYATAAN PUBLIKASI SKRIPSI.....	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Hipotesis Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Stirling Engine</i>	6
2.2 <i>Stirling Engine Tipe Gamma</i>	6
2.3 Siklus <i>Stirling Engine</i> Ideal	7
2.4 Komponen <i>Stirling engine</i>	8
2.5 Teori Dasar	14
2.6 Properti Material.....	20
2.7 SolidWorks	23
2.8 <i>Ansys Mechanical</i> APDL.....	23
METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
3.2 Bahan dan Alat	25
3.3 Metode Penelitian	28
3.4 Populasi dan Sampel.....	29
3.5 Prosedur Kerja	29
BAB IV	39
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Hasil.....	39
4.2 Pembahasan	53
SIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Simpulan.....	60
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Properti material variasi bahan	22
Tabel 3.1. Jadwal Tugas Akhir	25
Tabel 3.2. Variasi bahan dan ketebalan	29
Tabel 3.3. material properties pada simulasi	30
Tabel 4.1. Data Simalsi Stainless Steel 304	41
Tabel 4.2. Data simulasi tembaga	43
Tabel 4.3. Data simulasi aluminium	45
Tabel 4.4. Data simulasi besi	49
Tabel 4.5. Hasil simulasi gariden suhu	54
Tabel 4.6. Hasil simulasi gradien temperatur	58



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Siklus ideal pada stirling engine	7
Gambar 2.2. Heat Exchanger pada mesin stirling.....	9
Gambar 2.3. Piston dan rumah piston mesin stirling	10
Gambar 2.4. Displacer pada mesin stirling	11
Gambar 2.5. Pulley pada mesin stirling	12
Gambar 2.6. Burner pada mesin stirling	13
Gambar 2.7. Cooler dan Heater pada mesin stirling	14
Gambar 2.8. Tahanan pada sekat	19
Gambar 3.1. Desain heater	26
Gambar 3.2. Tampilan halaman Solidworks 2023	27
Gambar 3.3. Tampilan ansys mechanical APDL	28
Gambar 3.4. Desain Heater	30
Gambar 3.5. Pembuatan desain heater menggunakan software ansys	31
Gambar 3.6. Operasi Booleans add.....	32
Gambar 3.7. Operasi Booleans Glue.....	33
Gambar 3.8. Preferensi Simulasi Termal	33
Gambar 3.9. Tipe Element	34
Gambar 3.10. Model Material.....	34
Gambar 3.11. Mesh Tool	35
Gambar 3.12. Boundary Conditions	36
Gambar 3.13. Diagram alir proses simulasi	38
Gambar 4.1. Simulasi dengan bahan <i>Stainless Steel 304</i>	40
Gambar 4.2. Grafik <i>Stainless Steel 304</i>	41
Gambar 4.3. Simulasi dengan bahan tembaga	42
Gambar 4.4. Grafik Tembaga.....	44
Gambar 4.5. Simulasi dengan bahan aluminium	45
Gambar 4.6. Grafik Aluminium	47
Gambar 4.7. Simulasi dengan bahan besi	48
Gambar 4.8. Grafik Simulasi Besi	50
Gambar 4.9. Grafik ketebalan 2.5mm	50
Gambar 4.10. Grafik ketebalan 5mm.....	51
Gambar 4.11. Grafik ketebalan 7.5mm	51
Gambar 4.12. Grafik ketebalan 10mm	52
Gambar 4.13. Grafik ketebalan 12.5mm	53

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Stirling engine adalah mesin yang memanfaatkan energi panas menjadi energi mekanik melalui siklus termodinamika, siklus ini terdiri dari kompresi, pemanasan, ekspansi, dan pendinginan. Prinsip kerja *stirling engine* melibatkan pemindahan udara yang dikompresi ke sumber panas untuk dipanaskan, kemudian mengalami ekspansi adiabatik saat menghasilkan energi mekanik sebelum didinginkan kembali untuk memulai siklus baru (Bitsikas et al., 2020; Prasetyo & Saputra, 2019). *Stirling engine* dikenal karena efisiensinya yang tinggi dan kemampuannya menggunakan berbagai sumber panas, serta memiliki sedikit pergerakan mekanis yang memungkinkannya memiliki umur pakai yang panjang dengan perawatan minimal (Dyreby et al., 2024).

Stirling engine memiliki relevansi signifikan dalam bidang energi alternatif, hal ini dikarenakan kemampuan dari mesin tersebut yang dapat menggunakan berbagai sumber panas dari energi terbarukan seperti matahari, biomassa serta panas bumi. Keunggulan penting dari *stirling engine* tersebut terletak pada tingkat efisiensi yang tinggi dan tingkat emisi yang rendah, hal ini menjadikan solusi yang menarik dalam upaya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan dalam lingkungan yang terjadi (Kuban et al., 2019). Pada bidang industri, mesin *stirling* dapat diaplikasikan secara luas seperti dalam pembangkit listrik terdistribusi, pemanas, pendingin ataupun aplikasi pada kendaraan transportasi. Potensi mesin tersebut dalam menghasilkan daya yang stabil dapat diandalkan untuk menjadi

solusi yang menarik dalam memenuhi kebutuhan energi industri yang berkelanjutan (Ren et al., 2023).

Heater merupakan komponen penting dalam siklus *stirling engine*, karena mengatur suhu dan tekanan dalam mesin. Heater digunakan untuk menghidupkan fluida kerja dalam mesin, sehingga memungkinkan siklus kompresi dan ekspansi pada fluida kerja dalam wujud gas. Tujuan dari heater dalam mesin Stirling adalah untuk menjaga suhu tetap tinggi selama siklus yang terjadi, sehingga memastikan efisiensi tinggi dalam konversi energi panas ke energi mekanik. Dalam siklus operasi *stirling engine*, *heater* bekerja sama dengan komponen lainnya, seperti piston kompresor dan piston ekspansi, untuk mengatur suhu dan tekanan dalam mesin.

Pemilihan bahan untuk *heater* pada mesin *stirling engine* memiliki dampak signifikan terhadap konduktivitas termal dan sifat termalnya. Bahan yang memiliki konduktivitas termal tinggi dapat mempercepat proses perpindahan panas dari sumber panas ke udara di dalam mesin, dan dapat meningkatkan efisiensi termal mesin *stirling engine* (Siregar, Hasanah, et al., 2022). Ketebalan dinding yang tepat dapat meningkatkan transfer panas antara sumber panas/dingin dengan fluida kerja (biasanya udara atau gas lainnya) di dalam mesin (Thombare & Verma, 2008).

Berdasarkan penelitian sebelumnya tentang *stirling engine* yang dilakukan oleh Rahmalina et al. (2021) menggunakan simulasi *ansys, stirling engine* dengan ketebalan *heater* 4 mm dapat menghasilkan perpindahan panas pada heater sebesar 216,22 *Watt*, kerugian panas dari generator adalah 131,83 J, efisiensi yang dihasilkan adalah sebesar 40% (Rahmalina et al., 2021). Hasil penelitian yang didapatkan oleh Rahmalina et al. (2021) menemukan bahwa adanya hubungan

antara ketebalan dinding *heater* terhadap efisiensi dan suhu yang dihasilkan pada mesin *stirling engine*. Berdasarkan hubungan tersebut, maka diperlukan penelitian lebih lanjut berdasarkan bahan dan ketebalan dinding heater untuk mencapai tingkat efisiensi maksimal (Regalado-Rodríguez & Militello, 2022; Salih et al., 2023).

Penelitian ini dilakukan menggunakan *software ansys mechanical APDL* sebagai media simulasi yang dapat memprediksi kinerja dan efisiensi dari *stirling engine* sebelum dibuat manufaktur dari bentuk aslinya. *Software ansys mechanical APDL* digunakan sebagai media simulasi numerik agar dapat menghindari terjadinya kerugian akibat metode eksperimen secara langsung, metode ini dapat digunakan untuk memprediksi hasil yang mendekati dengan keadaan aslinya (Kuban et al., 2019).

Pemahaman tentang bahan dan ketebalan dinding heater pada mesin Stirling sangat penting. Kedua faktor ini memengaruhi perpindahan panas dan efisiensi mesin. Penelitian ini krusial karena dapat membantu optimalkan efisiensi mesin Stirling. Melalui simulasi menggunakan *software* seperti *Ansys*, penelitian ini memprediksi kinerja mesin tanpa risiko eksperimen langsung. Hasilnya bisa memandu desain mesin yang lebih efisien dalam mengonversi energi panas menjadi energi mekanik, yang penting untuk pengembangan energi alternatif yang lebih baik.

1.2 Perumusan Masalah

- a) Bagaimana pengaruh bahan heater terhadap distribusi temperatur?
- b) Bagaimana pengaruh ketebalan dinding heater terhadap distribusi temperatur?

- c) Kombinasi bahan dan ketebalan heater seperti apa yang memberikan distribusi temperatur paling optimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tujuan sebagai berikut:

- a) Menganalisis distribusi temperatur pada heater mesin stirling dengan variasi bahan (stainless steel 304, tembaga, aluminium, dan besi).
- b) Mengevaluasi pengaruh ketebalan dinding heater (2,5 mm hingga 12,5 mm) terhadap distribusi temperatur.
- c) Menentukan kombinasi bahan dan ketebalan heater yang memberikan performa termal terbaik.

1.4 Hipotesis Penelitian

Hipotesis merupakan penjelasan sementara yang harus di uji kebenarannya mengenai masalah yang di teliti, di mana hipotesis selalu di rumuskan dalam bentuk pernyataan yang menghubungkan dua variabel atau lebih.

- a) *Heater* dengan ketebalan yang lebih tipis cenderung memiliki temperatur yang tinggi.
- b) *Heater* dengan ketebalan yang lebih tipis memiliki konduktivitas termal dan efisiensi yang lebih baik.

1.5 Manfaat Penelitian

- a) Menambah kepustakaan tentang pengaruh *heater* terhadap kinerja dari mesin *stirling engine*.
- b) Dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya sehingga diharapkan kemampuan dari mesin *stirling engine* semakin maksimal.

- c) Sebagai masukan bagi kalangan akademisi dan pihak terkait khususnya pada pengujian piston terhadap kemampuan *heater* pada stirling engine.
- d) Memberikan rekomendasi bahan dan desain optimal untuk heater mesin stirling.
- e) Mendukung pengembangan mesin stirling yang efisien dan ekonomis.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Stirling Engine*

Stirling engine adalah mesin kalor yang memanfaatkan peredaran fluida dalam suatu ruang dengan sistem kompresi dan ekspansi menggunakan udara atau gas, ketika kompresi dan ekspansi terjadi maka volume dan tekanan pada fluida akan berubah (Jufrizal, Mawardi, et al., 2022). *Stirling engine* bekerja menggunakan siklus *stirling* yang berbeda dengan siklus pada mesin pembakaran internal. Fluida yang digunakan pada mesin pembakaran tidak akan keluar dari mesin pembakaran sehingga mengurangi emisi gas pencemaran (Jufrizal, Siregar, et al., 2022).

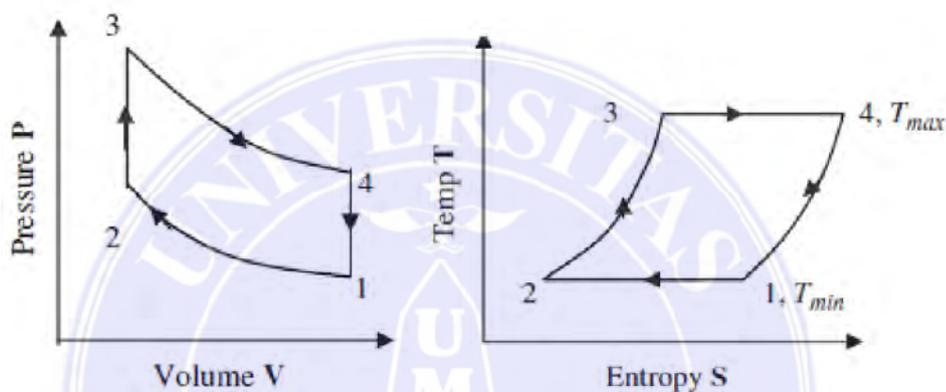
2.2 *Stirling Engine Tipe Gamma*

Stirling engine tipe *gamma* memiliki kemiripan dengan tipe *beta*, perbedaannya adalah pada piston tenaga dan piston *displacer* terdapat pada silinder yang berbeda, namun masih terkait pada poros *flywheel* yang sama (Jufrizal et al., 2022)

Fluida pada kedua silinder masih dapat mengalir bebas di antara keduanya dan bergabung, kombinasi dari konfigurasi ini menghasilkan rasio kompresi yang lebih rendah karena volume dari kedua silinder yang terhubung secara sederhana (Napitupulu et al., n.d.).

2.3 Siklus *Stirling Engine* Ideal

Siklus ideal pada *stirling engine* adalah gambaran siklus teoritis yang didasarkan pada kondisi ideal tanpa mempertimbangkan adanya kerugian gesekan, perpindahan panas secara reversibel. *Stirling engine* memiliki 4 siklus ideal utama, yaitu kompresi *isothermal*, kompresi *isokhorik*, ekspansi *isothermal*, dan kompresi *isochoric* (Napitupulu et al., n.d.).



Gambar 2.1. Siklus ideal pada *stirling engine*

Proses 1-2 merupakan proses kompresi isothermal di mana panas dipindahkan dari fluida kerja ke sirip luar pada suhu T_{min} . Proses ini ditandai dengan pemampatan oleh piston terhadap fluida kerja sehingga meningkatkan tekanan dari P_1 ke P_2 . Karena panas mengalir dari pendingin ke lingkungan, suhu tetap konstan.

Proses 2-3 merupakan proses regenerasi isokhorik di mana terjadi transfer panas dari matriks regenerator ke fluida kerja. Fluida kerja dipindahkan dari ruang kompresi ke ruang ekspansi melalui regenerator berpori, dengan dua piston bergerak secara bersamaan. Piston bergerak menuju regenerator sementara *displacer* menjauhi regenerator sehingga volume antara piston tetap konstan. Fluida kerja telah dipanaskan sebelumnya di regenerator. Suhu fluida kerja meningkat dari T_{min} ke T_{max} dengan cara mentransfer panas dari matriks regenerator ke fluida kerja.

Proses 3-4 merupakan proses ekspansi isothermal, dengan mentransfer panas ke fluida kerja pada suhu T_{\max} dari sumber panas eksternal. Proses ini terjadi saat *displacer* menjauhi regenerator menuju pusat mati bawah sementara piston kompresi tetap berada di pusat mati atas berdekatan dengan regenerator. Tekanan menurun seiring dengan peningkatan volume. Suhu tetap konstan dengan menambahkan panas ke sistem dari pemanas.

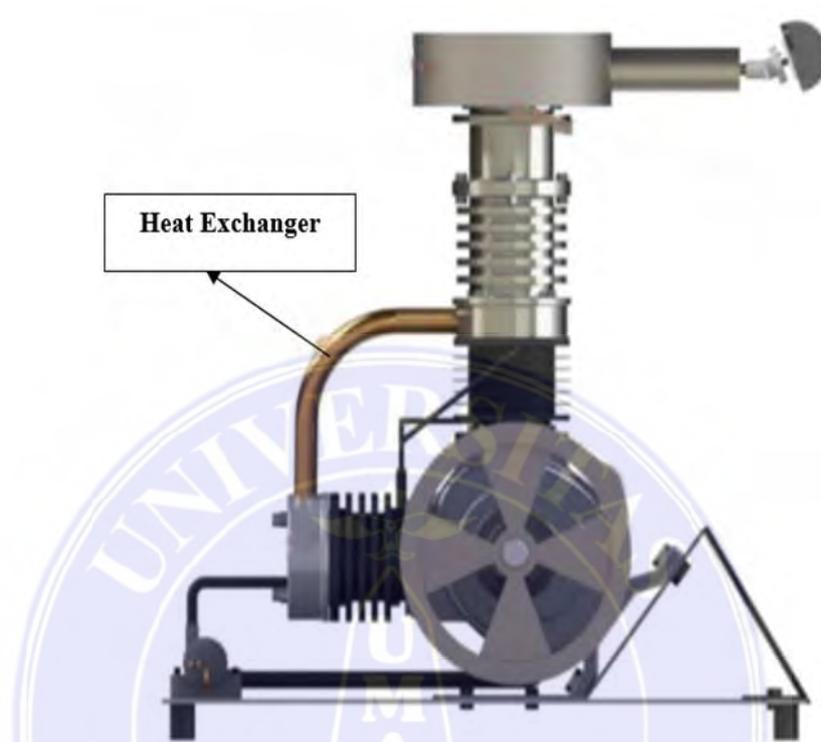
Proses 4-1 merupakan proses regenerasi isokhorik, dengan mentransfer panas dari fluida kerja ke matriks regenerator. Proses ini terjadi saat kedua piston bergerak secara bersamaan untuk mentransfer fluida kerja dari ruang ekspansi ke ruang kompresi melalui regenerator dengan volume tetap. Panas ditransfer dari fluida kerja ke matriks regenerator. Selama aliran fluida kerja melalui regenerator, panas ditransfer dari fluida kerja ke matriks regenerator, yang menurunkan suhu fluida kerja menjadi T_{\min} .

2.4 Komponen *Stirling engine*

2.4.1. *Heat Exchanger*

Heat Exchanger adalah komponen penting pada mesin *stirling engine* yang berfungsi untuk transfer panas antara fluida yang berada dalam kondisi panas dan dingin. *Heat exchanger* ini memiliki peran penting dalam siklus termal mesin *stirling* yang memungkinkan adanya perpindahan panas efisien antara dua fluida kerja yang sedang mengalami ekspansi dan kompresi. Pada *stirling engine* terbagi menjadi dua bagian yaitu bagian pemanas (*Hot heat exchanger*) dan pendingin (*Cold heat exchanger*). Bagian pemanas ini berfungsi untuk memanaskan fluida yang mengalami ekspansi, fluida ini menyerap panas dari sumber panas eksternal

seperti api atau elemen pemanas, proses pemanasan ini meningkatkan suhu dan tekanan fluida sehingga menyebabkan ekspansi dan mendorong piston.

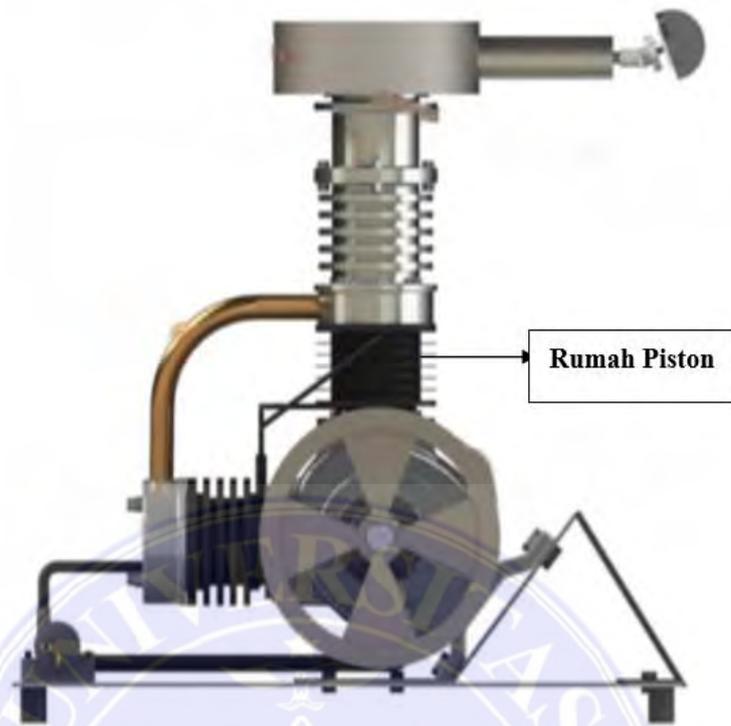


Gambar 2.2. *Heat Exchanger* pada mesin *stirling* (Jufrizal et al., 2023).

Sedangkan pada bagian pendingin berfungsi untuk mendinginkan fluida yang mengalami kompresi, fluida ini melepaskan panas ke lingkungan atau ke medium pendingin sehingga suhu dan tekanannya turun, proses ini memungkinkan fluida kembali ke keadaan awalnya dan bersiap untuk siklus berikutnya.

2.4.2 Piston

Piston adalah komponen pada mesin *stirling* yang berfungsi untuk konversi energi panas menjadi energi mekanis, piston ini umumnya terletak di dalam silinder atau tabung dan gerakannya dipengaruhi oleh perubahan suhu dan tekanan fluida.



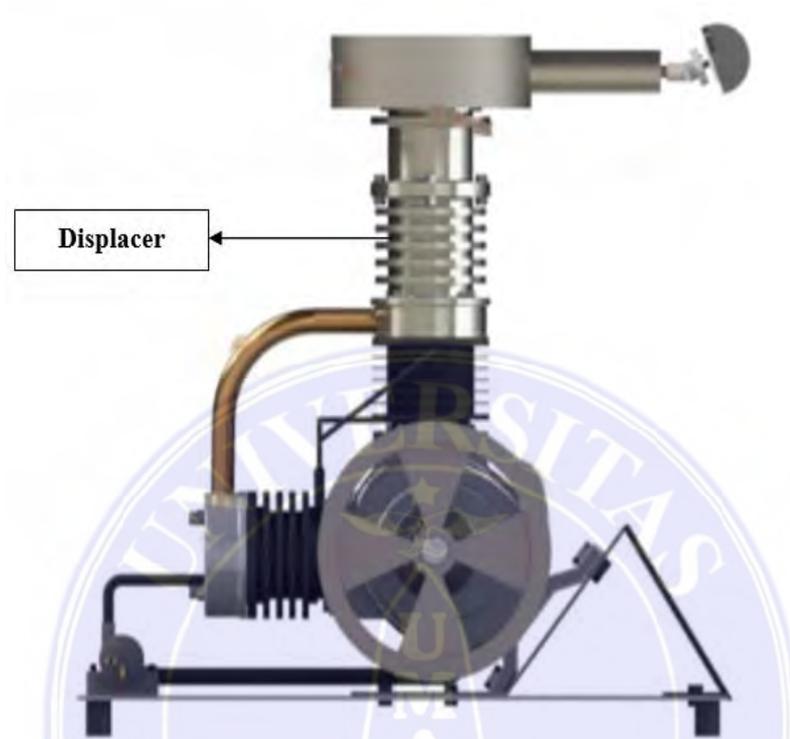
Gambar 2.3. Piston dan rumah piston mesin *stirling* (Jufrizal et al., 2023).

Piston ini bergerak bolak balik di dalam silinder dikarenakan adanya respon terhadap perubahan tekanan dan suhu fluida dalam mesin, pada tahap ekspansi panas fluida akan menyebabkan peningkatan tekanan sehingga mendorong piston keluar dari silinder. Ketika tahap kompresi terjadi maka fluida akan mengalami pendinginan yang menyebabkan penurunan tekanan sehingga piston bergerak masuk ke dalam silinder.

2.4.3 *Displacer*

Displacer adalah komponen penting dalam mesin *stirling* yang berfungsi untuk memindahkan fluida antara area pemanas dan pendingin selama siklus termal terjadi. Pergerakan *displacer* berfungsi untuk mengatur perpindahan panas yang membantu terjadinya perubahan tekanan dan suhu untuk menggerakkan piston.

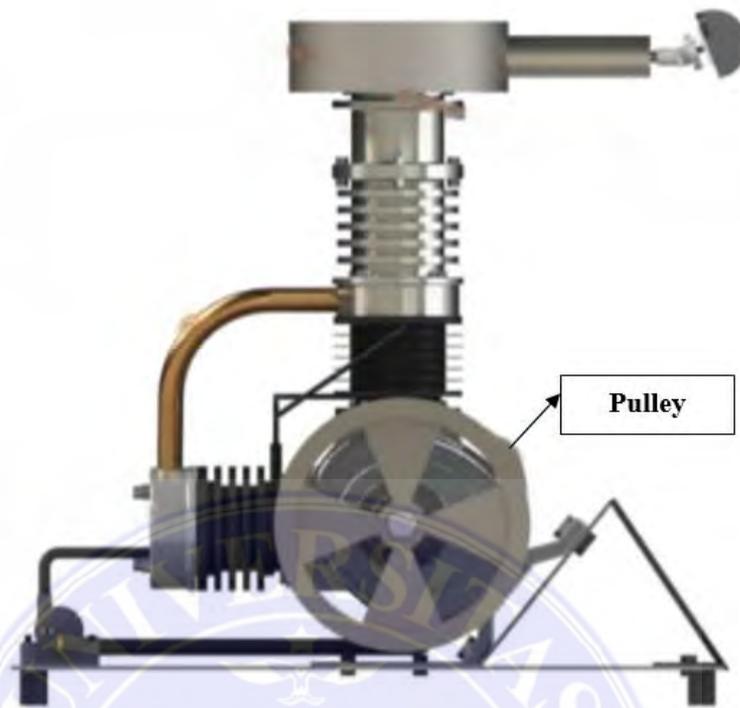
Posisi *displacer* ini umumnya terletak di dalam mesin *stirling* di antara bagian pemanas dan pendingin pada satu silinder yang sama.



Gambar 2.4. *Displacer* pada mesin *stirling* (Jufrizal et al., 2023).

2.4.4 *Flywheel*

Flywheel merupakan komponen berbentuk roda yang berfungsi untuk menyimpan energi kinetik selama siklus kerja mesin dan melepaskan energi tersebut pada keadaan fluida tidak memberikan daya maksimumnya.

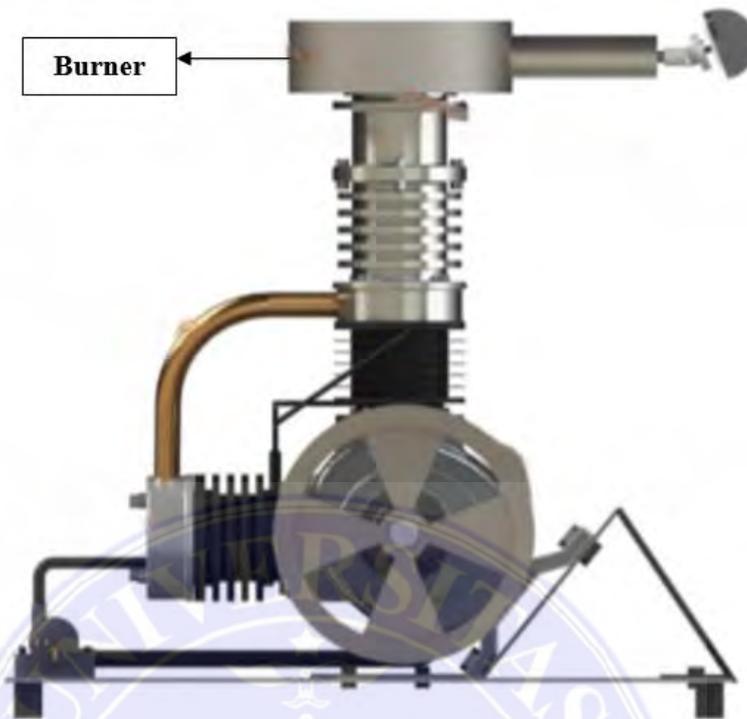


Gambar 2.5. *Pulley* pada mesin stirling (Jufrizal et al., 2023).

Kecepatan putar yang disimpan dalam *flywheel* ini dapat dipergunakan untuk menjaga kestabilan gerakan mesin selama fase dimana fluida kerja memberikan daya yang lebih rendah atau bahkan nol.

2.4.5 *Burner*

Burner merupakan komponen yang berfungsi sebagai sumber panas eksternal untuk memanaskan fluida dalam siklus termal mesin, fungsi utama ini adalah menyediakan panas yang diperlukan untuk menyebabkan ekspansi fluida dan menggerakkan *stirling engine*.

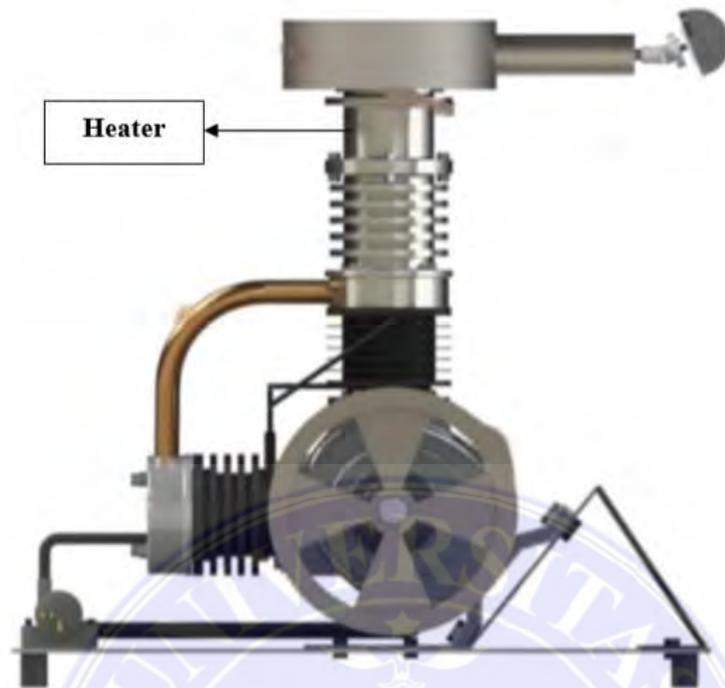


Gambar 2.6. *Burner* pada mesin *stirling* (Jufrizal et al., 2023).

Burner digunakan untuk memanaskan fluida kerja dalam mesin, biasanya gas seperti helium dan hidrogen, panas ini menyebabkan peningkatan suhu dan tekanan fluida yang kemudian digunakan untuk melakukan kerja pada piston.

2.4.6 *Heater*

Heater pada mesin *stirling* berfungsi untuk memindahkan fluida dalam siklus termal, *heater* bertindak sebagai sumber panas eksternal yang memberikan energi termal ke fluida untuk memicu ekspansi fluida dan menggerakkan komponen mesin seperti piston.



Gambar 2.7. Cooler dan Heater pada mesin *stirling* (Jufrizal et al., 2023).

2.5 Teori Dasar

Teori dasar merupakan dasar prinsip kerja dan operasional dari suatu mesin *stirling engine*, operasinya berdasarkan prinsip dasar termodinamika, di mana fluktuasi suhu gas menciptakan perubahan volume yang digunakan untuk menggerakkan piston dan menghasilkan energi mekanis. Hukum gas ideal yang berkaitan dengan tekanan, volume, dan suhu gas, menjadi landasan teori.

2.5.1 Konduksi

Konduksi merupakan metode transfer panas yang terjadi melalui perpindahan energi termal dari suatu bagian dengan suhu yang tinggi ke bagian dengan suhu rendah di antara 2 material yang bersentuhan. Proses ini dapat terjadi tanpa perpindahan massa bahan ataupun fluida. Konduksi terjadi karena adanya gerakan partikel dalam materi yang dapat mentransfer energi panas melalui tumbukan antar partikel atau perpindahan energi kinetik partikel-partikel tersebut.

Persamaan konduksi ini dapat dinyatakan dengan hukum Fourier yang menyatakan bahwa laju perpindahan panas melalui suatu materi sebanding dengan perbedaan suhu dan area penampang. Hukum fourier dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = -k \times A \times \frac{\Delta T}{d} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

- Q = Laju perpindahan panas
- k = Koefisien konduktivitas termal
- A = Luas penampang
- d = Ketebalan materi

Bagian *heater* pada mesin *stirling* mengalami konduksi ketika panas ditransfer dari sumber pemanas ke bagian dalam mesin seperti piston atau permukaan *heater* itu sendiri.

2.5.2 Konveksi

Konveksi merupakan metode transfer panas yang terjadi melalui perpindahan massa fluida atau gas yang mengalir, proses ini dapat terjadi karena adanya perbedaan suhu dalam fluida yang menyebabkan perubahan kepadatan fluida tersebut. Konveksi termal dapat terbagi menjadi konveksi alami dan konveksi paksa. Konveksi alami terjadi ketika perbedaan suhu menyebabkan fluida mengalami perubahan massa yang menyebabkan aliran tidak membutuhkan bantuan eksternal, sedangkan koveksi paksa terjadi melibatkan penggunaan kekuatan eksternal seperti kipas atau pompa untuk mempercepat pergerakan fluida dan meningkatkan perpindahan panas.

Konveksi ini dapat dijelaskan melalui hukum perpindahan panas Newton yang menyatakan bahwa laju perpindahan panas (Q) dalam koveksi tergantung pada perbedaan suhu (ΔT) antara fluida dan permukaan yang dipanaskan atau didinginkan, serta koefisien koveksi (h) yang merupakan karakteristik dari kombinasi fluida dan permukaan tersebut. Persamaan koveksi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = h \times A \times \Delta T \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

- Q = Laju perpindahan panas
- h = Koefisien konveksi
- A = Luas permukaan yang terlibat
- ΔT = Perbedaan suhu antara fluida dan permukaan

Konveksi umumnya terlibat dalam transfer panad berbagai sistem seperti sistem pemanas, pendinginan dan aplikasi yang melibatkan fluida. Pada *heater stirling engine*, koveksi terjadi akibat perbedaan suhu dalam fluida gas, ketika fluida terpapar panas, molekul fluida akan menjadi lebih energik yang mengakibatkan penurunan kepadatan dan kenaikan volume. Hal ini mengakibatkan fluida yang lebih ringan dan panas cenderung naik, sedangkan fluida yang lebih dingin dan berat cenderung turun. Dengan adanya konveksi, maka panas dalam mesin dapat merata dan mendukung efisiensi perpindahan panas.

2.5.3 Radiasi

Radiasi termal adalah metode transfer panas yang terjadi melalui pancaran gelombang elektromagnetik dari permukaan yang memiliki suhu lebih tinggi ke

permukaan dengan suhu lebih rendah. Proses ini dapat terjadi dalam ruang hampa udara atau melalui media transparan. Radiasi termal ini tidak memerlukan medium untuk mentransfer panas dan dapat terjadi bahkan dalam keadaan vakum. Radiasi termal umumnya dapat dijelaskan dengan hukum radiasi Planck dan hukum Stefan-Boltzmann, pada hukum radiasi Planck, menjelaskan bahwa distribusi spektral energi radiasi elektromagnetik dari suatu objek pada suhu tertentu yang dapat dinyatakan sebagai fungsi panjang gelombang dan suhu, sedangkan pada hukum Stefan-Boltzmann menyatakan bahwa daya total yang dipancarkan oleh suatu permukaan sebanding dengan suhu keempat dari permukaan tersebut. Rumusan dari hukum Stefan-Boltzmann dapat ditulis sebagai berikut:

$$P = \sigma \times A \times T^4 \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

- P = Daya pancaran
- σ = Konstanta Stefan-Boltzmann
- A = Luas Permukaan
- T = Suhu permukaan (K)

Pada mesin dengan komponen elemen pemanas seringkali menghasilkan radiasi termal, khususnya pada pemanas *heater stirling engine*. Pancaran energi elektromagnetik ini akan mencapai elemen internal seperti silinder dan bagian lain yang terlibat dalam siklus *stirling*, hal ini dapat menyebabkan peningkatan energi kinetik dalam fluida kerja.

2.5.4 Efisiensi termal siklus stirling engine

Efisiensi termal pada dasarnya tergantung pada perbedaan suhu antara reservoir panas (tempat panas diserap) dan reservoir dingin (tempat panas dibuang). Dalam konteks siklus Stirling, semakin besar perbedaan suhu antara kedua reservoir tersebut, semakin tinggi potensi untuk mengubah panas menjadi energi mekanis, dan karenanya, semakin tinggi efisiensi termal (Abuelyamen & Ben-Mansour, 2018). Efisiensi termal tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan 1 (Jufrizal et al., 2020).

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_E} \dots\dots\dots (2.4)$$

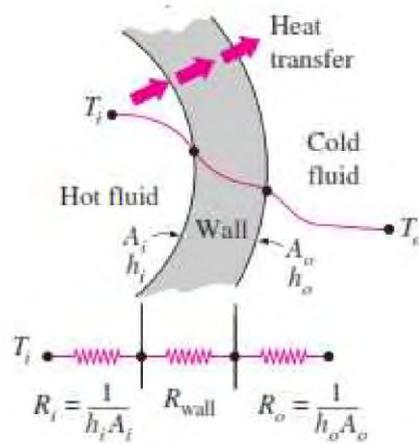
Dimana :

T_C = Temperatur kompresi (K)

T_E = Temperatur ekspansi (K)

2.5.5 Perpindahan panas

Penukar panas umumnya melibatkan dua cairan mengalir yang dipisahkan oleh sekat. Awalnya, panas dipindahkan dari fluida panas ke dinding melalui konveksi, kemudian diteruskan melalui dinding melalui konduksi, dan akhirnya diserap oleh fluida dingin melalui konveksi (Jufrizal et al., 2023).



Gambar 2.8. Tahanan pada sekat

Koefisien panas pada penelitian ini digunakan untuk menentukan efektivitas dari heater *stirling engine* yang digunakan. Nilai koefisien perpindahan panas dapat dihitung menggunakan persamaan 2 (Hidayah, 2022).

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

- \dot{Q} = Laju pindah kalor (J/s)
- ΔT = Perubahan suhu (K)
- A = Luas permukaan perpindahan kalor (m²)
- R = Tahanan termal

Sedangkan untuk menghitung nilai tahanan termal pada dinding sekat berbentuk tabung dapat menggunakan persamaan 3 (Siregar, Hasanah, et al., 2022).

$$R_{dinding} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

- $R_{dinding}$ = Laju pindah kalor (J/s)
- D_o = Diameter luar sekat (m)
- D_i = Diameter dalam sekat (m)
- k = Tahanan termal (W/m.K)
- L = Panjang sekat (m)

Sehingga tahanan termal secara total dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4 (Siregar, Jufrizal, et al., 2022).

$$R_{total} = R_i + R_{dinding} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.7)$$

Maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi persamaan 5.

$$R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{dinding} + \frac{1}{h_o A_o} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

- h_o = Koefisien konveksi luar (W/m².K)
- h_i = Koefisien konveksi dalam (W/m².K)

2.6 Properti Material

Berikut adalah penjelasan mengenai berbagai variasi bahan yang digunakan dalam simulasi meliputi *stainless steel* 304, tembaga, aluminium, dan besi.

2.6.1 *Stainless Steel* 304

Stainless Steel 304 adalah paduan baja tahan karat yang tahan terhadap korosi dan oksidasi karena mengandung kromium (18–20%) dan nikel (8–10.5%). Dengan konduktivitas termal 16.2 W/m·K, densitas 8.00 g/cc dan kapasitas panas spesifik 500 J/kg/K pada 25°C, baja tahan karat 304 sering digunakan dalam

aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap lingkungan ekstrim dan suhu tinggi hingga 870–925°C, seperti dalam industri kimia dan makanan. Selain itu, material ini tidak magnetik dalam kondisi anil. namun, setelah pengerjaan dingin, mereka mungkin menjadi sedikit magnetik.

2.6.2 Tembaga (Cu)

Dikenal sebagai logam murni, tembaga memiliki konduktivitas termal 398 W/m·K pada suhu kamar. Densitasnya 8.92 g/cm³ dan kapasitas panas spesifiknya pada 25°C sekitar 385 J/kg·K. Tembaga sering digunakan dalam pengaplikasian yang menghantarkan panas termasuk pipa, pendingin elektronik, dan penukar panas. Material ini juga populer dalam aplikasi medis dan sanitasi karena sifat antibakterinya dan ketahanan korosi dalam lingkungan kering. Namun, dalam lingkungan basah, tembaga dapat membentuk patina hijau sebagai hasil dari reaksi oksidasi.

2.6.3 Aluminium (Al)

Dengan densitas hanya 2.69 g/cm³, aluminium adalah logam ringan yang ideal untuk aplikasi seperti konstruksi dan transportasi. Aluminium sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan efisiensi penghantaran panas, seperti heatsink dan penukar panas, karena memiliki konduktivitas termal 210 W/m·K pada suhu kamar dan kapasitas panas spesifik 900 J/kg·K pada 25°C. Selain itu, permukaan aluminium memiliki lapisan oksida alami yang sangat kuat, yang membuatnya sering digunakan di lingkungan yang lembap atau korosif.

2.6.4 Besi (Fe)

Logam dasar yang banyak digunakan dalam konstruksi dan industri teknik adalah besi. Besi memiliki densitas 7.87 g/cm^3 dan memberikan kekuatan struktural yang kuat meskipun rentan terhadap korosi. Dengan konduktivitas termal $76.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ dan kapasitas panas spesifik $450 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ pada 25°C , ini cukup efisien untuk aplikasi termal seperti oven atau komponen pemanas. Sifat mekanis besi sangat bergantung pada perlakuan panas dan kandungan karbonnya, yang membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi, seperti struktur bangunan dan alat berat.

Berikut tabel yang merangkum properti material dan sifat material dari *Stainless Steel* 304, tembaga, aluminium, dan besi berdasarkan penjelasan di atas:

Tabel 2.1. Properti material variasi bahan

Material	Konduktivitas Termal ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	Densitas (g/cm^3)	Kapasitas Panas Spesifik ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	Atribut Tambahan
<i>Stainless Steel</i> 304	16.2	7.93	500	Tahan korosi tinggi, tidak magnetik dalam kondisi anil, stabil hingga $870\text{--}925^\circ\text{C}$.
Tembaga (<i>Copper</i>)	401	8.96	385	Konduktivitas termal dan listrik sangat tinggi, antibakteri, membentuk patina hijau dalam lingkungan lembap.
Aluminium	237	2.70	900	Sangat ringan, tahan korosi karena lapisan oksida alami, efisien untuk aplikasi termal.
Besi (<i>Iron</i>)	80	7.87	450	Kuat secara struktural, mudah dibentuk, rentan terhadap korosi tanpa pelindung.

2.7 *SolidWorks*

SolidWorks adalah perangkat lunak CAD (*Computer-Aided Design*) berbasis parametrik 3D untuk desain, analisis, dan visualisasi produk. *SolidWorks*, yang dikembangkan oleh *Dassault Systèmes*, sangat digunakan oleh desainer dan insinyur untuk membuat model 3D dari berbagai komponen dan perakitan produk, serta untuk menghasilkan gambar teknik yang diperlukan untuk produksi. Dengan antarmuka yang ramah pengguna, *SolidWorks* membantu proses desain dengan menyediakan alat untuk membuat geometri, simulasi, dan dokumentasi teknis yang diperlukan untuk pengembangan produk. Berbagai file tertanam dalam setiap SLDDRW (file gambar), SLDPRT (part file), SLDASM (file assembly).

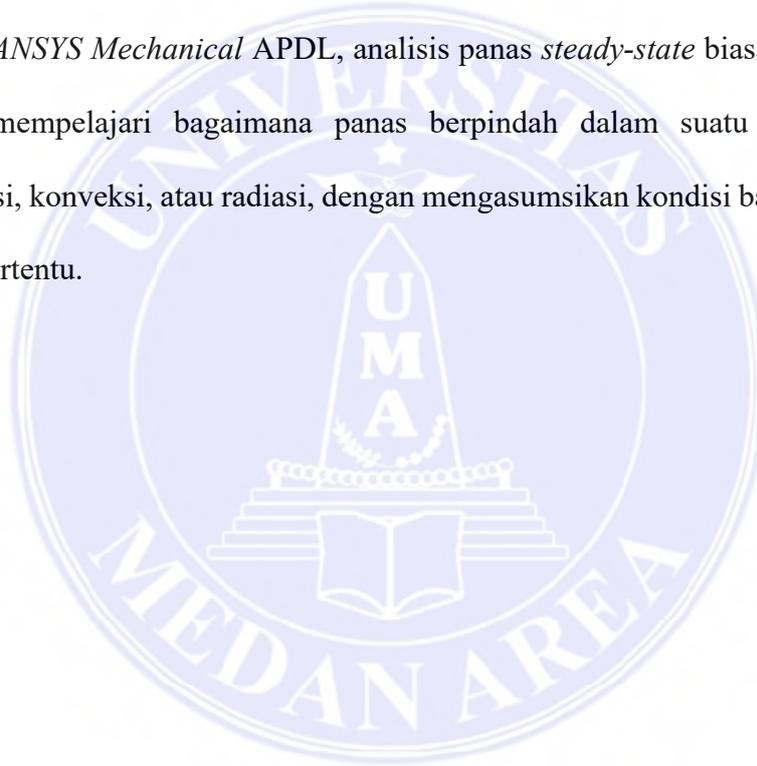
2.8 *Ansys Mechanical APDL*

Ansys Mechanical APDL adalah sebuah modul dalam perangkat lunak *ANSYS* yang dimaksudkan untuk melakukan analisis rekayasa berbantuan komputer (CAE) dengan menggunakan antarmuka berbasis teks atau perintah. APDL lebih fleksibel dalam hal kontrol dan pengaturan simulasi daripada *Ansys Mechanical* yang berbasis grafis, memungkinkan pengguna untuk mengatur setiap aspek proses analisis seperti meshing, pemodelan geometri, dan hasil analisis dengan detail. Kemampuannya untuk menangani analisis yang lebih kompleks adalah salah satu keunggulan utama *ansys mechanical APDL*. Ini terutama berlaku untuk analisis non-linier yang melibatkan efek kontak, perilaku material plastis, dan kondisi batas yang sangat spesifik. Pengguna dapat mengotomatisasi dan melakukan simulasi parametrik dengan dukungan scripting berbasis APDL. Ini memungkinkan pengulangan analisis dengan berbagai parameter desain untuk tujuan optimasi.

2.8.1 *Steady State Ansys Mechanical APDL*

Dalam *ANSYS Mechanical APDL*, analisis suhu *steady-state* adalah jenis analisis yang digunakan untuk mempelajari distribusi suhu dan perilaku termal dalam suatu struktur di bawah kondisi suhu yang tetap (stabil). Dalam analisis ini, asumsi yang digunakan adalah bahwa suhu objek tidak berubah seiring waktu, yang menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi keseimbangan termal (*steady state*). Ini berbeda dengan analisis termal transien, di mana perubahan suhu seiring

Dalam *ANSYS Mechanical APDL*, analisis panas *steady-state* biasanya digunakan untuk mempelajari bagaimana panas berpindah dalam suatu objek melalui konduksi, konveksi, atau radiasi, dengan mengasumsikan kondisi batas dan sumber panas tertentu.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini berlangsung pada bulan Februari hingga bulan Maret 2024, penelitian ini dilaksanakan di CV IRA PUBLISHING, Perum Graha Garuda Mas blok II no.39, Dusun V Desa Sigara Gara, Kec.Patumbak, Kab Deli Serdang, Sumatera Utara. Jadwal penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 3.1. Jadwal Tugas Akhir

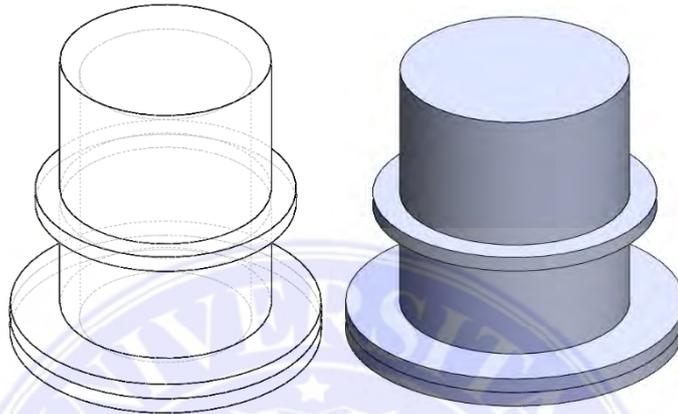
Aktivitas	2024 - 2025															
	Bulan X				Bulan XII				Bulan I				Bulan III			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pengajuan Judul		■														
Penulisan Proposal			■	■												
Seminar Proposal					■											
Proses Penelitian						■	■	■								
Pengolahan Data							■	■	■							
Penyelesaian Laporan										■						
Seminar Hasil											■					
Evaluasi dan Persiapan Sidang												■	■			
Sidang Sarjana														■		

3.2 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan gambaran tentang *heater* pada *stirling engine* tipe mCHPSE-012021. Penelitian menggunakan

alat yaitu laptop HP dengan *processor Ryzen 7* dan aplikasi yang digunakan adalah *Solidworks 2023* dan *Ansys Mechanical APDL*.

3.2.1 Heater pada mesin *stirling*

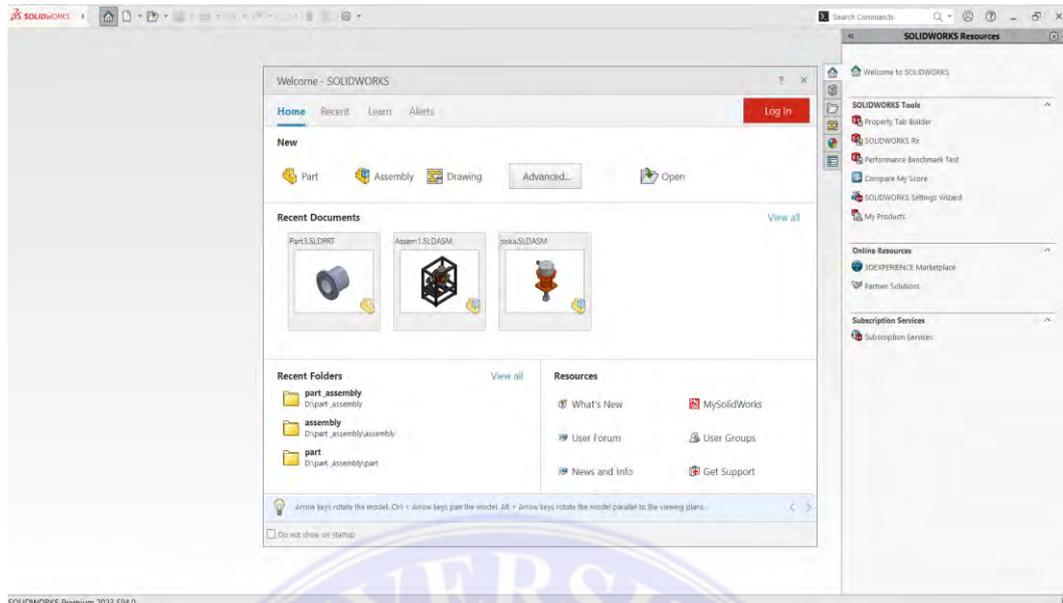


Gambar 3.1. Desain *heater*

Heater pada mesin *stirling engine* digunakan sebagai bagian penukar panas dari sumber panas ke bagian fluida. Kinerja dari *heater* ini sangat dipengaruhi oleh laju perpindahan panas pada bahan *heater*.

3.2.2 *Solidworks*

Solidworks adalah aplikasi 3D CAD yang dapat digunakan untuk desain model 3D sebagai acuan ilustrasi dari produk yang akan dibuat. Pemodelan 3 dimensi diperlukan dalam proses perancangan untuk menghindari terjadinya kesalahan dalam proses pembuatan produk.



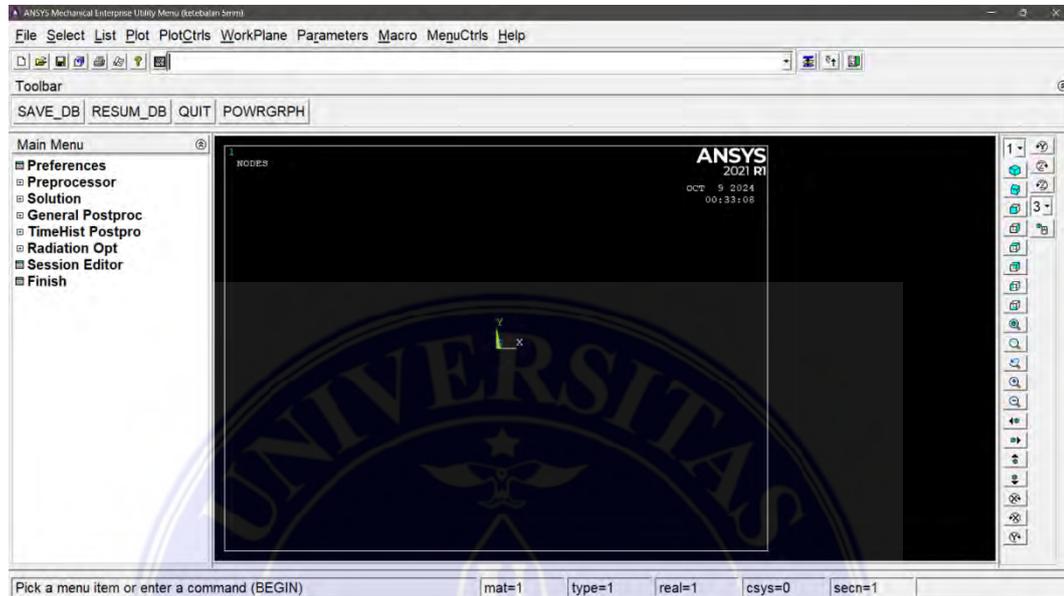
Gambar 3.2. Tampilan halaman *Solidworks* 2023

Pembuatan geometri 3D pada aplikasi *Solidworks* dibagi menjadi pembuatan *part*, *assembly* dan *drawing*. Perancangan ini dimulai dengan pembuatan *part* kecil yang kemudian akan digabung pada proses *assembly* menjadi satu bagian rancangan utuh yang dapat dilihat pada bentuk 3 dimensi.

3.2.3 *Ansys Mechanical APDL*

Perangkat lunak simulasi berbasis elemen hingga, *Ansys Mechanical APDL*, dimaksudkan untuk mengevaluasi berbagai masalah mekanis, termasuk kopling fisik, analisis termal, kekuatan struktur, dan dinamika struktur. Dengan menggunakan bahasa pemrograman parametrik, program ini memungkinkan pengguna melakukan simulasi kompleks. Pengaturan simulasi dan otomatisasi tugas sangat fleksibel. *Ansys Mechanical APDL* digunakan untuk menguji desain tanpa perlu membuat prototipe fisik. Ini digunakan di berbagai sektor, seperti manufaktur, mobil, dan penerbangan. Memodelkan geometri, melakukan meshing, dan menganalisis respons material terhadap beban atau kondisi tertentu, baik linier maupun non-linier, adalah semua fitur yang dapat digunakan oleh pengguna. APDL

adalah alat yang sangat kuat dan fleksibel dibandingkan dengan antarmuka berbasis grafis seperti *Ansys Workbench* karena sifatnya yang berbasis skrip memungkinkannya untuk memiliki kontrol penuh atas setiap tahap proses simulasi.



Gambar 3.3. Tampilan *ansys mechanical APDL*

Ansys mechanical APDL memiliki modul untuk analisis struktur mekanik, aliran fluida, termal, elektromagnetik, dan dinamik *multiphysics*. Dengan metode elemen terbatas, *Ansys mechanical APDL* menghasilkan solusi numerik yang mendekati perilaku fisik sistem, membantu dalam optimasi desain dan mengurangi risiko kegagalan dalam proses manufaktur.

3.3 Metode Penelitian

Proses penelitian ini dilakukan dengan aplikasi *Ansys Parametric Design Language (APDL)*, metode ini sangat cocok digunakan untuk analisa terhadap sistem yang rumit dan sulit diselesaikan dengan perhitungan manual, dalam penelitian ini analisa yang dilakukan adalah analisis suhu terhadap *heater*.

3.4 Populasi dan Sampel

Populasi adalah keseluruhan dari objek yang memiliki karakteristik tertentu dari penelitian yang dilakukan, misalnya pada penelitian ini membahas tentang pengaruh bahan dan ketebalan dari dinding *heater*, maka populasi dapat ditentukan berdasarkan banyaknya variasi bahan dan variasi ketebalan. Sampel adalah bagian penting dari populasi yang diambil dan dapat mewakili populasi tersebut, sampel ini biasanya digunakan karena populasi pada penelitian yang terlalu besar untuk diteliti, sehingga diperlukan pengambilan sampel untuk mewakili keseluruhan penelitian. Berdasarkan penelitian ini, maka populasi dan sampel dapat dijabarkan sebagai berikut.

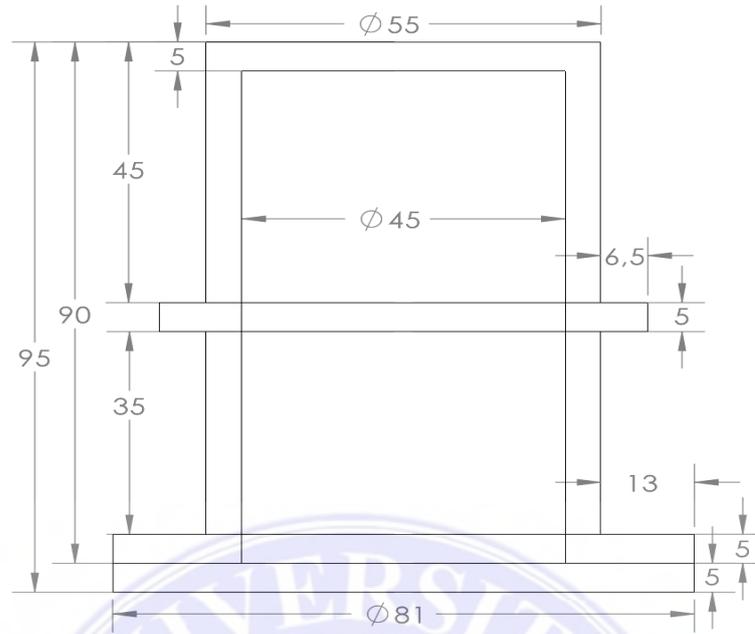
Tabel 3. 2. Variasi bahan dan ketebalan

Bahan	Ketebalan (mm)
<i>Stainless Steel</i> 304	2.5
Tembaga (Cu)	5
Aluminium (Al)	7.5
Besi (Fe)	10
	12.5

3.5 Prosedur Kerja

Adapun prosedur kerja pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Membuat desain dan pemilihan material, adapun desain penelitian dapat dilihat pada gambar



Gambar 3.4. Desain Heater

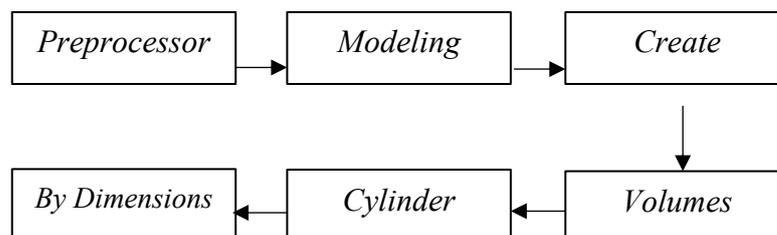
Pada penelitian ini dilakukan simulasi desain heater dengan menggunakan software *Ansys Parametric Design Language (APDL)*. Bahan yang digunakan dalam simulasi ini adalah Stainless Steel 304, tembaga, aluminium dan besi. Pada penelitian ini, pembuatan desain 2D menggunakan software *Solidworks 2023* dan mengekspornya ke Parasolid (.x_t). Impor untuk simulasi di *ANSYS 2021 R1*.

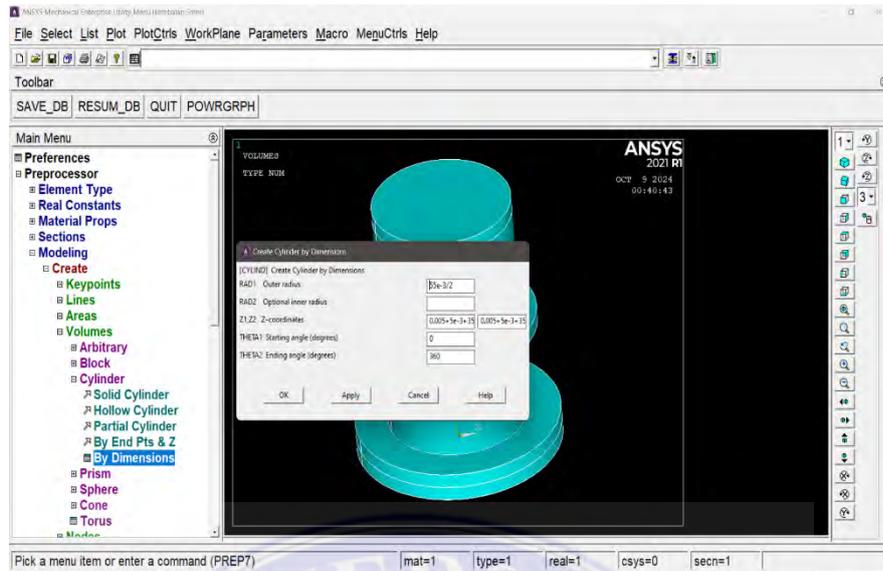
Tabel 3.3. material properties pada simulasi

Material	Konduktivitas Thermal (W/m ^o K)
Stainless Steel 304	16.2
Besi (Fe)	76.2
Aluminium (Al)	210
Tembaga (Cu)	385

2. Mendesain heater menggunakan software *ansys Mechanical APDL*

Prosedur pembuatan desain heater menggunakan software *ansys* sebagai berikut :

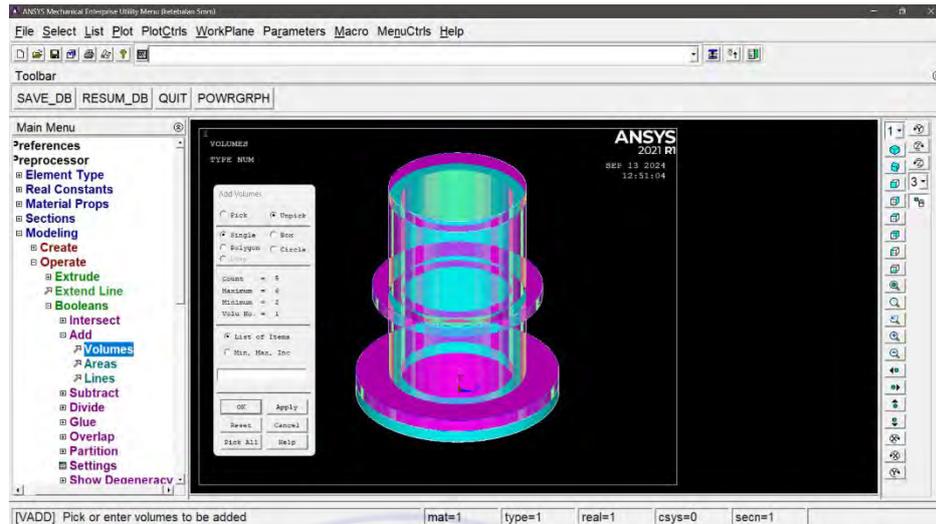




Gambar 3.5. Pembuatan desain *heater* menggunakan *software ansys*

3. Menyatukan volume pada geometri *heater*

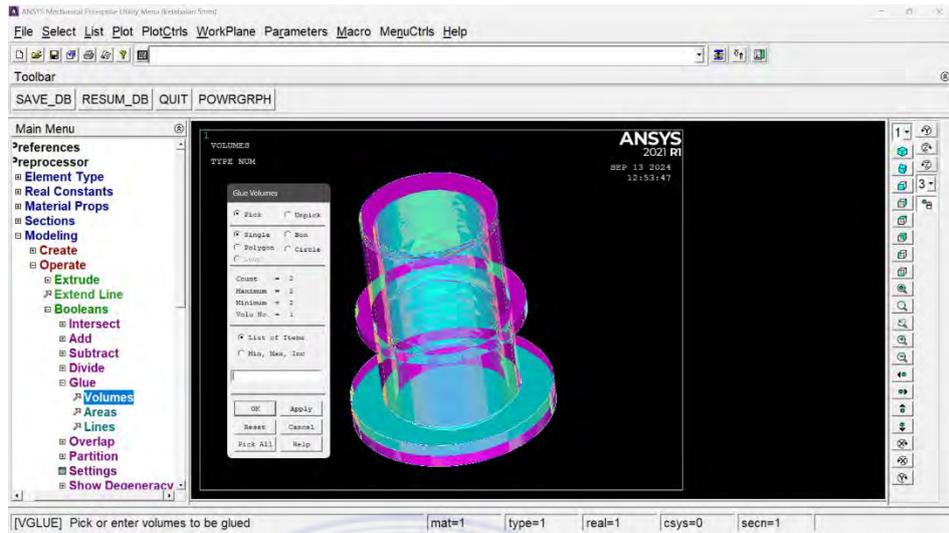
Dalam *ANSYS Mechanical APDL*, operasi *Booleans Add*, yang sering dikenal sebagai union (penggabungan), merupakan salah satu metode dalam manipulasi entitas geometris, termasuk titik, garis, area, dan volume. Ketika diterapkan pada volume, *Booleans Add* memungkinkan penggabungan dua atau lebih volume menjadi satu entitas geometris yang menyatukan keseluruhan ruang dari volume-volume yang terlibat. Operasi ini menghasilkan volume tunggal yang mewakili kombinasi dari seluruh ruang yang ditempati oleh volume-volume awal, tanpa adanya redundansi pada bagian yang tumpang tindih. Dengan kata lain, bagian yang beririsan di antara dua volume hanya dihitung sekali dalam hasil akhir, sehingga menciptakan suatu volume gabungan yang kompak dan konsisten secara geometris.



Gambar 3.6. Operasi *Booleans add*

4. Menghubungkan volume pada geometri *heater*

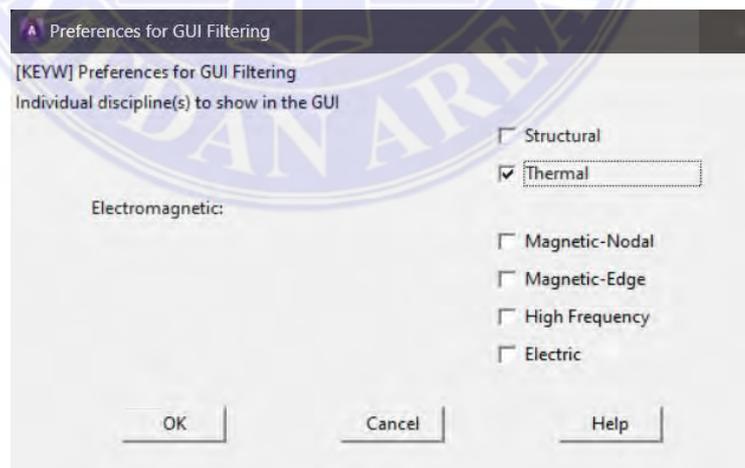
Operasi *Booleans Glue* digunakan untuk menghubungkan dua atau lebih elemen geometri, seperti area atau volume, secara numerik sehingga mereka berfungsi sebagai satu kesatuan saat dianalisis dan tidak mengubah bentuk fisik dari geometri tersebut. *Glue* hanya menghubungkan dua objek pada tingkat mesh, tidak seperti operasi *Booleans Add (Union)*, yang menyatukan dua objek secara fisik menjadi satu objek baru. Tujuan dari proses ini adalah untuk memastikan bahwa gaya dan perpindahan yang terjadi pada permukaan kontak antara objek dapat ditransfer secara mulus, yang menghasilkan hasil analisis yang lebih akurat. Meskipun demikian, operasi ini tidak secara fisik menggabungkan volume, setiap volume tetap terpisah secara geometris. Sebaliknya, volume terhubung pada simpul di *mesh*-nya.



Gambar 3.7. Operasi *Booleans Glue*

5. Preferensi simulasi termal

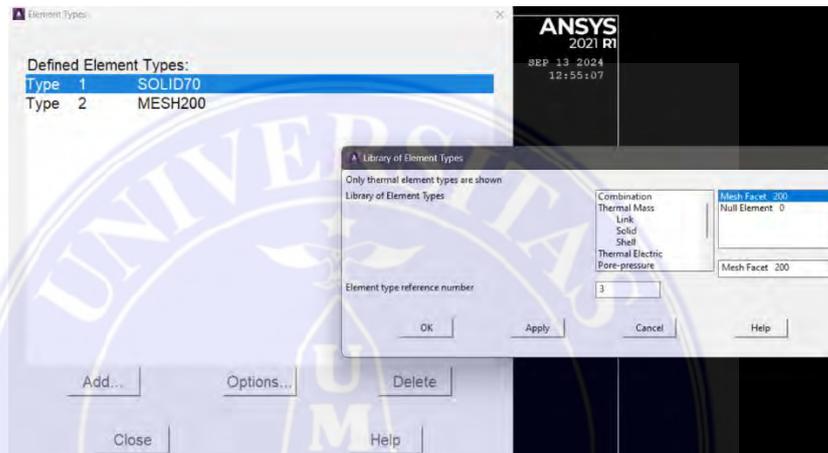
Pengaturan preferensi untuk analisis termal memastikan bahwa opsi dan elemen yang berkaitan dengan perpindahan panas ditampilkan dan diaktifkan, serta mengurangi tampilan elemen atau fitur yang tidak relevan dengan analisis termal. Pengaturan ini juga digunakan untuk memfokuskan lingkungan kerja pada simulasi termal.



Gambar 3.8. Preferensi Simulasi Termal

6. Tipe *element* pada simulasi

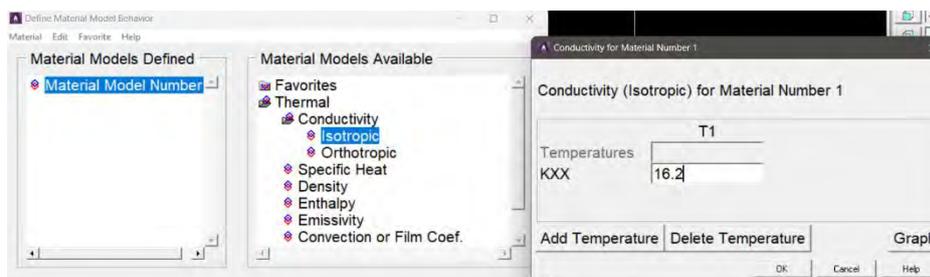
Element Solid 8 Node 70 (SOLID70) dan *Not Solved Mesh Facet 200 (MESH200)* digunakan untuk simulasi ini. elemen yang digunakan untuk analisis termal 3D, terutama untuk memodelkan konduksi panas dalam benda padat. Elemen ini cocok untuk distribusi dan aliran panas dalam berbagai geometri padat, seperti blok, pelat, dan struktur kompleks lainnya.



Gambar 3.9. Tipe *Element*

7. Model material pada simulasi

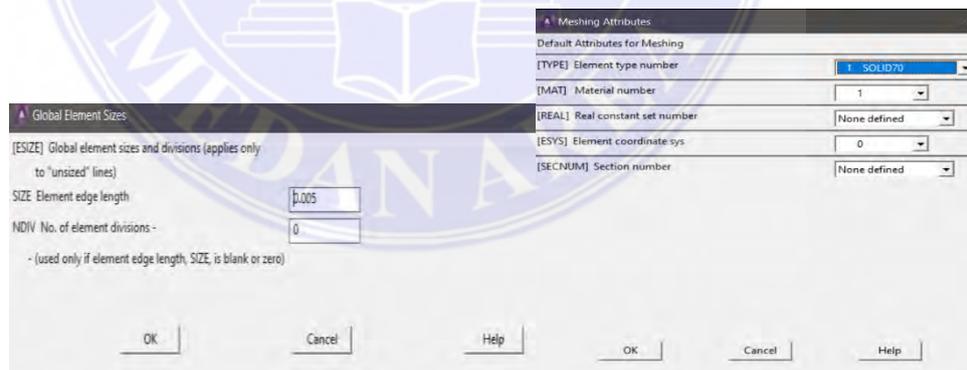
Untuk analisis termal, properti material yang paling penting adalah konduktivitas termal, yang menunjukkan kemampuan material untuk menghantarkan panas. Dalam simulasi ini, perintah yang digunakan adalah *conductivity isotropic*, yang berarti karakteristik fisik material, seperti konduktivitas termal, sama di semua arah.



Gambar 3.10. Model Material

8. Meshing pada simulasi

Mesh Tool adalah fitur penting dalam proses pemecahan model geometris menjadi elemen-elemen kecil yang disebut *mesh*. Proses pemecahan, juga dikenal sebagai pemeshing, digunakan untuk melihat perilaku fisik suatu struktur, seperti distribusi tegangan, deformasi, dan aliran panas. Tujuan dari *mesh* adalah untuk membuat model geometri lebih mudah dan dapat dianalisis secara numerik. Kontrol yang tepat terhadap ukuran dan kepadatan elemen mesh sangat penting karena ukuran elemen memengaruhi akurasi dan ketelitian simulasi. lebih kecil elemen *mesh*, lebih akurat, terutama di area dengan gradien besar, seperti sudut atau titik konsentrasi beban. Namun, *mesh* yang terlalu halus akan meningkatkan waktu komputasi. Selain itu, *mesh* membantu dalam menangani geometri yang kompleks karena memecahnya menjadi elemen-elemen yang lebih sederhana yang lebih mudah diselesaikan oleh *solver ansys*. Meshing pada simulasi ini, *size element* yang digunakan adalah 0.0025.

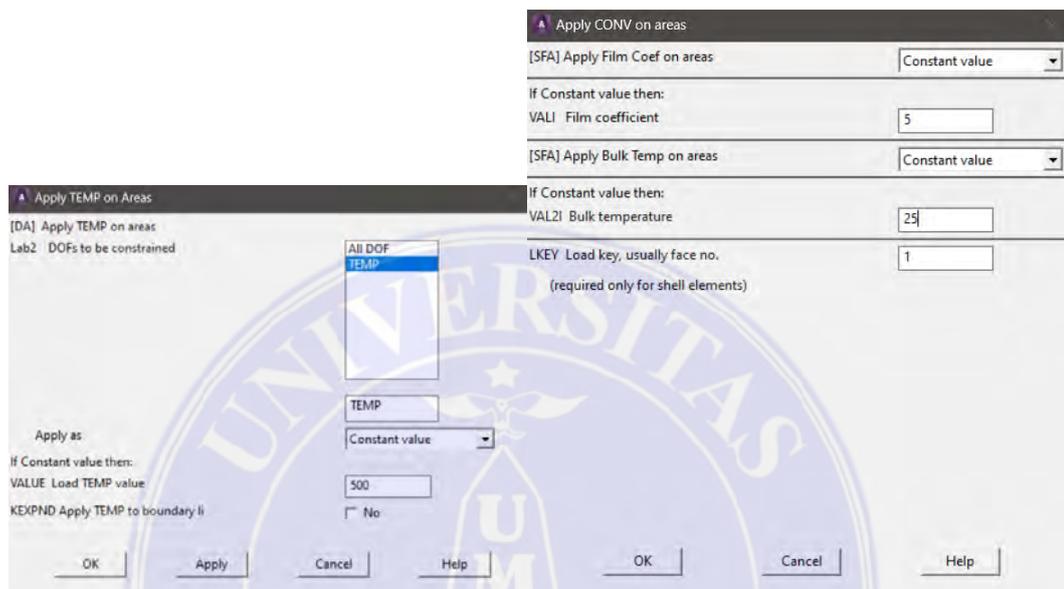


Gambar 3.11. Mesh Tool

9. Boundary Conditions

Kondisi batas dalam ANSYS Mechanical APDL Thermal adalah kondisi atau batasan yang diterapkan pada simulasi termal untuk menunjukkan bagaimana sistem berinteraksi dengan lingkungan atau bagaimana panas ditransfer dari objek

yang disimulasikan. Kondisi batas penting untuk memastikan simulasi termal menggambarkan situasi fisik secara akurat. Dalam simulasi ini, nilai *film coefficient* adalah $5\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ dan nilai *bulk temperature* adalah 25°C . Nilai temperatur yang digunakan dalam penelitian ini adalah 500°C .



Gambar 3.12. *Boundary Conditions*

10. *Solution / Solve*

Solution atau *solve* dalam *Ansys Mechanical APDL (Ansys Parametric Design Language)* merujuk pada tahap pemecahan atau penyelesaian persamaan numerik yang menunjukkan respons struktur, termal, atau fluida terhadap kondisi pembebanan yang diberikan. Tahap ini merupakan bagian penting dari metode elemen hingga (*Finite Element Method*), juga dikenal sebagai FEM yang digunakan oleh *ansys* untuk menghitung berbagai fenomena fisis.

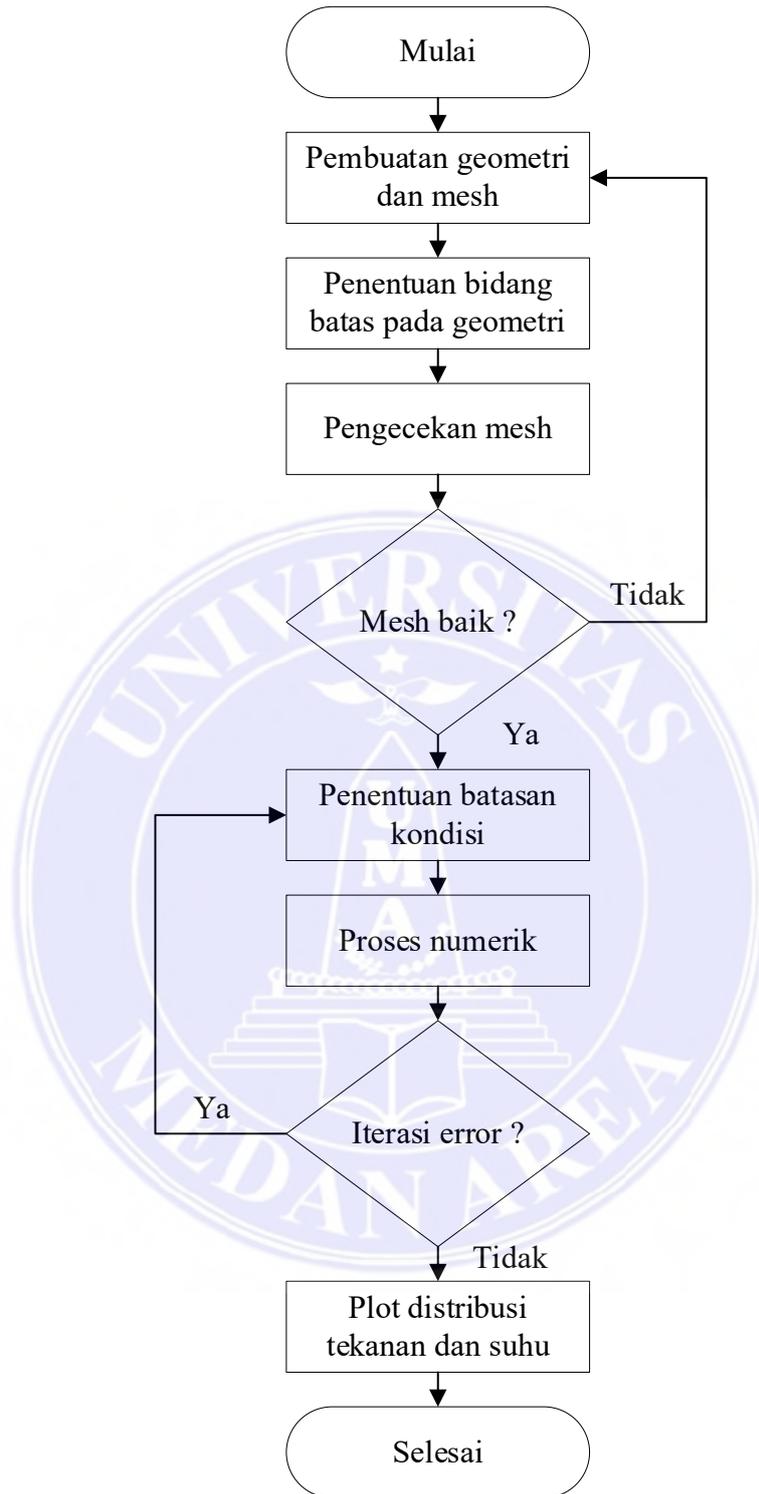
3.5.1 Diagram Alir Penelitian

Proses penelitian ini akan diawali dengan pembuatan geometri dimensi dari *heater* sesuai dimensi yang telah ditentukan dan dilanjutkan dengan penentuan bidang geometri pada aplikasi *Design Modeler Ansys*. Setelah penentuan bidang

geometri maka dilakukan proses mesh untuk membagi geometri menjadi bidang bidang yang lebih kecil, jika proses mesh berhasil maka mesh tersebut akan dimasukkan ke Ansys Fluent untuk dilakukan penyesuaian terhadap kondisi yang akan diteliti.

Untuk diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.13.





Gambar 3.13. Diagram alir proses simulasi

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan simulasi yang dilakukan untuk menganalisis pengaruh bahan dan ketebalan dinding heater terhadap distribusi temperatur pada mesin Stirling, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Bahan tembaga memiliki performa termal lebih baik dibandingkan *stainless steel*, dengan gradien temperatur lebih kecil pada semua ketebalan dinding yang diuji.
2. Ketebalan dinding heater memengaruhi efisiensi perpindahan panas, di mana ketebalan yang lebih besar meningkatkan hambatan termal tetapi menambah kekuatan struktural.
3. Kombinasi bahan tembaga dengan ketebalan 5 mm memberikan hasil optimal untuk efisiensi termal pada skenario yang dianalisis.

5.2 Saran

Hasil penelitian ini memberikan beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut terkait desain heater mesin Stirling:

1. Melakukan validasi hasil melalui pengujian fisik pada prototipe heater mesin Stirling untuk mengukur distribusi temperatur, efisiensi energi, dan daya tahan material pada kondisi operasi nyata.

2. Penelitian lanjutan untuk mengeksplorasi material komposit atau lapisan, seperti pelapisan tembaga pada aluminium atau *stainless steel*. Pendekatan ini dapat mengombinasikan efisiensi termal tembaga dengan keunggulan struktural bahan lainnya.
3. Disarankan untuk mengoptimalkan desain heater dengan ketebalan dinding yang bervariasi di area tertentu. Bagian yang menerima panas langsung dapat dirancang lebih tipis untuk meningkatkan transfer panas, sementara bagian lain dibuat lebih tebal untuk mendukung kekuatan mekanik.
4. Penelitian lanjutan dapat mempertimbangkan pengaruh kondisi lingkungan seperti suhu sekitar, tekanan fluida kerja, dan kecepatan aliran fluida terhadap performa heater. Hal ini penting untuk memastikan kinerja optimal dalam berbagai kondisi operasi.
5. Menganalisis biaya dan dampak lingkungan dari material yang digunakan perlu dilakukan untuk memastikan desain heater yang ekonomis dan ramah lingkungan. Penelitian lebih lanjut dapat mengeksplorasi bahan yang lebih berkelanjutan atau dapat didaur ulang.
6. Selain simulasi termal, pengembangan desain dapat dilakukan dengan metode lain, seperti simulasi aliran fluida (CFD) atau analisis tekanan mekanik. Pendekatan ini dapat menghasilkan desain *heater* yang lebih efisien dan tahan lama.

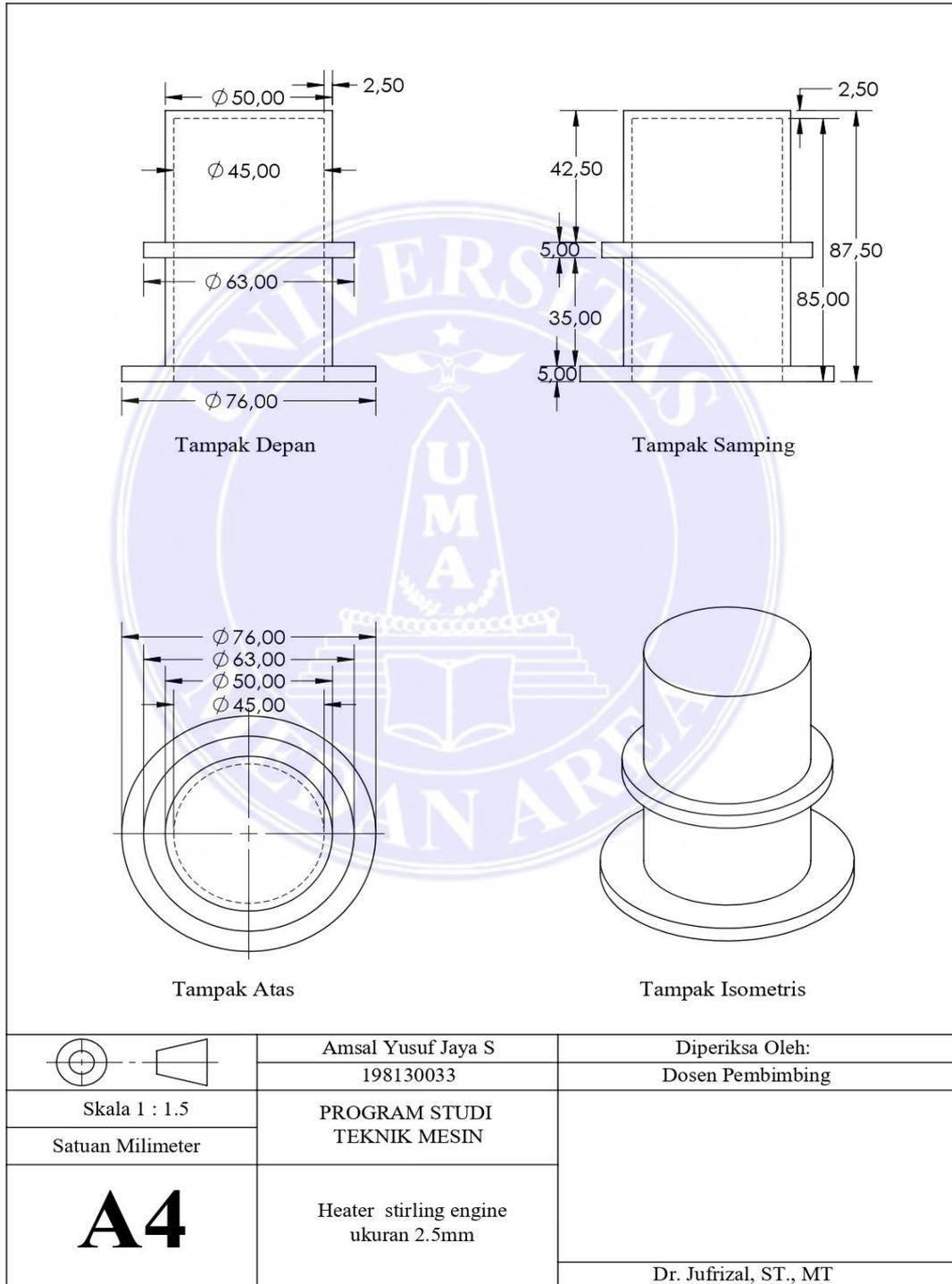
DAFTAR PUSTAKA

- Abuelyamen, A., & Ben-Mansour, R. (2018). Energy efficiency comparison of Stirling engine types (α , β , and γ) using detailed CFD modeling. *International Journal of Thermal Sciences*, 132, 411–423. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.026>
- Bitsikas, P., Rogdakis, E., & Dogkas, G. (2020). CFD study of heat transfer in Stirling engine regenerator. *Thermal Science and Engineering Progress*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100492>
- Dyreby, J., Shumaker, J., E. Schaefer, K., Corey, J., J. Carroll, J., J. Chiara, C., & Nellis, G. (2024). Assessment of the integration of a switched nuclear isomer material with a kinematic Stirling engine. *Applied Thermal Engineering*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121708>
- Hidayah, M. (2022). Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling dengan Variasi Kosumsi Bahan Bakar LPG Burner Performance Test Stirling Engine with Variations in Fuel Consumption. In *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* (Vol. 1, Issue 1).
- Jufrizal, J., Mawardi, M., & Ramadhan, F. (2022). Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling dengan Variasi Tekanan Bahan Bakar. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 1(2). <https://doi.org/10.56862/irajtma.v1i2.18>
- Jufrizal, J., Siregar, Z. H., Saktisah, T. J., Putra, B. K., & Syahputra, M. N. R. (2022). Uji Kinerja Burner Gas LPG Mesin Stirling dengan Variasi Laju Aliran Udara. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 1(2). <https://doi.org/10.56862/irajtma.v1i2.19>
- Jufrizal, Napitupulu, F. H., Ilmi, & Ambarita, H. (2020). Manufacturing and testing prototype of a gamma type Stirling engine for micro-CHP application. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 725(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/725/1/012016>
- Jufrizal, Napitupulu, F. H., Ilmi, Ambarita, H., Supriatno, & Irwanto, M. (2023). Integration of a Gamma-Type Stirling Engine with LPG Cooking Stove for Micro-Scale Combined Heat and Power Generation. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 108(2), 1–16. <https://doi.org/10.37934/arfmts.108.2.116>
- Jufrizal and Napitupulu Farel H. and Ilmi and Ambarita, H. and M. M. (2022). Thermodynamic Analysis of a Gamma - Type Stirling Engine for mCHP Application. In H. and P. S. A. S. and A. M. F. and I. A. Abdollah Mohd Fadzi Bin and Amiruddin (Ed.), *Proceedings of the 7th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICE-SEAM 2021), Melaka, Malaysia* (pp. 225–229). Springer Nature Singapore.
- Kuban, L., Stempka, J., & Tyliczszak, A. (2019). A 3D-CFD study of a Γ -type Stirling engine. In *Energy* (Vol. 169, pp. 142–159). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.009>
- Napitupulu, F. H., Ambarita, H., & Meliala, M. (n.d.). *Ideal Cycle Thermodynamic Analysis For Gamma-Type Stirling Engine*.

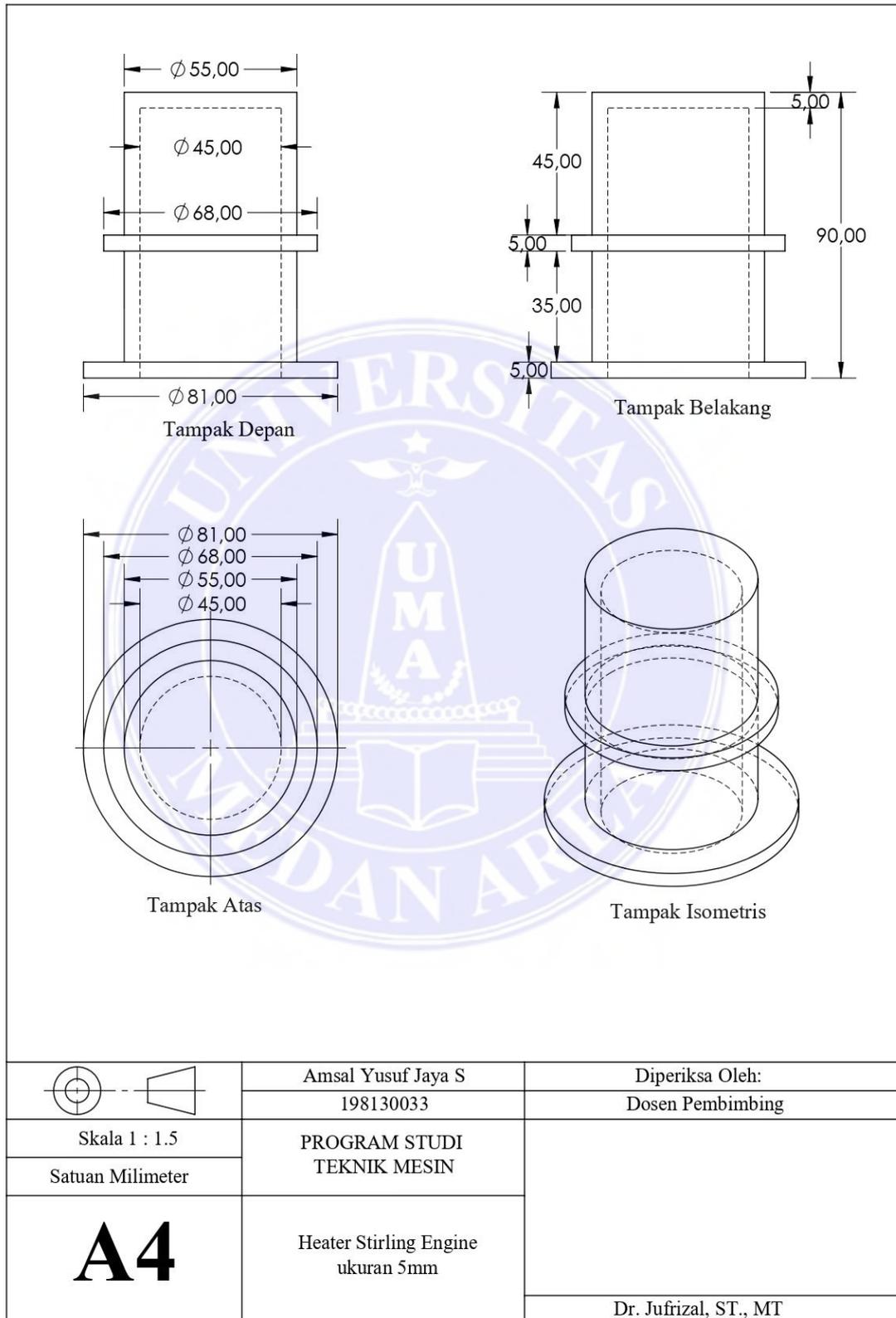
- Prasetyo, E., & Saputra, N. (2019). *Seminar dan Konferensi Nasional Idec Manufaktur Stirling Engine Sebagai Penggerak Genset Berbahan Bakar Gas*.
- Rahmalina, D., Gede, I., Lesmana, E., Suwandi, A., Rahman, R. A., Ramadhan, F. S., & Sugiyanto, K. A. (2021). *Pengembangan Stirling Engine Tipe Piston Bebas Untuk Aplikasi Concentrated Solar Power (CSP)*. 13(1). <https://doi.org/10.24853/jurtek.13.1.101-108>
- Regalado-Rodríguez, N., & Militello, C. (2022). Comparative study of the effects of increasing heat transfer area within compression and expansion chambers in combination with modified pistons in Stirling engines. A simulation approach based on CFD and a numerical thermodynamic model. *Energy Conversion and Management*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115930>
- Ren, S., Gundersen, T., Liu, Z., & Feng, X. (2023). Performance improvement of liquid air energy storage: Introducing Stirling engine and solar energy. *Energy Conversion and Management*, 296, 117666. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117666>
- Salih, S. A., Aljashaami, B. A., Alwan, N. T., Qasim, M. A., Shcheklein, S. E., & Velkin, V. I. (2023). Isothermal thermodynamic analysis investigation of the Stirling engine types (alpha, beta, gamma): A theatrical study. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.069>
- Siregar, Z. H., Hasanah, M., & Agusdiandy, M. D. (2022). Pengaruh Variasi Temperatur Sumber Panas Terhadap Temperatur Udara Dalam Heater Mesin Stirling Effect of Variation in Heat Source Temperature on Air Temperature in Stirling Engine Heater. In *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* (Vol. 1, Issue 1).
- Siregar, Z. H., Jufrizal, J., & Putra, B. K. (2022). Pengaruh Penambahan Regenerator Terhadap Performansi Mesin Stirling Tipe Gamma. *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 8(2), 194. <https://doi.org/10.35308/jmkn.v8i2.5957>
- Thombare, D. G., & Verma, S. K. (2008). Technological development in the Stirling cycle engines. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 12, Issue 1, pp. 1–38). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.001>

LAMPIRAN

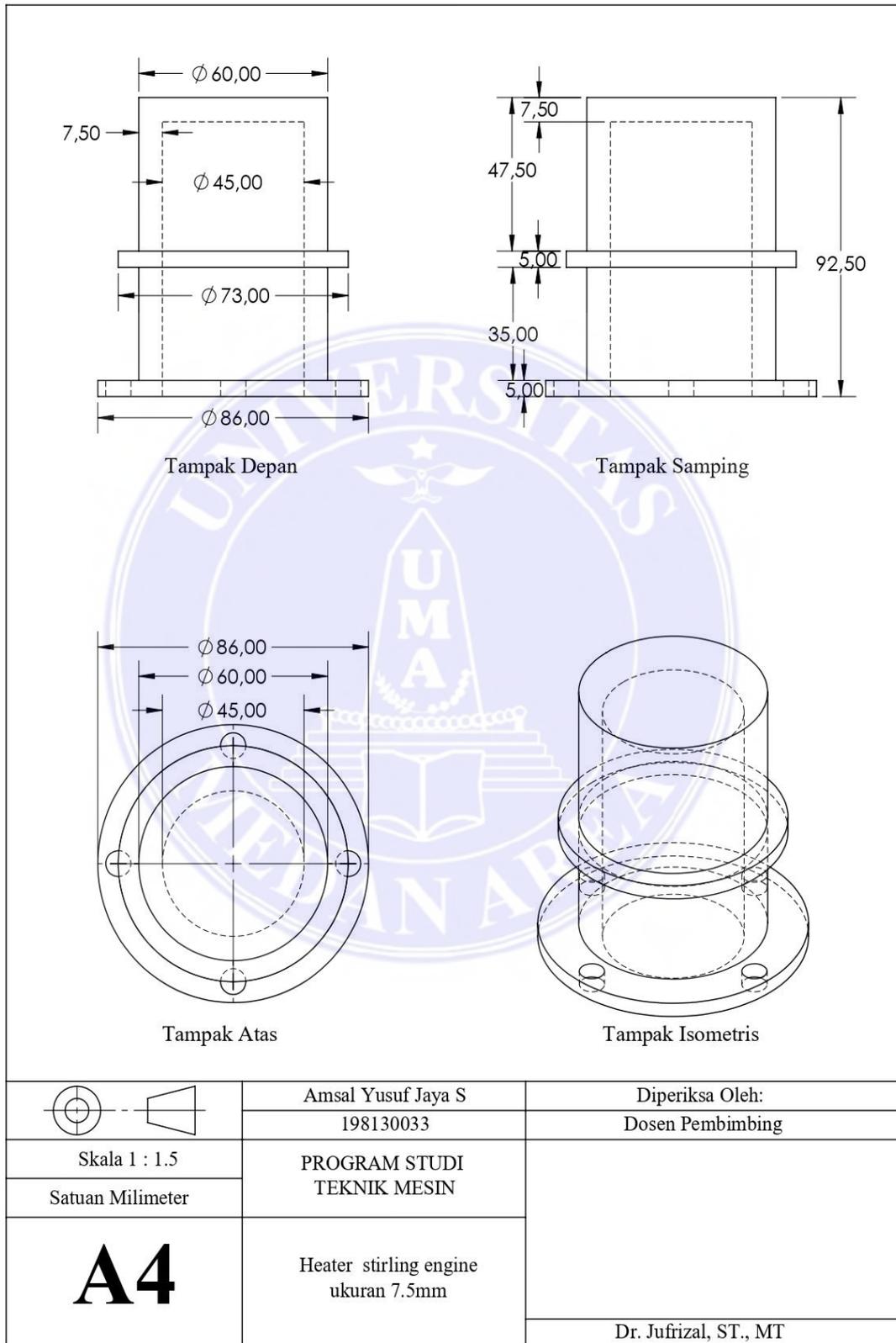
Lampiran 1. Gambar Teknik *Heater* ukuran 2.5mm



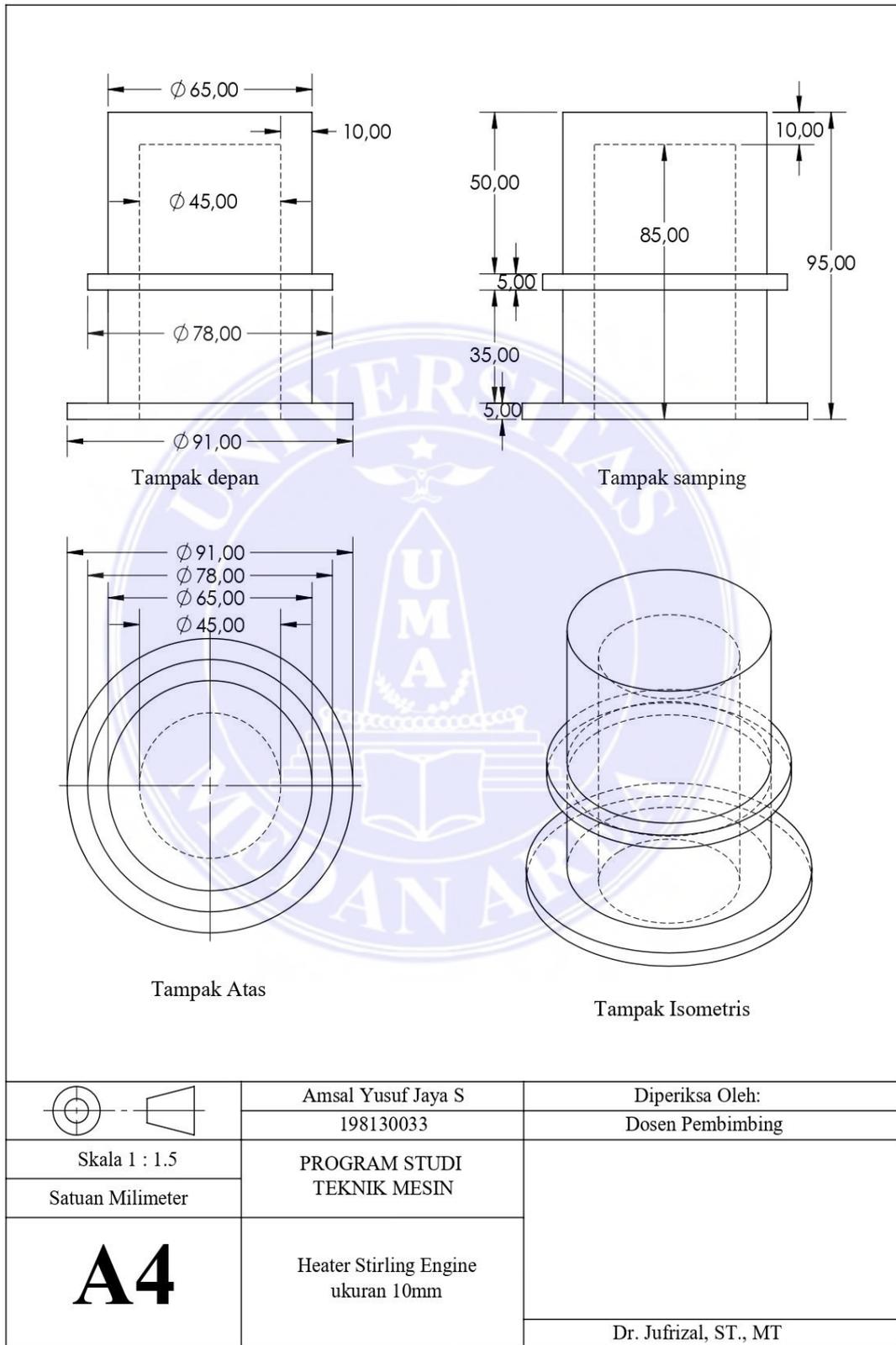
Lampiran 2. Gambar Teknik Heater ukuran 5mm



Lampiran 3. Gambar Teknik Heater ukuran 7.5mm



Lampiran 4. Gambar Teknik Heater ukuran 10mm



Lampiran 5. Gambar Teknik Heater ukuran 12.5mm

