

**PENGARUH BAHAN DAN KETEBALAN DINDING *HEATER*  
TERHADAP TEMPERATUR DAN TEKANAN UDARA YANG  
DIHASILKAN MESIN STIRLING DENGAN METODE  
EKSPERIMEN**

**SKRIPSI**

**OLEH:**

**ANGGI HARAPAN RITONGA  
198130042**



**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 6/8/25

Access From (repository.uma.ac.id)6/8/25

## HALAMAN JUDUL

# **PENGARUH BAHAN DAN KETEBALAN DINDING *HEATER* TERHADAP TEMPERATUR DAN TEKANAN UDARA YANG DIHASILKAN MESIN STIRLING DENGAN METODE EKSPERIMEN**

## SKRIPSI

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

Oleh:

**ANGGI HARAPAN RITONGA  
198130042**

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

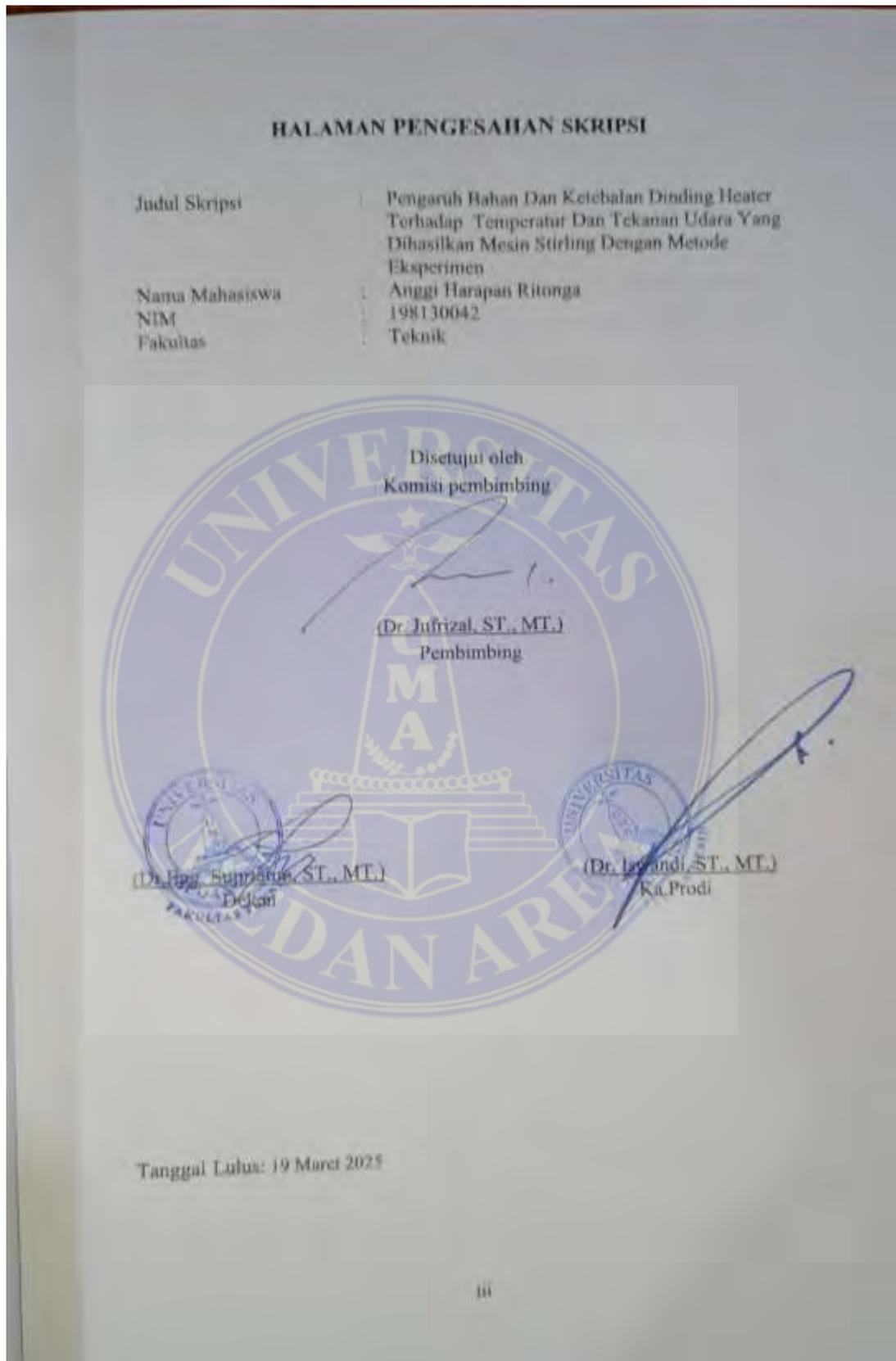
UNIVERSITAS MEDAN AREA

© 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 6/8/25

Access From (repository.uma.ac.id)6/8/25



#### 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, 19 Maret 2025



Anggi Harapan Ritonga  
198130042

## HALAMAN PERSETUJUAN PERNYATAAN PUBLIKASI SKRIPSI

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

Nama : Anggi Harapan Ritonga

NPM : 198130042

Program Studi 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: Pengaruh Bahan Dan Ketebalan Dinding Heater Terhadap Temperatur Dan Tekanan Udara Yang Dihasilkan Mesin Stirling Dengan Metode Eksperimen, beserta perangkat yang ada. Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), menawat, dan memublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Medan, 19 Maret 2025

Yang menyatakan



( Anggi Harapan Ritonga )  
198130042

## ABSTRAK

Tujuan penelitian ini yaitu (1) Menganalisis pengaruh jenis bahan dinding heater terhadap temperatur dan tekanan udara yang dihasilkan oleh mesin stirling engine. (2) Menentukan pengaruh ketebalan dinding heater terhadap performa temperatur dan tekanan mesin stirling engine, dan (3) Mengidentifikasi kombinasi bahan dan ketebalan dinding heater yang paling optimal untuk mencapai temperatur dan tekanan udara yang maksimal. Metode yang digunakan ialah metode kualitatif. Bahan yang digunakan tabung gas 3kg, pompa angin. Alat yang digunakan heater, timbangan digital, flow meter, regulator, pipa stik, burner, stopwatch, thermometer, thermowell NPT stainless, kabel thermocouple sensor, dan thermogun. Hasil penelitian ini ialah Dimensi heater yaitu dengan berbahan besi baja carbon sm5c, diameter dalam dengan ukuran 45 mm, diameter luar dengan ukuran 55 mm, diameter tutup 16 mm Tinggi dengan ukuran 90 mm, dan ketebalan dengan ukuran 4 mm. Dimensi heater stainless steel 304, diameter dalam dengan ukuran 45 mm, diameter luar 55 mm, diameter tutup 16 mm, tinggi dengan ukuran 90mm, dan ketebalan dengan ukuran 3mm. Nilai rata-rata berbahan besi baja carbon sm5c, T1 sebesar 720,8°C, T2 rata-rata sebesar 33,3°C, T3 rata-rata sebesar 510,8°C. Dan nilai rata-rata T4 sebesar 406,8°C. Dan nilai rata-rata berbahan stainless steel 304, T1 sebesar 748,6°C, T2 rata-rata sebesar 42,1°C, T3 rata-rata sebesar 334,5°C, dan nilai rata-rata T4 sebesar 316,3°C. Dengan pengujian selama 30 menit dengan pencatatan waktu T1 T2 selama persatu menit sekali, dan pencatatan T3 T4 selama perlima menit sekali untuk mengetahui perubahan suhu yang di dapat.

**Kata kunci:** heater mesin stiring, pengaruh ketebalan heater.

### ABSTRACT

The purpose of this research is (1) To analyze the effect of heater wall material on the temperature and air pressure produced by the Stirling engine, (2) To determine the effect of the heater wall thickness on the temperature and pressure performance of the Stirling engine, and (3) To identify the optimal combination of material and wall thickness that achieves maximum temperature and air pressure. The method used is qualitative. The materials used include a 3kg gas cylinder and an air pump. The tools used include a heater, digital scale, flow meter, regulator, pipe stick, burner, stopwatch, thermometer, stainless steel NPT thornwell, thermocouple sensor cables, and thermogun. The results of this research showed the heater dimensions, made of SM5C carbon steel, with an inner diameter of 45 mm, outer diameter of 55 mm, cap diameter of 16 mm, height of 90 mm, and thickness of 4 mm. The heater made of 304 Stainless Steel has an inner diameter of 45 mm, outer diameter of 55 mm, cap diameter of 16 mm, height of 90 mm, and thickness of 3 mm. The average temperature values for the SM5C carbon steel material are  $T_1 = 720.8^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 33.3^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3 = 510.8^{\circ}\text{C}$ , and  $T_4 = 406.8^{\circ}\text{C}$ . For the 304 Stainless Steel material, the average values are  $T_1 = 748.6^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 42.1^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3 = 334.5^{\circ}\text{C}$ , and  $T_4 = 316.3^{\circ}\text{C}$ . The tests were conducted for 30 minutes with temperature readings taken every minute for  $T_1$  and  $T_2$ , and every five minutes for  $T_3$  and  $T_4$  to observe temperature changes.

**Keywords:** Stirling Engine Heater, Effect Of Heater Thickness.



## RIWAYAT HIDUP

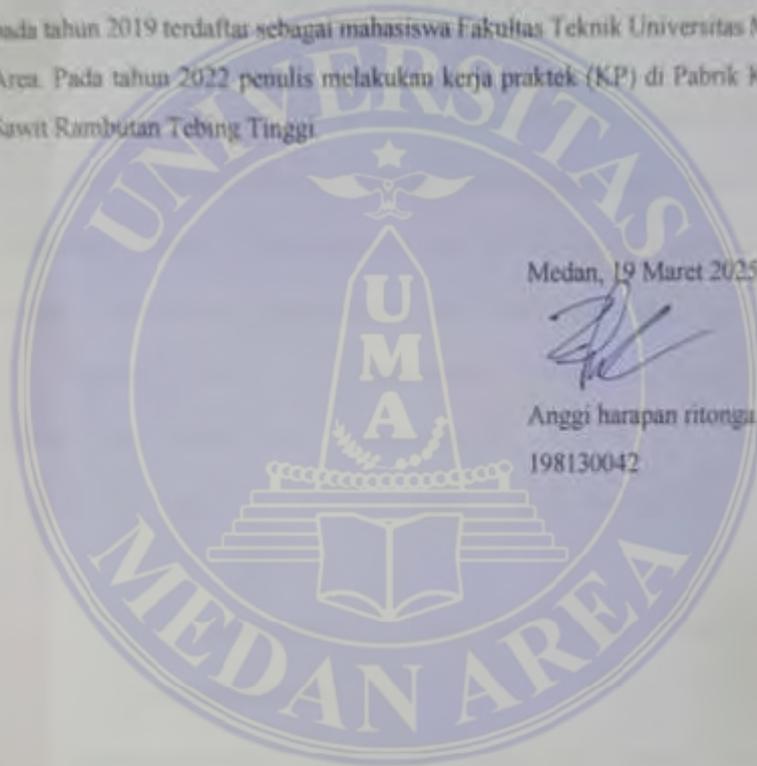
Penulis dilahir di Tanjung Raya, Kab. Labuhan Batu Selatan, Prov. Sumatra Utara pada tanggal 08 April 1999, dari ayah saya bernama Rustam Ritonga dan ibunda saya bernama Paridah Hamun Rambe. Penulis merupakan anak ketiga dari empat bersaudara.

Tahun 2017 penulis lulus dari SMK Swasta Pernda Rantau Prapat dan pada tahun 2019 terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area. Pada tahun 2022 penulis melakukan kerja praktek (KP) di Pabrik Kelapa Sawit Rambutan Tebing Tinggi.

Medan, 19 Maret 2025

Anggi harapan ritonga

198130042

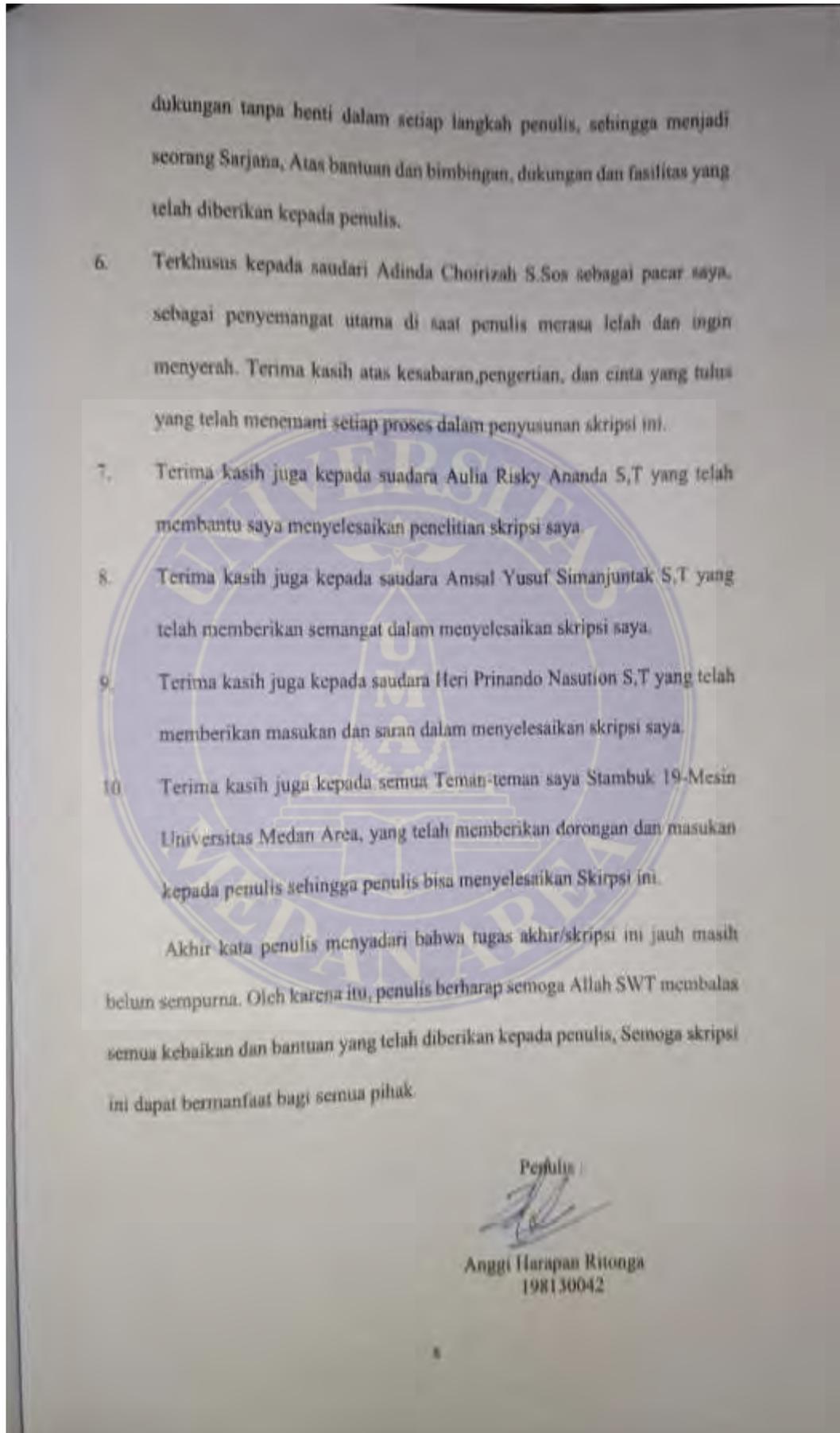


## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala karuniaNya 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 eksperimen.”

Adapun tujuan penelitian ini adalah salah satu syarat untuk mahasiswa dalam menyelesaikan studinya di Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area. Penulis memahami bahwa tanpa dorongan, doa dan bimbingan dari semua pihak, akan sangat sulit untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas dorongan dan kontribusinya kepada.

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc. Selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Bapak Dr. Eng.Supriatno, ST., MT. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
3. Bapak Dr. Iswandi, ST., MT. Selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
4. Bapak Dr. Jufrizal, ST., MT. Selaku Dosen Pembimbing Skripsi saya, yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berarti.
5. Teristimewah untuk Ayahanda Rustam Ritonga dan Ibunda Farida Hanum Rambe sebagai orang tua saya yang selalu memberikan cinta, doa, dan



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PERNYATAAN PUBLIKASI SKRIPSI .....	v
ABSTRAK .....	vi
RIWAYAT HIDUP.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR NOTASI .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Hipotesis Penelitian .....	6
1.5 Manfaat Penelitian .....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Mesin Stirling.....	7
2.2 Jenis-jenis Mesin Stirling .....	11
2.3 Bagian-bagian Mesin Stirling.....	16
2.2 Ketebalan Dinding Heater Pada Mesin Stirling.....	20
2.4 Analisa Termodinamika Mesin Stirling .....	23
2.5 Perhitungan untuk Analisis Heater.....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	27
3.2 Bahan dan Alat.....	28
3.3 Metode Penelitian .....	33
3.4 Populasi dan Sampel.....	34
3.5 Prosedur Kerja .....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	38
4.1 Hasil .....	38
4.2 Pembahasan.....	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
5.1 Simpulan .....	101
5.2 Saran.....	102
DAFTAR PUSTAKA .....	103
LAMPIRAN .....	104

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jadwal kegiatan penelitian	27
Tabel 4.1. Spesifikasi Heater Mesin Stirling	38
Tabel 4.2. Spesifikasi Heater Mesin Stirling	39
Tabel 4.3. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,1 Bar	39
Tabel 4.4. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,2 Bar	42
Tabel 4.5. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,3 Bar	44
Tabel 4.6. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,4 Bar	47
Tabel 4.7. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,5 Bar	50
Tabel 4.8. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,1 Bar	53
Tabel 4.9. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,2 Bar	56
Tabel 4.10. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,3 Bar	59
Tabel 4.11. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,4 Bar	62
Tabel 4.12. Pengujian Temperature Heater Tekanan 0,5 Bar	64
Tabel 4.13. Pengaruh waktu terhadap Suhu Udara berbahan Besi Baja Carbon Sm5c	95
Tabel 4.14. Pengaruh waktu terhadap Suhu Udara Berbahan Stainless Steel 304	97
Tabel 4.15. Pengaruh waktu terhadap Tekanan Udara Berbahan Besi Baja Carbon Sm5c	98
Tabel 4.16. Pengaruh waktu terhadap Tekanan Udara Berbahan Stainless Steel 304	100

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Diagram P-V dan T-s Pada Siklus Stirling	11
Gambar 2.2. Mesin Stirling Alpha	12
Gambar 2.3. Mesin Stirling tipe Beta	13
Gambar 2.4. Mesin Stirling tipe Gamma	14
Gambar 3.1. Tabung Gas LPG 3Kg	28
Gambar 3.2. Pompa Angin	29
Gambar 3.3. Heater	29
Gambar 3.4. Regulator dan selang SNI	30
Gambar 3.5. Stopwatch	30
Gambar 3.6. Thermometer controller UT320D	31
Gambar 3.7. Thermowell NPT Stainless	31
Gambar 3.8. Thermogun	32
Gambar 3.9. Kabel Thermocouple Sensor	32
Gambar 3.10. Pressure Gauge	33
Gambar 3.11. Titik titik pengujian temperature	34
Gambar 3.12. Diagram alir penelitian untuk efesiensienergi dan waktu	37
Gambar 4.1. Grafik Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,1 Bar berbahan Besi	67
Gambar 4.2. Grafik Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,2 bar berbahan besi	69
Gambar 4.3. Grafik temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,3 Bar Berbahan Besi	70
Gambar 4.4. Grafik Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,4 Bar Berbahan Besi	72
Gambar 4.5. Grafik Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,5 Bar Berbahan Besi	73
Gambar 4.6. Grafik Temperature dan TekananUdara di Heater pada kondisi 0,1 Bar Berbahan Stainless Steel 304	74
Gambar 4.7. Grafik Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,2 Bar Berbahan Stainless Steel 304	76
Gambar 4.8. Grafik Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,3 Bar berbahan Stainless Steell 304	78
Gambar 4.9. Grafik Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,4 Bar berbahan Stainless Steel 304	80
Gambar 4.10. Grafik Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,5 Bar berbahan Stainless Steel 304	82
Gambar 4.11. Grafik perbedaan Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,1 Bar berbahan Besi Baja Carbon Sm5c dan Stainless Steel 304	84
Gambar 4.12. Grafik perbedaan Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,2 Bar berbahan Besi Baja Carbon Sm5c dan Stainless Steel 304	86
Gambar 4.13. Grafik perbedaan Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,3 Bar berbahan Besi Baja Carbon Sm5c dan Stainless Steel 304	88
Gambar 4.14. Grafik perbedaan Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,4 Bar berbahan Besi Baja Carbon Sm5c dan Stainless Steel 304	90
Gambar 4.15. Grafik perbedaan Temperature dan Tekanan Udara di Heater pada kondisi 0,5 Bar berbahan Besi Baja Carbon Sm5c dan Stainless Steel 304	92

Gambar 4.16. Grafik pengaruh waktu terhadap Suhu udara berbahan Besi baja Carbon Sm5c dengan Tekanan 0,1 - 0,5 Bar	94
Gambar 4.17. Grafik pengaruh waktu terhadap Suhu udara berbahan Stainless Steel dengan tekanan 0,1 - 0,5 Bar	96
Gambar 4.18. Grafik pengaruh waktu terhadap Tekanan Udara berbahan Besi baja Carbon Sm5c dengan Tekanan 0,1 - 0,5 Bar	97
Gambar 4.19. Grafik pengaruh waktu terhadap Tekanan Udara berbahan Stainless Stell dengan tekanan 0,1 - 0,5 Bar	99



## DAFTAR NOTASI

K	=	Konduktivitas termal (W/m.K)
A	=	Luas Batang / Penampang ( $m^2$ )
L	=	panjang batang (M)
Q	=	banyak kalor (J)
$\Delta$	=	Perubahan Suhu (K)
T	=	Selang Waktu (S)
H	=	Kalor yang merambat persatuan waktu (J/S)



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

*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).

Motor bakar adalah mesin kalor atau mesin konversi energi yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi mekanik berupa kerja (Gultom et al. 2021). Perkembangan motor bakar pada saat ini menuju ke arah yang ramah lingkungan dan memfokuskan pada pemakaian biaya yang lebih rendah. Hal ini dimungkinkan karena adanya kenaikan harga bahan bakar minyak (BBM), kelangkaan sumber energi, sampai kepedulian tentang masalah lingkungan seperti pemanasan global.

Mesin *stirling* adalah mesin pembakaran *eksternal* yang menggunakan

udara atau gas (helium, hydrogen, nitrogen, methanol dan sebagainya) sebagai fluida kerjanya dengan prinsip regeneratif siklus tertutup (*closed-cycle regenerative*) (Yuliani Ika 2013).

Mesin *stirling* memiliki tiga tipe, antara lain mesin *stirling* tipe *alpha*, mesin *stirling* tipe *beta*, dan mesin *stirling* tipe *gamma* (Rahmalina et al. 2021). Perkembangan mesin ini tidak begitu pesat dikarenakan ukuran mesin yang cukup besar dengan daya yang dihasilkan sangat kecil. Namun, akibat dampak penggunaan energi fosil terhadap lingkungan pengembangan mesin *stirling engine* menjadi suatu pilihan kembali. Prinsip kerja *stirling engine* sendiri memanfaatkan perubahan tekanan dan volume akibat dari perbedaan temperature pada sistem tertutup. Panas yang diberikan pada salah satu cylinder yang memiliki temperature yang lebih dingin. *Stirling engine* terdiri dari beberapa komponen utama seperti *hot cylinder*, *cold cylinder*, *displacer*, *cooling fins*, *piston rod*, *con-rod displacer*, *power piston cylinder*, *power piston*, *con-rod piston*, *flywheel* dan *main shaft*. Melakukan perancangan *stirling engine* dengan memanfaatkan energi terbarukan sebagai sumber pembakarannya. Penelitian terhadap mesin *stirling* juga pernah diterapkan terhadap lingkungan angkatan laut dan pengeboran lepas pantai dengan menggunakan energi terbarukan sebagai sumber panasnya (Siregar et al. 2022).

Mesin *stirling* merupakan mesin kalor yang mempunyai cara kerja mengkompresi dan mengekspansi fluida pada suhu yang berbeda yang menyebabkan terjadinya perubahan energi panas menjadi energi mekanik. Listrik dapat dihasilkan ketika fluida panas yang masuk ke dalam mesin *stirling* menggerakkan komponen penggerak mesin *stirling* (*displacer* dan *piston*) yang

tersambung ke sebuah generator. Mesin stirling memiliki tiga tipe, antara lain mesin stirling tipe alpha, mesin stirling tipe beta, dan mesin stirling tipe gamma.

Mesin *stirling gamma* hanyalah sebuah mesin *stirling beta*, dimana piston tenaga sudah terpasang di dalam silinder yang terpisah di samping silinder piston displacer, tapi masih terhubung ke roda gila sama. Gas dalam dua silinder dapat mengalir bebas karena mereka berada dalam satu tubuh. Mekanis ini cukup sederhana dan sering digunakan di dalam mesin *stirling* multi-silinder (Nazila 2016).

Mesin *Stirling* tipe *gamma* Generasi Pertama mCHPSE 012018 diproduksi dan diuji untuk sistem mikro-CHP dengan volume kompresi 106 cc. Mesin diuji dengan udara dan menggunakan bahan bakar LPG sebagai sumber panas. Tekanan udara pada awal proses kompresi dianggap sebagai tekanan gas ideal sebesar 0,987 bar. Karakteristik kerja mesin terbaik diperoleh pada pengujian pertama dengan perbedaan suhu pada sisi panas dan dingin rata-rata sebesar 74,7°C. Output maksimum dan output daya diperoleh pada tekanan pengisian 1,82 bar pada 242,6 rpm dan 12,9 W. Hasil yang ditemukan adalah mendorong untuk memulai prototipe mesin *stirling* tipe gamma untuk aplikasi mikro-CHP (Jufrietal et al. 2023).

Mesin *stirling* generasi ke-2 mCHPSE 012019 dengan pendekatan analisis termodinamika siklus ideal. Dengan menggunakan Mesin *stirling* tipe gamma dengan fluida kerja udara dan tekanan preload gas kerja adalah tekanan atmosfer. Mesin ini memiliki volume maksimum 0,000201 m<sup>3</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa efisiensi termal rata-rata adalah 24,6%. Rata-rata putaran mesin dan tenaga yang dihasilkan adalah 415 rpm dan 37,9 W. Rata-rata tekanan

maksimum yang dihasilkan selama proses pengujian adalah 2,446 bar (Jufriзал et al. 2020).

Mesin *stirling* generasi ke-3 mCHPSE 012020 ini menggunakan *burner* yang dimodifikasi dan dianalisa dengan metode *water boiling test*. Tujuan penelitian adalah mengetahui efisiensi termal, laju aliran bahan bakar dan daya *burner* LPG mesin *stirling* dengan variasi konsumsi bahan bakar. Variasi laju aliran bahan bakar LPG dilakukan dengan menggunakan alat pemutar dan pematik kompor gas LPG konvensional yang memiliki pengaturan minimum, menengah, dan maksimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari ketiga variasi laju aliran massa bahan bakar pada kondisi minimum memiliki efisiensi yang lebih tinggi dan konsumsi bahan bakar rendah tetapi daya *burner* yang dihasilkan sangat rendah yaitu sebesar 1,714 kW dibandingkan dengan kondisi menengah dan maksimum. Nilai parameter efisiensi termal pada kondisi minimum yaitu sebesar 49,91% dan konsumsi bahan bakar 0,000036 kg/detik atau setara dengan 1296 gram/jam. Daya burner maksimum yang dihasilkan selama pengujian adalah 4,487 kW (Hidayah 2022).

Pada Mesin *stirling*, *heater* merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai penukar panas dari sumber panas ke fluida kerja. Kemampuan *heater* pada mesin *stirling* sangat dipengaruhi oleh laju perpindahan panas. Merujuk dari beberapa penelitian sebelumnya oleh tim mCHPSE dan tinjauan referensi terkait *heater* yang secara teori merupakan jenis penukar panas maka penulis tertarik untuk menguji *heater* pada mesin *stirling* dengan melakukan variasi temperatur panas.

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah sangat luas pencakupannya dan perlu untuk dirumuskan apa saja yang akan dibahas. Berdasarkan uraian dari latar belakang, perumusan masalah dalam penelitian ini ialah:

1. Bagaimana pengaruh bahan dinding heater berbahan baja karbon SM5C dengan ketebalan 4 mm terhadap temperatur dan tekanan udara yang dihasilkan oleh mesin Stirling?
2. Bagaimana pengaruh bahan dinding heater berbahan stainless steel dengan ketebalan 3 mm terhadap temperatur dan tekanan udara pada mesin Stirling?
3. Apakah terdapat hubungan antara kombinasi bahan dan ketebalan dinding heater dengan performa temperatur dan tekanan yang dihasilkan?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh jenis bahan dinding heater terhadap temperatur dan tekanan udara yang dihasilkan oleh mesin stirling engine.
2. Menentukan pengaruh ketebalan dinding heater terhadap performa temperatur dan tekanan mesin stirling engine.
3. Mengidentifikasi kombinasi bahan dan ketebalan dinding heater yang paling optimal untuk mencapai temperatur dan tekanan udara yang maksimal.

#### 1.4 Hipotesis Penelitian

Sebelum melakukan penelitian, dasar atau landasan dalam proses penelitian ini didapat dari buku dan jurnal yang terkait. Maka dari itu hipotesis penelitian ini adalah:

1. Dinding heater yang terbuat dari baja karbon SM5C dengan ketebalan 4 mm menghasilkan temperatur dan tekanan udara yang berbeda dibandingkan dengan dinding heater dari stainless steel dengan ketebalan 3 mm.
2. Heater berbahan stainless steel dengan ketebalan 3 mm cenderung menghasilkan temperatur dan tekanan udara yang lebih tinggi dibandingkan dengan heater berbahan baja karbon SM5C dengan ketebalan 4 mm, karena konduktivitas termal stainless steel yang lebih baik.
3. Perbedaan bahan dan ketebalan dinding heater memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja temperatur dan tekanan udara mesin Stirling.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah:

1. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi studi lebih lanjut mengenai pemilihan bahan untuk mesin Stirling yang lebih efisien.
2. Mesin Stirling yang lebih efisien akan membutuhkan lebih sedikit bahan bakar untuk menghasilkan energi, yang berkontribusi pada pengurangan emisi karbon.
3. Penelitian ini mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan yang ramah lingkungan, serta berperan dalam upaya mitigasi perubahan iklim.

## BAB II

### TINJAUN PUSTAKA

#### 2.1 Mesin Stirling

Mesin stirling ditemukan oleh Robert Stirling pada tahun 1816 di Skotlandia. mesin stirling merupakan mesin pembakaran luar yang menggunakan energi termal (panas) yang berasal dari sumber panas kemudian di transfer ke heater. Mesin stirling berdasarkan bentuk susunan silinder terdiri dari tiga tipe yaitu Alpa ( $\alpha$ ), Beta ( $\beta$ ) dan Gamma ( $\gamma$ ) (Hidayah 2022).

Mesin *Stirling* merupakan teknologi lama yang dikembangkan kembali pada zaman ini. Teknologi ini kembali dikembangkan karena dibutuhkan teknologi yang ramah lingkungan, sumber energi fleksibel, dan efisiensi tinggi. Telah diketahui bahwa secara teori, Mesin *Stirling* merupakan teknologi yang memiliki efisiensi mendekati efisiensi *Carnot* dengan proses isothermal dan isokhorik. Teknologi ini mengkonversi energi panas menjadi energi mekanik. Dari energi mekanik dapat dikonversi menjadi energi listrik jika dihubungkan pada dinamo generator listrik.

Cara kerja mesin ini memanfaatkan sifat dasar Udara yang akan memuai jika dipanaskan dan akan menyusut jika didinginkan. Dengan demikian akan terjadi siklus pemuaiian dan penyusutan sehingga sebuah mesin dapat berputar. Berdasarkan pengertian mesin stirling dapat disimpulkan bahwa mesin stirling akan bekerja atau bergerak akibat adanya perbedaan suhu yaitu panas dan dingin. Perbedaan suhu yang terjadi akan mengakibatkan perbedaan tekanan dimana

ketika tekanan semakin besar maka akan dapat menggerakkan piston. Piston yang telah dihubungkan pada poros engkol kemudian bergerak secara terus menerus sehingga dapat menggerakkan roda (Barry and Anoi 2022).

Mesin-mesin ini bekerja dengan memanfaatkan sifat gas yang dipanaskan akan memuai kemudian saat didinginkan gas akan menyusut volumenya. Salah satu contoh siklus tertutup yang dapat digunakan dalam merancang mesin yang ramah lingkungan Mesin Stirling. Saat ini dalam pengembangan Mesin Stirling untuk kebutuhan produksi massal baru mampu menghasilkan daya terbesar mencapai 3 kilowatt listrik. Mesin-mesin Stirling yang berdaya besar pada umumnya menggunakan volume kecil namun dengan tekanan puluhan bar. Mesin seperti ini harus memiliki teknologi material dan manufaktur yang tinggi. Mesin- mesin ini mulai dikembangkan di Eropa dan Amerika dikarenakan memiliki potensi yang cukup besar layaknya panel solar-sel untuk menghasilkan energi listrik bagi kebutuhan rumah tangga (Zakaria, Priadythama, and Budiyanto 2013).

### 2.1.1 Prinsip Kerja Mesin *Stirling Engine*

*Stirling engine* adalah sebuah mesin kalor regenerasi pada siklus tertutup, berfluida kerja berupa udara atau gas yang menggunakan pembakaran luar atau eksternal. Prinsip kerja mesin *stirling* itu sendiri bekerja dengan dasar yang sederhana dari proses pemuaian (ekspansi) dan penyusutan (kompresi) misalkan pada sebuah kaleng (anggap saja silinder) yang ditutup dengan karet balon. Dari kedua proses tersebut digabungkan menjadi satu (ekspansi dan kompresi) pada ujung silinder yang berbeda dan diantaranya diletakkan piston yang memiliki ukuran kecil dari dinding kaleng (silinder). Udara dapat melewati celah piston

dengan volume yang tetap serta terdapat perbedaan suhu yang cukup, ketika dipancing dengan sedikit gerakan ke atas, maka terjadilah sebuah coupling gerakan antara ekspansi dan kompresi. Piston akan naik dan turun secara bergantian dan bila dilihat kondisi termal, maka di dalam silinder terjadi sebuah siklus termal antara ekspansi dan kompresi sebuah mesin kalor regenerasi panas pada siklus tertutup yang menggunakan pembakaran luar atau eksternal. Dari gerakan yang dihasilkan oleh karet dan piston yang berlawanan, maka dibuat sebuah mekanisme engkol yang mengkonversi dari gerakan piston dan karet tersebut menjadi gerakan. Ketika mekanisme engkol telah dibuat mesin tidak akan bisa berjalan atau berputar dengan sendirinya karena udara panas akan terus menekan.

Hukum termodinamika I dan II digunakan serta berlaku untuk semua mesin panas/ thermal engine termasuk mesin Stirling. Ketika sebuah mesin memenuhi semua aspek dalam Hukum termodinamika I dan II maka segala hal dalam mesin itu dapat dijelaskan. Pemahaman dan keyakinan mengenai hukum termodinamika diperlukan untuk dapat memahami secara mendalam mengenai mesin panas regeneratif.

Proses yang terjadi pada mesin panas sederhana bagaimanapun masih rumit sehingga tidak mungkin untuk menghitung secara tepat apa yang terjadi pada mesin. Sebaliknya dibuatlah model teoritis yang diasumsikan, didalamnya mengandung berbagai keadaan yang diidealisasikan sejauh yang diperlukan untuk membuat analisis dari kemungkinan pengoperasiannya. Dalam hal ini, pengoperasian hampir seluruh jenis mesin dapat disimulasikan dengan menggunakan asumsi dari urutan berulang proses termodinamika yang biasa disebut siklus. Masing-masing proses diasumsikan menjadi salah satu fungsi

berubah dalam fungsi termodinamika yang terjadi pada fluida bergerak dari satu kondisi ke kondisi lain, namun ada satu fungsi yang dipertahankan konstan. Kondisi termodinamika penting yaitu tekanan (P), volume (V), temperatur (T), energi dalam (U), entalpi (W) dan entropi (S).

Sebuah siklus dapat dipresentasikan dalam gambar dengan beberapa cara. Dua bentuk presentasi yang sangat membantu dalam analisis operasi mesin panas yaitu diagram tekanan-volume (P-V) dan diagram temperatur-entropi (T-S). Kedua diagram tersebut sangatlah penting dikarenakan area didalam diagram P-V mengambarkan kerja yang dihasilkan dan area didalam diagram T-S menggambarkan proses perpindahan panas.

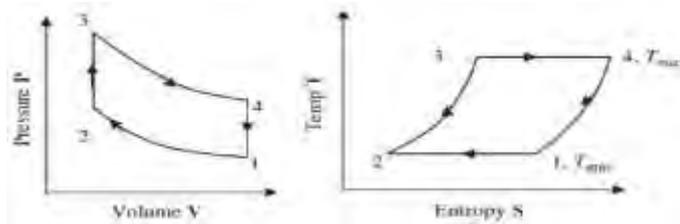
*Stirling engine* adalah mesin thermal dengan beberapa piston yang di dalamnya terdapat gas kerja dengan masa konstan (seperti gas, udara, helium atau hidrogen). Secara teoritis, siklus kerja termodinamika dari mesin ini terdiri dari dua proses isothermal dan dua proses isohoric atau lebih terkenal dengan siklus Stirling (Riyadi 2016). Yang membedakan siklus Stirling dengan siklus-siklus yang lainnya yaitu adanya dua proses regenerasi volume konstan. Regenerasi yaitu proses dimana panas ditransferkan ke alat penyimpan energi panas (biasa disebut regenerator) saat salah satu bagian proses dari siklus dan ditransferkan kembali ke fluida kerja pada saat salah satu bagian dari proses siklus lainnya.

Empat proses yang benar-benar reversibel berlangsung dalam siklus stirling yaitu: 1 – 2 T = Ekspansi konstan (penambahan panas dari sumber luar).

2 – 3 V = Regenerasi konstan (panas internal ditransferkan dari fluida kerja ke regenerator).

2 – 4 T= kompresi konstan (panas dibuang ke pembuangan luar).

4 – 1 V = regenerasi konstan (panas internal ditransferkan kembali dari regenerator ke fluida kerja).



Gambar 2.1. Diagram P-V dan T-s Pada Siklus Stirling

## 2.2 Jenis-jenis Mesin Stirling

Mesin Stirling adalah sebuah mesin panas yang beroperasi secara kompresi siklik (berulang-ulang) dan melalui pemuaihan udara atau gas (gaya fluida), pada tingkat suhu yang berbeda sehingga ada konversi energi panas menjadi energi mekanik (termodinamika).

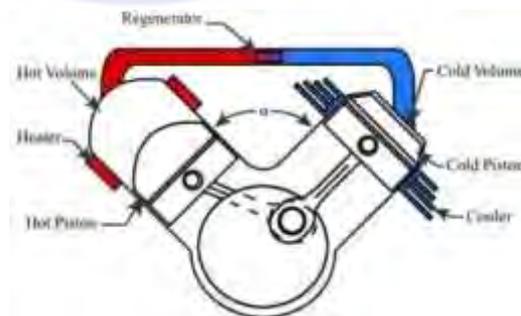
Mesin Stirling didefinisikan sebagai mesin regenerasi udara panas siklus tertutup. Dalam konteks ini, siklus tertutup berarti bahwa fluida kerjanya secara permanen terkurung di dalam sistem. Mesin Stirling disebut juga mesin udara dengan model mesin pembakaran luar siklus tertutup. Seperti mesin uap, mesin Stirling secara tradisional diklasifikasikan sebagai mesin pembakaran eksternal, seperti transfer panas dari tabung pembakaran (tabung yang dibakar dari luar). Ini berbeda dengan mesin pembakaran internal, dimana masukan panas didapatkan dari pembakaran bahan bakar didalam tabung pembakaran. Tidak seperti mesin uap (atau biasa disebut sebuah siklus rankine engine) penggunaan zat cair dan gas, digunakan untuk menghasilkan gaya mekanik, mesin Stirling didesain sedemikian rupa agar jumlah gas tetap secara permanen. Mesin Stirling bekerja karena adanya ekspansi gas ketika dipanaskan dan diikuti

kompresi gas ketika didinginkan.

Mesin itu berisi sejumlah gas yang dipindahkan antara sisi dingin dan panas terus-menerus. Perpindahan gas ini dimungkinkan karena adanya piston displacer yang memindahkan gas antara dua sisi dan piston power mengubah volume internal karena ekspansi dan kontraksi gas. Piston yang berpindah disebut sebagai regenerator yang dapat membangkitkan kembali udara (Prasetyo and Widyartono 2020).

### 2.2.1 Mesin Stirling tipe Alfa

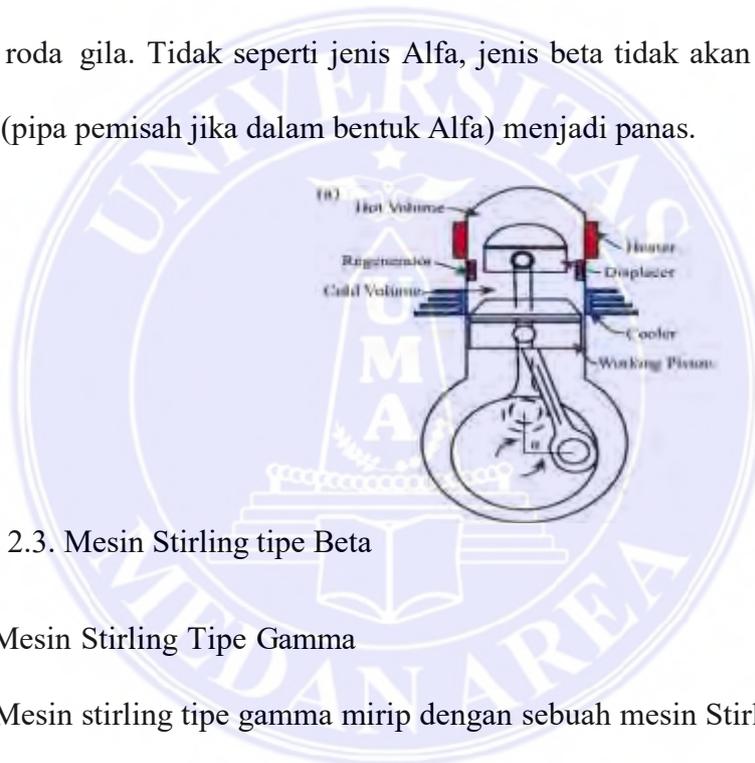
Mesin Stirling Alfa berisi kekuatan dua piston dalam silinder yang terpisah, satu berada didingin dan satunya berada dipanas. Silinder panas terletak di dalam suhu tinggi penghantar panas (silinder yang dibakar) dan silinder dingin terletak di dalam displacer suhu rendah. Jenis mesin ini memiliki rasio power- tovolume tinggi, namun memiliki masalah teknis karena apabila suhu piston tinggi biasanya panas akan merambat ke pipa pemisah silinder. Dalam prakteknya, piston ini biasanya membawa isolasi yang cukup besar untuk bergerak jauh dari zona panas dengan mengorbankan beberapa ruang mati tambahan.



Gambar 2.2. Mesin Stirling Alfa

### 2.2.2 Mesin Stirling Tipe Beta

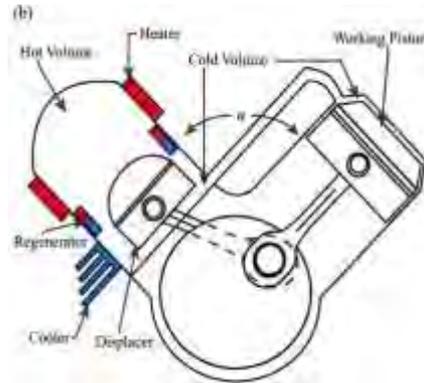
Mesin Stirling beta memiliki piston daya tunggal yang diatur dalam silinder yang sama pada poros yang sama sebagai displacer piston. Silinder Piston displacer yang cukup longgar hanya berfungsi untuk antar jemput gas panas dari silinder panas ke silinder dingin. Ketika silinder dipanaskan gas mendorong dan memberikan piston kekuatan. Ketika piston terdorong ke dingin (titik bawah) silinder mendapat momentum dari mesin, dan ditingkatkan dengan roda gila. Tidak seperti jenis Alfa, jenis beta tidak akan menyebabkan isolator (pipa pemisah jika dalam bentuk Alfa) menjadi panas.



Gambar 2.3. Mesin Stirling tipe Beta

### 2.2.3 Mesin Stirling Tipe Gamma

Mesin Stirling tipe gamma mirip dengan sebuah mesin Stirling beta, pada mesin Stirling jenis ini piston tenaga terpasang di dalam silinder yang terpisah di samping silinder piston displacer, tapi masih terhubung ke roda gila yang sama. Gas dalam dua silinder dapat mengalir bebas karena mereka berada dalam satu ruang. Konfigurasi ini menghasilkan rasio kompresi lebih rendah, tetapi secara mekanis lebih sederhana dan sering digunakan di dalam mesin Stirling multi-silinder.



Gambar 2.4. Mesin Stirling tipe Gamma

kelebihan dan kekurangan dari masing-masing jenis mesin Stirling tipe Alfa, Beta, dan Gamma:

#### 1. Mesin Stirling Tipe Alfa

Mesin tipe Alfa menggunakan dua piston yang terpisah dalam dua silinder, satu silinder sebagai pemanas (panas) dan satu lagi sebagai pendingin (dingin).

Kelebihan tipe Alfa adalah:

Efisiensi Termal Tinggi: Tipe Alfa memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi karena suhu pada kedua silinder bisa dipertahankan dengan lebih stabil.

Dengan Menggunakan dua piston yang sederhana, sehingga desainnya cenderung mudah dibuat dan lebih mudah diatur. Tipe Alfa dapat menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan tipe lain dalam kondisi tertentu.

Sementara Kekurangan tipe alfa ialah: Membutuhkan sistem pendinginan yang efektif karena panas yang tinggi dapat menyebabkan keausan atau kerusakan komponen. Tekanan kerja yang tinggi bisa menyebabkan mesin rentan terhadap kebocoran dan membutuhkan material yang lebih kuat. Dan dalam pengaturan suhu dapat mempengaruhi kinerja mesin secara signifikan.

## 2. Mesin Stirling Tipe Beta

Mesin tipe Beta memiliki satu silinder dengan dua piston yang saling berhubungan: satu piston kompresi dan satu piston displacer. Piston displacer menggerakkan udara di antara area panas dan dingin dalam silinder yang sama.

Kelebihan tipe beta adalah:

**Konstruksi yang Kompak:** Karena menggunakan satu silinder, tipe Beta memiliki desain yang lebih kompak dan lebih hemat tempat. Mesin tipe Beta cenderung lebih tahan lama karena komponennya tidak perlu bekerja pada suhu yang terlalu ekstrem. Efisiensi tetap baik meskipun pada kecepatan mesin yang rendah hingga sedang.

Kekurangan tipe beta ialah :

Desainnya lebih kompleks dibanding tipe Alfa karena menggabungkan dua fungsi piston dalam satu silinder.

Output Daya Lebih Rendah Karena harus mengakomodasi displacer, mesin tipe Beta biasanya menghasilkan daya yang lebih rendah daripada tipe Alfa.

Untuk melakukan Pengaturan suhu pada mesin tipe Beta memerlukan perhatian khusus agar tetap efisien.

## 3. Mesin Stirling Tipe Gamma

Mesin tipe Gamma mirip dengan tipe Beta, tetapi piston displacer dan piston kerja berada dalam dua silinder terpisah, namun tetap terhubung. Piston displacer menggerakkan udara di antara area panas dan dingin, sementara piston kerja menghasilkan daya.

Kelebihan tipe gamma adalah :

Desain yang Lebih Fleksibel dengan dua silinder yang terpisah memberikan fleksibilitas dalam pemasangan dan pengaturan komponen.

Tahan Lama dan Stabil Karena udara bergerak lebih bebas dan panas terdistribusi lebih baik, mesin ini cenderung lebih stabil dan tahan lama.

Dalam Pengoperasian tipe gamma lebih Halus, Mesin ini memiliki getaran yang lebih sedikit sehingga pengoperasiannya lebih halus.

Kekurangan tipe gamma ialah:

Output yang dihasilkan Daya Lebih Rendah: Tipe Gamma menghasilkan daya lebih rendah dibandingkan tipe Alfa, terutama pada ukuran dan kondisi yang sama.

tipe Gamma lebih besar dan berat, membutuhkan ruang lebih banyak. Tipe Gamma biasanya memiliki efisiensi termal yang lebih rendah karena kesulitan menjaga suhu optimal pada kedua silinder.

## 2.3 Bagian-bagian Mesin Stirling

Mesin *stirling* memiliki bagian bagian komponen, adapun bagian-bagian Mesin *stirling* sebagai berikut (Nazila 2016).

### 2.3.1 Heat Exchanger

Silinder dari mesin *stirling* dijaga suhu (panas) sementara bagian lainnya tetap dijaga pada suhu rendah (dingin). Penukar panas yang digunakan untuk mencapai hal ini yaitu perangkat yang membantu dalam pertukaran panas dari satu medium ke medium lainnya. Di penghujung panas panas dari sumber ditransfer ke silinder, sementara di penghujung dingin panas dari silinder ditransfer ke atmosfer. Mesin Stirling yang langsung dipanaskan tidak memiliki

penukar panas yang signifikan. Udara dingin mesin Stirling biasanya memiliki penukar panas sederhana sementara pada air dingin mesin Stirling yang memiliki penukar panas yang lebih kompleks.

### 2.3.2 Heater (Pemanas Udara)

*Heater* merupakan alat penukar panas yang dimana terjadi aliran perpindahan panas diantara dua fluida atau lebih pada temperatur yang berbeda, dimana kedua fluida tersebut mengalir didalam sistem. Fluida yang bertemperatur lebih tinggi akan mengalirkan panas ke fluida yang bertemperatur lebih rendah. Pada mesin Stirling, heater merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai penukar panas dari sumber panas ke fluida kerja. Kemampuan heater pada mesin Stirling sangat dipengaruhi oleh laju perpindahan panas. Bahan yang digunakan dalam pembuatan Heater ada dua yaitu:

Besi baja carbon sm5c dengan ketebalan 4mm dan Stainles Steel 304 dengan ketebalan 3mm.

Pemilihan material heater pada mesin Stirling antara besi baja karbon SM5C dengan ketebalan 4mm dan stainless steel 304 dengan ketebalan 3mm akan memengaruhi efisiensi mesin melalui beberapa faktor, seperti konduktivitas termal, tahanan korosi, dan kemampuan mempertahankan panas. Berikut adalah analisis bagaimana masing-masing bahan memengaruhi efisiensi mesin Stirling:

Besi Baja Karbon SM5C (Ketebalan 4mm) Konduktivitas Termal Besi baja karbon memiliki konduktivitas termal yang cukup baik, meskipun lebih rendah dibandingkan stainless steel 304. Karena ketebalannya yang 4mm, baja karbon ini cenderung mempertahankan panas lebih lama, sehingga dapat membantu menjaga suhu stabil untuk waktu yang lebih lama.

Kekerasan dan Ketahanan Suhu Tinggi Baja karbon memiliki kekuatan mekanis yang baik dan dapat tahan terhadap suhu tinggi, namun lebih rentan terhadap korosi pada suhu tinggi dibandingkan stainless steel.

Efek Terhadap Efisiensi Dengan ketebalan yang lebih besar, baja karbon SM5C dapat mengurangi kehilangan panas melalui dinding heater, sehingga panas yang dihasilkan lebih stabil dan efisien Pada suhu tinggi, baja karbon tetap memiliki kekuatan Secara keseluruhan, besi baja karbon SM5C dengan ketebalan 4mm dapat memberikan kestabilan panas yang baik tetapi membutuhkan perlindungan ekstra terhadap korosi untuk mempertahankan efisiensi jangka panjang.

#### Stainless Steel 304 (Ketebalan 3mm)

Konduktivitas Termal Stainless steel 304 memiliki konduktivitas termal yang lebih baik dari besi baja karbon, sehingga mampu menghantarkan panas lebih cepat dari sumber panas ke udara di dalam mesin Stirling.

Stainless steel 304 memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap oksidasi dan korosi pada suhu tinggi, membuatnya lebih tahan lama dalam lingkungan panas.

Dengan ketebalan yang lebih tipis (3mm), stainless steel 304 lebih ringan dan memungkinkan transfer panas lebih cepat, namun tidak mempertahankan panas sebaik baja karbon yang lebih tebal. Transfer Panas yang Lebih Cepat Dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi dan ketebalan lebih tipis.

Secara keseluruhan, stainless steel 304 dengan ketebalan 3mm lebih efisien dalam mentransfer panas dan lebih tahan lama terhadap korosi, yang dapat mendukung efisiensi termal yang lebih tinggi dan umur pakai yang lebih panjang dibandingkan baja karbon sm5c

#### 2.3.2 Piston

Piston adalah anggota geser yang dapat bergerak dari satu ujung ekstrim dari silinder ke ujung ekstrim yang lain, biasa disebut sebagai pusat mati. Biasanya gerakan piston bervariasi volume dalam silinder sejak fluida kerja tidak melarikan diri melalui clearance antara piston dan antarmuka silinder. Piston dari mesin Stirling adalah identik dengan yang hadir di mesin mobil. Hal ini tekanan gas yang bekerja pada piston, yang diturunkan sebagai output kerja mesin.

#### 2.1.1 *Displacer*

*Displacer* adalah bagian dari mesin Stirling yang bergeser geser menyerupai piston tapi berbeda dengan displacer, silinder jauh lebih besar. Hal ini memungkinkan untuk fluida kerja untuk dialirkan dengan mudah melalui ruang. Karena seperti yang dapat kita bayangkan, pergerakan displacer tidak kompresi gas atau menyebabkan gas lebih luas (ekspansi), maka pergerakan displacer tidak menyebabkan volume silinder berubah. gaya tekanan gas yang bekerja pada displacer akan diabaikan dibandingkan dengan pada piston karena kebanyakan dari gas keluar melalui ruang ke sisi tekanan rendah.

#### 2.1.1 *Flywheel*

Roda gila (*Flywheel*) merupakan sebuah massa yang berputar, dan dipergunakan sebagai penyimpan tenaga dalam mesin. Energi yang disimpan di dalam roda gila berupa tenaga kinetik yang besarnya.

Roda gila (*Flywheel*) adalah perangkat mekanik berputar yang digunakan untuk menyimpan energi rotasi. *Flywheel* mempunyai momen inersia yang signifikan, dan demikian menahan perubahan kecepatan rotasi. Jumlah energi

yang tersimpan dalam *Flywheel* sebanding dengan kuadrat kecepatan rotasi. Energi ditransfer ke *Flywheel* dengan menggunakan torsi, sehingga dapat meningkatkan kecepatan rotasi dan karenanya energi dapat tersimpan. Sebaliknya, *Flywheel* melepaskan energi yang tersimpan dengan melakukan torsi ke beban mekanik, sehingga mengurangi kecepatan torsi (Jufrizal et al. 2023).

### 2.1.2 Burner

Burner atau alat penghasil panas merupakan mesin kompor api yang menggunakan bahan bakar gas, solar, residu dan *dual fuel*, gas/solar. Fungsi burner adalah untuk mengabutkan bahan bakar dan mencampurnya dengan udara kemudian membakar bahan bakar tersebut (Arifin 2019).

## 2.2 Ketebalan Dinding Heater Pada Mesin Stirling

Ketebalan dinding heater pada mesin Stirling adalah faktor penting dalam merancang dan mengoperasikan mesin Stirling. Heater adalah salah satu komponen kunci dalam siklus mesin Stirling yang berfungsi untuk memanaskan udara atau gas kerja sehingga dapat mengalir ke sisi panas mesin. Ketebalan dinding heater memengaruhi efisiensi dan performa keseluruhan mesin Stirling. Berikut beberapa pertimbangan terkait ketebalan dinding heater.

Ketebalan dinding heater harus dipilih dengan mempertimbangkan konduktivitas panas bahan yang digunakan. Material yang baik dalam menghantarkan panas akan membantu dalam mentransfer panas dari sumber panas ke gas kerja dengan efisien. Ketebalan yang tepat akan memungkinkan panas untuk merata dalam waktu yang singkat.

Ketebalan dinding heater juga mempengaruhi resistensi termal, yang merupakan hambatan aliran panas melalui dinding. Semakin tebal dindingnya, semakin besar resistensi termalnya. Oleh karena itu, pilihlah ketebalan yang memungkinkan panas untuk mengalir dengan mudah ke gas kerja tanpa terlalu banyak kehilangan panas. Material yang digunakan untuk membuat dinding heater harus memiliki sifat-sifat termal yang sesuai. Bahan seperti Pemilihan material heater pada mesin Stirling antara besi baja karbon SM5C dengan ketebalan 4mm dan stainless steel 304 dengan ketebalan 3mm akan memengaruhi efisiensi mesin melalui beberapa faktor, seperti konduktivitas termal, tahanan korosi, dan kemampuan mempertahankan panas. Berikut adalah analisis bagaimana masing-masing bahan memengaruhi efisiensi mesin Stirling:

Besi Baja Karbon SM5C (Ketebalan 4mm) Besi baja karbon memiliki konduktivitas termal yang cukup baik, meskipun lebih rendah dibandingkan stainless steel 304. Karena ketebalannya yang 4mm, baja karbon ini cenderung mempertahankan panas lebih lama, sehingga dapat membantu menjaga suhu stabil untuk waktu yang lebih lama. Baja karbon memiliki kekuatan mekanis yang baik dan dapat tahan terhadap suhu tinggi, namun lebih rentan terhadap korosi pada suhu tinggi dibandingkan stainless steel. Dengan ketebalan yang lebih besar, baja karbon SM5C dapat mengurangi kehilangan panas melalui dinding heater, sehingga panas yang dihasilkan lebih stabil dan efisien. Pada suhu tinggi, baja karbon tetap memiliki kekuatan, tetapi memerlukan perlindungan dari korosi untuk menjaga kinerja dalam jangka panjang.

Dalam lingkungan panas, baja karbon lebih rentan terhadap oksidasi atau korosi, yang bisa menurunkan efisiensi termal seiring waktu.

Stainless Steel 304 (Ketebalan 3mm) Konduktivitas Termal Stainless steel 304 memiliki konduktivitas termal yang lebih baik dari besi baja karbon, sehingga mampu menghantarkan panas lebih cepat dari sumber panas ke udara di dalam mesin Stirling. Stainless steel 304 memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap oksidasi dan korosi pada suhu tinggi, membuatnya lebih tahan lama dalam lingkungan panas. Dengan ketebalan yang lebih tipis (3mm), stainless steel 304 lebih ringan dan memungkinkan transfer panas lebih cepat, namun tidak mempertahankan panas sebaik baja karbon yang lebih tebal.

Dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi dan ketebalan lebih tipis, stainless steel 304 dapat mentransfer panas lebih efisien, memungkinkan pemanasan udara lebih cepat di dalam mesin Stirling. Karena tahan terhadap korosi, stainless steel 304 menjaga integritas termal dan mencegah penurunan efisiensi akibat oksidasi pada jangka panjang.

Pemilihan material tergantung pada prioritas, apakah kestabilan panas jangka panjang (baja karbon) atau efisiensi transfer panas yang lebih tinggi dan ketahanan korosi (stainless steel) yang lebih diutamakan.

Dalam operasi mesin Stirling, dinding heater akan mengalami variasi suhu yang signifikan selama siklus kerja. Ketebalan dinding harus mampu menahan perubahan suhu tanpa mengalami deformasi atau kerusakan. Ini penting untuk menjaga integritas struktural dinding heater. Selain ketebalan dinding heater, isolasi panas di sekitar dinding heater juga sangat penting. Ini membantu mengurangi kehilangan panas yang tidak diinginkan dan memastikan bahwa sebagian besar panas digunakan untuk memanaskan gas kerja. Pemilihan ketebalan dinding heater pada mesin Stirling akan bergantung

pada berbagai faktor seperti bahan, suhu operasi, tekanan, dan kebutuhan performa yang diinginkan. Ini adalah pertimbangan yang rumit dan harus dihitung dengan cermat selama perancangan mesin Stirling.

Pada mesin Stirling, heater merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai penukar panas dari sumber panas ke fluida kerja. Kemampuan heater pada mesin Stirling sangat dipengaruhi oleh laju perpindahan panas yang meliputi (Prasetyo and Widartono 2020):

1. Laju perpindahan panas konveksi dari media pemanas eksternal ke dinding tabung heater atau sirip.
2. Laju perpindahan panas konduksi melalui permukaan dinding tabung luar ke permukaan dalam.
3. Laju perpindahan panas konveksi dari dinding internal tabung ke fluida kerja.

#### **2.4 Analisa Termodinamika Mesin Stirling**

Termodinamika dengan hukum-hukumnya dan beberapa konsep yang berkaitan dengannya seperti isothermal, isokhorik, adiabatik ataupun yang lainnya terkadang dianggap sebagai suatu hal yang sulit dimengerti oleh manusia awam. Berkaitan dengan prinsip termodinamika ada sebuah alat yang berhubungan dengan hal itu salah satunya mesin stirling. Mesin stirling adalah mesin pembakaran eksternal yang menggunakan udara atau gas sebagai fluida kerjanya, bekerja berdasarkan prinsip termodinamika. Pada mesin ini dilengkapi dengan regenerator untuk menyimpan energi panas. Akibat panas ini menyebabkan volume gas bertambah dan karena volume gas bertambah

maka terjadi pula perubahan tekanan gas yang besar juga yang digunakan untuk menggerakkan piston mesin stirling.

#### 2.4.1 Heater (Pemanas Udara)

*Heater* merupakan alat penukar panas yang dimana terjadi aliran perpindahan panas diantara dua fluida atau lebih pada temperatur yang berbeda, dimana kedua fluida tersebut mengalir didalam sistem. Fluida yang bertemperatur lebih tinggi akan mengalirkan panas ke fluida yang bertemperatur lebih rendah Pada mesin Stirling, heater merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai penukar panas dari sumber panas ke fluida kerja. Kemampuan heater pada mesin Stirling sangat dipengaruhi oleh laju perpindahan panas. (Siregar, Jufrizal, Hasanah, & Agusdiandy, 2022).

### 2.5 Perhitungan untuk Analisis Heater

Dalam perhitungan Pengujian Heater pada dasarnya memerlukan persamaan Konduksi, Konveksi, Radiasi, dan Keefektivitasan.

#### 2.5.1 Konduksi

Peristiwa perpindahan kalor melalui suatu zat tanpa disertai dengan perpindahan partikel-partikelnya disebut konduksi. Perpindahan kalor yang terjadi pada heater dengan api burner yang terdapat pada mesin. Dengan demikian konduksi yang terjadi dapat dirumuskan pada persamaan 2.1. dan 2.2.

$$H = Q t = k.A. \Delta T L \dots\dots\dots(2.1)$$

$$Q = k. A. t \Delta T L \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

H = Jumlah kalor yang merambat tiap detik(J/s)

k = Koefisien konduksi termal(J/msK)

$A$  = luas penampang batang(m)

$L$  = Panjang Batang(m)

$\Delta T$  = perbedaan suhu antara kedua ujung batang (K)

### 2.5.2 Konveksi

Perambatan kalor yang disertai perpindahan massa atau perpindahan partikel-partikel zat perantaranya seperti partikel udara disebut konveksi. Untuk menghitung laju kalor secara konveksi, yang merambat tiap detik dapat digunakan persamaan 2.3:

$$H = Q t = h \cdot A \cdot \Delta t$$

(2.3)

Keterangan:

$H$  = Laju perpindahan (J/s)

$h$  = Koefisien konveksi termal (j/sm<sup>2</sup>K)

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

$\Delta T$  = Perbedaan suhu (K)

### 2.5.3 Keevektivitasan

Alat penukar kalor (Heat Exchanger) adalah alat yang difungsikan untuk menukarkan energi atau panas dalam bentuk langsung dan kontak tidak langsung. Perhitungan efektivitas pada Heater dapat dirumuskan pada persamaan.

$$\epsilon = Q / Q_{max} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$Q = m h C_{ph} (T_{h,in} - T_{h,out})$$

$$Q = C h (T_{h,in} - T_{h,out})$$

$$Q_{max} = C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})$$

$$Ch = m h Cph$$

$$Cc = m c Cpc$$

Keterangan:

$\varepsilon$  = efektivitas

$Q$  = Laju perpindahan panas aktual (kW)

$Q_{max}$  = Laju perpindahan panas max (kW)

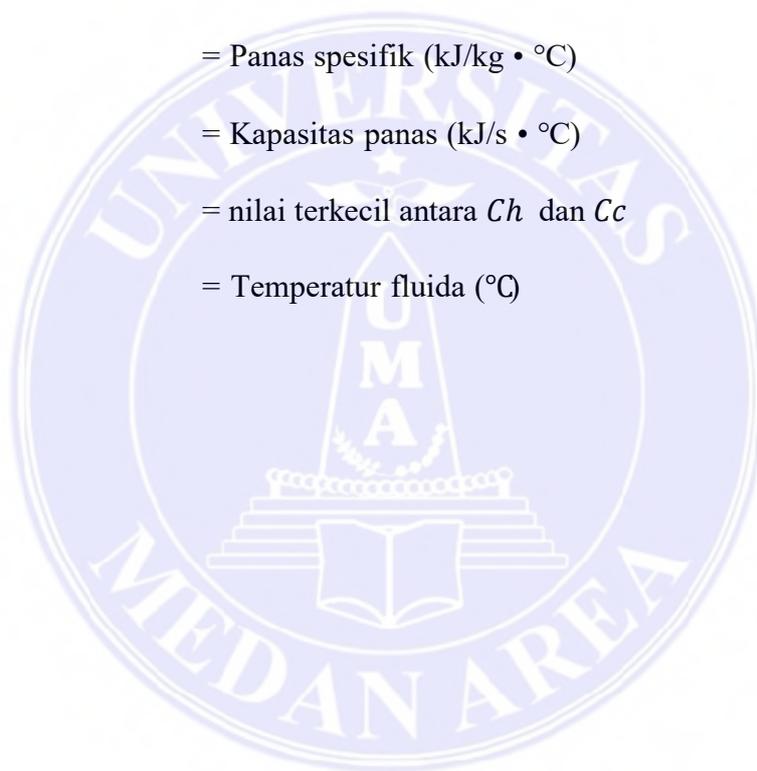
$m h, m c$  = Laju aliran massa fluida (kg/s)

$Cp, Cpc$  = Panas spesifik (kJ/kg • °C)

$Ch, Cc$  = Kapasitas panas (kJ/s • °C)

$C_{min}$  = nilai terkecil antara  $Ch$  dan  $Cc$

$T$  = Temperatur fluida (°C)



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

##### 3.1.1 Waktu

Penelitian dilakukan selama 3 bulan dengan jadwal kegiatan penelitian dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Jadwal kegiatan penelitian

No	Aktifitas	2024															
		Bulan 1				Bulan 2				Bulan 3				Bulan 4			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Pengajuan Judul	■	■														
2.	Penulisan Proposal			■	■												
3.	Seminar Proposal					■											
4.	Proses penelitian					■	■	■	■	■							
5.	Pengolahan Data Penyelesaian Laporan										■	■	■				
6.	Seminar Hasil													■			
7.	Evaluasi dan persiapan Sidang														■	■	
8.	Sidang Sarjana															■	

##### 2.1.2 Tempat

Kegiatan penelitian dilaksanakan di Perum Graha Garuda Mas Blok II No. 39 Dusun V Desa Sigara-Gara Kecamatan Patumbak Kabupaten Deli Serdang Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, 20361. Tempat penelitian ini dipilih di perum graha garuda mas yang memiliki fasilitas dan peralatan uji yang lengkap, seperti mesin Stirling, sensor temperatur dan tekanan, serta alat uji material. Fasilitas yang memadai dan peralatan khusus akan memungkinkan

penelitian dilakukan dengan presisi yang tinggi, terutama dalam mengukur perubahan suhu dan tekanan. Ini juga akan memungkinkan perbandingan akurat antara heater berbahan baja karbon dan stainless steel.

## 2.2 Bahan dan Alat

### 2.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

#### 1. Gas LPG 3 Kg

Gas LPG 3 kg berfungsi sebagai bahan bakar pemanas burner kompor dalam pengujian ini dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1. Tabung Gas LPG 3Kg

#### 2. Pompa angin

Pompa angin berfungsi untuk mengisi atau memompa angin ke dalam berbagai benda yang membutuhkan tekanan angin, dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2. Pompa Angin

### 3.2.2. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

#### 3. Heater

*Heater* pada mesin *Stirling* berfungsi untuk memanaskan udara atau fluida kerja di dalam mesin. Fungsi utama *heater* adalah untuk memasok energi panas ke fluida kerja di dalam mesin *Stirling*. Proses ini melibatkan pemanasan fluida kerja dengan memanfaatkan sumber energi *eksternal*, Objek yang dilakukan penelitian dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3. Heater

#### 4. *Regulator* dan Selang SNI

*Regulator* berfungsi untuk mengetahui laju dan kestabilan tekanan gas, juga

Selangnya untuk perantara yang mengalirkan gas dari tabung ke *burner* dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. *Regulator* dan selang SNI

5. *Stopwatch*

*Stopwatch* adalah alat yang digunakan untuk melakukan pengukuran durasi waktu yang diperlukan pada saat pengujian dapat dilihat pada gambar 3.5 di bawah.



Gambar 3.5. *Stopwatch*

6. *Thermometer Controller UT320D*

Thermometer controller UT320D adalah suatu alat yang digunakan untuk menunjukkan atau membaca temperature yang diukur oleh sensor thermocouple pada dinding silinder panas dan silinder Heater, dengan daya pengukuran suhu -50 °C hingga 1300 °C, dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut



Gambar 3.6. Thermometer controller UT320D

7. *Thermowell NPT Stainless*

*Thermowell NPT Stainless* adalah untuk melindungi sensor suhu dari kerusakan akibat korosi dan benturan aliran proses. Thermowell juga berfungsi sebagai penghalang antara perangkat pengukur suhu dan cairan serta cairan dari udara luar 3.7 berikut.



Gambar 3.7. Thermowell NPT Stainless

8. *Thermogun*

*Thermogun* berfungsi mengetahui temperatur dinding luar *heater* dapat dilihat pada gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8. Thermogun

9. Kabel *Thermocouple Sensor*

Kabel *thermocouple sensor* berfungsi untuk mendeteksi atau mengukur suhu temperatur dengan melalui dua jenis logam konduktor berbeda yang kemudian digabung pada bagian ujungnya sehingga menghasilkan efek *thermo electric* dapat dilihat pada gambar 3.9. berikut.



Gambar 3.9. Kabel Thermocouple Sensor

10. *Pressure gauge*

*Pressure gauge* berfungsi untuk mengukur tekanan dalam sistem tertutup, seperti tekanan gas, cairan, air, atau uap. Alat ini memiliki beberapa fungsi, di antaranya: menjaga performa mesin, mendeteksi kebocoran, memastikan keselamatan, mengontrol tingkat tekanan dalam cairan dan gas dan menjaga tekanan dalam batas yang diperlukan. Dapat dilihat pada gambar 3.10. berikut.



Gambar 3.10. Pressure Gauge

### 2.3 Metode Penelitian

Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan di ruangan terbuka, dengan mengamati perubahan temperatur pada sumber api, ruang udara dalam dan dinding luar *heater* yang ditunjukkan oleh *thermocouple* dan *Thermogun*. Mengamati kestabilan suhu temperatur sumber api dan objek yang dipanaskan yaitu *heater*. Serta mengetahui konsumsi spesifik bahan bakar. Adapun langkah-langkah dalam pengambilan data adalah sebagai berikut.

1. Memasang semua alat ukur, seperti *thermowell* dan *thermocouple* (T1) diletakkan pada sisi dinding kompos gas (Th). *Thermowell* dan *thermocouple* diletakkan pada sisi silinder *heater* (Te) dan temperature dinding luar *heater* di ukur menggunakan *thermogun* (Th).
2. Mempersiapkan gas LPG 3 kg sebagai bahan bakar pemanasan *heater* bersamaan sebagai penambahan tekanan gas.
3. Hidupkan kompor gas setelah hidup api sesuaikan tekanan gas untuk mencapai api yang stabil pada sumber api
4. Pengujian dilakukan 30 menit, dengan rentan waktu 1 menit sekali menggunakan *stopwatch*. Lalu per 5 menit dilakukan pengecekan suhu dinding menggunakan *thermogun*.

5. Pengambilan data pengujian suhu ruang panas ( $T_e$ ), suhu ruang dingin ( $T_c$ ), dan temperatur api ( $T_h$ ), dilakukan secara bersamaan. Pembacaan dilakukan dimulai dari sumber panas dihidupkan.
6. Melakukan pencatatan beberapa parameter, yaitu suhu panas, suhu dingin, temperatur api dan konsumsi bahan bakar. Adapun titik-titik pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.11. berikut



Gambar 3.11. Titik titik pengujian temperature

## 2.4 Populasi dan Sampel

Populasi adalah keseluruhan kelompok atau himpunan individu, objek, atau peristiwa yang menjadi fokus dari sebuah penelitian. Populasi

bisa sangat luas, seperti semua warga negara dalam suatu negara, atau bisa sangat spesifik, seperti semua siswa di sebuah sekolah tertentu. Dalam penelitian, populasi adalah semua elemen yang ingin kita pahami atau dari mana kita ingin menarik kesimpulan.

Sampel adalah bagian atau subset dari populasi yang dipilih untuk diambil datanya dan dianalisis. Karena meneliti seluruh populasi seringkali tidak praktis atau mungkin tidak memungkinkan, sampel digunakan sebagai perwakilan dari populasi tersebut. Peneliti kemudian menarik kesimpulan tentang populasi berdasarkan hasil yang diperoleh dari sampel ini.

## 2.5 Prosedur Kerja

Berikut ini adalah prosedur pelaksanaan penelitian, antara lain:

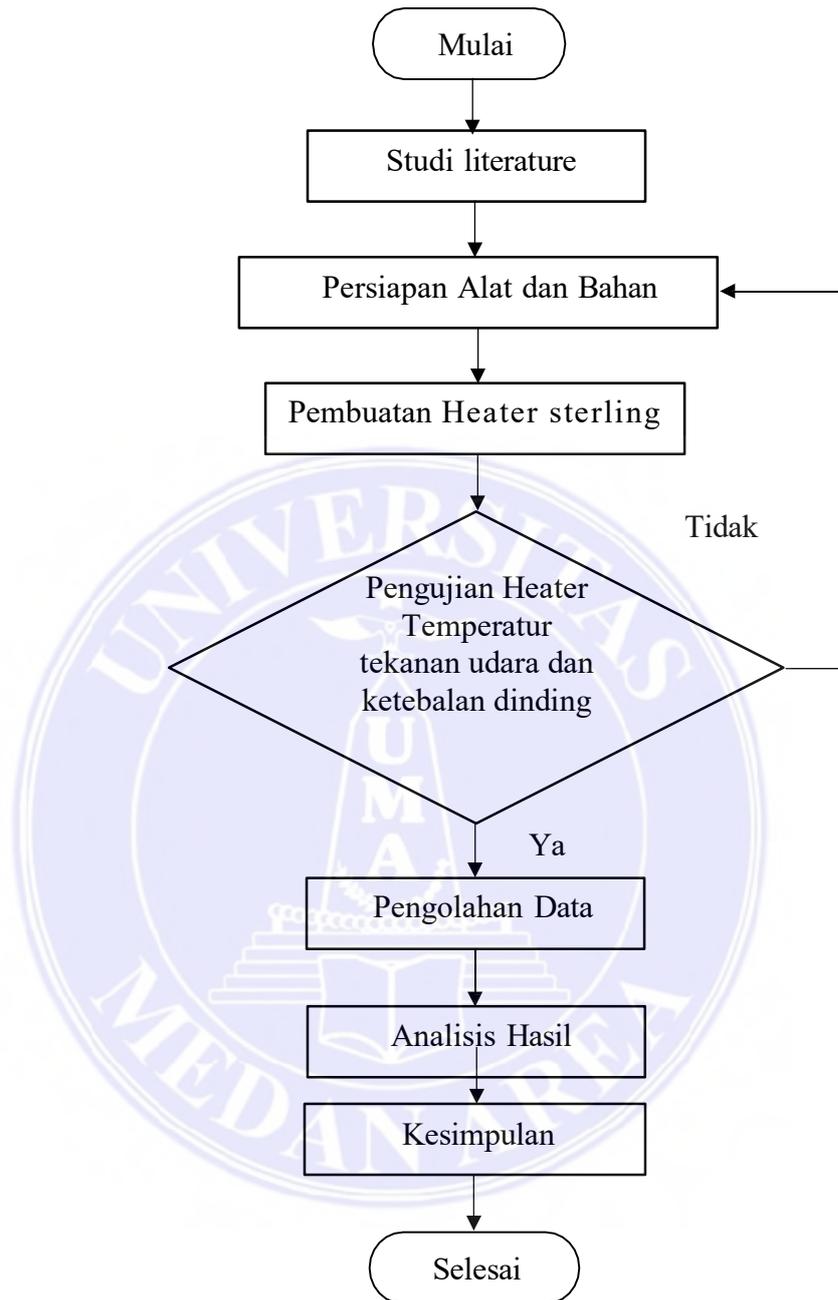
1. Mempersiapkan gas LPG 3 kg sebagai bahan bakar yang akan digunakan untuk menghidupkan Mesin Stirling Enginee
2. Memasang semua alat ukur, seperti thermocouple dan thermowell (T1) diletakkan di dalam air (Th). Thermocouple dan thermowell diletakkan pada temperatur nyala api (T2).
3. Knob merupakan komponen pada kompor masak yang berfungsi untuk mengatur setelan minimum dan maksimum dari api pembakaran serta berfungsi juga pemantik api pada saat menghidupkan kompor.
4. Pengujian dan pengambilan data yang dilakukan dalam waktu 60 menit dengan pencatatan waktu setiap 1 menit sekali. Sehingga di dapatkan nilai yang dihasilkan.
5. Pengambilan data pengujian temperatur didih air (T1), temperatur

sumber api (T2), dilakukan secara bersamaan. Pembacaan mulai dilakukan dari sumber panas dihidupkan.

6. Melakukan pencatatan beberapa parameter, yaitu suhu panas, suhu dingin, temperatur api dan rpm.



### 2.5.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.12. Diagram alir penelitian untuk efesiensienergi dan waktu

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang didapatkan, diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Pengaruh Bahan heater memiliki pengaruh signifikan terhadap temperatur dan tekanan udara yang dihasilkan. Heater berbahan stainless steel dengan ketebalan 3 mm menghasilkan temperatur dan tekanan udara yang lebih tinggi dibandingkan dengan heater berbahan baja karbon SM5C dengan ketebalan 4 mm. Hal ini disebabkan oleh konduktivitas termal stainless steel yang lebih tinggi, sehingga memungkinkan transfer panas yang lebih efisien ke dalam Heater Stirling.
2. Pengaruh Ketebalan dinding heater juga mempengaruhi performa Heater dengan ketebalan 3 mm pada stainless steel memungkinkan pemanasan yang lebih cepat dan efektif dibandingkan dengan ketebalan 4 mm pada baja karbon SM5C. Ketebalan yang lebih tipis cenderung mendukung efisiensi pemanasan, yang meningkatkan tekanan udara dalam Heater.
3. Berdasarkan hasil eksperimen, kombinasi bahan stainless steel dengan ketebalan 3 mm menunjukkan performa yang lebih optimal dalam menghasilkan temperatur dan tekanan udara yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa stainless steel dengan ketebalan lebih tipis lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan performa tinggi pada Heater Stirling.

## 5.2 Saran

Berikut adalah beberapa saran yang ingin disampaikan.

1. Untuk aplikasi mesin Stirling yang membutuhkan efisiensi tinggi, disarankan untuk menggunakan heater berbahan stainless steel dengan ketebalan yang lebih tipis, seperti 3 mm. Stainless steel tidak hanya memiliki konduktivitas termal yang baik tetapi juga tahan terhadap korosi, yang membuatnya lebih awet untuk penggunaan jangka panjang.
2. Penelitian lanjutan dapat dilakukan untuk menguji berbagai bahan lainnya, seperti paduan logam lain dengan konduktivitas termal tinggi, untuk melihat pengaruhnya terhadap kinerja mesin Stirling. Selain itu, pengaruh variasi ketebalan lain juga dapat dieksplorasi guna menemukan ketebalan optimal untuk berbagai aplikasi industri.
3. Selain bahan dan ketebalan heater, faktor lain seperti geometri heater, jenis gas kerja, dan temperatur sumber panas dapat dieksplorasi lebih lanjut untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja mesin Stirling.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Zaenal. 2019. "Burner."
- Barry, Akmal, and Yano Hurung Anoi. 2022. "Studi Eksperimental Unjuk Kerja Mesin Stirling Dengan Variasi Beban Lampu." *Jurnal JAGO* 2(2): 18.
- Gultom, D et al. 2021. "Analisis Performansi Motor Bakar Pada Generator-Set Dengan Kapasitas Daya 440 Kw Fuel Motor Performance Analysis On Generator-Set With 440 Kw Power CAPACITY." 2(2).
- 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." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1(1): 35–40.
- Jufrizal et al. 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.
- Jufrizal, Farel H. Napitupulu, Ilmi, and Himsar Ambarita. 2020. "Manufacturing and Testing Prototype of a Gamma Type Stirling Engine for Micro-CHP Application." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 725(1).
- Nazila, Intan Putri. 2016. "Unjuk Kerja Mesin Stirling Tipe Gamma Dan Sistem Aliran Air Pada Reservoir Rendah Skripsi Oleh : Intan Putri Nazila."
- Prasetyo, Akvian Bagus, and Mahendra Widartono. 2020. "Pengaruh Perubahan Temperatur Hot Cylinder Wall Pada Mesin Stirling Terhadap Tegangan Keluaran Generator Dc Akvian Bagus Prasetyo Mahendra Widartono Abstrak." *Jurnal Teknik Elektro UNESA* 9(2): 487–91.
- Rahmalina, Dwi et al. 2021. "Pengembangan Stirling Engine Tipe Piston Bebas Untuk Aplikasi Concentrated Solar Power ( CSP )." *Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta* 13(1):101–8.  
<https://jurnal.umj.ac.id/index.php/jurtek/article/view/8169/5409>.
- Riyadi. 2016. "Rekayasa Mesin." *Rekayasa Mesin. Rekayasa Mesin, 4(2), 147–156*.  
<http://rekayasamesin.ub.ac.id/index.php/rm/article/view/193>.
- Siregar, Z H, Jufrizal, Moraida Hasanah, and M D Agusdiandy. 2022. "Pengaruh Variasi Temperatur Sumber Panas Terhadap Temperatur Udara Dalam Heater Mesin Stirling." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1(1): 11–16.
- Yuliani Ika, Irwan Mochamad. 2013. "Pembuatan Dan Pengujian Prototipe Tipe Gamma." *Industrial Research Workshop and National Seminar*: 215–19.
- Zakaria, Roni, Ilham Priadythama, and Nugroho Eka Budiyanto. 2013. "Rancangan Mesin Stirling Memanfaatkan Komponen Mesin Lain Yang Ada Di Pasaran Indonesia Sebagai Pembangkit Listrik." *Performa* 12(1): 51–5

## LAMPIRAN

