

**PENGUJIAN KINERJA *HEATER* MESIN *STIRLING* mCHPSE-  
012020 DENGAN MENGGUNAKAN GAS HELIUM SEBAGAI  
GAS KERJA**

**SKRIPSI**

**OLEH**

**DANDY ALFIESTA  
188130038**



**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 12/5/26

Access From (repositori.uma.ac.id)12/5/26

## HALAMAN JUDUL

# PENGUJIAN KINERJA *HEATER* MESIN *STIRLING* mCHPSE-012020 DENGAN MENGGUNAKAN GAS HELIUM SEBAGAI GAS KERJA

## SKRIPSI

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

OLEH

**DANDY ALFIESTA**  
**188130038**

**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 12/5/26

Access From (repositori.uma.ac.id)12/5/26


## HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Skripsi : PENGUJIAN KINERJA *HEATER MESIN STIRLING*  
mCHPSE-012020 DENGAN MENGGUNAKAN GAS  
HELIUM SEBAGAI GAS KERJA  
Nama Mahasiswa : DANDY ALFIESTA  
NIM : 188130038  
Fakultas : TEKNIK MESIN

Disetujui Oleh  
Komisi Pembimbing

  
(Dr. Jufrizal, ST, MT)  
Pembimbing I



  
(Dr. Eng. Supriatno, ST, MT)  
Dekan Fakultas Teknik



  
(Dr. A. Syahidi, ST, MT)  
Ka. Prodi Teknik Mesin

Tanggal Lulus: Senin, 11 Agustus 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 norma, 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, 11 Agustus 2025



Dandy Alfiesta  
NPM : 188130038

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

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

Nama : Dandy Alfiesta  
NPM : 188130038  
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 karya ilmiah saya yang berjudul:

“Pengujian Kinerja Heater Mesin Stirling mCHPSE-012020 Dengan Menggunakan Gas Helium Sebagai Gas Kerja”

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengolah dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis, pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan, Indonesia

Pada Tanggal : 11 Agustus 2025

Yang menyatakan

  
(Dandy Alfiesta)  
188130038

## ABSTRAK

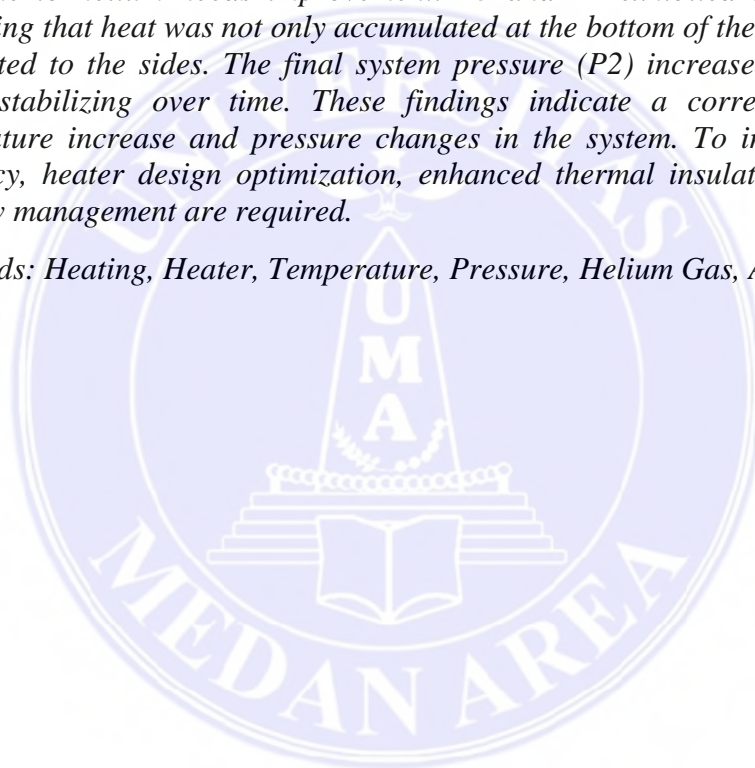
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa pemanasan pada sistem *heater* dengan menggunakan gas helium dan udara sebagai media pemanas. Pengujian dilakukan dengan memantau perubahan temperatur pada beberapa titik pengukuran, yaitu sumber api kompor (T1), temperatur helium dalam *heater* (T2), temperatur dinding *heater* bagian bawah (T3), dan temperatur dinding *heater* bagian samping (T4), serta tekanan akhir dalam sistem (P2). Hasil pengujian menunjukkan bahwa temperatur T1 mengalami kenaikan cepat di awal hingga mencapai kestabilan pada suhu tinggi. Temperatur T2 mengalami peningkatan secara bertahap, namun tetap jauh lebih rendah dibandingkan T1, yang menunjukkan bahwa efisiensi perpindahan panas dari sumber api ke helium masih perlu ditingkatkan. Temperatur T3 dan T4 menunjukkan pola kenaikan bertahap, mengindikasikan bahwa panas yang dihasilkan tidak hanya terakumulasi di bagian bawah *heater* tetapi juga menyebar ke bagian samping. Tekanan akhir dalam sistem (P2) mengalami kenaikan bertahap hingga mencapai kestabilan setelah waktu tertentu. Hasil ini menunjukkan adanya hubungan antara peningkatan temperatur dengan perubahan tekanan dalam sistem. Untuk meningkatkan efisiensi pemanasan, diperlukan optimasi desain *heater*, peningkatan isolasi termal, serta pengaturan aliran gas yang lebih optimal.

Kata Kunci: Pemanasan, *Heater*, Temperatur, Tekanan, Gas Helium, Udara.

## ABSTRACT

*This study aims to analyze the heating performance of a heater system using helium gas and air as heating media. The experiment was conducted by monitoring temperature changes at several measurement points: stove flame temperature ( $T_1$ ), helium temperature inside the heater ( $T_2$ ), bottom heater wall temperature ( $T_3$ ), and side heater wall temperature ( $T_4$ ), as well as the final pressure in the system ( $P_2$ ). The results showed that  $T_1$  increased rapidly at the beginning and then stabilized at a high temperature.  $T_2$  increased gradually but remained significantly lower than  $T_1$ , indicating that heat transfer efficiency from the flame to helium needs improvement.  $T_3$  and  $T_4$  exhibited a gradual rise, suggesting that heat was not only accumulated at the bottom of the heater but also distributed to the sides. The final system pressure ( $P_2$ ) increased progressively before stabilizing over time. These findings indicate a correlation between temperature increase and pressure changes in the system. To improve heating efficiency, heater design optimization, enhanced thermal insulation, and better gas flow management are required.*

*Keywords: Heating, Heater, Temperature, Pressure, Helium Gas, Air.*



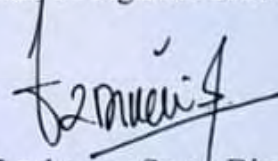
## RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Medan, pada tanggal 17 Oktober 1998, putra dari pasangan Almarhum Bapak Abdul Mukhlis dan Ibu Maryati Novrida. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara.

Penulis memulai pendidikan di SD SWASTA YAYASAN PENDIDIKAN ISLAM NUR FADHILAH MEDAN. Pada tahun 2004 dan tamat tahun 2010, pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di SMP NEGERI 38 MEDAN dan tamat pada tahun 2013, kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMA SWASTA YAYASAN PENDIDIKAN HARAPAN MEKAR 1 MEDAN dan selesai pada tahun 2016. Lalu ditahun 2018 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa di Universitas Medan Area Fakultas Teknik Mesin.

Sampai dengan skirpsi ini penulis masih terdaftar sebagai mahasiswa prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik Mesin di Universitas Medan Area.

Medan, 11 Agustus 2025



Irvan Hendrawan Surya Dinata  
NPM : 188130089

## KATA PENGANTAR

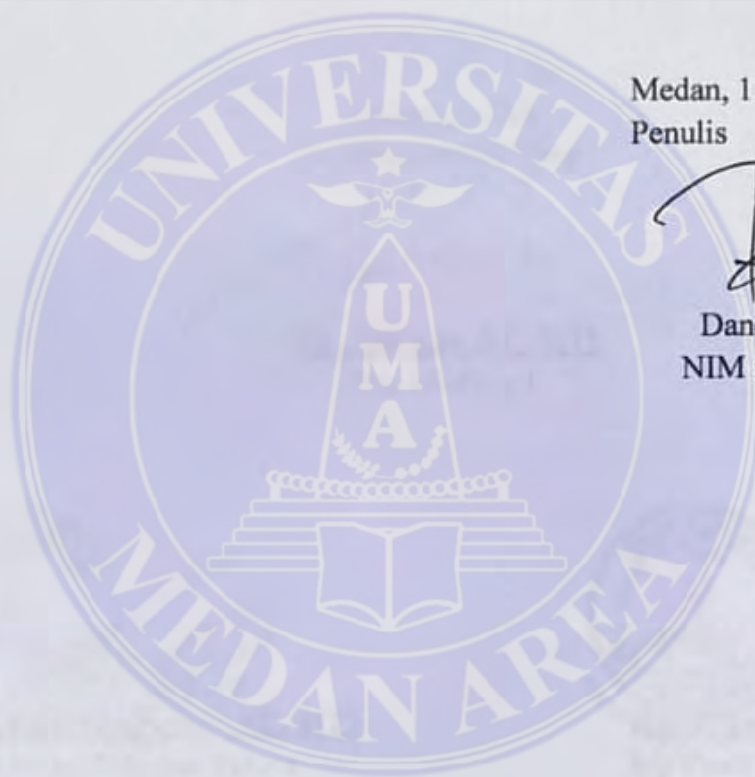
Puji dan syukur atas kehadiran Allah Subhanahu wa ta'ala atas segala karunia yang telah diberikan sehingga penulis skripsi ini bisa diselesaikan. Tema yang dalam penelitian ini adalah motor bakar dengan judul “**Pengujian Kinerja Heater Mesin Stirling mCHPSE-012020 Dengan Menggunakan Gas Helium Sebagai Gas Kerja**”.

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 penelitian 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.
5. Teristimewa untuk Ayahanda Rachman Rubianto dan Ibunda Ummiati Rangkuti sebagai orang tua saya yang selalu mendukung dan memberikan semangat saya hingga menjadi seorang Sarjana.
6. Kepada teman-teman seperjuangan Teknik Mesin 2018.
7. Terima kasih kepada Tim mCHPSE.
8. Semua pihak yang belum tertulis diatas, yang telah banyak membantu.

Atas bantuan dan bimbingan, dukungan dan fasilitas yang telah diberikan kepada penulis. Penulis berharap semoga Allah SWT membalas semua kebaikan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis.

Akhir kata penulis menyadari bahwa tugas akhir/skripsi ini jauh masih belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.



Medan, 11 Agustus 2025  
Penulis

Dandy Alfiesta  
NIM : 188130038

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
HALAMAN PERNYATAAN .....	ii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	iii
ABSTRAK .....	iv
<i>ABSTRACT</i> .....	v
RIWAYAT HIDUP.....	vi
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Hipotesis Penelitian .....	5
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Mesin <i>Stirling</i> .....	7
2.3.1. Siklus Mesin <i>Stirling</i> .....	8
2.2. Jenis – Jenis Mesin <i>Stirling</i> .....	10
2.2.1. Mesin <i>Stirling</i> Tipe Alpha.....	11
2.2.2. Mesin <i>Stirling</i> Tipe Beta .....	12
2.2.3. Mesin <i>Stirling</i> Tipe Gamma.....	12
2.3. Komponen Mesin <i>Stirling</i> .....	13
2.3.1. <i>Heater</i> .....	13
2.3.2. Pendingin ( <i>Cooler</i> ).....	14
2.3.3. Piston.....	15
2.3.4. <i>Displacer</i> .....	15
2.3.5. <i>Burner</i> .....	16
2.4. Gas Kerja .....	16
2.4.1. Helium.....	17
2.4.2. Hidrogen.....	18

2.4.3. Nitrogen.....	18
2.4.3. Udara.....	19
2.5. Parameter Utama Dari Siklus Mesin <i>Stirling</i> .....	20
2.5.1. Jumlah Mol Gas Kerja .....	20
2.5.2. Tekanan Pada Proses Isokhorik .....	21
2.5.3. Proses Isotermik.....	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	24
3.1. Tempat dan Waktu .....	24
3.1.1. Tempat.....	24
3.1.2. Waktu .....	24
3.2. Alat dan Bahan .....	25
3.2.1. Alat.....	25
3.2.2. Bahan.....	28
3.3. <i>Heater</i> .....	28
3.4. Skema Pengujian .....	28
3.5. Langkah-Langkah Pengujian.....	29
3.6. Diagram Alir Penelitian.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	32
4.1. Hasil.....	32
4.1.1. Dimensi Ukuran <i>Heater</i> .....	33
4.1.2. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Helium Sebagai Gas Kerja .....	33
4.1.3. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Udara Sebagai Gas Kerja .....	48
4.2. Pembahasan .....	64
4.2.1. <i>Heater</i> Menggunakan Helium Sebagai Gas Kerja .....	64
4.2.2. <i>Heater</i> Menggunakan Udara Sebagai Gas Kerja .....	69
4.2.3. Perbandingan Helium dan Udara .....	74
BAB V SIMPULAN DAN SARAN .....	78
5.1. Simpulan.....	78
5.2. Saran.....	79
DAFTAR PUSTAKA .....	80
LAMPIRAN DOKUMENTASI KEGIATAN PENGUJIAN HEATER.....	87

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jadwal Kegiatan Penelitian .....	24
Tabel 3.2. Variabel Perubahan Yang Diamati Pada Penelitian.....	30
Tabel 4.2. Spesifikasi <i>Heater</i> Menggunakan Bahan <i>Stainless Steel 304</i> .....	33
Tabel 4.3. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,1 bar..	34
Tabel 4.4. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,2 bar..	36
Tabel 4.4. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,2 bar..	37
Tabel 4.5. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,3 bar..	39
Tabel 4.5. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,3 bar..	40
Tabel 4.6. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,4 bar..	42
Tabel 4.6. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,4 bar..	43
Tabel 4.7. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,5 bar..	45
Tabel 4.7. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Helium Tekanan 0,5 bar..	46
Tabel 4.8. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Udara Tekanan 0,1 bar ....	49
Tabel 4.9. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Udara Tekanan 0,2 bar ....	52
Tabel 4.10. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Udara Tekanan 0,3 bar..	55
Tabel 4.10. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Udara Tekanan 0,3 bar..	56
Tabel 4.11. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Udara Tekanan 0,4 bar..	58
Tabel 4.11. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Udara Tekanan 0,4 bar..	59
Tabel 4.12. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Udara Tekanan 0,5 bar..	61
Tabel 4.12. Pengujian <i>Heater</i> Menggunakan Gas Kerja Udara Tekanan 0,5 bar..	62

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Stirling Engine</i> .....	7
Gambar 2.2. Diagram PV dan TS untuk mesin <i>Stirling</i> .....	10
Gambar 2.3. Mekanisme Mesin <i>Stirling</i> Tipe Alpha .....	12
Gambar 2.4. Mekanisme Mesin <i>Stirling</i> Tipe Beta .....	12
Gambar 2.5. Mekanisme Mesin <i>Stirling</i> Tipe Gamma .....	13
Gambar 2.6. <i>Heater</i> .....	14
Gambar 2.7. Piston.....	15
Gambar 2.8. <i>Displacer</i> .....	16
Gambar 2.9. <i>Burner</i> .....	16
Gambar 2.10. Gas Kerja Mesin <i>Stirling</i> .....	17
Gambar 3.1. <i>Stopwatch</i> .....	25
Gambar 3.2. Tabung Helium.....	25
Gambar 3.3. Kompresor Vakum .....	26
Gambar 3.4. <i>Thermocouple Sensor</i> .....	26
Gambar 3.5. <i>Manifold Gauge</i> .....	27
Gambar 3.6. <i>Thermometer Infrared</i> .....	27
Gambar 3.7. <i>Heater</i> untuk mesin <i>Stirling</i> mCHPSE-012020 .....	28
Gambar 3.8. Skema Pengujian .....	29
Gambar 3.9. Diagram Alir Pengujian .....	31
Gambar 4.1. Grafik Temperatur dan Tekanan Helium <i>Heater</i> 0,1 bar .....	64
Gambar 4.2. Grafik Temperatur dan Tekanan Helium <i>Heater</i> 0,2 bar .....	65
Gambar 4.3. Grafik Temperatur dan Tekanan Helium di <i>Heater</i> 0,3 bar .....	66
Gambar 4.4. Grafik Temperatur dan Tekanan Helium <i>Heater</i> 0,4 bar.....	67
Gambar 4.5. Grafik Temperatur dan Tekanan Helium <i>Heater</i> 0,5 bar.....	68
Gambar 4.6. Grafik Temperatur dan Tekanan Udara <i>Heater</i> 0,1 bar .....	69
Gambar 4.7. Grafik Temperatur dan Tekanan Udara <i>Heater</i> 0,2 bar .....	70
Gambar 4.8. Grafik Temperatur dan Tekanan Udara <i>Heater</i> 0,3 bar .....	71
Gambar 4.9. Grafik Temperatur dan Tekanan Udara <i>Heater</i> 0,4 bar .....	72
Gambar 4.10. Grafik Temperatur dan Tekanan Udara <i>Heater</i> 0,5 bar .....	73
Gambar 4.11. Grafik Perbandingan Helium dan Udara pada Tekanan 0,1 bar .....	74
Gambar 4.12. Grafik Perbandingan Helium dan Udara pada Tekanan 0,2 bar .....	75
Gambar 4.13. Grafik Perbandingan Helium dan Udara pada Tekanan 0,3 bar .....	76

Gambar 4.14. Grafik Perbandingan Helium dan Udara pada Tekanan 0,4 bar .....76

Gambar 4.15. Grafik Perbandingan Helium dan Udara pada Tekanan 0,5 bar .....77



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Mesin *Stirling* merupakan mesin kalor yang bekerja berdasarkan prinsip siklus *Stirling*, yaitu dengan memanfaatkan perbedaan temperatur antara dua sumber panas untuk menghasilkan kerja mekanis. Salah satu komponen kunci dalam sistem ini adalah *heater* atau pemanas, yang berfungsi sebagai sumber panas eksternal untuk memanaskan fluida kerja (biasanya gas seperti udara, helium, atau hidrogen) di dalam mesin. Efektivitas *heater* secara langsung mempengaruhi efisiensi termal dan performa keseluruhan dari 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 (Thombare & Verma, 2008):

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.

Nilai temperatur udara di dalam *heater* sangat dipengaruhi oleh lamanya pemanasan dan temperatur sumber panas. Ini karena semakin lama pemanasan dilakukan maka akan semakin banyak laju perpindahan panas yang berpindah dari

sumber panas ke dinding *heater* dan diteruskan secara konveksi ke udara. Dan semakin tinggi temperatur sumber panas yang diberikan yaitu dalam kasus ini kategori ke-I maka semakin besar laju perpindahan panas yang diterima oleh udara (Siregar, Jufrizal, Hasanah, & Agusdiandy, 2022)

Adapun penelitian ini melanjutkan penelitian yang dilakukan oleh tim peneliti mCHPSE (*micro combined heat and power Stirling engine*) yang telah mengembangkan beberapa mesin *Stirling* tipe gamma (Jufrizal, Napitulu, Ilmi, Ambarita, & Meliala, 2022a). Tim peneliti mCHPSE ini merupakan kerjasama antara mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Medan dan Universitas Sumatera Utara. Generasi pertama dikembangkan pada tahun 2018 yang diberi nama mCHPSE-012018 (Jufrizal, Napitulu, Ilmi, & Ambarita, 2020). Dan diikuti oleh generasi selanjutnya pada tahun 2019 yang bernama mCHPSE-012019 (Jufrizal, Napitulu, Ilmi, Ambarita, & Meliala, 2022b). pada tahun 2020 telah dikembangkan sebuah Mesin *Stirling* tipe Gamma yang merupakan generasi ke-3 yang diberi nama mCHPSE-012020.

Untuk meningkatkan kinerja mesin, penting untuk memilih fluida kerja yang sesuai berdasarkan sifat fisik dan termalnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh fluida kerja terhadap kinerja mesin *Stirling*. Fluida kerja yang berbeda dipelajari (udara, helium, dan hidrogen) karena merupakan fluida kerja yang paling umum digunakan dalam mesin *Stirling* yang dikembangkan. Berdasarkan hasil penelitian, hidrogen menghasilkan tenaga yang lebih besar dan efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan helium dan udara, namun hidrogen adalah gas yang mudah terbakar dan dapat menyebabkan ledakan jika tidak ditangani dengan hati-hati. Oleh karena itu, sebagian besar mesin

*Stirling* yang dikembangkan bekerja lebih baik ketika diisi dengan helium dibandingkan dengan udara karena viskositasnya yang lebih rendah dan konduktivitas termal yang lebih tinggi (Salih, Aljashaami, Qasim, Mola, & Shcheklein, 2023)

Salah satu aspek yang menjadi fokus adalah pemilihan gas yang optimal untuk meningkatkan kinerja mesin stirling. Dalam konteks ini, penggunaan helium sebagai gas kerja menarik perhatian karena sifat-sifatnya yang unik, seperti konduktivitas termal yang tinggi dan massa jenis yang rendah. Sebagai pembangkit tenaga pembakaran eksternal, mesin *Stirling* menggunakan perbedaan suhu antara panas dan sumber dingin untuk menggerakkan piston, menghasilkan energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi listrik. Berdasarkan literatur yang tersedia, ditemukan bahwa pemanfaatan udara sebagai fluida kerja merupakan cara yang lebih hemat biaya pilihan selain helium. Namun, patut dicatat bahwa ketika udara digunakan sebagai fluida kerja dalam *Stirling* mesin, cenderung menghasilkan output daya dan efisiensi yang lebih rendah daripada helium. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji kemungkinan menggunakan kombinasi udara/helium sebagai fluida kerja pada mesin *Stirling*. Penelitian ini memperkenalkan model termodinamika *non-ideal* yang dirancang untuk mesin *Stirling* tipe gamma. Begitu modelnya divalidasi, penelitian ini menggunakan campuran helium dan udara sebagai fluida kerja dalam model termodinamika dari satu fluida operasi. Setelah langkah ini, data yang diperlukan diambil dari model termodinamika menggunakan pendekatan Desain Eksperimen, dan sebuah kurva dipasang pada data untuk menetapkan fungsi yang diinginkan. Terakhir, optimasi multi-tujuan berdasarkan algoritma genetika dilakukan pada fungsi yang diperoleh

perangkat lunak mode-FRONTIER untuk menentukan rasio pencampuran udara dan helium, di mana efisiensi dan tenaga mesin *Stirling* meningkat, dan biaya konsumsi fluida kerja serta kehilangan panas menurun. Itu hasil optimasi menunjukkan bahwa pada optimasi empat tujuan, parameter input yang paling optimal untuk direduksi biaya dan pembuangan panas serta peningkatan daya dan efisiensi adalah persentase helium sebesar 34,6%, kecepatan 614 rpm, tekanan 4,5 bar, dan suhu panas 597°C. Mengoptimalkan dengan udara dan gas helium campuran meningkatkan daya sebesar 124,8% dibandingkan dengan 100% helium tanpa optimasi (Vaziri, Azadi, Biglari, & Madani, 2024).

## 1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik perubahan temperatur dan tekanan dalam sistem pemanasan menggunakan helium dan udara sebagai gas kerja pada berbagai tekanan operasi?
2. Sejauh mana efisiensi perpindahan panas dalam *heater* dipengaruhi oleh ketebalan *heater* dan distribusi panas pada berbagai titik pengukuran?
3. Bagaimana pengaruh optimasi desain *heater*, terhadap efisiensi perpindahan panas dan kinerja keseluruhan mesin *Stirling*?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah.

1. Menganalisis distribusi panas pada *heater* untuk mengetahui temperatur maksimum helium didalam *heater*, serta membandingkan dengan

penggunaan udara sebagai fluida kerja.

2. Mengetahui peningkatan tekanan akhir dalam sistem *heater* saat menggunakan gas helium sebagai fluida kerja dan membandingkan dengan udara saat tekanan maksimum.
3. Membandingkan kinerja helium dan udara sebagai fluida kerja dalam sistem *heater*, dengan fokus pada suhu helium tertinggi dan tekanan akhir yang dihasilkan oleh masing-masing fluida.

#### 1.4. Hipotesis Penelitian

Adapun Hipotesis pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Temperatur pada titik yang lebih dekat dengan sumber panas akan meningkat lebih cepat dibandingkan titik yang lebih jauh, menunjukkan adanya perbedaan efisiensi pemanasan berdasarkan lokasi.
2. Peningkatan tekanan dalam sistem pemanas sebanding dengan kenaikan temperatur, tetapi tekanan akan mencapai kestabilan setelah sistem mencapai kondisi termal yang seimbang.

#### 1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan pemahaman yang lebih dalam mengenai mekanisme perpindahan panas dalam sistem pemanas berbasis gas helium dan udara, sehingga dapat digunakan untuk optimalisasi desain *heater* di masa depan.

2. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan teknologi pemanas industri yang lebih efisien, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan kestabilan temperatur dan tekanan dalam sistem tertutup.

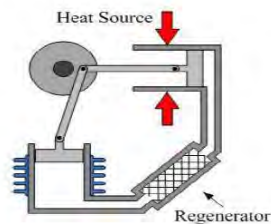


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Mesin *Stirling*

Mesin striling merupakan perangkat mekanik yang beroperasi pada siklus termodinamika tertutup, dengan siklus kompresi dan ekspansi fluida kerja pada tingkat suhu yang berbeda. Alirannya dikendalikan oleh perubahan volume dan ada total perubahan atau konversi dari panas ke kerja ataupun sebaliknya.

Mesin *Stirling* pada umumnya memiliki cara kerja memanfaatkan sifat dasar udara yang akan memuai jika dipanaskan dan akan menyusut jika didinginkan. Dengan demikian akan terjadi siklus pemuain dan penyusutan sehingga sebuah mesin dapat berputar. Dari defenisi tadi dapat ditarik kesimpulan bahwa mesin *Stirling* akan bekerja atau berputar jika terdapat perbedaan temperatur. Perbedaan temperatur tersebut mengakibatkan adanya perbedaan tekanan yang akhirnya menghasilkan ekspansi dari fluida kerjanya. Ekspansi inilah yang dimanfaatkan untuk dikonversi menjadi kerja oleh piston yang kemudian dihubungkan ke poros engkol (*crankshaft*) agar menjadi kerja mekanik. Poros engkol ini kemudian dihubungkan ke *flywheel* agar dapat terjadi siklus berikutnya (A, Rachman, 2017).



Gambar 2.1. *Stirling Engine*

### 2.3.1. Siklus Mesin *Stirling*

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, di dalamnya 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 persentasi yang sangat membantu dalam analisis operasi mesin panas yaitu diagram tekanan-volume (P-V) dan diagram temperatur-entropi (T-S). Kedua diagram tersebut sangat lah penting dikarenakan area didalam diagram P-V

menggambarkan kerja yang dihasilkan dan area didalam diagram T-S menggambarkan proses perpindahan panas.

*Stirling engine* adalah mesin thermal dengan beberapa piston yang didalamnya terdapat gas kerja dengan massa 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* (T, Faculty E;, 2000).

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.

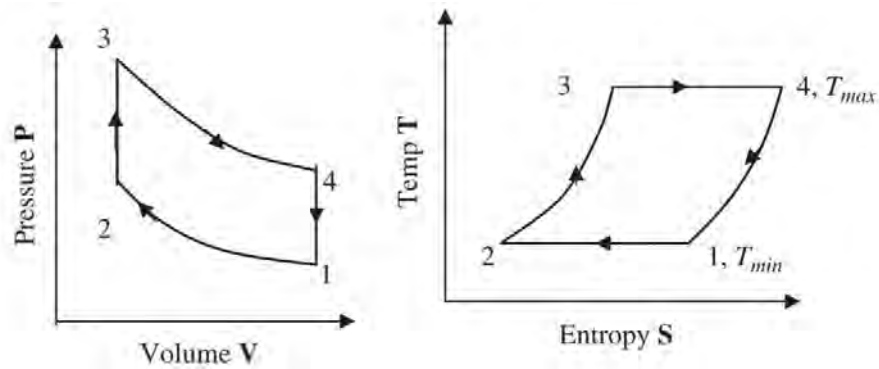
Empat proses yang benar-benar reversibel berlangsung dalam siklus *Stirling* yaitu:

1-2 T = ekspansi konstan (penambahan panas dari sumber luar).

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

3-4 T = kompresi konstan (panas dibuang ke pembuangan luar).

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



Gambar 2.2. Diagram PV dan TS untuk mesin *Stirling*

## 2.2. Jenis – Jenis Mesin *Stirling*

Mesin *Stirling* didefinisikan sebagai mesin regenerasi udara panas siklus tertutup. Dalam konteks ini, siklus tertutup berarti bahwa fluida kerjanya secara permanen terkurung didalam sistem. Mesin *Stirling* disebut juga mesin udara dengan model mesin pembakaran luar siklus tertutup.

Mesin *Stirling* adalah sebuah mesin panas yang beroperasi secara kompresi siklik (berulang-ulang) dan melalui pemuain udara atau gas (gaya fluida), pada tingkat suhu yang berbeda sehingga ada konversi energi panas menjadi energi mekanik (termodinamika) (Jufrizal, Napitulu, Ilmi, Ambarita, Supriatno, & Irwanto, 2023).

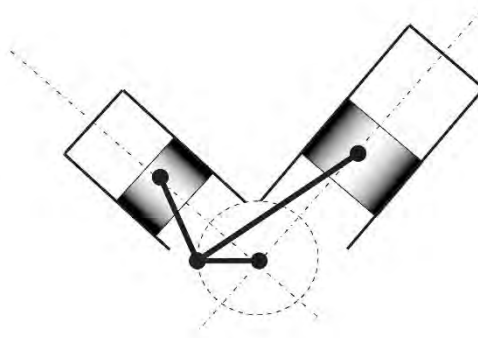
Seperti mesin uap, mesin *Stirling* secara tradisional diklasifikasikan sebagai mesin pembakaran eksternal, seperti transfer panas dari tabung pembakaran (tabung yang dibakar dari luar). Ini berbeda dengan mesin pembakaran internal, dimana masukan panas didapatkan dari pembakaran bahan bakar didalam 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.

### 2.2.1. Mesin *Stirling* Tipe Alpha

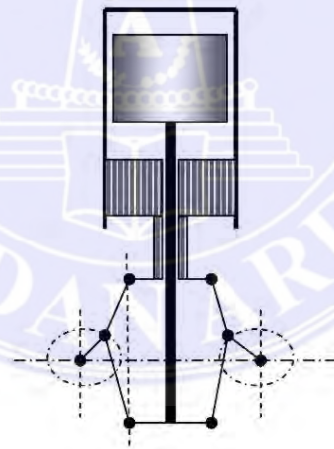
Mesin *Stirling* Alpha berisi kekuatan dua piston dalam silinder yang terpisah, satu berada didingin dan satunya berada dipanas. Silinder panas terletak di dalam suhu tinggi penghantar panas (silinder yang dibakar) dan silinder dingin terletak didalam *displacer* suhu rendah. Jenis mesin ini memiliki rasio power-to-volume 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, berikut ini gambar mekanisme mesin *Stirling* tipe alpha.



Gambar 2.3. Mekanisme Mesin *Stirling* Tipe Alpha

### 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, berikut dibawah ini gambar mekanisme mesin *Stirling* tipe beta.

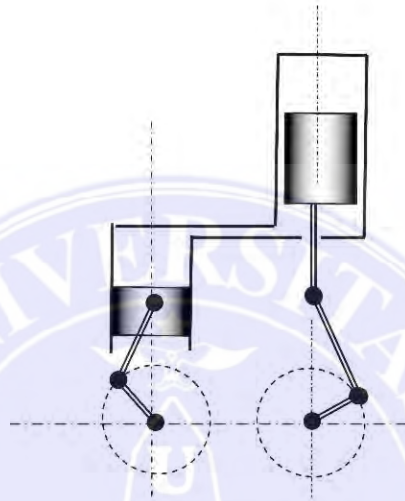


Gambar 2.4. Mekanisme Mesin *Stirling* Tipe Beta

### 2.2.3. Mesin *Stirling* Tipe Gamma

Mesin *Stirling* Gamma mirip dengan sebuah mesin *Stirling* Beta, pada mesin *Stirling* jenis ini piston tenaga terpasang didalam 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 dalam mesin *Stirling* multi-silinder, berikut ini gambar mekanisme mesin *Stirling* tipe gamma.



Gambar 2.5. Mekanisme Mesin *Stirling* Tipe Gamma

### 2.3. Komponen Mesin *Stirling*

Mesin *Stirling* terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja bersama untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanis. Berikut adalah penjelasan detail mengenai masing-masing komponen:

#### 2.3.1. *Heater*

*Heater* merupakan komponen kunci yang mendukung kinerja mesin *Stirling*. Fungsi utama *heater* dalam mesin *Stirling* adalah untuk memanaskan gas kerja yang ada di dalam sistem. Proses pemanasan ini terjadi saat fluida kerja berada di bagian panas dari mesin. Saat dipanaskan, fluida kerja tersebut mengembang dan meningkatkan tekanan dalam ruang kerja. Pemanasan fluida

kerja adalah tahap awal dari siklus kerja mesin *Stirling* (Ritonga, 2025). Proses ini mengubah energi panas menjadi energi mekanik yang dapat digunakan. Tanpa pemanasan yang efisien pada fluida kerja, mesin *Stirling* tidak dapat berfungsi secara optimal atau bahkan sama sekali. Kualitas pemanasan, transfer panas yang efisien, dan kontrol suhu yang baik sangat penting dalam menjaga kinerja optimal dari mesin *Stirling* (Hidayat, Al Ridho, Jufrizal, Supriatno, & Nurdiana, 2023), berikut ini gambar *heater* pada mesin *Stirling*.



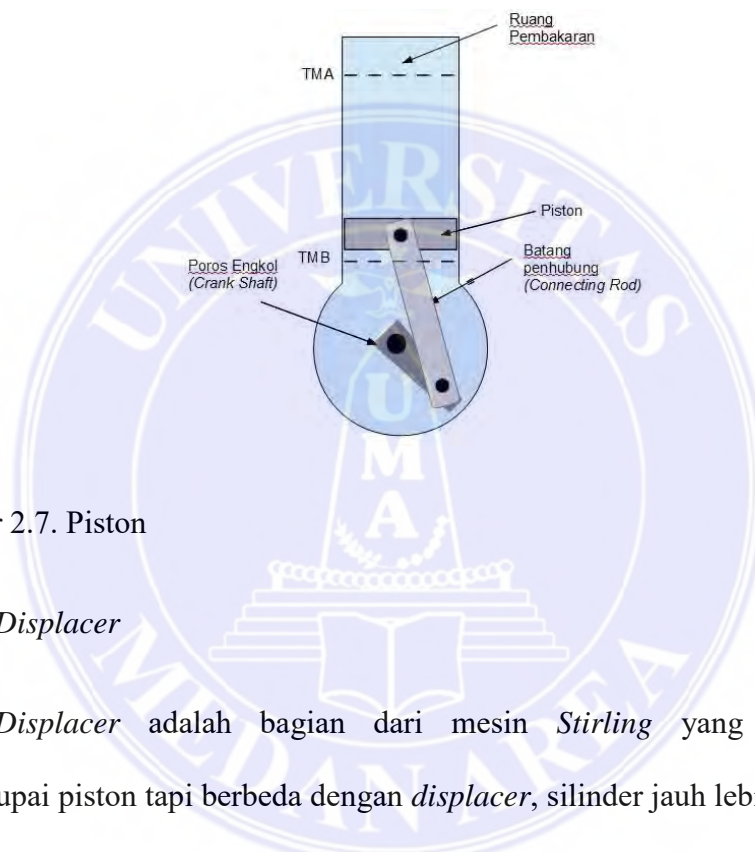
Gambar 2.6. *Heater*

### 2.3.2. Pendingin (*Cooler*)

Pendingin sama pentingnya dengan pemanas untuk menjaga gradien suhu yang menunjukkan mesin beroperasi. Dalam kasus mesin *Stirling*, pendingin memerlukan penanganan hampir dua kali lipat beban pendingin mesin konvensional internal untuk mengurangi suhu fluida kerja pada tingkat yang diinginkan (Prasetio, Jufrizal, & Supriatno, 2024). Sistem yang lebih umum digunakan pada mesin *Stirling* adalah pengaturan pendingin air. Kondisi aliran fluida kerja bagian dalam serupa dengan aliran di dalam pemanas, tetapi pada suhu yang lebih rendah (Graham, 1980).

### 2.3.3. Piston

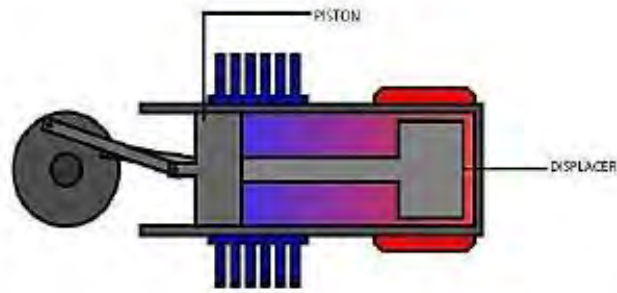
Piston adalah anggota geser yang dapat bergerak dari satu ujung ekstrim dari silinder ke ujung ekstrim silinder yang lain. Biasa disebut sebagai titik mati. Biasanya gerakan piston bervariasi volume dalam silinder sejak fluida kerja tidak melarikan diri melalui celah (*clearance*) antara piston dan antarmuka silinder.



Gambar 2.7. Piston

### 2.3.4. 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 mengalir dengan mudah melalui ruang. Karena seperti yang dapat kita bayangkan, pergerakan *displacer* tidak mengkompresi 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 gaya pada piston.

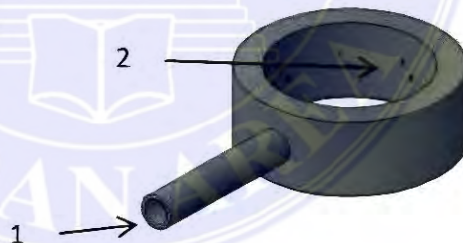


Gambar 2.8. *Displacer*

### 2.3.5. *Burner*

*Burner* adalah suatu alat yang digunakan untuk memanaskan *heater* sebagai sumber panas awal yang panasnya berfungsi untuk menggerakkan mesin *Stirling* (Jufrizal, Siregar, Saktisahdan, Putra, Syahputra, & Syahputra, 2022). *Burner* gas LPG merupakan tempat terjadi pembakaran pada kompor yang menggunakan sumber bahan bakas gas (Mawardi, Jufrizal, & Hidayah, 2022).

1. Lubang Input
2. Lubang output



Gambar 2.9. *Burner*

## 2.4. Gas Kerja

Gas kerja adalah fluida yang digunakan dalam siklus termodinamika mesin *Stirling* untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanis. Pemilihan gas kerja yang tepat sangat penting untuk efisiensi dan kinerja mesin *Stirling*. Berikut adalah beberapa gas yang umum digunakan sebagai gas kerja dalam mesin

*Stirling*, beserta karakteristik dan keunggulannya, dan gambar gas kerja dalam mekanisme mesin *Stirling*.



Gambar 2.10. Gas Kerja Mesin *Stirling*

#### 2.4.1. Helium

Helium memiliki konduktivitas termal yang tinggi sehingga memungkinkan transfer panas yang cepat dan efisien. Helium memiliki rapat massa yang rendah sehingga mengurangi gesekan internal dan memungkinkan operasi mesin yang lebih halus dan efisien (Shufat, Kurt, Cinar, Aksoy, Hancerliogullari, & Solmaz, 2019).

Berikut adalah rumus dan keterangan untuk menghitung konstanta gas spesifik  $R$  untuk helium.

$$R_{He} = \frac{R_u}{M} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

$R_{He}$  = Konstanta gas spesifik untuk helium (Kg/K)

$R_u$  = Konstanta gas universal (mol/K)

$M$  = Massa molar helium (Kg/mol)

### 2.4.2. Hidrogen

Konsep mesin pembakaran internal hydrogen, pemanasan gas kerja dalam mesin *Stirling* konvensional dilakukan dengan menggunakan penukar panas suhu tinggi, sedangkan mesin pembakaran internal hidrogen menggunakan pembakaran campuran  $H_2-O_2$  stoikiometri yang disuntikkan ke dalam gas kerja sebagai input termal (Takahashi, Morita, Murata, & Yamashita, 2003).

Berikut adalah rumus dan keterangan untuk menghitung konstanta gas spesifik  $R$  untuk hidrogen.

$$R_{H_2} = \frac{R_u}{M} \dots\dots\dots(2)$$

$R_{H_2}$  = Konstanta gas spesifik untuk hidrogen (Kg/K)

$R_u$  = Konstanta gas universal (mol/K)

$M$  = Massa molar hidrogen (Kg/mol)

### 2.4.3. Nitrogen

Nitrogen digunakan sebagai fluida kerja pada mesin *Stirling* untuk mengetahui pengaruh fluida ini terhadap daya keluaran mesin. Kalor jenis pada tekanan dan volume konstan fluida ini masing-masing adalah 1040 dan 743 J/kg K. Kerja keluaran per siklus untuk nitrogen sebagai fluida kerja adalah pada tekanan 800, 970, dan 1300 rpm. Seperti helium, kerja keluaran per siklus

meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan pengisian mesin (Katooli, Moghadam, & Hooshang, 2020).

Berikut adalah rumus dan keterangan untuk menghitung konstanta gas spesifik R untuk nitrogen.

$$R_{N_2} = \frac{R_u}{M} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

$R_{N_2}$  = Konstanta gas spesifik untuk nitrogen (Kg/K)

$R_u$  = Konstanta gas universal (mol/K)

$M$  = Massa molar nitrogen (Kg/mol)

### 2.4.3. Udara

Udara sangat mudah didapat dan tidak memerlukan sistem penyimpanan khusus akan tetapi juga memiliki kekurangan karena kandungan oksigen pada udara dapat menyebabkan korosi pada beberapa material dan memiliki efisiensi yang lebih rendah.

$$R_{udara} = \frac{R_u}{M} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

$R_{udara}$  = Konstanta gas spesifik untuk udara (Kg/K)

$R_u$  = Konstanta gas universal (mol/K)

$M$  = Massa molar udara (Kg/mol)

## 2.5. Parameter Utama Dari Siklus Mesin *Stirling*

### 2.5.1. Jumlah Mol Gas Kerja

Jumlah mol gas kerja ( $n$ ) adalah jumlah partikel gas yang digunakan dalam mesin *Stirling*. Ini adalah parameter penting karena menentukan bagaimana gas bereaksi terhadap perubahan suhu dan volume dalam siklus termodinamika mesin. Untuk menghitung jumlah mol gas kerja dalam mesin *Stirling*, kita menggunakan hukum gas ideal (Oberweis & Al-Shemeri, 2011)

Hukum gas ideal dinyatakan sebagai:

$$PV = nRT \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

- $P$  = Tekanan gas (Pa)
- $V$  = Volume gas ( $m^3$ )
- $n$  = Jumlah mol gas (mol)
- $R$  = Konstanta gas ideal ( $J/mol \cdot K$ )
- $T$  = Suhu gas (K)

Untuk menghitung jumlah mol gas kerja ( $n$ ) dalam mesin *Stirling*, kita menggunakan persamaan gas ideal pada kondisi awal (proses isokhorik):

$$n = \frac{P_1 V_{min}}{RT_c} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana:

- $P_1$  = Tekanan awal gas dalam kondisi dingin (Pa)
- $V_{min}$  = Volume minimum gas ( $m^3$ )
- $R$  = Konstanta gas ideal ( $J/mol \cdot K$ )
- $T_c$  = Suhu dingin (K)

### 2.5.2. Tekanan Pada Proses Isokhorik

Proses isokhorik adalah proses di mana volume gas tetap konstan. Dalam siklus mesin *Stirling*, ada dua proses isokhorik: pemanasan isokhorik dan pendinginan isokhorik. ada proses isokhorik (juga dikenal sebagai proses isovolumetrik atau isometrik), volume gas tetap konstan. Dalam konteks termodinamika, perubahan tekanan gas selama proses isokhorik berkaitan langsung dengan perubahan suhu, sesuai dengan hukum gas ideal.

#### 1) Proses Pemanas Isokhorik 1-2

Pada proses ini, gas dipanaskan pada volume tetap. Akibatnya, suhu gas meningkat, dan sesuai dengan hukum gas ideal, tekanan juga meningkat. Proses ini adalah bagian penting dalam analisis siklus termodinamika, seperti siklus *Stirling*, di mana pemahaman tentang bagaimana energi termal diubah menjadi tekanan dan suhu sangat penting untuk perancangan dan analisis efisiensi mesin.

Berikut rumus tekanan akhir setelah pemanasan isokhorik.

$$P_2 = P_1 \times \frac{T_h}{T_c} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana:

$P_2$  = Tekanan akhir setelah pemanasan isokhorik (Pa)

$P_1$  = Tekanan awal sebelum pemanasan isokhorik (Pa)

$T_h$  = Suhu panas setelah pemanasan isokhorik (K)

$T_c$  = Suhu dingin sebelum pemanasan isokhorik (K)

#### 2) Proses Pendinginan Isokhorik 3-4

Proses termodinamika di mana volume dari sistem tertutup yang menjalani proses tetap konstan. Proses isokhorik dapat dicontohkan dengan pemanasan atau

pendinginan pada wadah tertutup. Pada proses ini, gas didinginkan pada volume tetap. Akibatnya, suhu gas menurun, dan sesuai dengan hukum gas ideal, tekanan juga menurun.

Berikut rumus untuk tekanan akhir setelah pendinginan isokhorik.

$$P_4 = P_3 \times \frac{T_h}{T_c} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana:

- $P_4$  = Tekanan akhir setelah pendinginan isokhorik (Pa)
- $P_3$  = Tekanan awal sebelum pendinginan isokhorik (Pa)
- $T_h$  = Suhu dingin setelah pendinginan isokhorik (K)
- $T_c$  = Suhu panas sebelum pendinginan isokhorik (K)

### 2.5.3. Proses Isotermik

Dalam siklus mesin *Stirling*, ada dua proses isotermik: ekspansi isotermik dan kompresi isotermik. Pada kedua proses ini, suhu gas tetap konstan, dan perubahan volume gas menyebabkan perubahan tekanan dan menghasilkan kerja. Dalam proses isotermik, suhu gas tetap konstan ( $T = \text{konstan}$ ). Oleh karena itu, menurut hukum gas ideal ( $PV = nRT$ ), produk tekanan ( $P$ ) dan volume ( $V$ ) juga harus tetap konstan.

#### 1) Proses Ekspansi Isotermik (2-3)

Pada proses ekspansi isotermik, gas mengembang pada suhu tinggi konstan ( $T_h$ ). Saat gas mengembang, ia melakukan kerja pada piston atau silinder. Berikut rumus untuk kerja selama ekspansi isotermik.

$$W_{23} = nRT_h \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \dots\dots\dots(8)$$

Dimana:

- $W_{23}$  = Kerja selama ekspansi isotermik (J)
- $n$  = Jumlah mol gas (mol)
- $R$  = Konstanta gas ideal (J/mol·K)
- $T_h$  = Suhu panas konstan selama ekspansi (K)
- $V_{max}$  = Volume maksimum setelah ekspansi (m<sup>3</sup>)
- $V_{min}$  = Volume minimum sebelum ekspansi (m<sup>3</sup>)

2) Proses Kompresi Isotermik (4-1)

Pada proses kompresi isotermik, gas dikompresi pada suhu yang rendah konstan ( $T_c$ ). Saat gas dikompresi, kerja dilakukan pada gas oleh piston atau silinder. Berikut rumus untuk kerja selama kompresi isotermik.

$$W_{41} = nRT_c \ln\left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right) \dots\dots\dots(9)$$

Dimana:

- $W_{41}$  = Kerja selama kompresi isotermik (J)
- $n$  = Jumlah mol gas (mol)
- $R$  = Konstanta gas ideal (J/mol·K)
- $T_c$  = Suhu dingin konstan selama kompresi (K)
- $V_{max}$  = Volume maksimum sebelum kompresi (m<sup>3</sup>)
- $V_{min}$  = Volume minimum setelah kompresi (m<sup>3</sup>)

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. Tempat dan Waktu

#### 3.1.1. Tempat

Kegiatan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Universitas Medan Area, Jalan Kolam No. 1 Medan Estate / Jalan Gedung PBSI, Medan 20223.

#### 3.1.2. Waktu

Penelitian dilakukan selama 6 bulan dengan jadwal kegiatan penelitian dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Jadwal Kegiatan Penelitian

Aktivitas	2024-2025																							
	Bulan Ke-I				Bulan Ke-II				Bulan Ke-III				Bulan Ke-IV				Bulan Ke-V				Bulan Ke-VI			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pengajuan Judul	■																							
Penulisan Proposal		■	■																					
Seminar Proposal				■																				
Proses Penelitian					■	■	■	■	■	■	■	■												
Pengelolaan & penyelesaian data laporan													■	■	■	■	■	■	■	■				
Seminar Hasil																					■			
Evaluasi dan persiapan sidang																						■	■	
Sidang sarjana																							■	

## 3.2. Alat dan Bahan

### 3.2.1. Alat

#### 1) Stopwatch

*Stopwatch* berfungsi untuk mengukur waktu saat pengujian *Stirling Engine* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. *Stopwatch*

#### 2) Tabung Gas Helium

Tabung gas digunakan untuk menampung helium yang digunakan sebagai gas kerja pada pengujian *Stirling Engine* dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Tabung Helium

### 3) Kompresor Vakum

Kompresor vakum berfungsi untuk mengurangi tekanan udara yang ada didalam *heater* agar nantinya helium yang digunakan sebagai pengujian tidak tercampur dengan udara yang berada didalam *heater*. Berikut dibawah ini dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Kompresor Vakum

### 4) *Thermocouple Sensor*

Digunakan untuk mengukur suhu gas kerja pada berbagai titik dalam mesin *Stirling*. Thermocouples menawarkan presisi yang tinggi dan dapat ditempatkan di lokasi yang sulit dijangkau oleh termometer konvensional, dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. *Thermocouple Sensor*

### 5) *Manifold Gauge*

*Manifold Gauge* memiliki peran penting sebagai alat bantu untuk memantau dan mengendalikan tekanan internal sistem secara presisi pada proses pengisian (*charging*) dan pengurasan (*discharging*) fluida kerja sebagai tahapan krusial yang sangat memengaruhi performa dan efisiensi termal mesin. Berikut dibawah ini dapat dilihat *manifold gauge* yang digunakan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5. *Manifold Gauge*

### 6) *Thermometer Infrared*

Adalah sebuah alat untuk mengukur suhu yang dapat mengukur temperatur tanpa bersentuhan dengan objek. Alat ini mampu untuk mendeteksi temperatur secara optik selama objek diamati, radiasi energi sinar inframerah diukur dan dikonversikan sebagai suhu dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. *Thermometer Infrared*

### 3.2.2. Bahan

#### 1) Helium

Helium digunakan sebagai bahan uji coba penelitian mesin *Stirling* untuk perbandingan efektivitas jika memakai helium dan tidak memakai helium

#### 2) Gas LPG

Gas LPG digunakan sebagai pembakaran sumber panas untuk menjalankan mesin *Stirling* tipe gamma.

### 3.3. Heater

Adapun *heater* yang akan diuji dapat dilihat pada gambar 3.7 dibawah ini:

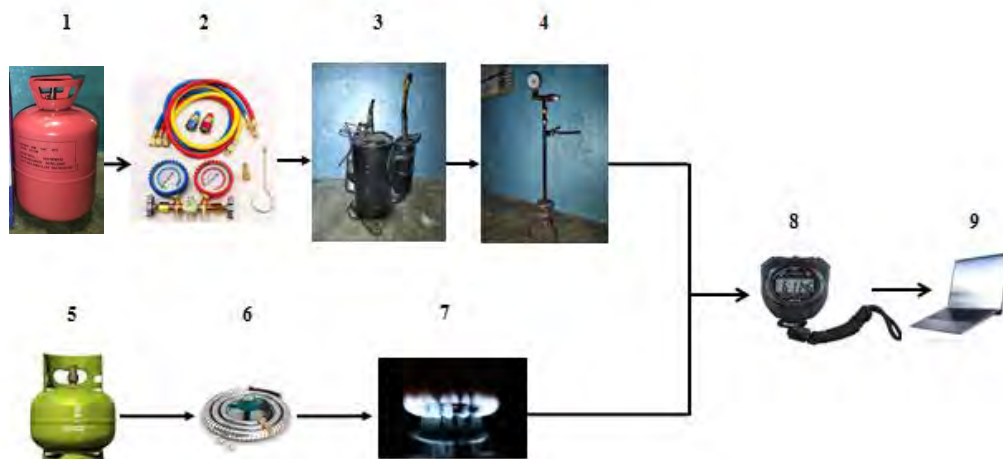
#### 1) Heater yang akan digunakan untuk mesin *Stirling* mCHPSE-012020



Gambar 3.7. Heater untuk mesin *Stirling* mCHPSE-012020

### 3.4. Skema Pengujian

Berikut dibawah ini gambar 3.8 untuk menguji *heater* menggunakan helium sebagai gas kerja.



Gambar 3.8. Skema Pengujian

Keterangan:

1. Gas Helium
2. *Manifold Gauge*
3. Kompresor Vakum
4. *Heater*
5. Gas LPG
6. Selang Regulator
7. Burner
8. Stopwatch
9. Laptop

### 3.5. Langkah-Langkah Pengujian

- 1) Persiapan Peralatan dan Bahan
  - a. Helium (1) digunakan sebagai gas kerja dalam pengujian *heater*.
  - b. Gas LPG (5) digunakan sebagai bahan bakar untuk pemanasan *heater*.
  - c. Peralatan pengujian: *Mainifold Gauge* (2), Kompresor Vakum (3), Selang Regulator (6), *Burner* (7), *Stopwatch* (8), dan laptop (9) pencatatan data.
- 2) Pengaturan Aliran Helium
  - a. Tabung *Heater* yang akan diisi helium divakum terlebih dahulu dengan kompresor vakum (3) agar nantinya pengujian tidak tercampur dengan udara yang berada didalam *heater*.

- b. Helium dialirkan melalui *Mainifold Gauge* (2) untuk mengukur laju alir gas.
- 3) Pengaturan Sistem Pemanasan
  - a. LPG dari tabung (5) disalurkan melalui selang dan regulator (6) menuju *burner* (7) untuk menghasilkan nyala api yang stabil.
  - b. *Burner* digunakan untuk memanaskan *heater* yang akan diuji.
- 4) Pengambilan Data
  - a. Laju aliran helium dan tekanan dicatat dari *Manifold Gauge* (2)
  - b. Lama waktu pemanasan *heater* dicatat menggunakan stopwatch (8).
  - c. Semua data yang diperoleh dimasukkan ke dalam laptop (9) untuk analisis lebih lanjut.
- 5) Analisis Hasil
  - a. Berdasarkan data yang dikumpulkan, dilakukan evaluasi terhadap performa *heater*.

Berikut dibawah ini adalah tabel 3.2 pengujian *heater* yang akan diamati pada penelitian:

Tabel 3.2. Variabel Perubahan Yang Diamati Pada Penelitian

Waktu (menit)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	P2 (bar)
0					
1					

Keterangan:

T1 = sumber api kompor

T2 = temperatur helium di dalam *heater*

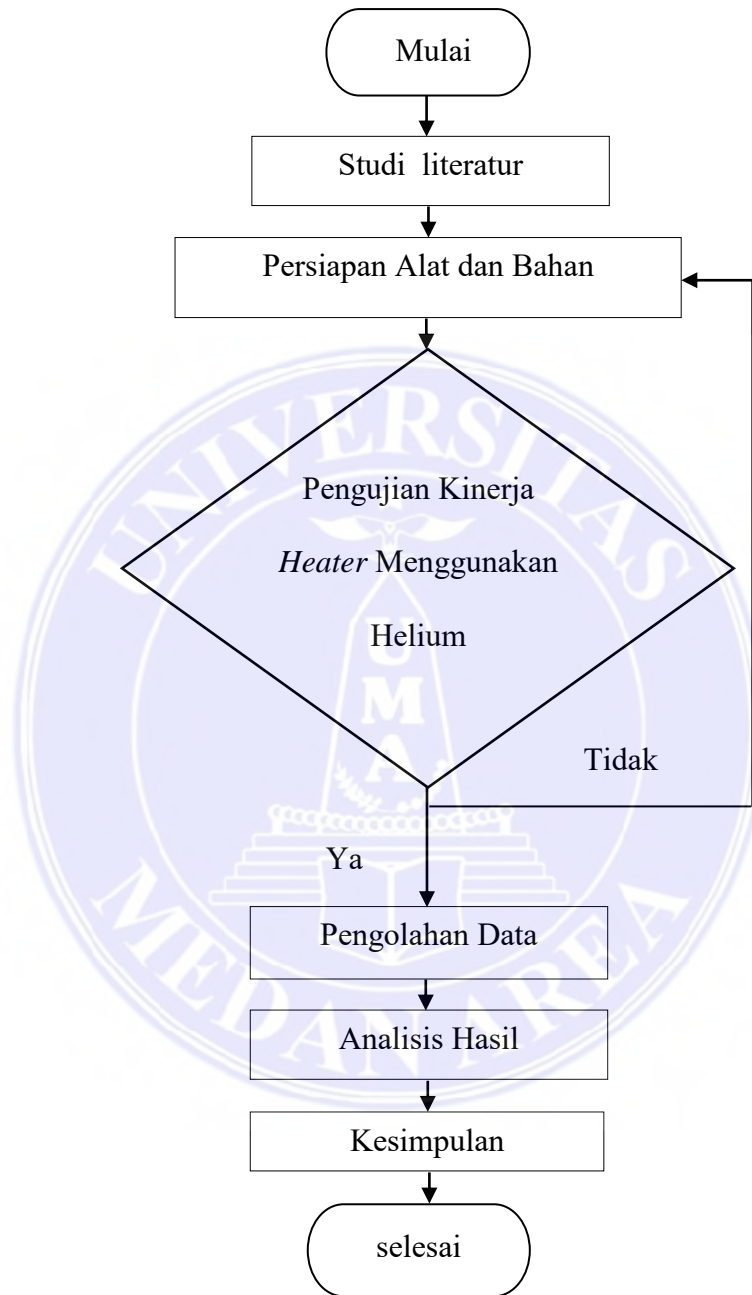
T3 = temperatur dinding *heater* bawah

T4 = temperatur dinding *heater* samping

P2 = tekanan akhir.

### 3.6. Diagram Alir Penelitian

Untuk gambar diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.9. Diagram Alir Pengujian

## BAB V

### SIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Simpulan

1. Distribusi panas pada *heater* menunjukkan bahwa temperatur maksimum sumber api (T1) mencapai  $884,9^{\circ}\text{C}$ , sedangkan temperatur helium di dalam *heater* (T2) tertinggi tercatat sebesar  $64,2^{\circ}\text{C}$  pada tekanan 0,3 bar, lebih tinggi dibandingkan dengan T2 saat menggunakan udara yang hanya mencapai  $51,6^{\circ}\text{C}$  pada tekanan yang sama.
2. Peningkatan tekanan akhir (P2) dalam sistem *heater* menunjukkan bahwa helium mampu menghasilkan tekanan hingga 3,2 bar (pada tekanan awal 0,3–0,5 bar), sedangkan udara hanya mencapai tekanan maksimal 2,5 bar pada tekanan awal yang sama.
3. Secara keseluruhan, helium lebih unggul dibandingkan udara sebagai fluida kerja karena menghasilkan suhu helium tertinggi (T2) sebesar  $64,2^{\circ}\text{C}$  dan tekanan sistem (P2) sebesar 3,2 bar, sedangkan pada penggunaan udara maksimum hanya mencapai T2 sebesar  $51,6^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 2,5 bar.

## 5.2. Saran

1. Untuk meningkatkan efisiensi pemanasan, perlu dilakukan optimasi desain *heater* agar perpindahan panas dari sumber api ke helium lebih efektif, misalnya dengan meningkatkan konduktivitas termal atau memperbaiki distribusi panas dalam *heater*.
2. Penggunaan insulasi termal yang lebih baik dapat membantu mengurangi kehilangan panas dan meningkatkan temperatur helium dalam *heater*, sehingga meningkatkan efisiensi sistem pemanas secara keseluruhan.
3. Perlu dilakukan pengujian tambahan dengan variasi ketebalan *heater* dan perubahan desain aliran gas helium untuk memahami lebih lanjut bagaimana distribusi panas dapat dioptimalkan dalam sistem.

## DAFTAR PUSTAKA

- A, Rachman. (2017). *Perancangan Stirling Engine Tipe Beta Menggunakan Teori SCHMIDT*. Fak. Tek. Univ., Teknik Mesin. Lampung: Tugas Akhir.
- Arjianto, & Usman. (2015). Penggunaan Gas Sebagai Bahan Bakar Pada Sepeda Motor Bermesin Injeksi. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*. Banjarmasin.
- Asnawi, & Setiawan, A. (2017). Pengaruh Penggunaan Elpiji Sebagai Bahan Bakar Terhadap Unjuk Kerja Motor Bakar Bensin. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 43-51.
- Baruno, B. (2014). Kinerja LPG pada Motor Bakar 6,5 HP sebagai Bahan Bakar Alternatif Perahu Penangkap Ikan. *Marine Fisheries*, 14.
- Baruno, B., Iskandar, B. H., Imron, M., & Mawardi, W. (2014). Kinerja LPG Pada Motor Bakar 6,5 HP Sebagai Bahan Bakar Alternatif Perahu Penangkapan Ikan. *Marine Fisheries*, 13-25.
- Basyirun, Winarno, & Karnowo. (2008). *Mesin Konversi Energi*. Semarang: Pusat Penjamin Mutu Universitas Negeri Semarang.
- Borman, G. L., & Ragland, K. W. (1998). *Combustion Engineering*. United States of America: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York: McGraw--Hill Education .

- Ganesan, V. (2004). *Internal Combustion Engines* (2 ed.). New Delhi: McGraw-Hill Education.
- Graham, W. (1980). *Stirling Engine*. New York: United States by Oxford University Press.
- Hashem, G. T., Al-Dawody, M. F., & Sarris, I. E. (2023). The characteristics of gasoline engines with the use of LPG: An experimental and numerical study. *International Journal of Thermofluids*, 1-14.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill Education.
- Hidayat, M. A., Al Ridho, F. F., Jufrizal, Supriatno, & Nurdiana. (2023). Manufaktur dan Pengujian Burner LPG untuk Pemanasan Heater Mesin Stirling mCHPSE-012021. *RA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 1.
- Jufrizal, Napitulu, F. H., Ilmi, & Ambarita, H. (2020). Manufacturing and Testing Prototype of a Gamma Type Stirling Engine for micro-CHP Application. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Hal. 3.
- Jufrizal, Napitulu, F. H., Ilmi, Ambarita, H., & Meliala, M. (2022a). Ideal Cycle Thermodynamic Analysis For Gamma-Type Stirling Engine. *Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET)*, 14, 1-5.
- Jufrizal, Napitulu, 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*, 1-16.

Jufrizal, Naputulu, F. H., Ilmi, Ambarita, H., & Meliala, M. (2022b). Thermodynamic Analysis of a Gamma-Type Stirling Engine for mCHP Application. Dalam A. Ibrahim (Penyunt.), *Proceeding of the 7th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICE SEAM 2021)* (hal. Hal. 225-229). Melaka: Springer Nature Singapore.

Jufrizal, Siregar, H. Z., Saktisahdan, J. T., Putra, K. B., Syahputra, R. M., & Syahputra, N. M. (2022). Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling dengan Variasi Laju Aliran Udara. *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 5-10.

Kambrany, M. A., A, F., & N, F. (2014). Pengaruh Filter Udara Terhadap Unjuk Kerja Mesin Pada Motor Matic. *PROTON*, 42-47.

Katooli, M. A., Moghadam, R. A., & Hooshang, M. (2020). Investigation on Effective Operating Variables in Gamma-Type Stirling Engine Performance: a Simulation Approach. *Springer Nature Journal*, 725.

Lumi, L. A., Pangalila, F. T., Pamikiran, R. C., A Masengi, K. W., Manopo, L., & Dien, H. F. (2023). Studi Perbandingan Penggunaan Bahan Bakar Gas dan Bahan Minyak pada Mesin Katinting. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Perikanan Tangkap*, 25-30.

Mahesh Babu Talupa, Rao, P. S., Kumar, S. P., & Praven, C. (2017). Alternative Fuels for Internal Combustion Engines: Overview of current research.

*SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)*, 20-29.

Mawardi, Jufrizal, & Hidayah, M. (2022). Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling dengan Variasi Konsumsi Bahan Bakar. *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 35-40.

Mulyaningsih, N., & Marjito, A. (2006). Pengaruh Perubahan Pemajuan Waktu Penyalaan Terhadap Motor Dual Fuel (Bensin-BBG). *Fak. Teknik Jurusan Mesin Univ. Tidar Magelang*, 209-221.

Munsong, B. R., Young, D. F., & Okhisii, T. H. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Iowa: John Wiley & Sons.

Nuarsa, I. M., Mara, I. M., & Riskon. (2012). Pengaruh Posisi Penyemprotan Bahan Gas LPG Pada Intake Manifold Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Pada Mesin Bensin Empat Langkah Satu Silinder (Honda supra x). *Dinamika Teknik Mesin*, 55-61.

Oberweis, S., & Al-Shemeri, T. (2011).  $\gamma$ -Stirling engine – The effect of different working gases and pressures. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO)*, 316.

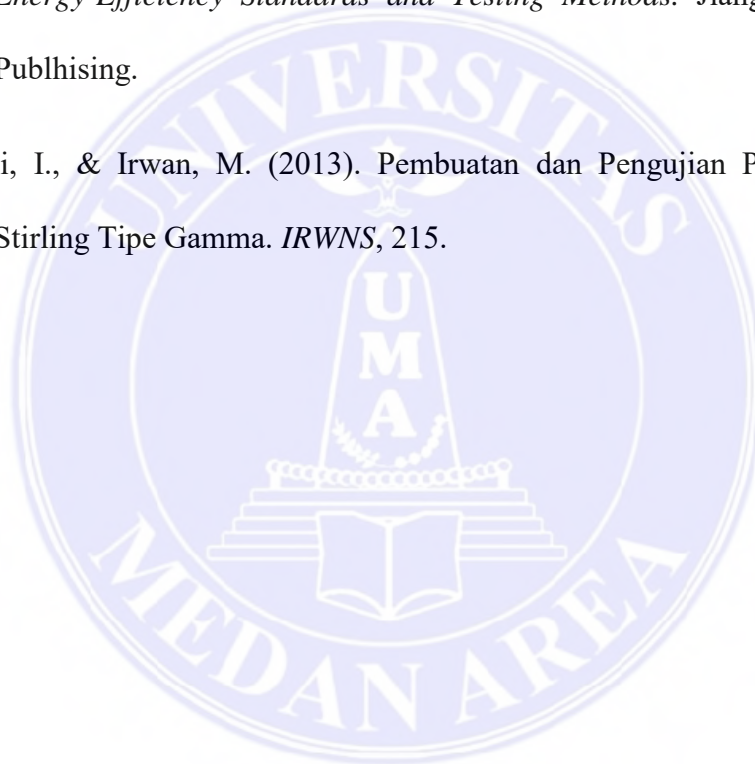
Prasetio, I., Jufrizal, & Supriatno. (2024). Pengujian Kinerja Cooling Water untuk Mesin Stirling tipe Gamma Skala Kecil. *IRAJTMA*, 10-16.

Pudjanarsa, A., & Nursuhud, D. (2013). *Mesin Konversi Energi*. Surabaya: C.V Andi Offset.

- Pulkrabek, W. W. (2015). *Engineering Fundamentals Of The Internal Combustion Engine*. Plateville: Prentice Hall.
- Puppung, P. L. (1986). Penggunaan LPG Sebagai Bahan Bakar Motor Bakar. *Lembaran Publikasi Lemigas*, 30-39.
- Rahmalina, D. (2021). Pengembangan Stirling Engine Tipe Piston Bebas Untuk Aplikasi Concentrated Solar Power (CSP). *Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta*, Vol. 13 No. 1, Hal. 102.
- Ritonga, A. H. (2025, Maret 19). *Pengaruh Bahan dan Ketebalan Dinding Heater Terhadap Temperatur dan Tekanan Udara yang Dihasilkan Mesin Stirling*. Dipetik Agustus 2, 2025, dari Digital Repository UMA: <https://repositori.uma.ac.id/handle/123456789/27943>
- Rohmat, Y. N. (2015). STUDI EKSPERIMEN KONVERSI LPG PADA SEPEDA MOTOR BERBAHAN BAKAR BENSIN. *Jurnal Teknologi Terapan*, 13.
- Salih, S. A., Aljashaami, B. A., Qasim, M. A., Mola, A. H., & Shcheklein, S. E. (2023). The Influence of Working Fluid on Stirling Engine Performance. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 1-5.
- Septiani, Z. D., Rozi, K., & Kiono, B. F. (2023). Perbandingan Hasil Pengujian Performa Pompa dan Perhitungan Teoritis Pada Karakteristik Pompa Terhadap Kecepatan Putar Impeller. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Diponegoro*, 43-50.

- Shufat, S. A., Kurt, E., Cinar, C., Aksoy, F., Hancerliogullari, A., & Solmaz, H. (2019). Exploration of a Stirling engine and generator combination for air and helium media. *Applied Thermal Engineering*, 738-749.
- Siregar, Z. H., Jufrizal, Hasanah, M., & Agusdiandy, M. D. (2022). Pengaruh Variasi Temperatur Sumber Panas Terhadap Temperatur Udara Dalam Heater Mesin Stirling. *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 11-16.
- Soewarno. (1912). *Pengukuran dan Pengolahan Data Aliran Sungai (Hidrometri)*. Bandung: NOVA.
- T, Faculty E;. (2000). Manufacturing and Testing of a V-Type Stirling Engine. *Turk J Engine Env. Sci*, 24, 71-80.
- Takahashi, S., Morita, H., Murata, O., & Yamashita, I. (2003). Hydrogen Internal Combustion Stirling Engine. *JSME International Journal*, 633-643.
- Tasic, T., Pogorevc, P., & Brajlilh, T. (2011). Gasoline And Lpg Exhaust Emissions. *Advances in production engineering and management*, 87-94.
- Thombare, D. G., & Verma, S. K. (2008). Technological Development in the Stirling Cycle Engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-38.
- Vaziri, B., Azadi, M., Biglari, M., & Madani, S. N. ( 2024). Multi-Objective Optimization in Air-Helium Stirling Engine Under Objectives of Efficiency, Power, Heat Loss, and Cost. *Journal of Engineering Research*, 1-13.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill.

- Wiryan, P. N., G, W., & K, R. D. (2014). Penentuan Air Fuel Ratio (AFR) Aktual Pembakaran LPG Pada Celah Sempit Tipe Horizontalis. *Jurnal Teknik Mesin*, 45-51.
- Yeliana, A., & Wibawa, N. P. (2004). Bahan Bakar dan Teknik Pembakaran. *Program Studi Teknik Mesin : Universitas Udayana*.
- Yu, J., Zhang, T., & Qiang, Z. (2011). *Electrical Motor Product: International Energy-Efficiency Standards and Testing Methods*. Jiangsu: Woodhead Publishing.
- Yuliyani, I., & Irwan, M. (2013). Pembuatan dan Pengujian Prototipe Mesin Stirling Tipe Gamma. *IRWNS*, 215.



## LAMPIRAN

### DOKUMENTASI KEGIATAN PENGUJIAN *HEATER*

