

**PENGUJIAN KEMAMPUAN DARI KOMPONEN BAGIAN
*DISPLACER MESIN STIRLING mCHPSE-012021***

SKRIPSI

OLEH:

NIKO TAUFIK ADI NUGRAHA

198130014



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2024**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 25/3/24

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

Access From (repository.uma.ac.id)25/3/24

HALAMAN JUDUL

PENGUJIAN KEMAMPUAN DARI KOMPONEN BAGIAN *DISPLACER MESIN STIRLING mCHPSE-012021*

SKRIPSI

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

OLEH:

NIKO TAUFIK ADI NUGRAHA

198130014

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2024**

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 25/3/24

Access From (repository.uma.ac.id)25/3/24

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Skripsi : Pengujian Kemampuan Dari Komponen Bagian *Displacer* Mesin
Stirling mCHPSE-012021

Nama Mahasiswa : Niko Taufik Adi Nugraha

NIM : 198130014

Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing



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



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



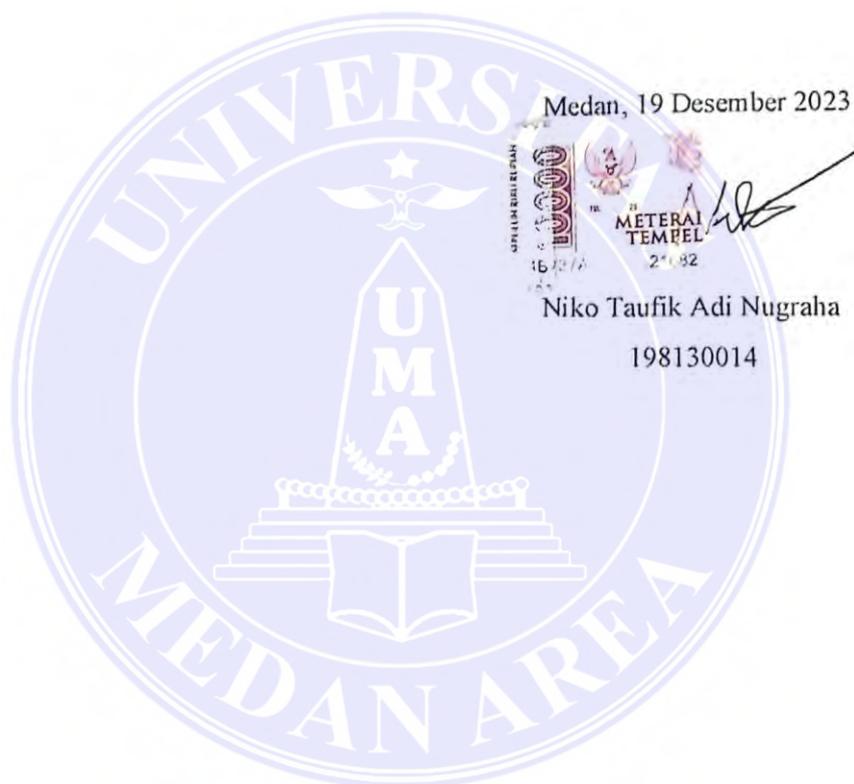
Dr. Iswandi, S.T., M.T.
Ka. Prodi

Tanggal lulus: 19 Desember 2023

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.



**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 : Niko Taufik Adi Nugraha

NPM : 198130014

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 Kemampuan Dari Komponen Bagian *Displacer* Mesin *Stirling* mCHSPE-012021”

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

Pada Tanggal : 19 Desember 2023

Yang menyatakan

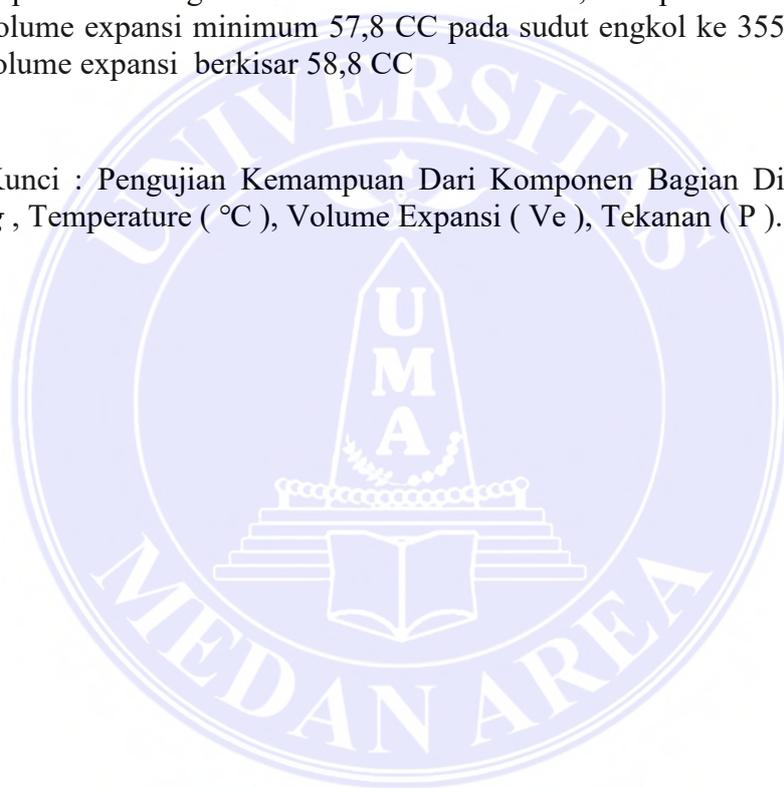


(Niko Taufik Adi Nugraha)

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui dimensi dan komponen ruang ekspansi, perubahan volume sebagai fungsi sudut engkol, temperatur ekspansi, dan tekanan udara. Alat ukur yang digunakan pada penelitian ini adalah *Flowtech* meter, pipa stik gas, timbangan digital, *burner*, *displacer*, *stopwatch*, *thermowell*, *thermometer controller*, *thermometer digital*, *thermocouple*. Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental yaitu untuk mengetahui temperatur pada *displacer*, tekanan udara, volume ekspansi dan volume Langkah ekspansi. Hasil penelitian yang diperoleh dari perancangan mesin *stirling* menunjukkan bahwa Temperatur pada bagian *displacer* mencapai maksimum 351,3 °C pada menit ke-30 dan temperatur *displacer* rata-rata mencapai 255,7 °C. Pada pengujian perubahan volume ruang ekspansi pada sudut engkol 360°. Pada maksimum 59,9 CC pada sudut engkol ke 0°, pada volume ekspansi minimum 57,8 CC pada sudut engkol ke 355° dan rata rata pada volume ekspansi berkisar 58,8 CC

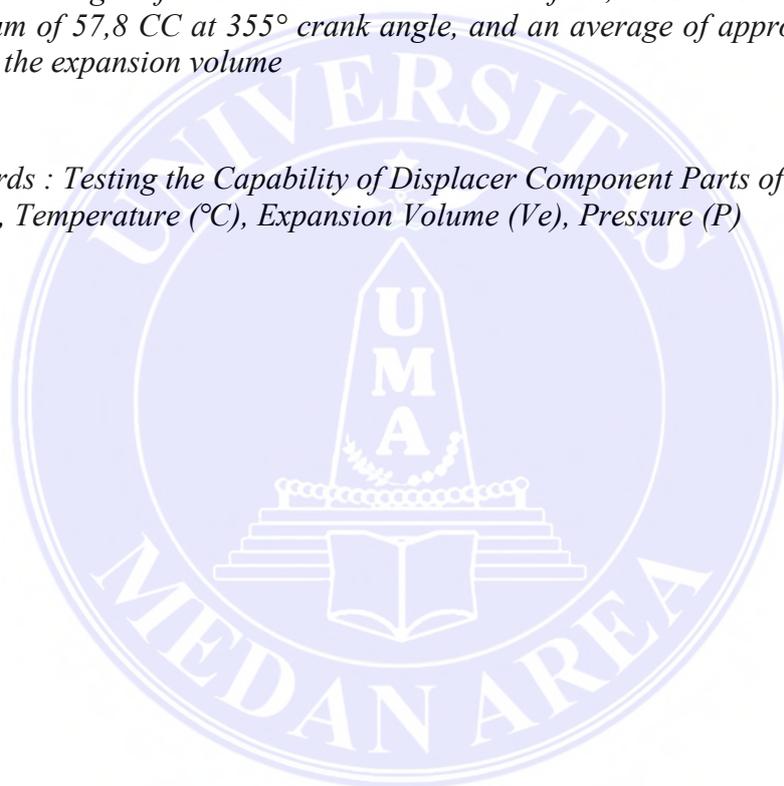
Kata Kunci : Pengujian Kemampuan Dari Komponen Bagian Displacer Mesin *Stirling* , Temperature (°C), Volume Ekspansi (V_e), Tekanan (P).



ABSTRACT

The purpose of this research is to determine the dimensions and components of the expansion space, changes in volume as a function of crank angle, expansion temperature, and air pressure. The measurement tools used in this research are Flowtech meter, gas stick pipe, digital scale, burner, displacer, stopwatch, thermowell, thermometer controller, digital thermometer, and thermocouple. This research was conducted experimentally to determine the temperature in the displacer, air pressure, expansion volume, and expansion step volume. The results obtained from the Stirling engine design show that the temperature at the displacer reaches a maximum of 351.3 °C at the 30th minute, and the average displacer temperature is 255.7 °C. During the testing, the change in expansion space volume at a crank angle of 360° reached a maximum of 59,9 CC at 0° crank angle, a minimum of 57,8 CC at 355° crank angle, and an average of approximately 58,8 CC for the expansion volume

Keywords : Testing the Capability of Displacer Component Parts of the Stirling Engine, Temperature (°C), Expansion Volume (Ve), Pressure (P)



RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Medan Pada tanggal 25 Desember 2001 dari ayah Sugiyanto dan ibu Triyani Penulis merupakan Anak Kedua dari 3 bersaudara.

Tahun 2019 Penulis lulus dari SMK Panca Budi Medan dan pada tahun 2019 terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area.

Selama mengikuti perkuliahan, penulis melaksanakan praktek kerja lapangan (PKL) di PT Siantar Top Medan.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Yang Maha Kuasa atas segala karunia-Nya sehingga skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ini ialah motor bakar dengan judul Pengujian Kemampuan Dari Komponen Bagian *Displacer* Mesin *Stirling* mCHSPE-012021.

Terima kasih penulis sampaikan kepada bapak Jufrizal, ST, MT. selaku pembimbing yang telah banyak memberikan saran dan masukan kepada penulis selama proses pengerjaan penelitian ini. Disamping itu penghargaan penulis sampaikan kepada rekan-rekan satu tim dan teman-teman seangkatan yang telah membantu penulis selama melaksanakan penelitian. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir/skripsi/tesis ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tugas akhir/skripsi/tesis ini. Penulis berharap tugas akhir/skripsi/tesis ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan Pendidikan maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Penulis



(Niko Taufik Adi Nugraha)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PERNYATAAN	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
KATA PENGANTAR	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Hipotesis penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Stirling Engine.....	5
2.2. Prinsip Kerja Mesin Stirling.....	6
2.3. Jenis Jenis Stirling Engine.....	7
2.4. Komponen - Komponen Stirling Engine.....	9
2.5. Siklus <i>Stirling Engine</i> Ideal.....	13
2.6. Proses Siklus Stirling Engine Ideal	14
2.7. Teori dan Analisa Pendukung pada Displacer Stirling Engine	17
2.8. Parameter Unjuk Kerja Stirling Engine.....	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	27
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	27
3.2. Bahan dan Alat	27
3.3. Metode Penelitian.....	33

3.4. Populasi dan Sampel	35
3.5. Prosedur Kerja	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1. Hasil.....	38
4.2. Pembahasan.....	45
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	48
5.1. Simpulan.....	48
5.2. Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	50



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Parameter-parameter mesin <i>stirling engine</i>	19
Tabel 3.1. Jadwal kegiatan penelitian	27
Tabel 3.2. Variable Perubahan Yang Diamati Pada Penelitian.....	35
Tabel 3.3. Tabel Populasi dan Sampel	35
Tabel 4.1. Dimensi <i>Displacer Stirling Engine</i>	39
Tabel 4.2. Pengujian <i>Temperatur Burner dan Displacer</i>	42



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Sistem pembakaran mesin <i>stirling</i> (Evalina and Putro 2020).....	6
Gambar 2.2. Mesin <i>stirling</i> tipe alpha.....	8
Gambar 2.3. Mesin <i>Stirling</i> Tipe Beta.....	9
Gambar 2.4. Mesin <i>Stirling</i> Tipe Gamma.....	9
Gambar 2.5. Heat Exchanger.....	10
Gambar 2.6. Cylinder displacer dan Displacer Piston.....	12
Gambar 2.7. Flywheell.....	13
Gambar 2.8. Siklus <i>stirling</i> engine Ideal dalam Diagram P- V dan diagram T- s	14
Gambar 2.9. Proses kompresi Isotermal.....	15
Gambar 2.10. Proses kompresi Isokhoric.....	15
Gambar 2.11 Proses Ekspansi Isothermal.....	16
Gambar 2.12. Proses Kompresi Isochoric.....	17
Gambar 2.13. Skema mesin <i>stirling</i> engine tipe gamma.....	18
Gambar 2.14. Konfigurasi sederhana mesin <i>stirling</i> tipe gamma.....	20
Gambar 3.1. Bahan Bakar Gas LPG.....	28
Gambar 3.2. Angin Kompresor.....	28
Gambar 3.3. <i>Flowtech Acrylic Flow Meter</i>	29
Gambar 3.4. Timbangan Digital.....	29
Gambar 3.5. Pipa Stik Gas.....	30
Gambar 3.6. <i>Burner</i>	30
Gambar 3.7. <i>Displacer</i>	31
Gambar 3.8. <i>Stopwatch</i>	31
Gambar 3.9. <i>Stainless Steel Thermowell</i>	32
Gambar 3.10. <i>Thermometer Controller UT320D</i>	32
Gambar 3.11. <i>Thermometer Digital</i>	33
Gambar 3.12. <i>Thermocouple sensor</i>	33
Gambar 3.16. Skema Pengujian Alat Ukur Pengujian <i>Stirling</i> Engine.....	36
Gambar 3.17. Diagram alir penelitian.....	37
Gambar 4.1. Displacer Mesin <i>Stirling</i> Engine.....	38
Gambar 4.2. Gambar Cylinder Displacer Dan Displacer Piston.....	39
Gambar 4.3. Titik-titik Pengujian Temperature.....	41
Gambar 4.4. Grafik Temperatur <i>Burner</i> (°C).....	45
Gambar 4.5. Grafik Temperatur Displacer (°C).....	46
Gambar 4.6. Perbandingan Temperatur <i>Burner</i> dan Temperatur <i>Displacer</i>	47
Gambar 4.7. Grafik Volume Sudut Engkol.....	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Pengujian Bagian Displacer Mesin Stirling Engine	53
Lampiran 2. Data Hasil Perubahan Volume Sebagai Sudut Engkol.....	55



DAFTAR NOTASI

ΔT	= Perbedaan temperatur (°C)
T sisi panas	= Temperatur sisi panas (°C)
T sisi dingin	= Temperatur sisi dingin (°C)
T	= Torsi (N.m)
F	= Gaya yang bekerja (N)
r	= Jarak atau lengan (m)
I	= Momem mersia (kg m/s)
Ω	= Percepatan (rad/s)
r	= Radius (m)
n	= Putaran (rpm)
π	= <i>phi</i> yang nilainya 3,14
D	= Diameter silinder
P	= Tekanan udara
V	= Volume udara (m^3)
m	= Massa udara/gas (kg)
R	= Konstanta gas (J/kg.K)
Th	= Temperature (°C)
P	= Tekanan (Pa)
V	= Volume (m^3)
T	= Temperature (K)
w	= Usaha/kerja pada keadaan ekspansi
Th	= Temperatur <i>displacer</i> (K)
V4	= Volume maksimum (m^3)
V3	= Volume Minimum (m^3)
I	= Suhu awal (°C)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini, motor bakar sedang mengalami perkembangan menuju motor bakar yang lebih ramah lingkungan dan fokus pada penggunaan biaya yang lebih efisien. Hal ini terjadi karena meningkatnya harga bahan bakar minyak (BBM), keterbatasan sumber daya energi, serta kepedulian terhadap isu lingkungan seperti pemanasan global (Jufrizal et al. 2022).

Mesin *stirling* adalah jenis mesin pembakaran eksternal yang menggunakan udara atau gas (seperti helium, hidrogen, nitrogen, metanol, dll.) sebagai fluida kerjanya. Mesin ini mengoperasikan siklus tertutup dengan prinsip regeneratif (siklus regeneratif tertutup). Selain itu, mesin *stirling* juga dikenal sebagai mesin yang ramah lingkungan (Jufrizal et al. 2023). Kelebihannya terletak pada fleksibilitasnya dalam menggunakan berbagai sumber energi sebagai sumber daya penggerakannya, karena mesin *stirling* termasuk dalam kategori mesin pembakaran eksternal (*Eksternal Combustion Engine*).

Mesin Stirling adalah mesin kalor yang memanfaatkan perbedaan temperatur, perubahan tekanan, dan perubahan volume fluida kerja dalam sistem tertutup. Mesin ini dapat dioperasikan melalui berbagai sumber panas yang dapat mencukupi, seperti tenaga matahari, kimia maupun nuklir. Dibandingkan dengan mesin pembakaran internal, mesin Stirling memiliki potensi untuk lebih efisien, lebih tenang, dan lebih mudah perawatannya (Yuliyani and Irwan 2013).

Mesin *stirling* adalah salah satu varian mesin pembakaran eksternal yang berbeda dari mesin-mesin lainnya karena proses pembakarannya terjadi di luar

mesin itu sendiri. Mesin *stirling* pertama kali ditemukan oleh *Dr. Robert Stirling* pada tahun 1816. Mesin ini menggunakan siklus regenerasi tertutup di mana fluida kerja dikompresi atau diperluas di reservoir terpisah sebelum didistribusikan untuk menggerakkan piston daya secara bolak-balik (Fanani, Agus Sahbana, and Suwandono 2021).

Ada tiga tipe mesin *stirling* berdasarkan susunan silindernya, yaitu Alfa (α), Beta (β), dan Gamma (γ). Sebuah prototipe Mesin *Stirling* dengan desain tipe Gamma telah dirancang dan dibuat oleh tim mCHPSE (*Micro Combine Heat Power Stirling Engine*), yang merupakan hasil kolaborasi antara mahasiswa Program Studi Teknik Mesin di Institut Teknologi Medan dan Universitas Sumatera Utara. Mesin mCHPSE ini dikembangkan mulai tahun 2018 dan diberi nama mCHPSE-012018 (Jufrizal et al. 2020). Setelahnya, pada tahun 2019, dihasilkan generasi berikutnya dengan nama mCHPSE-012019. Dan hingga saat ini, desain terakhir dari mesin tersebut dikembangkan pada tahun 2020 dan diberi nama mCHPSE-012020 (Sowale et al. 2018).

Salah satu komponen yang sangat penting dalam mesin *stirling* mCHPSE-012021 adalah *displacer*, yang dirancang untuk meningkatkan performa piston daya. *Displacer* dalam mesin *stirling* berperan dalam memindahkan gas antara dua sisi yang berbeda, sementara piston daya mengubah volume internal dengan ekspansi dan kontraksi gas. Komponen *displacer* ini diuji untuk mengevaluasi kemampuannya dalam meningkatkan performa pada piston daya dalam mesin *stirling* mCHPSE-012021 (Jufrizal et al. 2020). Dalam penelitian mengenai bagian *displacer* pada mesin *stirling*, umumnya terdapat celah antara silinder dengan piston *displacer* (Hidayah 2022).

Penelitian ini difokuskan pada pengujian kemampuan komponen *displacer* pada mesin *Stirling* mCHSPE-012021 yang menggunakan bagian dari kompresor $\frac{1}{2}$ hp. Tujuannya adalah Dimensi dan komponen ruang ekspansi, perubahan volume sebagai fungsi sudut engkol, temperature ruang ekspansi, serta tekanan udara. Dengan demikian, diharapkan mesin ini dapat mengalami perbaikan dan menjadi lebih handal serta dapat diandalkan oleh masyarakat dan industri di masa depan.

1.2. Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini ada sebagai berikut.

- a. Bagaimana menguji kemampuan komponen bagian *displacer* pada *stirling engine* ?
- b. Bagaimana mengetahui pengaruh pada komponen bagian *displacer* terhadap temperatur yang dihasilkan *stirling engine* ?
- c. Dengan mengamati peningkatan tekanan dan suhu udara di dalam ruang *displacer*, dapat disimpulkan bahwa ini terjadi karena adanya perpindahan panas dari sumber panas eksternal ke bagian pemanas (*heater*) ?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan umum dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengujian kemampuan dari komponen bagian *displacer* mesin *stirling* mCHSPE-012021.

Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Dimensi dan komponen ruang ekspansi
2. Perubahan volume sebagai fungsi sudut engkol
3. Temperature ruang ekspansi
4. Mengetahui tekanan udara
5. Usaha/kerja pada keadaan ekspansi

1.4. Hipotesis penelitian

Hipotesis adalah sebuah penjelasan awal yang perlu diuji kebenarannya mengenai masalah yang sedang diselidiki. Hipotesis selalu dinyatakan dalam bentuk pernyataan yang menghubungkan dua variabel atau lebih.

- a. Tidak ada pengaruh perpindahan panas terhadap kenaikan tekanan dan temperatur udara di dalam ruang *displacer*.
- b. Ada pengaruh perpindahan panas terhadap kenaikan tekanan dan temperatur udara di dalam ruang *displacer*.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini sebagai berikut.

- a. Sebagai masukan bagi kalangan akademis, praktisi, dan pihak terkait khususnya pada pengujian *displacer* terhadap kemampuan *stirling engine* mCHSPE-012021.
- b. Dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya sehingga diharapkan pengujian dan kemampuan dari *stirling engine* mCHSPE-012021 semakin maksimal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Stirling Engine

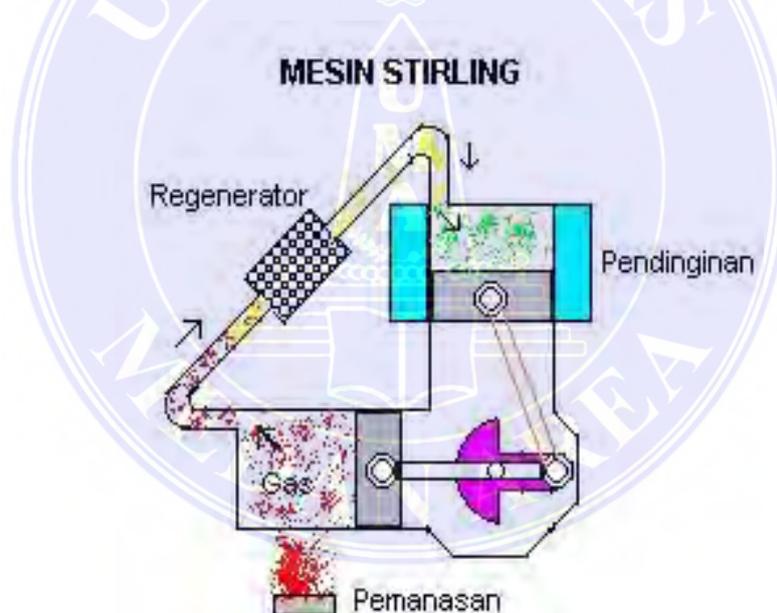
Mesin *stirling* ditemukan oleh *Robert Stirling* (1790-1878) pada tahun 1816. Pada awalnya, mesin ini disebut sebagai mesin udara dan merupakan model mesin pembakaran eksternal siklus tertutup. *Stirling* mematenkan penemuan ini pada 27 September 1816 dan paten tersebut berlaku efektif mulai 20 Januari 1817, ketika dia berusia 26 tahun. Prinsip kerja mesin ini secara teoretis dikembangkan oleh *George Cayley* dari Inggris sekitar 20 tahun sebelumnya. Istilah "*Stirling Engine*" pertama kali dipopulerkan oleh *Rolf Meijer* untuk menggambarkan semua jenis mesin gas regeneratif siklus tertutup (Siregar, Hasanah, and Agusdiandy 2022).

Pada perkembangannya, produksi mesin *stirling* dipimpin oleh *J. Ericsson*, seorang penemu dan insinyur asal Swedia. *Ericsson* berhasil memproduksi dan menjual hingga 2.000 unit mesin *stirling* dengan ukuran 0,5-5 tenaga kuda sekitar tahun 1850 di Inggris dan Amerika. Mesin *stirling* memiliki reputasi yang baik dalam kinerjanya dan masa pakainya yang panjang (lebih dari 20 tahun). Pada masa itu, mesin *stirling* banyak digunakan sebagai mesin pompa air dengan kapasitas rendah hingga pertengahan abad ke-19 hingga sekitar tahun 1920, ketika mesin pembakaran internal dan motor listrik mulai menggantikannya (Basuendro Putro 2019). Mesin Stirling adalah mesin kalor yang memanfaatkan perbedaan temperatur, perubahan tekanan, dan perubahan volume fluida kerja dalam sistem tertutup. Mesin ini dapat dioperasikan melalui berbagai sumber panas yang dapat mencukupi, seperti tenaga matahari, kimia maupun nuklir.

2.2. Prinsip Kerja Mesin Stirling

Mesin *stirling* dapat dijelaskan sebagai mesin panas regeneratif dengan siklus tertutup yang menggunakan udara sebagai fluida kerjanya. Dalam konteks ini, siklus tertutup mengacu pada fakta bahwa fluida kerja tetap terperangkap di dalam sistem secara permanen. Mesin *Stirling* memiliki karakteristik unik sebagai mesin kalor karena efisiensi teoretisnya mendekati efisiensi maksimum yang dikenal sebagai efisiensi mesin Carnot.

Mesin *Stirling* pertama kali ditemukan pada tahun 1816 oleh *Robert Stirling* (1790-1878). Pada awalnya, mesin ini dikenal sebagai mesin udara dengan model mesin pembakaran eksternal siklus tertutup (Zayyinun and Widyartono 2020).



Gambar 2.1. Sistem pembakaran mesin *stirling* (Evalina and Putro 2020)

Stirling engine pada umumnya memiliki cara kerja memanfaatkan sifat dasar udara yang akan memuai jika dipanaskan dan akan menyusut jika didinginkan. Dengan demikian akan terjadi siklus pemuaian dan penyusutan sehingga sebuah mesin dapat berputar. Dari definisi tadi dapat ditarik kesimpulan bahwa *stirling engine* 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 (gambar 2.1.). Poros engkol ini kemudian dihubungkan ke *flywheel* agar dapat terjadi siklus berikutnya (Annisa Rachman 2017).

Sementara itu, gas penggerak masuk ke ruang yang lebih dingin, melepaskan panas pada saat yang sama. Penurunan suhu ini mengakibatkan penurunan volume gas, dan sistem menerima kerja kompresi yang membuat volume gas kembali ke keadaan awal. Keadaan ini terjadi secara periodik, menyebabkan gerakan piston yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik dengan menghubungkannya ke turbin (Zayyinun and Widyartono 2020).

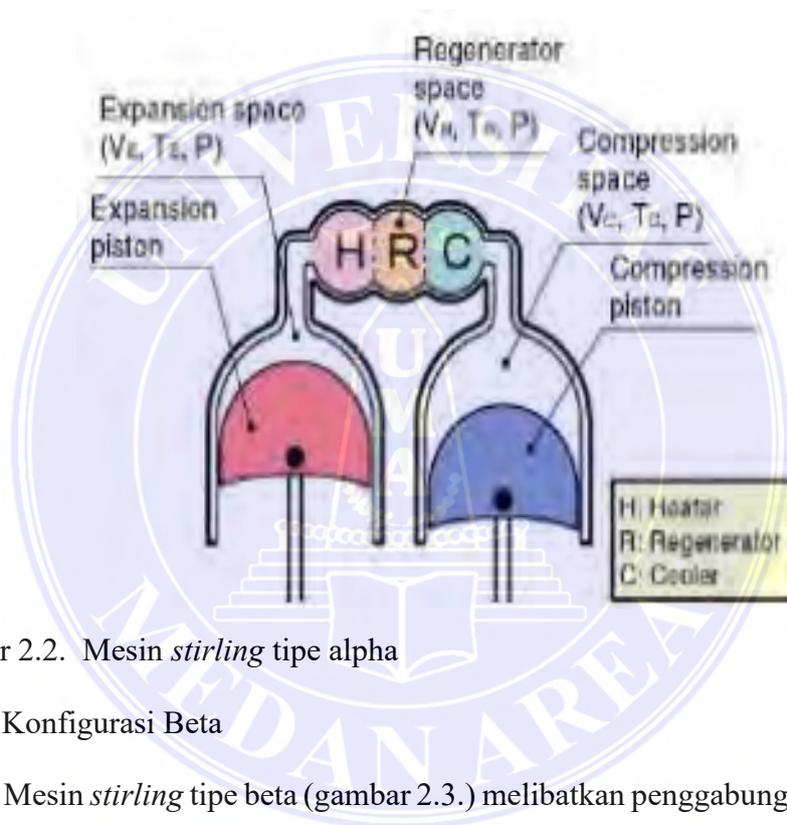
2.3. Jenis Jenis Stirling Engine

Mesin *stirling* (*Stirling Engine*) memiliki berbagai konfigurasi yang umum digunakan, namun perbedaan dalam konfigurasi tersebut tidak mempengaruhi siklus termodinamika. Berikut adalah tiga jenis konfigurasi yang ada (Annisa Rachman 2017).

2.3.1. Konfigurasi Alpha

Mesin *stirling* tipe alpha (gambar 2.2.) melibatkan dua piston yang berada dalam silinder terpisah di setiap sisi, yaitu pemanas, regenerator, dan pendingin. Silinder pemanas berada pada suhu tinggi karena terpapar panas (misalnya, silinder yang terbakar), sementara silinder pendingin terdapat di dalam displacer dengan suhu rendah. Mesin *stirling* jenis ini memiliki rasio daya kevolume yang tinggi, tetapi dapat menghadapi masalah teknis. Misalnya, jika suhu pada piston tinggi,

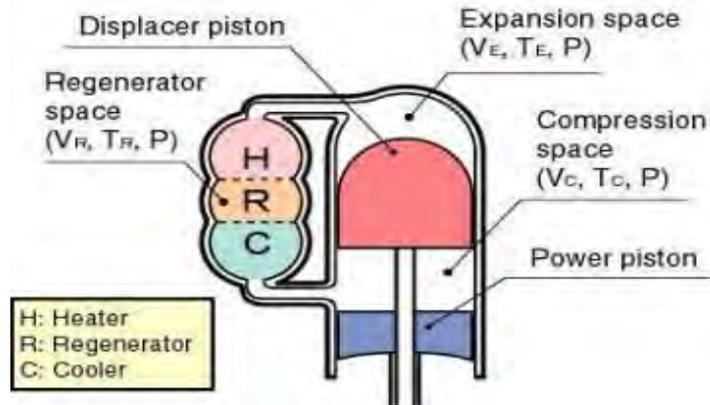
panas dapat menyebar ke pipa pemisah antar silinder. Untuk mengatasi hal ini, piston perlu memiliki arah yang sama agar proses volume tetap konsisten untuk pendinginan dan pemanasan gas. Kompresi terjadi pada piston dingin (piston yang berada di dalam silinder pendingin), sementara ekspansi terjadi pada piston panas (piston yang berada di dalam silinder pemanas). Konfigurasi alpha tidak memerlukan penggunaan *displacer*.



Gambar 2.2. Mesin *stirling* tipe alpha

2.3.2. Konfigurasi Beta

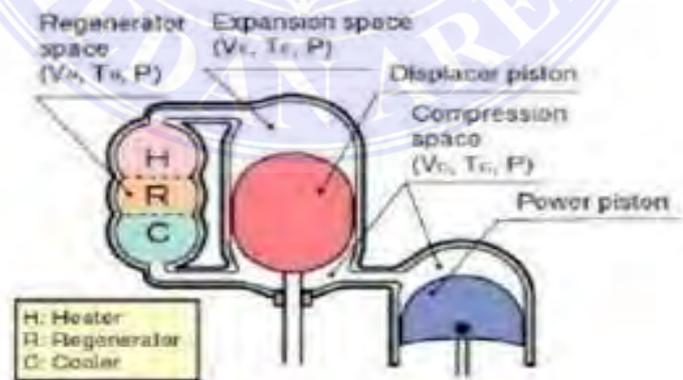
Mesin *stirling* tipe beta (gambar 2.3.) melibatkan penggabungan piston daya tunggal yang terletak dalam silinder yang sama dengan poros yang sama sebagai piston *displacer*. Piston *displacer* ini berfungsi untuk memindahkan gas panas dari silinder panas ke silinder dingin dengan gerakan bolak-balik. Piston daya umumnya ditempatkan di ujung silinder dingin dan bertindak untuk mengompresi gas kerja ketika gas berada di ujung dingin, serta memperluas gas kerja ketika gas bergerak ke arah piston panas. Mesin *Stirling* dengan konfigurasi beta dapat dikategorikan sebagai mesin kinematik atau mesin *free-piston*.



Gambar 2.3. Mesin *Stirling* Tipe Beta

2.3.3. Konfigurasi Gamma

Mesin *stirling* tipe gamma (gambar 2.4.) melibatkan penggunaan piston daya yang terpasang di dalam silinder terpisah, bersebelahan dengan silinder piston *displacer*. *Displacer* piston berfungsi untuk memindahkan gas antara dua silinder yang terpisah, yang memungkinkan aliran gas secara bebas karena keduanya berada dalam satu tubuh yang sama. Pada konfigurasi ini, terdapat silinder pemanas, *regenerator*, dan pendingin yang terintegrasi. Piston daya terletak di dalam silinder terpisah dan terhubung secara pneumatik dengan silinder *displacer*.



Gambar 2.4. Mesin *Stirling* Tipe Gamma

2.4. Komponen - Komponen Stirling Engine

Mesin *stirling* memiliki bagian bagian komponen, adapun bagian-bagian

Mesin *stirling* sebagai berikut :

2.4.1. Heat Exchanger (penukar panas)

Heat exchanger digunakan untuk membantu dalam pertukaran udara antara dua medium yang berbeda. Pada mesin *Stirling* , penting untuk menjaga suhu tinggi di dalam ruang pemanas dan suhu rendah di dalam ruang pendingin. Panas dari sumber panas diujung panas ditransfer ke dalam silinder, sedangkan panas dari silinder ditransfer ke ujung dingin. Mesin *stirling* yang langsung dipanaskan cenderung tidak memiliki pertukaran panas yang signifikan. Mesin *stirling* udara yang menggunakan pendinginan biasanya dilengkapi dengan penukar panas yang sederhana, sedangkan mesin *stirling* yang menggunakan pendinginan air biasanya dilengkapi dengan *heat exchanger* yang lebih kompleks seperti terlihat pada gambar 2.5. (Intan Putri Nazila 2016).



Gambar 2.5. *Heat Exchanger*

2.4.2. Displacer Piston dan Cylinder

Displacer adalah komponen dalam mesin *stirling* yang memiliki pergerakan seperti piston, namun terdapat celah yang lebih besar antara *displacer* dan silinder. Hal ini memungkinkan fluida kerja, seperti udara, untuk melewati dengan mudah melalui celah tersebut. *Displacer* berfungsi sebagai penggerak udara dalam sistem. Pergerakan *displacer* tidak menyebabkan kompresi atau ekspansi gas, sehingga

tidak menyebabkan perubahan volume dalam silinder. Tekanan gas yang bekerja pada *displacer* dapat diabaikan dibandingkan dengan piston, karena gas dapat melalui celah piston ke daerah dengan tekanan yang lebih rendah (Intan Putri Nazila 2016).

Displacer cylinder terdiri dari empat komponen :

1. Tutup ujung panas
2. Silinder
3. Sirip pendingin
4. *Flange*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6

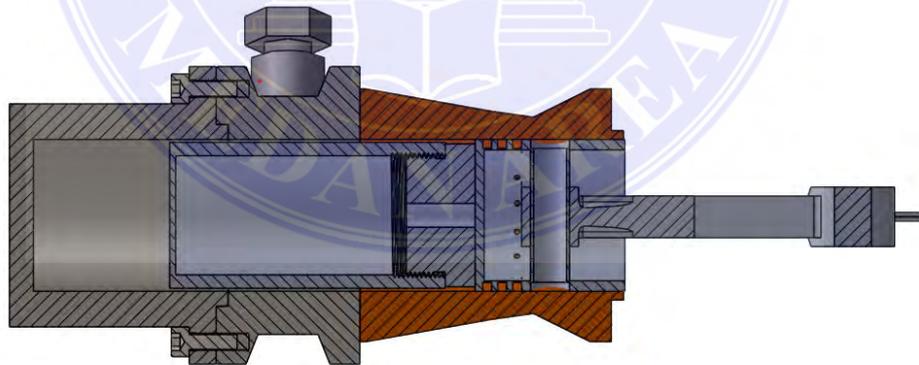
Silinder dan tutup ujung pada mesin *stirling* menggunakan *stainless steel*. Penggunaan *stainless steel* dipilih karena baja ini tahan terhadap karat dan korosi, serta memiliki karakteristik konduktivitas panas yang diinginkan. Meskipun konduktivitas panas melalui *stainless steel* tidak optimal, tetapi bahan ini menjadi pilihan yang ideal untuk silinder, karena gradien panas pada silinder selama operasi dapat mencapai nilai maksimum.

Dinding silinder harus memiliki ketebalan yang seefisien mungkin. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas panas dan mengurangi waktu yang dibutuhkan agar udara di dalam silinder dapat cepat dipanaskan. Di sisi lain, tutup ujung silinder perlu memiliki ketebalan yang lebih besar dibandingkan dengan dinding silinder untuk mengatasi konsentrasi radiasi yang terfokus pada area tersebut. Ketebalan tambahan ini penting untuk mencegah melelehnya bahan silinder akibat radiasi yang terkonsentrasi di tutup ujung tersebut.

Pertama-tama, *displacer cylinder* dihubungkan dengan *flensa* kuningan melalui proses *brazing*. Setelah itu, sirip pendingin dipanaskan dan diposisikan

sejajar dengan celah *flensa* pada silinder. Sebelum sirip pendingin diposisikan secara tepat, pasta panas digunakan untuk meningkatkan konduktivitas panas antara sirip pendingin dan silinder. Akhirnya, tutup ujung silinder dipasang dengan menggunakan proses *brazing* pada ujung silinder pemindah tersebut seperti terlihat pada gambar 2.6.

Piston pemindah terdiri dari tiga komponen yaitu piston dan dua tutup ujung. Untuk meningkatkan performa mesin, penting untuk menjaga berat piston pemindah tetap rendah. Hal ini dicapai dengan memproses piston menjadi sangat tipis dengan dinding yang tipis dan menggunakan tutup ujung aluminium pada ujung piston yang berada di daerah yang lebih dingin. Sementara itu, tutup ujung pada ujung piston yang terpapar panas masih menggunakan tutup ujung dari baja tahan karat, meskipun tidak perlu memiliki ketebalan yang sama dengan tutup silinder, karena tidak ada paparan langsung dengan sumber panas (Yerbury et al. 2016).



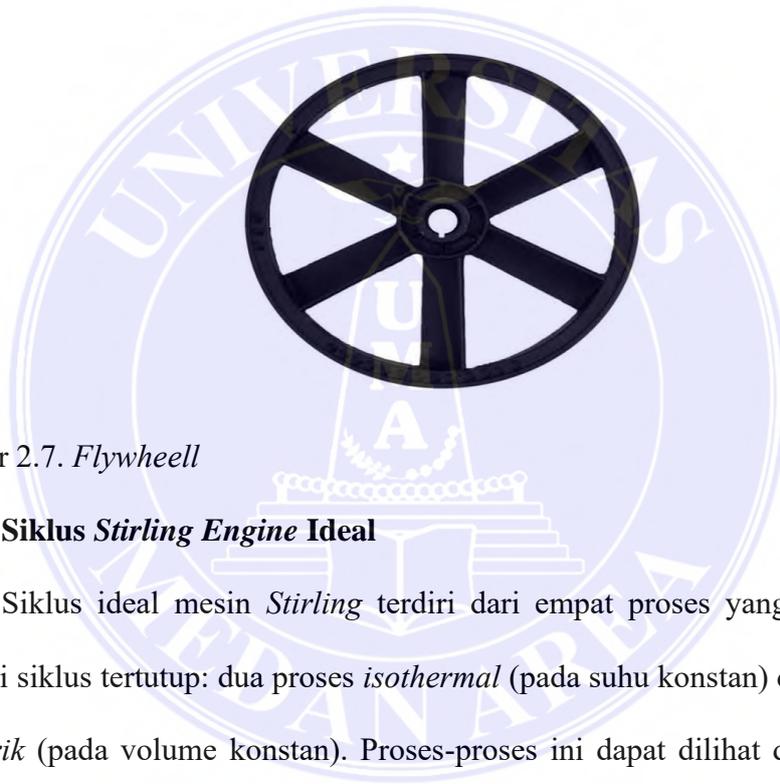
Gambar 2.6. *Cylinder displacer dan Displacer Piston*

2.4.3. Flywheel

Roda gila (*Flywheel*) adalah sebuah komponen yang berputar dan digunakan untuk menyimpan energi dalam mesin (Intan Putri Nazila 2016).

Energinya disimpan dalam bentuk energi kinetik yang besar. Roda gila merupakan

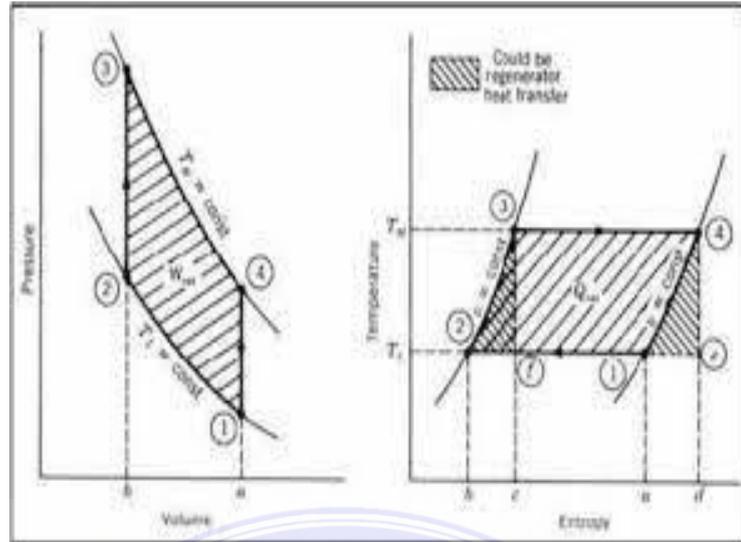
perangkat mekanik yang berputar untuk menyimpan energi rotasi. Ia memiliki momen inersia yang signifikan, yang berfungsi untuk menahan perubahan kecepatan rotasi. Jumlah energi yang tersimpan dalam roda gila berhubungan dengan kuadrat dari kecepatan rotasinya. Energi ditransfer ke roda gila melalui torsi, yang dapat meningkatkan kecepatan rotasi dan menyimpan energi. Sebaliknya, roda gila melepaskan energi yang tersimpan dengan memberikan torsi ke beban mekanik, yang mengurangi kecepatan rotasi seperti pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. *Flywheel*

2.5. Siklus *Stirling Engine* Ideal

Siklus ideal mesin *Stirling* terdiri dari empat proses yang digabungkan menjadi siklus tertutup: dua proses *isothermal* (pada suhu konstan) dan dua proses *isokhorik* (pada volume konstan). Proses-proses ini dapat dilihat dalam diagram tekanan-volume (P-V) dan diagram temperatur-entropi (T-s). Luas area di dalam diagram siklus *Stirling* mewakili kerja indikator yang dihasilkan oleh siklus tersebut. Kerja hanya dihasilkan oleh proses *isothermal* dalam siklus tersebut. Untuk memastikan kelancaran kerja masuk dan keluar sistem, roda gila (*flywheel*) harus terintegrasi dalam desain mesin *Stirling*. Roda gila berfungsi sebagai perangkat penyimpanan energi. Dalam siklus ini, panas harus ditransfer melalui semua proses yang terlibat (Napitupulu, Ambarita, and Meliala n.d.).



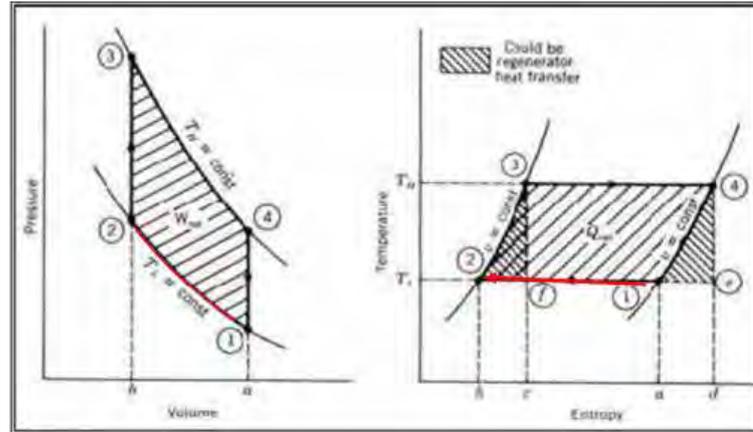
Gambar 2.8. Siklus *stirling engine* Ideal dalam Diagram P- V dan diagram T- s

Kerja yang dihasilkan oleh siklus *stirling* tertutup ideal direpresentasikan oleh luas area 1-2-3-4 pada diagram P-V. Sesuai dengan Hukum Pertama Termodinamika, kerja output harus setara dengan panas input yang direpresentasikan oleh luas area 1-2-3-4 pada diagram T-S. Penggunaan regenerator dapat membantu dalam mengambil panas dari fluida kerja pada proses 4-1 dan mengembalikan panas tersebut pada proses 2-3. Siklus Carnot digunakan untuk menggambarkan efisiensi teoretis dari sebuah siklus termodinamika (Prasetyo MT 2019).

2.6. Proses Siklus Stirling Engine Ideal

2.6.1. Proses 1-2 : Kompresi Isothermal

Piston pada silinder panas melakukan kerja pada fluida kerja dan melakukan kompresi secara *isothermal* pada temperatur dingin, sementara juga membuang panas ke lingkungan sekitarnya. Karena fluida kerja memiliki tekanan rendah pada saat itu, diperlukan kerja yang lebih sedikit untuk melakukan kompresi dibandingkan dengan kerja yang dihasilkan pada proses ekspansi (Anggit Yuliantono M 2010).



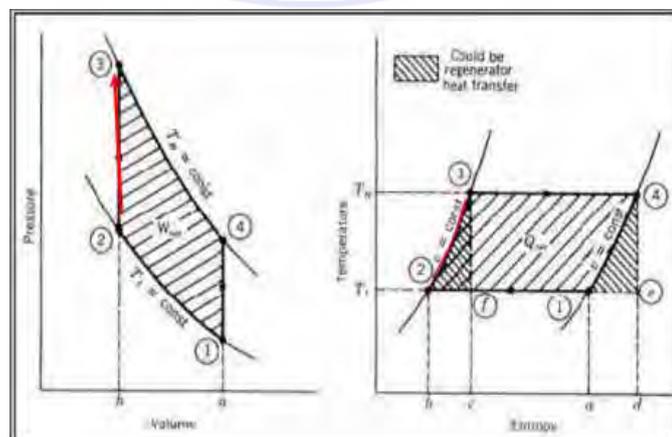
Gambar 2.9. Proses kompresi *Isotermal*

Keterangan:

- Pembuangan panas ke silinder dingin.
- Q_{12} = area $1-2-b-a$ pada diagram T-s
- Fluida kerja dikenai kerja. (pertukaran energi dari *flywheel*)
- W_{12} = area $1-2-b-a$ pada diagram P-V

2.6.2. Proses 2-3 : Kompresi Isokhorik

Piston memindahkan fluida kerja secara *isokhorik* (volume konstan) melalui regenerator menuju silinder panas. Selama fluida kerja melewati regenerator, panas ditransfer ke fluida kerja, menyebabkan peningkatan suhu fluida kerja saat masuk ke dalam silinder panas (Anggit Yuliantono M 2010).



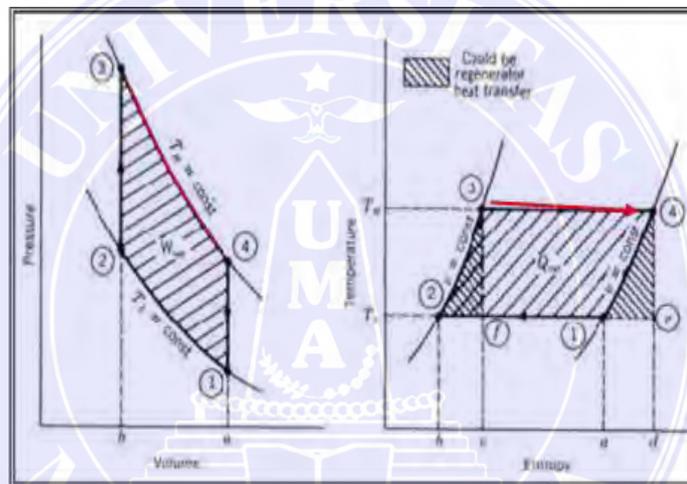
Gambar 2.10. Proses kompresi *Isokhoric*.

Keterangan :

- a. Pemasukan Panas (pertukaran energi dari regenerator)
- b. $Q_{23} = \text{area } 2-3-c-b$ pada diagram T-s
- c. $W_{23} = 0$

2.6.3. Proses 3-4 : Ekspansi Isothermal

Fluida kerja yang memiliki tekanan tinggi menyerap panas dari sumber panas dan mengalami ekspansi secara *isothermal*, yang menghasilkan kerja pada piston (Anggit Yulianto M 2010).



Gambar 2.11 Proses Ekspansi *Isothermal*

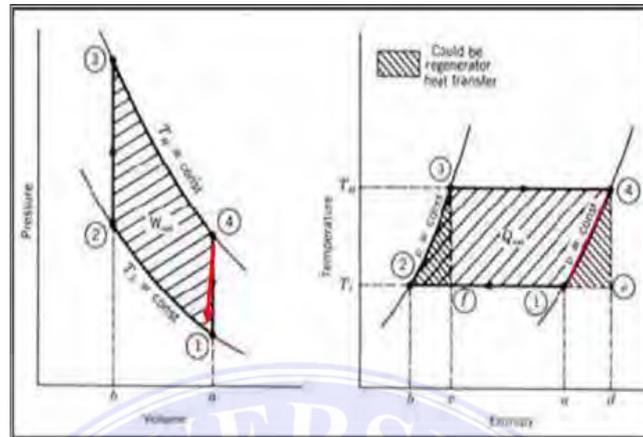
Keterangan:

- a. Panas ditransferkan dari sumber panas
- b. $Q_{34} = \text{area } 3-4-d-c$ pada diagram T-s
- c. Kerja dilakukan oleh fluida kerja (pertukaran energi ke *flywheel*)
- d. $W_{34} = \text{area } 3-4-a-b$ pada diagram P-V

2.6.4. Proses 4-1 : Kompresi Isokhoric

Piston ekspansi memindahkan fluida kerja secara *isokhorik* (volume konstan) melalui regenerator ke sisi dingin (silinder dingin) dari mesin. Selama fluida kerja melewati regenerator, panas diserap oleh fluida kerja, yang menyebabkan

penurunan suhu fluida kerja saat menuju silinder dingin (Anggit Yulianto M 2010).



Gambar 2.12. Proses Kompresi *Isochoric*

Keterangan:

- Pelepasan kalor (pertukaran energi ke regenerator)
- $Q_{41} = \text{area } 1-4-d-a$ pada diagram T-s
- $W_{41} = 0$

2.7. Teori dan Analisa Pendukung pada Displacer Stirling Engine

2.7.1. Analisa Schmidt

Analisa *Schmidt*, yang pertama kali diterbitkan pada tahun 1871 oleh *Gustav Schmidt* dari Institut Politeknik Jerman di Praha, adalah salah satu metode standar yang digunakan dalam menghadapi desain mesin *stirling*. Metode ini berguna dalam pengembangan mesin *stirling* (Westevan Juneto Nainggolan 2020).

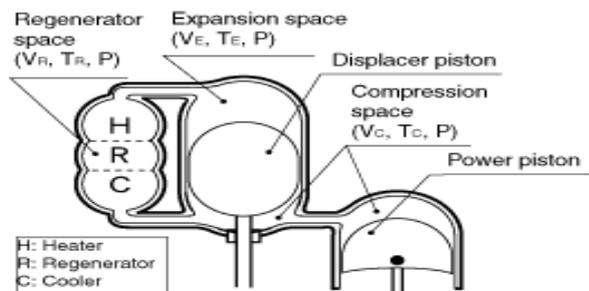
Performansi dari mesin dapat dikalkulasi dari diagram P-V. Volume dari mesin juga dapat dengan mudah dihitung dari geometri internalnya. Jika volume, massa dari fluida kerja sudah dapat ditentukan, maka tekanan dapat dihitung menggunakan metode gas ideal seperti pada persamaan di bawah ini (Yuliyani and Irwan 2013).

$$PV = mRT \dots\dots\dots(2.1)$$

- Dimana :
- P = Tekanan (Pa)
 - V = Volume (m^3)
 - m = Massa gas (kg)
 - R = Konstanta gas (j/kgk)
 - T = Temperature (K)

Parameter-parameter motor *stirling* dapat dihitung dengan menggunakan asumsi-asumsi sebagai berikut :

- a. Tidak ada *pressure loss* dan tidak ada perbedaan *internal pressure*.
- b. Proses ekspansi dan proses kompresi berlangsung secara *isothermal*.
- c. Kondisi fluida kerja adalah udara sebagai gas ideal.
- d. Terjadi regenerasi sempurna.
- e. Volume sisa pada silinder panas menjaga temperatur gas pada silinder panas - TE, volume sisa pada silinder dingin menjaga temperatur gas pada silinder dingin - TC selama siklus.
- f. Temperatur pada regenerator adalah rata-rata temperatur ekspansi – TE dan temperatur kompresi - TC.
- g. Volume ekspansi (VE) dan volume kompresi (VC) berubah berdasarkan fungsi sinusioda.



Gambar 2.13. Skema mesin *stirling engine* tipe gamma

Tabel-tabel berikut ini menunjukkan simbol-simbol yang digunakan pada proses perancangan motor *stirling*.

Tabel 2.1. Parameter-parameter mesin *stirling engine*

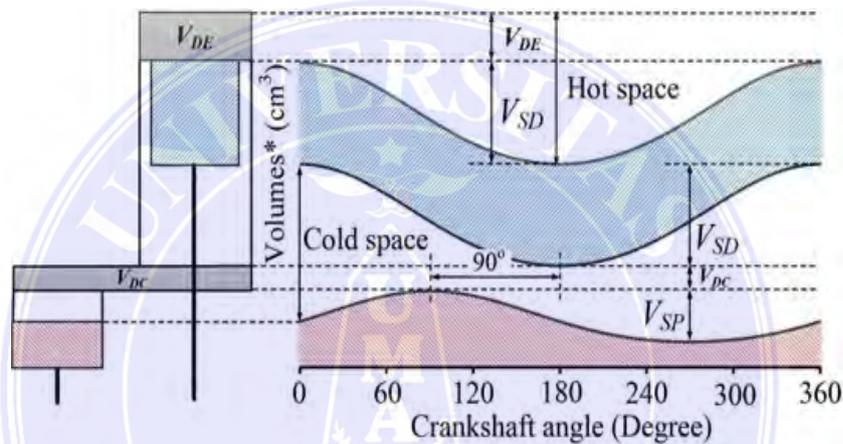
Nama	Simbol	Unit
Tekanan Mesin	P	Pa
Volume pada posisi piston ekspansi atau <i>displacer</i> piston	V _E	m ³
Volume pada posisi piston kompresi atau <i>power</i> piston	V _c	m ³
Volume sisa pada sisi ekspansi	V _{DE}	m ³
Volume sisa pada sisi kompresi	V _{DC}	m ³
Volume ekspansi	V _E	m ³
Volume kompresi	V _c	m ³
Volume total	V	m ³
Massa total gas kerja	M	Kg
Konstanta gas	R	J/kgK
Temperatur gas sisi ekspansi	T _E	K
Temperatur gas sisi kompresi	T _c	K

Volume dari silinder ekspansi dan silinder kompresi pada sudut engkol tertentu dihitung pertama, Volume sesaat dideskripsikan dengan sudut engkol- x . Sudut engkol didefinisikan sebagai $x=0$ ketika piston ekspansi (piston pada silinder panas) ada pada posisi TMA. Volume ekspansi sesaat - V_E dinyatakan pada persamaan (2.2) dengan asumsi (g) (Napitupulu, Ambarita, and Meliala n.d.)

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) \dots\dots\dots(2.2)$$

Analisa *schmidt* telah berhasil mengoptimalkan desain batang penghubung dan roda gila ganda dalam mesin *stirling*. Setelah optimasi tersebut, kedua tenaga piston mampu bergerak sinusoidal secara tegak lurus satu sama lain dalam keadaan

stabil. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 2.14, yang menggambarkan hubungan antara volume ekspansi dan kompresi (VE dan VC, sesuai dengan persamaan 3-4) sebagai fungsi sudut poros engkol. Gambar tersebut menunjukkan bahwa volume sapuan memungkinkan aliran panas dan pembersihan yang sesuai antara ruang panas dan ruang dingin selama proses kompresi dan ekspansi dalam setiap siklus mesin. Selain itu, siklus daya panas menunjukkan perbedaan fase sebesar 90° antara silinder pemindah dan piston tenaga (Lekchaum & Locharoenrat, 2018).



Gambar 2.14. Konfigurasi sederhana mesin *stirling* tipe gamma.

Volume ekspansi dihitung dengan menggunakan rumus dibawah sebagai berikut :

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana : V = Volume Langkah piston

π = phi yang nilainya 3,14/4

D = Diameter silinder

2.8. Parameter Unjuk Kerja Stirling Engine

2.8.1. Temperaure Sisi Dingin dan Sisi Panas

Untuk menjaga mesin tetap berputar, penting untuk mengetahui nilai suhu pada sisi panas dan sisi dingin. Jika suhu terlalu tinggi, siklus perluasan dan

$$T = r \times F \dots\dots\dots(2.4)$$

- Dimana :
- T = Torsi mesin (N.m)
 - F = Gaya yang bekerja (N)
 - r = Jarak atau lengan (m)

Jika kita mendorong pintu dekat engsel, torsi akan berkurang dan menghasilkan putaran pintu yang kecil. Bahkan jika jarak r antara titik dorong dengan engsel adalah nol, artinya kita mendorong pintu pada engselnya sendiri, maka pintu sama sekali tidak akan berputar karena gaya yang diberikan memiliki nilai nol. Hal yang sama terjadi jika sudut dorongan semakin kecil, torsi juga akan berkurang. Bahkan jika sudut dorongan (α) adalah nol, artinya kita mendorong pintu sejajar dengan pintu (bukan tegak lurus), maka tentu saja pintu tidak akan berputar.

Untuk mengukur daya poros pada motor bakar, perlu diketahui torsi yang dihasilkan. Pengukuran torsi pada poros motor bakar dilakukan menggunakan alat yang disebut dinamometer. Prinsip kerja alat ini adalah dengan memberikan beban yang berlawanan arah putaran hingga putaran mendekati 0 rpm. Besarnya beban ini setara dengan torsi pada poros. Dalam definisi torsi, dikatakan bahwa torsi adalah hasil perkalian antara gaya dan jarak. Dengan menggunakan rumus tersebut, torsi pada poros dapat dihitung.(Boby Novianto Syahputra 2020).

$$T = I . \omega \dots\dots\dots(2.5)$$

- Dimana :
- T = Torsi mesin (Nm)
 - I = Momen inersia (kg m/s)
 - ω = Percepatan (rad/s)

Untuk menentukan momen inersia perhitungan adalah.

$$I = 0.5 m r^2 \dots\dots\dots(2.6)$$

- Dimana :
- I = Momen mersia (kg m/s)
 - m = Massa *flywheel* (kg)
 - r = Radius (m)

Sedangkan untuk mengetahui nilai percepatan perhitungannya adalah.

$$\omega = n \times \frac{2.\pi}{60} \dots\dots\dots(2.7)$$

- Dimana :
- ω = Percepatan (rad/s)
 - n = Putaran (rpm)
 - π = phi yang nilainya 3,14

2.8.3. Rotation Per Minute (RPM)

Rotation Per Minute (RPM), yang dinyatakan sebagai ∞ , mengacu pada kecepatan putaran dari sebuah motor. Kecepatan sudut digunakan untuk menggambarkan rotasi suatu objek dalam lintasan melingkar. Biasanya didefinisikan sebagai perubahan kecepatan sudut, dalam hubungannya dengan waktu, dari perpindahan sudut atau perubahan posisi partikel atau benda lain. Kecepatan sudut ditentukan oleh garis tegak lurus terhadap kurva lingkaran, dan juga tegak lurus terhadap arah rotasi. Alat yang digunakan untuk mengukur RPM adalah *tachometer*.

Kecepatan suatu benda sering kali ditentukan oleh kecepatan sudutnya. Dalam konteks ini, kecepatan sudut diukur sebagai perjalanan sepanjang lingkaran dalam periode waktu tertentu. Satuan untuk mengukur kecepatan sudut adalah radian per detik (rad/s), yang merupakan perjalanan satu radian setiap detik.

2.8.4. Daya Yang Dihasilkan Stirling Engine

Setelah mendapatkan nilai torsi, kita dapat menghitung daya yang dihasilkan oleh mesin *stirling* tersebut. Daya dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P = \frac{2\pi nT}{60} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana : P = Daya maksimum (Watt)
 T = Torsi (Nm)
 n = Putaran (rpm)

2.8.5. Tekanan, Massa Udara, dan Usaha/Kerja Pada Keadaan Expansi

Tekanan udara pada suatu titik dalam atmosfer dapat dihitung menggunakan hukum gas ideal atau hukum *Boyle-Charles*. Namun, perlu diingat bahwa tekanan udara dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti ketinggian, suhu, dan komposisi atmosfer (Jufriзал, Mawardi, and Ramadhan 2022).

$$P.V = m.R.Th \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana : P = Tekanan udara
 V = Volume udara (m^3)
 m = Massa udara (Kg)
 R = Konstanta Gas (J/kg.K)
 Th = Temperatur ($^{\circ}C$)

Massa udara adalah jumlah total massa dari partikel-partikel yang membentuk udara dalam suatu volume tertentu. Udara terdiri dari berbagai komponen seperti nitrogen, oksigen, argon, karbondioksida, dan sejumlah kecil gas lainnya. Massa udara bisa diukur dalam satuan massa (gram, kilogram, dll.).

$$m = \frac{P V}{R T} \dots\dots\dots(2.10)$$

- Dimana :
- m = Massa udara (kg)
 - P = Tekanan 1 Atmosfer
 - V = Volume maksimum (m^3)
 - R = Konstanta gas/udara (J/kg.K)

Usaha atau kerja pada keadaan ekspansi adalah bentuk energi yang dialihkan sebagai hasil dari ekspansi gas atau cairan dalam suatu sistem. Dalam konteks mesin termal seperti *stirling engine*, usaha pada keadaan ekspansi mengacu pada energi mekanik yang dihasilkan oleh ekspansi fluida kerja (biasanya gas) saat bekerja pada piston atau menggerakkan bagian mesin lainnya.

$$w = m \cdot R \cdot T_h \times \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right) \dots\dots\dots(2.11)$$

- Dimana :
- w = Usaha/kerja pada keadaan ekspansi
 - m = Massa udara (kg)
 - R = Konstanta gas (J/kg.K)
 - T_h = Temperatur *displacer* (K)
 - V₄ = Volume maksimum (m^3)
 - V₃ = Volume Minimum (m^3)

2.8.6. Konstanta Gas Ideal

Konstanta gas ideal, yang juga dikenal sebagai konstanta gas universal, adalah suatu nilai tetap dalam bidang ilmu fisika dan kimia yang digunakan untuk menjelaskan hubungan antara berbagai variabel dalam kerangka hukum gas ideal. Hukum gas ideal sendiri adalah suatu prinsip fisika yang menjelaskan perilaku gas ideal dalam situasi-situasi tertentu. Konstanta gas ideal ini diberi nama "universal" karena nilainya tetap konstan untuk semua jenis gas ideal.

Konstanta gas ideal sering dilambangkan dengan simbol "R" dan memiliki beberapa nilai yang berbeda tergantung pada unit yang digunakan. Nilai-nilai yang paling umum digunakan untuk konstanta gas ideal adalah:

1. Jika tekanan diukur dalam pascal (Pa), volume dalam meter kubik (m³), dan suhu dalam kelvin (K), maka nilai R adalah sekitar 8.314 J/(mol·K). Ini disebut juga sebagai konstanta gas universal.
2. Jika tekanan diukur dalam atmosfer (atm), volume dalam liter (L), dan suhu dalam kelvin (K), maka nilai R adalah sekitar 0.0821 L·atm/(mol·K)
3. Jika tekanan diukur dalam torr, volume dalam liter (L), dan suhu dalam kelvin (K), maka nilai R adalah sekitar 62.36 L·torr/(mol·K).

Konstanta gas ideal digunakan dalam hukum gas ideal, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$PV = nRT \dots\dots\dots(2.12)$$

- Dimana :
- P = Tekanan gas (dalam pascal, atm, atau torr)
 - V = volume gas (dalam meter kubik, liter)
 - n = Jumlah mol gas
 - T = Suhu gas dalam kelvin
 - R = Konstanta gas ideal

Konstanta gas ideal memiliki peran penting dalam mengilustrasikan keterkaitan antara tekanan, volume, jumlah mol, dan suhu gas, dan secara luas dimanfaatkan dalam kalkulasi dalam disiplin ilmu kimia dan fisika.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan selama 4 bulan dengan jadwal kegiatan penelitian dilihat pada table 3.1., dan kegiatan penelitian ini dilaksanakan di workshop Teknik Mesin Universitas Medan Area dan Workshop CV. Ira Publishing.

Tabel 3.1. Jadwal kegiatan penelitian

Aktifitas	Tahun 2023						
	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
Pengajuan Judul							
Penulisan Proposal							
Seminar Proposal							
Proses Penelitian							
Pengolahan Data Penyelesaian Laporan							
Seminar Hasil							
Evaluasi dan persiapan Sidang							
Sidang Sarjana							

3.2. Bahan dan Alat

3.2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Bahan Bakar Gas LPG

Gas LPG berfungsi sebagai bahan bakar burner untuk pemanas *heat exchanger* pada mesin *stirling* sebagai pengujian.



Gambar 3.1. Bahan Bakar Gas LPG

2. Angin Kompresor

Angin kompresor Fungsinya adalah untuk membantu mengalirkan dan mengendalikan aliran fluida kerja, yang umumnya berupa gas seperti helium atau hidrogen. Mesin *stirling* merupakan jenis mesin panas eksternal yang beroperasi dengan mematuhi siklus termodinamika, di mana gas mengalami perubahan volume sebagai hasil dari perubahan suhu.



Gambar 3.2. Angin Kompresor

3.2.2. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Flowtech Acrylic Flow Meter

Flowtech Acrylic Flow Meter berfungsi sebagai perangkat yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran (*flowrate*) atau jumlah aliran cairan atau gas dalam sebuah sistem. Alat ini terbuat dari bahan *acrylic* yang transparan, sehingga memungkinkan pengguna untuk dengan jelas melihat aliran cairan atau gas yang sedang diukur secara langsung.



Gambar 3.3. *Flowtech Acrylic Flow Meter*

2. Timbangan Digital

Timbangan Digital berfungsi melakukan pengukuran dan pemantauan berat dari komponen-komponen khusus dalam sistem mesin *stirling*. Timbangan digital ini juga berfungsi sebagai untuk mengukur massa awal dan akhir ada gas LPG.



Gambar 3.4. Timbangan Digital

3. Pipa Stik Gas

Pipa stik gas berfungsi sebagai jalur pengaliran yang menghubungkan gas fluida kerja dari satu komponen ke komponen lainnya dalam sistem mesin. Mesin *Stirling* adalah mesin panas eksternal yang bekerja dengan memanfaatkan perubahan volume gas akibat perubahan suhu. Pipa stik gas menjadi komponen penting dalam menyusun siklus termodinamika dalam mesin ini.



Gambar 3.5. Pipa Stik Gas

4. Burner

Burner berfungsi sebagai sumber panas eksternal yang digunakan untuk memanaskan fluida kerja dalam siklus termodinamika mesin. Fungsi utama *burner* ini sangat penting karena menyediakan panas yang diperlukan untuk menggerakkan siklus kerja mesin *stirling*.



Gambar 3.6. *Burner*

5. Displacer

Displacer berfungsi sebagai untuk memindahkan gas fluida kerja, yang umumnya berupa helium atau hidrogen, antara dua ruang yaitu ruang pemanasan dan ruang pendinginan dalam siklus termodinamika mesin.



Gambar 3.7. *Displacer*

6. Stopwatch

Stopwatch berfungsi sebagai alat untuk mengukur waktu secara akurat dan presisi selama siklus kerja mesin *stirling*.



Gambar 3.8. *Stopwatch*

7. Stainless Steel Thermowell

Thermowell berfungsi sebagai untuk memberikan perlindungan fisik kepada sensor suhu dari kontak langsung dengan fluida kerja dalam mesin *stirling*. Ini penting karena fluida kerja dalam mesin *stirling* biasanya berupa gas yang dapat memiliki suhu yang sangat tinggi atau rendah.



Gambar 3.9. *Stainless Steel Thermowell*

8. Thermometer Controller UT320D

Thermometer controller berfungsi untuk mendeteksi suhu dalam sistem mesin *stirling* dan mengatur proses pemanasan atau pendinginan sehingga suhu tetap berada dalam kisaran yang diinginkan. Pengaturan suhu yang akurat sangat penting untuk mencapai kinerja mesin yang optimal.



Gambar 3.10. *Thermometer Controller UT320D*

9. Thermometer Digital

Thermometer digital berfungsi untuk mengukur suhu dalam berbagai komponen dan bagian mesin *stirling*, seperti ruang pemanasan, ruang pendinginan, *displacer*, dan elemen pemanas atau pendingin.



Gambar 3.11. *Thermometer Digital*

10. Thermocouple sensor

Thermocouple sensor pada mesin *stirling* berfungsi sebagai alat untuk mengukur suhu dengan menggunakan prinsip efek termoelektrik. *Thermocouple sensor* bekerja berdasarkan prinsip efek *termoelektrik*, yaitu perubahan tegangan listrik yang dihasilkan ketika ada perbedaan suhu pada dua titik yang berbeda dari *thermocouple*.



Gambar 3.12. *Thermocouple sensor*

3.3. Metode Penelitian

Pendekatan eksperimen digunakan untuk mengumpulkan data penelitian. karena pengumpulan data kuantitatif deskriptif paling baik dicapai melalui eksperimen. Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan di ruangan terbuka, dengan mengamati perubahan temperatur pada sumber api, ruang panas, ruang

dingin, dan dinding luar *displacer* yang ditunjukkan oleh *thermocouple* dan *thermogun*. Mengamati kestabilan suhu temperatur sumber api dan objek yang dipanaskan melalui *heater*. Adapun langkah-langkah dalam pengambilan data adalah sebagai berikut.

1. Memasang semua alat ukur, seperti *Termowell* dan *Termocouple* diletakkan pada bagian silinder sisi dingin (T_c), silinder sisi panas (T_c) dan temperatur api (T_h).
2. Menyiapkan 3 kg gas LPG sebagai sumber bahan bakar untuk memanaskan pemanas, sekaligus menggunakan mesin kompresor untuk meningkatkan tekanan gas. Kemudian, kita meletakkan *flowmeter* pada masing-masing selang gas dan pada kompresor. Setelah melalui *flowmeter*, aliran udara dari kompresor dan gas bertemu pada pipa sambungan, lalu menuju sumber api, yaitu *burner*.
3. Pengujian dilakukan 30 menit, dengan rentan waktu 1 menit sekali menggunakan *stopwatch*.
4. Pengambilan data pengujian suhu ruang panas (T_c), suhu ruang dingin (T_c), temperatur api (T_h), dilakukan secara bersamaan. Pembacaan dilakukan dimulai dari sumber panas dihidupkan.
5. Melakukan pencatatan beberapa parameter, yaitu suhu panas, suhu dingin, dan temperatur api.

Variabel perubahan yang diamati pada penelitian ini diperlihatkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2. Variable Perubahan Yang Diamati Pada Penelitian

Variabel	Indikator	Deskriptor	Instrumen
Temperature	<i>Api, Panas dan dingin</i>	°C	<i>Temperature controller</i>
Kecepatan putaran <i>stirling engine</i>	<i>Putaran</i>	Rpm	<i>Tachometer</i>
Waktu	Waktu	Menit	<i>stopwatch</i>

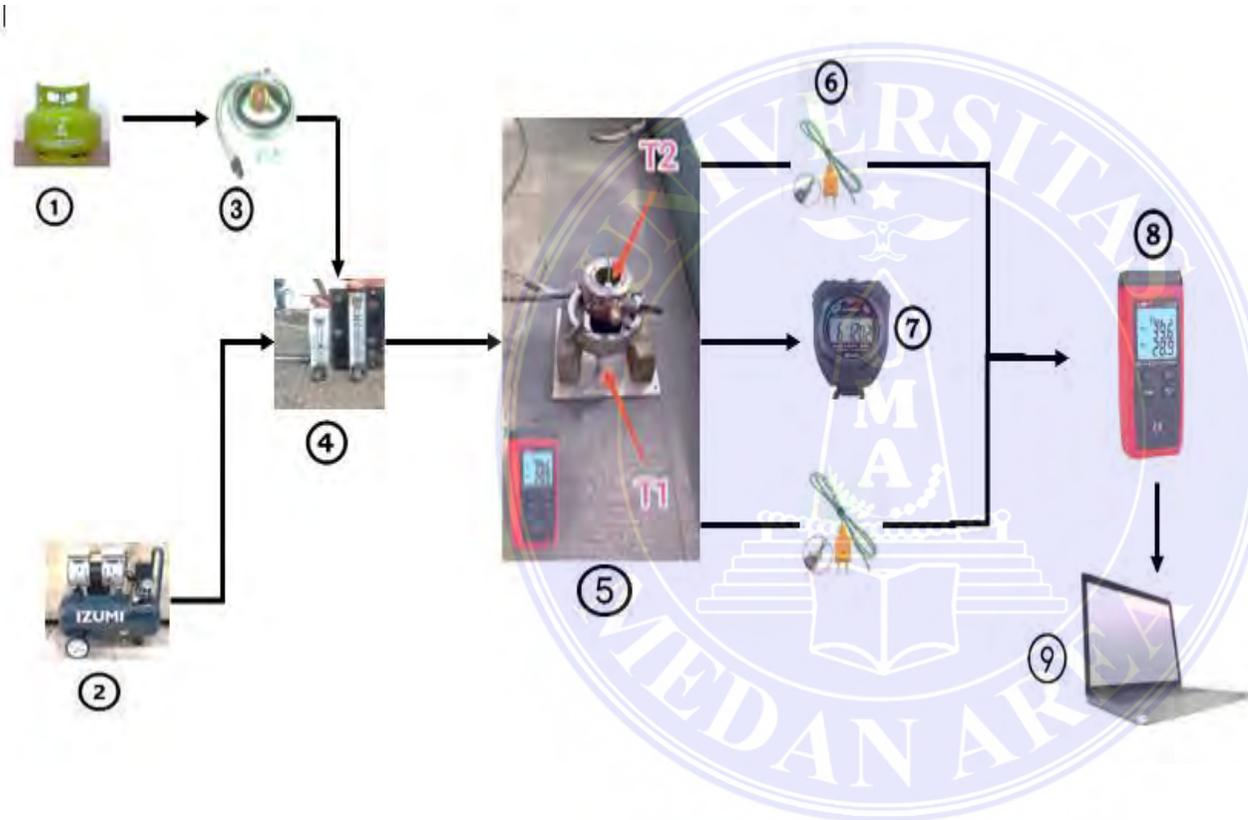
3.4. Populasi dan Sampel

Dalam konteks ini pengujian kemampuan dari komponen bagian *displacer* mesin *stirling* mCHSPE-012021. Populasi dan sampel dapat dijelaskan sebagai berikut (table populasi ini mencakup *displacer* yang ada di dalam mesin *stirling engine* yang ingin dilakukan pengujian). Sedangkan sampel dalam penelitian ini adalah *burner*, *displacer*, dan konsumsi bahan bakar. Tabel populasi dan sampel bisa dilihat pada table 3.3.

Tabel 3.3. Tabel Populasi dan Sampel

No	Bahan	Sampel	Pengujian	Waktu/Menit
1	Burner	1	1	30
2	Displacer	1	1	30
3	Konsumsi Bahan Bakar	1	1	30

3.5. Prosedur Kerja



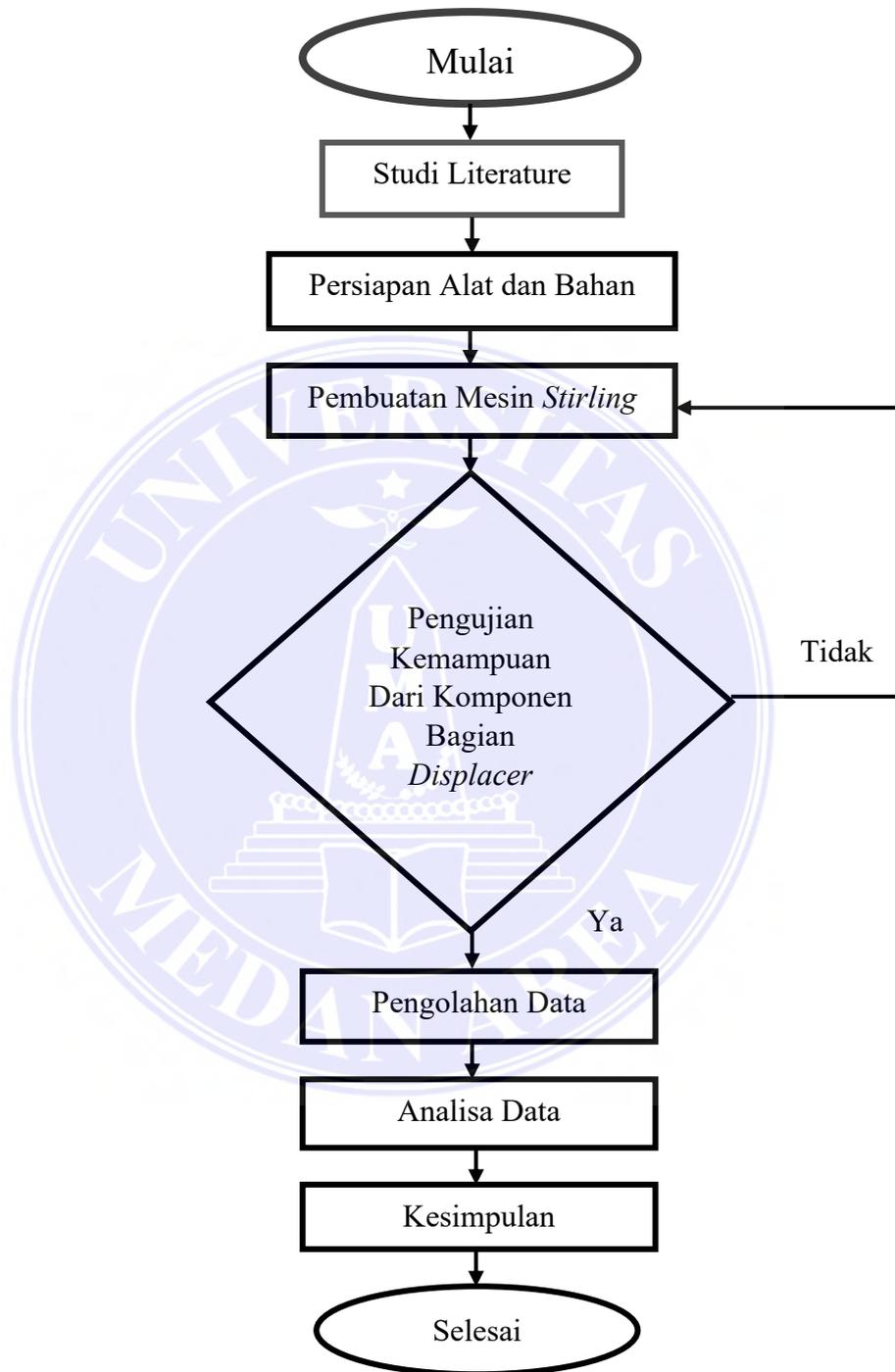
Keterangan :

1. Gas LPG
2. Angin kompresor
3. Selang Regulator
4. *Flowmeter*
5. *Burner dan Displacer*
6. Kabel *thermocouple sensor*
7. *Stopwatch*
8. *Thermometer controller*
9. Laptop

Gambar 3.13. Skema Pengujian Alat Ukur Perngujian *Stirling Engine*

3.5.1. Diagram Alir Penelitian

Untuk gambar diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.17.



Gambar 3.14. Diagram alir penelitian

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Dari hasil pengujian ini yang dapat dilakukan, maka dapat disimpulkan berdasarkan desain dan pembuatan, perhitungan dan hasil analisa data mesin *stirling engine* tipe gamma yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Di bagian *displacer* mesin *stirling* yang telah didesain dengan ukuran dimensi diameter piston *displacer* 50 mm, panjang piston *displacer* 150 mm dengan tebal 2 mm, dan pada bagian silinder tebal 3 mm, pada bagian *flywheel* tebal 10 mm, diameter 150 mm dan *connecting rods* dengan panjang 120,5 mm.
2. Pada *displacer* piston dan silinder kemampuan *stirling engine* pada diameter piston 50 mm menunjukkan temperature ruang ekspansi yang dihasilkan pada pengujian *displacer stirling engine* dengan temperatur yg dihasilkan selama 30 menit yaitu 351,3°C dengan waktu 30 menit dan rata-rata yang dihasilkan yaitu 255,7°C.
3. Pada volume ekspansi dan volume sudut engkol maka diperoleh hasil dari data hasil pengujian. Pada maksimum 59,9 CC pada sudut engkol ke 0°, pada volume ekspansi minimum 57,8 CC pada sudut engkol 355° sedangkan hasil rata-rata yang didapat volume ekspansi yaitu 58,8 CC.
4. Dari hasil analisa dan perhitungan, maka hasil tekanan yang didapat yaitu 208062,4 Pa atau setara dengan 2,0534 Atm.

5. Dari hasil analisa dan perhitungan. Maka hasil usaha/kerja pada keadaan ekspansi yang didapat yaitu -50,008 J.

5.2. Saran

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, penulis menyadari bahwa hasil perancangan dan penelitian ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut :

1. Perlu adanya perkembangan lebih lanjut dalam hal desain komponen mesin *stirling*, pada bagian diameter dalam silinder *displacer* dengan diameter luar *displacer*, supaya tidak lagi mengalami kebocoran dan agar tercapai kinerja yang maksimal.
2. Perlu Pengetahuan pada sistem pendingin khususnya pada *displacer* agar mengetahui temperatur fluida pendingin pada *stirling engine*.
3. Mekanisme pada batang torak menghasilkan gesekan yang besar, sehingga perlu didesain yang menghasilkan gesekan yang lebih kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggit Yulianto M. 2010. “Perancangan Termodinamika Dan Pengujian Prototype Motor Stirling Tipe Alpa (α) Dengan Konfigurasi V-90.” : 8–30.
- Annisa Rachman. 2017. “Perancangan Stirling Engine Tipe Beta (β) Menggunakan Teori Schmidt.”
- BASUENDRO PUTRO. 2019. *Analisis Karakteristik Pembangkit Listrik Hot Air Stirling Engine Dengan Bahan Bakar Metanol*. MEDAN.
- Boby Novianto Syahputra. 2020. “Pengujian Dan Analisa Stirling Engine Tipe Gamma Menggunakan Teori Schmidt Dengan Metode Hargreaves .” *STIRLING ENGINE*: 38–40.
- Evalina, Noorly, and Basuendro Putro. 2020. “Analisis Karakteristik Pembangkit Listrik Hot Air Stirling Engine Dengan Bahan Bakar Metanol.” <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.
- Fanani, Akhmad Rizal, Muhammad Agus Sahbana, and Purbo Suwandono. 2021. “Pengaruh Konduktivitas Thermal Pada Hot Cylinder Mesin Stirling Menggunakan Energi Surya Terkonsentrasi.” *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro* 10.
- Hidayah, M. 2022. 1 IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA) *Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling Dengan Variasi Kosumsi Bahan Bakar LPG Burner Performance Test Stirling Engine with Variations in Fuel Consumption*.
- Intan Putri Nazila. 2016. “Unjuk Kerja Mesin Stirling Tipe Gamma Dengan Sumber Panas Reflektor Parabolik Dan Sistem Aliran Air Pada Reservoir Rendah.”
- 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, Jufrietal et al. 2022. “Uji Kinerja Burner Gas LPG Mesin Stirling Dengan Variasi Laju Aliran Udara.” *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1(2).
- Jufrizal, Jufrietal, Mawardi Mawardi, and Fandy Ramadhan. 2022. “Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling Dengan Variasi Tekanan Bahan Bakar.” *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1(2).
- Jufrizal, Farel H. Napitupulu, Ilmi, and Himsar Ambarita. 2020. “Manufacturing and Testing Prototype of a Gamma Type Stirling Engine for Micro-CHP Application.” In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing.

- Jufrizal, Farel H. Napitupulu, Ilmi, Himsar Ambarita, and Mahadi Meliala. 2022b. "Thermodynamic Analysis of a Gamma-Type Stirling Engine for MCHP Application." In *Proceedings of the 7th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICE-SEAM 2021)*, edited by Mohd Fadzli Bin Abdollah, Hilmi Amiruddin, Amrik Singh Phuman Singh, Fudhail Abdul Munir, and Asriana Ibrahim, 225–229. Melaka, Malaysia:SpringerNatureSingapore.https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-3179-6_40.
- Jufrizal, F. H. Napitupulu, Ilmi, H. Ambarita, and M. Meliala. 2022a. "Ideal Cycle Thermodynamic Analysis For Gamma-Type Stirling Engine." *Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET)* 14 (2): 1–15
- Mawardi, Jufrizal, and M. Hidayah. 2022. "Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling Dengan Variasi Kosumsi Bahan Bakar." *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1 (1): 35–40.
- 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.
- Siregar, Zufri Hasrudy, Jufrizal Jufrizal, and Bintang Kelana Putra. 2022. "Pengaruh Penambahan Regenerator Terhadap Performansi Mesin Stirling Tipe Gamma." *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi* 8 (2): 1–8. <https://doi.org/10.35308/jmkn.v8i2.5957>
- Lekchaum, S., and K. Locharoenrat. 2018. "Design of Dual Flywheels with Connecting Rods for Gamma-Type Stirling Engine." *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*: 919–24.
- Napitupulu, F H, H Ambarita, and M Meliala. "IDEAL CYCLE THERMODYNAMIC ANALYSIS FOR GAMMA-TYPE STIRLING ENGINE."
- Prasetyo MT, Eko ST. 2019. "Syahril 2) 1) Fakultas Teknik." *Universitas Pancasila, Jl.Srengseng Sawah 7272290*.
- Siregar, Z H, Moraida Hasanah, and M D Agusdiandy. 2022. 1 IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA) *Pengaruh Variasi Temperatur Sumber Panas Terhadap Temperatur Udara Dalam Heater Mesin Stirling Effect of Variation in Heat Source Temperature on Air Temperature in Stirling Engine Heater*.
- Sowale, Ayodeji et al. 2018. "Thermodynamic Analysis of a Gamma Type Stirling Engine in an Energy Recovery System." *Energy Conversion and Management* 165: 528–40.

Westevan Juneto Nainggolan. 2020. *Pengaruh Toleransi Displacer Piston Dengan Silinder Terhadap Kemampuan Stirling Engine Tipe Gamma.*

Yerbury, Alex, Alex Coote, Vikram Garaniya, and Hongyang Yu. 2016. "Design of a Solar Stirling Engine for Marine and Offshore Applications." *International Journal of Renewable Energy Technology* 7(1): 1.

Yuliyani, Ika, and Mochamad Irwan. 2013. *Pembuatan Dan Pengujian Prototipe Mesin Stirling Tipe Gamma.*

Zayyinun, Achmad, and Mahendra Widartono. 2020. *Prototipe Mesin Stirling Menggunakan Panas Sinar Matahari Sebagai Energi Alternatif.* Surabaya.



Lampiran 1. Data Hasil Pengujian Bagian Displacer Mesin Stirling Engine

waktu	Kompresi		$V_1 = V_4 =$	$V_2 = V_3 =$	R_a	p_1	T_i	m_g	Q_{12}	W	P			
	$T_1 = T_2 = T_c$	V_{maks}	V_{min}											
menit	°C	K	m ³	m ³	J/kg.K	atm	Pa (N/m ²)	°C	K	kg	J	J	Pa	Atm
0	31,9	305,1	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,217	-24,346	208062,4	2,053416
1	60,1	335,4	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,238	-26,768	111369,5	1,099132
2	76,6	351,9	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,250	-28,085	116848,3	1,153203
3	80,2	355,5	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,252	-28,372	118043,7	1,165001
4	97,6	372,9	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,265	-29,761	123821,4	1,222022
5	119,2	394,5	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,280	-31,484	130993,7	1,292807
6	146,5	421,8	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,299	-33,663	140058,6	1,382271
7	170,3	445,6	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,316	-35,563	147961,4	1,460265
8	192,1	467,4	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,332	-37,303	155200,1	1,531706
9	228,9	504,2	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,358	-40,239	167419,5	1,652302
10	230,8	506,1	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,359	-40,391	168050,4	1,658529
11	245,5	520,8	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,370	-41,564	172931,5	1,706702
12	261,5	536,8	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,381	-42,841	178244,3	1,759135
13	266,6	541,9	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,385	-43,248	179937,8	1,775848
14	288,9	564,2	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,400	-45,028	187342,5	1,848927
15	300,8	576,1	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,409	-45,978	191293,9	1,887924
16	311,9	587,2	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,417	-46,864	194979,6	1,9243
17	325,1	600,4	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,426	-47,917	199362,7	1,967557
18	336,2	611,5	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,434	-48,803	203048,5	2,003932
19	344,0	619,3	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,440	-49,425	205638,4	2,029494

20	345,3	620,6	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,441	-49,529	206070,1	2,033754
21	343,9	619,2	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,440	-49,417	205605,2	2,029166
22	344,0	619,3	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,440	-49,425	205638,4	2,029494
23	344,3	619,6	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,440	-49,449	205738,1	2,030477
24	344,9	620,2	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,440	-49,497	205937,3	2,032443
25	345,8	621,1	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,441	-49,569	206236,1	2,035392
26	346,7	622,0	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,442	-49,641	206535	2,038342
27	347,9	623,2	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,442	-49,737	206933,4	2,042274
28	349,3	624,6	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,443	-49,848	207398,3	2,046862
29	350,2	625,5	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,444	-49,920	207697,2	2,049812
30	351,3	626,6	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,445	-50,008	208062,4	2,053416
Min.	80,2	355,5	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,445	-50,008	111369,5	1,099132
Max.	351,3	626,6	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,252	-28,372	208062,4	2,053416
Average	277,1	552,4	0,000060	0,000058	287,1	1	101325	32,00	305,2	0,000069	-0,392	-44,089	179756,8	1,774061

Lampiran 2. Data Hasil Perubahan Volume Sebagai Sudut Engkol

Sudut Engkol	Diameter Piston	Langkah Piston	Volume Sudut Engkol	Volume Exspansi	
Φ	D	L	CC	m ³	CC
0	0,05	0,06	0,00011775	0,0000599	59,90256
5	0,05	0,06	0,00011775	0,0000592	59,16648
10	0,05	0,06	0,00011775	0,0000580	58,0128
15	0,05	0,06	0,00011775	0,0000581	58,09437
20	0,05	0,06	0,00011775	0,0000593	59,29433
25	0,05	0,06	0,00011775	0,0000599	59,89352
30	0,05	0,06	0,00011775	0,0000590	59,0335
35	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,9464
40	0,05	0,06	0,00011775	0,0000582	58,18968
45	0,05	0,06	0,00011775	0,0000594	59,4148
50	0,05	0,06	0,00011775	0,0000599	59,86656
55	0,05	0,06	0,00011775	0,0000589	58,89774
60	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,89634
65	0,05	0,06	0,00011775	0,0000583	58,29704
70	0,05	0,06	0,00011775	0,0000595	59,52578
75	0,05	0,06	0,00011775	0,0000598	59,82216
80	0,05	0,06	0,00011775	0,0000588	58,76157
85	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,86349
90	0,05	0,06	0,00011775	0,0000584	58,41458
95	0,05	0,06	0,00011775	0,0000596	59,6253
100	0,05	0,06	0,00011775	0,0000598	59,76109
105	0,05	0,06	0,00011775	0,0000586	58,6274
110	0,05	0,06	0,00011775	0,0000578	57,84844
115	0,05	0,06	0,00011775	0,0000585	58,54021
120	0,05	0,06	0,00011775	0,0000597	59,71162
125	0,05	0,06	0,00011775	0,0000597	59,68443
130	0,05	0,06	0,00011775	0,0000585	58,49759
135	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,85146
140	0,05	0,06	0,00011775	0,0000587	58,67173
145	0,05	0,06	0,00011775	0,0000598	59,78322
150	0,05	0,06	0,00011775	0,0000596	59,59352
155	0,05	0,06	0,00011775	0,0000584	58,37441
160	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,87248
165	0,05	0,06	0,00011775	0,0000588	58,80683
170	0,05	0,06	0,00011775	0,0000598	59,83885
175	0,05	0,06	0,00011775	0,0000595	59,48998
180	0,05	0,06	0,00011775	0,0000583	58,26004
185	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,91114
190	0,05	0,06	0,00011775	0,0000589	58,94313
195	0,05	0,06	0,00011775	0,0000599	59,87751

200	0,05	0,06	0,00011775	0,0000594	59,37562
205	0,05	0,06	0,00011775	0,0000582	58,1565
210	0,05	0,06	0,00011775	0,0000580	57,96676
215	0,05	0,06	0,00011775	0,0000591	59,07824
220	0,05	0,06	0,00011775	0,0000599	59,89854
225	0,05	0,06	0,00011775	0,0000593	59,25244
230	0,05	0,06	0,00011775	0,0000581	58,06559
235	0,05	0,06	0,00011775	0,0000580	58,03836
240	0,05	0,06	0,00011775	0,0000592	59,20976
245	0,05	0,06	0,00011775	0,0000599	59,90156
250	0,05	0,06	0,00011775	0,0000591	59,12263
255	0,05	0,06	0,00011775	0,0000580	57,98893
260	0,05	0,06	0,00011775	0,0000581	58,12468
265	0,05	0,06	0,00011775	0,0000593	59,3354
270	0,05	0,06	0,00011775	0,0000599	59,88651
275	0,05	0,06	0,00011775	0,0000590	58,98846
280	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,92785
285	0,05	0,06	0,00011775	0,0000582	58,2242
290	0,05	0,06	0,00011775	0,0000595	59,45293
295	0,05	0,06	0,00011775	0,0000599	59,85367
300	0,05	0,06	0,00011775	0,0000589	58,85229
305	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,88345
310	0,05	0,06	0,00011775	0,0000583	58,33517
315	0,05	0,06	0,00011775	0,0000596	59,5603
320	0,05	0,06	0,00011775	0,0000598	59,80361
325	0,05	0,06	0,00011775	0,0000587	58,71653
330	0,05	0,06	0,00011775	0,0000579	57,85648
335	0,05	0,06	0,00011775	0,0000585	58,45564
340	0,05	0,06	0,00011775	0,0000597	59,65561
345	0,05	0,06	0,00011775	0,0000597	59,73722
350	0,05	0,06	0,00011775	0,0000586	58,58355
355	0,05	0,06	0,00011775	0,0000578	57,84744
360	0,05	0,06	0,00011775	0,0000586	58,58349
MAX				0,0000599	59,90256
MIN				0,0000578	57,84744
Rata-Rata			0,00011775	0,0000589	58,87101

