# Pengembangan Mesin Stirling Tipe Gamma Sebagai Tenaga Penggerak Kipas Angin

Rahmat
*Welding Inspector – PT. Hexindo Adiperkasa Tbk.,Jakarta
*Email: rahmat98@gmail.com*

## ABSTRAK

*Mesin stirling adalah mesin kalor yang mengambil kalor dari luar silinder kerjanya. Penelitian ini memberikan tinjauan literatur tentang mesin stirling type gamma dengan berbagai macam pengembangannya seperti sebagai penggerak kipas angin. Tujuan dari penelitian ini adalah dapat mengembangkan sebuah mesin stirling yang energi keluarannya minimal sebesar 45 Watt dengan kecepatan putar 1000 rpm, sehingga mesin ini bisa digunakan sebagai tenaga penggerak sebuah kipas angin. Pengembangan mesin ini menggunakan metoda teknik perancangan VDI 2221. Proses perancangan mendapatkan beberapa alternatif rancangan. Rancangan yang terpilih menggunakan mesin stirling type gamma dengan 3 buah sudu kipas. Setelah dilakukan pengujian, maka didapatkan kecepatan putar maksimum yaitu 3153 rpm, kecepatan putar rata-rata 1798 rpm, dengan efisiensi teoritis sebesar 63 % dengan daya keluaran sebesar 140 Watt.*

*Kata kunci: Mesin stirling gamma, Perancangan, VDI 2221*

## *ABSTRACT*

*The stirling engine is a heat engine that takes heat from outside the cylinder it works. This study provides a literature review of the gamma stirling type engine with a variety of developments such as a fan.. The purpose of this study is to be able to develop a stirling engine whose output energy is at least 45 Watts with a rotating speed of 1000 rpm, so that this engine can be used as a driving force for a fan. The development of this machine uses the VDI 2221 design technique. The design process gets several alternative designs. The selected design uses a gamma stirling type with 3 fan blades. After testing, the maximum rotational speed is 3153 rpm, the average rotational speed is 1798 rpm, with theoretical efficiency of 63% with an output power of 140 Watts.*

***Keywords: Gamma stirling engine, Design Engineering, VDI 2221***

## I. PENDAHULUAN

Penggunaan energi terbarukan di Indonesia belum begitu banyak kecuali tenaga air, karena biaya produksinya belum kompetitif di banding dengan energi konvensional. Jika tidak ada langkah strategis yang cepat diambil, maka kita akan mengalami defisit energi.

Dalam usaha mencari alternatif energi terbarukan tersebut, mesin stirling memiliki reputasi kerja yang baik dan masa kerja yang lama (diatas 20 tahun). Mesin ini memiliki potensi bagus untuk mencapai efisiensi tertinggi dari semua mesin kalor yang ada.

Mesin stirling ini dapat dioperasikan dengan berbagai sumber panas, seperti tenaga matahari, kimia maupun nuklir. Dibandingkan dengan mesin pembakaran dalam lain, mesin ini memiliki potensi yang lebih efisien, lebih tenang, dan lebih mudah dalam perawatan.

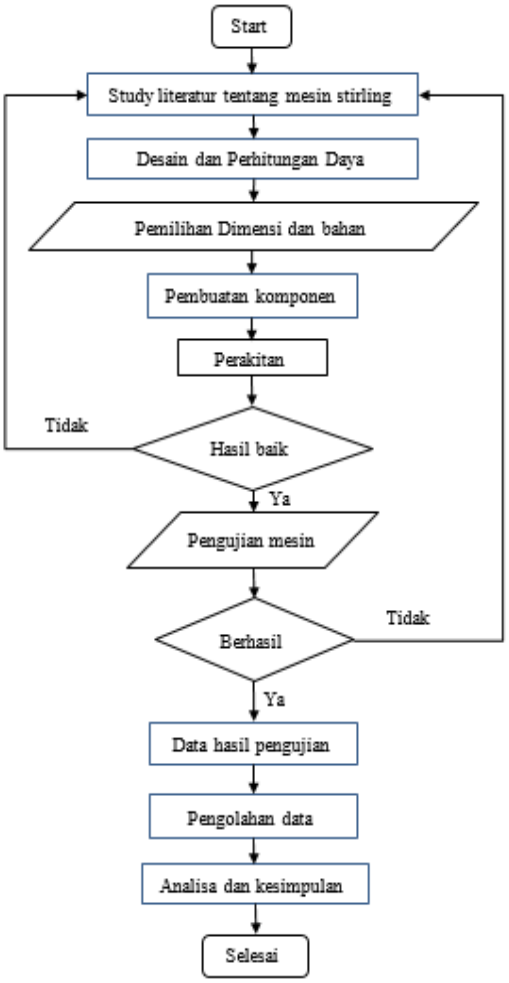
Alasan utama mengapa mesin ini tidak dikomersialkan adalah kurang kompetitifnya mesin ini jika dibandingkan dengan mesin yang menggunakan motor bakar pembakaran dalam dari segi daya spesifiknya dan dimensinya [1].

Tujuan penelitian ini adalah menyelidiki kinerja dari mesin stirling 140 Watt dan mengembangkannya menjadi sebuah kipas angin. Desain dari pengembangan mesin ini cukup memuaskan, daya keluaran dan efisiensinya juga dapat ditingkatkan lagi. Perbaikan ini sangat menarik sebagai contoh model penelitian.

## II. METODE PENELITIAN

Secara keseluruhan langkah kerja yang terdapat dalam VDI 2221 terdiri dari 7 tahap, yang dikelompokkan menjadi 4 fase yaitu :

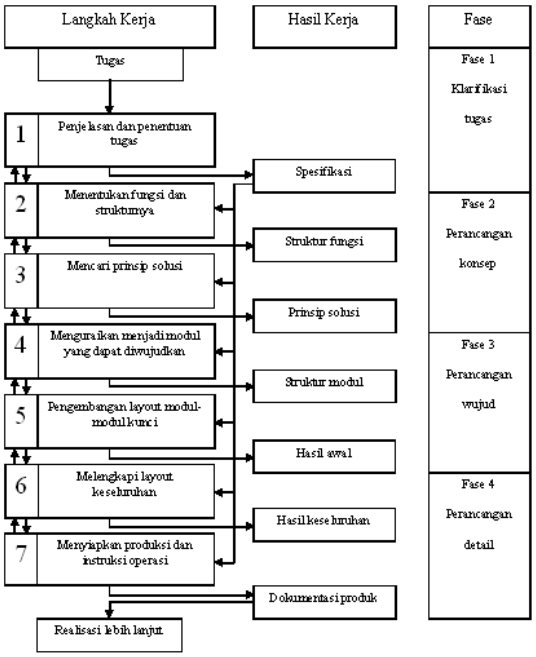
1. Penjabaran tugas
2. Perancangan dengan konsep
3. Pembentukan konsep
4. Perancangan dengan terperinci




Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

**Tahap Penjabaran Tugas**

Langkah kerja penjabaran tugas merupakan tahap awal perancangan, di mulai dari pengumpulan informasi.




Gambar 2. Diagram Alir Perancangan

**Spesifikasi Daftar Kehendak**

Daftar kehendak merupakan sebuah dokumen penting dan merupakan dasar dalam melaksanakan langkah kerja lainnya.

Tabel 1. Daftar Kehendak

| MAGISTER TEKNIK | | SPESIFIKASI DAN SUB FUNGSI | IDENTIFIKASI KLASIFIKASI HALAMAN = 1 |
|---|---|---|---|
| PERUBAHAN | D/W | DAFTAR KEHENDAK | PENANGGUNG JAWAB |
| 1 | D<br>D<br>D<br>D<br>W | **GEOMETRI**<br>Bahan uji : Mesin stirling tipe gamma dengan putaran minimal 250 rpm<br>Dimensi mesin Stirling ringan dan ringkas.<br>Menghasilkan putaran yang cukup tinggi.<br>Tinggi alat 30 cm.<br>Mengikuti standart SNI tentang Kipas angin dan peralatan berputar. | |
| 2 | D<br>D | **KINEMATIKA**<br>Jenis gerakan rotasi.<br>Arah gerak rotasi dan berulang | |
| 3 | `<br>D<br>D<br>D<br><br>D<br>W | **GAYA DAN MOMEN**<br>Besar gaya mesin yang dihasilkan pada mesin Stirling cukup besar.<br>Gaya mesin yang bekerja dirubah menjadi gaya<br>Populasi gaya harus stabil.<br>**GAYA DAN MOMEN**<br>Putaran *flywheel* pembangkit gaya dapat<br>Kurva putaran vs waktu harus dapat | |

Tabel 1. Lanjutan

| MAGISTER TEKNIK | | SPESIFIKASI DAN SUB FUNGSI | IDENTIFIKASI KLASIFIKASI HALAMAN = 1 |
|---|---|---|---|
| PERUBAHAN | D/W | DAFTAR KEHENDAK | PENANGGUNG JAWAB |
| 4 | D<br>W<br>D<br>D<br>W<br>W | **TENAGA (ENERGI)**<br>Mampu dioperasikan oleh energi 1 orang.<br>Sumber energi dari alat ini dapat mudah diubah dan dikembangkan lebih lanjut tanpa mengubah prinsip kerja dari alat.<br>Effesiensi harus tinggi.<br>Hubungan daya penggerak dengan yang digerakan sederhana.<br>Diharapkan temperatur rasio yang terjadi bisa menggerakan mesin.<br>Energi penggerak didapat dari Pembakaran luar atau sinar matahari. | |
| 5 | D<br>D<br>D<br>W<br>W | **MATERIAL (BAHAN)**<br>Bahan yang digunakan adalah besi struktur dan aluminium.<br>Material dipilih telah standar (dimensi rata-rata).<br>Bahan konstruksi harus tahan korosi.<br>Harga material / bahan baku tidak mahal (relative murah).<br>Bahan konstruksi yang digunakan mudah didapatkan | |
| 6 | D<br>D<br>W | **KESELAMATAN/KEAMANAN**<br>Bagian yang bergerak/bekerja ditutup langsung.<br>Tidak membahayakan pengguna dan orang lain.<br>Tidak terlalu berisik | |
| 7 | D<br>D<br>D<br>W<br>D | **PEMBUATAN/PRODUKSI**<br>Komponen yang digunakan adalah komponen standar.<br>Komponen utama dapat dibuat/ditangani sendiri.<br>Suku cadang harus mudah dibuat atau dapat dibeli di toko.<br>Proses pembuatan yang paling sesuai dikerjakan sendiri.<br>Mutu dan toleransi dapat dijaga kesesuaiannya. | |
| 8 | D<br>D<br>D | **PERAKITAN**<br>Mesin dapat dibongkar dan dipasang sendiri.<br>Sistem perakitan komponen mesin mudah dipahami.<br>Dapat dibuat dan dirakit sendiri dirumah. | |
| 9 | D<br>D | **TRANSPORTASI**<br>Peralatan mudah apabila dikirim<br>Mudah dipindah-pindah. | |
| 10 | D<br>D<br>D<br>D | **PEMAKAIAN/OPERASI**<br>Dioperasikan secara manual.<br>Mesin mudah dipindah-pindahkan.<br>Operator tidak memerlukan keahlian khusus.<br>Pengoperasian mudah dipahami | |
| 11 | D<br>D<br>D<br>D | **PERAWATAN**<br>Periode perawatan dilakukan 6 bulan sekali.<br>Sistem perawatan mesin mudah dipahami.<br>Perbaikan mesin harus mudah ditangani oleh mekanik<br>Biaya perawatan tidak terlalu mahal. | |
| 12 | D | **LINGKUNGAN**<br>Bebas polusi dan tidak terlalu bising. | |
| 13 | D | **DAUR ULANG**<br>Jika terjadi kerusakan dapat diperbaiki. | |
| 14 | D | **BIAYA**<br>Biaya produksi pembuatan mesin Stirling dibuat serendah mungkin. | |
| 15 | D<br>D | **JADWAL**<br>Waktu perakitan ditentukan.<br>Waktu pengujian ditentukan | |

## Abstraksi

Abstraksi adalah perumusan masalah dan analisa terhadap daftar kehendak.

Tabel 2. Abstrak I

| PARAMETER | SPESIFIKASI | DEMAND (D) / WISHES (W) |
|---|---|---|
| GEOMETRI | Dimensi mesin stirling ringan dan ringkas. | D |
| | Menghasilkan putaran yang cukup tinggi. | D |
| | Tinggi alat 30 cm. | D |
| KINEMATIKA | Jenis gerakan rotasi. | D |
| | Arah gerak rotasi dan berulang | D |
| GAYA | Besar gaya mesin yang dihasilkan pada mesin Stirling cukup besar. | D |
| | Gaya mesin yang bekerja dirubah menjadi gaya rotasi. | D |
| | Populasi gaya harus stabil. | D |
| | Putaran flywheel pembangkit gaya dapat mencapai 250 rpm. | D |
| ENERGI | Mampu dioperasikan oleh energi 1 orang. | D |
| | Effesiensi harus tinggi. | D |
| MATERIAL (BAHAN) | Bahan yang digunakan adalah besi struktur dan aluminium. | D |
| | Material dipilih telah standar (dimensi rata-rata). | D |
| | Bahan konstruksi harus tahan korosi. | D |
| | Bagian yang bergerak/bekerja ditutup langsung. | D |
| | Tidak membahayakan pengguna dan orang lain. | D |
| PRODUKSI | Komponen yang digunakan adalah komponen standar. | D |
| | Komponen utama dapat dibuat/ditangani sendiri. | D |
| | Suku cadang harus mudah dibuat atau dapat dibeli di toko. | D |
| | Mutu dan toleransi dapat dijaga kesesuaiannya. | D |
| PERAKITAN | Mesin dapat dibongkar dan dipasang sendiri. | D |
| | Sistem perakitan komponen mesin mudah dipahami. | D |
| | Dapat dibuat dan dirakit sendiri dirumah. | D |
| PENGOPERASI | Dioperasikan secara manual. | D |
| | Mesin mudah dipindah-pindahkan. | D |
| | Operator tidak memerlukan keahlian khusus. | D |
| | Pengoperasian mudah dipahami | D |
| PERAWATAN | Periode perawatan dilakukan 6 bulan sekali. | D |
| | Sistem perawatan mesin mudah dipahami. | D |
| | Perbaikan mesin harus mudah ditangani oleh mekanik | D |
| | Biaya perawatan tidak terlalu mahal. | D |

Tabel 3. Abstraksi II

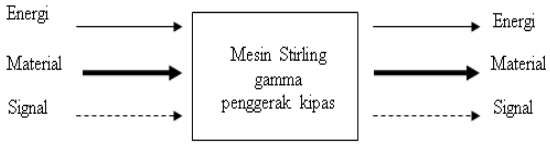
| PARAMETER | SPESIFIKASI | DEMAND (D) / WISHES (W) |
|---|---|---|
| FUNGSI | Dapat memutar sudu kipas | D |
| PRINSIP KERJA | Piston bergerak naik turun dengan memanfaatkan perbedaan suhu pada silinder, kemudian menggerakan poros engkol dan memutar kipas | D |
| KINEMATIKA | Arah gerak rotasi dan berulang | |
| PERAKITAN | Mesin dapat dibongkar dan dipasang sendiri. | D |
| | Sistem perakitan komponen mesin mudah dipahami. | D |
| PEMBUATAN | Konstruksi sederhana dan dapat dikerjakan sendiri | D |
| PENGOPERASIAN | Pengoperasian mudah dipahami | D |

Tabel 4. Abstraksi III

| PARAMETER | SPESIFIKASI | DEMAND (D) / WISHES (W) |
|---|---|---|
| FUNGSI | Dapat memutar sudu kipas | D |
| PRINSIP KERJA | Piston bergerak naik turun dengan memanfaatkan perbedaan suhu pada silinder, kemudian menggerakan poros engkol dan memutar kipas | D |
| PERAKITAN | Mesin dapat dibongkar dan dipasang sendiri. | D |
| | Sistem perakitan komponen mesin mudah dipahami. | D |
| PENGOPERASIAN | Pengoperasian mudah dipahami | D |

**Struktur Fungsi**

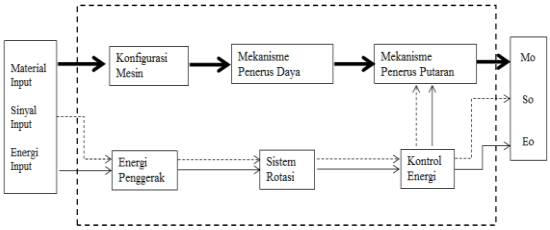
Struktur fungsi adalah sebuah rangkaian dari berbagai sub fungsi yang menjalankan fungsi keseluruhan.




Gambar 3. Struktur Fungsi Mesin Stirling

**Sub Stuktur Fungsi**

Dari fungsi keseluruhan dibuat menjadi struktur fungsi dengan jalan memperkirakan sub-sub fungsi yang diperlukan.

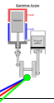



Gambar 4. Sub Struktur Fungsi Mesin Stirling

**Prinsip Solusi & Sub Varian**

Prinsip solusi harus ditentukan untuk variasi sub fungsi di dalam suatu sistem.

Tabel 5. Prinsip Solusi

| Sub Fungsi \ Prinsip Solusi | | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| 1. | Konfigurasi Mesin |  |  |  |
| 2. | Mekanisme Penerus Daya |  |  | |
| 3. | Kontrol Energi | Mata  | Sensor  | |
| 4. | Mekanisme Penerus Putaran | 2 Baling-baling  | 3 Baling-baling  | 4 Baling-baling  |
| 5. | Energi Penggerak | Matahari  | Lampu Minyak  | |

**Evaluasi Varian Konsep**

Evaluasi konsep dilakukan pada prinsip penilaian menurut VDI, dengan cara menentukan kriteria evaluasi dan bobot kriteria.

Tabel 6. Variasi Solusi

| MAGISTER TEKNIK MESIN UNIVERSITAS PANCASILA | | Tabel Pemilihan Variasi Struktur Fungsi Mesin Stirling Gamma Sebagai Penggerak Kipas Angin | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Varian Prinsip Solusi | | Kriteria Pemilihan<br>+ Ya<br>- Tidak<br>? Kurang informasi<br>! Periksa spesifikasi | | | | | Keputusan<br>+ Solusi yang dicari<br>- Hapuskan solusi<br>? Kumpulkan informasi<br>! Lihat spesifikasi | | |
| | | Sesuai dengan fungsi keseluruhan | | | | | | | |
| | | Sesuai dengan daftar kehendak | | | | | | | |
| | | Dalam batas biaya produksi | | | | | | | |
| | | Prinsipnya rasional/dapat diwujudkan | | | | | | | |
| | | Sesuai keinginan perancang | | | | | | | |
| | | Efisiensi tempat | | | | | | | |
| | | Memenuhi syarat keamanan | | | | | | | |
| | | A | B | C | D | E | F | G | Penjelasan |
| V1 | 1 | + | + | - | + | - | - | - | Part terlalu mahal |
| V2 | 2 | + | + | + | + | + | + | + | |
| V3 | 3 | + | + | + | + | - | + | + | Part sulit dibuat |

**Menentukan Rating Varian**

Untuk menentukan *rating* varian diatas, dapat digunakan rumus:

$$WRJ = \frac{OWVj}{VMAX \sum_{i=i}^{n} Wi}$$

Maka didapatkan hasil :

1. Varian 1

$$WRJ = \frac{3.00}{3 \times 6} = 0.166$$

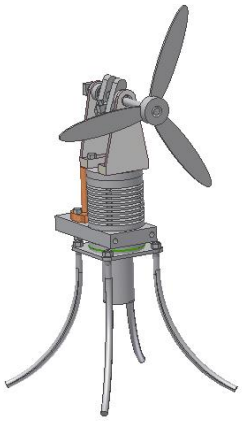
2. Varian 2

$$WRJ = \frac{3.50}{3 \times 6} = 0.194$$

3. Varian 3

$$WRJ = \frac{3.05}{3 \times 6} = 0.169$$

Karena varian no. 2 mendapatkan nilai paling tinggi di antara yang lain, maka dipilih sebagai pilihan utama.



Gambar 5. Konsep Mesin Stirling

**Perhitungan Perancangan Mesin**

**Silinder *Displacer***

Perancangan material silinder *displacer* harus memenuhi beberapa kriteria seperti konduktivitas termal yang rendah.

Berikut adalah data pendekatan dari perancangan silinder *displacer* bahan dasar aluminium dengan kondisi :

- Diameter (d) = 26 mm
- Panjang(l) = 73 mm
- Tebal (t) = 1 mm

- *Clearance* = 0.25 mm

Maka :

$$ø\ Displacer \approx ø\ silinder - 2 \times radius\ clearance$$
$$\approx 26 - 2 \times 0.25$$
$$\approx 25.5\ mm$$

**Piston *Displacer***

Dimensi dari piston *displacer* yang dibuat oleh peneliti adalah :

- Diameter (d) = 25.5 mm
- Tebal (t) = 35 mm

Jadi:

$$Stroke \approx (Tinggi\ silinder - tebal\ displacer) - 2 \times Clearance$$

Assumsi jarak *clearance* antara permukaan bawah dingin dan atas panas silinder dan permukaan panas dan dingin *displacer* adalah 5 mm, maka :

$$Stroke \approx (73 - 35) - 2 \times 5$$
$$\approx 28\ mm$$

Sehingga kita bisa mencari nilai dari *crank radius* untuk *displacer;*

$$Crank\ radius = \frac{Stroke}{2}$$
$$= \frac{28}{2}$$
$$= 14\ mm$$

**Perancangan Piston Dan Silinder Dingin**

Perancangan piston pada silinder dingin dapat dilakukan dengan memakai persamaan :

$$Stroke\ Power\ Piston = Stroke\ of\ displacer$$

Dari proses perhitungan sebelumnya dapat diketahui bahwa *stroke* dari *displacer* adalah 28 mm dan *crank radius* 14 mm, sehingga :

*Stroke power piston = 28 mm*, dan

*Crank radius = 14 mm.*

Selanjutnya kita bisa mencari volume ekspansi dari *power* piston dengan menggunakan rumus :

$$Vepp = \frac{Swept\ volume\ displacer\ silinder}{25}$$

Sedangkan *swept volume displacer silinder* didapatkan dari rumus :

$$Svds = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times Stroke$$
$$= \frac{\pi}{4} \times 26^2 \times 28$$
$$= 59433.92$$
$$= 59.433 \times 10^3\ mm^3$$

Maka:

$$Vepp = \frac{59.433 \times 10^3\ mm^3}{25}$$
$$= 2377.3568\ mm^3$$
$$Vepp = \frac{\pi}{4} \times (ø\ silinder)^2 \times stroke$$
$$= \sqrt{\frac{59.433 \times 4}{\pi \times 28}}$$
$$= \sqrt{\frac{9509.42}{87.92}}$$
$$= \sqrt{108.16} \approx 10.4\ mm$$

**Perancangan Berdasarkan Analogi Tekanan Efektif Sebenarnya**

Berdasarkan kondisi termodinamika di sub bab sebelumnya, dapat ditentukan parameter yang nantinya digunakan dalam proses perhitungan selanjutnya, yaitu :

1. Temperatur rasio

Dari persamaan sebelumnya :

$$W_0 = (1 - (rt))(rv)\frac{\ln(rv)}{(rt)(\gamma - 1)}$$

Dimana :

$$Temperatur\ rasio = \frac{50^0C + 273^0K}{600^0C + 273^0K}$$
$$= \frac{323}{873}$$
$$= 0.42$$

2. Asumsi kompresi rasio ;

$$V\ silinder\ displacer\ 1 = 300 \times 10^3\ mm^3$$
$$V\ silinder\ displacer\ 2 = 75 \times 10^3\ mm^3$$

$$Kompresi\ rasio = \frac{59.433 \times 10^3\ mm^3}{10 \times 10^3\ mm^3}$$
$$= 5.94$$

Maka :

$$W_0 = (1 - (0.42))(5.94)\frac{\ln(5.94)}{(0.42)(1.4-1)}$$
$$= 45\ Watt$$

Dengan assumsi temperatur dan rasio kompresi, mesin ini mampu menghasilkan daya sebesar 45 Watt.

**Persamaan Baele**

Hasil dari keluaran mesin stirling dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Baele.

$$\boldsymbol{Power(W) = N_b \times Mean\ effective\ Pressure(MPa) \times Swept\ volume(cm^3) \times Rotation\ in\ Hz}$$

Dimana Nb adalah bilangan Baele, yaitu : 0.1112

Dari desain *swept* volume di dapat :

*Swept* volume = 59.433 x $10^3$ $mm^3$

Dari referensi empiris, dengan mengambil tekanan efektif didalam ruangan (silinder power) adalah 1 Mpa, dengan demikian kecepatan rotasi bisa di hitung :

$$45 = 0.1112 \times (1 \times 10^6) \times (59.433 \times 10^{-6}) \times R$$
$$R = \frac{45}{6.60895} = 6.809$$

1 Hz = 60 *rotation per minute*

Sehingga;

$$R = 6.809 \times 60$$
$$= 408\ rpm$$

Mesin dirancang dengan *swept* volume 59 $cm^3$ dan temperatur rasio panas ke dingin 873 $^0$K : 323 $^0$K serta tekanan efektif 1 Mpa didalam silinder tenaga, secara teori dapat menghasilkan daya sebesar 45 Watt pada putaran 408 rpm.

**Kalkulasi *Fly Wheel***

*Fly wheel* yang dibutuhkan untuk menyimpan energi dan menghasilkan rotasi yang lembut untuk piston didalam silinder adalah :

$$Energy\ stored\ by\ a\ flywheel = \frac{1}{2} \times I \times \omega^2$$

Dimana ;

$I, momen\ inersia\ kedua$
$$= \frac{1}{2} \times Massa \times Radius^2$$
$\omega, rotation\ per\ menit,$
$= 408\ rpm\ dihitung\ dengan\ pers. Baele$

Untuk mencari massa (M) :

$$Massa \times Radius^2 = \frac{4 \times Energy\ stored}{\omega^2}$$
$$= \frac{4 \times 45}{408^2}$$
$$= 1.08 \times 10^{-3} kgm^2$$

dari material yang tersedia dengan tebal 2 mm dan diameter *flywheel* 0.19 m dipilih material *mild steel* dengan massa 0,2 kg.

**Perencanaan Poros**

Mesin didesain secara teoritis mampu menghasilkan daya sebesar 45 Watt. Dengan faktor koreksi 1.0 maka :

$$P_d = f_c \times P(W)$$
$$= 1.0 \times 0.045\ kW$$
$$= 0.045\ kW$$

Sehingga :

$$T = 9.74 \times 10^5 \frac{P_d}{n_1}$$
$$= 9.74 \times 10^5 \left(\frac{0.045}{408}\right)$$
$$= 107\ kg.mm$$

Karena bahan poros terbuat dari baja konstruksi yang di *finish* dingin S30C-D dengan $\sigma_B$ = 48 (kg/mm$^2$), *safety factor* ($Sf_1$) = 6.0 dan $Sf_2$ = 2.0 maka ;

$$\tau_a = \frac{\sigma_B}{Sf_1 \times Sf_2}$$
$$= \frac{48\ {}^{kg}/_{mm^2}}{6.0 \times 2.0}$$
$$= 4\ {}^{kg}/_{mm^2}$$

Jika beban lentur tidak ada dan factor koreksi :
$C_b$ = 1.0 dan $K_t$ = 1.5 Ada tumbukan, maka diameter poros adalah :

$$d_s = \left[\frac{5.1}{\tau_a} \times K_t \times C_b \times T\right]^{1/3}$$
$$d_s = \left[\frac{5.1}{4\ {}^{kg}/_{mm^2}} \times 1.5 \times 1.0 \times 107\right]^{1/3}$$
$$= [1.275 \times 1.5 \times 1.0 \times 107\ kg.mm]^{1/3}$$
$$= 5.88\ mm$$

Maka diameter poros $d_s = 6\ mm$

Tabel 7. Dimensi Hasil Perancangan Mesin

| | | |
|---|---|---|
| Piston *Displacer Stroke* | 28 | mm |
| *Crank radius* | 14 | mm |
| Volume Ekspansi Power Piston | 10.4 | mm |
| Temperatur Rasio | 0.42 | |
| Daya Keluaran | 45 | Watt |
| *Swept* Volume | 59.433 x 103 | $mm^3$ |
| Kecepatan Putar | 408 | rpm |
| Massa & Radius *Fly Wheel* | 1.08 x $10^{-3}$ | $kgm^2$ |
| Diameter *Fly Wheel* | 19 | mm |
| Diameter Poros | 6 | mm |
| Diameter Poros *Crank Shaft* | 9.86 | mm |

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

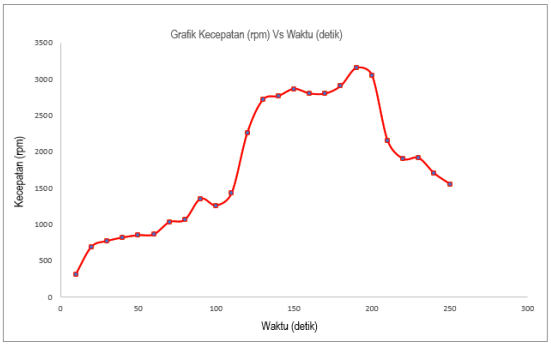
Pengujian *hardware* mesin dilakukan untuk menguji kecepatan putar dari *fly wheel (fan).*



Gambar 6. Mesin Hasil Pengembangan

Tabel 8. Kecepatan Putar Mesin Stirling

| No | Waktu (detik) | Kecepatan (RPM) | Δn (RPM) | α (rad/s$^2$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 310.5 | | |
| 2 | 20 | 688.3 | 377.8 | 3.9543 |
| 3 | 30 | 768.7 | 80.4 | 0.8415 |
| 4 | 40 | 816.8 | 48.1 | 0.5034 |
| 5 | 50 | 848.9 | 32.1 | 0.336 |
| 6 | 60 | 858.6 | 9.7 | 0.1015 |
| 7 | 70 | 1029 | 170.4 | 1.7835 |
| 8 | 80 | 1061 | 32 | 0.3349 |
| 9 | 90 | 1351 | 290 | 3.0353 |
| 10 | 100 | 1257 | -94 | -0.9839 |
| 11 | 110 | 1429 | 172 | 1.8003 |
| 12 | 120 | 2257 | 828 | 8.6664 |
| 13 | 130 | 2713 | 456 | 4.7728 |
| 14 | 140 | 2765 | 52 | 0.5443 |
| 15 | 150 | 2864 | 99 | 1.0362 |
| 16 | 160 | 2800 | -64 | -0.6699 |
| 17 | 170 | 2799 | -1 | -0.0105 |
| 18 | 180 | 2905 | 106 | 1.1095 |
| 19 | 190 | 3153 | 248 | 2.5957 |
| 20 | 200 | 3052 | -101 | -1.0571 |
| 21 | 210 | 2152 | -900 | -9.42 |
| 22 | 220 | 1900 | -252 | -2.6376 |
| 23 | 230 | 1912 | 12 | 0.1256 |
| 24 | 240 | 1700 | -212 | -2.2189 |
| 25 | 250 | 1554 | -146 | -1.5281 |
| Rata-rata | | 1797.8 | 49.7 | 0.5206 |




Gambar 7. Grafik Kecepatan Putar Mesin Stirling

Berdasarkan gambar 7 terlihat bahwa, mesin membutuhkan waktu 130 detik untuk mencapai kecepatan putar rata-rata. Pada 10 detik pertama, mesin hanya berputar perlahan, tetapi memasuki 20 detik kedua putaran mesin terlihat mulai naik. Pada 90 detik berikutnya, putaran mesin kembali turun. Hal ini diakibatkan karena pasokan panas pada silinder panas belum merata pada setiap bagian dinding silinder panas.

Terjadi fluktuasi putaran yang cukup signifikan pada 10 sampai 100 detik pertama. Hal ini disebabkan karena panas yang dihasilkan oleh *burner* belum merata pada dinding silinder panas.

**Perhitungan Torsi**

Perhitungan torsi dilakukan untuk mengetahui besar torsi yang ditimbulkan oleh *flywheel* yang diasusmsikan sebagai kipas.

A. Perhitungan momen inersia untuk *flywheel* adalah sebagai berikut :

$$I = \left(\frac{1}{2}\right) mr^2$$
$$= \left(\frac{1}{2}\right) 0.3023kg \times 0.19^2 m$$
$$= 0.00546\ kg.m^2$$

B. Momen inersia yang dihasilkan oleh poros engkol adalah sebagai berikut:

$$I = \left(\frac{1}{2}\right) mr^2$$
$$= \left(\frac{1}{2}\right) 0.0848kg \times 0.006^2 m$$
$$= 0.0000015\ kg.m^2$$

C. Perhitungan momen inersia yang dihasilkan oleh piston *displacer* adalah sebagai berikut:

$$I = mr^2$$
$$= 0.00502\ kg \times 0.0255^2 m$$
$$= 0.00000326\ kg.m^2$$

Sehingga momen inersia totalnya adalah:

$$I_{tot} = I_{flywheel} + I_{poros} + I_{piston}$$
$$= 0.00546+0.0000015+0.00000326 kg.m^2$$
$$= 0.005465\ kg.m^2$$

Torsi dapat diketahui dengan menggunakan persamaan :

$$T = F \times l$$

Dimana :

$$F = m \times a$$
$$F = (massa_{Flywheel} + massa_{Crank\ shaft} + massa_{piston}) \times a$$
$$= (0.3023 + 0.0848 + 0.00502kg) \times 9.81\ {}^{m}/_{s^2}$$
$$= 3.8467\ N$$

Sedangkan l adalah panjang total dari *crank shaft* yaitu 0.111 m. Jadi Torsi dapat kita hitung;

$$T = 3.8467\ N \times 0.111\ m$$
$$= 0.42698\ N.m$$

Sehingga kita bisa mencari berapa daya mesin, sebagai berikut:

$$P = \frac{2\pi nT}{60}$$
$$= \frac{2 \times 3.14 \times 3153 \times 0.42698}{60}$$
$$= 140\ watt$$

**Perhitungan Efisiensi mesin**

Perhitungan efisiensi mesin dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\%$$

Input daya ke sistem diperkirakan dengan mengambil perbedaan suhu antara bagian yang dipanaskan dan *heat sink*, sebagai berikut;

$$Energy\ input\ per\ detik = Massa\ udara \times Udara\ C_p \times \Delta T$$

Namun massa udara dapat dihitung sebagai;

$$Massa = Density(\rho) \times volume(v)$$

Oleh karena itu, dengan mengambil nilai

$\rho = 1.2 kg/m^3$, $v = 1200 \times 10^{-6} m^3$

$$Kapasitas\ panas\ spesifik, C_p = 1005\ J/kg\ K$$

$$Perubahan\ temperatur, \Delta T \approx (600 - 50) = 550\ K$$

$$Masukan\ energi\ per\ detik = 1.2 \times 1000 \times 10^{-6} \times 1005 \times 550 = 663\ \mathrm{J/s}$$

Dengan mengambil output daya seperti yang diperkirakan oleh persamaan Beale; yaitu; Output daya = 45 watt

Maka dari itu, efisiensi dapat dihitung sebagai berikut:

$$Efisiensi\ Aktual = \frac{45}{663} \times 100 = 6.7\%$$

Dengan demikian efisiensi mesin sebenarnya adalah 6.7 %. Ini dapat dibandingkan dengan efisiensi mesin stirling teoritis Ideal, yang secara teoritis sama dengan efisiensi Carnot sebagai;

$$Effisiensi\ teoritis\ ideal = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

$$= \left(1 - \frac{50 + 273.15}{600 + 273.15}\right) \times 100 = 63\ \%$$

## IV. KESIMPULAN

Daya keluaran yang dihasilkan oleh mesin stirling tergantung dari besar kecilnya diameter silinder tenaga serta masukan panas yang dihasilkan oleh *burner*. Semakin tinggi panas yang dapat dihasilkan, maka daya keluaran yang dihasilkan oleh mesin stirling akan besar pula. Dari hasil pengujian, didapatkan daya keluaran mesin stirling yang di rancang adalah sebesar 140 Watt dengan putaran maksimum sebesar 3153 rpm.

Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa nilai dari perubahan suhu sangat berpengaruh terhadap kecepatan putar dari mesin stirling. Semakin tinggi suhu yang dipasok ke silinder panas, maka semakin tinggi pula kecepatan putar dari mesin. Hal ini dapat dibuktikan dengan cara menjauhkan atau menghentikan pasokan panas pada silinder panas, maka perlahan kecepatan putar dari mesin akan semakin menurun dan akhirnya berhenti setelah beberapa saat.

Hasil pengujian dan perhitungan didapatkan efisiensi sebesar 63 %, sehingga pengembangan mesin stirling tipe gamma dapat dilakukan dengan cara memodifikasi bagian dari mesin, yaitu bagian *flywheel* yang kemudian ditambahkan beberapa sudu kipas. Sehingga gabungan dari *flywheel* dan sudu kipas akan membentuk sebuah kipas angin. Bagian silinder panas dibuat dibagian bawah dengan harapan agar panas dari pembakaran arang pemanggang sate bisa digunakan sebagai tenaga masukan panas.

## DAFTAR PUSTAKA


[1]. Karabulut, Halit. "*Manufacturing and Testing of a V-Type Stirling Engine",* Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences 24 (2000) :71 - 80.

[2]. Apandi, Puzi Ultra. "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Stirling Engine Generator Magnet Permanen" UIN Sultan Syarif Kasim, Riau 2015.

[3]. Nazila, Intan Putri. "Unjuk Kerja mesin Stirling Tipe Gamma Dengan Sumber Panas Reflektor Parabolik Dan Sistem Aliran Air Pada Reservoir Rendah", UIN Maulana Malik Ibrahim, Malang 2016.

[4]. Manab, Rahmat Chandra. "Rancang Bangun Model Mesin Stirling Sebagai Pembangkit Tenaga Surya Termal, Universitas Sebelas Maret, Surakarta 2016.

[5]. Ajay Ashok and Arundas S. *"Design and Fabrication of Gamm-Type Stirling Engine With Rotary Displacer",* IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume 4 – April 2015.

[6]. Narayan, Sunny & Vikas Gupta. *"Overview Of Working Of Stirling Engine",* Journal of Engineering Studies and Research, Volume 21 No 4 - 2015.

[7]. Dawi, Syed Mohamad Hisyam Wan and Muhammad Murtadha Othman. *"Gamma Stirling Engine for a Small Design of Renewable Resource Model",* Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 8, No. 2, November 2017.

[8]. Kwasi Effah C.C & Obanor A.I. "*Performance Appraisal of a Gamma-Type Stirling Engine",* International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering 2017; 5(4): 51-53.

[9]. Yerbury, Alex and Alex Coote. *"Design Of A Solar Stirling Engine For Marine*

*And Offshore Application",* International Journal Renewable Energy Technology, Vol. 7, No. 1, 2016.

[10]. Nezemi, Seyyed Danial and Mehrdad Boroushaki.*"Design, Analysis and Optimization of a Solar Dish/Stirling System*", International Journal of Renewable Energy Development 5 (1) 2016: 33-42.

[11]. Widodo. "Studi Eksperimen *Output* Daya Pada Motor Stirling Td 295 Tipe Gamma Dengan Menggunakan Stirling Engine Control" V.1.5.0 – 2013.

[12]. Cronenberg, G. *"The Stirling Engine".*Uppsala University, Sweden – 2005.

[13]. Vineeth, CS. "*Stiriling Engine : A Beginner guide*". Mechanical Engineering at College of Engineering Thiruvananthapuram, India – 2012.

[14]. N.A. Kanyonga and W.S. King'ori. *"Hybrid Stirilling Engine",* Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University Of Nairobi, Kenya - 2012.

[15]. T.D. Easttop and A. McConkey. *"Fifth impression, Applied Thermodynamics for engineering technologists",* Pearson Education Ltd, India, 2009.

[16]. A. Freddi. "*Course on Design-CeUB Bertinoro".* Diem University of Bologna, Italia – 2006.

[17]. Boothroyd, G., Peter Dewhurst, W.Knight. *"Product design for manufacture and assembly"*. Taylor & Francis Group, Florida – 1994.

[18]. Sheng-Hsien (Gary) Teng dan Shin-Yann (Michael) Ho,*" Failure mode and effect analysis an integrated approach for product design and process control"*, North Carolina A & T State University, Grensborro USA dan Sterling Height USA - 1995.

[19]. G.Pahl and W.Beitz. *"Engineering Design A Systematic Approach".* Spriner-Verlag, London - 1996.

[20]. B. Kongtragool, S. W. "A review of solar-powered Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 7,* 2003.

[21]. Joseph Edward Shigley, Charles R. Mischke. *"Mechanical Engineering Design"*, Fifth Edition, McGraw-Hill Publishing Co, 1989.

[22]. Sularso, Kiyokatsu Suga. "Dasar Perencanaan Dan Pemilihan Elemen Mesin", PT Pradnya Paramita, Jakarta, 1991.