

Perancangan Stirling Engine Type Gamma Kapasitas 17cc Berbahan Bakar Ethanol

Ghuruh Pratama Santoso^a, Ir. Sudarman MT^a, Ir. Herry Suprianto MT^a

^aTeknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang
Jl. Raya Tlogomas No.246, Malang 65144 Indonesia
Phone. (0341) 464318-128 Fax. (0341) 460782
e-mail: Ghuruhsantoso30@gmail.com

Abstract

The Stirling engine is an external combustion engine so that the use of fuel can vary, such as using renewable and non-renewable energy. The working principle of the Stirling engine utilizes pressure and volume differences resulting from temperature differences in a closed system. Stirling engines are known to have several types, namely alpha, beta and gamma types. The design of the Stirling engine type gamma is designed by taking into account several aspects such as system selection, calculation of engine elements and calculations based on Schmidt's theory. This designed Stirling engine consists of several main components such as hot cylinder, cold cylinder, displacer, cooling fins, piston rod, con-rod displacer, power piston cylinder, power piston, con-rod piston, flywheel and main shaft. The Stirling engine type gamma design has a volume displacement capacity of 17cc with a low temperature concentration of 50-300 Celsius, an engine efficiency of 43.6% is obtained with a min-max pressure of 134-236 kpa and a min-max volume of 10-45 cm^3 . Produces an indicator power of 1 watt at 400 rpm motor rotation. In the end, this design produces a Stirling engine specification.

Keywords: Stirling Engine, Gamma, Schmidt Analysis.

Abstrak

Stirling engine merupakan mesin pembakaran luar sehingga dalam penggunaan bahan bakar dapat bermacam-macam seperti menggunakan energi terbarukan dan tidak terbarukan. Prinsip kerja Stirling engine memanfaatkan perbedaan tekanan dan volume akibat dari perbedaan temperatur pada sistem tertutup. Stirling engine dikenal memiliki beberapa tipe yaitu tipe alpha, beta dan gamma. Perancangan Stirling engine tipe gamma didesain dengan memperhitungkan beberapa aspek seperti pemilihan sistem, perhitungan elemen mesin dan perhitungan berdasarkan teori Schmidt. Stirling engine yang dirancang ini terdiri dari beberapa komponen utama seperti hot cylinder, cold cylinder, displacer, cooling fins, piston rod, con-rod displacer, power piston cylinder, power piston, con-rod piston, flywheel dan main shaft. Perancangan Stirling engine tipe gamma ini memiliki kapasitas volume displacement 17cc dengan konsentrasi low temperature 50-300 Celsius diperoleh engine efficiency 43,6 % dengan tekanan min-max 134-236 kpa dan volume min-max 10-45 cm^3 . Menghasilkan daya indikator sebesar 1 watt pada putaran motor 400 rpm. Pada akhirnya dalam perancangan ini menghasilkan berupa spesifikasi Stirling engine.

Kata Kunci : Stirling Engine, Gamma, Analisis Schmidt.

1. Pendahuluan

Energi merupakan kebutuhan terbesar umat manusia, berbagai kegiatan manusia pada saat ini dipermudah dengan adanya teknologi yang dimana sebagian teknologi ini menggunakan energi fosil sebagai sumber bahan bakarnya. Pembakaran fosil sebagai sumber energi menghasilkan polutan yang menyebabkan terjadinya penipisan lapisan ozon, asap, hujan asam, pemanasan global dan perubahan iklim [1]. Penerapan energi terbarukan dalam aspek kehidupan dapat mengurangi dampak pemanasan global dan kerusakan iklim [2]. Teknologi yang memanfaatkan energi terbarukan diperlukan untuk mengurangi dampak dari penggunaan energi fosil salah satunya adalah stirling engine. Stirling engine merupakan mesin pembakaran luar yang memiliki nilai efisiensi yang tinggi, memiliki kemampuan dalam menggunakan berbagai macam sumber panas, operasinya yang tidak berisik, umur engine yang lebih panjang dan karakter mesin yang tidak menimbulkan polusi [3].

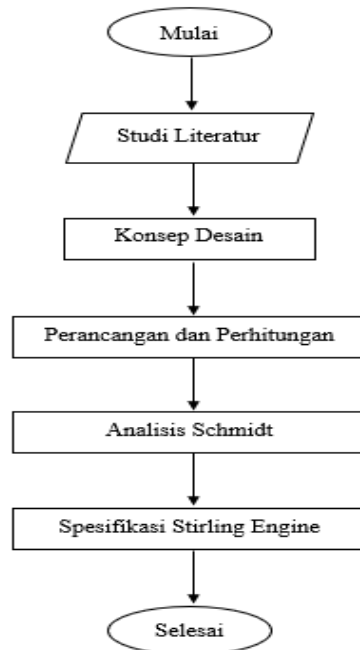
Perkembangan mesin ini tidak begitu pesat dikarenakan ukuran mesin yang cukup besar dengan daya yang dihasilkan sangat kecil. Namun, akibat dampak penggunaan energi fosil terhadap lingkungan pengembangan mesin stirling engine menjadi suatu pilihan kembali. Prinsip kerja stirling engine sendiri memanfaatkan perubahan tekanan dan volume akibat dari perbedaan temperature pada sistem tertutup[4][5]. Panas yang diberikan pada salah satu cylinder menyebabkan udara didalamnya mengembang sehingga piston bergerak mendorong udara ke bagian cylinder yang memiliki temperature yang lebih dingin [6]. Stirling engine terdiri dari beberapa komponen utama seperti hot cylinder, cold cylinder, displacer, cooling fins, piston rod, con-rod displacer, power piston cylinder, power piston, con-rod piston, flywheel dan main shaft. [7] melakukan perancangan stirling engine dengan memanfaatkan energi terbarukan sebagai sumber pembakarannya. Penelitian terhadap mesin stirling juga pernah diterapkan terhadap lingkungan angkatan laut dan pengeboran lepas pantai dengan menggunakan energi terbarukan sebagai sumber panasnya [8].

Perancangan stirling engine harus memperhatikan beberapa aspek penting salah satunya adalah perancangan sistem pendinginan yang baik. Perancangan sistem pendingin yang baik berpengaruh besar terhadap kinerja mesin dari stirling engine. Kinerja terbaik dari stirling engine dapat dicapai dengan penggunaan sirip terhadap sistem pendingin dalam geometri [9].

Berdasarkan alasan dan berbagai referensi diatas maka dilakukan perancangan stirling engine type gamma kapasitas 17cc dengan sistem pendingin menggunakan sirip berbahan bakar ethanol. Hasil dari perancangan ini diharapkan dapat dijadikan bahan referensi dalam pembuatan stirling engine selanjutnya.

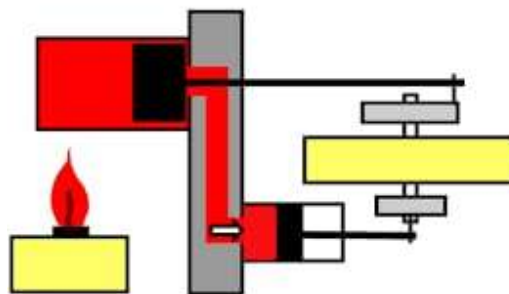
2. Metode Perancangan

Alur (gambar 1) dalam perancangan stirling engine type gamma kapasitas 17cc dapat dilihat pada diagram alir berikut :



Gambar 1. Diagram Allir Stirling Engine Type Gamma

Pada konsep desain stirling engines seperti gambar 2 type gamma dirancang memiliki 2 buah cylinder ekspansi dan kompresi dengan perbandingan volume sebesar 1:2,5. Pada konsep ini cooling fins digunakan sebagai media pendinginan terhadap perbedaan temperature yang terjadi didalam cylinder. Pemilihan material pada tiap-tiap komponen stirling engine disesuaikan berdasarkan dari sifat material itu sendiri terhadap kinerja yang dihasilkan oleh stirling engine. Pemilihan dari konsep desain diharapkan dapat memiliki nilai efficiency engine sebesar 40-50 % mengacu pada efficiency ideal yang dapat diperoleh stirling engine.



Gambar 2. Konsep Desain Stirling Engine

Perancangan komponen dilakukan untuk menganalisa kebutuhan komponen-komponen dalam perancangan stirling engine type gamma ini. Diantara komponen-komponen tersebut adalah sebagai berikut :

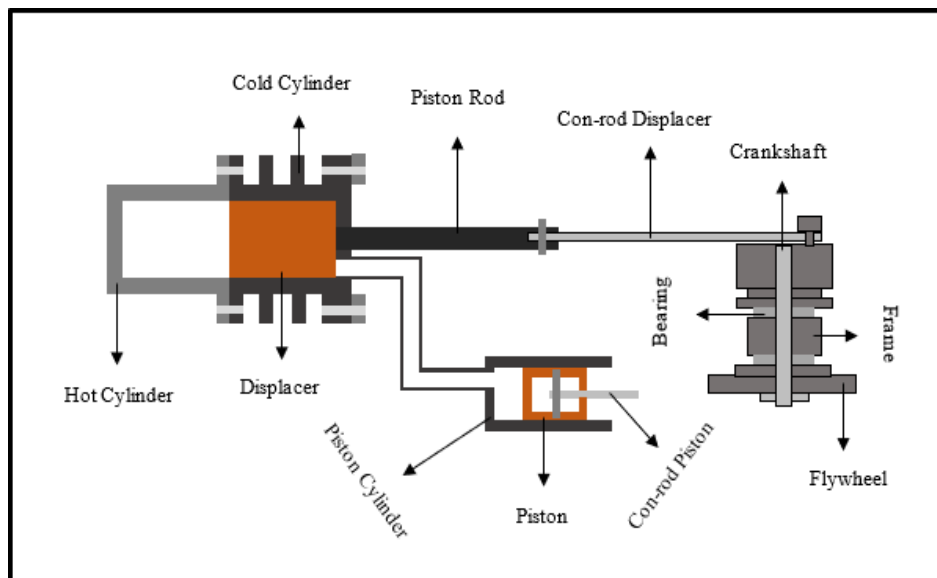
(a) Perancangan hot cylinder. Perancangan hot cylinder merupakan proses perhitungan untuk menentukan ukuran dimesin dari cylinder termasuk panjang, diameter

dan ketebalan. (b). Perancangan cold cylinder. Perancangan cold cylinder merupakan proses perhitungan untuk menentukan ukuran dimesin dari cylinder termasuk panjang, diameter dan ketebalan. (c). Perancangan displacer. Perancangan displacer merupakan proses perhitungan untuk menentukan diameter dan panjang dari piston displacer sehingga ketika stirling engine beroperasi tekanan udara didalam system dapat berpindah dari hot cylinder menuju cold cylinder begitu juga sebaliknya. (d). Perancangan cooling fins. Perancangan cooling fins merupakan proses perhitungan untuk menentukan nilai fins efficiency yang dimiliki cooling fins. (e). Perancangan piston rod. Perancangan piston rod bertujuan untuk menentukan diameter ketebalan dari piston rod berdasarkan material yang akan digunakan sehingga tidak patah ketika stirling engine beroperasi. (f). Perancangan con-rod displacer. Perancangan con rod displacer bertujuan untuk menentukan ketebalan yang dapat menanggung besarnya tekanan yang diterima oleh con-rod agar tidak patah berdasarkan jenis material yang digunakan. (g). Perancangan power piston cylinder. Perancangan power piston cylinder merupakan perhitungan dalam menentukan volume dari cylinder dan diameternya, serta ketebalan minimum yang diijikan. (h). Perancangan power piston. Perancangan power piston bertujuan untuk menentukan diameter dari power piston. (i). Perancangan con-rod power piston. Perancangan con rod power piston untuk menentukan ketebalan yang dapat menanggung besarnya tekanan yang diterima oleh con-rod agar tidak patah berdasarkan jenis material yang digunakan. (j). Perancangan flywheel. Perancangan flywheel merupakan perhitungan dalam menentukan massa yang ideal untuk flywheel agar energi mekanik dapat didistribusikan dengan baik. (k). Perancangan main shaft. Perancangan main shaft bertujuan untuk menentukan diameter yang dapat menanggung beban kerja dari flywheel.

3. Perancangan dan Perhitungan

3.1 Rencana Desain

Berikut rencana desain dari stirling engine type gamma dapat dilihat pada gambar 3



Gambar 3. Rencana Desain Stirling Engine Type Gamma

3.2 Perhitungan Elemen Mesin

3.2.1 Perhitungan termodinamika

Stirling engine dirancang dengan konsentrasi low temperature 50 – 300°C dan tekanan sebesar 100 kpa dengan perbandingan kompresi ideal 1 : 1,5 bermassa 1kg udara. $R = 0,287$ dan $k = 1,4$

$$V_1 = V_4$$

$$V_2 = V_3$$

$$T_1 = T_2$$

$$T_3 = T_4$$

$$V_1 = \frac{m \times R \times T_1}{P_1} \quad (1)$$

Dimana V_1 adalah volume 1, T_1 adalah temperature 1, P_1 adalah tekanan 1, m adalah massa, dan R adalah konstanta gas universal. Kemudian dapat dicari nilai P_2

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \quad (2)$$

Dimana V_1 adalah volume 1, V_2 adalah volume 2, P_1 adalah tekanan 1, P_2 adalah tekanan 2, dan k adalah gas di-atomik. Kemudian dapat dicari nilai V_2

$$V_2 = \frac{m \times R \times T_2}{P_2} \quad (3)$$

Dimana V_2 adalah volume 2, T_2 adalah temperature 2, P_2 adalah tekanan 2, m adalah massa, dan R adalah konstanta gas universal. Kemudian dapat dicari nilai P_3

$$P_3 = \frac{P_2 T_3}{T_2} \quad (4)$$

Dimana T_2 adalah temperature 2, T_3 adalah temperature 3, P_2 adalah tekanan 2, dan P_3 adalah tekanan 3. Kemudian dapat dicari nilai V_3

$$V_3 = \frac{m \times R \times T_3}{P_3} \quad (5)$$

Dimana V_3 adalah volume 3, T_3 adalah temperature 3, P_3 adalah tekanan 3, m adalah massa, dan R adalah konstanta gas universal. Kemudian dapat dicari nilai P_4

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^k \quad (6)$$

Dimana V_3 adalah volume 3, V_4 adalah volume 4, P_3 adalah tekanan 3, P_4 adalah tekanan 4, dan k adalah gas di-atomik. Kemudian dapat dicari nilai V_4

$$V_4 = \frac{m \times R \times T_4}{P_4} \quad (7)$$

Dimana V_4 adalah volume 4, T_4 adalah temperature 4, P_4 adalah tekanan 4, m adalah massa, dan R adalah konstanta gas universal. Setelah ditemukan nilai V_1 , V_2 , V_3 , V_4 kita dapat mencari nilai kerja persiklus W_{12} dan W_{34} .

$$W_{12} = m \times R \times T_{c12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (8)$$

$$W_{34} = m \times R \times T_{h34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (9)$$

Dimana W_{12} adalah kerja daerah 1-2, W_{34} adalah kerja daerah 3-4, T_c adalah temperature kompresi, T_h adalah temperature ekspansi, V_1 adalah volume 1, V_2 adalah

volume 2, V_3 adalah volume 3, V_4 adalah volume 4, m adalah massa, dan R adalah konstanta gas universal. Selanjutnya kita dapat mencari nilai kerja total siklus W .

$$W = W_{12} + W_{34} \quad (10)$$

Dimana W adalah kerja total siklus, W_{12} adalah kerja daerah 1-2, dan W_{34} adalah kerja daerah 3-4. Kemudian kita mencari nilai dari engine efficiency

$$\eta_{th} = \frac{W}{W_{34}} \quad (11)$$

Dimana W adalah kerja total siklus, W_{34} adalah kerja daerah 3-4, dan η_{th} adalah engine efficiency. Kemudian nilai dari engine efficiency didapatkan kita mencari nilai tekanan persiklus

$$P_{23} = \frac{m \times R \times T_h}{V_2} \quad (12)$$

$$P_{41} = \frac{m \times R \times T_c}{V_1} \quad (13)$$

Dimana V_1 adalah volume 1, V_2 adalah volume 2, T_c adalah temperature kompresi, T_h adalah temperature ekspansi, P_{23} adalah tekanan area 2-3, P_{41} adalah tekanan area 4-1, m adalah massa, dan R adalah konstanta gas universal. Kemudian setelah ditemukan tekanan persiklus kita dapat mencari nilai P_m

$$P_m = \frac{P_{23}}{r} (1 + \ln r) - P_{41} \quad (14)$$

Dimana P_m adalah tekanan efektif, P_{23} adalah tekanan area 2-3, P_{41} adalah tekanan area 4-1 dan r adalah rasio kompresi ideal. Setelah didapatkan nilai tekanan efektifnya kita dapat mencari nilai D_e

$$D_e = \frac{P_m \times V_L \times n}{60} \quad (15)$$

Dimana D_e adalah daya efektif, P_m adalah tekanan efektif, n adalah jumlah ratio mesin, dan V_L adalah volume langkah.

3.2.2 Perhitungan volume langkah, ketebalan dan diameter cylinder

Volume langkah dapat ditentukan dengan memasukan persamaan daya efektif. Dimana dilakukan pendekatan nilai panjang langkah sebesar 35 mm.

$$V_L = \frac{D_e \times 60}{P_m \times 400} \quad (16)$$

Dimana D_e adalah daya efektif, P_m adalah tekanan efektif, n adalah jumlah ratio mesin, dan V_L adalah volume langkah. Setelah didapatkan volume langkah stirling engine kita mencari nilai diameter cylinder dengan persamaan :

$$d = \sqrt{\frac{V_L \times 4}{\pi \times L}} \quad (17)$$

Dimana d adalah diameter cylinder, L adalah panjang langkah, dan V_L adalah volume langkah. Kemudian kita mencari tekanan internal cylinder dengan persamaan :

$$P_i = \frac{\text{kerja persiklus}}{\text{volume displacement}} \quad (18)$$

Dimana P_i adalah tekanan internal, setelah ditemukan kita dapat mencari nilai dari ketebalan cylinder dengan persamaan :

$$t_m = \frac{P_i \times r \times n_s}{s_y} \quad (19)$$

Dimana t_m adalah tebal cylinder, P_i adalah tekanan internal, r adalah jari-jari cylinder, s_y adalah yield strength dan n_s adalah safety factor.

3.2.3 Perhitungan panjang cylinder dan diameter displacer

Berdasarkan perhitungan sebelumnya diketahui panjang langkah sebesar 35 mm, dengan mengacu kepada referensi power and speed. Maka dapat ditentukan height piston dengan menggunakan persamaan :

$$h.piston = \frac{2}{3} stroke \quad (20)$$

Dimana $h.piston$ adalah panjang displacer, $stroke$ adalah panjang langkah $TMB - TMA$. Kemudian kita mencari panjang cylinder displacer

$$L.cyli displacer = stroke + h.piston \quad (21)$$

Dimana $L.cyli displacer$ adalah panjang total cylinder displacer, $h.piston$ adalah panjang displacer, dan $stroke$ adalah panjang langkah $TMB - TMA$. Kemudian kita mencari diameter displacer persamaan :

$$\emptyset displacer = \emptyset silinder - 2 x clearance \quad (22)$$

Dimana $\emptyset displacer$ adalah diameter displacer, $\emptyset silinder$ adalah diameter cylinder displacer, dan $clearance$ adalah celah antara displacer dengan cylinder.

3.2.4 Perhitungan cooling fins

Cylinder displacer dirancang dengan panjang 60 mm memiliki suhu 300°C dan suhu ruangan 30°C dengan kecepatan udara 2 m/s. Kita dapat mencari nilai koefisien perpindahan panas konveksinya dengan persamaan :

$$h = 0,664 x \frac{k}{L} Re_L^{0,5} Pr^{0,333} \quad (23)$$

Dimana h adalah nilai koefisien perpindahan panas konveksi, k adalah thermal conductivity, L adalah panjang cylinder displacer, Re adalah bilangan reynold dan Pr adalah bilangan prandtl. Dalam mencari nilai bilangan reynold udara kita menggunakan persamaan :

$$Re = v.L/\mu \quad (24)$$

Dimana Re adalah bilangan reynold, v adalah kecepatan udara, L adalah panjang cylinder displacer dan μ adalah koefisien viscosity. Setelah ditemukan nilai Re dan h kita dapat mencari luas area perpindahan panas pada cooling fins dengan parameter h : 22,06208169 W/m²C, T_b : 300°C, T_∞ : 30°C, D_1 : 31 mm, D_2 : 45 mm, L : 30 mm, t : 1 mm, s : 1 mm, k : 222 W/m C maka :

$$A_{nofin} = \pi D_1 L \quad (25)$$

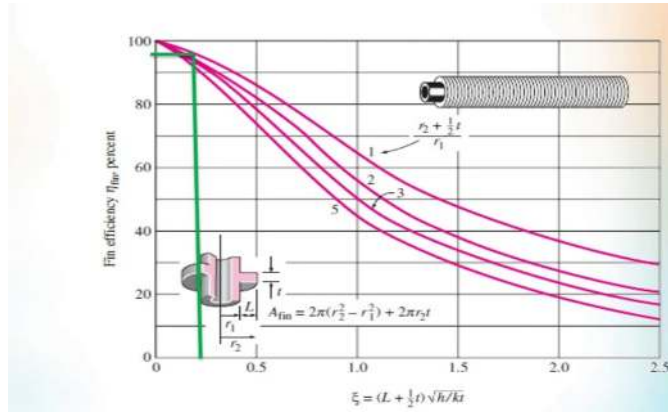
Dimana A_{nofin} adalah luas area tanpa fin, D_1 adalah diameter dalam fins, dan L adalah panjang cooling fins. Setelah itu kita mencari nilai perpindahan panas tanpa fins dengan persamaan :

$$Q_{nofin} = h A_{nofin} (T_b - T_\infty) \quad (26)$$

Dimana Q_{nofin} adalah nilai perpindahan panas tanpa fin, h adalah koefisien perpindahan panas konveksi, A_{nofin} adalah luas area tanpa fin, T_b adalah temperature cylinder, dan T_∞ adalah temperature ruangan. Setelah mendapat nilai kerja area tanpa fins kita mencari lebar dari fins dengan persamaan :

$$L = \frac{1}{2}(D_2 - D_1) \quad (27)$$

Dimana L adalah lebar fins, D_1 adalah diameter dalam fins, dan D_2 adalah diameter luar fins. Kemudian kita mencari nilai fins efficiency percent berdasarkan persamaan pada gambar 4 :



Gambar 4. Fin efficiency percent

$$\left(L + \frac{1}{2}t\right) \sqrt{\frac{h}{kt}} \quad (28)$$

Dimana L adalah lebar fins, t adalah tebal fins, h adalah nilai koefisien perpindahan panas konveksi, dan k adalah nilai konduktivitas thermal material. Kemudian kita mencari luas area fins dengan persamaan :

$$A_{fin} = 2\pi(r_2^2 - r_1^2) + 2\pi r_2 t \quad (29)$$

Dimana A_{fin} adalah luas fins, r_1 adalah jari-jari dalam fins, r_2 adalah jari-jari luar fins, dan t adalah tebal fins. Kemudian kita mencari nilai perpindahan panas fins persamaan :

$$Q_{fin} = 0,95 h A_{fin} (T_b - T_\infty) \quad (30)$$

Dimana Q_{fin} adalah nilai perpindahan panas fins, h adalah koefisien perpindahan panas konveksi, A_{fin} adalah luas area fin, T_b adalah temperature cylinder, dan T_∞ adalah temperature ruangan. Setelah mendapat nilai perpindahan panas fins kita mencari luas area perpindahan panas yang tidak mengenai fins dengan persamaan :

$$A_{unfin} = \pi D_1 s \quad (31)$$

Dimana A_{unfin} adalah luas area tidak mengenai fins, D_1 adalah diameter dalam fins, dan s adalah jarak antar fins. Kemudian kita mencari nilai perpindahan panas tidak mengenai fins persamaan :

$$Q_{unfin} = h A_{unfin} (T_b - T_\infty) \quad (32)$$

Dimana Q_{unfin} adalah nilai perpindahan panas fins tidak mengenai fins, h adalah koefisien perpindahan panas konveksi, A_{unfin} adalah luas area tidak mengenai fins, T_b adalah temperature cylinder, dan T_∞ adalah temperature ruangan. Setelah mendapat

nilai perpindahan panas yang tidak mengenai fins. Selanjutnya kita mencari total heat transfer dengan parameter panjang cooling fins 30 mm terdapat 14 fins. Maka total heat transfer dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q_{total} = n(Q_{fin} + Q_{unfin}) \quad (33)$$

Dimana Q_{total} adalah total heat transfer, n adalah jumlah fins, Q_{fin} adalah nilai perpindahan panas fins, dan Q_{unfin} adalah nilai perpindahan panas yang tidak mengenai fins. Setelah itu kita dapat mencari nilai $\varepsilon_{fin,overall}$ berdasarkan skala 1-10 dengan persamaan :

$$\varepsilon_{fin,overall} = \frac{Q_{total}}{Q_{nofin}} \quad (34)$$

Maka dengan demikian didapatkan nilai $\varepsilon_{fin,overall}$ untuk menunjukkan seberapa baik desain dari cooling fins dengan skala 1-10.

3.2.5 Perhitungan volume ekspansi, jari-jari, kecepatan rotasi dan ketebalan cylinder power piston

Volume ekspansi power piston dapat dicari dengan persamaan :

$$V_{exp} = \frac{\text{Swept volume}}{2,5} \quad (35)$$

Kemudian setelah diketahui nilai V_{exp} kita dapat mencari jari-jari cylinder dengan persamaan:

$$r = \sqrt{\frac{V_{exp}}{\pi L}} \quad (36)$$

Setelah diketahui jari-jari cylinder kita dapat mencari nilai kerja indikasinya dengan menggunakan persamaan :

$$W_o = (1 - (rt))(rv) \frac{\ln(rv)}{(rt)(1,75-1)} \quad (37)$$

Dimana W_o adalah kerja indikasi, rt adalah rasio temperature, dan rv adalah rasio volume. Dengan ditemukannya nilai kerja indikasi kita dapat mencari kecepatan rotasi dengan menggunakan rumus persamaan baele :

$$R = \frac{W_o \times 60}{0,11 \times P_i \times \text{Sweap volume}} \quad (38)$$

Setelah itu ketebalan cylinder power piston dapat dicari dengan persamaan :

$$t_m = \frac{p_i \times r \times n_s}{s_y}$$

3.2.6 Perhitungan piston rod dan connecting rod

Piston rod displacer berbahan Al 1100 panjang 65 mm dapat dicari ketebalan minimum dengan persamaan :

$$t_{pr} = \frac{p_i \times L \times n_s}{s_y} \quad (39)$$

Kemudian Connecting Rod berbahan Al 6061 panjang 91,5 mm dapat dicari ketebalan minimum dengan persamaan :

$$t_{cr} = \frac{p_i \times L \times n_s}{s_y} \quad (40)$$

3.2.7 Perhitungan crankpin

Ketebalan crankpin dapat dicari dengan persamaan :

$$t_m = P_i \times t_{cr} \quad (41)$$

3.2.8 Perhitungan flywheel

Flywheel dibutuhkan untuk menyimpan energi dan mengasihkan rotasi yang lembut untuk piston didalam cylinder. Maka perlu dicari massa ideal dari flywheel dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Energy stored} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (42)$$

$\omega =$ radiant angle persamaan baele

Energy stored = kerja indikasi

Dimana:

$I(\text{Momen inersia}) = \text{massa} \times r^2$

$$I = \frac{2 \times \text{Energy stored}}{\omega^2}$$

Kemudian :

$$\text{massa} = \frac{I}{r^2}$$

Maka didapatkan massa ideal dari flywheel untuk menghasilkan transfer energi yang baik.

3.2.9 Perhitungan mainshaft

Poros direncanakan mampu menghasilkan 15,34 watt pada 205,5 rpm menggunakan carbon steel S45C dari JISG 4102 dengan kekuatan tarik sebesar 58 kg/mm^2 , maka tegangan geser ijin $\tau_a = \frac{58}{12} \approx 4,83 \text{ kg/mm}^2$. Sehingga dapat dicari diameter shaft berdasarkan momen torsi :

$$T = 9,74 \times 10^5 \frac{P_d}{n_1} \quad (43)$$

Dimana T momen torsi, n_1 adalah kecepatan rotasi, dan P_d adalah kerja indikasi. Kemudian kita dapat mencari besarnya gaya yang terjadi pada flywheel dengan persamaan :

$$F = P_i \times A \quad (44)$$

Dimana F adalah gaya flywheel, P_i adalah tekanan internal, dan A adalah luas alas crankpin. Setelah itu kita mencari nilai momen lentur maksimal dengan persamaan :

$$M = V_b \times s \quad (45)$$

Dimana nilai V_b dapat dicari dengan persamaan :

$$V_b = \frac{(F \times s_{ab}) - (\text{Massa flywheel} \times s)}{s}$$

Setelah didapatkan nilai momen lenturnya poros menerima beban torsi dengan menggunakan material carbon steel S45C dari JISG 4102 memiliki faktor koreksi $K_t = 1,5$ dan $C_b = 2,0$ maka untuk mencari nilai diameter mainshaft dapat digunakan persamaan :

$$d_s = \left[\frac{5,1}{\tau_a} \times \sqrt{(K_t \times M)^2 + (C_b \times T)^2} \right]^{1/3} \quad (46)$$

3.3 Hasil Perhitungan Elemen Mesin

Tabel 1. Hasil Perhitungan Elemen mesin [Data Pribadi]

No	Simbol	Satuan
1	V_1	$0,92701 \text{ m}^3$
2	P_1	100 kpa
3	V_2	$0,525480616 \text{ m}^3$
4	P_2	$176,4118354 \text{ kpa}$
5	V_3	$0,525480616 \text{ m}^3$
6	P_3	$312,9535037 \text{ kpa}$
7	V_4	$0,92701 \text{ m}^3$
8	P_4	$177,3993627 \text{ kpa}$
9	W_{12}	$-52,62182 \text{ joule}$
10	W_{34}	$93,35078285 \text{ joule}$
11	W	$40,72896285 \text{ joule}$
12	η_{th}	$43,63001745$
13	P_{23}	$0,312953504 \text{ Mpa}$
14	P_{41}	$0,1 \text{ Mpa}$
15	P_m	$179092,666 \text{ N/m}^2$
16	D_e	$20,50238 \text{ watt}$
17	V_L	$17,17 \text{ cm}^3$
18	d	25 mm
19	$h. \text{ piston}$	25 mm
20	$L. \text{ Cyln displacer}$	60 mm
21	$\emptyset \text{ Displacer}$	$24,5 \text{ mm}$
22	P_i	$2,372100341 \text{ Mpa}$
23	t_m	$0,943448999 \text{ mm}$
24	h	$22,06208169 \text{ W/m}^2 \text{ C}$
25	R_e	$3693,444137$
26	A_{nofin}	$0,0029202 \text{ m}^2$
27	Q_{nofin}	$17,39493656 \text{ watt}$
28	L	$0,007 \text{ m}$
29	A_{fin}	$0,001670494 \text{ m}^2$
30	Q_{fin}	$9,950735274 \text{ watt}$
31	A_{unfin}	$0,00009734 \text{ m}^2$
32	Q_{unfin}	$0,579831219 \text{ watt}$
33	Q_{total}	$147,4279309 \text{ watt}$
34	$Q_{increase}$	$130,0329943 \text{ watt}$
35	$\varepsilon_{fin. overall}$	$7,475335932$
36	V_{epp}	$6,868 \text{ cm}^3$
37	r	$7,905262527 \text{ mm}$
38	W_o	$15,34510985 \text{ watt}$
39	R	$205,5063358 \text{ rpm}$

40	t_m	0,056495825
41	t_{pr}	4,905934796
42	t_{cr}	2,752409907
43	t_{cr}	2,316235659
44	t_m	7,11 mm
45	I	0,000726735 kgm ²
46	massa	807 gram
47	T	72,73059364 kg. mm
48	F	71,5 kg
49	V_b	142,30 kg
50	M	1992,316 kg. mm
51	d_s	14,673793855034 mm

Tabel 1 diatas merupakan data dari hasil perhitungan termodinamika pada stirling engine

3.4 Perhitungan Analisis Schmidt

Volume as a function of the crank angle

Panjang Langkah dari dua cylinder memiliki harga yang sama yaitu :

$$h = 35 \text{ mm}$$

displacer dan piston memiliki diameter :

$$D_E = 25 \text{ mm}$$

$$D_C = 16 \text{ mm}$$

Maka, menggunakan data diatas volume Langkah dan dead volume dapat kita turunkan dengan menggunakan persamaan :

$$V_{SE} = \frac{\pi}{4} \times D_E^2 \times h \quad (47)$$

$$V_{SC} = \frac{\pi}{4} \times D_C^2 \times h \quad (48)$$

$$V_{DE} = \frac{\pi}{4} \times D_E^2 \times h \quad (49)$$

$$V_{DC} = \frac{\pi}{4} \times D_C^2 \times h \quad (50)$$

Tabel 2. Parameter Stirling Engine [Data Pribadi]

No	Simbol	Satuan
1	V_{SE}	17,171875 cm ³
2	V_{DE}	4,90625 cm ³
3	D_E	25 mm
4	L_E	35 mm
5	V_{SC}	7,0336 cm ³
6	V_{DC}	1,907059375 cm ³
7	D_C	16 mm
8	L_C	35 mm
9	dx	90
10	P_{mean}	179,092666 kpa
11	R	286 kJ/kg.k

Tabel 2 di atas merupakan hasil dari data dan Langkah Langkah di atas sehingga di hasil kan tabel 2.

3.4.1 Perhitungan volume kerja stirling engine

Perhitungan volume kerja (x) dimana nilai (x) = $0 - 360^\circ$ dengan kelipatan sudut 30° . Maka dapat dicari kelipatan volume kerja stirling engine dengan persamaan :

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + V_{DE} \quad (51)$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2} \{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC} \quad (52)$$

$$V = V_E + V_C \quad (53)$$

Dimana V_E adalah nilai volume ekspansi, V_C adalah nilai volume kompresi, dan V adalah nilai volume total sesaat.

3.4.2 Perhitungan tekanan, energi, dan daya yang dihasilkan mesin stirling

Rasio temperature stirling engine berdasarkan analisis schmidt dapat dicari dengan persamaan :

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (54)$$

Rasio temperature stirling engine berdasarkan analisis schmidt dapat dicari dengan persamaan :

$$V = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (55)$$

Rasio volume mati ekspansi stirling engine berdasarkan analisis schmidt dapat dicari dengan persamaan :

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (56)$$

Rasio volume mati kompresi stirling engine berdasarkan analisis schmidt dapat dicari dengan persamaan :

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (57)$$

Nilai a dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1} \quad (58)$$

Nilai S dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + 2X_{DC} + 1 \quad (59)$$

Nilai B dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad (60)$$

Nilai c dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$c = \frac{B}{S} \quad (61)$$

Perhitungan tekanan stirling engine (x) dimana nilai (x) = $0 - 360^\circ$ dengan kelipatan sudut 30° . Maka dapat dicari kelipatan tekanan stirling engine dengan persamaan :

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1-c^2}}{1-c \cdot \cos(x-a)} \quad (62)$$

Kemudian nilai indikator energi daerah ekspansi dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$W_E = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c \sin a}{1 + \sqrt{1-c^2}} \quad (63)$$

Selanjutnya nilai indikator energi daerah kompresi dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$W_C = - \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c t \sin a}{1 + \sqrt{1-c^2}} \quad (64)$$

Nilai energi total siklus dapat dicari dengan persamaan :

$$W_i = W_E + W_C \quad (65)$$

Dengan diketahui energi total siklus yang dihasilkan maka dapat diketahui daya indikator yang dapat dihasilkan stirling engine dengan menggunakan persamaan :

$$L_i = W_i \frac{n}{60} \quad (66)$$

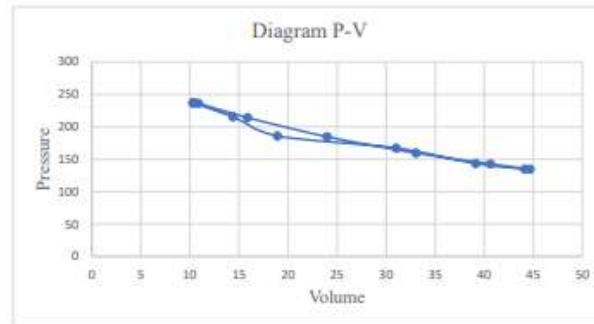
Tabel 3. Hasil Perhitungan Energi dan Daya [Data Pribadi]

No	Simbol	Satuan
1	t	0,563699825
2	V	0,4096
3	X_{DE}	0,285714286
4	X_{DC}	0,111057143
5	a	14,35°
6	S	2,107928297
7	B	0,59843964
8	c	0,283899429
9	W_E	0,346870182 Joule
10	W_C	-0,195530661 Joule
11	W_i	0,151339521 Joule
12	L_i	1,008930142 watt

Tabel 4. Perbandingan Tekanan dan volume [Data Pribadi]

θ	Volume (V)	Tekanan (P)
0	10,33010938 cm^3	236,8739469 kpa
30	10,87230439 cm^3	236,3304728 kpa
60	15,87040873 cm^3	214,2414281 kpa
90	23,98518438 cm^3	184,7212584 kpa
120	33,04228373 cm^3	159,5078568 kpa
150	40,61486436 cm^3	142,7448608 kpa
180	44,67385938 cm^3	134,6808724 kpa
210	44,13166436 cm^3	134,8572007 kpa
240	39,13356002 cm^3	143,2873599 kpa
270	31,01878438 cm^3	167,3195716 kpa
300	18,91604688 cm^3	185,9658864 kpa
330	14,38910439 cm^3	215,4657974 kpa
360	10,33010938 cm^3	236,8739469 kpa

Tabel 3 ,merupakan data hasil dari perhitungan energi dan daya pada stirling engine, sedangkan pada tabel 4 berisi data perbandingan tekanan dan volume pada stirling engine.



Gambar 5. Diagram P-V [Data pribadi]

Diagram P-V pada gambar 5 merupakan gambaran sebuah gravik 2 dimensi antara tekanan dan volume pada stirling engine

4. Kesimpulan

Berikut kesimpulan yang didapat dari perancangan stirling engine type gamma kapasitas 17cc berbahan bakar ethanol :

A. Spesifikasi Stirling Engine

Kapasitas engine : 17cc
Engine efficiency : 43,6 %
Pressure min-max : 134 - 236 kpa
Volume min-max : 10 – 45 cm³
Daya : 1 watt

B. Spesifikasi Part Komponen

1. Hot Cylinder

Diameter luar :27mm
Diameter dalam :25mm
Panjang :40mm
Jumlah :1
Bahan :Aluminium 1100

2. Cold Cylinder

Diameter luar :29mm
Diameter dalam :25mm
Panjang :33mm
Jumlah :1
Bahan :VCI 140

3. Displacer

Diameter :24,5mm
Panjang :25mm
Jumlah :1
Bahan :Aluminium 1100

4. Cooling Fins

Diameter luar :45mm
Diameter dalam :29mm
Panjang :33mm

Jumlah fins :13
Bahan :Aluminium 1100

5. Piston Rod Displacer

Diameter :6mm
Panjang :75mm
Jumlah :1
Bahan :Aluminium 1100

6. Con-rod Displacer

Panjang :91,5mm
Tebal :3mm
Jumlah :1
Bahan :Aluminium 6061

7. Power Piston Cylinder

Diameter luar :18mm
Diameter dalam :16mm
Panjang :45mm
Jumlah :1
Bahan :VCL 140

8. Power Piston

Diameter :16mm
Panjang :15mm
Jumlah :1
Bahan :Brass

9. Con-rod Power Piston

Panjang :77mm
Tebal :3mm
Jumlah :1
Bahan :Aluminium 6061

10. Flywheel

Diameter :60mm
Massa :807gram
Jumlah :1
Bahan :Steel

11. Main Shaft

Diameter :15mm
Jumlah :1
Bahan :Carbon Steel S45C

Daftar Pustaka

- [1] I. M. Astra, "Energi Dan Dampaknya Terhadap Lingkungan," *J. Meteorol. dan Geofis.*, vol. 11, no. 2, pp. 127–135, 2010, doi: 10.31172/jmg.v11i2.72.
- [2] A. Haryanto, "Energi Terbarukan." *Innosain*, 2017.
- [3] W. R. Martini, "Stirling engine design manual," 1983.
- [4] G. Walker, "Stirling engines," 1980.

- [5] I. Urieli and D. M. Berchowitz, "Stirling cycle engine analysis," 1984.
- [6] C. M. Hargreaves, "The Phillips stirling engine," 1991.
- [7] S. Dawi, M. M. Othman, I. Musirin, A. A. M. Kamaruzaman, A. M. Arriffin, and N. A. Salim, "Gamma Stirling engine for a small design of renewable resource model," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 350–359, 2017.
- [8] A. Yerbury, A. Coote, V. Garaniya, and H. Yu, "Design of a solar Stirling engine for marine and offshore applications," *Int. J. Renew. Energy Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–45, 2016.
- [9] M. K. Mahek and K. M. Al-Arife, "Heat Transfer Enhancement in Stirling Engines Using Fins with Different Configurations," in *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 2022, pp. 1–6.