

RANCANG BANGUN DAN PENGUJIAN PROTOTIPE MESIN STIRLING TIPE ALPHA

MUHAMMAD SAING EUREPLEY¹
SIGIT HERNOWO²
YOLANDA J. LEWERISSA³

^{1,2,3}Politeknik Saint Paul Sorong

Email : asigit_hernowo@yahoo.com ; ruselloanz@yahoo.co.id

ABSTRAK

Krisis energi telah menjadikan mesin Stirling salah satu pilihan lagi, karena fleksibel terhadap bahan bakar. Mesin Stirling dapat memanfaatkan panas dari berbagai bahan bakar, termasuk biomassa, biogas, dan energi surya. Langkah pertama dalam membangun prototipe mesin Stirling adalah melakukan perhitungan berdasarkan teori Schmidt. Dari hasil perhitungan didapatkan Temperatur panas sebesar 245 °C atau 519 K, temperatur dingin sebesar 44 °C atau 317 K, sudut antara silinder panas dan dingin sebesar 90°, diameter piston ekspansi sebesar 15 mm, Panjang langkah piston ekspansi sebesar 20,06 mm, diameter piston kompresi sebesar 13 mm, Panjang langkah piston kompresi sebesar 20,06 mm, volume sisa pada piston kompresi sebesar $2,521 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ dan volume sisa pada piston ekspansi sebesar $5,299 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

Hasil dari pembuatan prototipe mesin Stirling dan dilakukan pengujian, mesin Stirling mampu berputar maksimal 250 rpm tanpa beban. Mesin mampu berputar selama sumber panas yang di berikan pada silinder sisi panas masih menyala. Hasil pengujian mesin dapat berputar selama 5 menit.

Kata kunci: Energi alternatif, teori Schmidt, mesin stirling.

ABSTRACT

The energy crisis has made the Stirling engine one of the more options, as it is flexible to fuel. Stirling engines can utilize heat from a variety of fuels, including biomass, biogas, and solar energy. The first step in building the prototype of the Stirling engine was to perform calculations based on Schmidt's theory. From the calculation results obtained Temperature of 245 °C or 519 K, temperature of cold to be 44 °C or 317 K, angle between hot and cold cylinders by 90°, in the piston diameter expansion by 15 mm, Length expansion piston stroke of 20.06 mm, diameter compression piston of 13 mm, Compression piston stroke length of 20.06 mm, residual volume on compression piston of 20.06 mm, residual volume on compression piston of and residual volume on expansion piston $2,521 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ of $5,299 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

As a result of prototyping the Stirling engine and testing, the Stirling engine is able to rotate a maximum of 250 rpm without load. The engine is able to rotate as long as the heat source given to the hot side cylinder is still on. The test results of the machine can rotate for 5 minutes.

Keywords : Alternative energy, Schmidt theory, stirling engines.

PENDAHULUAN

Pada saat ini perkembangan motor bakar menuju ke arah motor bakar yang ramah lingkungan yang menekankan pada pemakaian biaya yang lebih rendah. Hal ini disebabkan karena semakin menipisnya persediaan bahan bakar fosil yang tersedia di dunia. Berdasarkan pemikiran tersebut, dilakukanlah pengembangan sebuah motor bakar yang menggunakan bahan bakar yang relatif tidak membahayakan lingkungan. Untuk mendapatkan hasil tersebut

dibuatlah sebuah motor bakar berupa motor Stirling. Mesin stirling ini mampu bekerja jika mendapatkan panas dari termal surya. Sistem kerjanya adalah dengan memanfaatkan panas dari pembakaran untuk mengembangkan udara didalam silinder mesin, sehingga timbulah tekanan pada power piston untuk menggerakkan poros dengan dibantu oleh roda gila yang menyebabkan terjadinya putaran. Dalam hal ini mesin stirling mempunyai potensi untuk mengurangi penggunaan bahan bakar minyak, serta menggantikan sistem engine yang saat ini

dinilai kurang efisien dan menyebabkan polusi udara yang dapat memicu pemanasan global. Selain itu mesin stirling juga dapat digunakan sebagai pembangkit listrik, dengan memanfaatkan putaran yang dihasilkan untuk memutar generator. Tetapi masih banyak ditemukan yang belum mengetahui tentang mesin stirling. Padahal jika dikembangkan dan dilakukan penelitian lebih lanjut, mesin stirling dapat berguna sebagai penggerak kendaraan maupun pembangkit listrik. Mesin stirling merupakan jenis mesin pembakaran luar dengan siklus tertutup yang mengubah energi panas menjadi energi gerak dengan menggunakan udara atau gas sebagai fluida kerjanya. Energi panas bisa didapatkan dari matahari atau apapun yang bisa dibakar dan bisa menghasilkan panas, misalnya lilin, kayu, kertas bahkan bisa juga memanfaatkan sampah untuk mendapatkan energi panas yang dibutuhkan.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah Analisis mesin strilling menggunakan teori Schmidt.

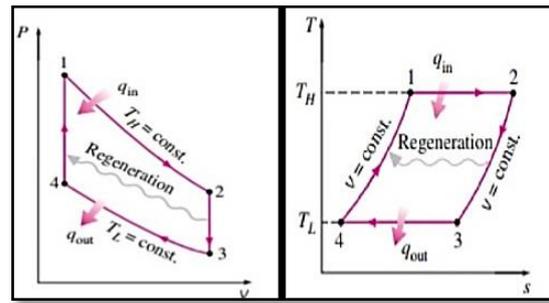
KAJIAN PUSTAKA

Mesin Stirling

Stirling adalah mesin kalor yang mengambil kalor dari luar silinder kerjanya. Sumber kalor apapun, selama temperaturnya cukup tinggi, akan bisa menggerakkan motor stirling ini. Mesin stirling juga dikenal sebagai mesin pembakaran luar, proses kerjanya seperti motor bakar pembakaran dalam. (Iqbal Al-Fikri, t.t.)

Siklus Stirling

Siklus *Stirling engine* ideal terdiri dari 4 (empat) proses yang dikombinasikan menjadi sebuah siklus tertutup, yaitu: dua proses *isothermal* dan dua proses *isochorik*. Proses-proses tersebut ditunjukkan pada diagram tekanan-volume (P-V) dan diagram temperatur-entropi (T-s). Luas area didalam diagram siklus *stirling* tersebut adalah kerja indikator yang dihasilkan dari siklus tersebut. Kerja dihasilkan oleh siklus hanya dihasilkan dari proses *isothermalnya* saja. Untuk memfasilitasi kontinuitas kerja dari dan menuju sistem, sebuah *Flywheel* harus diintegrasikan dalam rancangan *Stirling engine*. *Flywheel* berguna sebagai *storag e device* untuk energi. Dalam siklus ini, panas harus ditransmisikan dalam seluruh prosesnya.



Gambar 1. Siklus Stirling

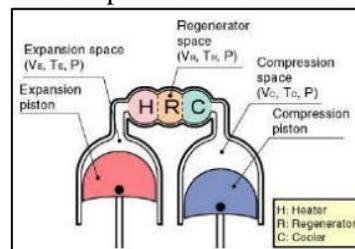
Kerja yang dihasilkan dari siklus *stirling* tertutup ideal direpresentasikan oleh luas area 1-2-3-4 pada diagram P-V. Dari Hukum Pertama Termodinamika, kerja *output* harus sama dengan panas *input* yang direpresentasikan pada area 1-2-3-4 di diagram T-S. Regenerator dapat digunakan untuk mengambil panas dari fluida kerja di proses 4-1 dan mengembalikan lagi panas dalam proses 2-3. Siklus *Carnot* memperlihatkan efisiensi teoritik dari sebuah siklus termodinamika. (Prasetyo Eko 2019)

Jenis-jenis Mesin Stirling

Jenis-jenis mesin stirling berdasarkan memindahkan panas adalah : (Hirata, t.t.)

1. Alpha Stirling

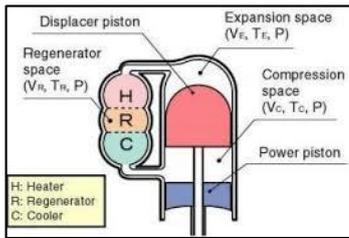
Mesin stirling alpha berisi kekuatan dua piston dalam silinder yang terpisah, satu berada didingin dan satunya berada dipanas. Silinder panas terletak di dalam suhu tinggi penghantar panas (silinder yang dibakar) dan silinder dingin terletak di dalam displacer suhu rendah.



Gambar 2. Mesin Stirling Tipe Alpha

2. Beta Stirling

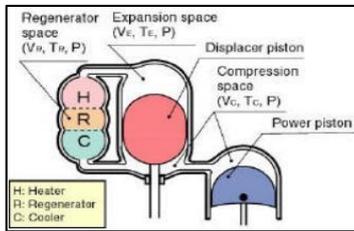
Mesin stirling beta memiliki piston daya tunggal yang diatur dalam silinder yang sama pada poros yang sama sebagai displacer piston. Silinder piston displacer yang cukup longgar hanya berfungsi untuk antar jemput gas panas dari silinder panas ke silinder dingin.



Gambar 3. Mesin Stirling Tipe Beta

3. Gamma Stirling

Mesin Stirling gamma hanyalah sebuah mesin Stirling beta, di mana piston tenaga sudah terpasang di dalam silinder yang terpisah samping silinder piston displacer, tapi masih terhubung ke roda gila sama. Gas dalam dua silinder dapat mengalir bebas karena mereka berada dalam satu tubuh.



Gambar 4. Mesin Stirling Tipe Gamma

Teori Schmidt

Dalam proses pembuatan sebuah prototipe mesin Stirling, dibutuhkan proses perancangan. Proses perancangan tersebut meliputi proses perhitungan termodinamika, salah satu teori yang sering dipergunakan sebagai pendekatan model termodinamika mesin Stirling adalah teori Schmidt yang pertama kali diperkenalkan oleh Gustav Schmidt pada 1871. (Hirata, t.t.)

Banyak pengembangan mengenai teori Schmidt, diantaranya pengembangan yang dilakukan oleh Koichi Hirata. Teori Schmidt yang digunakan dalam penelitian ini merupakan teori Schmidt yang dipublikasikan oleh Koichi Hirata, seorang ilmuwan asal Jepang. Teori Schmidt adalah salah satu metode perhitungan isothermal untuk mesin Stirling. Teori ini merupakan teori yang paling sederhana dan sangat berguna untuk pengembangan mesin Stirling. Teori ini berdasarkan pada ekspansi isothermal dan kompresi dari gas ideal.

Persamaan Perhitungan Volume dan Massa Udara

Volume dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$V = \pi \times r^2 \times S \tag{1}$$

di mana r adalah diameter piston dalam satuan meter (m) dan S adalah panjang langkah dalam satuan meter (m).

Persamaan ini digunakan untuk menghitung masing-masing volume langkah pada piston ekspansi (V_{SE}), volume langkah pada piston kompresi (V_{SC}), volume langkah pada regenerator (V_R), volume sisa pada piston ekspansi (V_{DE}), volume langkah sisa pada piston kompresi (V_{DC}) volume piston (V_{piston}) dan volume displacer ($V_{displacer}$). (Satria dkk. 2020)

Rasio volume langkah dihitung dengan persamaan :

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \tag{2}$$

di mana VSC adalah volume langkah pada piston kompresi dan VSE adalah volume langkah pada piston ekspansi.

Massa udara yang diperlukan sebagai fluida kerja dihitung dengan persamaan : (Satria dkk. 2020)

$$PV = mRT \rightarrow m = \frac{PV}{RT} \tag{3}$$

di mana T adalah temperatur suhu lingkungan, R adalah konstanta gas udara, V adalah volume total dan P adalah tekanan udara luar. Volume total diperoleh dari persamaan : (Ritonga dkk. 2019)

$$V = V_{SE} + V_{SC} + V_R + V_{DE} + V_{DC} - V_{piston} - V_{displacer} \tag{4}$$

Volume ekspansi sesaat (VE) dan volume kompresi sesaat (VD) masing-masing dihitung dengan persamaan :

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos x) + V_{DE} \tag{5}$$

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} [1 - \cos(x - dx)] + V_{DC} \tag{6}$$

di mana sudut x adalah sudut engkol yang divariasikan dari 0° – 360° dan sudut dx adalah sudut fase sebesar 90°.

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang dipergunakan sebagai pendekatan model termodinamika untuk menganalisa performa mesin stirling tipe alpha inovasi desain berbasis biomassa ini adalah menggunakan metode Schmidt. Metode Schmidt

yang dipergunakan dalam penelitian ini merupakan teori Schmidt yang dipublikasikan oleh Koichi Hirata, seorang ilmuwan asal Jepang. Metode Schmidt adalah salah satu metode perhitungan isothermal untuk mesin stirling yang berdasarkan pada ekspansi isothermal dan kompresi dari gas ideal [11]

Proses perancangan konstruksi mesin stirling. meliputi, identifikasi gambar kerja, persiapan alat dan bahan serta persiapan mesin maupun perkakas tangan yg nantinya akan di gunakan dalam proses pembuatan dari masing-masing komponen mesin stirling.



Gambar 5. Model Mesin Stirling Tipe Alpha

Proses pembuatan merupakan langkah yang paling utama karena pada proses ini akan dibuat bagian bagian mesin stirling yang sesuai dengan gambar kerja dengan menggunakan mesin tertentu dan peralatan tertentu dimana bahan yang digunakan telah disiapkan terlebih dahulu. Setelah semua alat dan bahan pembuatan lengkap, tahap selanjutnya adalah membuat komponen-komponen mesin stirling sesuai dengan desain yang telah direncanakan.

Setelah rancang bangun alat selesai, dilakukan pengujian mesin tersebut dan dicatat hasil pengujiannya, apakah mesin tersebut berjalan baik atau tidak. Alat ukur untuk pengujian ini berupa tachometer yang berfungsi mengukur kecepatan putar mesin.

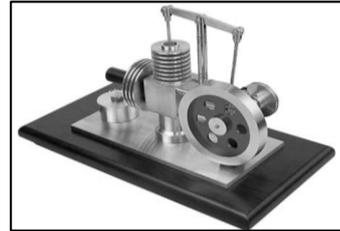
Perhitungan temperatur pada sisi panas dan sisi dingin silinder utama juga dilakukan, hal ini dimaksudkan untuk mengetahui perbedaan temperatur yang ada pada sisi panas dan sisi dingin silinder utama Perhitungan tersebut menggunakan thermometer

PEMBAHASAN

Beberapa hal penting yang di lakukan sebelum melakukan proses perakitan mesin stirling agar proses perakitan menjadi lebih cepat dan mudah:

1. Mengatur area kerja agar semua bagian seperti alat ukur, alat dan bahan dan sebagainya dapat tertata dengan rapih agar proses pengerjaan dapat lebih efisien.

2. Pastikan ketika merakit mesin stirling tangan anda bersih dari minyak debu dan kotoran, karena bagian – bagian komponen dari mesin stirling sangat sensitive.
3. Gunakan sedikit waktu tambahan pada saat merakit, untuk memastikan menghafal setiap bagian dari mesin striling, bagaimana fungsi dan cara kerjanya.
4. Jangan lupa untuk melumasi setiap bagian penting dari mesin stirling yang perlu dilumasi. Agar tidak terjadi gesekan hingga menimbulkan panas yang berlebih.



Gambar 6. Mesin Stirling

Data Hasil Pengujian

Cara kerja mesin stirling memanfaatkan perbedaan suhu pada reservoir untuk menggerakkan displacer sehingga dihasilkan gerak. Gerak yang dilakukan oleh mesin stirling memiliki 4 siklus yaitu ekspansi isothermal ekspansi isokhorik, kompresi isothermal dan kompresi isokhorik. Sumber panas yang digunakan mesin stirling adalah gas butane. Pengukuran perbedaan suhu dengan menggunakan thermometer dan untuk mengukur rpm menggunakan alat tachometer untuk menentukan putaran pada diameter fly wheel. Dari percoaan yang telah dilaksanakan telah diperoleh hasil data pengukuran yang dilakukan. Data yang dihasilkan sebagai berikut :

Tabel pengujian pertama menggunakan piston dengan diameter piston 15 mm dan tinggi 39 mm yang disajikan sebagai berikut :

Tabel 1. Pengukuran pada Tinggi Piston 39 mm

Waktu (menit)	Temperatur (°C)		Putaran N (rpm)
	T _h	T _c	
1	245	44	99,03
2	297	54	155,08
3	387	78	250,01

Hasil pengujian menunjukkan bahwa parameter Termodinamika hasil perancangan sudah tercapai. Data hasil pengujian tersebut adalah :

- a. Temperatur maksimum udara dalam silinder panas (T_h) = 245 °C = 519 K. Temperatur

tersebut dicapai dengan menggunakan gas butana, dengan kepala penyembur gas jenis logam.

- b. Temperatur udara dalam silinder dingin (T_c) = 44 °C = 317 K. Pendinginan yang dilakukan untuk mencapai tempertaur ini adalah dengan mengandalkan sirip-sirip pada silinder dingin dan sistem pendingin udara.
- c. Volume langkah piston pada saat keadaan ekspansi (V_{SE}) dan kompresi (V_{SC}). Volume V_{SE} ditentukan dengan diameter displacer piston 15 mm dan panjang langkah piston 56 mm dan volume V_{SC} ditentukan dengan diameter pisto power 13 mm dan Panjang langkah piston 40 mm.
- d. Fluida kerja yang digunakan adalah udara dengan konstanta gas $R = 286 \text{ J/kgK}$.

Perhitungan Volume Langkah

Berdasarkan kondisi-kondisi Termodinamika dilakukan perhitungan parameter volume sebagai berikut :

1. Volume Langkah pada Piston Ekspansi (V_{SE})

$$V_{SE} = \pi \times r^2 \times S$$

$$= 3,14 \times (0,0075 \text{ m})^2 \times 0,02006 \text{ m}$$

$$= 3,543 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$
2. Volume Langkah pada Piston Kompresi (V_{SC})

$$V_{SC} = \pi \times r^2 \times S$$

$$= 3,14 \times (0,0065 \text{ m})^2 \times 0,02006 \text{ m}$$

$$= 2,66125 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$
3. Volume Langkah pada Regenerator (V_R)

$$V_R = \pi \times r^2 \times S$$

$$= 3,14 \times (0,0025 \text{ m})^2 \times 0,01 \text{ m}$$

$$= 1,9625 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$
4. Volume Sisa pada Piston Ekspansi (V_{DE})

$$V_{DE} = \pi \times r^2 \times S$$

$$= 3,14 \times (0,0075 \text{ m})^2 \times 0,030 \text{ m}$$

$$= 5,299 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$
5. Volume Sisa pada Piston Kompresi (V_{DC})

$$V_{DC} = \pi \times r^2 \times S$$

$$= 3,14 \times (0,0065 \text{ m})^2 \times 0,019 \text{ m}$$

$$= 2,521 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$
6. Rasio Volume Langkah (v)

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} = \frac{2,66125 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{3,543 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 0,75$$
7. Volume Piston (V_{piston})

$$V_{piston} = \pi \times r^2 \times S$$

$$= 3,14 \times (0,0075 \text{ m})^2 \times 0,039 \text{ m}$$

$$= 6,8884 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$
8. Volume Displacer ($V_{Displacer}$)

$$V_{Displacer} = \pi \times r^2 \times S$$

$$= 3,14 \times$$

$$(0,0065 \text{ m})^2 \times 0,021 \text{ m}$$

$$= 2,7859 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Massa Udara yang Diperlukan Sebagai Fluida Kerja

Massa udara total (m) yang dimasukkan pada mesin adalah pada saat temperatur kamar dan tekanan lingkungan (atmosfir). Nilai Temperatur kamar dan tekanan lingkungan adalah sebesar :

$$T_{kamar} = 25 \text{ °C} = 302 \text{ K}$$

$$P_{udara} = 1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$$

$$= 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Massa udara total diperoleh dengan persamaan gas ideal yaitu :

$$PV = mRT \rightarrow m = \frac{PV}{RT}$$

di mana volume total (V) diperoleh dengan persamaan :

$$V = V_{SE} + V_{SC} + V_R + V_{DE} + V_{DC} - V_{piston} - V_{displacer}$$

Jadi Volume total dapat diperoleh :

$$V = (3,543 \times 10^{-6} + 2,66125 \times 10^{-6} + 1,9625 \times 10^{-7} + 5,299 \times 10^{-6} + 2,521 \times 10^{-6} - 6,8887 \times 10^{-6} - 2,7859 \times 10^{-6}) \text{ m}^3$$

$$= 6,31215 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Maka dapat diperoleh massa udara total sebagai berikut :

$$m = \frac{PV}{RT}$$

$$= \frac{1,01325 \times 10^5 \text{ Pa} \times 6,31215 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{286 \text{ J/kgK} \times 302 \text{ K}}$$

$$= 7,536 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

Volume Ekspansi Sesaat (V_E)

Volume dari silinder ekspansi dan silinder kompresi pada sudut engkol tertentu dihitung pertama. Volume sesaat dideskripsikan dengan sudut engkol x . Sudut engkol didefenisikan sebagai $x = 0^\circ$ ketika piston ekspansi (piston pada silinder panas) ada pada posisi TMA.

Volume ekspansi sesaat (V_E) dinyatakan dengan persamaan :

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

di mana sudut x divariasikan dari $0^\circ - 360^\circ$. Hasil perhitungan disajikan pada tabel perhitungan volume.

Volume Kompresi Sesaat (V_C)

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} [1 - \cos(x - dx)] + V_{DC}$$

di mana sudut dx adalah sudut fase sebesar 90° . Hasil perhitungan disajikan juga pada tabel perhitungan volume.

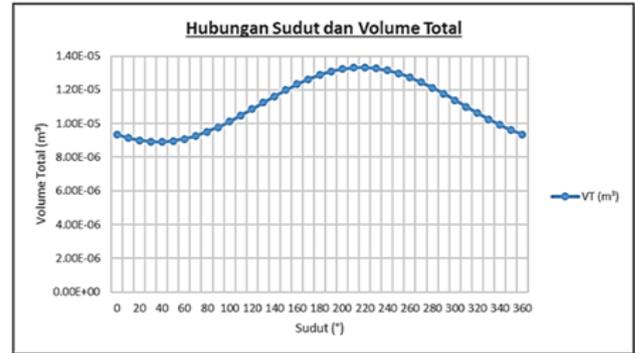
Volume Total Sesaat (V_T)

$$V_T = V_E + V_C + V_R$$

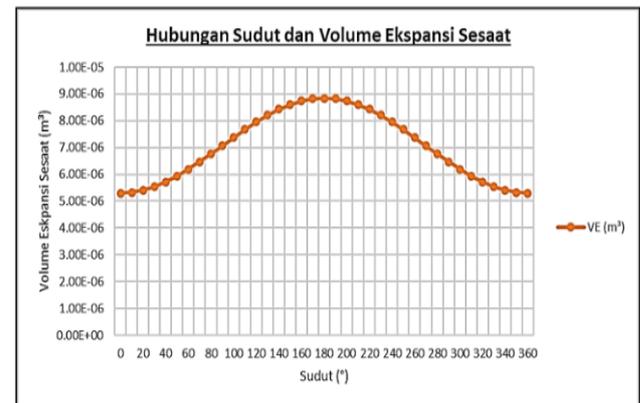
Tabel 2. Perhitungan P-V

Sudut Engko l (Ø)	VE (m³)	VC (m³)	VR (m³)	VT (m³)	P (Pa)
0	5,299 x 10 ⁻⁶	3,851 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,346 x 10 ⁻⁶	83439.4849
10	5,326 x 10 ⁻⁶	3,620 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,142 x 10 ⁻⁶	85685.2366
20	5,406 x 10 ⁻⁶	3,396 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	8,998 x 10 ⁻⁶	87610.3469
30	5,536 x 10 ⁻⁶	3,186 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	8,918 x 10 ⁻⁶	89101.2224
40	5,713 x 10 ⁻⁶	2,996 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	8,905 x 10 ⁻⁶	90061.9687
50	5,932 x 10 ⁻⁶	2,832 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	8,960 x 10 ⁻⁶	90427.0269
60	6,185 x 10 ⁻⁶	2,699 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,079 x 10 ⁻⁶	90170.7000
70	6,464 x 10 ⁻⁶	2,601 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,261 x 10 ⁻⁶	89311.0767
80	6,763 x 10 ⁻⁶	2,541 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,500 x 10 ⁻⁶	87907.2587
90	7,070 x 10 ⁻⁶	2,521 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,787 x 10 ⁻⁶	86050.6672
100	7,378 x 10 ⁻⁶	2,541 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,0115 x 10 ⁻⁵	83852.7417
110	7,676 x 10 ⁻⁶	2,601 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,0473 x 10 ⁻⁵	81431.9394
120	7,956 x 10 ⁻⁶	2,699 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,0851 x 10 ⁻⁵	78902.5330
130	8,209 x 10 ⁻⁶	2,832 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,1237 x 10 ⁻⁵	76366.6661
140	8,427 x 10 ⁻⁶	2,996 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,1619 x 10 ⁻⁵	73909.9993
150	8,605 x 10 ⁻⁶	3,186 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,1986 x 10 ⁻⁵	71600.4594
160	8,735 x 10 ⁻⁶	3,396 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,2327 x 10 ⁻⁵	69489.2090
170	8,815 x 10 ⁻⁶	3,620 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,2631 x 10 ⁻⁵	67612.9132
180	8,842 x 10 ⁻⁶	3,851 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,2889 x 10 ⁻⁵	65996.5446
190	8,815 x 10 ⁻⁶	4,082 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,3093 x 10 ⁻⁵	64656.2030
200	8,735 x 10 ⁻⁶	4,306 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,3237 x 10 ⁻⁵	63601.6395
210	8,605 x 10 ⁻⁶	4,517 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,3317 x 10 ⁻⁵	62838.3394
220	8,427 x 10 ⁻⁶	4,707 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,3330 x 10 ⁻⁵	62369.1178
230	8,209 x 10 ⁻⁶	4,871 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,3276 x 10 ⁻⁵	62195.2381
240	7,956 x 10 ⁻⁶	5,004 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,3156 x 10 ⁻⁵	62317.0794
250	7,676 x 10 ⁻⁶	5,102 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,2974 x 10 ⁻⁵	62734.3810
260	7,378 x 10 ⁻⁶	5,162 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,2736 x 10 ⁻⁵	63446.0715
270	7,070 x 10 ⁻⁶	5,182 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,2448 x 10 ⁻⁵	64449.6765
280	6,763 x 10 ⁻⁶	5,162 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,2120 x 10 ⁻⁵	65740.2828
290	6,464 x 10 ⁻⁶	5,102 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,1762 x 10 ⁻⁵	67309.0271
300	6,185 x 10 ⁻⁶	5,004 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,1384 x 10 ⁻⁵	69141.0988
310	5,932 x 10 ⁻⁶	4,871 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,0998 x 10 ⁻⁵	71213.2860

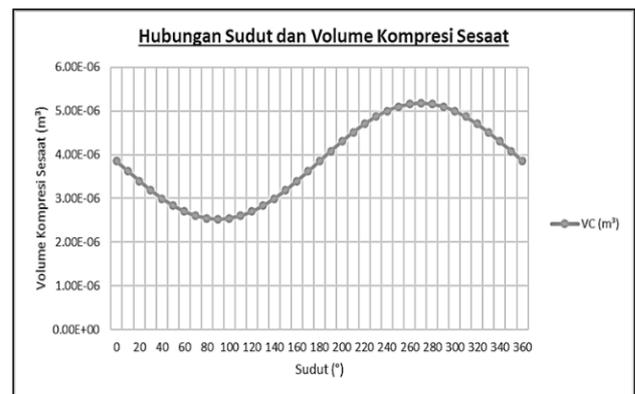
Sudut Engko l (Ø)	VE (m³)	VC (m³)	VR (m³)	VT (m³)	P (Pa)
320	5,713 x 10 ⁻⁶	4,707 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,0616 x 10 ⁻⁵	73491.1906
330	5,536 x 10 ⁻⁶	4,517 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	1,0249 x 10 ⁻⁵	75926.3899
340	5,406 x 10 ⁻⁶	4,306 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,908 x 10 ⁻⁶	78454.0260
350	5,326 x 10 ⁻⁶	4,082 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,604 x 10 ⁻⁶	80991.5445
360	5,299 x 10 ⁻⁶	3,851 x 10 ⁻⁶	1,96 x 10 ⁻⁷	9,346 x 10 ⁻⁶	83439.4849



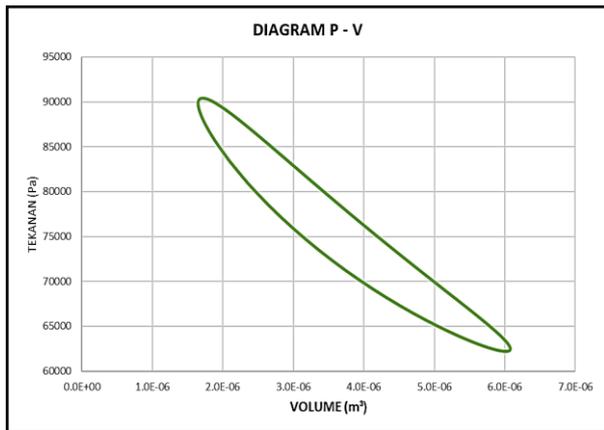
Gambar 7. Grafik Hubungan Sudut dan Volume Total



Gambar 8. Grafik Hubungan Sudut dan Volume Ekspansi Sesaat



Gambar 9. Grafik Hubungan Sudut dan Volume Kompresi Sesaat



Gambar 10. Grafik Hubungan Sudut dan Volume Kompresi Sesaat

PENUTUP

Dari hasil perhitungan, pembuatan, dan serangkaian pengujian alat, maka dapat disimpulkan :

- Mesin dapat berputar dengan pemanasan pada silinder panas dengan temperature 245°C dan temperature silinder dingin 44°C.
Mesin mampu berputar selama sumber panas yang di berikan pada silinder sisi panas masih menyala. Hasil pengujian mesin dapat berputar selama 5 menit.
- Dari hasil perancangan termodinamika mesin stirling tipe alpha akan di peroleh tekanan dan volume berdasarkan sudut engkol dengan putaran pada voleme maksimum, hasil-hasil tersebut di peroleh dengan mengaplikasikan teori *Schmidt* pada perancangan termodinamika ini.

Tabel 3. Spesifikasi Hasil Perancangan Berdasarkan Kondisi Termodinamika

Spesifikasi	Nilai
T_E (Temp. Panas)	245°C = 519 K
T_C (Temp. Dingin)	44°C = 317 K
Fluida kerja	Udara [R = 286 J/(kg.k)]
Sudut antara silinder panas dan dingin (dx)	90°
Diameter piston ekspansi (D)	15 mm = 0,015 m
Panjang langkah piston ekspansi (S)	20,06 mm = 0,0206 m
Diameter piston kompresi (D)	13 mm = 0,013 m
Panjang langkah piston kompresi (S)	20,06 mm = 0,0206 m
Volume sisa pada piston kompresi (V_{DC}) dan piston ekspansi (V_{DE})	$V_{DC} = 2,521 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ $V_{DE} = 5,299 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

DAFTAR PUSTAKA

- Hirata, Koichi. t.t. “Schmidt Theory For Stirling Engines.”
<http://www.nmri.go.jp/env/khirata/>.
- Iqbal Al-Fikri, Harry. t.t. “Analisis Pembangkit Listrik Dengan Generator Stirling.”
- Prasetyo Eko, Syahril Achmad. 2019. “Perancangan Stirling Engine Sebagai Penggerak Generator Set Berbahan Bakar Gas.” Dalam *Seminar Dan Konferensi Nasional IDEC*, D12.1-D12.7.
- Ritonga, Hari S, Farel H Napitupulu, Tulus B Sitorus, dan M Syahril Gultom. 2019. “Rancang Bangun Mesin Stirling Tipe Gama Berkapasitas 157 ML Menggunakan Sistem Pendingin Fluida Cair.” *Jurnal Dinamis* 7, no. 1.
- Satria, Dhimas, Rina Lusiani, Imron Rosyadi, Erny Listijorini, dan Yogi Hermawan. 2020. “Analisa Performa Mesin Stirling Tipe Alpha Inovasi Desain Sudut Fasa 180 Derajat.” *Jurnal Rekayasa Mesin*. Vol. 15.