



Pengaruh Variasi Dimensi Sirip Pada Displacer Sistem Pendingin Mesin Stirling Menggunakan Energi Surya Terkonsentrasi

Moch. Zainul Achyak¹, Gatot Soebiyakto¹, Purbo Suwandono^{1*}

¹ Jurusan Teknik Mesin, Universitas Widyagama Malang, Indonesia

*Email Penulis: purbo@widyagama.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Naskah Diterima 23/05/2022
Naskah Direvisi 27/06/2022
Naskah Disetujui 28/06/2022
Naskah Online 30/06/2022

ABSTRAK

Energy needs in Indonesia are increasing day by day due to population growth and economic growth. To meet the increasing energy needs, it is necessary to develop a variety of alternative energies such as: biomass, solar energy, wind energy, water energy, which are still few that utilize. One of the machines that use renewable energy is the Stirling motor. A Stirling motor is a type of motor that has an external combustion engine that does not require much maintenance and does not emit a lot of pollutants because it only requires a source of thermal energy to run it. In other words, solar energy can also be utilized. The method developed is the use of solar energy which is concentrated by a parabolic reflector to the hot cylinder of the Stirling engine to convert heat energy into motion energy. The purpose of this study was to determine the effect of variations of several fin dimensions and variations in the number of fins on a displacer with aluminum material. This study uses an experimental method to describe the performance of the Stirling engine prototype using various dimensions of cooling fins and variations in the number of fins. The results showed that the gamma Stirling engine using 6 fins, and a diameter of 38 mm, showed the best results with a time of 43 minutes with an intensity of solar radiation of 188,2 W/m² to drive the Stirling engine with a speed of 189 rpm and a torque of 0,87 N. mm. The difference in temperature produced in the hot cylinder and cold cylinder is 115°C with a thermal efficiency of 44,13%.

Keywords: renewable energy, energy conversion, cooling fins, Stirling engine.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di Indonesia semakin lama semakin meningkat karena pertumbuhan jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi. Untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat perlu di kembangkan berbagai energi alternatif seperti energi terbarukan karena di Indonesia sumber energi terbarukan sangat banyak. Potensi energi terbarukan seperti: biomassa, energi surya, energi angin, energi air yang masih sedikit yang memanfaatkan [1].

Sumber energi yang di terapkan saat ini yaitu sumber energi yang berasal dari fosil. Sumber energi fosil semakin lama semakin menipis. Perlu alternatif lain untuk menghemat energi fosil. Mesin yang menggunakan bahan bakar fosil seperti motor bakar diesel dan motor bakar bensin yang menggunakan prinsip pembakaran dalam (internal combustion engine). Selain sumber energi nya yang semakin menipis sumber energi dari fosil juga menyebabkan polusi udara yang serius. Untuk menunjang hal tersebut perlu di

lakukan penelitian yang berkelanjutan tentang penerapan mesin dengan sumber energi yang bisa di perbarui karena lebih efisien dan ramah lingkungan. Pengetahuan masyarakat Indonesia akan teknologi pembangkit energi yang bisa di perbarui sangatlah terbatas. Ada banyak penelitian yang menemukan teknologi lain dengan model berbeda yang perlu di ketahui. Salah satunya adalah motor Stirling (Stirling engine) yang di temukan Robert Stirling (1790-1878) pada tahun 1816 [2].

Motor Stirling (Stirling engine) adalah jenis motor yang memiliki proses pembakaran luar (external combustion engine) yang tidak banyak memerlukan perawatan dan tidak banyak mengeluarkan polutan karena hanya membutuhkan sumber energi termal untuk menjalankannya. Dengan kata lain energi matahari pun bisa di manfaatkan. Motor Stirling memiliki potensi untuk mencapai efisiensi tertinggi dari semua mesin kalor, secara teori sampai efisiensi maksimal mesin Carnot, meskipun dalam prakteknya usaha ini masih

dibatasi oleh berbagai sifat-sifat nonideal baik itu dari fluida kerjanya maupun bahan dari mesin itu sendiri, seperti gesekan, konduktivitas termal dan titik lebur. Mesin Stirling adalah salah satu mesin kalor yang memanfaatkan perbedaan temperatur dalam sistem tertutup. Akibatnya fluida kerja tersebut mengalami ekspansi dan kompresi pada satu kali siklus yang dapat menggerakkan cylinder secara bolak-balik (responding). Siklus ini terjadi berulang-ulang secara intermitten sehingga terjadi gerakan cylinder yang dapat dimanfaatkan sebagai penggerak. Mesin Stirling dalam siklus kerjanya sangat membutuhkan sistem pendinginan yang maksimal untuk menunjang kinerja mesin tersebut. Di perlukan penelitian yang mendalam dalam perancangan sistem pendingin. Salah satu sistem pendingin yang baik dalam menunjang kinerja stirling engine adalah system pendinginan udara dengan menggunakan sirip udara pada displacer. Selain minim perawatan, sistem pendinginan ini juga sangat terjangkau dari segi biaya dalam proses pembuatannya[3].

Pemilihan model sirip yang tepat sangat berpengaruh dalam menunjang proses kerja mesin yang maksimal. Karakteristik aliran yang melalui suatu benda sangat tergantung pada beberapa parameter fisik, diantaranya; kondisi permukaan, bentuk benda, maupun orientasi benda yang dilintasi untuk memodelkan silinder bersirip dengan variasi jarak antar fin. Diameter silinder, panjang silinder, panjang fin, dan tebal fin adalah variabel yang tetap konstan[4].

2. TINJAUAN PUSTAKA

Achmad Zayyinun N dan Mahendra Widayatono pada tahun 2020 melakukan penelitian tentang model mesin stirling melibatkan panasnya matahari sebagai energi alternatif. Disimpulkan bahwa unjuk kerja reflektor memiliki opsi untuk membangun kekuatan panas siang hari dengan amplifikasi normal 1,2 kali setiap jam. Model eksekusi motor stirling yang menggunakan cahaya matahari sebagai energi elektif ini juga siap bekerja pada pukul 11.00 dengan suhu 136°C , kecepatan putaran 751 rpm, menghasilkan tegangan sebesar 0,89 volt dan mendapatkan temperatur tertinggi pada pukul 12.00 dengan temperatur 188°C , kecepatan putar 823 rpm, hasil tegangan 1,12 volt [5].

Riyadi Prabowo Moecty, Galih Adityawan dan Aziz Nurfadillah Artha pada tahun 2016 melakukan penelitian tentang rekayasa mesin stirling untuk pembangkit listrik tenaga matahari dengan motor stirling yang telah dibuat sudah sesuai. Namun, ada beberapa kendala yang menyebabkan tidak bisa dibidang ideal, antara lain silinder yang terlalu dekat sehingga membuat flywheel sulit berputar. Hal ini karena kedalaman silinder dengan jarak ruang melalui hambatan sangat kecil. Juga, penentuan bahan untuk ruang yang tidak sesuai dapat menyebabkan silinder pas. Kendala selanjutnya adalah plat yang digunakan untuk menahan silinder sangat kecil, sehingga ketika tekanan silinder menjadi tidak masuk akal dan membuat perkembangan silinder dari TDC ke TMB atau dari TMB ke TDC tidak konstan[6].

Rahmat, Djoko W Karmiadji pada tahun 2019 melakukan penelitian tentang pengembangan mesin stirling tipe gamma sebagai tenaga penggerak kipas angin dengan hasil 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 [7].

Intan Putri Nazila pada tahun 2016 melakukan penelitian tentang cara kerja mesin stirling tipe gamma dengan sumber panas reflektor parabolik dan kerangka aliran air persediaan rendah memiliki opsi untuk memperluas kekuatan radiasi bertenaga matahari dengan amplifikasi 2,7 kali. Hal ini karena reflektor parabolik dapat mengumpulkan dan mencerminkan cahaya siang hari dengan baik pada titik fokus (ruang panas) sebagai sumber panas untuk motor Stirling. Cara kerja tipe gamma dengan aliran air pasokan rendah tiba pada selisih suhu 315°C , kecepatan putaran roda 594 rpm, dan efisiensi 8,6%, sedangkan cara kerja tipe gamma tanpa kerangka aliran air rendah mencapai perbedaan suhu 297°C , kecepatan putaran roda 542 rpm, dan produktivitas 7,3%[8].

Evita Muthiatul Maula pada tahun 2016 melakukan penelitian tentang efek tebal lensa pemfokus cahaya matahari sebagai sumber panas mesin stirling tipe gamma untuk mengkonversi energi panas menjadi energi mekanik dengan hasil beda suhu (ΔT) ruang panas dan dingin mesin mempengaruhi kecepatan putar (rpm) mesin stirling. Antara Beda suhu (ΔT) sipinder dispacer mesin dengan kecepatan putar (rpm) mesin Stirling terkorelasi linier, koefisien relasi masing-masing adalah 0,95, 0,91 dan 0,95. Hal ini berdasarkan information yang diperoleh beda suhu (ΔT) maksimal mesin menghasilkan 253°C kecepatan putar mesin mencapai 642 rpm. Lensa air (plan konveks), bersifat memfokuskan cahaya sehingga dapat mempengaruhi penguatan intensitas cahaya matahari yang diterima oleh hot chamber mesin Stirling. Untuk penguatan lensa air yang permukaanya memiliki width 100 cm dengan variasi tebal lensa (15 cm, 20 cm, dan 25 cm) menghasilkan penguatan berturut-turut 1,85 kali, 2,0 kali, dan 2,4 kali. Efisiensi mesin Stirling menggunakan pemfokus cahaya matahari dengan ketebalan lensa 15 cm, 20 cm, 25, berturut-turut 4,37%, 5,46% dan 6,07%[9].

PK Purwadi pada tahun 2010 melakukan penelitian tentang efisiensi Semakin besar nilai koefisien perpindahan kalor konveksi h, nilai efisiensi sirip η semakin kecil. Untuk keadaan tunak, semakin besar nilai konduktivitas termal bahan, nilai efisiensi sirip η semakin besar[10].

Widodo, Wawan A., Triyogi, Y., Indiyono, P., Aryawan, Wasis D. pada tahun 2010 melakukan penelitian eksperimental tentang , Pengendalian Aliran Pasif pada Silinder Sirkular Disturbance Body Berbentuk Silinder Elip dengan hasil variasi bentuk silinder elip sebagai inlet disturbance body dengan maupun tanpa modifikasi geometri, memberikan informasi mengenai fenomena fisis tentang interaksi aliran yang dikaitkan dengan keberadaan separasi bubble pada kontur permukaan silinder elip yang dimodifikasi ($a = 5\%B$, $a = 10\%B$, dan $a = 15\%B$). Adanya separasi bubble tersebut mampu meningkatkan intensitas turbulensi momentum fluida yang attach pada kontur permukaan silinder sirkular yang dapat mempercepat transisi lapis batas laminar menjadi turbulen, dan dapat menunda

separasi masif lebih ke belakang. Keberadaan separasi bubble yang terdapat pada kontur permukaan silinder elip yang dipotong pada sisi depan, secara keseluruhan memberikan a. Elips Tanpa Pemotongan (a = 0%B) b. Elips (a = 5%B) c. Elips (a = 10%B) d. Elips (a = 15%B) Komparasi Visualisasi Aliran Pada Kontur Permukaan Silinder Sirkular Tunggal dan Tandem Pada Jarak Longitudinal (G/D = 1 kontribusi dalam mereduksi gaya hambat (drag force) secara signifikan pada silinder sirkular, khususnya pada silinder elip dengan pemotongan sisi depan sebesar 10% dari panjang sumbu mayornya (a = 10%B)[11].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental. Penelitian eksperimental adalah penelitian yang dilakukan terhadap variabel yang data-datanya belum ada sehingga perlu dilakukan proses manipulasi melalui pemberian treatment/perlakuan tertentu terhadap subjek penelitian yang kemudian diamati/diukur dampaknya (data yang akan datang). Menggunakan pendekatan kuantitatif bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi dimensi sirip pada displacer sistem pendingin mesin stirling menggunakan energi surya terkonsentrasi.

Desain Rangkaian Alat

Parabola reflektor



Gambar 1. Parabola reflektor berjenis *dish*.

Pada gambar diatas parabola reflektor berjenis dish terbuat dari material utama berbahan dasar plat aluminium dengan ketebalan 2,3 mm yang dibentuk elipsoidal dengan diameter 960 mm dan ketinggian 100 mm. Permukaan sisi dalam parabola reflektor dilapisi dengan kaca cermin berbentuk persegi dengan ukuran luas 1 m² yang direkatkan menggunakan sealant.

Secara terorisit perhitungan focal point menurut Ali, I. *et al.*[12] yang dihasilkan adalah :

$$Y = \frac{x^2}{4a} \quad (1)$$

$$Y = \frac{(480 \text{ mm} \times 480 \text{ mm})^2}{4 \times 100 \text{ mm}}$$

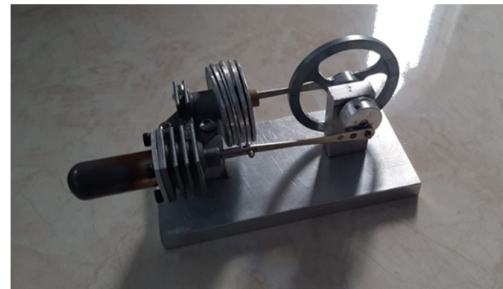
$$Y = \frac{230.400 \text{ mm}^2}{400 \text{ mm}}$$

$$Y = 576 \text{ mm}$$

$$Y = 0.57 \text{ m}$$

Unjuk kerja parabola reflektor dalam memantulkan radiasi matahari pada pukul 10.00 sampai dengan pukul 11.00 dalam kondisi yang cerah karena pada jam tersebut nilai intensitas radiasi yang didapatkan lebih optimal. Perhitungan nilai intensitas matahari diukur menggunakan solarimeter dalam bentuk lux yang kemudian dikonversikan ke dalam satuan W/m².

Mesin stirling tipe gamma



Gambar 2. Mesin stirling tipe gamma menggunakan *hot cylinder* dengan material *stainless steel*.

Pembuatan mesin stirling tipe gamma memiliki dua silinder yang terpasang secara terpisah meliputi *hot cylinder* dan *cold cylinder* namun tetap terhubung dalam satu poros engkol yang sama. Mesin stirling tipe gamma yang dibuat memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 1. Spesifikasi mesin stirling.

No.	Item	Specification
1	<i>Displacer bore</i>	14 mm
2	<i>Displacer stroke</i>	12 mm
3	<i>Swept volume displacer</i>	718 mm ³
4	<i>Power piston bore</i>	8 mm
5	<i>Power piston stroke</i>	12 mm
6	<i>Swept volume piston</i>	201 mm ³
7	<i>Phase Angle</i>	90°
8	<i>Working Gas</i>	<i>Air</i>
9	<i>Gas constant</i>	287 J/Kg.K

Sirip pendingin



Gambar 3. Sirip pendingin mesin stirling tipe gamma.

Pada penelitian ini menggunakan dua variasi diameter sirip dan dua variasi jumlah sirip setiap diameter meliputi:
Menggunakan 3 buah sirip :

1. Sirip dengan diameter 26 mm.
2. Sirip dengan diameter 38 mm.
3. Menggunakan 6 buah sirip:
4. Sirip dengan diameter 26 mm.
5. Sirip dengan diameter 38 mm.

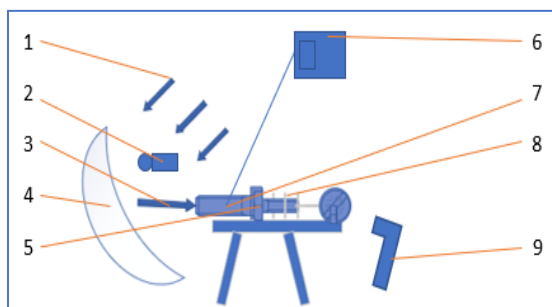
4. TEKNIK PENGAMBILAN DATA

Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan diluar ruangan saat kondisi siang hari dengan mengamati perubahan intensitas matahari.



Gambar 4. Flux meter

Adapun langkah-langkah yang digunakan dalam proses pengambilan data terdapat pada skema eksperimental *set up* di bawah ini:



Gambar 5. Skema eksperimental *set up*.

Pada skema eksperimental *set up* di atas dapat di jabarkan:

1. Pantulan radiasi matahari menuju parabolik reflektor.
2. Flux meter untuk mengetahui intensitas radiasi matahari. Kemudian dari flux meter ini dikonversi menjadi intensitas cahaya matahari dimana $1 \text{ Lux} = 0,00079 \text{ W/m}$.
3. Pantulan radiasi matahari dari parabolik reflektor menuju ke *hot cylinder*.
4. Parabolik reflektor digunakan untuk mendapatkan perbesaran maksimum radiasi matahari yang dikonsentrasikan pada satu titik fokus. Implementasi penggunaan reflektor parabolic sebagai sumber panas di ukur menggunakan thermometer pada waktu tertentu.
5. Mesin stirling tipe gamma dengan penambahan variasi sirip-sirip pendingin.
6. Termokopel digital untuk pengambilan data temperatur di tempatkan pada *hot cylinder*.
7. *Hot cylinder* digunakan untuk mendistribusikan fluida yang sudah dipanaskan menuju ke *cold cylinder* dan mendorong piston *power*.
8. Sirip pendingin yang di letakkan di area *cold cylinder* untuk di dapatkan performa mesin yang maksimal.
9. Tachometer di tembakkan pada sisi depan *flywheel* untuk pengambilan data rpm.

Untuk perhitungan torsi menggunakan neraca pegas yang nantinya di dapatkan gaya yang di hasilkan oleh putaran mesin stirling kemudian di kalikan dengan jari-jari *flywheel*.

5.HASIL DAN PEMBAHASAN

Unjuk kerja mesin stirling tipe gamma bekerja dengan memanfaatkan energi alternatif berupa radiasi termal matahari yang di pantulkan oleh parabola reflektor berjenis dish secara terkonsentrasi menuju ujung *hot cylinder*. Energi panas yang diterima oleh *hot cylinder* mesin stirling kemudian dikonversi menjadi energi gerak melalui sistem regenerasi tertutup, dimana fluida kerja yang ada didalam sistem akan terkompresi atau terekspansi pada reservoir yang terpisah secara konveksi. Proses ini meyebabkan perubahan temperatur, perbedaan tekanan, dan volume yang kemudian di distribusikan untuk menggerakkan piston daya. Gerak yang dihasilkan secara translasi diubah menjadi gerak rotasi pada *flywheel*.

Keadaan intensitas cahaya matahari berdasarkan penelitian nyata, dimana pada saat pengambilan data cuaca berawan sehingga sinar matahari kurang maksimal. Namun begitu peneliti masih bisa melakukan penelitian dan pengambilan data dengan cukup baik dan di dapatkan perbedaan kinerja berdasarkan perbedaan variasi sirip. Berdasarkan data pengujian didapatkan hasil sebagai berikut

Tabel 2. Hasil pengujian dengan sirip berjumlah 3 berdiameter 26 mm.

No	Jam	Menit	Intensitas (W/m ²)	Temperature (C°)		ΔT	RPM	Torsi (N.m m)	Eff (%)
				Hot	Cold				
1	10.00	0	160,9	27,2	25	2,2	0	0	0
2	10.15	15	162,5	71,6	32	39,6	0	0	0
3	10.30	30	169,6	125	43	82,2	0	0	0
4	10.41	41	187,5	144	50,5	93	125	0,42	14,14

Pada tabel diatas hasil unjuk kerja mesin stirling pada percobaan hari pertama dengan menggunakan sirip berjumlah 3 diameter sirip 26 mm dapat beroperasi pada pukul 10.41 dengan perbedaan temperatur sebesar 93 °C dan menghasilkan kecepatan putaran sebesar 125 rpm serta torsi sebesar 0,42 N.mm.

Tabel 3. Hasil pengujian dengan sirip berjumlah 3 berdiameter 38 mm.

No	Jam	Menit	Intensitas (W/m ²)	Temperature (C°)		ΔT	RPM	Torsi (N.m m)	Eff (%)
				Hot	Cold				
1	10.00	0	161,1	27,1	26,5	0,6	0	0	0
2	10.15	15	162,7	69,3	31,7	37,6	0	0	0
3	10.30	30	172,7	123,5	40	83,5	0	0	0
4	10.45	45	186,8	142,5	49,9	92,6	127	0,45	15,45

Pada tabel diatas hasil unjuk kerja mesin stirling pada percobaan hari kedua dengan sirip berjumlah 3 berdiameter 38 mm dapat beroperasi pada pukul 10.45 dengan perbedaan temperatur sebesar 92,6 °C dan menghasilkan kecepatan putaran sebesar 127 rpm serta torsi sebesar 0,45 N.mm.

Tabel 4. Hasil pengujian dengan sirip berjumlah 6 berdiameter 26 mm.

No	Jam	Menit	Intensitas (W/m ²)	Temperature (C°)		ΔT	RPM	Torsi (N.m m)	Eff (%)
				Hot	Cold				
1	10.00	0	159,7	27	26,3	0,7	0	0	0
2	10.15	15	161,8	67,2	30,2	37	0	0	0
3	10.30	30	173,4	120,4	40,9	79,5	0	0	0
4	10.47	47	186,9	140,1	50,8	89,3	153	0,63	26

Pada tabel diatas hasil unjuk kerja mesin stirling dengan sirip berjumlah 6 berdiameter 26 mm dapat beroperasi pada pukul 10.47 dengan perbedaan temperatur sebesar 89,3 °C dan menghasilkan kecepatan putaran sebesar 153 rpm serta torsi sebesar 0,63 N.mm.

Tabel 5. Hasil pengujian dengan sirip berjumlah 6 berdiameter 38 mm.

Menit	Intensitas (W/m ²)	Temperature (C°)		ΔT	RPM	Torsi (N.m m)	Eff (%)
		Hot	Cold				
0	161,5	27,3	25,5	1,8	0	0	0
15	162,9	66,3	29,5	36,8	0	0	0
30	181,5	119	38,3	80,7	0	0	0
43	188,2	164,5	49,5	115	189	0,87	44,13

Pada tabel diatas hasil unjuk kerja mesin stirling dengan sirip berjumlah 6 berdiameter 38 mm dapat beroperasi pada pukul 10.43 WIB dengan perbedaan temperatur sebesar 115 °C dan menghasilkan kecepatan putaran sebesar 189 rpm serta torsi sebesar 0,87 N.mm.

Perhitungan tekanan kerja

Tekanan kerja yang terjadi didalam mesin stirling tipe gamma di hitung menggunakan teori Schmidt[13] pada setiap fase. Ada pun contoh perhitungan dilakukan pada mesin stirling tipe gama dengan menggunakan *hot cylinder* material *stainless steel* pada masing-masing titik sebagai berikut :

Diketahui :

$$T_1 = T_2 = T_C = 52^\circ\text{C} = 325^\circ\text{K}$$

$$T_3 = T_4 = T_H = 155^\circ\text{C} = 428^\circ\text{K}$$

$$V_1 = V_4 = V_{\text{max}} = 2.8260\text{E}-06 \text{ m}^3$$

$$V_2 = V_3 = V_{\text{min}} = 2.2231\text{E}-06 \text{ m}^3$$

Tekanan pada titik 1 :

$$P_1 = 101,325 \text{ kPa} \tag{2}$$

Tekanan pada titik 2 :

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{V_2} \tag{3}$$

$$= \frac{101,325 \text{ kPa} \cdot 2,8260\text{E}-06 \text{ m}^3}{2,2231-06 \text{ m}^3}$$

$$= 128,803 \text{ kPa}$$

Tekanan pada titik 3 :

$$P_3 = \frac{P_2 \cdot v_2}{v_2} \tag{4}$$

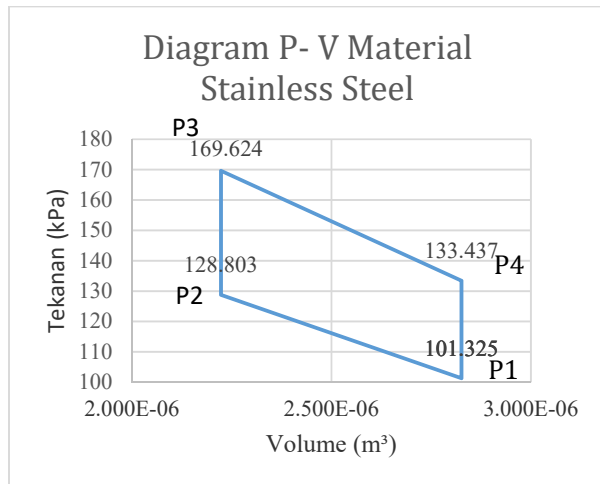
$$= \frac{128,802 \text{ kPa} \cdot 428^\circ\text{K}}{325^\circ\text{K}}$$

$$= 169,624 \text{ kPa}$$

Tekanan pada titik 4 :

$$\begin{aligned}
 P_4 &= \frac{P_3 V_3}{V_4} \quad (5) \\
 &= \frac{169,624 \text{ kPa} \cdot 2,2231 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}{2,8260 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \\
 &= 133,437 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas didapat diagram P-V pada material *Glass* sebagai berikut:



Gambar 6. Diagram P-V menggunakan *hot cylinder* material *stainless steel*.

Perhitungan laju perpindahan panas

Laju perpindahan panas yang terjadi pada mesin stirling dihitung dengan batasan kondisi termodinamika karena adanya perbedaan konduktivitas material antara *hot cylinder* dengan *cold cylinder*. Perpindahan panas yang terjadi berlangsung secara konveksi dari luar *hot cylinder* kemudian diteruskan lewat *hot cylinder* secara konduksi dan selanjutnya ke zat alir yang menuju ke *cold cylinder* secara konveksi.

Secara teoritis perhitungan laju perpindahan panas menurut Cengel, Yunus A.[14] yang terjadi pada mesin stirling menggunakan jumlah sirip 6 dan diameter sirip 38 mm ditunjukkan pada perhitungan sebagai berikut :

Diketahui :

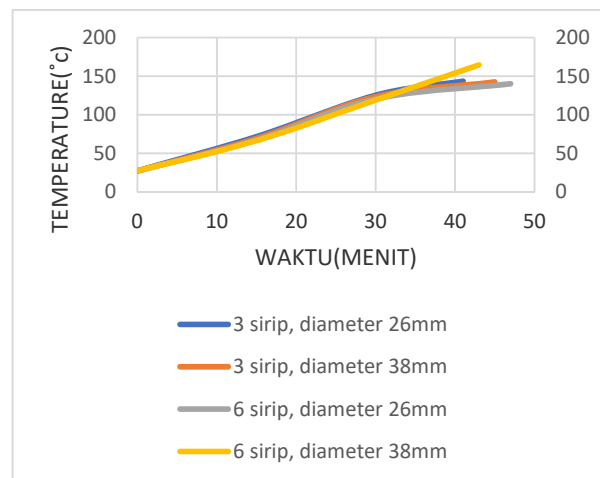
- Konduktivitas termal K = 16 W/m.°C
- Jari - jari dalam r₁ = 0,006 m
- Jari - jari dalam r₂ = 0,007 m
- Koefisien konveksi h = 10 W/m.°C
- Panjang silinder L = 0,04 m
- Temperatur *hot* T_A = 164,5 °C
- Temperatur *cold* T_B = 49,5 °C

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{2\pi L (T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_2 r_2}} \quad (6) \\
 &= \frac{2\pi \cdot 0,04 (164,5 - 49,5)}{\frac{1}{0,06} + \frac{\ln(0,007/0,006)}{16} + \frac{1}{0,07}} \\
 &= 0,93 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Laju perpindahan panas pada 6 sirip dengan diameter 26mm ada penurunan nilai laju perpindahan panas, ini di sebabkan adanya perbedaan intensitas radiasi matahari. Jadi dapat di peroleh simpulan sementara bahwa intensitas radiasi matahari sangat berpengaruh pada nilai besar kecilnya laju perpindahan panas.

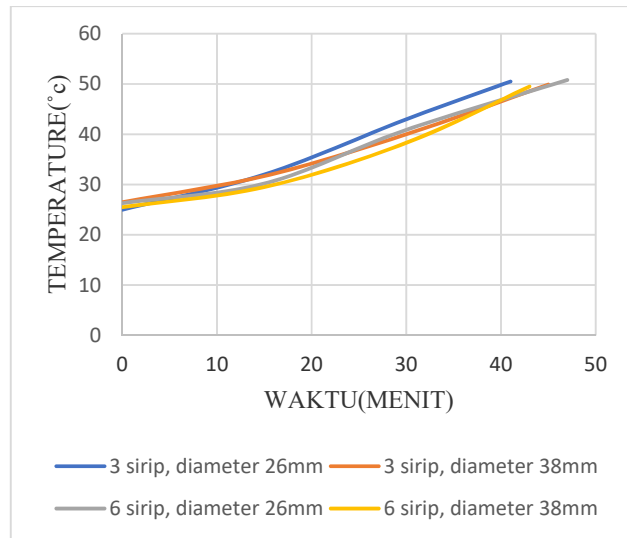
Grafik analisa hubungan antara perbedaan temperatur, waktu, rpm, torsi dan efisiensi.

Pengaruh konduktivitas material *hot cylinder* pada unjuk kerja mesin stirling tipe gamma dengan menggunakan energi surya terkonsentrasi dihubungkan dengan parameter perhitungan yang dianalisis dengan beberapa grafik sebagai berikut :



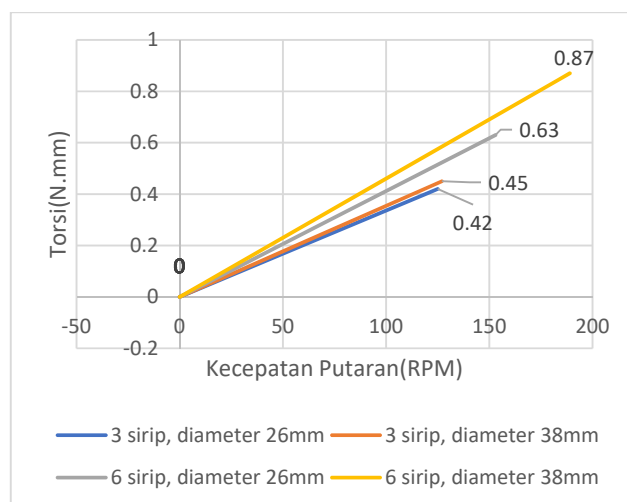
Gambar 7. Grafik hubungan antara perubahan temperatur pada *hot cylinder* terhadap waktu.

Grafik di atas pada jumlah sirip 3 dengan diameter 26mm *temperature hot cylinder* saat mesin stirling beroperasi sebesar 143,5 °C, sedangkan pada jumlah sirip 6 dengan diameter 38mm *temperature hot cylinder* sebesar 164,5. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan temperatur dengan menggunakan jumlah sirip yang lebih banyak dan diameter sirip yang lebih besar lebih rendah di banding dengan jumlah sirip yang lebih sedikit dan diameter yang lebih kecil.



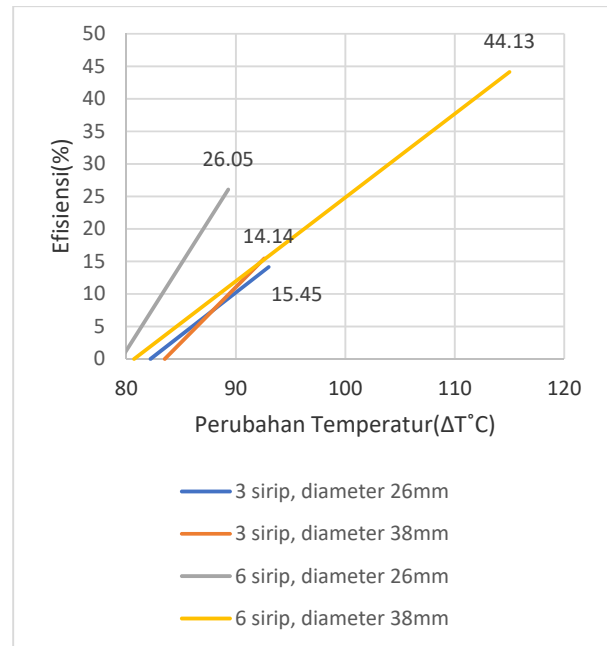
Gambar 8. Grafik hubungan antara perubahan temperatur pada *cold cylinder* terhadap waktu.

Pada grafik di atas mesin dengan sirip-sirip lebih banyak dan diameter sirip lebih besar perubahan temperaturnya lebih rendah di banding dengan jumlah sirip dan diameter sirip lebih sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa sirip-sirip pendingin sangat berpengaruh pada kestabilan temperature mesin saat mesin bekerja. Mesin stirling dalam siklus kerjanya menggunakan perbedaan *temperature* antara *hot cylinder* dan *cold cylinder*. Maka di perlukan sekali perbedaan temperatur antara *hot cylinder* dan *cold cylinder*. Laju perpindahan panasnya juga terjadi secara konduksi pada permukaan sirip.



Gambar 9. Grafik hubungan antara kecepatan putaran terhadap torsi.

Pada grafik diatas jumlah 6 sirip dengan diameter 38mm memiliki torsi tertinggi sebesar 0,87 N.mm dengan kecepatan putaran tertinggi sebesar 189 Rpm, sementara jumlah sirip 3 dengan diameter 26 memiliki torsi terendah sebesar 0,42 N.mm dengan kecepatan putaran terendah sebesar 125 Rpm. Kecepatan putaran dan torsi erat kaitanya dengan perubahan temperatur, volume, dan tekanan yang terjadi didalam sistem.



Gambar 10. Grafik hubungan antara kecepatan perubahan temperatur terhadap efisiensi.

Grafik diatas menunjukkan bahwa pengaruh variasi sirip-sirip pendingin pada temperatur kerja mesin stirling memiliki nilai efisiensi yang berbeda terhadap perubahan temperatur. Jumlah sirip 6 dengan diameter 38 mm memiliki nilai efisiensi tertinggi sebesar 44,1 %. Jadi besar nilai efisiensi pada tiap variasi sirip tergantung pada besar kecilnya intensitas radiasi matahari yang di pantulkan oleh parabola konsentrator ke *displacer* mesin stirling. Sementara daya output bergantung pada kecepatan putaran *flywheel* dan torsi yang dihasilkan. Faktor tersebut juga dipengaruhi oleh perbedaan temperatur pada *hot cylinder* dan *cold cylinder*. Semakin banyak variasi sirip dan semakin besar diameter sirip maka akan menghasilkan efisiensi yang lebih besar di banding dengan jumlah sirip yang lebih sedikit dan diameter yang lebih kecil.

6.KESIMPULAN

Unjuk kerja mesin stirling tipe gamma menggunakan 6 sirip, diameter 38 mm menunjukkan hasil terbaik dengan waktu selama 43 menit dengan intensitas radiasi matahari sebesar 188,2 W/m² untuk menggerakkan mesin stirling dengan kecepatan 189 rpm dan torsi 0,87 N.mm. Perbedaan temperatur yang dihasilkan pada *hot cylinder* dan *cold cylinder* sebesar 115°C dengan efisiensi termal sebesar 44,13 %.

Nilai intensitas radiasi matahari sangat berpengaruh pada perbedaan temperatur antara *hot cylinder* dan *cold cylinder* yang nantinya akan menghasilkan daya *output* yang maksimal.

Kecepatan putaran dan torsi erat kaitanya dengan perubahan temperatur, *volume*, dan tekanan yang terjadi didalam sistem. Semakin tinggi putaran maka semakin tinggi torsi, ini terjadi karena tidak ada perurunan gaya inersia pada sistem tersebut.

7.DAFTAR PUSTAKA

- [1] Christian, “Karakteristik Motor Stirling Piston Bebas Berpendingin Udara Dengan Satu Pegas,” 2011.
- [2] C. S. Vineeth, “Stirling Engines.,” *C. Chart. Mech. Eng.*, vol. 29, no. 6, pp. 59–62, 2011, doi: 10.1201/9781315374192-14.
- [3] Denny christian, “Karakteristik Motor Stirling Piston Bebas Berpendingin Udara Dengan Dua Pegas,” 2013.
- [4] S. Sudirman, “Karakteristik Aliran Di Sekitar Silinder Sirkular Dan Silinder Bersirip,” *Elem. J. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, p. 28, 2019, doi: 10.34128/je.v6i1.93.
- [5] Zayyinun, “Prototipe Mesin Stirling Menggunakan Panas Sinar Matahari Sebagai Energi Alternatif,” *Tek. Elektro*, vol. 09, no. 2, pp. 459–466, 2020.
- [6] Riyadi, “Rekayasa Mesin,” *Rekayasa Mesin. Rekayasa Mesin, 4(2), 147–156.*, vol. 4, no. 2, pp. 147–156, 2016, [Online]. Available: <http://rekayasamesin.ub.ac.id/index.php/rm/article/view/193>.
- [7] D. W. Karmiadji, “Pengembangan Mesin Stirling Tipe Gamma Sebagai Tenaga Penggerak Kipas Angin,” 2019.
- [8] I. P. Nazila, “Unjuk Kerja Mesin Stirling Tipe Gamma Dan Sistem Aliran Air Pada Reservoir Rendah,” 2016.
- [9] E. M. Maula, “Sebagai Sumber Panas Mesin Stirling Tipe Gamma,” 2016.
- [10] P. K. Purwadi, “Efisiensi sirip berbentuk silinder,” vol. 9, no. September, pp. 231–237, 2010.
- [11] W. A. Widodo, T. Yuwono, P. Indiyono, and W. D. Aryawan, “Pengendalian Aliran Pasif Pada Silinder Sirkular Dengan Inlet Disturbance Body Berbentuk Silinder Elip ($Ar = 1/4$),” *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 1–11, 2010, doi: 10.9744/jtm.11.1.pp.1-11.
- [12] I. Ali, I. M. Saleh, K. Khalifa, M. Bughazem, and N. Algharbi, “Developments in Parabolic Solar Dish Concentrator For Enhanced System Efficiency of Steam Generation,” *Dev. Parabol. Sol. Dish Conc. Enhanc. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 17–32, 2016.
- [13] K. Hirata, “Schmidt theory for Stirling engines,” *Stirling Engine home page. Disponivel em*, pp. 1–9, 1997, [Online]. Available: <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/list/general/schmidt.pdf>.
- [14] Y. A. Cengel, “Heat Transference a Practical Approach,” *MacGraw-Hill*, vol. 4, no. 9, p. 874, 2004, [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20279-7_5.