

DESAIN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA 1 KW MENGUNAKAN MESIN STIRLING TIPE ALFA

Indra Fitriyanto^{1,2}, Gunawan Nugroho³

¹Politeknik Negeri Indramayu, ²Institut Teknologi Sepuluh Nopember

³Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Email: ¹indrafitriyanto@polindra.ac.id

Abstrak

Mesin stirling dapat dioperasikan dengan memfokuskan cahaya matahari menggunakan konsentrator. Mesin stirling dipilih karena sederhana dan efisien. Mesin stirling bisa diterapkan untuk *power plants* dalam skala besar maupun kecil. Penelitian ini akan membahas sistem konsentrator untuk mesin stirling pada skala rumah tangga. Untuk dapat memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga 900 VA, maka konsentrator harus menghasilkan daya keluaran sebesar 2254,96 W dengan luas konsentrator 15,38 m². Mula-mula dilakukan *sizing aperture* untuk mendapatkan diameter *aperture* paling baik, diperoleh sebesar 0,04m. Dari perhitungan diperoleh efisiensi *receiver* sebesar 57,50%, efisiensi mesin stirling sebesar 33,26%, efisiensi generator diasumsikan 95%, sehingga sistem mesin stirling dengan konsentrator secara keseluruhan memiliki efisiensi 17,07%. Agar dapat memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga golongan 900 VA, maka sistem memerlukan 5 buah baterai 12 V 120 Ah yang disusun secara paralel dengan inverter 1000 W. Penelitian ini juga melihat potensi sistem mesin stirling dengan konsentrator pada daerah lain. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, Surabaya merupakan wilayah paling potensial untuk pembuatan sistem konsentrator mesin stirling 1 kW. Sedangkan untuk daerah luar Pulau Jawa, Kota Pekanbaru adalah daerah yang paling potensial.

Kata Kunci: mesin stirling, konsentrator, aperture, receiver.

Abstract

Stirling engine can be operated by focusing sunlight using a concentrator. The Stirling engine was chosen because of its simplicity and efficiency. Stirling engine can be applied to power plants on a large or small scale. In this study, we will discuss the concentrator system for the Stirling engine on a household scale. To be able to meet the household electricity needs of 900 VA, the concentrator must produce an output power of 2254.96 W with a concentrator area of 15.38 m². First of all, aperture sizing is done to get the best aperture diameter, and obtained 0.04 m. The system analysis that has been carried out shows that the efficiency of the receiver is 57.50%, the efficiency of the Stirling engine is 33.26%, and the efficiency of the generator is 95%. Thus, the Stirling engine with the concentrator as a whole system has an efficiency of 17.07%. To meet the 900 VA class household electricity needs, the system requires 5 unit of 12 V 120 Ah batteries arranged in parallel with a 1000W inverter. This study also looks at the potential of Stirling engine systems with concentrators in other areas. Based on the analysis that has been done, Surabaya is the most potential area for the manufacture of a 1 kW Stirling engine concentrator system. As for areas outside Java, Pekanbaru City is the most potential area.

Keywords: Stirling engine, concentrator, aperture, receiver

I. PENDAHULUAN

Matahari adalah sumber energi baru dan terbarukan dengan ketersediaan berlimpah. Salah satu teknologi yang menjanjikan untuk mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik adalah sistem mesin stirling dengan konsentrator surya. Mesin stirling dipilih karena sederhana dan siklus panas yang lebih efisien dibandingkan dengan mesin panas lainnya. Secara teori, efisiensi mesin stirling dapat mendekati efisiensi carnot ketika regenerasi ideal dan kompresi isothermal tidak diabaikan (Ahmadi et al., 2013). Sistem mesin stirling juga dapat diterapkan pada pembangkit listrik skala besar dan kecil (Balcombe et al., 2015; Evalina et al., 2020; Moonka et al., 2022; Rahmalina et al., 2021) juga dikombinasikan dengan sumber energi terbarukan lainnya (Monné et al., 2014). Dalam perkembangannya, mesin stirling dapat dioperasikan dengan memfokuskan cahaya matahari sebagai bahan bakar mesin. Untuk membuat pembangkit listrik menggunakan mesin stirling, diperlukan radiasi matahari yang tinggi. Radiasi matahari yang tinggi dapat diperoleh jika suatu daerah berada di garis khatulistiwa. Dalam penelitian ini, Surabaya digunakan sebagai lokasi penelitian. Surabaya dipilih karena memiliki tingkat radiasi yang cukup tinggi, yaitu maksimum 1kW/m² (Uropean Commission, 2017).

Dalam penelitian sebelumnya, Nuwayhid dkk (Nuwayhid et al., 2001) telah melakukan penelitian pada konsentrator dengan bahan *stainless steel* dengan diameter 1,6 m dan bahan aluminium dengan diameter 2 m. Kemudian Ehsan dkk (Gholamalizadeh & Chung, 2017) melakukan penelitian dengan bahan yang sama. Dalam penelitian ini, rasio konsentrasi (perbandingan antara ukuran concentrator dengan receiver) ditingkatkan menjadi 2500 sehingga produksi energi tahunan diperoleh yang meningkat dari 1,94 menjadi 6,74 GWh / tahun atau meningkat 3,5 kali lebih besar dari studi sebelumnya. Ehsan dkk menunjukkan bahwa sebagian besar kerugian termal sistem terjadi pada *receiver*. Radiasi matahari yang terkonsentrasi oleh parabola akan diteruskan ke mesin stirling melalui rongga *aperture* di *receiver*. Maka, perlu dilakukan simulasi untuk menentukan diameter *aperture* optimal dengan kerugian terkecil. Kerugian terjadi dalam konduksi melalui dinding penerima, radiasi *aperture* ke lingkungan, dan konveksi pada rongga *receiver*. Sedangkan, kerugian paling besar terjadi pada mesin stirling. Kerugian pada mesin stirling ditentukan oleh efisiensi siklus karnot dan efisiensi hukum kedua Termodinamika, di mana efisiensi hukum kedua

Termodinamika adalah efisiensi karena regenerasi tidak sempurna dan rugi tekanan.

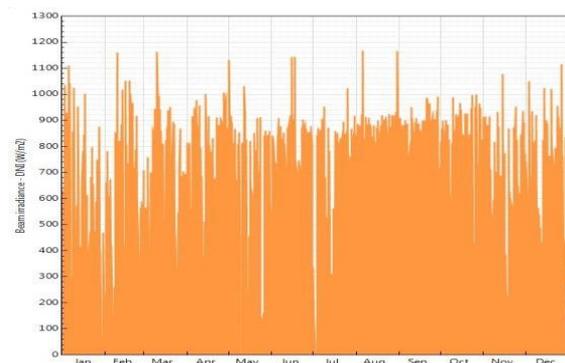
Penelitian ini berfokus pada desain konsentrator mesin stirling dengan daya 1kW untuk skala rumah tangga. Spesifikasi mesing stirling yang digunakan dalam penelitian ini adalah sama dengan yang digunakan oleh Ehsan dkk dengan pertimbangan bahwa energi yang dihasilkan mencapai kebutuhan listrik sebuah rumah dalam satu tahun. Sehingga, dapat dibuat konsentrator dengan dimensi yang mampu memenuhi kebutuhan mesin stirling

II. METODE

Lokasi Sistem Konsentrator Mesin Stirling

Penelitian dilakukan di Surabaya dengan koordinat -7.284 LU, 112.797 BT. Koordinat tersebut digunakan untuk menentukan input data radiasi matahari di Kota Surabaya. Data radiasi matahari diperoleh dari Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) (Uropean Commission, 2017). Data radiasi matahari yang diperoleh adalah data radiasi matahari 5 tahun terakhir Kota Surabaya. Data tersebut kemudian digunakan sebagai input program dan diperoleh grafik radiasi matahari tahunan seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Selain Surabaya, simulasi juga memasukkan input beberapa wilayah kota besar di Indonesia. Kota tersebut adalah Jakarta, Bandung, dan Palembang. Kota tersebut dipilih dengan pertimbangan bahwa kota tersebut memiliki intensitas radiasi matahari yang cukup tinggi. Gambaran peta radiasi matahari dapat dilihat pada gambar 2. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa daerah dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi ditandai dengan warna kemerahan. Selain itu, pertimbangan ekonomi juga digunakan. Kota tersebut merupakan kota besar di Indonesia dengan laju pertumbuhan ekonomi yang relatif lebih tinggi daripada kota lainnya.



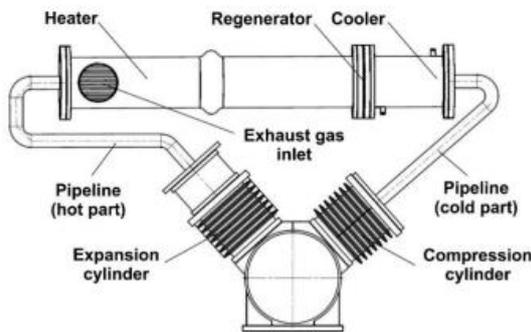
Gambar 1. Radiasi tahunan Kota Surabaya



Gambar 2. Peta intensitas radiasi matahari di Indonesia (Uropean Commission, 2017)

Desain mesin stirling

Mesin stirling yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin stirling tipe *alpha* (Pérez-González et al., 2019). Detail dari mesin Stirling tipe Alpha seperti ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 3. Mesin Stirling tipe Alpha (Kropiwnicki & Furmanek, 2020)

Spesifikasi parameter mesin Stirling yang digunakan adalah sebagai berikut: $T_H = 800K$, $T_L = 310K$, $RPM = 800$ RPM, tekanan fluida kerja = 10 bar. Dengan menggunakan persamaan gas ideal, energi yang dihasilkan dapat diperoleh melalui persamaan berikut

$$W = mR(T_H - T_L) \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right) \quad (1)$$

di mana:

- m = massa fluida kerja
- R = konstanta gas ideal
- V_{max} = volume ekspansi maksimum
- V_{min} = volume kompresi minimum
- T_L = suhu pendingin
- T_H = suhu pemanas

Kalor yang ditransfer dari ruang kompresi dan kalor yang ditransfer menuju ruang ekspansi merupakan fungsi dari tekanan mesin dan *crank angle*.

$$Q_c = W_c = \int P \frac{dV_c}{d\theta} d\theta$$

$$Q_c = -mRT_L \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (2)$$

$$Q_e = W_e = \int P \frac{dV_e}{d\theta} d\theta$$

$$Q_e = mRT_H \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right) \quad (3)$$

Total kerja yang dihasilkan oleh mesin merupakan penjumlahan dari kerja negatif ruang kompresi (W_c) dan kerja positif ruang ekspansi (W_e).

$$W = W_c + W_e \quad (4)$$

Daya yang dihasilkan mesin stirling merupakan kerja output dari siklus stirling selaras dengan kecepatan putar mesin per detik

$$P = W \cdot n \quad (5)$$

Dengan mempertimbangkan ireversibilitas internal dan eksternal dari mesin stirling, efisiensi mesin stirling dapat ditentukan sebagai hasil perkalian antara efisiensi siklus karnot dan efisiensi hukum kedua Termodinamika seperti berikut:

$$\eta_{SE} = \eta_{CC} \cdot \eta_{II,irev} \quad (6)$$

Efisiensi hukum kedua Termodinamika dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\eta_{II,irev} = \eta_{II,X} \cdot \eta_{II,\Delta p} \quad (7)$$

di mana $\eta_{II,X}$ dan $\eta_{II,\Delta p}$ masing-masing adalah efisiensi karena regenerasi tidak sempurna dan rugi tekanan. Efisiensi hukum kedua yang disebabkan regenerasi tidak sempurna dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\eta_{II,X} = \frac{1}{1 + \frac{(X_1 y + X_2 (1-y)) \cdot c_v}{R \cdot \ln \varepsilon_v} \sqrt{\left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)}} \quad (8)$$

di mana y adalah koefisien yang nilainya ditetapkan sebesar 0,72 (Petrescu et al., 2002). Sedangkan X_1 dan X_2 adalah rugi-rugi yang disebabkan regenerasi yang tidak sempurna. X_1 dan X_2 dapat ditentukan sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{1+2M+e^{-E}}{2(1+M)} \quad (9)$$

$$X_2 = \frac{M+e^{-E}}{1+M} \quad (10)$$

$$M = \frac{1+M}{m_r c_r} \quad (11)$$

Parameter E dan h dapat ditentukan sebagai berikut:

$$E = \frac{(1+M)hA_R}{m_g c_v} \left(\frac{S}{w} \right) \quad (12)$$

$$h = \frac{0,395(4p_m/RT_L)w^{0,424}c_p(T_m) \cdot [v(T_m)]^{0,576}}{(1+\tau) \left[1 - \frac{\pi}{4[(b/d)+1]} \right] D_R^{0,576} Pr^{2/3}} \quad (13)$$

yang mana hubungan antara kecepatan piston dan kecepatan rotasi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$w = 2 \cdot S \cdot N / 60 \quad (14)$$

Efisiensi disebabkan rugi tekanan dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\eta_{II,\Delta p} = 1 - \frac{\frac{w}{w_s} \gamma (1 + \tau^{1/2}) \ln \epsilon_v + 5 \left(\frac{w}{w_s}\right)^2 N_s}{\tau \cdot \eta_{CC} \cdot \eta_{II,X} \cdot \ln \epsilon_v} - \frac{3(0,94 + 0,045w)10^5}{4p_1(\tau \cdot \eta_{CC} \cdot \eta_{II,X} \cdot \ln \epsilon_v)} \quad (15)$$

yang mana p_1 dapat dihitung sebagai berikut:

$$p_1 = \frac{4p_m}{(\epsilon_v + 1)(\tau + 1)} \quad (16)$$

Desain receiver mesin Stirling

Sebagian besar dari total losses termal sistem terjadi pada *receiver*. Oleh karena itu, mensimulasikan losses pada *receiver* diperlukan untuk memprediksi kinerja sistem. Losses pada *receiver* dibagi menjadi losses konduksi melalui dinding *receiver*, losses radiasi ke lingkungan melalui *aperture* dan, losses konveksi dari rongga

Losses konduksi dapat dihitung seperti berikut

$$\dot{Q}_{conduction} = \frac{T_{cav} - T_{amb}}{\ln\left[\frac{(\frac{D_{cav}}{2} + \delta_{insul})/\frac{D_{cav}}{2}}{(2\pi \cdot k_{insul} \cdot L_{cav})}\right]} \quad (17)$$

Koefisien *forced convective* juga diperhitungkan dengan menggunakan persamaan berikut

$$h_{forced} = 0.1967 \cdot v^{1.849} \quad (18)$$

Di mana v adalah kecepatan angin Sehingga total losses konveksi adalah sebagai berikut:

$$h_{total} = h_{natural} + h_{forced} \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{konveksi} = h_{total} \cdot A_{cav} \cdot (T_{cav} - T_{amb}) \quad (20)$$

Radiasi yang di emisikan dan direfleksikan dari *receiver* dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$\dot{Q}_{emitted} = \epsilon \cdot A_{ap} \cdot \sigma \cdot (T_{cav}^4 - T_{amb}^4) \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{reflected} = (1 - \alpha_{eff}) \cdot \eta_{conc} \cdot G \cdot A_d \quad (22)$$

Losses total dari *receiver* adalah seperti berikut

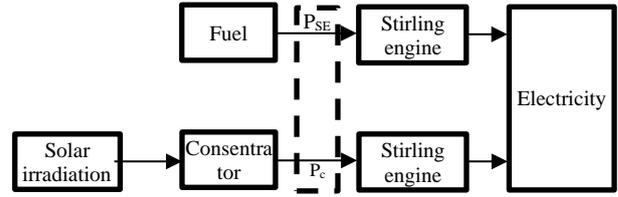
$$\dot{Q}_{total,loss} = \dot{Q}_{convection} + \dot{Q}_{conduction} + \dot{Q}_{emitted} + \dot{Q}_{reflected} \quad (23)$$

Efisiensi *receiver* dihitung seperti berikut

$$\eta_{rec} = 1 - \frac{\dot{Q}_{total,loss}}{\eta_{conc} \cdot G \cdot A_d} \quad (24)$$

Desain kolektor

Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa energi iradiasi matahari yang difokuskan oleh konsentrator dan diteruskan ke penerima mesin stirling sama dengan energi kimia bahan bakar untuk menjalankan mesin stirling. Persamaannya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Model energi mesin stirling

Berdasarkan gambar di atas, hubungan antara kedua sistem dapat ditulis sebagai berikut

$$P_{SE} = P_c \quad (25)$$

di mana

P_{SE} = Daya untuk menggerakkan mesin stirling (W)

P_c = Daya yang difokuskan oleh konsentrator (W)

Model konsentrator parabola memprediksi energi radiasi matahari yang diterima oleh *receiver* mesin stirling berdasarkan refraktivitas, faktor kebersihan, faktor intersep, faktor kesalahan penjejukan, dan faktor *shading*.

$$P_c = I_{DNI} \cdot A_c \cdot \Phi_{ref} \cdot \Phi_{clean} \cdot \Phi_{int} \cdot \Phi_{err} \cdot \Phi_{shd} \quad (26)$$

di mana

I_{DNI} = intensitas radiasi matahari (W/m^2)

A_c = luas konsentrator (m)

Φ_{ref} = refraktivitas

Φ_{clean} = faktor kebersihan

Φ_{int} = faktor intersep

Φ_{err} = kesalahan penjejukan

Φ_{shd} = faktor *shading*

nilai parameter-parameter tersebut dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 1. Parameter untuk perhitungan konsentrator (Lovegrove et al., 2007)

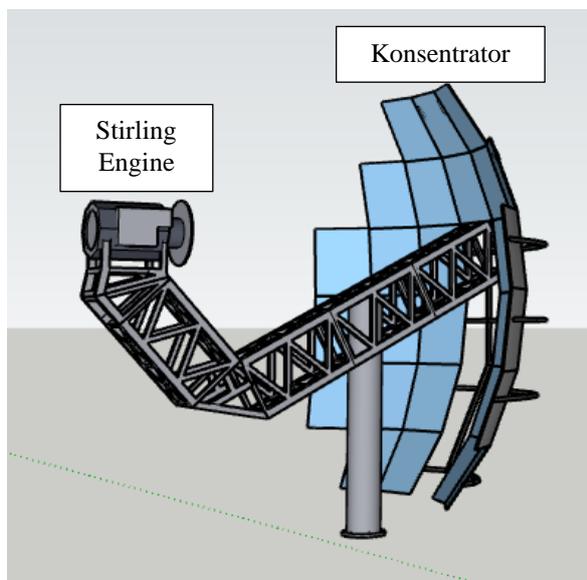
Parameter	Symbol	Nilai
Refraktivitas	Φ_{ref}	0.931
Faktor kebersihan	Φ_{clean}	0.98
Faktor intersep	Φ_{int}	0.95
Kesalahan penjejukan	Φ_{err}	0.95
Faktor <i>shading</i>	Φ_{shd}	0.95

Diketahui bahwa $P_c = P_{SE}$, maka luas konsentrator yang digunakan dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$A_c = \frac{P_{SE}}{I_{DNI} \cdot \Phi_{ref} \cdot \Phi_{clean} \cdot \Phi_{int} \cdot \Phi_{err} \cdot \Phi_{shd}} \quad (27)$$

II. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah semua parameter ditentukan, desain sistem mesin Stirling dengan konsentrator dibuat menggunakan *software* Google Sketchup seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Desain mesin Stirling dengan konsentrator

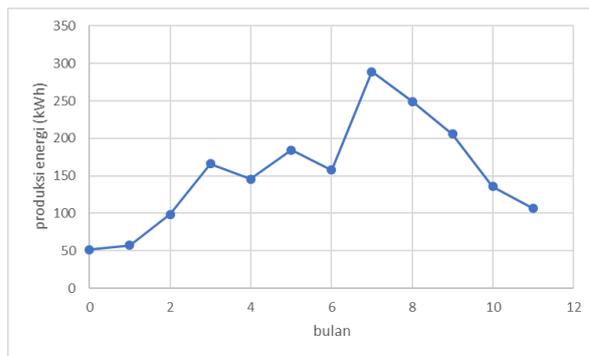
Kinerja sistem mesin stirling dengan konsentrator dipengaruhi oleh iradiasi matahari pada konsentrator, parameter desain kolektor, dan mesin Stirling. Desain konsentrator memiliki parameter berikut

Tabel 2. Parameter desain konsentrator piringan parabola

Parameter	Nilai
Rim angle (φ)	45 ⁰
Diameter (D)	4.24 m
Titik fokus (f)	2,67 m
Luas konsentrator	15,38 m ²
Material permukaan konsentrator	Glass/silver
Reflektivitas	94%

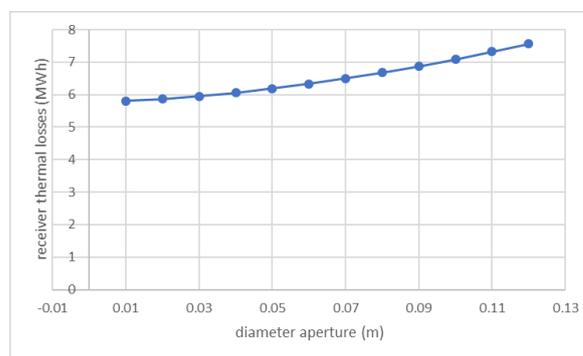
Produksi Energi Sistem Mesin Stirling dengan Konsentrator

Produksi energi diperoleh melalui simulasi dengan bantuan program *System Advisor Model* (SAM). Parameter desain konsentrator yang telah diperoleh kemudian dijadikan input perhitungan simulasi. Lokasi yang dipilih dalam simulasi adalah Surabaya dengan pertimbangan bahwa intensitas radiasi matahari yang cukup tinggi dan pertumbuhan ekonomi yang maju. Grafik produksi energi tahunan dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 6. Produksi energi tahunan sistem mesin stirling dengan konsentrator

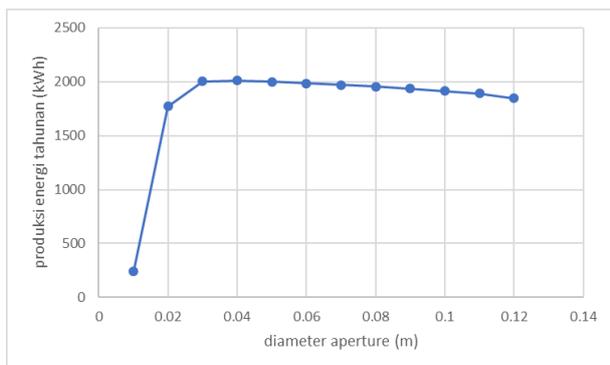
Semakin besar diameter *aperture* maka energi yang diterima oleh mesin stirling akan semakin besar. Namun, memperbesar diameter *aperture* juga menimbulkan kerugian akibat panas yang dilepaskan kembali ke lingkungan, sehingga ukuran *aperture* harus ditentukan dengan tepat untuk mendapatkan output energi maksimal.



Gambar 7. Losses pada receiver

Losses atau kerugian akibat kalor yang dilepaskan kembali ke lingkungan baik secara konduksi, konveksi, maupun radiasi oleh receiver dapat ditunjukkan oleh gambar 7. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin besar diameter *aperture receiver*, maka kerugian yang terjadi juga semakin bertambah besar. Receiver dengan diameter *aperture* 0,12 meter akan mengakibatkan kerugian energi sebesar 7,56 MWh termal

Untuk menentukan diameter *aperture* yang optimal, simulasi dijalankan dengan memasukkan input diameter dalam rentang antara 0,01-0,12 m. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 8.

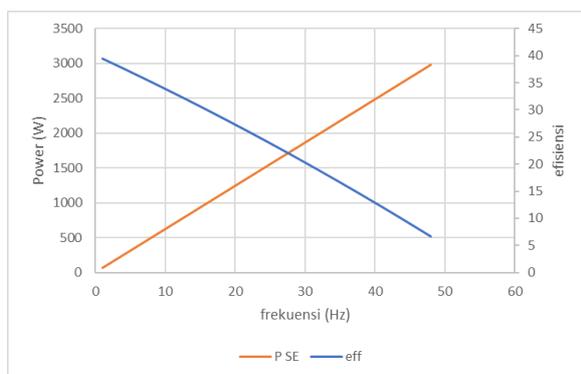


Gambar 8. Produksi energi untuk beberapa diameter aperture

Berdasarkan gambar 8 dapat diketahui bahwa diameter *aperture* paling baik adalah 0.04 meter karena menunjukkan produksi energi paling besar yaitu sebesar 2011,15 kWh. Sedangkan diameter *aperture* 0,01 meter menghasilkan energi paling sedikit jika dibandingkan dengan lainnya. Hal tersebut disebabkan energi yang dipantulkan oleh konsentrator tidak bisa diteruskan ke mesin stirling atau hanya diteruskan sebagian kecil saja. Sehingga, mesin Stirling tidak cukup mendapatkan energi untuk memanaskan fluida kerja.

Analisis Mesin Stirling

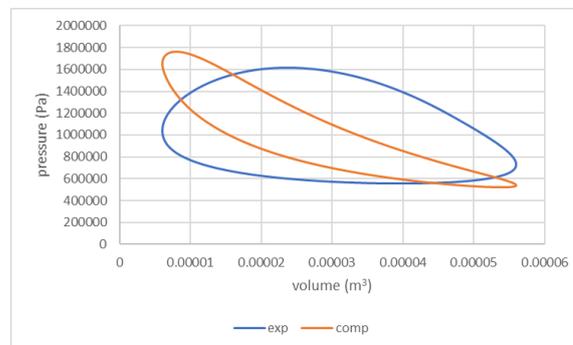
Sistem mesin stirling dengan konsentrator menggunakan mesin stirling tipe alpha dengan fluida kerja udara. Simulasi dilakukan untuk mengetahui kinerja optimum dan kinerja maksimum dari mesin. Mesin stirling disimulasikan beroperasi pada beberapa rentang frekuensi. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, mesin stirling dengan fluida kerja udara mampu bekerja secara optimum pada frekuensi 28 Hz dengan daya sebesar 1737W, efisiensi 21,74%. Ketika frekuensi terus dinaikkan sampai 50 Hz, maka efisiensi mesin akan mendekati nol.



Gambar 9. Output mesin stirling dengan fluida kerja udara pada beberapa frekuensi

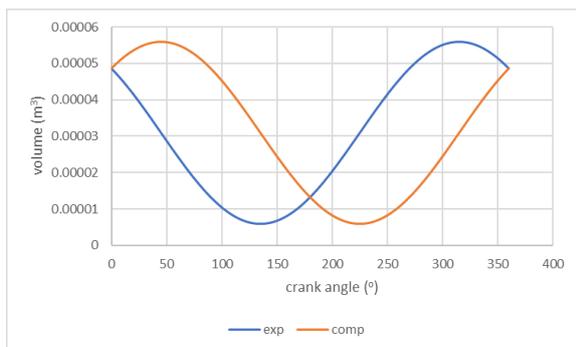
Penyebab sebuah mesin mencapai kinerja maksimum untuk setiap desain adalah karena *pumping losses* di dalam mesin. Kehilangan aliran meningkat dengan meningkatnya kecepatan mesin, sehingga ketika kecepatan meningkat, output daya meningkat hingga daya maksimum tercapai. Selanjutnya, daya akan terus berkurang hingga mencapai nol. Kecepatan di mana daya mencapai nol adalah kecepatan maksimum. Kecepatan mesin yang lebih cepat dari ini akan menghasilkan daya bersih negatif. Namun pada kenyataannya, ini hanya menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh mesin tidak cukup untuk mengatasi kerugian pemompaan internal. Simulasi akan berhenti ketika daya negatif tercapai. Kecepatan akhir ini biasa disebut *free speed*.

Dalam satu kali siklus engkol mesin Stirling berputar sebesar 360°. Engkol berfungsi untuk menghubungkan antara silinder panas dan dingin. Silinder panas dan dingin bergerak dengan beda fase 90°. Energi yang dihasilkan dalam satu kali siklus mesin stirling adalah sebesar 392,8 Joule dengan efisiensi 33,26%.

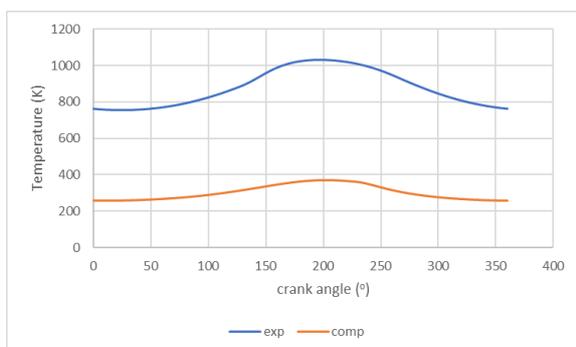


Gambar 10. Diagram P-V Mesin Stirling

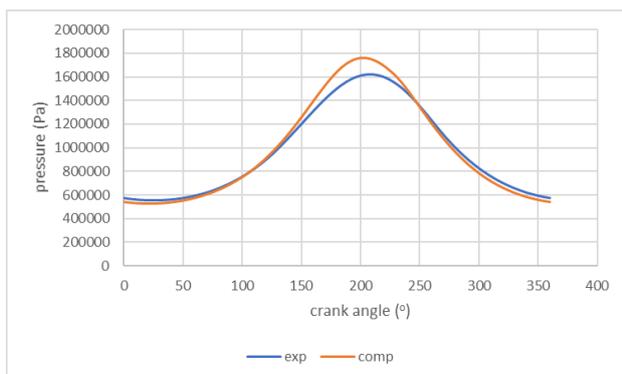
Pada gambar 10 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan antara tekanan maksimum dan minimum dalam ruang ekspansi dan kompresi. Hal tersebut diakibatkan oleh penurunan tekanan di regenerator ketika gas yang bekerja mengalir melalui ruang ekspansi dan kompresi. Regenerator dalam siklus stirling ideal diasumsikan memiliki efisiensi 100%. Namun, dalam siklus nyata, tidak ada regenerator yang sempurna dan salah satu penyebab ketidakefisienan siklus Stirling nyata adalah gesekan aliran gas yang bekerja ketika melewati regenerator (Ferreira et al., 2012). Akibatnya, ada kehilangan perpindahan panas di regenerator. Gambar 10 mewakili diagram P-V dari siklus Stirling nyata. Gambar tersebut mengilustrasikan diagram P-V untuk ruang ekspansi dan kompresi, di mana area yang tertutup oleh setiap siklus P-V mewakili kerja (energi) yang dipertukarkan di masing-masing ruang.



Gambar 11. Volume ruang ekspansi dan kompresi



Gambar 12. Temperatur ruang ekspansi dan kompresi



Gambar 13. Tekanan ruang ekspansi dan kompresi

Efisiensi sistem

Dalam penelitian ini digunakan konsentrator dengan material *glass/silver* yang memiliki reflektifitas atau efisiensi sebesar 94%. Sehingga terdapat 94% radiasi matahari yang dipantulkan konsentrator menuju *receiver* mesin stirling.

Kemudian losses pada *receiver* dibagi menjadi losses konduksi, losses konveksi, losses emisi, dan losses refleksi. Losses konduksi diperoleh sebesar 28,31W, losses konveksi sebesar 22,24W, losses emisi sebesar 17,06W dan losses refleksi sebesar 1083,31W. Sehingga diperoleh total losses pada *receiver* sebesar 1150,91W dan efisiensi *receiver* sebesar 57,50%. Diketahui bahwa losses terbesar adalah losses yang diakibatkan oleh refleksi. Losses refleksi sangat dipengaruhi oleh luas *aperture*. Jika

aperture semakin luas, maka losses refleksi juga akan semakin luas.

Efisiensi mesin stirling dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 6. Efisiensi pada mesin stirling dipengaruhi oleh regenerasi yang tidak sempurna dan losses tekanan pada regenerator. Perhitungan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa losses yang disebabkan regenerasi tidak sempurna pada mesin stirling adalah sebesar 75,07%. Sedangkan efisiensi yang disebabkan losses tekanan pada regenerator adalah sebesar 64,21%. Sehingga dapat diperoleh efisiensi keseluruhan mesin stirling adalah sebesar 33,26%.

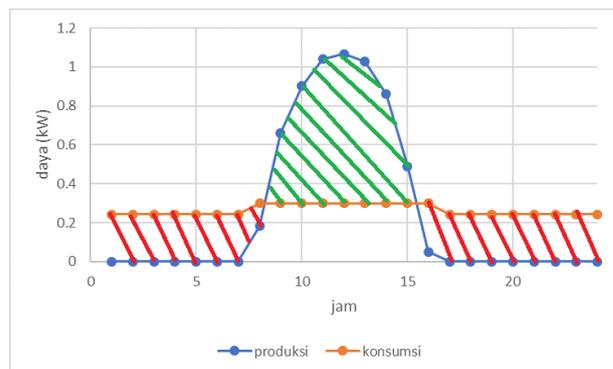
Secara keseluruhan sistem mesin stirling dengan konsentrator terdiri dari beberapa komponen yaitu konsentrator, *receiver*, mesin stirling, dan generator. Pada penelitian ini tidak membahas komponen generator lebih spesifik. Sehingga diasumsikan bahwa generator yang digunakan memiliki efisiensi 95%. Sehingga efisiensi total sistem mesin stirling dengan konsentrator adalah sebesar 14,18%.

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa efisiensi paling rendah terjadi pada mesin

stirling yaitu sebesar 33,26%. Salah satu faktor yang menyebabkan rendahnya efisiensi mesin stirling adalah terjadinya losses tekanan pada regenerator. Losses tekanan tersebut disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satunya adalah RPM mesin. Semakin besar RPM mesin, maka efisiensi akibat losses tekanan akan semakin mengecil.

Sistem Konsentrator dengan Mesin Stirling untuk Rumah Tangga

Dalam penelitian ini digunakan listrik rumah tangga kapasitas 900VA dengan konsumsi listrik dalam satu hari sebesar kurang lebih 5,67 kWh. Sebanyak 38% konsumsi listrik terjadi antara jam 08.00-16.00 dan 62% pada jam 16.00-08.00. Sehingga diperoleh grafik produksi sistem dan konsumsi listrik seperti pada gambar 12.



Gambar 14. Grafik konsumsi dan produksi listrik

Sistem konsentrator dengan mesin stirling hanya mampu menghasilkan energi listrik pada jam 08.00-16.00 sedangkan kebutuhan listrik rumah tangga berlangsung setiap jam. Grafik dengan blok warna hijau menunjukkan bahwa produksi energi melebihi kebutuhan konsumsi. Sedangkan grafik dengan blok warna merah menunjukkan bahwa produksi energi kurang dari kebutuhan konsumsi.

Konsumsi energi listrik pada jam 16.00-08.00 adalah 3,9kWh. Kelebihan produksi pada blok warna hijau akan disimpan ke dalam baterai untuk menyuplai listrik pada jam 16.00-08.00. Sehingga dibutuhkan baterai dengan kapasitas sebagai berikut

$$E_{batt} = \frac{E_{beban}}{\eta_{inverter} \times \eta_{kontroler} \times DoD} \quad (28)$$

$$E_{batt} = \frac{3900 Wh}{0,85 \times 0,85 \times 0,8}$$

$$E_{batt} = 6747,40 Wh$$

Baterai yang dijual di pasaran dinyatakan dalam voltase dan rating Ah (muatan baterai). Sedangkan voltase yang digunakan adalah 12V. Sehingga muatan baterai dapat dihitung sebagai berikut

$$Ah = \frac{E_{batt}}{V_{batt}} \quad (29)$$

$$Ah = \frac{6747,40}{12}$$

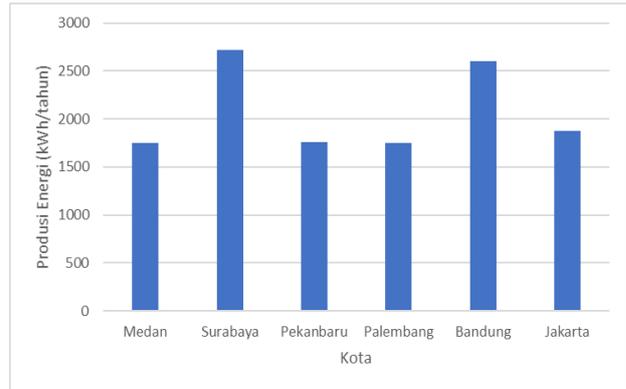
$$Ah = 562,28 Ah$$

Kapasitas baterai yang banyak terdapat di pasaran adalah 12V 120Ah. Sehingga untuk mendapatkan baterai dengan kapasitas total 562,28 Ah dibutuhkan baterai 12V 120Ah sebanyak 5 buah yang disusun paralel.

Agar dapat digunakan untuk menyuplai kebutuhan listrik sebuah rumah, maka sistem memerlukan komponen tambahan yaitu inverter. Inverter berfungsi untuk mengubah arus listrik DC menjadi arus listrik AC. Kebutuhan inverter besarnya minimal sama dengan total daya instrument yang dinyalakan saat bersamaan. Total daya yang digunakan dalam kajian ini adalah 900 Watt, maka digunakan inverter 1000 W

Analisis Mesin Stirling di Beberapa Kota

Selain di Surabaya, Indonesia memiliki beberapa kota besar yang memiliki potensi energi matahari yang cukup besar. Kota tersebut adalah Jakarta, Bandung, Palembang, Medan, dan Pekanbaru. Dengan menggunakan parameter yang telah ditetapkan sebelumnya, energi yang dihasilkan mesin stirling dengan konsentrator untuk masing-masing kota dapat dilihat pada gambar 15.



Gambar 15. Produksi energi beberapa kota di Indonesia

Berdasarkan tabel 3 diketahui bahwa Surabaya merupakan kota dengan produksi energi terbesar kemudian diikuti oleh Kota Bandung. Sedangkan kota dengan produksi energi paling kecil adalah Kota Pekanbaru. Tetapi dapat dilihat juga bahwa losses receiver pada Kota Surabaya adalah yang terbesar yaitu sebesar 5,95 MWh. Sedangkan kota dengan losses receiver terkecil adalah Kota Medan yaitu sebesar 1,82 MWh.

Tabel 3. Statistik losses beberapa kota di Indonesia

Variabel	Mean	Max	Avg Daily Max
Pekanbaru			
Receiver loss (kWt)	0.2207	2.3511	0.9963
Receiver efficiency (%)	0.2152	0.9764	0.8822
Wind Speed (m/s)	1.3141	3.9	1.9732
Palembang			
Receiver loss (kWt)	0.3014	3.7738	1.4147
Receiver efficiency (%)	0.2044	0.9720	0.8468
Wind Speed (m/s)	1.9316	5.4	2.829
Bandung			
Receiver loss (kWt)	0.4235	5.3047	1.7137
Receiver efficiency (%)	0.2238	0.9747	0.8516
Wind Speed (m/s)	2.0914	6.7	3.1288
Medan			
Receiver loss (kWt)	0.2073	2.4198	1.0123
Receiver efficiency (%)	0.1970	0.9750	0.8592
Wind Speed (m/s)	1.4625	5.2	2.2712
Jakarta			
Receiver loss (kWt)	0.3383	5.5627	1.5892

Variabel	Mean	Max	Avg Daily Max
Receiver efficiency (%)	0.2226	0.9717	0.8516
Wind Speed (m/s)	1.7307	6.9	3.06
Surabaya			
Receiver loss (kWt)	0.6798	10.4142	3.0201
Receiver efficiency (%)	0.2368	0.9739	0.8575
Wind Speed (m/s)	3.4273	10	5.0359

Pada tabel 3 juga dapat dilihat bahwa Kota Pekanbaru memiliki *losses* yang paling kecil. Jika dibandingkan dengan Kota Surabaya, efisiensi *receiver* Kota Pekanbaru lebih besar daripada efisiensi *receiver* Kota Surabaya. Efisiensi *receiver* rata-rata Kota Pekanbaru adalah 88.22% sedangkan efisiensi *receiver* Kota Surabaya adalah 85.75%. Jika dibandingkan dengan semua kota pada tabel tersebut, maka efisiensi *receiver* terbesar adalah Kota Pekanbaru. Hal tersebut sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin maksimum di Kota Pekanbaru yang hanya 3,9 m/s.

Meskipun memiliki efisiensi *receiver* besar, sistem mesin stirling dengan konsentrator di Pekanbaru menghasilkan energi yang jauh lebih sedikit dibandingkan sistem konsentrator mesin stirling di Surabaya. Salah satu faktor yang paling menentukan adalah potensi iradiasi matahari Surabaya jauh lebih besar jika dibandingkan dengan potensi iradiasi matahari di Pekanbaru. Peta potensi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Pada gambar tersebut terlihat jelas bahwa daerah Jawa Timur khususnya Surabaya memiliki warna lebih merah daripada daerah di Pulau Sumatera. Warna merah tersebut mengindikasikan bahwa potensi iradiasi matahari di wilayah tersebut sangat tinggi.

Dengan pertimbangan bahwa energi yang dihasilkan adalah yang paling besar, maka mesin stirling dengan konsentrator lebih layak untuk dibangun di Surabaya. Adapun opsi untuk pembangunan sistem mesin stirling dengan konsentrator di luar Pulau Jawa, maka wilayah tersebut adalah Kota Pekanbaru.

IV. PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan antara lain:

1. Diameter *aperture* yang sesuai untuk sistem mesin stirling dengan konsentrator 1 kW adalah 0,04 m. Produksi energi tahunan yang dihasilkan meningkat dari 1847,61 kWh/tahun

dengan diameter *aperture* 0,12 m menjadi 2011,15 kWh/tahun dengan diameter *aperture* 0,04 m.

2. Efisiensi konsentrator diasumsikan 94%, efisiensi *receiver* diperoleh sebesar 57,88%, efisiensi mesin Stirling sebesar 27,44%, dan efisiensi generator diasumsikan 95%. Dengan demikian, sistem mesin stirling dengan konsentrator secara keseluruhan memiliki efisiensi 14,18%.
3. Sistem mesin stirling dengan konsentrator memerlukan 5 buah baterai 12V 120Ah yang disusun secara paralel dengan inverter 1000W untuk dapat memenuhi kebutuhan rumah tangga golongan 900VA.
4. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh hasil bahwa Kota Surabaya merupakan daerah paling potensial untuk membangun mesin stirling dengan konsentrator 1kW. Sedangkan untuk daerah luar Pulau Jawa, Kota Pekanbaru adalah daerah yang paling potensial untuk membangun sistem mesin stirling dengan konsentrator.

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diharapkan desain yang telah dibuat dapat dikembangkan dan diterapkan untuk menjadi sebuah produk yang nyata dan dapat bermanfaat bagi perkembangan teknologi energi terbarukan ke depan.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, M. H., Sayyaadi, H., Dehghani, S., & Hosseinzade, H. (2013). Designing a solar powered Stirling heat engine based on multiple criteria: Maximized thermal efficiency and power. *Energy Conversion and Management*, 75, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.025>
- Balcombe, P., Rigby, D., & Azapagic, A. (2015). Environmental impacts of microgeneration: Integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage. *Applied Energy*, 139, 245–259. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.034>
- Evalina, N., Putro, B., & Zulfikar, Z. (2020). Analisis Karakteristik Pembangkit Listrik Hot Air Stirling Engine Dengan Bahan Bakar Metanol. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*, 2(2), 89–94.

- <https://doi.org/10.30596/rele.v2i2.4423>
Ferreira, A., Teixeira, S., Teixeira, J., Nunes, M., & Martins, L. (2012). Modeling a Stirling Engine for Cogeneration Applications. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 6. <https://doi.org/10.1115/IMECE2012-88183>
- Gholamalizadeh, E., & Chung, J. D. (2017). Design of the Collector of a Solar Dish-Stirling System: A Case Study. *IEEE Access*, 5, 20754–20762. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758354>
- Kropiwnicki, J., & Furmanek, M. (2020). A theoretical and experimental study of moderate temperature alfa type stirling engines. *Energies*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/en13071622>
- Monné, C., Bravo, Y., Moreno, F., & Muñoz, M. (2014). Analysis of a solar dish-Stirling system with hybridization and thermal storage. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(2–3), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0080-x>
- Moonka, G., Surana, H., & Singh, H. R. (2022). Study on some aspects of Stirling engine: A path to solar Stirling engines. *Materials Today: Proceedings*, 63, 737–744. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.05.107>
- Nuwayhid, R. Y., Mrad, F., & Abu-Said, R. (2001). The realization of a simple solar tracking\concentrator for university research applications. *Renewable Energy*, 24, 207–222. [56uh57ie75ie.pdf](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00056-5)
- Pérez-González, M. A., Pérez-Gutiérrez, A. N., Ramírez-Villaseñor, E. N., & Gonzalez-Lopez, J. M. (2019). Design and construction of an Alfa Type Stirling Engine as a teaching prototype. *ECORFAN Journal-Democratic Republic of Congo*, June, 7–13. <https://doi.org/10.35429/ejdr.2019.8.5.7.13>
- Petrescu, S., Costea, M., Harman, C., & Florea, T. (2002). Application of the Direct Method to irreversible Stirling cycles with finite speed. *International Journal of Energy Research*, 26(7), 589–609. <https://doi.org/10.1002/er.806>
- Rahmalina, D., Lesmana, I. G. E., Suwandi, A., & Rahman, R. A. (2021). Pengembangan Stirling Engine Tipe Piston Bebas Untuk Aplikasi Concentrated Solar Power (Csp). *Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta*, 13(1), 101–108.
- Uropean Commission. (2017). *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#TMY