
Uji Variabilitas Suhu *Flux* Pendingin Terhadap Kinerja Mesin *Stirling*

Zufri Hasrudy Siregar^{*1}, Refiza², Fajar Noer Ramber

¹Prodi Teknik Mesin, Universitas Asahan, Jalan Jend. Ahmad Yani, Kisaran, Sumatera Utara, 21216, Indonesia

²Prodi Teknik Industri, Universitas Al-Azhar Medan, Jl. Pintu Air IV No. 214 Kwala Bekala, Padang Bulan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

³Prodi Teknik Mesin, Universitas Al-Azhar Medan, Jl. Pintu Air IV No. 214 Kwala Bekala, Padang Bulan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

e-mail: ^{*}rudysiregar7@gmail.com, ²refiza61@gmail.com, ³fajamurr112@gmail.com

Abstrak

Energi menjadi semakin penting bagi kebutuhan manusia modern¹², sehingga kesejahteraan sangat bergantung pada jumlah dan kualitas energi yang digunakan secara langsung maupun tidak langsung. Menggunakan mesin *stirling* merupakan alternatif penggunaan mesin bahan bakar. Tujuan penelitian yaitu mengetahui efisiensi mesin dengan bervariasi suhu fluida yang dianalisis terhadap kinerja mesin *stirling*. Didapat kesimpulan bahwa jumlah kalor yang diterima oleh udara pendingin tertinggi 78.03243 J pada temperatur udara pendingin 38°C, dan 22.2638 J pada suhu temperatur fluida pendingin 30°C artinya semakin besar temperature fluida pendingin maka semakin besar pula jumlah kalor yang diterima oleh udara pendingin, Nilai efektivitas radiator tertinggi adalah 87,11 persen pada suhu fluida pendingin 38 derajat Celcius, dan nilai efektivitas terendah adalah 57,8 persen pada suhu 30 derajat Celcius. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi suhu fluida pendingin, semakin besar efektivitas radiator, unjuk kinerja mesin *stirling* paling tinggi terjadi pada 38°C, dengan torsi 0,647558672 N.m, daya 17.69898043 W, dan efisiensi 75.5%. Unjuk kinerja mesin *stirling* terendah terjadi pada 30°C, dengan torsi 0.592975889 N.m, daya 14.84101331 W, dan efisiensi 71.1%.

Kata kunci mesin *Stirling*, flux pendingin, efisiensi, daya, torsi

Abstract

Energy is becoming increasingly crucial to the needs of modern man¹², so well-being depends mainly on the amount and quality of energy used directly or indirectly. Using a *sterling* engine is an alternative to using a fuel engine. The purpose of the study is to determine the engine's efficiency by varying the temperature of the fluid analyzed against the performance of the *Stirling* machine. It was concluded that the amount of heat received by the highest cooling air was 78.03243 J at a cooling air temperature of 38°C and 22.2638 J at a cooling fluid temperature of 30°C, meaning that the greater the cooling fluid temperature, the greater the amount of heat received by the cooling air, The highest radiator effectiveness value was 87.11 per cent at a cooling fluid temperature of 38 degrees Celsius, and the lowest effectiveness value was 57.8 per cent at 30 degrees Celsius. Thus, it can be concluded that the higher the temperature of the cooling fluid, the greater the effectiveness of the radiator; the highest performance of the *Stirling* engine occurs at 38°C, with a torque of 0.647558672 N.m, power of 17.69898043 W, and efficiency of 75.5%. The lowest *Stirling* engine performance occurred at 30°C, with 0.592975889 N.m of torque, 14.84101331 W of power, and 71.1% efficiency.

Keywords *Stirling* engine, variation of lubricant, oil, engine power

1. PENDAHULUAN

Energi menjadi semakin penting bagi kebutuhan manusia modern [1][2], sehingga kesejahteraan sangat bergantung pada jumlah dan kualitas energi yang digunakan secara langsung maupun tidak langsung. Selain itu, energi merupakan komponen penunjang yang sangat penting dalam proses pertumbuhan ekonomi dan ikut menentukan keberhasilan pembangunan di bidang lain.[3][4].

Semua energi yang ada di Bumi berasal dari energi matahari, serta gas alam, batu bara, minyak, kayu, batu bara, dan natural gas [5], Di Indonesia, penggunaan energi terbarukan hanya terbatas pada tenaga air dan tenaga angin [6]. Energi panas dan kerja, energi kimia, listrik, dan nuklir adalah sumber energi alam lainnya, serta biaya produksi energi terbarukan belum kompetitif dibandingkan dengan energi konvensional [7] [8]. Namun, energi fosil, yang ketersediaannya semakin menipis karena eksploitasi besar-besaran, masih menjadi sumber utama energi listrik [9] [10]. Kita akan mengalami defisit energi jika tidak ada tindakan cepat untuk menyelesaikannya. Mesin Stirling adalah salah satu inovasi energi baru yang muncul seiring perkembangan zaman.[11][12][13].

Mesin stirling adalah mesin pembakaran luar siklus tertutup dengan perubahan panas dan tekanan. Saat suhunya meningkat, piston displacer bergerak dan mengkompresi udara dingin, menghasilkan volume gas yang lebih rendah.[13][14]. Desain *stirling engine* tipe gamma dipilih sebagai desain penelitian karena keunggulannya, yaitu desain yang sederhana dan gesekan yang rendah[15][16], menurut [17] stirling engine tipe gamma menghasilkan efisiensi maksimum 1,5% pada putaran 198 rpm saat menggunakan daya piston berbahan duralumin selama 30 menit[18].

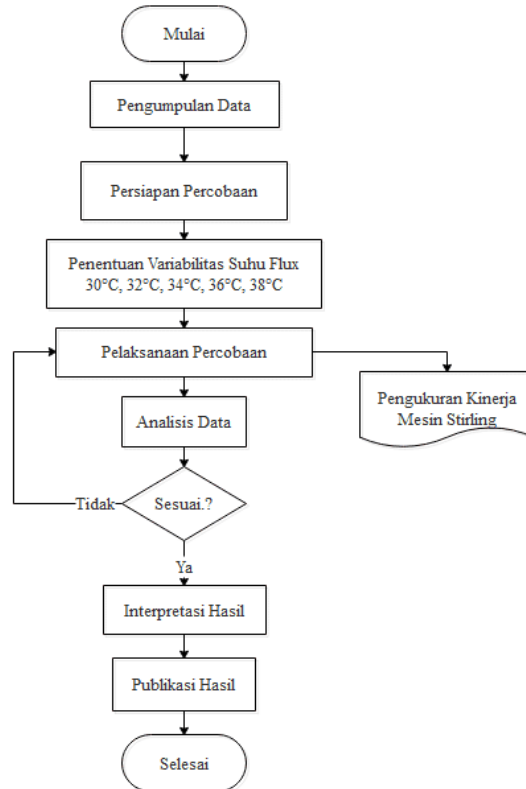
Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan dimana sebelumnya sudah dilakukan penelitian sejenis yaitu Pengaruh Penambahan Regenerator Terhadap Performansi Mesin Stirling Tipe Gamma [19] dan Pengaruh variasi temperatur sumber panas terhadap temperatur udara dalam Heater Mesin Stirling [20].

2. METODE PENELITIAN

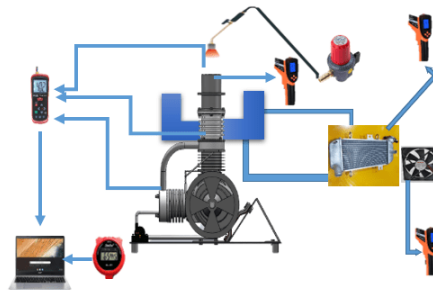
Penelitian dilakukan dengan eksperimental analitik yaitu melakukan analisis dan bervariasi suhu fluida pendingin dengan suhu 30°C, 32°C, 34°C, 36°C, 38°C. Sehingga variabel bebasnya adalah suhu, variabel terikatnya kinerja mesin stirling (torsi, daya dan efisiensi). Gambar 1 dan gambar 2 menunjukkan diagram alir pada penelitian ini dan Skema alat uji.

2.1 Langkah Pengujian

1. Mempersiapkan sumber api kompor gas yang akan digunakan untuk pengujian mesin Stirling kemudian diletakkan di bagian ujung silinder panas.
2. Memasang semua alat ukur, seperti *thermocouple* di sistem pendingin dan memasang *thermostat* di radiator dan pompa.
3. *Tachometer* diletakkan di depan roda gila untuk mengukur r.p.m. yang dihasilkan.
4. Pengambilan data pengujian suhu ruang panas, suhu ruang dingin, r.p.m., suhu masuk dan suhu keluar dari fluida pendingin ke radiator dilakukan secara bersamaan. Pembacaan dilakukan dimulai dari sumber panas dihidupkan pada waktu pemanasan ± 5 menit.
5. Melakukan pencatatan beberapa parameter, yaitu: suhu panas, suhu dingin, dan r.p.m.



Gambar 1. Diagram Alir



Gambar 2 Skema Alat Uji

2.2 Parameter unjuk kerja mesin Stirling

1. Temperatur sisi dingin dan sisi panas

Untuk pengujian ini, nilai suhu untuk kedua bagian panas dan dingin harus diketahui. Karena suhu yang terlalu tinggi akan menghentikan siklus pemuaian dan penyusutan mesin, ini dilakukan untuk memastikan bahwa mesin tetap beroperasi. Persamaan ini dapat digunakan untuk menghitung variasi suhu. [21]

$$\Delta T = T \text{ sisi panas} - T \text{ sisi dingin} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan : ΔT = perbedaan temperatur ($^{\circ}\text{C}$) atau ($^{\circ}\text{K}$)

T sisi panas = temperatur sisi panas ($^{\circ}\text{C}$)

T sisi dingin = temperatur sisi dingin ($^{\circ}\text{C}$)

2. RPM (*Revolution Per Minute*)

Kemampuan kecepatan putaran suatu objek dalam suatu waktu, atau RPM, yang diwakili oleh ω , adalah kecepatan sudut. Ini digunakan untuk menunjukkan rotasi suatu objek dalam lintasan melingkar [22]. Biasanya diwakili dengan laju perubahan waktu dari perpindahan sudut. Sesuatu yang berputar biasanya ditentukan oleh garis tegak lurus terhadap arahnya. Tachometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur r.p.m.

3. Torsi pada *Flywheel*

Benda bergerak sesuai dengan gayanya. Istilah "momen gaya" atau "torsi" digunakan untuk menggambarkan bagaimana sesuatu bergerak atau berputar. Berapa besar momen gaya (torsi) yang dikeluarkan, serta jarak antara posisi dan sumbu putaran gaya, bervariasi. Torsi disebabkan oleh gaya kopel, yang memuntir batang terhadap sumbu longitudinalnya. Untuk mengetahui daya poros motor bakar, Anda pertama-tama harus mengetahui torsinya. Alat yang disebut dinamometer digunakan untuk mengukur torsi pada poros motor bakar. Bekerja dengan memberi beban yang berlawanan terhadap arah putaran sampai putaran mendekati 0 r.p.m., yang sama dengan torsi poros, mekanisme ini berfungsi. Torsi adalah perkalian antara gaya dengan jaraknya [23]

$$T = I \cdot \omega \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

- T = Torsi mesin (N.m)
- I = momen inersia (kg m/s)
- ω = percepatan (rad/s²)

Sedangkan untuk menentukan momen inersia perhitungannya adalah sebagai berikut

$$I = 0.5 m r^2 \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

- I = momen inersia (kg m/s)
- m = massa *flywheel* (kg)
- r^2 = radius (m/s²)

4. Daya yang dihasilkan mesin stirling

Setelah mendapatkan nilai torsi barulang kiutra dapat menghitung besaar daya yang dapat dihasilkan oleh mesin stirling tersebut. Besar daya yang dihasilkan dapat dihiitung dengan persamaan berikut ;

$$P = \frac{2\pi nT}{60} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

- P = Daya maksimum (watt)
- T = Torsi (Nm)
- n = RPM maksimum

5. Efisiensi Termal

Untuk menentukan nilai efisiensi termal pada mesin stirling dapat di hitung dengan menggunakan dibawah ini :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_c}{T_e} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan :

- η_{th} = Efisiensi Termal (°C)
- Tc = suhu gas kompresi (°C)

Te = suhu gas ekspansi ($^{\circ}\text{C}$)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Menghitung jumlah kalor yang diterima udara pendingin

Pengukuran setiap suhu pada penelitian ini menggunakan thermocouple digital sedangkan untuk pengukuran suhu T_{c1} , T_{c2} , T_{u1} , T_{u2} , diambil dengan thermometer digital yang merupakan fasilitas tambahan pada anemometer digital. Berdasarkan pada tujuan pada penelitian ini untuk mengetahui laju perpindahan panas pada udara pendingin, pengambilan data diambil dari nilai temperatur rata-rata dari setiap temperature fluida pendingin yang sudah ditetapkan yaitu 30°C , 32°C , 34°C , 36°C , 38°C .

Tabel 1 Jumlah kalor yang diterima udara pendingin

Th1	Tc	Te	Th2	Ths	Ter1	Ter2	Tu1	Tu2	rpm
30	28,4	98.3	29,3	673,4	28,1	29,2	28	30	239
32	28,2	104.1	31,1	758,1	28,1	30,8	28	32	248
34	27,9	106.1	32,9	762,3	29,3	32,6	29	34	253
36	27,6	109.1	35,1	768,2	29,3	35,1	30	36	257
38	27,2	110.5	37,3	773,1	29,3	36,8	31	38	261

Kecepatan laju aliran udara ditetapkan 1,3m/s dengan menggunakan rumus yaitu :

$$Q_u = m_u \times c_{p_u} \times (T_{u2} - T_{u1})$$

Dimana :

Q_u = jumlah kalor yang diterima oleh udara pendingin (W)

m_u = massa udara yang mengalir (kg/min)

c_{p_u} = kalor jenis udara ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)

T_{u1} = temperature udara masuk kipas ($^{\circ}\text{C}$)

T_{u2} = temperature udara keluar kipas ($^{\circ}\text{C}$)

Sedangkan:

$$m_u = V_u \times \rho_u$$

Dimana:

V_u = volume aliran udara pendingin (m^3/s)

ρ_u = massa jenis udara (kg/m^3)

Temperatur udara rata rata pada temperature fluida pendingin 30°C

$$T \text{ rata-rata} = \frac{T_{u1} + T_{u2}}{2}$$

Dimana :

$$T_{u1} = 28^{\circ}\text{C} = 301^{\circ}\text{K}$$

$$T_{u2} = 30^{\circ}\text{C} = 303^{\circ}\text{K}$$

$$T \text{ rata-rata} = \frac{301 + 303}{2} = 302 \text{ k}$$

Sedangkan untuk mencari nilai m_u menggunakan rumus :

$$m_u = V_u \times \rho_u$$

Nilai ρ_u di dapat dari tabel udara untuk temperature 302 K adalah

$$\rho_u = 1,1770 \text{ kg/m}^3$$

Mencari nilai $V_u = V \cdot A$

Dimana :

V = kecepatan laju aliran udara 1,3 m/s

A = luas penampang kipas $\frac{1}{4} \pi \cdot d^2$

$$= \frac{1}{4} \pi \cdot 0,096^2$$

$$= 0,00723456 \text{ m}^2$$

V_u = 1,3 m/s. $0,00723456 \text{ m}^2$

$$= 0,00940493 \text{ m}^2/\text{s}$$

m = $0,00940493 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 1,177 \text{ kg/m}^3$

$$= 0,01107 \text{ kg/s}$$

Nilai C_{pu} pada temperature 302 K didapat dari tabel udara :

$$C_{pu} = 1007 \text{ J/kg.K}$$

Mencari selisih temperature ΔT

$$\Delta T = T_{u2} - T_{u1}$$

$$= 303 - 301$$

$$= 2 \text{ K}$$

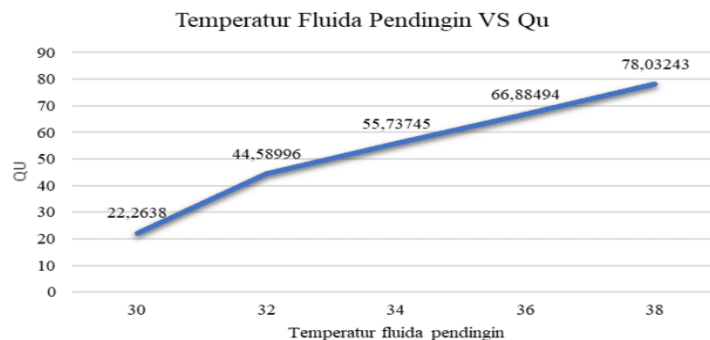
Maka :

$$Q_u = m_u \times c_{pu} \times (T_{u2} - T_{u1})$$

$$Q_u = 0,01107 \text{ kg/s} \cdot 1007 \text{ J/kg K} \cdot 2 \text{ K}$$

$$= 22,2638 \text{ J}$$

Untuk perhitungan pada temperature fluida pendingin selanjutnya yaitu 32°C , 34°C , 36°C , 38°C .



Gambar 2 Grafik hubungan fluida dan Q_u

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa untuk nilai Q_u tertinggi yaitu 78.03243 J pada temperature fluida pendingin 38°C dan untuk nilai Q_u terendah yaitu 22.2638 J pada

temperature fluida pendingin 30 °C. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah kalor yang diterima oleh udara pendingin berbanding lurus dengan temperature fluida pendingin tersebut.

3.2 Perhitungan Efektifitas Radiator Pada Setiap Temperatur Fluida Pendingin

Data rata – rata hasil penelitian untuk efektifitas radiator yaitu 30°C , 32°C, 34°C, 36°C, 38°C. Untuk efektifitas radiator dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{(T_{cr2} - T_{cr1})}{(T_{h1} - T_{cr1})}$$

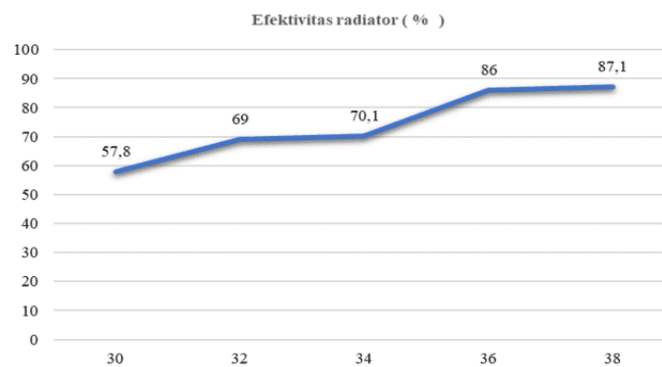
Dimana :

- ε = nilai efektifitas radiator
- T_{cr1} = temperature udara di depan radiator
- T_{cr2} = temperatur udara dibelakang radiator
- T_{h1} = temperatur air masuk ke radiator

Untuk temperature fluida pendingin pendingin 30°C maka efektifitas radiatornya sebagai berikut

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{(T_{cr2} - T_{cr1})}{(T_{h1} - T_{cr1})} \\ \varepsilon &= \frac{29,2 - 28,1}{30 - 28,1} \\ \varepsilon &= 0,578 \times 100\% \\ \varepsilon &= 57,8\% \end{aligned}$$

Untuk hasil perhitungan diubah ke bentuk decimal dengan di kalikan 100 % pada perhitungan selanjutnya pada temperature fluida pendingin selanjutnya yaitu pada temperature 32 °C , 34 °C, 36 °C, 38 °C.



Gambar 3 Grafik Efektifitas Radiator Pada Setiap Temperatur Fluida Pendingin

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa efektifitas radiator tertinggi yaitu 87.1% pada suhu fluida pendingin 38°C sedangkan untuk efektifitas radiator terendah yaitu 57.8% pada suhu fluida pendingin 30°C. maka semakin tinggi tempeatur fluida pendingin maka semakin tinggi pula efektifitas radiatornya.

3.3 Performansi mesin stirling

Untuk mengetahui torsi mesin stirling dapat di cari dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$T = I \cdot \omega$$

Keterangan :

- T = Torsi mesin (N.m)
- I = momen inersia (kg m/s)
- ω = percepatan (rad/s²)

Sedangkan untuk menentukan momen inersia perhitungannya adalah sebagai berikut

$$I = 0.5 m r^2$$

Keterangan :

- I = momen inersia (kg m/s)
- m = massa flywheel (kg)
- r^2 = radius (m/s²)

$$I = 0.5 m r^2$$

$$= 0,5 \cdot 2,6 \cdot 0,135$$

$$= 0,0236925 \text{ kg.m/s.}$$

$$\omega = \frac{2 \pi \times n}{60}$$

$$\omega = \frac{2 \pi \times 239}{60}$$

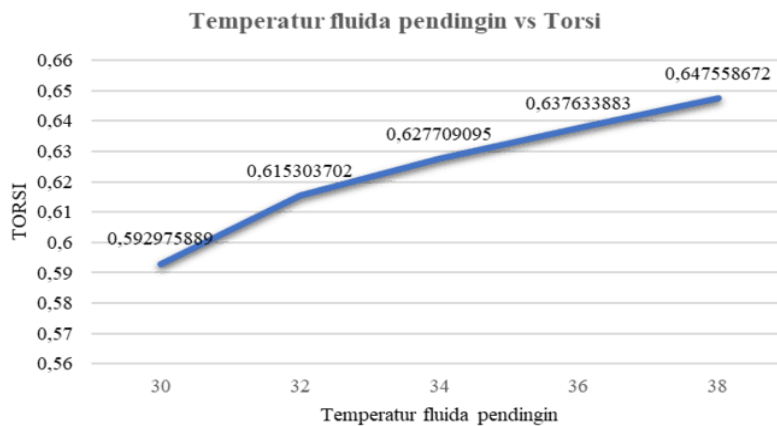
$$\omega = 25.0280 \text{ rad/s}^2$$

$$T = I \cdot \omega$$

$$T = 0.0236925 \times 25.0280$$

$$T = 0.592975889 \text{ N.m}$$

Untuk perhitungan selanjutnya yaitu pada temperature fluida pendingin 32 °C , 34 °C, 36 °C, 38 °C.



Gambar 4 Grafik Temperatur vs Torsi

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa nilai torsi tertinggi yaitu 0.647558672 N.m pada temperature fluida opendingin 38°C dan nilai torsi terendah yaitu 0.592975889 N.m pada temperature 30°C. Menghitung daya yang dihasilkan mesin stirling Untuk menghitung daya yang dihasilkan mesin stirling dapat dihitung menggunakan rumus berikut

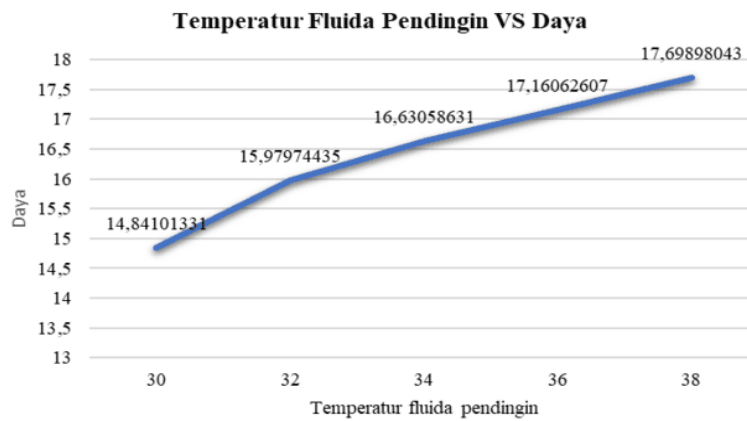
$$P = \frac{2\pi nT}{60}$$

Keterangan :

P = Daya maksimum (watt)
 T = Torsi (Nm)
 N = RPM maksimum

$$P = \frac{2 \times \pi \times 239 \times 0.59297589}{60}$$

$$P = 14.84101331 \text{ W}$$



Gambar 5. Grafik Temperatur vs Daya

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa nilai daya tertinggi yaitu 17.69898043 W pada temperature fluida 38°C dan nilai daya terendah yaitu 14.84101331 W pada temperature fluida pendingin 30°C Menghitung efisiensi mesin stirling Untuk menghitung efisiensi mesin stirling dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_c}{T_e}$$

Keterangan :

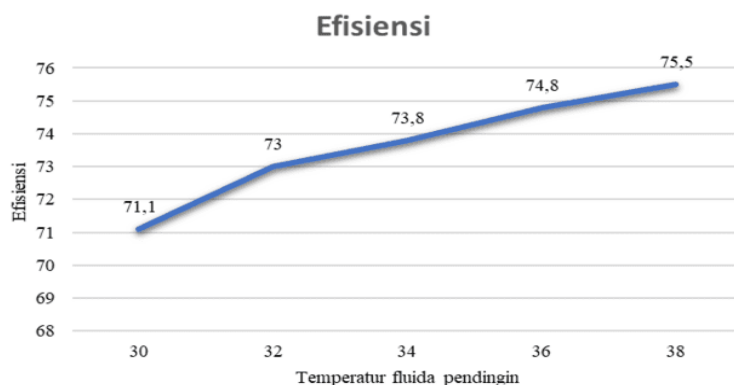
η_{th} = Efisiensi Termal
 T_c = suhu gas kompresi ($^{\circ}K$)
 T_e = suhu gas ekspansi ($^{\circ}K$)

$$\eta_{th} = 1 - \frac{28.4}{98.3}$$

$$= 1 - 0.288$$

$$= 0.711 \times 100\%$$

$$= 71.1 \%$$



Gambar 6. Grafik Temperatur vs Efisiensi

Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa untuk nilai efisiensi tertinggi yaitu 75.5 % pada temperature fluida pendingin 38°C dan untuk nilai efisiensi terendah yaitu 71.1 % pada temperature fluida pendingin 30°C.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan antara lain:

1. Jumlah kalor yang diterima udara pendingin yang tertinggi yaitu 78.03243 J pada temperature udara pendingin 38°C. dan untuk jumlah kalor yang diterima oleh udara pendingin terendah yaitu 22.2638 J pada suhu temperature fluida pendingin 30°C. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar temperature fluida pendingin maka semakin besar pula jumlah kalor yang diterima oleh udara pendingin
2. Nilai efektivitas radiator yang tertinggi yaitu 87.11 % pada suhu temperature fluida pendingin 38°C dan nilai efektivitas radiator terendah yaitu 57.8% pada temperature fluida pendingin 30°C. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar temperature fluida pendingin maka semakin besar pula efektivitas radiator yang didapatkan.
3. Unjuk kinerja mesin stirling yang terbesar yaitu pada temperature 38°C dengan nilai torsi 0.647558672 N.m, daya 17.69898043 W, efisiensi 75.5 % sedangkan untuk unjuk kinerja mesin stirling yang terendah yaitu pada temperature 30°C dengan nilai torsi 0.592975889 N.m, daya 14.84101331 W, dan efisiensi 71.1 %. Dari hasil perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar temperature fluida pendingin maka semakin besar pula unjuk kinerja mesin stirling tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Prodi Teknik mesin Universitas Al-Azhar medan yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian, kemudian terima kasih kepada Universitas Asahan yang memberikan izin kepada peneliti untuk melaksanakan penelitiannya

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, no. January, pp. 38–50, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- [2] A. C. Serban and M. D. Lytras, "Artificial intelligence for smart renewable energy sector in europe - Smart energy infrastructures for next generation smart cities," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77364–77377, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990123.
- [3] Z. Ren and J. Zhang, "Digital Economy, Clean Energy Consumption, and High-Quality Economic Development: The Case of China," *Sustainability*, vol. 15, no. 18, p. 13588, 2023, doi: 10.3390/su151813588.
- [4] Vo, Vo, and Le, "CO2 Emissions, Energy Consumption, and Economic Growth: New Evidence in the ASEAN Countries," *J. Risk Financ. Manag.*, vol. 12, no. 3, p. 145, 2019, doi: 10.3390/jrfm12030145.
- [5] T. Z. Ang, M. Salem, M. Kamarol, H. S. Das, M. A. Nazari, and N. Prabaharan, "A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 43, no. August, p. 100939, 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100939.
- [6] S. W. Yudha, B. Tjahjono, and P. Longhurst, "Unearthing the Dynamics of Indonesia's Geothermal Energy Development," *Energies*, vol. 15, no. 14, pp. 1–18, 2022, doi: 10.3390/en15145009.
- [7] T. Ahmad, H. Zhang, and B. Yan, "A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 55, no. October 2019, p. 102052, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102052.
- [8] H. Mahmood, "Nuclear energy transition and CO2 emissions nexus in 28 nuclear electricity-producing countries with different income levels," *PeerJ*, vol. 10, no. 4, pp. 1–22, 2022, doi: 10.7717/peerj.13780.
- [9] M. Blondeel, M. J. Bradshaw, G. Bridge, and C. Kuzemko, "The geopolitics of energy system transformation: A review," *Geogr. Compass*, vol. 15, no. 7, pp. 1–22, 2021, doi: 10.1111/gec3.12580.
- [10] S. Kukharets *et al.*, "The Experimental Study of the Efficiency of the Gasification Process of the Fast-Growing Willow Biomass in a Downdraft Gasifier," *Energies*, vol. 16, no. 2, 2023, doi: 10.3390/en16020578.
- [11] P. J. Zabalaga, E. Cardozo, L. A. C. Campero, and J. A. A. Ramos, "Performance analysis of a stirling engine hybrid power system," *Energies*, vol. 13, no. 4, 2020, doi: 10.3390/en13040980.
- [12] Z. H. Siregar, J. Jufrizal, and B. K. Putra, "Pengaruh Penambahan Regenerator Terhadap Performansi Mesin Stirling Tipe Gamma," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, p. 194, 2022, doi: 10.35308/jmkn.v8i2.5957.
- [13] Z. H. Siregar *et al.*, "Variasi pelumas pada torak displacer terhadap kinerja mesin Stirling," *J. Mekanova*, vol. 9, no. 1, pp. 140–151, 2023, doi: 10.35308/jmkn.v9i1.7471.
- [14] G. Antonakos, I. Koronaki, and G. Domenikos, "Investigation of the Performance of Thermodynamic Analysis Models for a Cryocooler PPG-102 Stirling Engine," *energies*, vol. 16, no. 19, pp. 1–23, 2023, doi: 10.3390/en16196815.

-
- [15] A. Sowale *et al.*, "Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in an energy recovery system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 165, no. January, pp. 528–540, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.03.085.
- [16] K. Khatke, K. D. Pandey, K. Gupta, and M. K. Dwivedi, "Thermodynamic Analysis of Stirling Engine and its Performance Challenges : A Review," *J. Automob. Eng. Apl.*, vol. 7, no. 1, pp. 28–36, 2020, [Online]. Available: <https://engineeringjournals.stmjournals.in/index.php/JoAEA/article/view/3707>
- [17] S. Ranieri, G. A. O. Prado, and B. D. MacDonald, "Efficiency reduction in stirling engines resulting from sinusoidal motion," *Energies*, vol. 11, no. 11, pp. 1–14, 2018, doi: 10.3390/en11112887.
- [18] C. Perozziello, L. Grosu, and B. M. Vaglieco, "Free-piston stirling engine technologies and models: A review," *Energies*, vol. 14, no. 21, 2021. doi: 10.3390/en14217009.
- [19] Z. H. Siregar, J. Jufrizal, and B. K. Putra, "Pengaruh penambahan regenerator terhadap performansi mesin stirling tipe gamma," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, p. 194, 2022, doi: 10.35308/jmkn.v8i2.5957.
- [20] Z. H. Siregar, J. Jufrizal, M. Hasanah, and M. . Agusdiandy, "Pengaruh variasi temperatur sumber panas terhadap temperatur udara dalam Heater Mesin Stirling," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 1, pp. 11–16, 2022, [Online]. Available: <http://e-journals.irapublishing.com/index.php/IRAJTMA/article/view/1>
- [21] M. Muhanif, K. Umurani, and F. A. A. Nasution, "Analisis Termoelektrik Generator (TEG) sebagai pembangkit listrik Bersekala kecil terhadap perbedaan temperatur," *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, pp. 26–32, 2022, doi: 10.30596/rmme.v5i1.10260.
- [22] Y. Erdoğan, M. İ. Yıldız, and O. E. Kök, "Correlating Rate of Penetration with the Weigth on Bit, Rotation per Minute, Flow Rate and Mud Weight of Rotary Drilling," *Nat. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 378–385, 2018, doi: 10.28978/nesciences.469298.
- [23] A. Tegtmeier Pedersen and M. Courtney, "Flywheel calibration of a continuous-wave coherent Doppler wind lidar," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, no. 2, pp. 889–903, 2021, doi: 10.5194/amt-14-889-2021.
- [1] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, no. January, pp. 38–50, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- [2] A. C. Serban and M. D. Lytras, "Artificial intelligence for smart renewable energy sector in europe - Smart energy infrastructures for next generation smart cities," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77364–77377, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990123.
- [3] Z. Ren and J. Zhang, "Digital Economy, Clean Energy Consumption, and High-Quality Economic Development: The Case of China," *Sustainability*, vol. 15, no. 18, p. 13588, 2023, doi: 10.3390/su151813588.
- [4] Vo, Vo, and Le, "CO2 Emissions, Energy Consumption, and Economic Growth: New Evidence in the ASEAN Countries," *J. Risk Financ. Manag.*, vol. 12, no. 3, p. 145, 2019, doi: 10.3390/jrfm12030145.
- [5] T. Z. Ang, M. Salem, M. Kamarol, H. S. Das, M. A. Nazari, and N. Prabakaran, "A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 43, no. August, p. 100939, 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100939.
-

-
- [6] S. W. Yudha, B. Tjahjono, and P. Longhurst, "Unearthing the Dynamics of Indonesia's Geothermal Energy Development," *Energies*, vol. 15, no. 14, pp. 1–18, 2022, doi: 10.3390/en15145009.
- [7] T. Ahmad, H. Zhang, and B. Yan, "A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 55, no. October 2019, p. 102052, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102052.
- [8] H. Mahmood, "Nuclear energy transition and CO2 emissions nexus in 28 nuclear electricity-producing countries with different income levels," *PeerJ*, vol. 10, no. 4, pp. 1–22, 2022, doi: 10.7717/peerj.13780.
- [9] M. Blondeel, M. J. Bradshaw, G. Bridge, and C. Kuzemko, "The geopolitics of energy system transformation: A review," *Geogr. Compass*, vol. 15, no. 7, pp. 1–22, 2021, doi: 10.1111/gec3.12580.
- [10] S. Kukharets *et al.*, "The Experimental Study of the Efficiency of the Gasification Process of the Fast-Growing Willow Biomass in a Downdraft Gasifier," *Energies*, vol. 16, no. 2, 2023, doi: 10.3390/en16020578.
- [11] P. J. Zabalaga, E. Cardozo, L. A. C. Campero, and J. A. A. Ramos, "Performance analysis of a stirling engine hybrid power system," *Energies*, vol. 13, no. 4, 2020, doi: 10.3390/en13040980.
- [12] Z. H. Siregar, J. Jufrizal, and B. K. Putra, "Pengaruh Penambahan Regenerator Terhadap Performansi Mesin Stirling Tipe Gamma," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, p. 194, 2022, doi: 10.35308/jmkn.v8i2.5957.
- [13] Z. H. Siregar *et al.*, "Variasi pelumas pada torak displacer terhadap kinerja mesin Stirling," *J. Mekanova*, vol. 9, no. 1, pp. 140–151, 2023, doi: 10.35308/jmkn.v9i1.7471.
- [14] G. Antonakos, I. Koronaki, and G. Domenikos, "Investigation of the Performance of Thermodynamic Analysis Models for a Cryocooler PPG-102 Stirling Engine," *energies*, vol. 16, no. 19, pp. 1–23, 2023, doi: 10.3390/en16196815.
- [15] A. Sowale *et al.*, "Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in an energy recovery system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 165, no. January, pp. 528–540, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.03.085.
- [16] K. Khatke, K. D. Pandey, K. Gupta, and M. K. Dwivedi, "Thermodynamic Analysis of Stirling Engine and its Performance Challenges : A Review," *J. Automob. Eng. Apl.*, vol. 7, no. 1, pp. 28–36, 2020, [Online]. Available: <https://engineeringjournals.stmjournals.in/index.php/JoAEA/article/view/3707>
- [17] S. Ranieri, G. A. O. Prado, and B. D. MacDonald, "Efficiency reduction in stirling engines resulting from sinusoidal motion," *Energies*, vol. 11, no. 11, pp. 1–14, 2018, doi: 10.3390/en11112887.
- [18] C. Perozziello, L. Grosu, and B. M. Vaglieco, "Free-piston stirling engine technologies and models: A review," *Energies*, vol. 14, no. 21, 2021. doi: 10.3390/en14217009.
- [19] Z. H. Siregar, J. Jufrizal, and B. K. Putra, "Pengaruh penambahan regenerator terhadap performansi mesin stirling tipe gamma," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, p. 194, 2022, doi: 10.35308/jmkn.v8i2.5957.
- [20] Z. H. Siregar, J. Jufrizal, M. Hasanah, and M. . Agusdiandy, "Pengaruh variasi temperatur sumber panas terhadap temperatur udara dalam Heater Mesin Stirling," *IRA*
-

-
- J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 1, pp. 11–16, 2022, [Online]. Available: <http://e-journals.irapublishing.com/index.php/IRAJTMA/article/view/1>
- [21] M. Muhanif, K. Umurani, and F. A. A. Nasution, "Analisis Termoelektrik Generator (TEG) sebagai pembangkit listrik Bersekala kecil terhadap perbedaan temperatur," *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, pp. 26–32, 2022, doi: 10.30596/rmme.v5i1.10260.
- [22] Y. Erdoğan, M. İ. Yıldız, and O. E. Kök, "Correlating Rate of Penetration with the Weigth on Bit, Rotation per Minute, Flow Rate and Mud Weight of Rotary Drilling," *Nat. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 378–385, 2018, doi: 10.28978/nesciences.469298.
- [23] A. Tegtmeier Pedersen and M. Courtney, "Flywheel calibration of a continuous-wave coherent Doppler wind lidar," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, no. 2, pp. 889–903, 2021, doi: 10.5194/amt-14-889-2021.
-