

Pengujian Kinerja Cooling Water untuk Mesin Stirling tipe Gamma Skala Kecil

Cooling Water Performance Testing for Small Scale Gamma Stirling Engine

Indra Prasetyo¹, Jufrizal^{1*}, Supriatno¹

¹Prodi Teknik Mesin, Universitas Medan Area, Medan Estate, Sumatera Utara, 20223, Indonesia

*Corresponding author: jufrizal@staff.uma.ac.id

Diterima: 06-10-2024

Disetujui: 27-11-2024

Dipublikasikan: 30-12-2024

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan menganalisis kinerja cooling water pada mesin Stirling tipe Gamma skala kecil. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan eksperimental. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu air masuk berada pada 27,6 °C, sementara suhu rata-rata air keluar mencapai 92,33 °C setelah pengujian selama 60 menit. Cooling water dengan suhu masuk tersebut mampu menurunkan suhu rata-rata sumber panas dari 484,51 °C menjadi 64,78 °C pada sisi ruang kompresi. Pada aliran udara sebesar 0,006 m³/s, efektivitas pendingin rata-rata tercatat sebesar 13%, dengan nilai tertinggi 19,1% pada menit ke-55 pengujian. Simpulan dari penelitian ini adalah cooling water efektif dalam menurunkan suhu sumber panas dan memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi termal pada mesin Stirling tipe Gamma skala kecil.

Kata Kunci: Kinerja cooling water, Mesin Stirling, Temperatur kompresi, Efektivitas, Efisiensi termal.

Abstract

This study aims to evaluate and analyze the performance of cooling water in a small-scale Gamma-type Stirling engine. The research method employed was an experimental approach. The test results show that the inlet water temperature was 27.6 °C, while the average outlet water temperature reached 92.33 °C after 60 minutes of testing. Cooling water with an inlet temperature of 27.6 °C reduced the average heat source temperature from 484.51 °C to 64.78 °C on the compression chamber side. At an airflow rate of 0.006 m³/s, the average cooling effectiveness was recorded at 13%, with the highest value of 19.1% observed at the 55th minute of testing. This study concludes that cooling water effectively reduces the heat source temperature and improves thermal efficiency in a small-scale Gamma-type Stirling engine.

Keywords: Cooling water performance, Stirling engine, Compression temperature, Effectiveness, Thermal efficiency.

1. Pendahuluan

Penurunan produksi energi fosil, khususnya minyak bumi, serta komitmen global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca telah mendorong pemerintah untuk meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan sebagai bagian dari upaya menjaga ketahanan energi. Hal ini memperkuat pentingnya penerapan langkah-langkah penghematan energi di berbagai sektor, salah satunya melalui pengembangan sistem gabungan panas dan listrik (*combined heat and power system* atau CHP) yang memungkinkan penggunaan satu sumber bahan bakar untuk menghasilkan panas dan listrik secara bersamaan.

Mesin Stirling telah dipilih sebagai salah satu teknologi yang layak dikembangkan karena kemampuannya memanfaatkan berbagai sumber panas, termasuk bahan bakar terbarukan, panas limbah, dan energi matahari. Mesin ini memiliki keunggulan seperti pembakaran yang terkendali, masa pakai yang panjang, kebutuhan perawatan yang minimal, efisiensi tinggi, kebisingan rendah, getaran kecil, serta emisi yang rendah (Jufrizal et al. 2022a; 2022b; 2023). Salah satu tantangan utama dalam meningkatkan efisiensi mesin Stirling adalah proses pendinginan pada sisi dingin. Untuk meningkatkan perpindahan panas, sering kali digunakan sirip (*fins*) atau metode pendinginan tambahan. Namun, metode pendinginan pasif yang hanya mengandalkan kontak langsung dengan udara luar tidak cukup untuk mencapai efisiensi tinggi, khususnya untuk aplikasi dengan kapasitas daya menengah hingga besar. Oleh karena itu, sistem pendingin berbasis air (*cooling water*) menjadi solusi yang lebih efektif untuk menghasilkan perbedaan suhu yang signifikan.

Pemilihan mesin Stirling tipe gamma dalam pengujian kinerja sistem pendingin air pada mesin Stirling tipe gamma skala kecil didasarkan pada karakteristik teknis dan praktisnya. Mesin Stirling menawarkan operasi yang stabil dan konsisten, yang mempermudah prediksi perubahan suhu dan beban termal selama pengujian. Dengan efisiensi termal yang tinggi, mesin ini menghasilkan panas dalam jumlah besar yang harus dikelola oleh sistem pendingin, sehingga memberikan tantangan yang relevan untuk menguji kinerja *cooling water*. Tujuan utama pendinginan adalah menurunkan suhu fluida kerja, sehingga tekanan di sisi dingin berkurang dan piston dapat bergerak lebih mudah untuk melakukan kompresi fluida. Mesin Stirling bekerja berdasarkan perbedaan suhu (ΔT) antara dua silinder, di mana semakin besar perbedaan suhu, semakin tinggi efisiensi mesin (Simanjuntak & Tambunan, 2021). Sistem pendingin memainkan peran penting dalam mempertahankan gradien suhu untuk memastikan kinerja optimal mesin Stirling. Dalam penggunaannya, sistem pendingin berbasis air sering kali diperlukan untuk menangani beban termal yang jauh lebih besar dibandingkan mesin pembakaran internal konvensional. Desain aliran fluida kerja pada sisi pendingin mirip dengan aliran pada pemanas, namun dengan suhu yang lebih rendah (Graham, 1980).

Penelitian sebelumnya menggunakan mesin Stirling tipe gamma dengan variasi debit air pada silinder pendingin, yaitu 0,3 l/menit, 0,6 l/menit, dan 0,9 l/menit. Pengukuran dilakukan dengan memantau suhu kompresi, suhu air keluar, dan kecepatan putaran menggunakan termokopel dan takometer. Analisis hasil dilakukan secara deskriptif, di mana data diolah dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Penelitian ini menemukan bahwa efisiensi termal tertinggi sebesar 61,29% dicapai pada debit air 0,9 l/menit, dengan efektivitas silinder pendingin mencapai 44,66%. Sebaliknya, efisiensi termal terendah sebesar 58,97% dicapai pada debit air 0,3 l/menit dengan efektivitas silinder pendingin 44,22%. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan debit air berkorelasi positif dengan peningkatan kinerja mesin Stirling (Sibero 2019).

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji sejauh mana *cooling water* mampu menurunkan suhu sumber panas pada sisi ruang kompresi dan dampaknya terhadap kinerja termal mesin Stirling. Selain itu juga penelitian ini juga menghitung nilai efektivitas *cooling water* pada berbagai kondisi aliran udara selama pengujian berlangsung.

2. Metode

Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan pengambilan data pada penelitian ini dilakukan di dalam ruangan, mengamati perubahan temperatur pada ruang panas dan ruang dingin dengan menggunakan thermometer laser, serta mengamati laju aliran air pendingin dari mulai air masuk dan keluar. Berikut gambar mesin Stirling (Gambar 1.) yang akan diuji menggunakan sistem *cooling water*.



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Mesin Stirling tipe gamma skala kecil; (b) *Cooling water* pada Mesin Stirling

Tabel 1. Dimensi dan Spesifikasi *Cooling Water*

Parameter	Dimensi
Diameter dalam <i>cooling water</i>	0,143 m
Diameter luar <i>cooling water</i>	0,148 m
Ketebalan	0,003 m
Panjang silinder <i>cooling water</i>	0,65 m

Alat ukur suhu yang digunakan pada penelitian:



Gambar 2. Termometer *Infrared*



Gambar 3. Temperatur *Controller* AT4208

Adapun langkah – langkah dalam pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Memasang semua alat ukur, seperti *Temperature Controller* diletakkan pada bagian silinder sisi dingin masuk (T_{in}) dan keluar (T_{out}), dan menggunakan Termometer Infrared untuk mengukur fluida panas bagian sisi sumber panas dan bagian blok piston power.
2. Memasang selang untuk laju aliran air pendingin dengan masing-masing panjang selang untuk masuk dan keluar sekitar ± 20 cm.
3. Pengambilan data pengujian suhu ruang panas sisi sumber panas (T_{source}) dan di dinding blok piston power (T_{cold}), suhu ruang dingin saat masuk dan keluar, temperatur api

(Tnyala-api), dilakukan secara bersamaan. Pembacaan dilakukan dimulai dari suhu awal ketika mesin belum dijalankan lalu saat mulai mesin dijalankan.

4. Melakukan pencatatan beberapa parameter saat mesin dijalankan, suhu ketika menggunakan sistem *cooling water*
5. Melakukan analisis data dan perhitungan dengan hasil yang sudah di uji menggunakan *software microsoft excell 2013*.

Untuk mencari nilai laju aliran massa *cooling water* ($\dot{m}$) jika diketahui laju aliran volume ($\dot{V}$) dan densitas air (ρ) :

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho \quad (1)$$

Pada perpindahan panas yang terjadi dalam sistem pendingin dapat dihitung menggunakan rumus:

$$Q = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

Mencari perpindahan panas maksimum yang terjadi ketika suhu *cooling water* mencapai keseimbangan dengan suhu sumber panas:

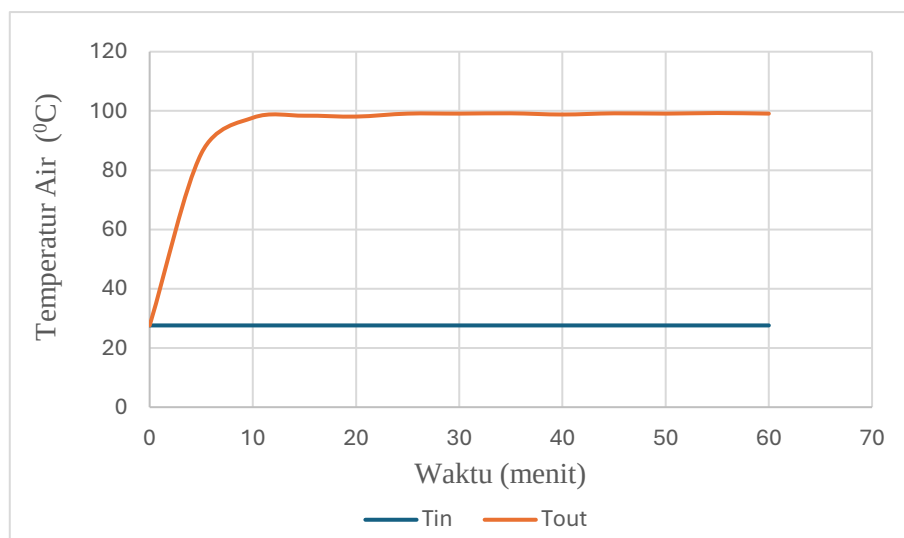
$$Q_{maks} = \dot{m} \times C_p \times (T_{source} - T_{in}) \quad (3)$$

Pengujian kinerja *cooling water* memerlukan literatur dan metode perhitungan untuk menentukan efektivitas silinder pendingin (ε) dan efisiensi termal mesin Stirling. Efektivitas sistem pendingin dihitung dengan rumus:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{maks}} \quad (4)$$

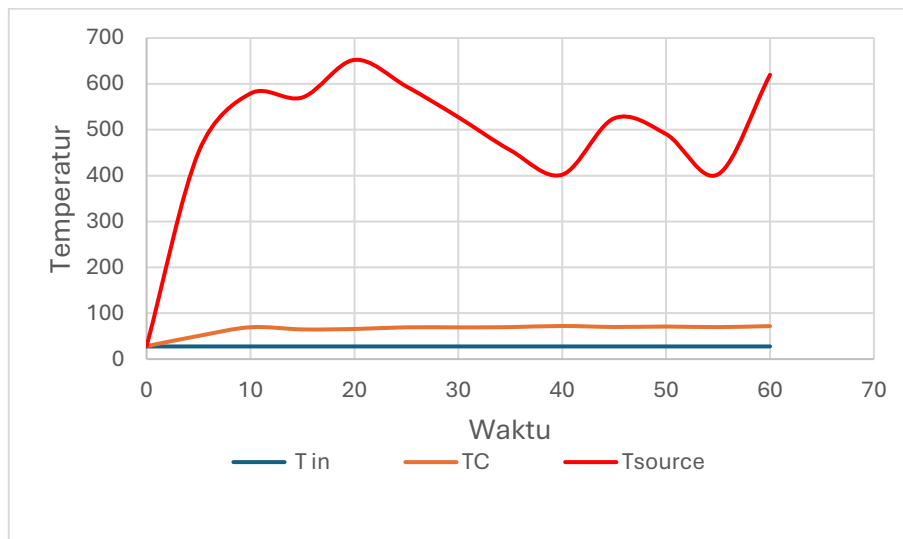
3. Hasil dan Pembahasan

Dari data-data yang diperoleh setelah dilakukan proses perhitungan maka dikonversi kedalam bentuk grafik. Dari grafik dibawah dapat dilihat temperatur air masuk dan keluar, pengaruh suhu masuk air terhadap temperatur sumber panas dan temperatur kompresi, pengaruh volume air terhadap efektifitas pada silinder pendingin dan pengaruh volume air terhadap efisiensi thermal selama pengujian mesin Stirling berlangsung.



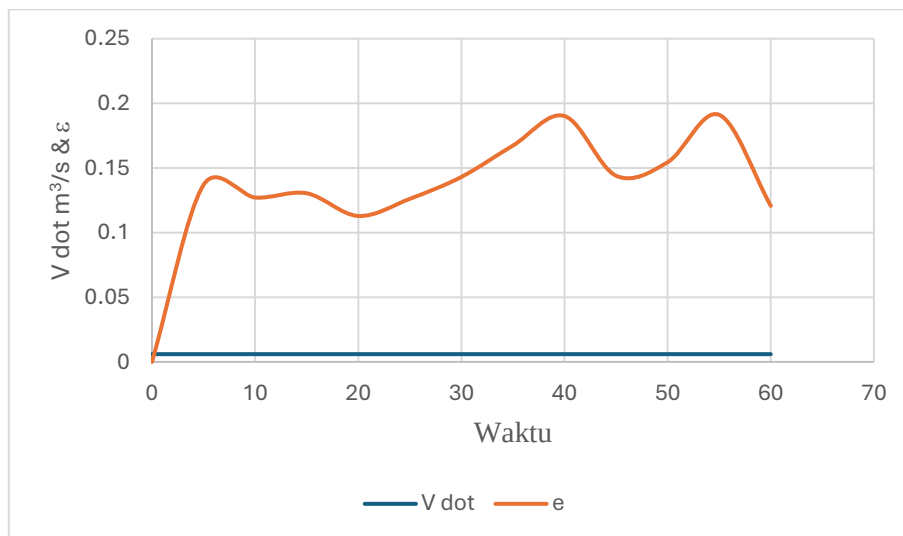
Gambar 4. Grafik Temperatur Air Masuk Dengan Air Keluar

Dari Gambar 4 dapat dilihat temperatur air masuk pada suhu $27,6^{\circ}\text{C}$ dan temperatur rata-rata air yang keluar mencapai suhu $92,33^{\circ}\text{C}$, dengan pengujian selama 1 jam (60 menit).



Gambar 5. Grafik Fluida Dingin (Air) Dengan Fluida Panas (Udara)

Dari Gambar 5 dengan pengujian selama 60 menit menunjukkan *cooling water* dengan suhu masuk $27,6^{\circ}\text{C}$ mampu menurunkan menjadi $64,78^{\circ}\text{C}$ dengan temperatur sumber panas rata-rata $484,51^{\circ}\text{C}$ pada sisi ruang kompresinya. Apabila semakin rendah temperatur pada ruang sisi kompresi maka akan menghasilkan nilai efisiensi termal yang semakin tinggi dan begitu juga sebaliknya.



Gambar 6. Grafik Pengaruh $\dot{V}$ Air Dengan Efektivitas

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa pada $\dot{V}$ Air $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$ terjadi kenaikan nilai efektivitas pendingin dengan rata-rata mencapai 13%, dengan titik tertinggi 19,1% pada menit 55. Apabila semakin tinggi temperatur panas yang dibuang maka akan semakin tinggi nilai efektivitasnya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dari data eksperimen yang dilakukan, diperoleh beberapa temuan penting. Pertama, temperatur air masuk tercatat pada suhu $27,6^{\circ}\text{C}$, sedangkan temperatur rata-rata air yang keluar mencapai $92,33^{\circ}\text{C}$ setelah dilakukan pengujian selama 1 jam (60 menit). Hal ini menunjukkan kemampuan sistem dalam memanaskan air hingga

mendekati suhu optimal. Kedua, pengujian selama 60 menit juga menunjukkan bahwa *cooling water* dengan suhu masuk 27,6 °C mampu menurunkan temperatur menjadi 64,78 °C dengan rata-rata temperatur sumber panas dari 484,51 °C pada sisi ruang kompresi. Penurunan temperatur yang signifikan ini mencerminkan efektivitas pendinginan yang baik. Semakin rendah temperatur pada sisi ruang kompresi, semakin tinggi nilai efisiensi termal yang dapat dicapai, dan sebaliknya. Dengan demikian, pengendalian temperatur menjadi faktor kunci dalam meningkatkan performa sistem. Ketiga, pada laju aliran udara ($\dot{V}_{Air}$) sebesar 0,006 m³/s, terjadi peningkatan nilai efektivitas pendingin dengan rata-rata mencapai 13%, dan nilai tertinggi sebesar 19,1% tercatat pada menit ke-55. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pendingin bekerja secara progresif dalam meningkatkan efisiensi, terutama pada durasi pengujian tertentu.

Secara keseluruhan, hasil eksperimen ini menegaskan pentingnya pengaturan temperatur dan laju aliran udara dalam mengoptimalkan kinerja sistem pendingin. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengevaluasi parameter lain yang berpotensi meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dosen Pembimbing dan Tim Peneliti mCHPSE di Universitas Medan Area yang telah membantu dalam proses merakit dan menguji mesin Stirling untuk penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh kawan-kawan yang telah bekerja keras untuk menyelesaikan proyek ini, khususnya Eprian Kurniawan, Aldi Kurniawan dan Bapak Edi dari Perbengkelan Bubut Tigayasa.

Daftar Pustaka

- Azmodeh, M. R., A. Keshavarz, and A. Batooei. 2020. "Experimental Study and Thermal Analysis of a Gamma Type Stirling Engine for Multi-Objective Optimization." *International Journal of Automotive Engineering*: 3281–3294.
- Borgnakke, C., and R. E. Sonntag. 2013. *Fundamentals of Thermodynamics*. Vol. 8. Michigan: Don Fowley.
- Cengel, Y. A., and A. J. Ghajar. 2014. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education.
- Cengel, Yunus A. 2003. "Heat Transfer." In *A Practical Approach*, edited by Y. A. Cengel, 671. Boston: McGraw-Hill.
- DeValve, T., and B. Olsommer. 2006. *Micro-CHP Systems for Residential Applications Final Report*. East Hartford: United Technologies Research Center.
- Graham, W. 1980. *Stirling Engine*. New York: Oxford University Press.
- Hirata, K. 1997. *Schmidt Theory for Stirling Engine*. Japan: National Maritime Research Institute.
- Incopera, F. P. 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Jufrizal, Mawardi, and F. Ramadhan. 2022. "Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling dengan Variasi Tekanan Bahan Bakar." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1 (1): 1–4.
- Jufrizal, Farel H. Napitupulu, Ilmi, Himsar Ambarita, and Mahadi Meliala. 2022a. "Ideal Cycle Thermodynamic Analysis for Gamma-Type Stirling Engine." *Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET)* 14 (1): 11–26. <https://journal.utem.edu.my/index.php/jmet/article/view/6246>.
- Jufrizal, Napitulu, F. H., Ilmi, Ambarita, H., and M. Meliala. 2022b. "Thermodynamic Analysis of a Gamma-Type Stirling Engine for mCHP Application." In A. Ibrahim (ed.), *Proceeding of the 7th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials*

- (ICE SEAM 2021), 225–229. Melaka: Springer Nature Singapore.
- Jufrizal, Farel Hasiholan Napitupulu, Ilmi, Himsar Ambarita, Supriatno, and Muhammad Irwanto. 2023. "Integration of a Gamma-Type Stirling Engine with LPG Cooking Stove for Micro-Scale Combined Heat and Power Generation." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 108 (2): 1–16. <https://doi.org/10.37934/arfmts.108.2.116>.
- Lestari, E. 2010. "Pengaruh Bioksida Pengoksidasi Terhadap Pertumbuhan Mikroorganisme Pada Air Pendingin Sekunder RSG-GAS." *BATAN*: 129–140.
- Matijasevic, L., A. Vuckovic, and I. Dejanovic. 2014. "Analysis of Cooling Water Systems in a Petroleum Refinery." *Original Scientific Paper*: 451–457.
- Moecty, R. P., G. Adityawan, and A. N. Artha. 2016. "Rekayasa Mesin Stirling Pembangkit Listrik Tenaga Surya." *PELITA*: 93–106.
- Moran, M. J., and H. N. Shapiro. 2004. *Fundamentals of Engineering*. Jakarta: Erlangga.
- Nasution, H., Z. Yusof, and A. A. Aziz. 2015. "The Water-Cooled Engine System Performance." *Jurnal Teknos*: 1–11.
- Nazila, I. P. 2016. "Unjuk Kerja Mesin Stirling Tipe Gamma Dengan Sumber Panas Reflektor Parabolik Dan Sistem Aliran Air Pada Reservoir Rendah." Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Fakultas Sains dan Teknologi. Malang: thesis.uin-malang.
- Rachman, A. 2017. "Perancangan Stirling Engine Tipe Beta Menggunakan Teori Schmidt." Universitas Lampung, Teknik Mesin Fakultas Teknik. Lampung: Tugas Akhir.
- Sibero, Juventus Eggy. 2019. "Uji Eksperimental Pengaruh Debit Air Dan Suhu Masuk Air Pada Silinder Pendingin Terhadap Kinerja Mesin Stirling Tipe Gamma." Universitas Sumatera Utara. <http://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/24019>.
- Simanjuntak, Janter P., and Bisrul H. Tambunan. 2021. "Kajian Analitis Pembangkit Tenaga Menggunakan Mesin Stirling Terintegrasi Dengan Insinerator Biomassa." *RODA: Jurnal Pendidikan dan Teknologi Otomotif*: 1–7.