

Pengaruh Penambahan Regenerator Terhadap Performansi Mesin Stirling Tipe Gamma

Zufri Hasrudy Siregar¹, Jufrizal*², Bintang Kelana Putra³

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

²Prodi Teknik Mesin, Universitas Medan Area, Jalan Kolam Nomor 1/ Jalan Gedung PBSI, Medan Estate, Medan, 20223, 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, *atjehb@gmail.com, bintangkelanaputra023@gmail.com

Abstrak

Mesin stirling merupakan mesin pembakaran luar dan menggunakan prinsip regeneratif siklus tertutup. Regenerator mesin Stirling berada di antara pemanas dan pendingin yang terdiri dari matriks. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan regenerator terhadap performansi mesin stirling tipe gamma. Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental yaitu dengan mengamati performansi sebelum menggunakan regenerator dan sesudah menggunakan regenerator. Hasil penelitian sebelum menggunakan regenerator diperoleh selisi temperatur maksimum 95,1 °C, dan rata-rata putaran mencapai 235,6 rpm, menghasilkan torsi tertinggi 0,624 Nm, daya tertinggi 16,430 Watt, dan efisiensi tertinggi sebesar 73,2 %. Sedangkan menggunakan regenerator diperoleh selisi temperatur maksimum 64,5 °C, dan rata-rata putaran mencapai 153,6 rpm, menghasilkan torsi tertinggi 0,38 N.m, daya tertinggi 6,236 Watt, dan efisiensi tertinggi sebesar 68,4 %. Penambahan regenerator pada mesin Stirling menyebabkan penurunan performansi, ini dimungkinkan karena terjadi penurunan tekanan fluida didalam mesin karena mesin Stirling mCHPSE-012020 masih menggunakan tekanan atmosfer sebagai tekanan kerja.

Kata Kunci — Mesin Stirling, Daya, Efisiensi termal, Regenerator, dan Torsi.

Abstract

The Stirling engine is an external combustion engine and uses a closed cycle regenerative principle. The Stirling engine regenerator sits between a heater and a coolant consisting of a matrix. The purpose of this study was to determine the effect of adding a regenerator to the performance of the gamma stirling engine. This research method was carried out experimentally by observing the performance before using the regenerator and after using the regenerator. The results of the study before using the regenerator obtained a maximum temperature difference of 95.1 , and the average rotation reached 235.6 rpm, producing the highest torque of 0.624 Nm, the highest power of 16.430 Watt, and the highest efficiency of 73.2%. While using the regenerator, the maximum temperature difference is 64.5 , and the average rotation reaches 153.6 rpm, produces the highest torque of 0.38 N.m, the highest power is 6.236 Watt, and the highest efficiency is 68.4%. The addition of a regenerator to the Stirling engine causes a decrease in performance, this is possible due to a decrease in fluid pressure in the engine because the Stirling mCHPSE-012020 engine still uses atmospheric pressure as working pressure.

Keywords — Stirling Engine, Power, Thermal Efficiency, Regenerator and Torque.

1. PENDAHULUAN

Konsumsi energi Indonesia masih didominasi menggunakan bahan bakar fosil terutama minyak bumi dan batu bara, namun seiring perkembangan teknologi yang pesat menyebabkan kebutuhan energi meningkat, yang dalam hal ini meningkatkan kebutuhan listrik dalam kehidupan masyarakat sehari-hari [1]. Salah satu contoh adalah mesin bensin dan mesin solar yang sangat dikenal di masyarakat. Padahal, terdapat sumber energi alternatif lain yang dapat digunakan dalam kehidupan sehari-hari, misalnya mesin Stirling (*Stirling engine*). Mesin Stirling adalah jenis mesin yang termasuk mesin pembakaran luar (*external combustion engine*) [2]. Mesin Stirling bekerja dengan memanfaatkan siklus tertutup regeneratif (*closed-cycle regenerative machines*) [3].

Penelitian ini merupakan salah satu penelitian dari tim peneliti mCHPSE (*micro combined heat and power stirling engine*) yang telah mengembangkan beberapa mesin Stirling tipe gamma. Tim peneliti mCHPSE merupakan kerjasama antara mahasiswa teknik mesin dari Institut Teknologi Medan dan Universitas Sumatera Utara. Generasi pertama dikembangkan pada tahun 2018 dan disebut mCHPSE-012018 [2]. Dan pada tahun 2019, disusul oleh generasi berikutnya yang bernama mCHPSE-012019 [4], [5]. Pada tahun 2020, mesin Gamma Stirling dikembangkan bersama tim dan generasi ketiga diberi nama mCHPSE-012020. Mesin mCHPSE-012020 menggunakan gas LPG (*liquefied petroleum gas*) dan memanaskan heater dengan kompor LPG yang dimodifikasi.

Regenerator pada mesin Stirling adalah salah satu jenis heat exchanger dengan sistem storage, yang berarti energi panas yang berasal dari fluida pertama tersimpan sementara sebelum panas tersebut ditransfer ke fluida kedua [6]. Sehingga bisa diasumsikan bahwa fungsi regenerator adalah untuk mempertahankan dalam sistem panas yang seharusnya dapat dipertukarkan dengan lingkungan pada suhu menengah untuk suhu siklus maksimum dan minimum [7]. Penelitian pada mesin Stirling mCHPSE-012020 telah banyak dilakukan untuk meningkatkan performansinya [8], [9] dan dikarenakan belum ada yang meneliti tentang pengaruh penambahan regenerator terhadap performansi mesin Stirling mCHPSE-012020 maka penulis tertarik untuk melakukannya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Graha Garuda Mas, Jl. Berlian I No.51, Deli Tua Barat, Kecamatan Deli Tua, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20361. Pada Desember 2021 - Maret 2022. Skema dan alat yang digunakan pada pengujian ini seperti ditampilkan pada Gambar 1 dan Tabel 1.

Untuk menghitung unjuk kerja mesin Stirling digunakan persamaan (1) sampai dengan (5) sebagai berikut [2], [4], [5].

1. Beda Temperatur Sisi Dingin Dan Sisi Panas

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

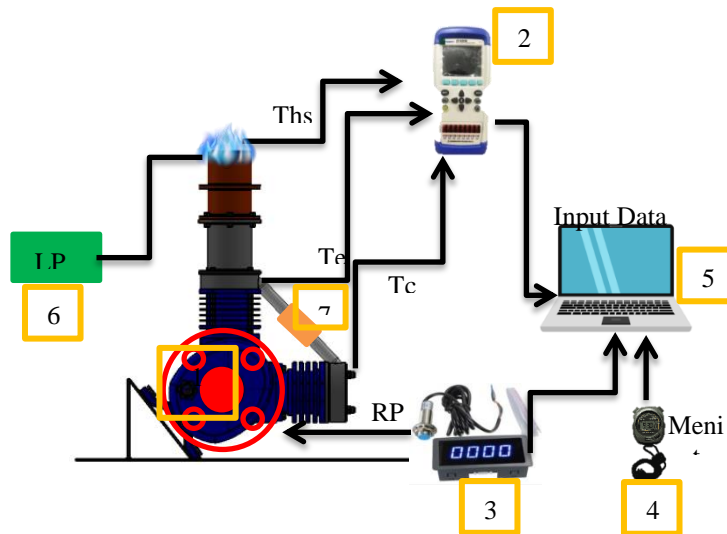
Keterangan : ΔT = Beda temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
 T sisi panas = Temperatur ekspansi (T_e) ($^{\circ}\text{C}$)
 T sisi dingin = Temperatur compressi (T_c) ($^{\circ}\text{C}$)

2. Torsi Pada *Flywheel*

Untuk mencari torsi dapat menggunakan rumus sebagai berikut

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

Keterangan: T = Torsi mesin (N.m)
 I = Momen inersia (kg m/s)
 ω = Percepatan (rad/s^2)



Gambar 1. Skema Pengujian Mesin Stirling mCHPSE-012020

Tabel 1. Alat yang digunakan

No.	Nama	Variabel	Deskriptor
1	Mesin Stirling mCHPSE-012020	-	-
2	Temperature Controller AT4208	Temperatur Ths, Te dan Tc.	°C
3	Tachometer	Kecepatan Putaran Mesin	Rpm
4	Stopwatch	Waktu	Menit
5	Laptop	-	-
6	LPG	-	-
7	Regenerator	-	-

Sedangkan untuk menentukan momen inersia adalah:

$$I = 0,5 \cdot m \cdot r^2 \quad (3)$$

Keterangan: I = Momen inersia (kg m/s)
 m = Massa *flywheel* (kg)
 r^2 = radius (m/s²)

3 Daya pada Mesin stirling

Untuk mencari daya mesin stirling dapat menggunakan rumus sebagai berikut

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

Keterangan : P = Daya maksimum (Watt)
 T = Torsi (Nm)
 n = Kecepatan Sudut Dalam Rotasi Permenit (Rpm)

4 Efisiensi Thermal

Untuk menentukan nilai efisiensi thermal pada mesin stirling dapat di hitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

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

Keterangan : η_{th} = Efisiensi thermal (°C)
 T_c = Temperatur kompresi (°C)
 T_e = Temperatur ekspansi (°C)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dai hasil pengujian ini didapat profil temperatur, kecepatan putaran (rpm), torsi (N.m), daya (Watt), dan efisiensi termal sebelum menggunakan regenerator dan setelah menggunakan regenerator, dengan parameter pengujian temperatur ekspansi (T_e), temperatur kompresi (T_c), beda temperatur (ΔT), temperatur sumber panas (T_{hs}), dan kecepatan putaran (rpm). Pengambilan data dilakukan 30 menit dengan pencatatan data 5 menit sekali. Untuk hasil pengujian sebelum menggunakan regenerator dapat dilihat di Tabel 2 dan menggunakan regenerator dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Data hasil pengujian sebelum menggunakan regenerator

Tanpa regenerator												
Waktu	T_c	T_e	ΔT	T_{hs}	Putaran	Percepatan	Torsi	Daya	Inersia	Radius	Massa Flywheel	Efisiensi
Menit	°C	°C	°C	°C	Rpm	rad/s ²	N.m	Watt	kg m/s	m	Kg	°C
5	30,8	62,4	31,6	592,5	190	19,887	0,471	9,340	0,024	0,135	2,6	50,64%
10	31,3	75,6	44,3	678,9	232	24,283	0,575	13,926	0,024	0,135	2,6	58,60%
15	32,4	87,2	54,8	697,5	252	26,376	0,625	16,430	0,024	0,135	2,6	62,84%
20	33,3	99,7	66,4	733,0	248	25,957	0,615	15,913	0,024	0,135	2,6	66,60%
25	33,9	102,3	68,4	781,6	245	25,643	0,608	15,530	0,024	0,135	2,6	66,86%
30	34,8	129,9	95,1	866,6	247	25,853	0,613	15,785	0,024	0,135	2,6	73,21%
MIN	30,8	62,4	31,6	592,5	190	19,887	0,471	9,340	0,024	0,135	2,6	50,64%
MAX	34,8	129,9	95,1	866,6	252	26,376	0,625	16,430	0,024	0,135	2,6	73,21%
RATA-R	32,8	92,9	60,1	725,0	235,7	24,666	0,584	14,487	0,024	0,135	2,6	64,73%

Tabel 3. Data hasil pengujian setelah menggunakan regenerator

Menggunakan regenerator												
Waktu	T_c	T_e	ΔT	T_{hs}	Putaran	Percepatan	Torsi	Daya	Inersia	Radius	Massa Flywheel	Efisiensi
Menit	°C	°C	°C	°C	Rpm	rad/s ²	N.m	Watt	kg m/s	m	Kg	°C
5	26,4	48,8	22,4	515,3	155	16,223	0,384	6,236	0,024	0,135	2,6	45,90%
10	27	54,7	27,7	589,9	154	16,119	0,382	6,156	0,024	0,135	2,6	50,64%
15	27,2	52,1	24,9	586	154	16,119	0,382	6,156	0,024	0,135	2,6	47,79%
20	27,5	70,3	42,8	618	153	16,014	0,379	6,076	0,024	0,135	2,6	60,88%
25	28,3	81,6	53,3	683,7	153	16,014	0,379	6,076	0,024	0,135	2,6	65,32%
30	29,8	94,3	64,5	707,8	152	15,909	0,377	5,997	0,024	0,135	2,6	68,40%
MIN	26,4	48,8	22,4	515,3	152	15,909	0,377	5,997	0,024	0,135	2,6	45,90%
MAX	29,8	94,3	64,5	707,8	155	16,223	0,384	6,236	0,024	0,135	2,6	68,40%
RATA-R	27,7	67,0	39,3	616,8	153,5	16,066	0,381	6,116	0,024	0,135	2,6	56,49%

Untuk mencari torsi mesin stirling dapat menggunakan persamaan (2) yaitu :

$$\begin{aligned}
 T &= I \cdot \omega \\
 &= 0,0236925 \text{ kg m/s} \times 19,8866667 \text{ rad/s}^2 \\
 &= 0,47116485 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

Untuk mencari daya mesin stirling dapat menggunakan persamaan (4) yaitu :

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

$$= \frac{2 \times 3,14 \times 190 \times 0,47116485}{60}$$

$$= 9,340 \text{ Watt}$$

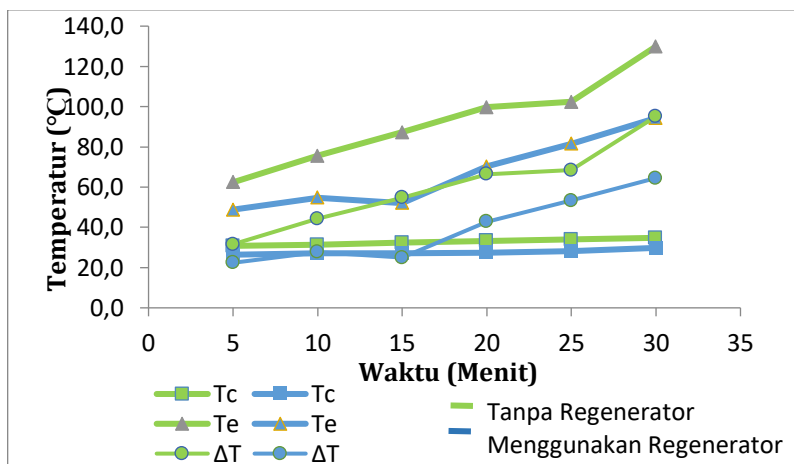
Untuk mencari efisiensi mesin stirling dapat menggunakan persamaan (5) yaitu :

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

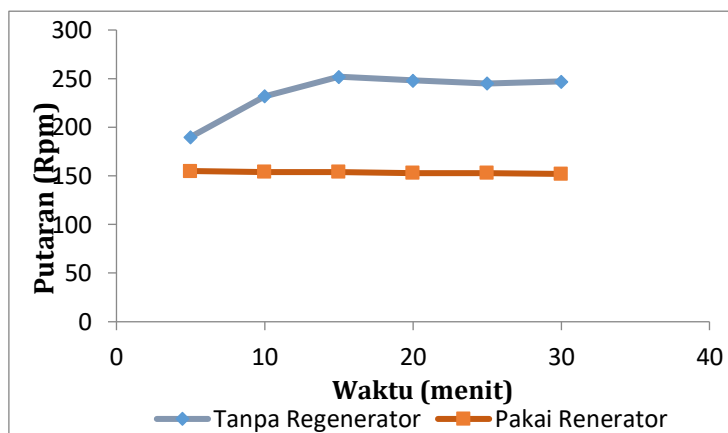
$$\eta_{th} = 1 - \frac{33,8}{62,4}$$

$$\eta_{th} = 50,64\%$$

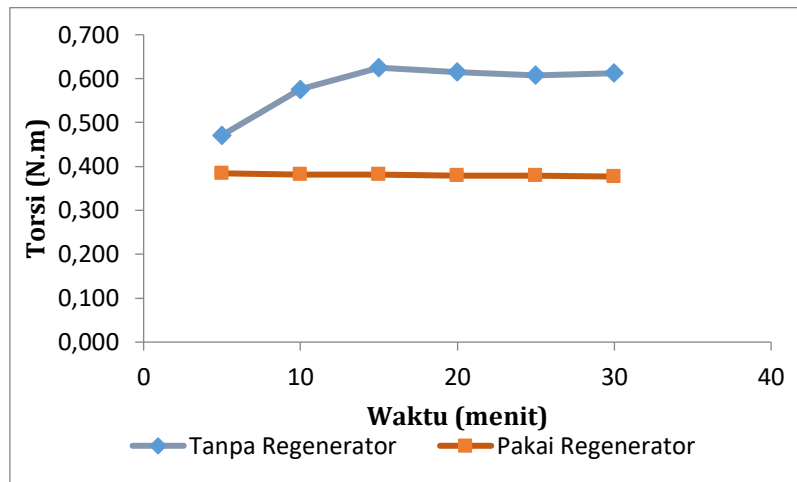
Gambar 2. Memperlihatkan grafik perbandingan temperatur kompresi (T_c), Temperatur ekspansi (T_e), dan Beda temperatur (ΔT) terhadap waktu (menit), Sebelum menggunakan regenerator dan setelah menggunakan regenerator. Sedangkan hubungan yang lain dalam bentuk grafik dari hasil pengukuran dan analisa dapat dilihat pada Gambar 3, 4, 5, dan 6.



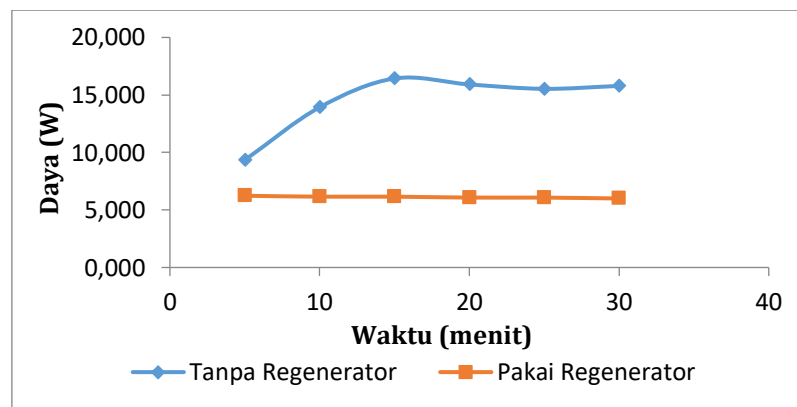
Gambar 2. Grafik hubungan T_c , T_e , dan ΔT ($^{\circ}\text{C}$) versus waktu (menit) tanpa regenerator dan menggunakan regenerator.



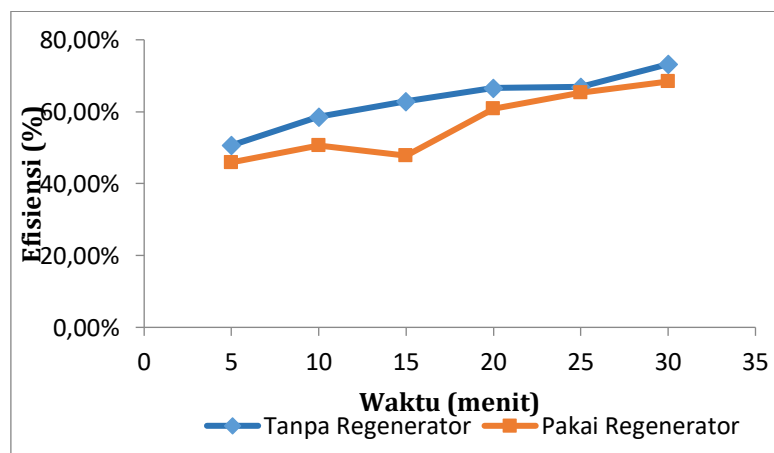
Gambar 3. Grafik hubungan putaran (rpm) versus waktu (menit) tanpa regenerator dan menggunakan regenerator.



Gambar 4. Grafik hubungan torsi (N.m) versus waktu (menit) tanpa regenerator dan menggunakan regenerator.



Gambar 5. Grafik hubungan daya (watt) versus waktu (menit) tanpa regenerator dan menggunakan regenerator.



Gambar 6. Grafik hubungan efisiensi (%) versus waktu (menit) tanpa regenerator dan menggunakan regenerator.

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa yang ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik sebelum menggunakan regenerator diperoleh temperatur sumber panas (Ths) maksimum 866,6 °C, temperatur Ekspansi (Te) maksimum 129,9 °C, temperatur kompresi (Tc) maksimum 34,8 °C, selisi temperatur (ΔT) maksimum 95,1 °C, dan rata-rata kecepatan putaran mencapai 235,6 rpm, menghasilkan torsi tertinggi 0,624 N.m, daya tertinggi 16,430 Watt, dan efisiensi tertinggi sebesar 73,2 %. Sedangkan menggunakan regenerator diperoleh temperatur sumber panas (Ths) maksimum 707,8 °C, temperatur Ekspansi (Te) maksimum 94,3 °C, temperatur kompresi (Tc) maksimum 29,8 °C, selisi temperatur (ΔT) maksimum 64,5 °C, dan rata-rata putaran mencapai 153,6 rpm, menghasilkan torsi tertinggi 0,38 N.m, daya tertinggi 6,236 Watt, dan efisiensi tertinggi sebesar 68,4 %. maka terlihat bahwa penambahan regenerator pada mesin Stirling menyebabkan penurunan performansi ini dimungkinkan karena terjadi penurunan tekanan fluida didalam mesin akibat penambahan regenerator. Perlu diketahui bahwa saat ini mesin Stirling mCHPSE-012020 masih menggunakan tekanan atmosfer sebagai tekanan kerja.

4. KESIMPULAN

Setelah melakukan pengujian dan analisa untuk mengetahui pengaruh penambahan regenerator terhadap performansi mesin Stirling tipe gamma kemudian diperoleh hasil maka disimpulkan bahwa penambahan regenerator pada mesin Stirling menyebabkan penurunan tekanan fluida didalam mesin sehingga performansi ikut turun. Penyebab utama adalah mesin Stirling mCHPSE-012020 masih menggunakan tekanan atmosfer sebagai tekanan kerja sehingga jika ingin menambahkan regenerator disarankan menggunakan tekanan tambahan dari luar (tekanan *charger*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada mCHPSE *research team*, Bapak Jufrizal, S.T, M.T sebagai koordinator tim yang telah bekerja keras untuk membantu menyelesaikan penelitian ini. Kemudian kepada terkhusus Fandy Ramadhan, Irwan Prasetya Simanullang, Muhammad Novrin Rizky Syahputra, Fajar Noer Rambe, Muhammad Dendy Agusdiandy, Fikri Yanda Pratama, Muhammad Hidayah dan Bapak Riclon H Sidabutar dari Perbengkelan Timbul Engineering.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Azhar and D. A. Satriawan, "Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional," vol. 1, no. November, pp. 398–412, 2018.
- [2] Jufrizal, F. H. Napitupulu, Ilmi, and H. Ambarita, "Manufacturing and testing prototype of a gamma type Stirling engine for micro-CHP application," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 725, no. 1, pp. 1–9, doi: 10.1088/1757-899X/725/1/012016.
- [3] O. D. HP, "Uji Unjuk Kerja Mesin Stirling Tipe Gamma," Universitas Sebelas Maret, 2012.
- [4] Jufrizal, F. H. Napitupulu, Ilmi, H. Ambarita, and M. Meliala, "Thermodynamic Analysis of a Gamma-Type Stirling Engine for mCHP Application," in *Proceedings of the 7th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICE-SEAM 2021)*, 2022, pp. 225–229, [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-3179-6_40.

-
- [5] Jufrizal, F. H. Napitupulu, Ilmi, H. Ambarita, and M. Meliala, "Ideal Cycle Thermodynamic Analysis for Gamma-Type Stirling Engine," *J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 11–26, 2022, [Online]. Available: <https://journal.utem.edu.my/index.php/jmet/article/view/6246>.
- [6] H. Exchangers, "Classification of Heat Exchangers," pp. 1–77.
- [7] G. Walker, "Operations Cycle of the Stirling Engine with Particular Reference to the Function of the Regenerator," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 394–411, 2007, doi: 10.1243/jmes_jour_1961_003_051_02.
- [8] Z. H. Siregar, Jufrizal, and M. D. Agusdiandy, "Pengaruh Variasi Temperatur Sumber Panas Terhadap Temperatur Udara Dalam Heater Mesin Stirling Effect of Variation in Heat Source Temperature on Air Temperature in Stirling Engine Heater antara mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Medan," *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>.
- [9] Mawardi, Jufrizal, and M. Hidayah, "Uji Kinerja Burner LPG Mesin Stirling dengan Variasi Kosumsi Bahan Bakar," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 1, pp. 36–42, 2022, [Online]. Available: <http://e-journals.irapublishing.com/index.php/IRAJTMA/article/view/2>.
-