

Exergy analysis on a thermoelectric heat *recovery* device with an exhaust gas heat source from a combustion engine

Yudha Pratama, Sarwo Edhy Sofyan*, Khairil

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Darussalam – Banda Aceh 23111, Indonesia

*Corresponding author: sarwo@usk.ac.id

Article Processing Dates:

Received 2025-07-15

Accepted 2025-09-28

Available online 2025-09-30

Keywords:

Exergy

Exhaust Gas

Thermoelectric Generator

Recovery System

Fins

Abstract

An internal combustion engine converts thermal energy into mechanical work with an efficiency of approximately 35–40%, depending on the engine type and operating conditions. This indicates that about 60–65% of the total energy is wasted, primarily in the form of heat loss through the cooling system, exhaust gases, and mechanical friction. One potential approach to improve engine efficiency is by recovering waste heat using a thermoelectric generator (TEG) system. This study aims to analyze the exergy performance of a thermoelectric heat recovery system that utilizes exhaust gas heat from an internal combustion engine as an energy source. The analysis focuses on the influence of engine speed variation and aluminum fin configuration on the exergy value, exergy destruction, and exergy efficiency to enhance waste heat utilization. The heat recovery system is connected to the exhaust pipe outlet, and several fin configurations are investigated: left–left-right, top–bottom, all-sided, and without fins. Tests were conducted at engine speeds of 1300, 1600, 1900, and 2200 rpm to observe variations in energy distribution and efficiency. The results indicate that the exergy value generated by the thermoelectric heat recovery system increases with higher engine speed. This finding demonstrates that the proposed system can effectively improve the thermal efficiency of internal combustion engines by converting exhaust heat into useful energy, contributing to overall energy savings and the development of more efficient energy conversion technologies.

Analisa eksergi pada alat *recovery* panas termoelektrik dengan sumber panas gas buang motor bakar

Abstrak Motor bakar merupakan mesin yang mengubah energi termal menjadi kerja mekanik dengan efisiensi sekitar 35–40%, tergantung pada jenis dan kondisi operasinya. Hal ini menunjukkan bahwa sekitar 60–65% energi terbuang, terutama dalam bentuk panas melalui sistem pendinginan, gas buang, dan gesekan komponen. Salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi motor bakar adalah dengan memanfaatkan kembali energi panas buang menggunakan sistem thermoelectric generator (TEG) sebagai alat heat recovery. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja eksergi pada sistem heat recovery termoelektrik yang memanfaatkan panas gas buang motor bakar sebagai sumber energi. Analisis difokuskan pada pengaruh variasi kecepatan putaran mesin dan susunan sirip aluminium terhadap nilai eksergi, kerusakan eksergi, dan efisiensi eksergi guna meningkatkan pemanfaatan energi panas buang. Sistem heat recovery dirancang terhubung pada ujung keluaran pipa knalpot, dengan variasi susunan sirip aluminium pada sisi dalam saluran gas buang, yaitu konfigurasi kiri–kanan, atas–bawah, seluruh sisi, serta kondisi tanpa sirip. Pengujian dilakukan pada variasi putaran mesin 1300, 1600, 1900, dan 2200 rpm untuk mengetahui perubahan distribusi energi dan efisiensinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai analisis eksergi sistem heat recovery termoelektrik meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran mesin. Penerapan sistem ini berpotensi meningkatkan efisiensi termal motor bakar dengan memanfaatkan energi panas yang sebelumnya terbuang, sehingga dapat berkontribusi terhadap penghematan energi dan pengembangan teknologi konversi energi yang lebih efisien.

Kata kunci: Eksergi, Gas Buang, Generator Termoelektrik, *Sistem recovery*, dan Sirip

1. Pendahuluan

Motor bakar merupakan mesin yang mengkonversikan energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar melalui proses pembakaran yang terjadi dalam ruang bakar (silinder) menjadi energi mekanik secara langsung. Pada saat ini efisiensi motor bakar masih relatif rendah, di mana dari 100% energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar hanya 35–

40% yang benar-benar dimanfaatkan untuk menggerakkan mesin [1-3], sebagian besar energi terbuang dalam bentuk panas yang terjadi pada radiator dan terbuang melalui gas buang.

Pengaplikasian alat *recovery* panas gas buang termoelektrik memungkinkan panas yang terbawa bersama dengan gas buang *direcovery* dan dikonversikan menjadi

energi listrik. Generator termoelektrik adalah sebuah alat yang dapat mengkonversi flux panas secara langsung menjadi energi listrik melalui sebuah fenomena yang disebut efek Seebeck [4-6].

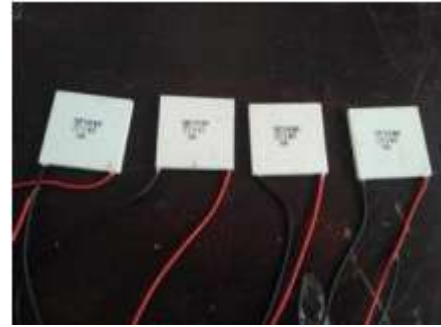
Analisa berbasis eksergi adalah metode yang sangat mudah untuk menilai kinerja sistem konversi energi. Eksergi adalah kerja maksimal yang bisa didapat dari suatu sistem. Analisis berbasis eksergi membantu menentukan ketidakterbalikan (pembentukan entropi) dan bagaimana sumber dapat digunakan secara efektif. Eksergi adalah kualitas energi, yang mempunyai kuantitas dan kualitas. Sedangkan energi hanya kuantitasnya saja. Energi terfokus pada hukum termodinamika pertama sedangkan eksergi terfokus pada hukum termodinamika kedua[7].

Berbagai kajian telah dilakukan oleh sejumlah peneliti terkait dengan kajian *recovery* panas gas buang termoelektrik [8-10]. Diantaranya oleh Rifqi (2025) melaporkan bahwa peningkatan penggunaan kendaraan bermotor menghasilkan potensi panas buang yang besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif melalui penerapan Thermoelectric Generator (TEG). Dalam penelitiannya, Rifqi merancang konstruksi TEG yang dipasang pada knalpot sepeda motor dengan sistem penukar kalor setengah lingkaran di sisi panas dan heatsink bersirip di sisi dingin. Hasil pengujian pada mesin sepeda motor 110 cc dengan variasi putaran 1600, 2000, dan 3000 rpm menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran mesin menyebabkan kenaikan suhu dinding knalpot, beda suhu (ΔT), serta keluaran listrik TEG. Pada kondisi maksimum 3000 rpm dan waktu pengukuran 1500 detik, diperoleh beda suhu sebesar 74 °C, tegangan 2894 mV, dan arus 205 mA. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem TEG berpotensi digunakan untuk mengonversi energi panas buang menjadi energi listrik pada mesin pembakaran dalam dengan efisiensi yang dapat ditingkatkan melalui optimasi desain dan kondisi operasi [8].

Berdasarkan hal tersebut maka tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja eksergi pada sistem *heat recovery* termoelektrik yang memanfaatkan panas gas buang motor bakar sebagai sumber energi. Kajian difokuskan pada pengaruh variasi kecepatan putaran mesin dan susunan sirip aluminium terhadap nilai eksergi, kerusakan eksergi, dan efisiensi eksergi, guna mengetahui sejauh mana sistem *thermoelectric generator* dapat meningkatkan efisiensi termal motor bakar melalui pemanfaatan panas buang.

2. Metode Penelitian

Adapun alat dan bahan yang akan di gunakan pada penelitian *sistem recovery* gas buang adalah mesin diesel TF R-di, Generator termoelektrik atau Elemen peltier merupakan komponen utama dari *sistem recovery* ini, di mana berfungsi untuk mengkonversikan energi panas yang bersumber gas buang motor bakar diesel menjadi energi listrik. Pada penelitian ini modul termoelektrik yang akan di gunakan adalah modul TEG SP184827145 dan berjumlah 16 termoelektrik akan di rangkai dengan rangkaian seri seperti Gambar 1.



Gambar 1. Termoelektrik SP1848-27145

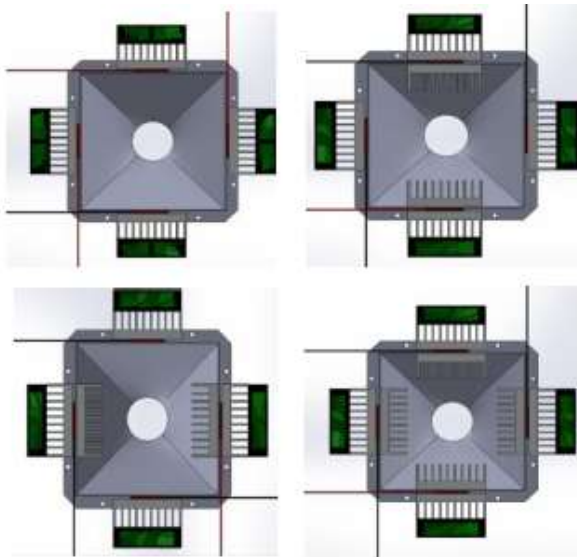
Selanjutnya penggunaan sirip pada sisi panas dan dingin. Sirip berfungsi sebagai alat penukar kalor untuk menyerap dan melepaskan panas yang bersumber dari gas buang motor diesel. Pada alat *recovery* gas buang ini, sirip akan ditempatkan pada bagian dalam dan luar, pada bagian dalam sirip digunakan untuk menyerap panas gas buang. Sedangkan pada bagian luar, sirip digunakan untuk melepaskan panas (sisi dingin termoelektrik) ke lingkungan. Dengan demikian, penambahan sirip maka luas permukaan perpindahan panas dari *sistem recovery* akan lebih besar, memungkinkan perpindahan panas yang lebih optimal pada *sistem recovery* gas buang, sehingga memungkinkan generator termoelektrik menghasilkan daya yang lebih besar. Sirip terbuat dari aluminium yang memiliki panjang 8 cm dan lebar 7,9 cm serta memiliki 10 ruas-ruas sirip.

Sistem recovery gas buang ini dirancang menggunakan 16 unit generator termoelektrik yang dipasang pada casing berbentuk segi empat dengan dimensi 160 × 140 mm. Setiap sisi dari casing tersebut dilengkapi dengan empat generator termoelektrik yang dirangkai secara seri, di mana masing-masing generator ditempatkan tepat di tengah sisi untuk mengoptimalkan perpindahan panas.

Untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas pada bagian dalam casing, digunakan sirip sebagai media penghantar panas tambahan. Selain itu, sirip juga dipasang pada bagian luar casing, disertai dengan fan yang berfungsi untuk menyuplai udara ke sisi panas dari generator termoelektrik. Sistem ini dihubungkan langsung ke knalpot, memanfaatkan gas buang dari mesin diesel sebagai sumber panas yang kemudian dikonversi kembali menjadi energi listrik oleh generator termoelektrik. Gambar 7 memperlihatkan rancangan alat *sistem recovery* gas buang yang digunakan pada motor bakar.

Penelitian ini difokuskan pada kajian pengaruh variasi konfigurasi sirip pada sisi aliran gas buang. Terdapat empat variasi konfigurasi sirip yang digunakan. Pertama, sistem diuji tanpa menggunakan sirip di saluran gas buang sebagai kondisi kontrol. Kedua, sirip dipasang pada sisi atas dan bawah saluran. Ketiga, sirip diletakkan pada sisi kiri dan kanan. Terakhir, sirip digunakan di seluruh sisi saluran gas buang seperti Gambar 2.

Seluruh konfigurasi ini akan diuji kinerjanya pada empat variasi putaran mesin, yaitu 1300 rpm, 1600 rpm, 1900 rpm, dan 2200 rpm, untuk melihat pengaruhnya terhadap performa *sistem recovery* gas buang dalam kondisi operasi yang berbeda.



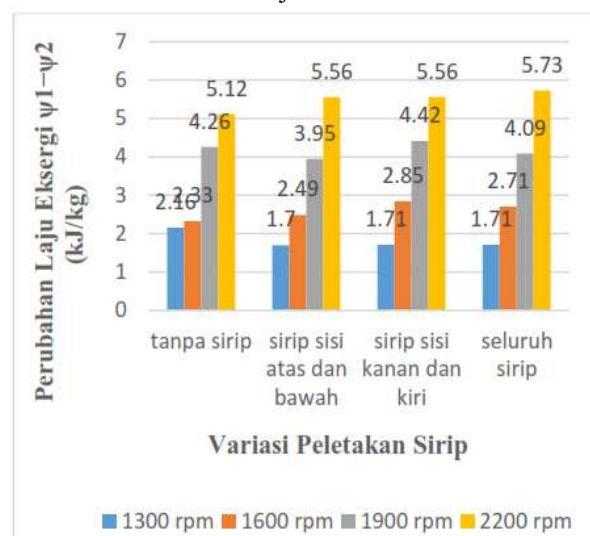
Gambar 2. Eksperimen pengujian performansi *sistem recovery*.

Perencanaan perhitungan dalam penelitian ini diawali dengan studi literatur sebagai dasar teori dan referensi analisis. Selanjutnya, dilakukan perhitungan eksergi yang mencakup tiga aspek utama, yaitu nilai eksergi, kerusakan eksergi yang menunjukkan jumlah energi yang hilang atau tidak dapat dimanfaatkan, serta efisiensi eksergi yang menunjukkan seberapa besar energi yang berhasil dimanfaatkan dibandingkan dengan potensi totalnya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hubungan Variasi Peletakan Sirip Terhadap Perubahan Laju Eksergi dan Daya Listrik yang Dihasilkan

Pada kondisi sistem tanpa menggunakan sirip pada sisi saluran gas buang seperti Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai eksergi yang dihasilkan oleh *sistem recovery* meningkat seiring bertambahnya putaran mesin. Pada putaran 1300 rpm, eksergi yang dihasilkan tercatat sebesar 2,16 kJ/kg, kemudian meningkat menjadi 3,13 kJ/kg pada putaran 1600 rpm. Nilai eksergi tertinggi tercapai pada putaran 2200 rpm, yaitu sebesar 5,91 kJ/kg. Peningkatan nilai eksergi ini disebabkan oleh kenaikan temperatur gas buang seiring dengan bertambahnya putaran mesin, sehingga energi panas yang diterima oleh modul termoelektrik menjadi lebih besar.



Gambar 3. Grafik hubungan variasi peletakan sirip terhadap eksergi pada berbagai putaran mesin

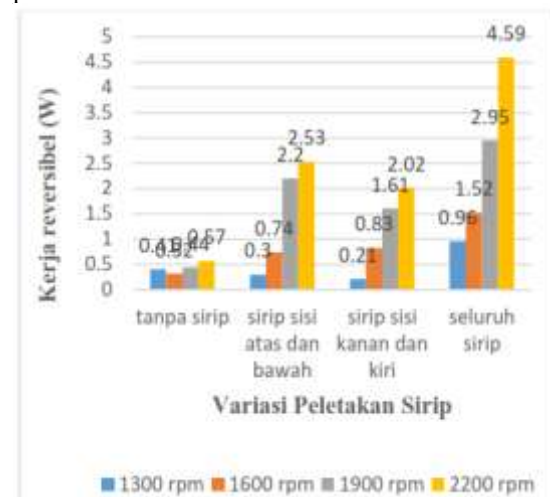
Sementara itu, ketika sistem menggunakan sirip pada sisi atas dan bawah saluran gas buang, terlihat bahwa peningkatan putaran mesin juga menyebabkan peningkatan nilai eksergi. Berdasarkan Gambar 3, penggunaan sirip pada konfigurasi ini menghasilkan nilai eksergi tertinggi sebesar 5,56 kJ/kg pada putaran 2200 rpm.

Pada konfigurasi lain, yaitu saat sirip digunakan pada sisi kiri dan kanan saluran gas buang, nilai eksergi yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan yang serupa. Pada putaran 1300 rpm, eksergi yang dihasilkan sebesar 1,71 kJ/kg, dan nilai tertinggi juga terjadi pada putaran 2200 rpm dengan besaran yang sama, yakni 5,56 kJ/kg. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi penempatan sirip baik di sisi atas–bawah maupun kiri–kanan memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan eksergi sistem, meskipun perbedaannya relatif kecil.

Selanjutnya, pada konfigurasi sistem dengan penggunaan sirip di seluruh sisi saluran gas buang, nilai eksergi yang dihasilkan menunjukkan variasi yang cukup signifikan. Pada putaran 1300 rpm, modul termoelektrik menghasilkan eksergi sebesar 4,49 kJ/kg. Namun, saat putaran dinaikkan menjadi 1600 rpm, terjadi penurunan nilai eksergi menjadi 2,71 kJ/kg. Meskipun demikian, nilai eksergi kembali meningkat dan mencapai angka tertinggi sebesar 5,73 kJ/kg pada putaran 2200 rpm.

Berdasarkan hasil perhitungan eksergi dari berbagai variasi konfigurasi sirip, diketahui bahwa kondisi tanpa penggunaan sirip justru menghasilkan nilai eksergi tertinggi pada seluruh rentang putaran mesin yang diuji. Konfigurasi dengan sirip di seluruh sisi berada pada urutan kedua dalam menghasilkan nilai eksergi yang besar. Selanjutnya diikuti oleh konfigurasi dengan sirip pada sisi kiri dan kanan, serta konfigurasi dengan sirip pada sisi atas dan bawah. Hasil ini menunjukkan bahwa keberadaan sirip tidak selalu menjamin peningkatan eksergi, kemungkinan disebabkan oleh hambatan perpindahan panas atau distribusi aliran gas buang yang tidak merata akibat bentuk dan posisi sirip yang digunakan.

Perubahan eksergi atau kerja reversibel ($W_{rev,out}$) dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu laju aliran massa, temperatur lingkungan, serta perubahan entropi dan entalpi dari fluida kerja. Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai perubahan eksergi yang dihasilkan oleh *sistem recovery* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya putaran mesin.



Gambar 4. Grafik hubungan konfigurasi sirip terhadap daya yang dihasilkan oleh *sistem recovery*

Pada kondisi tanpa penggunaan sirip, perubahan eksergi untuk setiap variasi putaran mesin cenderung stabil, dengan selisih nilai yang tidak terlalu signifikan. Nilai perubahan eksergi tertinggi pada kondisi ini tercatat sebesar 0,57 W pada putaran mesin 2200 rpm.

Ketika sistem dilengkapi dengan sirip pada sisi atas dan bawah saluran gas buang, perubahan eksergi menunjukkan peningkatan yang lebih tajam seiring kenaikan putaran mesin. Dari Gambar 4 dapat diamati bahwa penggunaan sirip memperbaiki proses perpindahan panas secara konveksi antara gas buang dan permukaan casing. Panas yang terserap dari aliran gas buang akan diteruskan secara konduksi ke sisi panas modul termoelektrik, kemudian dikonversi langsung menjadi energi listrik. Pada konfigurasi ini, nilai perubahan eksergi tertinggi tercapai pada putaran 2200 rpm, yaitu sebesar 2,53 W.

Sementara itu, pada konfigurasi dengan sirip di sisi kiri dan kanan, perubahan eksergi yang dihasilkan menunjukkan tren yang hampir serupa dengan konfigurasi atas-bawah. Pada putaran 1300 rpm, perubahan eksergi yang tercatat adalah sebesar 0,21 W, sedangkan nilai tertinggi pada konfigurasi ini juga terjadi pada putaran 2200 rpm dengan besaran 2,02 W.

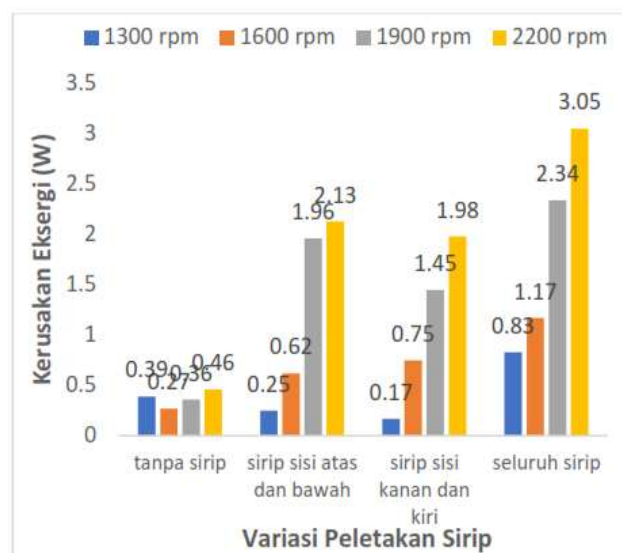
Pada kondisi sistem dengan penggunaan sirip di seluruh sisi saluran gas buang, nilai perubahan eksergi yang dihasilkan tercatat sebagai yang tertinggi dibandingkan dengan kondisi tanpa sirip maupun konfigurasi sirip dua sisi. Pada putaran mesin 1300 rpm, sistem menghasilkan perubahan eksergi sebesar 0,96 W. Nilai ini terus meningkat seiring bertambahnya putaran mesin dan mencapai angka tertinggi sebesar 4,59 W pada putaran 2200 rpm.

Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan sirip di seluruh sisi mampu meningkatkan laju perpindahan panas secara signifikan, sehingga lebih banyak energi panas dari gas buang yang dapat dimanfaatkan dan dikonversi menjadi energi listrik oleh modul termoelektrik. Efisiensi perpindahan panas yang lebih merata pada seluruh permukaan casing berkontribusi terhadap peningkatan kerja reversibel sistem secara keseluruhan.

4.2. Hubungan Variasi Peletakan Sirip Terhadap Kerusakan Eksergi

Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara variasi konfigurasi sirip pada berbagai putaran mesin terhadap nilai kerusakan eksergi (*exergy destruction*) yang terjadi pada *sistem recovery* gas buang. Variasi konfigurasi sirip yang diuji terdiri dari kondisi tanpa sirip, penggunaan sirip di sisi atas dan bawah, di sisi kanan dan kiri, serta pada seluruh sisi saluran gas buang.

Secara umum, Gambar 5 memperlihatkan bahwa nilai kerusakan eksergi meningkat seiring bertambahnya putaran mesin, terlepas dari konfigurasi sirip yang digunakan. Pada kondisi tanpa sirip, nilai kerusakan eksergi tertinggi justru terjadi pada putaran 1300 rpm dibandingkan dengan 1600 rpm dan 1900 rpm. Hal ini dapat dijelaskan oleh adanya perbedaan nilai entalpi yang cukup signifikan pada putaran 1300 rpm. Namun demikian, perlu ditekankan bahwa besar kerusakan eksergi tidak hanya ditentukan oleh selisih entalpi, tetapi juga dipengaruhi oleh kombinasi nilai entalpi dan entropi yang diperoleh dari temperatur masuk dan keluar gas buang.



Gambar 5. Grafik hubungan konfigurasi sirip terhadap kerusakan eksergi (*exergy destruction*) pada berbagai putaran mesin.

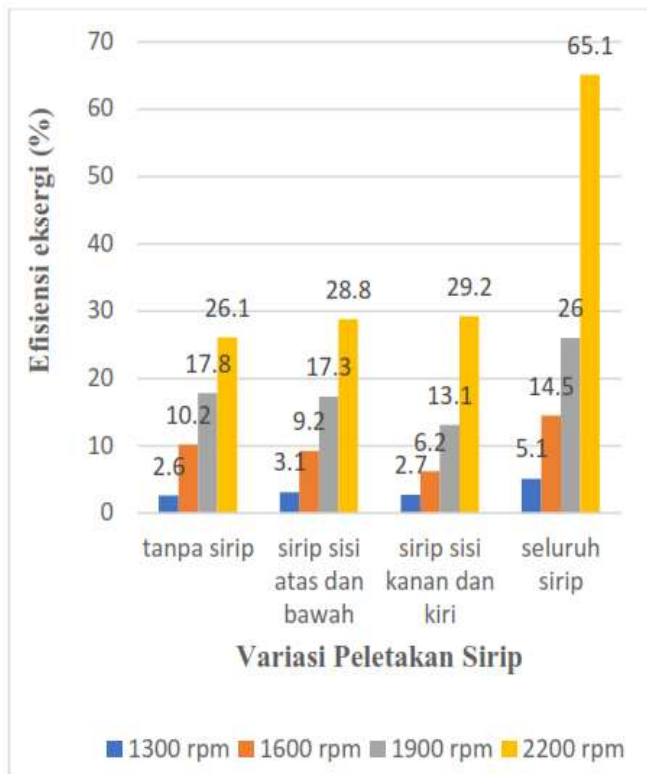
Pada konfigurasi dengan sirip di sisi kanan dan kiri, nilai kerusakan eksergi terendah tercatat pada putaran 1300 rpm sebesar 0,17 W, dan meningkat secara bertahap hingga mencapai 1,98 W pada putaran 2200 rpm. Variasi antar putaran pada konfigurasi ini relatif kecil, menunjukkan bahwa pengaruh peningkatan kecepatan mesin terhadap kerusakan eksergi cukup moderat.

Berbeda halnya dengan konfigurasi sirip di sisi atas dan bawah, di mana nilai kerusakan eksergi pada 1300 rpm tercatat sebesar 0,25 W dan mengalami peningkatan lebih tajam dibandingkan konfigurasi sebelumnya, terutama antara 1600 rpm hingga 1900 rpm. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan sirip pada sisi vertikal memberikan pengaruh lebih besar terhadap interaksi termal antara gas buang dan modul termoelektrik.

Sementara itu, pada konfigurasi dengan sirip di seluruh sisi, nilai kerusakan eksergi yang dihasilkan merupakan yang tertinggi dibandingkan konfigurasi lainnya. Pada putaran 1300 rpm, nilai kerusakan eksergi mencapai 0,83 W. Nilai ini terus meningkat menjadi 1,17 W pada 1600 rpm, 2,34 W pada 1900 rpm, dan mencapai nilai maksimum sebesar 3,05 W pada 2200 rpm. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin luas permukaan perpindahan panas, maka semakin besar pula energi yang masuk ke sistem, yang secara bersamaan juga meningkatkan potensi kerusakan eksergi akibat ketidaksempurnaan proses konversi energi termal menjadi energi listrik.

4.3. Hubungan Variasi Peletakan Sirip Terhadap Efisiensi Eksergi

Hubungan antara konfigurasi sirip terhadap efisiensi eksergi pada berbagai variasi putaran mesin ditunjukkan pada Gambar 6. Perhitungan efisiensi eksergi dilakukan dengan mempertimbangkan kontribusi perubahan entalpi, entropi, serta daya listrik yang dihasilkan oleh sistem termoelektrik.



Gambar 6. Grafik hubungan konfigurasi sirip terhadap efisiensi eksergi pada berbagai putaran mesin.

Gambar 6 . menunjukkan kondisi tanpa penggunaan sirip, nilai efisiensi eksergi pada putaran mesin 1300 rpm tercatat sebesar 2,8%. Terjadi lonjakan signifikan pada putaran 1600 rpm dengan efisiensi mencapai 15,9%. Efisiensi ini terus meningkat seiring kenaikan putaran mesin, yaitu sebesar 17% pada 1900 rpm dan mencapai 19,2% pada 2200 rpm. Peningkatan efisiensi ini menunjukkan bahwa peningkatan putaran mesin memperbesar selisih temperatur gas buang, sehingga memperkuat transfer panas ke modul termoelektrik.

Pada konfigurasi dengan sirip di sisi atas dan bawah, efisiensi eksergi tertinggi terjadi pada putaran 1600 rpm sebesar 16,9%. Namun, efisiensi terendah justru muncul pada putaran 1900 rpm dengan nilai 10,9%. Sementara itu, pada putaran 1300 rpm dan 2200 rpm, nilai efisiensinya masing-masing sebesar 14,3% dan 15,7%. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi ini cukup sensitif terhadap dinamika perubahan aliran gas buang pada rentang putaran menengah.

Konfigurasi sirip di sisi kanan dan kiri menunjukkan efisiensi tertinggi pada putaran 2200 rpm sebesar 16,7%, sedangkan efisiensi terendah terjadi pada putaran 1600 rpm sebesar 8,6%. Pada putaran 1300 rpm dan 1900 rpm, efisiensi masing-masing tercatat sebesar 15,2% dan 9,2%. Fluktuasi nilai ini mengindikasikan adanya interaksi kompleks antara distribusi panas lateral dan kecepatan aliran gas buang.

Konfigurasi dengan sirip di seluruh sisi menghasilkan efisiensi eksergi tertinggi di antara seluruh variasi, terutama pada putaran mesin 2200 rpm yang mencapai 33,3%. Pada putaran 1300 rpm, efisiensi awal sebesar 12,6%, kemudian meningkat menjadi 22,5% pada 1600 rpm, dan mencapai 26,1% pada 1900 rpm. Peningkatan efisiensi yang konsisten pada konfigurasi ini menunjukkan bahwa penambahan luas permukaan perpindahan panas secara menyeluruh berkontribusi signifikan terhadap optimalisasi konversi energi.

Secara keseluruhan, hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi eksergi tidak selalu meningkat secara linear terhadap kenaikan putaran mesin, karena dipengaruhi oleh interaksi antara laju aliran massa, perubahan entalpi dan entropi, serta performa termoelektrik dalam menghasilkan daya listrik. Meskipun demikian, peningkatan putaran mesin secara umum tetap memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi, terutama pada konfigurasi dengan luas permukaan sirip yang lebih besar.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan sirip pada sisi saluran gas buang berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kinerja *sistem recovery* termoelektrik. Dibandingkan dengan sistem tanpa sirip, konfigurasi dengan sirip menunjukkan peningkatan pada nilai eksergi, penurunan kerusakan eksergi, serta efisiensi yang lebih tinggi. Penambahan putaran mesin juga terbukti memberikan dampak positif terhadap peningkatan nilai eksergi, kerusakan eksergi, dan efisiensi eksergi. Hal ini disebabkan oleh naiknya temperatur gas buang pada putaran mesin yang lebih tinggi, sehingga memperbesar potensi perpindahan panas ke modul termoelektrik. Nilai eksergi tertinggi yang berhasil dicapai adalah sebesar 5,73 kJ/kg, terjadi pada kondisi sistem menggunakan sirip di seluruh sisi pada putaran mesin 2200 rpm. Pada kondisi yang sama, kerusakan eksergi tertinggi tercatat sebesar 3,05 W, sedangkan daya listrik tertinggi yang dihasilkan mencapai 1,53 W. Selain itu, efisiensi eksergi tertinggi tercapai pada putaran mesin 2200 rpm dengan konfigurasi sirip di seluruh sisi, yaitu sebesar 33,3%. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa optimalisasi desain sistem termoelektrik, khususnya pada aspek konfigurasi sirip dan pengaturan putaran mesin, memiliki peran penting dalam meningkatkan performa konversi energi termal menjadi energi listrik pada *sistem recovery* gas buang.

Referensi

- [1] N. Putra, R. A. Koestoer, M. Adhitya, A. Roekettino, and B. Trianto, "Potensi pembangkit daya termoelektrik untuk kendaraan hibrid," *Makara Journal of Technology*, vol. 13, no. 2, p. 149036, 2009.
- [2] H. Wardono, *Modul Pembelajaran Motor Bakar 4-Langkah*. Bandar Lampung, Indonesia: Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, 2004.
- [3] B. Hidayat, *Teknik Perawatan dan Pemeliharaan Sepeda Motor*. Yogyakarta, Indonesia: Absolut, 2008.
- [4] G. Min and D. M. Roe, "Peltier devices as generator," in *Handbook of Thermoelectrics*, 1994.
- [5] H. J. Goldsmid, *Introduction to Thermoelectricity*, vol. 121. Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [6] S. L. Soo, *Direct Energy Conversion*. London, U.K.: Prentice Hall, 1968.
- [7] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013.
- [8] R. Sukarno, "Pemanfaatan panas gas buang sepeda motor sebagai sumber energi alternatif menggunakan teknologi termoelektrik," *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur UNJ*, vol. 3, no. 3, pp. 149–156, 2016.
- [9] M. A. Rosen and I. Dincer, "Effect of varying dead-state properties on energy and exergy analyses of thermal systems," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 43, no. 2, pp. 121–133, 2004.

- [10] A. B. Rifqi, "Analisa pemanfaatan thermoelectric generator sebagai pembangkit listrik menggunakan panas gas buang kendaraan bermotor: Analysis of the utilization of thermoelectric generators as power plants using the heat of motor vehicle exhaust gases," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 4, no. 1, pp. 386–393, 2025.