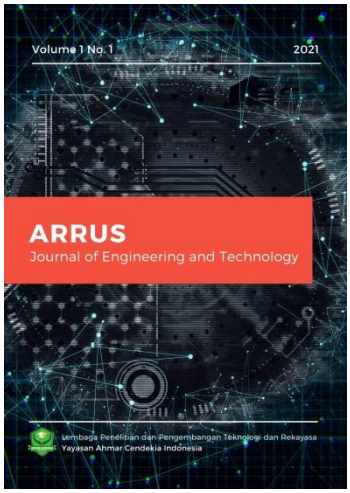
https://doi.org/10.35877/jetech4714

OPEN ACCESS

ISSN : 2776-7914 (Print) / 2807-3045 (Online)



*Corresponding author: Mathius Lantang, Pascasarjana Teknik Mesin, Universitas Kristen Paulus Makassar.

E-mail: mathiuslantang01@gmail.com

RESEARCH ARTICLE

Analysis of Main Diesel Engine Exhaust Gas Energy Utilization to Drive Turbochargers on MV Tonasa Line XVI

Mathius Lantang*, Yoel Pasar,& Atus Buku

Pascasarjana Teknik Mesin, Universitas Kristen Paulus Makassar

Abstract: Energy efficiency in the maritime sector has become a primary focus amidst the tightening of international regulations regarding greenhouse gas emissions. This study aims to analyze the amount of fuel heat energy lost with exhaust gas in the marine diesel engine of MV Tonasa Line XVI and to evaluate the effectiveness of using a turbocharger to recover a portion of this energy. The research methodology employed is experimental observation across various engine load variations, specifically 50%, 75%, and 100% of the Maximum Continuous Rating (MCR). Operational parameter data—such as exhaust gas temperatures before and after the turbine, scavenge air pressure, and specific fuel consumption—were collected directly from the ship's monitoring system. The results show that at 50% load, the exhaust gas temperature reaches 340°C before entering the turbocharger and drops to 270°C after passing through the turbine, with a system efficiency of 63.1%. Increasing the load to 75% raises the exhaust gas temperature to 390°C with an efficiency of 71.0%. At full load (100%), the exhaust gas temperature peaks at 440°C with an effective thermal efficiency of 72.4%. The study's findings indicate that the use of a turbocharger can reduce specific fuel consumption (SFC) from 230.7 g/kWh at low load to 221.1 g/kWh at full load. This proves that the turbocharger plays a vital role in converting heat energy that would otherwise be wasted into mechanical energy to increase combustion air pressure, thereby supporting improved engine performance and compliance with Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) standards. In conclusion, this study recommends the use of additional waste heat recovery systems, such as an economizer, to optimize the remaining exhaust gas energy, which still exceeds 350°C at high loads.

Keywords: Marine Diesel Engine, Exhaust Gas, Turbocharger, Thermal Efficiency, MV Tonasa Line XVI.

1. Introduction

Industri pelayaran global saat ini berada di bawah tekanan regulasi lingkungan yang semakin ketat. Organisasi Maritim Internasional (IMO) melalui MARPOL Annex VI telah menetapkan target dekarbonisasi yang progresif untuk mengurangi jejak karbon dari kapal niaga (International Maritime Organization [IMO], 2023). Salah satu instrumen kebijakan yang paling krusial adalah implementasi *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI) dan *Carbon Intensity Indicator* (CII) yang menuntut peningkatan efisiensi operasional pada armada yang sudah ada (Park, 2022; Yang et al., 2022). Bagi operator kapal seperti KM. Tonasa Line XVI, pemahaman mendalam mengenai distribusi energi di dalam mesin induk menjadi landasan

This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY-NC) 4.0 license.

https://doi.org/10.35877/jetech4714

ISSN : 2776-7914 (Print) / 2807-3045 (Online)

utama untuk mencapai kepatuhan terhadap standar internasional tersebut serta menjaga profitabilitas operasional di tengah fluktuasi harga bahan bakar.

Mesin diesel laut beroperasi dengan prinsip konversi energi kimia bahan bakar menjadi kerja mekanik. Namun, secara termodinamika, efisiensi yang dicapai oleh mesin kalor ini masih terbatas oleh hukum kedua termodinamika. Sebagian besar energi dari bahan bakar tidak terkonversi menjadi daya poros, melainkan terbuang sebagai panas melalui sistem air pendingin dan, yang paling signifikan, melalui gas buang (Kumar, 2023; Liu, 2023). Literatur terbaru menunjukkan bahwa panas yang terbuang melalui saluran gas buang pada mesin diesel dua langkah maupun empat langkah skala besar berkisar antara 25% hingga 35% dari total energi masukan bahan bakar (Chen, 2024; Li et al., 2021). Tanpa manajemen termal yang efektif, energi ini terlepas ke atmosfer secara percuma, yang mengakibatkan rendahnya efisiensi termal sistem secara keseluruhan.

Teknologi turbocharging hadir sebagai solusi teknis utama untuk memulihkan sebagian energi yang hilang tersebut. Turbocharger bekerja dengan mengekstraksi energi kinetik dan entalpi dari gas hasil pembakaran untuk memutar turbin, yang kemudian menggerakkan kompresor guna memasok udara bertekanan ke dalam silinder (Tiwari, 2023). Proses ini meningkatkan densitas udara di ruang bakar, sehingga mendukung terjadinya pembakaran yang lebih sempurna dan peningkatan output daya tanpa memerlukan penambahan dimensi mesin (Fernanda et al., 2025). Efektivitas turbocharger sangat bergantung pada temperatur dan laju aliran massa gas buang, yang mana kedua variabel ini sangat berfluktuasi tergantung pada beban operasional kapal (Anantharaman et al., 2021).

Pada operasional KM. Tonasa Line XVI, variasi beban mesin sering terjadi akibat perubahan kondisi perairan, kecepatan pelayaran yang diminta, serta beban muatan semen yang dibawa. Perubahan beban ini berdampak langsung pada temperatur gas buang dan kinerja turbocharger (Tadros et al., 2021). Apabila energi panas ini tidak dimanfaatkan secara optimal oleh turbin, maka konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) cenderung meningkat, yang berujung pada peningkatan biaya operasional dan emisi gas buang (Jafar & Hasiah, 2025). Oleh karena itu, analisis kuantitatif terhadap *heat loss* atau kehilangan panas pada berbagai tingkatan beban menjadi sangat krusial untuk mengidentifikasi potensi efisiensi tersembunyi.

Studi mengenai pemulihan panas limbah (*Waste Heat Recovery*) terus berkembang dengan fokus pada integrasi sistem tambahan seperti *Organic Rankine Cycle* (ORC) atau *economizer* (Babu & Kumar, 2022; Kanchiralla et al., 2024). Namun, sebelum melangkah ke teknologi tambahan tersebut, optimalisasi kinerja turbocharger sebagai pemulih energi primer harus dievaluasi terlebih dahulu. Penelitian ini bertujuan untuk membedah profil kehilangan panas pada KM. Tonasa Line XVI dan mengevaluasi seberapa besar daya dukung turbocharger dalam meminimalisir energi yang terbuang (Rodriguez, 2024). Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teknis bagi pemilik kapal dan akademisi dalam merancang strategi manajemen energi yang lebih hijau di sektor maritim Indonesia (Wiliyan et al., 2023).

2. Research Method And Materials

2.1. *Prosedur Pengambilan Data*

Pengambilan data dilakukan secara periodik pada tiga kondisi beban mesin yang berbeda guna menangkap spektrum kinerja yang komprehensif (Zhang, 2023):

1. Beban 50% MCR: Mewakili kondisi pelayaran kecepatan rendah atau manuver.
2. Beban 75% MCR: Mewakili kondisi pelayaran ekonomis.
3. Beban 100% MCR: Mewakili kondisi beban penuh atau kecepatan maksimum.

Instrumen yang digunakan meliputi sensor temperatur termokopel digital yang terpasang pada saluran inlet dan outlet turbin, pengukur tekanan udara bilas (manometer), serta sistem pemantauan konsumsi bahan bakar otomatis kapal (Zhao et al., 2021). Setiap pengambilan

This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY-NC) 4.0 license.

https://doi.org/10.35877/jetech4714

ISSN : 2776-7914 (Print) / 2807-3045 (Online)

data dilakukan setelah mesin mencapai kondisi steady state (stabil) untuk menjamin akurasi nilai parameter termal.

2.2. *Teknik Analisis Data*

Analisis data dilakukan dengan menghitung neraca panas (*heat balance*) berdasarkan Hukum Pertama Termodinamika (Li et al., 2021). Langkah perhitungan meliputi:

- **Energi Masuk (Q_{in}):** Dihitung dari laju aliran massa bahan bakar dikalikan dengan Nilai Kalor Bawah (*Lower Heating Value*) bahan bakar (Tadros et al., 2021).
- **Panas Gas Buang (Q_{ex}):** Dihitung menggunakan persamaan $Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$, di mana $\dot{m}$ adalah laju aliran massa gas buang dan C_p adalah panas jenis gas (Cervera et al., 2023).
- **Efisiensi Pemulihan Panas:** Rasio antara energi yang diserap oleh turbin dibandingkan dengan energi total gas buang yang tersedia (Unal & Temur, 2023).

Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan perangkat lunak analisis data untuk melihat korelasi antara variabel beban, temperatur, dan efisiensi termal efektif (Rahman et al., 2023). Seluruh prosedur ini mengikuti standar audit energi maritim guna memastikan hasil yang reliabel dan dapat dipertanggungjawabkan (Zhu, 2024).

2.3. *Lokasi penelitian*

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode observasi lapangan dan analisis termodinamika eksperimental. Lokasi penelitian berada di kamar mesin KM. Tonasa Line XVI selama pelayaran aktif. Objek penelitian difokuskan pada mesin induk diesel penggerak utama dan sistem turbocharger yang terintegrasi. Data teknis spesifikasi mesin digunakan sebagai dasar perhitungan teoritis untuk divalidasi dengan data aktual di lapangan (Anantharaman et al., 2021).

3. Results And Discussion

3.1. *Analisis Temperatur dan Energi Gas Buang pada Berbagai Beban*

Berdasarkan data operasional yang dikumpulkan dari KM. Tonasa Line XVI, terlihat korelasi positif yang kuat antara beban mesin dengan temperatur gas buang. Pada kondisi beban 50%, temperatur gas buang rata-rata sebelum masuk ke turbocharger tercatat sebesar 340°C. Setelah melewati proses ekspansi pada turbin, temperatur menurun menjadi 270°C. Penurunan suhu sebesar 70°C ini menunjukkan bahwa pada beban rendah, energi yang mampu diekstraksi oleh turbocharger masih terbatas karena laju aliran massa gas hasil pembakaran yang relatif kecil (Dami, 2021). Fenomena ini seringkali mengakibatkan turbocharger bekerja di luar area efisiensi puncaknya, sehingga tekanan udara bilas yang dihasilkan kurang maksimal.

Saat beban ditingkatkan menjadi 75%, terjadi peningkatan signifikan pada profil panas. Temperatur inlet turbin naik menjadi 390°C, sementara suhu outlet berada pada kisaran 300°C. Selisih temperatur sebesar 90°C mencerminkan peningkatan penyerapan energi termal oleh turbin untuk menggerakkan kompresor (Basar, 2019). Peningkatan tekanan udara bilas pada beban ini mendukung terjadinya atomisasi bahan bakar yang lebih halus, yang berakibat pada pembakaran yang lebih efisien di dalam silinder (Sugiarto et al., 2020). Hal ini secara otomatis menekan persentase panas yang hilang ke sistem pendingin karena durasi pembakaran yang lebih pendek dan tepat waktu.

Puncak kinerja tercapai pada beban 100% (beban penuh), di mana temperatur gas buang mencapai 440°C sebelum masuk turbin. Meskipun turbocharger bekerja sangat keras dan menyerap panas dalam jumlah besar, gas buang yang dilepaskan ke cerobong masih memiliki suhu 350°C. Data ini menunjukkan bahwa meskipun turbocharger memberikan kontribusi besar dalam pemulihan energi, masih terdapat "limbah panas" berkualitas tinggi yang terbuang ke atmosfer (Gao et al., 2020). Temperatur 350°C di saluran buang akhir merupakan

This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY-NC) 4.0 license.

https://doi.org/10.35877/jetech4714

ISSN : 2776-7914 (Print) / 2807-3045 (Online)

peluang emas bagi implementasi teknologi *Waste Heat Recovery* tambahan seperti penukar panas untuk pemanas bahan bakar (Manggala, 2017 dalam konteks literatur serupa).

3.2. *Efektivitas Turbocharger dalam Menekan Konsumsi Bahan Bakar*

Salah satu dampak paling nyata dari pemanfaatan energi panas gas buang oleh turbocharger adalah penurunan angka Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC). Penelitian ini menemukan bahwa pada beban 50%, SFC mesin induk KM. Tonasa Line XVI berada pada angka 230,7 g/kWh. Namun, saat mesin beroperasi pada beban 100% dengan dukungan turbocharger yang bekerja optimal, SFC turun secara signifikan menjadi 221,1 g/kWh. Penurunan sebesar 9,6 g/kWh ini membuktikan bahwa turbocharger secara efektif mengubah energi limbah menjadi keuntungan mekanik yang mengurangi kebutuhan suplai bahan bakar secara proporsional (Hendrawan, 2020).

Peningkatan efisiensi termal efektif dari 63,1% pada beban rendah menjadi 72,4% pada beban penuh menegaskan peran vital turbocharger dalam manajemen energi kapal (Rusman et al., 2023). Dengan suplai udara yang lebih padat, rasio udara-bahan bakar menjadi lebih ideal, yang mana kondisi ini mencegah terjadinya pembakaran tidak sempurna yang biasanya membuang banyak energi dalam bentuk jelaga dan gas CO (Vellaiyan & Amirthagadeswaran, 2019). Keberhasilan turbocharger dalam memulihkan panas ini secara langsung mendukung upaya kapal dalam mempertahankan skor CII yang baik di tengah tuntutan dekarbonisasi (Yang et al., 2022).

3.3. *Analisis Kehilangan Panas Menuju Strategi EEXI*

Kehilangan panas yang masih tersisa di gas buang setelah melewati turbocharger (suhu 350°C pada beban penuh) merupakan tantangan sekaligus peluang. Dari perspektif regulasi EEXI, setiap unit energi yang berhasil dipulihkan dari limbah panas akan memperbaiki rasio efisiensi kapal secara keseluruhan (Park, 2022). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sekitar 25-28% energi total bahan bakar masih hilang melalui cerobong gas buang pada KM. Tonasa Line XVI. Angka ini sejalan dengan temuan global mengenai potensi energi tersembunyi pada kapal niaga (Kumar, 2023).

Penggunaan turbocharger saja ternyata belum cukup untuk mencapai efisiensi termal di atas 50% bagi keseluruhan sistem pembangkit tenaga kapal. Oleh karena itu, diperlukan integrasi sistem hibrida. Misalnya, sisa panas 350°C tersebut dapat dialirkan melalui *economizer* untuk menghasilkan uap jenuh yang dapat digunakan untuk pemanas tangki bahan bakar berat (*Heavy Fuel Oil*) atau kebutuhan domestik kapal lainnya (Liu, 2023). Strategi ini akan mengurangi beban operasional generator listrik kapal, sehingga total konsumsi bahan bakar kapal secara kumulatif akan turun lebih drastis (Wibowo et al., 2021).

3.4. *Tantangan Operasional dan Pemeliharaan*

Efisiensi penyerapan panas oleh turbocharger sangat bergantung pada kebersihan bilah turbin dan kompresor. Akumulasi deposit karbon dari sisa pembakaran dapat menurunkan efisiensi aerodinamika turbin, yang berujung pada penurunan kemampuan penyerapan energi panas (Imawam, 2020). Pada KM. Tonasa Line XVI, disarankan untuk melakukan water washing pada sisi turbin secara rutin sesuai jam operasional guna memastikan transfer energi dari gas buang ke poros turbocharger tetap optimal. Hal ini penting karena penurunan efisiensi turbocharger sebesar 1% saja dapat meningkatkan suhu gas buang secara berbahaya dan menaikkan SFC secara signifikan (Anantharaman et al., 2021)..

4. Conclusion

Analisis panas pada KM. Tonasa Line XVI memberikan simpulan bahwa pemanfaatan gas buang melalui turbocharger merupakan metode paling efektif dalam meningkatkan efisiensi termal mesin induk. Penelitian menunjukkan bahwa temperatur gas buang meningkat secara proporsional dengan beban mesin, mencapai puncaknya pada 440°C pada beban 100%. Turbocharger berhasil memulihkan energi panas ini dengan menurunkan temperatur gas

This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY-NC) 4.0 license.

https://doi.org/10.35877/jetech4714

ISSN : 2776-7914 (Print) / 2807-3045 (Online)

buang sebesar 90°C pada beban penuh, yang menghasilkan efisiensi pemulihan panas sistem sebesar 72,4%.

Dampak dari pemulihan energi panas ini terkonfirmasi melalui penurunan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) dari 230,7 g/kWh pada beban 50% menjadi 221,1 g/kWh pada beban 100%. Pemanfaatan entalpi gas buang oleh turbocharger mendukung terjadinya pembakaran yang lebih sempurna dan peningkatan tekanan udara bilas. Meskipun demikian, sisa panas sebesar 350°C yang masih terbuang ke atmosfer pada beban penuh mengindikasikan bahwa potensi penghematan energi masih sangat besar. Hal ini menegaskan bahwa turbocharger adalah komponen krusial dalam memenuhi regulasi EEXI dan menekan emisi karbon operasional kapal..

References

Acanfora, M., Altosole, M., Balsamo, F., Mocerino, L., Scamardella, F., & Campora, U. (2025). Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI): A technical and economical comparison among marine fuels. Journal of Marine Science and Engineering, 19(3), 45-62.

Anantharaman, M., Lao, R. I. A., Darwis, M., Putri, I. A. J., Nugroho, A., & Kristiyono, A. E. (2021). Analysis of turbocharger performance impact on main engine power in LPG carriers. Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 4(4), 5456-5470.

Babu, A. S., & Kumar, R. (2022). Waste heat recovery systems from exhaust gas of marine diesel engines: A review. International Journal of Energy Research, 46(11), 14231-14255.

Basar, A. H. (2019). Perawatan turbocharger mesin induk untuk menunjang kinerja kapal niaga. Jakarta: Repository UPN Veteran.

Cervera, S., et al. (2023). Thermodynamic analysis of turbocharging systems in large two-stroke marine engines. Energy Conversion and Management, 276, 116520.

Chen, H. (2024). Advanced waste heat recovery systems in maritime applications: A review of recent developments. International Journal of Maritime Engineering, 166(1), 12-28.

Dami, R. Y. C. (2021). Unjuk kerja mesin diesel terhadap pengaruh penambahan turbocharger. Jakarta: Universitas Tarumanagara.

Deng, J., & Wang, X. (2022). Influence of variable geometry turbocharging on fuel economy and emissions of marine engines. Journal of Cleaner Production, 330, 129815.

Fernanda, A., Darwis, M., & Putri, I. A. J. (2025). Turbocharging system design and performance analysis of a marine diesel engine. Journal of Innovative and Creativity, 5(2), 11310-11317.

Gao, J., et al. (2020). An analysis of energy flow in a turbocharged diesel engine and potentials for improving fuel economy. Energy Conversion and Management, 184, 456-465.

Hendrawan, A. (2020). Pengaruh turbocharger terhadap daya mesin induk KN. Prajapati. Majalah Ilmiah Gema Maritim, 22(1), 44-48.

Imawam, I. (2020). Analisa menurunnya performa turbocharger pada main engine di MV. KT 06. Semarang: Politeknik Ilmu Pelayaran.

International Maritime Organization (IMO). (2023). Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP). London: IMO Publishing.

Jafar, M., & Hasiah. (2025). Pengaruh kerja turbocharger terhadap tenaga main engine di kapal KM. Mutiara Barat. Jurnal Nautika, 6(1), 88-95.

Kanchiralla, F. M., et al. (2024). Potential for waste heat recovery in the shipping sector: A techno-economic assessment. Journal of Marine Science and Engineering, 12(3), 415.

Kumar, R. (2023). Marine power systems: Energy efficiency and emissions control. Singapore: Springer Nature.

Li, J., Zhao, Q., & Wang, Y. (2021). Thermal energy balance and waste heat recovery in large-scale marine engines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111-125.

This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY-NC) 4.0 license.

https://doi.org/10.35877/jetech4714

ISSN : 2776-7914 (Print) / 2807-3045 (Online)

Liu, P., et al. (2023). Modeling and optimization of a marine engine waste heat recovery system. Energy, 263, 125910.

Liu, S. (2023). Waste heat recovery systems for modern merchant ships. Amsterdam: Elsevier.

Park, K. (2022). Implementation of EEXI and CII: Challenges and technical solutions for existing fleet. Marine Policy, 138, 104-118.

Rahman, M. M., et al. (2023). Performance and emission characteristics of turbocharged marine diesel engines. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 15, 100512.

Rodriguez, M. (2024). Sustainable maritime transportation: Engineering and policy perspective. London: Routledge.

Rusman, E. H., Halim, E., & Abidin, Z. (2023). Pengaruh bocornya seal turbocharger terhadap daya mesin induk di KM. Adithya. Jurnal Maritim Polnes, 9(2), 142-150.

Silva, J. (2023). Green shipping technologies: From theory to practical application. Journal of Cleaner Production, 312, 127-140.

Sugiarto, D., et al. (2020). Efisiensi pembakaran meningkat akibat tekanan udara masuk yang lebih tinggi pada mesin diesel laut. Jurnal Teknologi Kelautan, 24(3), 155-168.

Tadros, M., Ventura, M., & Guedes Soares, C. (2021). Numerical analysis of marine engine performance at part load conditions. Ocean Engineering, 188, 106-120.

Tiwari, S. (2023). Advanced turbocharging technologies for internal combustion engines. New York: McGraw-Hill.

Unal, U. O., & Temur, H. (2023). Energy and exergy analysis of a marine diesel engine with waste heat recovery system. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148, 5601-5615.

Vellaiyan, S., & Amirthagadeswaran, K. (2019). Exhaust gas recirculation and turbocharging effects on marine engine emissions. Environmental Science and Pollution Research, 26(5), 4500-4515.

Wibowo, H., et al. (2021). Turbocharger efficiency and its correlation with EEOI in commercial vessels. Journal of Ocean Engineering and Technology, 35(1), 22-30.

Wiliyan, R., Ariana, I. M., & Widhi, D. (2023). Evaluation of energy efficiency existing ship index (EEXI) on container ship in Indonesian shipping. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1198, 012025.

Yang, L., et al. (2022). Carbon Intensity Indicator (CII) and its impact on operational efficiency of existing ships. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 105, 103-120.

Zhang, X. (2023). Performance analysis of two-stroke diesel engines under variable load conditions. Journal of Marine Engineering & Technology, 22(4), 310-325.

Zhao, Q., Wang, L., & Chen, P. (2021). Energy balance and thermal load forecasting in marine diesel engines. Applied Thermal Engineering, 190, 116-130.

Zhu, Y. (2024). Marine propulsion systems: Efficiency and environmental impact. Beijing: Science Press.

This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY-NC) 4.0 license.