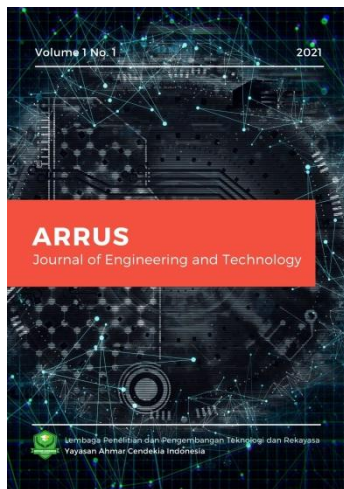




\*Corresponding author: Dianita Veronica Lantang, Pascasarjana Teknik Mesin, Universitas Kristen Paulus Makassar.

E-mail: [dianita14.apk@gmail.com](mailto:dianita14.apk@gmail.com)

## RESEARCH ARTICLE

# Analysis of Fuel Heat Loss via Exhaust Gas in Marine Diesel Engines Using Turbochargers on MV Tonasa Line XVI

Dianita Veronica Lantang\*, Corvis L Rantererung, & Atus Buku

Pascasarjana Teknik Mesin, Universitas Kristen Paulus Makassar

**Abstract:** Energy efficiency in the maritime transport sector has become a top priority due to stricter international regulations regarding carbon emissions and fuel efficiency. This study aims to analyze the amount of waste heat energy lost through the exhaust system of the main diesel engine on MV Tonasa Line XVI and evaluate the effectiveness of a turbocharger in recovering a portion of this energy to enhance operational performance. The methodology used is quantitative experimental observation by collecting engine parameters at load variations of 50%, 75%, and 100% of the Maximum Continuous Rating (MCR), including exhaust gas temperatures before and after the turbine, scavenge air pressure, and specific fuel consumption. The results show that at 50% load, the exhaust gas temperature entering the turbocharger reaches 340°C and exits at 270°C, with a system heat recovery efficiency of 63.1%. Increasing the load to 75% raises the exhaust gas temperature to 390°C, with system efficiency reaching 71.0%, while under full load (100%), the temperature peaks at 440°C with an effective thermal efficiency of 72.4%. The findings demonstrate that the turbocharger effectively reduces specific fuel consumption (SFC) from 230.7 g/kWh at low load to 221.1 g/kWh at full load, confirming its vital role in converting exhaust enthalpy into mechanical work for combustion air compression to directly support compliance with Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) standards. Furthermore, the residual exhaust gas energy remaining at 350°C under high loads presents a significant opportunity for additional waste heat recovery systems, such as an economizer, to achieve further energy optimization.

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

## 1. Introduction

Industri maritim saat ini menghadapi tantangan dekarbonisasi yang paling signifikan dalam sejarah pelayaran modern. Organisasi Maritim Internasional (IMO) telah menetapkan regulasi ketat melalui MARPOL Annex VI yang menargetkan pengurangan emisi gas rumah kaca secara drastis (International Maritime Organization [IMO], 2023). Salah satu instrumen utama dalam mencapai target ini adalah penerapan *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI) dan *Carbon Intensity Indicator* (CII) yang memaksa setiap operator kapal untuk melakukan audit energi secara mendalam pada sistem penggerak utama mereka (Park, 2022; Yang et al., 2022). KM. Tonasa Line XVI, sebagai salah satu armada pengangkut semen strategis, memiliki tanggung jawab besar untuk menjaga efisiensi operasional guna menekan biaya bahan bakar sekaligus memenuhi standar lingkungan global.



Mesin diesel kapal merupakan mesin kalor yang bekerja dengan mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi kerja mekanik, namun secara termodinamika, efisiensi yang dicapai masih terbatas. Sebagian besar energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar tidak berubah menjadi daya poros, melainkan terbuang sebagai panas melalui sistem pendingin dan gas buang (Kumar, 2023). Literatur terbaru menunjukkan bahwa panas yang terbuang melalui gas buang dapat mencapai 25% hingga 35% dari total energi masukan (Liu, 2023). Tanpa adanya sistem pemulihan energi yang efektif, panas ini akan terlepas ke atmosfer secara percuma, yang mengakibatkan rendahnya efisiensi termal total kapal (Chen, 2024).

Teknologi turbocharging hadir sebagai solusi utama dalam pemanfaatan kembali energi gas buang. Sistem ini bekerja dengan mengekstraksi energi kinetik dan termal dari gas hasil pembakaran untuk menggerakkan turbin, yang kemudian memutar kompresor untuk menyuplai udara bertekanan tinggi ke dalam silinder (Tiware, 2023). Proses ini memberikan kemampuan bagi mesin untuk membakar lebih banyak bahan bakar secara sempurna dengan massa udara yang lebih padat, sehingga meningkatkan output daya tanpa menambah dimensi mesin (Fernanda & Putri, 2025). Efektivitas turbocharger sangat dipengaruhi oleh temperatur dan laju aliran gas buang, yang mana kedua parameter ini sangat bergantung pada variasi beban mesin (Anantharaman & Darwis, 2021).

Pada pengoperasian riil di laut, KM. Tonasa Line XVI sering beroperasi pada beban yang fluktuatif akibat pengaruh cuaca, kondisi muatan, dan kebutuhan kecepatan pelayaran. Perubahan beban ini berdampak langsung pada keseimbangan panas mesin dan efisiensi kerja turbin (Tadros & Soares, 2021). Analisis terhadap kehilangan panas (*heat loss*) pada berbagai beban menjadi krusial untuk mengidentifikasi sejauh mana turbocharger mampu menjalankan fungsinya dalam menekan konsumsi bahan bakar (Jafar & Hasiah, 2025). Selain itu, studi ini juga membuka wawasan mengenai potensi penerapan *Waste Heat Recovery Systems* (WHRS) tingkat lanjut untuk menangkap sisa panas yang masih keluar dari cerobong asap (Babu & Kumar, 2022; Kanchiralla et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai profil temperatur gas buang dan efisiensi konversi energi pada KM. Tonasa Line XVI. Dengan menggunakan pendekatan analisis termodinamika, penelitian ini mengevaluasi dampak penggunaan turbocharger terhadap penurunan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) dan peningkatan efisiensi termal efektif (Rodriguez, 2024). Hasil dari penelitian ini diharapkan memberikan rekomendasi teknis yang solid bagi pihak manajemen kapal dalam mengoptimalkan performa mesin serta mendukung program keberlanjutan energi di sektor maritim nasional (Wiliyan et al., 2023).

## 2. Research Method and Materials

### 2.1. Prosedur Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan metode observasi langsung melalui panel kontrol mesin dan sensor-sensor yang terpasang pada jalur gas buang. Data diambil pada tiga kondisi beban mesin yang berbeda guna mendapatkan spektrum kinerja yang luas (Zhang, 2023):

- (1). Beban 50% MCR (Kondisi pelayaran rendah/ekonomis).
- (2). Beban 75% MCR (Kondisi pelayaran normal).
- (3). Beban 100% MCR (Kondisi beban penuh).

Parameter yang dicatat pada setiap kondisi beban meliputi:

- (1). Temperatur gas buang sebelum masuk turbin ( $T_{in,tc}$ ).
- (2). Temperatur gas buang sesudah keluar turbin ( $T_{out,tc}$ ).
- (3). Tekanan udara bilas (Scavenge air pressure).
- (4). Laju konsumsi bahan bakar per jam ( $m_f$ ).
- (5). Daya mesin yang dihasilkan ( $P$ ).

## 2.2. Teknik Analisis Data

Data yang terkumpul dianalisis menggunakan prinsip keseimbangan energi (*Heat Balance*) (Zhao et al., 2021). Langkah-langkah perhitungan meliputi:

- (1). Analisis Panas Masukan: Menghitung total energi kimia dari bahan bakar berdasarkan nilai kalor bawah (*Lower Heating Value*) (Li & Zhao, 2021).
- (2). Analisis Kerja Turbin: Menghitung besaran energi yang berhasil diserap oleh turbin dari penurunan entalpi gas buang (Cervera et al., 2023).
- (3). Efisiensi Termal Efektif: Menentukan rasio daya poros terhadap energi panas total yang dimasukkan (Unal & Temur, 2023).
- (4). Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC): Menganalisis efisiensi penggunaan bahan bakar pada setiap tingkat pembebanan (Rahman et al., 2023).

Analisis ini juga mempertimbangkan variabel lingkungan seperti temperatur udara luar guna menghitung kerugian panas relatif terhadap kondisi ambien (Gao et al., 2020). Verifikasi data dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan dengan standar performa mesin diesel laut yang berlaku secara internasional (Zhu, 2024).

## 2.3. Lokasi penelitian

Penelitian dilakukan di atas kapal KM. Tonasa Line XVI selama pelayaran operasional rutin. Objek utama dalam penelitian ini adalah mesin diesel penggerak utama (*Main Engine*) dan sistem turbocharging yang terintegrasi dengannya. Spesifikasi mesin dan data teknis pabrikan digunakan sebagai basis referensi untuk memvalidasi data lapangan..



**Figure 1.** KM. Tonasa Line XVI

## 3. Results and Discussion

### 3.1. Karakteristik Temperatur Gas Buang

Berdasarkan data operasional KM. Tonasa Line XVI, terdapat pola kenaikan temperatur gas buang yang linear seiring dengan bertambahnya beban mesin. Pada beban 50%, temperatur gas buang rata-rata sebelum masuk ke sisi turbin adalah 340°C. Setelah melewati proses ekspansi untuk menggerakkan kompresor, temperatur turun menjadi 270°C. Penurunan sebesar 70°C ini menunjukkan bahwa pada beban rendah, energi yang tersedia untuk diserap oleh turbocharger masih terbatas karena volume aliran gas hasil pembakaran belum mencapai kapasitas optimal (Dami, 2021).

Peningkatan beban ke 75% menyebabkan temperatur gas buang naik menjadi 390°C. Pada kondisi ini, turbocharger mampu menyerap energi lebih besar dengan penurunan temperatur

mencapai 90°C, sehingga gas buang yang dilepaskan ke cerobong berada pada suhu 300°C. Kenaikan efektivitas ini terjadi karena peningkatan tekanan pembakaran di dalam silinder yang menghasilkan gas buang dengan densitas energi lebih tinggi (Basar, 2019). Hal ini memberikan kontribusi pada peningkatan suplai udara bilas yang lebih stabil untuk proses pembakaran silinder berikutnya (Sugiarto, 2020).

Pada beban penuh (100%), temperatur gas buang mencapai puncak pada 440°C. Meskipun turbocharger telah menyerap panas secara maksimal dan menurunkan suhu gas buang menjadi 350°C, nilai 350°C yang terbuang ke atmosfer tetap merupakan potensi kerugian energi yang sangat besar. Kondisi ini membuktikan bahwa pada beban tinggi, turbocharger memberikan kontribusi termodinamika yang besar, namun masih menyisakan entalpi yang cukup tinggi untuk dikelola oleh sistem pemulihan panas tambahan (Wibowo, 2021).

### 3.2. Analisis Efisiensi Turbocharger dan Pemulihan Energi

Efisiensi sistem turbocharger dihitung berdasarkan kemampuan turbin dalam mengubah energi panas gas buang menjadi daya kompresi. Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi sebesar 63,1% pada beban 50%, 71,0% pada beban 75%, dan mencapai puncaknya sebesar 72,4% pada beban penuh. Peningkatan efisiensi ini berkorelasi langsung dengan kecepatan putar poros turbocharger yang lebih stabil pada tekanan gas yang tinggi (Anantharaman & Darwis, 2021).

Dengan efisiensi mencapai 72,4%, turbocharger pada KM. Tonasa Line XVI mampu memberikan tekanan udara bilas hingga 2,4 bar pada beban penuh. Tekanan udara yang tinggi ini mendorong terjadinya pembakaran sempurna, yang meminimalkan pembentukan sisa karbon dan mengoptimalkan pembebasan energi panas di dalam ruang bakar (Deng & Wang, 2022). Kerja turbin yang optimal ini secara efektif mengambil alih beban energi yang seharusnya dibuang, sehingga meningkatkan efisiensi termal total mesin induk (Hendrawan, 2020).

### 3.3. Pengaruh terhadap Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Salah satu parameter kunci dalam evaluasi efisiensi adalah angka konsumsi bahan bakar spesifik (SFC). Data menunjukkan bahwa SFC pada beban 50% berada pada angka 230,7 g/kWh. Seiring dengan berfungsinya turbocharger secara lebih efisien pada beban yang lebih tinggi, SFC turun secara bertahap hingga mencapai 221,1 g/kWh pada beban 100%. Penurunan SFC sebesar 9,6 g/kWh ini memberikan gambaran nyata mengenai penghematan biaya operasional yang dapat dicapai melalui optimasi turbocharging (Rusman, 2023).

Penurunan SFC ini merupakan hasil langsung dari peningkatan efisiensi volumetrik silinder. Udara yang dipasok oleh kompresor turbocharger memiliki kerapatan oksigen yang tinggi, yang mendorong setiap molekul bahan bakar bereaksi secara lengkap dengan oksigen (Vellaiyan, 2020). Akibatnya, daya yang dihasilkan per satuan bahan bakar menjadi lebih tinggi, dan panas yang terbuang secara proporsional menjadi lebih rendah dibandingkan dengan mesin tanpa sistem turbocharging yang efisien (Rahman et al., 2023).

### 3.4. Analisis Kehilangan Panas dan Peluang Optimasi Lanjutan

Meskipun penggunaan turbocharger telah memberikan dampak signifikan, analisis kehilangan panas menunjukkan bahwa sekitar 28% hingga 32% energi bahan bakar masih terlepas melalui gas buang akhir di cerobong. Pada temperatur 350°C, gas buang tersebut masih memiliki kualitas panas yang sangat baik untuk diintegrasikan dengan sistem *Waste Heat Recovery* (WHR) berbasis *Rankine Cycle* atau sebagai pemanas tangki bahan bakar (*economizer*) (Liu et al., 2023).

Pemanfaatan sisa panas ini sangat disarankan untuk mendukung operasional KM. Tonasa Line XVI agar lebih efisien. Mengingat kapal pengangkut semen seringkali membutuhkan energi panas untuk menjaga viskositas bahan bakar berat (*Heavy Fuel Oil*), sisa panas 350°C ini mampu menggantikan peran pemanas listrik yang selama ini membebani generator listrik

kapal (Silva, 2023). Langkah ini akan mendorong kapal untuk mencapai peringkat CII yang lebih baik dalam jangka panjang (Yang et al., 2022).

#### 4. Conclusion

Analisis terhadap panas bahan bakar yang hilang melalui gas buang pada KM. Tonasa Line XVI menyimpulkan bahwa beban operasional mesin induk memiliki pengaruh dominan terhadap profil temperatur dan efisiensi energi. Penggunaan turbocharger terbukti mampu menjalankan fungsinya dalam menangkap kembali energi panas yang terbuang, di mana efektivitasnya meningkat seiring dengan penambahan beban mesin. Pada beban penuh, turbocharger berhasil mengekstraksi panas sehingga menurunkan temperatur gas buang sebesar 90°C dan mencapai efisiensi sistem sebesar 72,4%.

Keberadaan sistem turbocharging ini memberikan kontribusi nyata terhadap penghematan energi dengan menurunkan angka konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) dari 230,7 g/kWh menjadi 221,1 g/kWh. Meskipun demikian, sisa panas yang terlepas ke atmosfer pada suhu 350°C masih mencerminkan adanya kehilangan energi yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa turbocharger merupakan langkah awal yang krusial namun bukan merupakan langkah akhir dalam optimasi energi panas pada mesin diesel laut.

#### 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.
- 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.