

Strategi Energy Efficiency Operational Index (EEOI) sebagai Instrumen Pengendalian Emisi Gas Buang Mesin Diesel di Kapal Modern

Fajar Pujiyanto^{1*}, Santhi Wilastari², Eka Darmana³, Susanto Susanto⁴

^{1,2,3} Prodi TRPK Politeknik Bumi Akpelni

⁴ Prodi Teknik Polimer Semarang

*e-mail korespondensi: fajar.pujiyanto@akpelni.ac.id

Abstract

The transition toward sustainable maritime operations requires a standardized and measurable indicator to evaluate ship energy performance in real operating conditions. The Energy Efficiency Operational Index (EEOI), recommended by the International Maritime Organization (IMO), provides a quantitative measure of CO₂ emissions relative to fuel consumption. This paper examines strategic approaches for implementing EEOI as a practical emissions control instrument for modern ships, focusing on calculation methods, operational parameters, and supporting technologies that influence index performance. The analysis highlights that consistent application of EEOI enables ship operators to identify energy-inefficient operating patterns and supports decision making for fuel saving measures such as optimized voyage planning, and propulsion system tuning. Furthermore, the integration of digital monitoring and realtime data analytics significantly enhances the accuracy and responsiveness of EEOI assessments. The findings indicate that EEOI functions not only as a compliance reporting tool but also as a core component of energy management strategies aimed at meeting IMO 2030–2050 emission reduction targets. Effective utilization of the index contributes to more efficient, economical, and environmentally responsible ship operations

Keywords: EEOI, Modern Ships, Exhaust Gas Emission Control

Abstrak

Transisi menuju operasi maritim berkelanjutan membutuhkan indikator standar dan terukur untuk mengevaluasi kinerja energi kapal dalam kondisi operasi nyata. Indeks Efisiensi Energi Operasional (EEOI), yang direkomendasikan oleh Organisasi Maritim Internasional (IMO), memberikan ukuran kuantitatif emisi CO₂ relatif terhadap konsumsi bahan bakar. Makalah ini mengkaji pendekatan strategis untuk mengimplementasikan EEOI sebagai instrumen pengendalian emisi praktis untuk kapal modern, dengan fokus pada metode perhitungan, parameter operasional, dan teknologi pendukung yang memengaruhi kinerja indeks. Analisis ini menyoroti bahwa penerapan EEOI yang konsisten memungkinkan operator kapal untuk mengidentifikasi pola operasi yang tidak efisien energi dan mendukung pengambilan keputusan untuk langkah-langkah penghematan bahan bakar seperti perencanaan pelayaran yang dioptimalkan, dan penyetulan sistem propulsi. Lebih lanjut, integrasi pemantauan digital dan analitik data waktu nyata secara signifikan meningkatkan akurasi dan responsivitas penilaian EEOI. Temuan menunjukkan bahwa EEOI berfungsi tidak hanya sebagai alat pelaporan kepatuhan tetapi juga sebagai komponen inti dari strategi manajemen energi yang bertujuan untuk memenuhi target pengurangan emisi IMO 2030–2050. Pemanfaatan indeks yang efektif berkontribusi pada operasi kapal yang lebih efisien, ekonomis, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

Kata kunci: EEOI, Kapal Modern, Pengendalian Emisi Gas Buang

PENDAHULUAN

Industri pelayaran global berada pada masa transformasi yang signifikan seiring dengan meningkatnya tuntutan terhadap efisiensi energi dan pengurangan emisi buang. Mesin diesel kapal, sebagai sumber tenaga utama, menyumbang sebagian besar emisi CO₂, NO_x, SO_x, yang berdampak langsung terhadap pemanasan global dan polusi udara (BPK.RI, 2020). Hal lain, peningkatan volume perdagangan internasional melalui jalur laut menuntut pengoperasian kapal yang semakin efisien, aman, dan ramah lingkungan. Situasi ini melahirkan tantangan sekaligus peluang bagi operator kapal untuk mengadopsi pendekatan sistematis dalam memantau dan mengendalikan performa energi secara operasional.

International Maritime Organization (IMO) telah mengeluarkan kebijakan strategis untuk mengurangi emisi karbon, termasuk *Energy Efficiency Design Index (EEDI)*, *Carbon Intensity Indicator (CII)*, dan *Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)* (Bazari, 2020). Komponen ini secara langsung mengukur performa operasional harian kapal dalam kondisi nyata adalah *Energy Efficiency Operational Index (EEOI)*. Berbeda dari EEDI dan EEXI yang bersifat desain, EEOI menilai efisiensi energi berdasarkan aktivitas pelayaran aktual, konsumsi bahan bakar harian, dan jarak tempuh. Dengan kata lain, EEOI merupakan indikator praktis yang dapat digunakan untuk mengevaluasi energi mesin diesel, pola operasi kapal, serta efektivitas tindakan penghematan bahan bakar.

EEOI berkembang menjadi alat pengendalian emisi yang relevan, karena mampu mengidentifikasi hubungan antara konsumsi bahan bakar dan besaran CO₂ yang dihasilkan. Nilai EEOI rendah, dapat dinyatakan bahwa energi yang digunakan efisien dan semakin kecil emisi yang dilepas. Bagi kapal modern, parameter ini menjadi kritis dalam mencapai target pengurangan emisi IMO tahun 2030 sebesar 40% dan 70% pada 2050 dibandingkan baseline tahun 2008 (Bazari, 2020). Tantangan muncul pada saat operasional kapal seperti variasi beban mesin, kecepatan, pola rute, dan kualitas bahan bakar sangat memengaruhi nilai EEOI sehingga membutuhkan pendekatan analitis untuk memastikannya tetap akurat.

Penelitian sebelumnya tentang EEOI, oleh Julio et.al dinyatakan efektif energi dalam mesin diesel memberikan nilai EEOI rendah (Julio Barreiro, 2024), C. Sun et al dinyatakan tentang *real time monitoring* meningkatkan nilai EEOI (Sun et al., 2020), W. Yehia dinyatakan bahwa nilai EEOI dapat tercapai dengan *speed management* (Yehia et al., 2021).

Penelitian ini menyajikan analisis strategis penerapan EEOI sebagai instrumen pengendalian emisi gas buang mesin diesel kapal, metode perhitungan sederhana, faktor operasional yang memengaruhi nilai EEOI, dan strategi manajemen untuk meningkatkan efisiensi energi. Dengan memanfaatkan data operasional kapal dan studi kasus simulasi, dapat menjelaskan bagaimana EEOI dioptimalkan sebagai bagian dari sistem manajemen energi kapal dan sistem kontrol emisi yang efektif.

METODE

Metode deskriptif pada penelitian ini berfokus pada analisis dan evaluasi kinerja energi kapal melalui serangkaian tahapan sistematis. yaitu pengumpulan data operasional kapal yang mencakup konsumsi harian bahan bakar, kecepatan pelayaran, jarak tempuh, serta jumlah muatan yang diangkut. Data diolah menggunakan perhitungan sesuai standar IMO untuk memperoleh nilai indeks yang menggambarkan tingkat efisiensi energi kapal. Analisis memperhitungkan parameter operasional terhadap nilai EEOI untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang menentukan perubahan indeks.

Evaluasi strategi peningkatan efisiensi energi dilakukan melalui simulasi penurunan konsumsi bahan bakar dengan beberapa skenario operasional, simulasi ini untuk mengetahui potensi reduksi emisi yang dapat dicapai. Seluruh rangkaian analisis ini diterapkan pada studi kasus

kapal general cargo MV. T Handal dengan berkapasitas 5100 DWT yang menggunakan mesin diesel utama berkekuatan 4500 KW sebagai representasi kondisi operasional kapal.

PEMBAHASAN

Emisi Gas Buang Mesin Diesel

Mesin diesel masih dominan sebagai sistem propulsi utama dengan nilai 80% untuk keseluruhan kapal di dunia, sehingga merupakan komponen vital dalam aktivitas perdagangan global. Kelemahan dari dominasi ini berbanding lurus dengan kontribusinya terhadap emisi gas yang dihasilkan, khususnya CO₂. IMO mencatat kapal oleh mesin diesel menyumbang 2,89% dari total emisi udara global (Outlook, 2023).

Besaran emisi yang dihasilkan dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional dan teknis, termasuk jenis bahan bakar yang digunakan, antara lain HFO, MDO, MGO hingga VLSFO. Komponen lain yaitu proses pembakaran, efisiensi turbocharger, kondisi injector, dan tingkat beban mesin selama pelayaran. Kombinasi faktor-faktor tersebut menentukan besarnya niali karbon yang dilepaskan ke atmosfer.

Energy Efficiency Operational Index (EEOI)

Energy Efficiency Operational Index (EEOI) merupakan indikator intensitas karbon yang digunakan untuk menilai tingkat efisien kapal mengubah konsumsi bahan bakar menjadi output dengan komponen muatan dalam satuan ton/miles. Nilai EEOI dihitung dengan membandingkan total emisi CO₂ yang dihasilkan selama operasional kapal, dengan besarnya kapasitas muatan aktual kapal dikalikan jarak tempuh. Secara matematis, persamaan EEOI sebagai berikut:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{cargo} \times D} \quad \dots \text{Persamaan 1 (Embankment, 2009)}$$

Keterangan:

1. FC_i = konsumsi bahan bakar jenis i (ton)
2. CF_i = *conversion factor* CO₂ (3114 ton CO₂/ton fuel)
3. m_{cargo} = muatan *cargo* (ton)
4. D = jarak tempuh (NM)

Kebijakan IMO Terkait EEOI

EEOI merupakan bagian dari *Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*. Dalam SEEMP Part II, kapal diwajibkan melakukan *monitoring* intensitas karbon dan melaporkannya pada Data Collection System (DCS) (Mepc, 2024). Efektivitas pengendalian emisi menjadi indikator penting keberlanjutan.

Simulasi Penghitungan EEOI

Data operasional kapal MV. T Handal selama 7 hari untuk pelayaran Surabaya – Ternate (jarak 1800Nm)

Tabel 1. Data Pelayaran

Hari	Fuel Cons (ton/hari)	Muatan (ton)	Jarak (Nm)
1	6	3600	288
2	6	3600	272
3	6	3600	276
4	6	3600	280
5	6	3600	280
6	6	3600	292
7	4	3600	112
TOTAL	40	3600	1800

Total konsumsi bahan bakar : 40 ton
Total jarak tempuh : 1800 Nm
Muatan cargo : 3600 T
Conversioc factor : 3,114

Perhitungan dasar:

$$\text{CO}_2 = 40 \times 3114 = 124560 \text{ Ton CO}_2 / \text{Ton} - \text{Nm}$$

Maka diperoleh:

$$\text{EEOI} = 124560 : (3600 \times 1800) = 0,0192 \text{ ton CO}_2/\text{ton-Nm}$$

Faktor Operasional Kapal untuk Nilai EEOI

1. Kecepatan Kapal (*Speed*)

Hubungan kecepatan dan konsumsi BBM bersifat eksponensial. Peningkatan 1 knot dapat meningkatkan konsumsi hingga 20–25%. Pada studi kasus, simulasi menunjukkan bahwa penurunan kecepatan dari 13 knot menjadi 12 knot

2. Kondisi Permukaan Lambung *Biofouling* meningkatkan hambatan (*resistance*) sehingga membutuhkan daya mesin lebih besar. Studi IMO menunjukkan *fouling* 10% dapat meningkatkan konsumsi hingga 14%. Perawatan lambung berkala dapat menurunkan EEOI 3–7%.

3. *Maintenance* Sistem Bahan Bakar dan Udara

Injector aus, *turbocharger* kotor, dan tekanan bahan bakar tidak stabil menurunkan efisiensi pembakaran. Audit mesin menunjukkan perawatan tepat dapat menghemat hingga 6% konsumsi BBM.

Simulasi Peningkatan EEOI

1. Optimalisasi Voyage

Simulasi dengan menurunkan kecepatan kapal dari 12 ke 10 knot, berusaha dikurangkan jarak tempuh setidaknya dapat mencapai 3%. Dengan jarak berkurang, dapat di asumsikan bahan bakar berkurang 12%.

Maka untuk EEOI baru :

$$\text{EEOI baru} = \{(40 \times 0,88) \times 3114\} : \{3600 \times (1800 \times 0,97)\} = 0,0174 \text{ ton CO}_2 / \text{Ton-Nm}$$

Berdasarkan penghitungan ini diperoleh nilai penurunan CO₂ sebesar 9,37 persen

2. Propulsion Tuning

Penyesuaian sudut *pitch propeller* serta kegiatan *propeller polishing* terbukti memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi operasional kapal. Optimalisasi *pitch* memungkinkan transfer daya yang lebih efektif dari mesin ke air, sementara permukaan propeller yang bersih mengurangi hambatan aliran sehingga menurunkan kebutuhan daya dorong. Secara keseluruhan, kedua tindakan ini dapat menurunkan konsumsi bahan bakar sebesar 2–5%. Pada kapal yang dijadikan studi kasus, penerapan langkah-langkah tersebut tercatat mampu menurunkan nilai EEOI hingga 10%, pengurangan emisi.

Penelitian ini menunjukkan bahwa EEOI sangat sensitif terhadap perubahan kecil dalam parameter operasional, sehingga pengecekan laporan harian yang presisi menjadi kebutuhan mutlak. EEOI tidak dapat berdiri sendiri, tiap komponen operasional harus menjadi bagian konektivitas dari manajemen energi kapal yang melibatkan awak kapal terlatih, dukungan sistem informasi, dan kebijakan perusahaan.

SIMPULAN

EEOI terbukti sebagai instrumen pengendalian emisi mesin diesel yang efektif untuk kapal modern. Dengan perhitungan yang sederhana namun informatif, EEOI mampu menggambarkan hubungan langsung antara konsumsi bahan bakar dan intensitas karbon kapal. Hasil analisis menunjukkan bahwa:

1. Nilai EEOI sangat dipengaruhi oleh kecepatan kapal, kondisi lambung, dan optimasi rute pelayaran singkat.
2. Penerapan strategi seperti *voyage optimization* dan *propeller tuning*, dapat menurunkan EEOI 10–20%.
3. Pengurangan EEOI memberikan dampak ekonomi signifikan berupa penghematan bahan bakar dan penurunan emisi CO₂.

Melalui penerapan EEOI secara konsisten, industri pelayaran dapat mencapai operasi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan sesuai regulasi internasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Bazari, D. Z. (2020). *Marpol. Annex VI. Prevention Air Pollution from Ship.pdf* (p. 89). IMO.
- BPK.RI. (2020). *Regulasi IMO. Lampiran Marpol Annex VI.pdf* (p. 24). bpk.go.id.
- Embankment, A. (2009). *EEOI:\CIRC\MEPC\01\684.doc. August 2009.*
- Julio Barreiro, et all. (2024). *Energy Efficiency Operational Indicator Resilient, Ship.pdf* (p. 19). marine Science and Engineering Journal.
- Mepc. (2024). *Guidelines For The Development Of A Ship Energy Efficiency Management Plan (Seemp) The. 395(October).*
- Outlook, E. T. (2023). *Maritime Forecast To 2050.*
- Sun, C., Wang, H., Liu, C., & Zhao, Y. (2020). Real Time Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI): Simulation Research from the Perspective of Life Cycle Assessment. *Journal of Physics.*
- Yehia, W., Kama, L. B., Mosaa, H. I., & Moustafa, M. M. (2021). *Improving Container Ships Energy E fficiency Operational Indicator (EEOI) by Speed Management. 25(1).* <https://doi.org/10.21608/pserj.2020.41525.1058>