

Analisis Energi Eficiency Existing Ship Index (EEXI) Akibat Pertambahan Engine dan Konversi Ro-Ro Vehicle Carrier Menjadi Kapal Ro-Ro Passenger

Bagas Rahkmad Ramadhan^{1*}, Agung Purwana², Syafiuddin³, Dodiet Eko Prasetyo⁴

Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia^{1*,2}

Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia³

Divisi Teknik, PT. Dharma Lautan Utama, Indonesia⁴

Email: bagasdhan28@gmail.com^{1*}; agpurwana@gmail.com²; syafiuddin@ppns.ac.id³; dodietaq@gmail.com⁴

Abstract - This study examines the implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) to limit ship carbon emissions as part of efforts to achieve future zero-emissions targets. The analysis was conducted on a Ro-Ro vehicle carrier ship with MAN B&W 8S50MC-C engines and a Ro-Ro passenger ship, in compliance with PERMEN RI Number PM 62 of 2019, which mandates the use of at least two main engines. The Ro-Ro passenger ship is equipped with MAN B&W 8S50MC-C engines, along with two Mitsubishi S12R-T2MPTK engines, both operating at 21 knots. The calculation results show that the Ro-Ro vehicle carrier achieved an EEXI value of 28.55 g CO₂/ton-mile, meeting the limit requirement of 32.85 g CO₂/ton-mile. Similarly, the Ro-Ro passenger ship achieved an EEXI value of 13.21 g CO₂/ton-mile, also below the required limit of 24.072 g CO₂/ton-mile. Both ships comply with EEXI criteria, with the Ro-Ro passenger ship's calculation using Gross Tonnage (GT) as the capacity divisor. This research underscores the importance of EEXI implementation in reducing carbon emissions in the shipping sector.

Keyword: Energi Eficiency Existing Ship Index (EEXI), Carbon content, Ro-Ro Passenger

Nomenclature

P_{ME}	=	Daya mesin utama (kW)
P_{AE}	=	Daya auxiliary engine (kW)
P_{PTI}	=	Daya shaft motor (Kw)
P_{shaft}	=	Daya Shaft ME (kW)
P_{eff}	=	Teknologi <i>mechanical energy-efficient</i> untuk mesin utama (Kw)
Δ	=	<i>Displacement</i>
C_f	=	<i>Faktor emisi CO₂ berdasarkan jenis bahan bakar</i>
C_{ad}	=	<i>Admiralty Coefficient</i>
SFC_{ME}	=	Specific fuel consumed mesin induk (g/kWh)
SFC_{AE}	=	Specific fuel consumed auxiliary engine (g/kWh)
GT	=	Kapasitas Gross Tonnage (ton)
DWT	=	Dead Weight Tonnage (ton)
V_{ref}	=	Kecepatan dinas kapal
f_j	=	<i>Ship specific design elements</i>
f_{eff}	=	Faktor setiap teknologi efisiensi energi yang inovatif
f_w	=	Faktor koreksi penurunan kecepatan kapal
f_i	=	Faktor pertimbangan kapasitas muatan untuk efisiensi
f_t	=	Faktor koreksi mengkompensasi bobot mati kapal
f_c	=	Faktor koreksi ruang kargo kapal

1. PENDAHULUAN

Kapal memiliki peran penting dalam logistik dan sebagai alat transportasi di seluruh dunia dalam industri maritim. Untuk membatasi emisi GRK (Gas Rumah Kaca) dari kapal, *International Maritime Organization* (IMO) melalui *Maritime Environment Protection Committee* (MEPC) telah mengeluarkan pedoman tentang metode perhitungan untuk EEXI yang dicapai, tentang survei dan sertifikasi EEXI, dan tentang kepatuhan sistem *engine power limitation* (EPL) [1]. dengan persyaratan EEXI dan penggunaan cadangan daya. Peraturan EEXI lebih spesifik pada jumlah CO₂ yang diemisikan per unit transportasi dalam satuan (gr-CO₂/ton.mile) perlunya menganalisa dari armada masing untuk memutuskan metode terbaik yang mana dalam mengurangi EEXI [2].

IMO pada MEPC akan meninjau efektivitas penerapan persyaratan EEXI paling lambat pada tahun 2026 [3]. Penghematan energi seperti layar, menambah ukuran propeller, dan mengurangi beban mesin utama atau bahan bakar sintetis dengan faktor emisi yang lebih rendah dapat mengurangi dampak CO₂ [4]. Dalam konteks ini, banyak pemilik kapal dan operator pelayaran yang mempertimbangkan untuk memodifikasi untuk memenuhi persyaratan EEXI yang semakin ketat. Pengurangan daya mesin utama kapal dianggap cara termudah bagi kapal tua memenuhi persyaratan EEXI karena hanya memerlukan sedikit perubahan dan tidak mengubah kinerja

dasar mesin [5]. Salah satu kasus yang menarik untuk dianalisis adalah konversi kapal Vehicle Carrier menjadi kapal *Ro-Ro Passenger* dengan penambahan mesin.

Namun, modifikasi tersebut juga membawa tantangan teknis dan regulasi, terutama dalam hal perhitungan dan pemenuhan EEXI. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk menganalisis perubahan nilai EEXI akibat penambahan mesin dan konversi kapal *Ro-Ro Vehicle Carrier* menjadi kapal *Ro-Ro Passenger*, dikarenakan mengikuti peraturan PERMEN RI nomor PM 62 tahun 2019. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan wawasan berharga bagi industri pelayaran dalam menghadapi tantangan regulasi lingkungan dan efisiensi energi di masa depan.

2. METODOLOGI

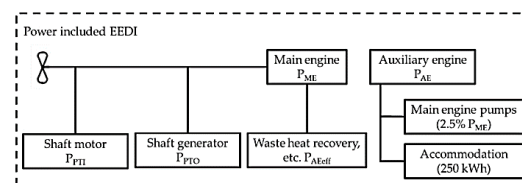
2.1 International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78)

Kapal "TORREY CANYON" mengalami tenggelam di lepas pantai bagian selatan Inggris pada tahun 1967, dan mengeluarkan 35 juta barel minyak. Peristiwa ini mengubah cara berpikir masyarakat dunia dan sejak itu mereka mulai berpikir serius mengenai pencegahan polusi. Hal ini berujung pada pertemuan *International Maritime Organization* (IMO) tentang "Konferensi Internasional tentang Kutub Laut".

Konvensi Internasional tentang Pencegahan Pencemaran dari Kapal / MARPOL 73/78 merupakan konvensi pertama yang mengatur mengenai pencemaran lingkungan laut oleh kapal dari aktivitas atau kecelakaannya. Konvensi ini merupakan gabungan dari dua perjanjian internasional sebelumnya pada tahun 1973 dan 1978 [6]. Konvensi ini diadopsi oleh IMO pada tanggal 2 November 1973, dan awalnya mengatur kontaminasi minyak, bahan kimia, dan zat berbahaya dalam pencemaran dan pencemaran. Pada konferensi TSPP (*Tanker Safety and Pollution Prevention*) pada bulan Februari 1978, peraturan MARPOL 1978 diadopsi. Ini tercipta sebagai akibat dari jatuhnya tank tahun 1976/1977. Konvensi MARPOL 73/78 diratifikasi oleh 158 negara anggota IMO pada bulan Januari 2018, mencakup 98,95% tonase global [6]. Sebagai bagian dari MARPOL 73/78, enam suplemen teknis pada Lampiran 1 - VI menangani berbagai jenis polusi. Lampiran ini membahas tentang minyak, cairan beracun, cairan berbahaya dalam wadah, 16 limbah, sampah dan polusi udara. Selama bertahun-tahun, bagian dari suplemen teknis MARPOL 73/78 terus dimodifikasi untuk mengurangi polusi kapal.

2.2 Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)

Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) merupakan aturan yang diusulkan oleh IMO untuk menghitung efisiensi energi kapal yang sudah dibuat. Aturan EEXI menetapkan standar minimal untuk efektivitas teknologi dalam melakukan sertifikasi bergantung pada desain kapal. Strategi Gas Rumah Kaca (GRK) yang direkomendasikan IMO [7]. Perhitungan EEXI sama dengan EEDI meliputi berbagai sistem yang terlibat [8]. Berikut merupakan gambar sistemnya:



Gambar 1. Daya yang terlibat dalam perhitungan *Energy Efficiency Design Index* (EEDI).

Berikut merupakan rumus untuk menghitung EEXI (*Marine Environment Protection Committee*) MEPC 78 menurut Marpol Annex 12 [9].

$$EEXI = \frac{(\sum_{j=1}^n f_j) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \times C_{FME(i)} \times SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \times C_{FAE} \times SFC_{FAE})}{f_i \times f_c \times Capacity \times f_w \times V_{ref}} + \frac{\left((\sum_{j=1}^n f_j \times \sum_{i=1}^{n_{PT}} P_{PT(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \times P_{AEeff(i)}) \times C_{AE} \times SFC_{AE} \right)}{f_i \times f_c \times Capacity \times f_w \times V_{ref}} + \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} P_{eff(i)} \times C_{FME} \times SFC_{ME} \right)}{f_i \times f_c \times Capacity \times f_w \times V_{ref}} \quad (1)$$

Dalam EEXI terdapat *admiralty coefficient* untuk memerkirakan kurva daya kapal dengan bentuk lambung dan kecepatan kapal. Dalam perhitungan EEXI kurva daya digunakan untuk memperkirakan daya perubahan daya pada kapal, sehingga semakin tinggi nilai *admiralty coefficient* maka daya *engine* yang dimanfaatkan oleh kapal semakin efisien [9]. Berikut merupakan perhitungan Admiralty Coefficient.

$$C_{cad} = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \times v^3}{P} \quad (2)$$

2.3 Batas Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)

EEXI memiliki batas-batas yang telah direkomendasikan oleh standar IMO menurut berbagai jenis kapal. Mengikuti Marpol Annex VI. EEXI yang diperlukan sama dengan rumus dari EEDI, sebagai berikut :

$$EEXI = \left(1 - \frac{X}{100} \right) \times \text{Nilai garis referensi} \quad (3)$$

Nilai X adalah faktor reduksi yang ditentukan dalam Tabel 1. untuk EEXI yang diperlukan dibandingkan dengan garis referensi EEXI [10].

Tabel 1. Faktor reduksi (dalam persentase) untuk EEXI relatif terhadap garis referensi EEXI.

Tipe kapal	Ukuran	Phase 2	Phase 3
		1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	1 Jan 2025 onwards
Ro -Ro Vehicle Carrier	10.000 DWT >	15	30
	1000 DWT >	20	30
Ro -Ro Passenger	250 -1000 DWT	0 - 20	0 - 30

*Faktor reduksi perlu diinterpolasi secara linier antara kedua nilai tersebut, berdasarkan ukuran kapal.

Perhitungan dari nilai garis referensi menggunakan rumus berikut:
 Nilai referensi garis = $a \times b^{-c}$ (4)
 Dimana nilai a, b dan c adalah parameter dari table berikut :

Tabel 2. Data penentuan nilai referensi untuk berbagai jenis kapal

Tipe Kapal	a	b	c
Ro -Ro Vehicle Carrier	$((DWT/GT)^{-0,7}) \times 780,36$ dimana $DWT/GT < 0,3$	DWT Kapal	0,471
	$1812,63$ dimana $DWT/GT \geq 0,3$		
Ro -Ro Passenger	752.16	DWT Kapal	0.381

Perhitungan EEXI (*Energy Efficiency Existing Ship Index*) yang dicapai harus lebih kecil atau sama dengan EEXI yang disyaratkan untuk memenuhi regulasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perhitungan EEXI Ro-Ro Vehicle Carrier

Tabel 3. Data Perhitungan EEXI Ro-Ro Vehicle Carrier

Keterangan	Data	Satuan
Kapasitas DWT	4990.73	Ton
Kapasitas GT	7751	Ton
Displacement	10747.8	Ton
Kecepatan Referesi	21	Knots
M.E MAN B&W 8S50MC-C		
P_{ME}	12640	kW
SHP	10744	kW
Bahan Bakar	B35 Diesel	
C_{f ME}	2.084	
SFC_{ME}	171	g/kWh
Aux. Engines Specification		
P_{AE}	900	kW
Bahan Bakar	B35 Diesel	
CF_{AE}	2.084	

SFC_{AE}	19.077	g/kWh
-------------------------	--------	-------

Dari tabel di atas mesin single screw menggunakan MAN B&W dengan daya 12640 kW pada 127 rpm. Berikut ini perhitungan EEXI sesuai persamaan (1):

$$EEXI = \frac{(1 - (12640 \times 2.084 \times 171))}{1 \times 1 \times 7751 \times 1 \times 21}$$

$$EEXI = 28.55 \text{ gr-CO}_2/\text{ton.mile}$$

Menurut IMO, EEXI yang dicapai harus lebih kecil dari EEXI yang disyaratkan. agar kapal yang bersangkutan memenuhi peraturan tersebut. Nilai yang diambil terdapat pada tabel 1. untuk mencari refrensi nilai garis. Berikut merupakan perhitungan refrensi nilai garis menurut persamaan (4):

$$\begin{aligned} \text{Nilai garis refrensi} &= 1812.63 \times 4990.73^{-0.471} \\ &= 32.85 \end{aligned}$$

Nilai x pada garis refrensi di isyaratkan didapat pada tabel 2 sesuai dengan pembangunan kapal. Berikut perhitungan batas EEXI menurut persamaan (3):

$$\begin{aligned} EEXI &= \left(1 - \frac{0}{100}\right) \times 32.85 \\ &= 32.85 \text{ gr-CO}_2/\text{ton.mile} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan EEXI diatas didapat bahwa nilai EEXI yang dicapai kapal Ro-Ro Vehicle Carrier 28.55 gr-CO₂/T-mile < EEXI yang di isyaratkan 32.85 gr-CO₂/T-mile. Selanjutnya dilakukan perhitungan *admiralty coefficient* menggunakan persamaan (4):

$$\begin{aligned} C_{cad} &= \frac{10747.78^{\frac{2}{3}} \times 21^3}{14407.94} \\ &= 419.8 \end{aligned}$$

3.2 Perhitungan EEXI Ro-Ro Passenger

Tabel 4. Data Perhitungan EEXI Ro-Ro Vehicle Carrier

Keterangan	Data	Satuan
Kapasitas GT	19010	Ton
Kapasitas DWT	3286.9	Ton
Displacement	10747.8	Ton
Kecepatan Referesi	21	Knots
ME MAN B&W 8S50MC-C		
P_{ME}	12640	kW
SHP	10744	kW
Bahan Bakar	B35 Diesel	
C_{f ME}	2.084	
SFC_{ME}	171	g/kWh
ME Mitsubishi S12R-T2MPTK		
P_{ME}	1040	kW

SHP	884	kW
Bahan Bakar	B35 Diesel	
Cf_{ME}	2.084	
SFC_{ME}	144.675	g/kWh
Aux. Engines Specification		
P_{AE}	900	kW
Bahan Bakar	B35 Diesel	
CF_{AE}	2.084	
SFC_{AE}	19.077	g/kWh

Setelah penambahan 2 mesin 1040 kW pada 1650 rpm kapal *Ro-Ro Passenger* menjadi *triple screw*. Berikut merupakan perhitungan EEXI kapal *Ro-Ro Passenger* menurut persamaan (1):

$$EEXI = \frac{(1 - (2 \times (1040 \times 2.084 \times 144.68)) + (12640 \times 2.084 \times 171))}{1 \times 1 \times 19010 \times 1 \times 21} + \frac{(4 \times (900 \times 2.084 \times 19.07)) + 0 - 0}{1 \times 1 \times 1 \times 19010 \times 21 \times 1}$$

$$EEXI = 13.21 \text{ gr-CO}_2/\text{ton.mile}$$

Menurut IMO. EEXI yang dicapai harus lebih kecil dari EEXI yang disyaratkan agar kapal yang bersangkutan memenuhi peraturan tersebut. Nilai yang diambil terdapat pada tabel 1. untuk mencari referensi nilai garis. Berikut merupakan perhitungan referensi nilai garis menurut persamaan (4):

$$\begin{aligned} \text{Nilai garis referensi} &= 752.16 \times 3286.9^{-0.381} \\ &= 34.389 \end{aligned}$$

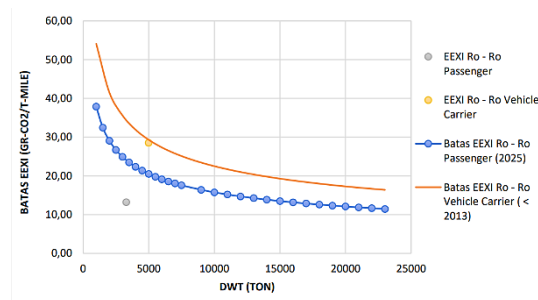
Nilai x pada garis referensi di isyaratkan didapat pada tabel 2 sesuai dengan pembangunan kapal. Berikut perhitungan batas EEXI menurut persamaan (3):

$$\begin{aligned} EEXI &= \left(1 - \frac{30}{100}\right) \times 34.389 \\ &= 24.072 \text{ gr-CO}_2/\text{ton.mile} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan EEXI diatas didapat bahwa nilai EEXI yang dicapai kapal *Ro-Ro Passenger Triple screw Ship* 13.21 gr-CO₂/T-mile < EEXI yang di isyaratkan 24.072 gr-CO₂/T-mile. Selanjutnya dilakukan perhitungan *admiralty coefficient* menggunakan persamaan (4):

$$\begin{aligned} C_{cad} &= \frac{10747.78^{\frac{2}{3}} \times 21^3}{((2 \times 884) + 14407.94)} \\ &= 360.48 \end{aligned}$$

Dari hasil perthiungan EEXI *Ro-Ro Passenger* dan *Ro-Ro Vehicle* kemudian dibuatkan grafik agar lebih jelas.



Gambar 2. Batas EEXI kapal *Ro-Ro Vehicle* dan *Ro-Ro Passenger*

Grafik di atas menunjukkan kedua kapal *Ro-Ro Vehicle* maupun *Ro-Ro Passenger* masih memenuhi emisi dari IMO, sehingga tidak perlu adanya modifikasi untuk mengurangi nilai EEXI yang di isyaratkan. Kapasitas *gross tonage* yang digunakan perhitungan EEXI *Ro-Ro Vehicle* lebih kecil daripada *Ro-Ro Passenger*, sehingga membuat nilai EEXI pada kapal *Ro-Ro Passenger* tidak terlalu besar meskipun memiliki penambahan mesin.

4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan nilai EEXI yang dicapai kapal *Ro-Ro Vehicle Carrier* didapatkan carbon content sebanyak sebesar 28.55gr-CO₂/T-mile dan kapal *Ro-Ro Passenger* didapatkan carbon content sebesar 13.21 gr-CO₂/T-mile yang keduanya masih kurang dari EEXI yang di isyaratkan. Nilai EEXI *Ro-Ro Vehicle* dan *Ro-Ro Passenger* memiliki selisih 116%. Nilai EEXI pada kapal *Ro-Ro Passenger* kecil meskipun telah ditambahkan mesin karena pada penambahan GT (*Gross Tonage*) setelah konversi. Pada perhitungan batas EEXI untuk *Ro-Ro Vehicle* menggunakan fase indeks dibawah 2013 karena sesuai dengan tahun pembuatan kapal sehingga perhitungan menggunakan fase indeks 0. Dari *admiralty coefficient* Kapal *Ro-Ro Vehicle* memiliki pemanfaatan daya main engine lebih baik daripada *Ro-Ro Passenger*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO (International Maritime Organization). (2021). Marine Environment Protection Committee – MEPC 76, Int. Marit. Organ.
- [2] Czermański, E., Oniszczyk-Jastrzębek, A., Spangenberg, et al (2022). Implementation of the *Energy Efficiency Existing Ship Index*: An important but costly step towards ocean protection. Marine Policy, 145(July). <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105259>

- [3] IMO (International Maritime Organization). (2024). Review Plan Of The Short-Term Ghg Reduction Measure. vol. 82
- [4] R. Lu, J.W. Ringsberg, Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology, *Ships Offshore Struct.* 15 (2019) 249–258, <https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1612544>
- [5] D. Rutherford, X. Mao, B. Comer. (2020). Potential CO₂ reductions under the energy efficiency existing ship index, *Int. Counc. Clean. Transp. Work. Pap.* 10 1–18.
- [6] IMO (International Maritime Organization). 2013. “MARPOL ANNEX VI and NTC 2008 with Guidelines for Implementation.” 258:1–24
- [7] IMO (International Maritime Organization). (2022). Guidelines On The Method Of Calculation Of The Attained *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI). *MEPC* 78, 346(June), 1–34.
- [8] Ren, H., & Ding, Y. (2019). Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship – *Engine* – Propeller Matching. *Marine Science and Engineering*, 22. <https://doi.org/10.3390/jmse7120425>
- [9] Tu, H., Yang, Y., Zhang, L., Xie, D., et al (2018). A modified *admiralty coefficient* for estimating power curves in EEDI calculations. *Ocean Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.068>
- [10] Rigos, N. (2022). *The effect of Engine Power Limitation on the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)*. Vol 27