



ISSN 2338-0322

# JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

## Implementasi *Waste Heat Recovery* Pada Kapal Kontainer Sebagai Upaya Peningkatan *Energy Efficiency Existing Ships Index (EEXI)*

Dhandi Ramadhani<sup>1</sup>, Prof. Dr. Eng Ahmad Fauzan Zakki S.T., M.T.<sup>2</sup>,

Dr. Zulfaidah Ariany S.T., M.T.<sup>3</sup>

Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

<sup>\*)</sup>e-mail : [dhandiramadhani15@gmail.com](mailto:dhandiramadhani15@gmail.com)

### Abstrak

Fenomena pemanasan global akibat emisi gas rumah kaca telah memicu regulasi ketat di industri maritim, salah satunya melalui mandat *Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)* oleh *International Maritime Organization (IMO)*. Penelitian ini mengkaji performa sistem *Waste Heat Recovery (WHR)* pada kapal peti kemas *MVEver* Obey sebagai strategi teknis dalam mengoptimalkan indeks efisiensi energi. Melalui pendekatan metodologis yang menggabungkan studi literatur dengan analisis data operasional primer dan sekunder, dilakukan kalkulasi terhadap potensi konversi energi panas menjadi daya listrik berdasarkan profil operasional kapal. Analisis perbandingan nilai *EEXI* dilakukan untuk mengevaluasi dampak sistem sebelum dan sesudah integrasi teknologi. Temuan riset menunjukkan bahwa mekanisme *WHR* mampu menyuplai output daya harian yang fluktuatif, dengan capaian puncak sebesar 295,724 kWh pada bulan pertama dan titik terendah 186,472 kWh pada bulan kesepuluh. Pemanfaatan energi hasil pemulihan panas ini secara efektif mereduksi beban kerja generator diesel melalui substitusi pasokan listrik kapal. Secara substansial, implementasi sistem ini berhasil menurunkan parameter *EEXI* rata-rata sebesar 6,28%, dengan efisiensi reduksi emisi maksimal menyentuh angka 18,26%. Hasil studi ini menegaskan bahwa adopsi teknologi *WHR* merupakan solusi kompetitif dalam mempercepat dekarbonisasi dan pengurangan emisi pelayaran serta menjamin kepatuhan armada terhadap standar lingkungan internasional.

Kata Kunci : Emisi, *EEXI*, *Waste Heat Recovery (WHR)*, Efisiensi Energi, Pengurangan Emisi, Kapal Kontainer, *International Maritime Organization (IMO)*, Penghematan Energi.

## 1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim dan lingkungan sangat berpengaruh dan menjadi masalah global yang semakin mengkhawatirkan, berbagai sektor mempengaruhi kontribusi peningkatan emisi gas rumah kaca. Data yang menunjukkan bahwa sektor transportasi bertanggung jawab atas 16% dari total emisi gas global pada tahun 2021, dengan sektor transportasi laut maritim yang menyumbang sekitar 2%. Dari data tersebut, meskipun pada sektor maritim menyumbang hanya 2% dampak kumulatif yang terjadi terhadap lingkungan sangat cukup signifikan. Sehingga upaya pengurangan emisi pada sektor maritim tetap sangat penting dilakukan. [1]. Dengan ini dalam industry maritim emisi gas rumah kaca yang meningkat ini

sebesar 24% dari 39.0011 ke 48.210 megatonnes of carbon dioxide equivalent (Mt CO<sub>2</sub> eq). [2].

Dengan konteks merespon krisis iklim ini, dunia telah menyepakati Paris agreement pada tahun 2015. Dan ini bertujuan untuk mencapai Net Zero Emission, kesepakatan ini diratifikasi tidak hanya 1-10 negara melainkan banyak negara sebesar 195 negara. Sebagian dari ini akhirnya *International Maritime Organization (IMO)* sebagai badan kebijakan teknis dan operasional dalam initial Net Zero Emission menerapkan beberapa regulasi, termasuk *Energy Efficiency Existing Ships Index (EEXI)*. Yang menjadi dasar standar untuk menilai efisiensi emisi kapal yang beroperasi. [3].

Dalam konteks pemenuhan *EEXI* Solusi yang sangat menjanjikan untuk dapat mengurangi emisi pada sektor maritim Adalah melalui

elektrifikasi kapal, yaitu dengan Implementasi Waste Heat Recovery. Pendekatan implementasi ini menurunkan emisi dan dapat memperbaiki nilai EEXI kapal. Dan ini tidak begitu kompleks dibandingkan trofit perangkat efisiensi yang kompleks atau perubahan design hull dan propulsi. [4].

Teknologi system ini memanfaatkan panas sisa yang dihasilkan oleh mesin kapal untuk menghasilkan energi yang dapat digunakan Kembali dalam system kapal itu sendiri. Sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar dan mengurangi emisi karbon. [5] Dalam konteks EEXI, penerapan WHR pada kapal dapat membantu meningkatkan efisiensi energi dan memenuhi standar yang ditetapkan oleh IMO. [6]. Ini menjadikan fokus utama dalam penelitian ini. WHR telah diterapkan tetapi penerapannya masih terbatas dan memerlukan pengembangan lebih lanjut dalam hal implementasi dan evaluasi kinerja. [7]

Penelitian oleh Diaz-Scades et al. (2023), menemukan bahwa penerapan Waste Heat Recovery dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 10% yang secara langsung membuka kontribusi terhadap pengurangan emisi. [8]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya hanya berfokus pada penerapan WHR tidak dengan study kasus kapal tertentu dan penelitian yang mencakup kedalaman Energy Efficiency Existing Ships Index (EEXI) masih sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan melakukan analisis terhadap penerapan teknologi system WHR pada kapal yang sudah beroperasi, serta evaluasi dampaknya terhadap EEXI. Berdasarkan data terbaru, pada tahun 2021 sektor transportasi maritim mencatatkan emisi sekitar 1000 juta ton yang meningkat kontribusinya pada 35 dari total emisi global. [9] Menurut International Energy Agency (IEA) (2020), biaya investasi pada teknologi system WHR di kapal dapat memberikan penghematan operasional dalam jangka Panjang yang sebanding dengan biaya awal yang tinggi, dengan perkiraan pengurangan biaya bahan bakar hingga 15-20% dalam 5 tahun pertama dan memberikan penghematan yang signifikan bagi kapal. [10]

Perkembangan terkini pada WHR sangat menjanjikan, maka penelitian ini memiliki urgensi yang tinggi untuk mengkaji serta mengimplementasikan potensi WHR dalam meningkatkan efisiensi energi kapal terhadap pemenuhan standar EEXI yang telah diterapkan oleh IMO. Tujuan penelitian ini Adalah untuk mengeksplorasi dan mengkaji penerapan teknologi system WHR pada kapal MV Ever

Obey. Juga untuk menganalisis pengaruhnya terhadap peningkatan energi efisiensi kapal. Kontribusi penelitian ini diharapkan dapat memberikan Solusi teknis untuk dapat diterapkan oleh Perusahaan dan juga untuk mendukung pencapaian target emisi global. Maka tidak hanya itu, penelitian ini juga memberikan panduan praktis dalam implementasi WHR yang dapat diterapkan oleh berbagai jenis kapal. Perhitungan attained dan required ini sangat memberikan dampak dari EEXI yang akan mengetahui hasil pengurangan emisi dan reduksi. [11].

## 2. METODE

### 2.1. Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah kapal kontainer MV Ever Obey, yang digunakan sebagai studi kasus untuk menganalisis implementasi sistem *Waste Heat Recovery* (WHR) dalam meningkatkan efisiensi energi kapal serta menurunkan nilai *Energy Efficiency Existing Ships Index* (EEXI). Data yang digunakan dapat dilihat di tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1 Panjang dan Berat Kapal

No	Mv. Ever Obey	Panjang (m)
1	LOA	154,56 M
2	LBP	167,40 M
3	Breadth	32,20 M
4	Depth	17,00 M
5	Draught	11.217 M
6	Vs	20 knot
7	Main Engine	Hitachi – MAN B&W 8560ME-C10.5
8	Auxiliary Engine	3X Yanmar 6EY18(A)LW Auxiliary

Pemilihan objek didasarkan pada asumsi bahwa kapal kontainer memiliki: Beban mesin yang relatif stabil, jam operasi tinggi, potensi panas buang yang signifikan. Data yang diperoleh melalui:

- Data primer: hasil observasi dan wawancara dari pihak perusahaan pelayaran, mencakup spesifikasi teknis kapal, konsumsi bahan bakar, daya mesin, serta profil operasional.
- Data sekunder: berasal dari regulasi IMO, literatur ilmiah terkini, dan referensi teknis terkait WHR dan EEXI.

Pendekatan ini memastikan bahwa analisis yang dilakukan tidak hanya teoritis, tetapi juga berbasis kondisi operasional nyata.

### 2.2. Perlakuan Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi teknis berbasis skenario dengan

membandingkan kondisi sebelum dan sesudah implementasi sistem WHR.

- A. Variabel Tetap.  
Kapasitas kapal (Deadweight Tonnage), kecepatan referensi kapal (Vref), jenis bahan bakar, konfigurasi mesin utama dan generator, rute pelayaran.
- B. Variabel Bebas.  
Penerapan sistem WHR berbasis ORC (Organic Rankine Cycle), daya keluaran sistem WHR, jam operasi mesin induk perbulan.
- C. Variabel Terikat.  
Variabel yang diamati sebagai hasil:  
Nilai attained EEXI, konsumsi bahan bakar, emisi co2, energi listrik yang dihasilkan.

### 2.3. Prosedur Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah analisis kuantitatif berbasis perhitungan teknik energi, yang umum digunakan dalam studi efisiensi kapal dan evaluasi EEXI.

Tahapan Penelitian:

1. Identifikasi Masalah.
2. Pengumpulan Data.
3. Perhitungan EEXI Awal.
4. Sistem WHR Implementasi.
5. Perhitungan Energi WHR.
6. Analisis Energi Yang Menggantikan Generator.
7. Perhitungan Hemat Emisi.
8. Perhitungan EEXI Baru.
9. Analisis Kompratif.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Perhitungan Attained EEXI

Perhitungan awal energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) dilakukan untuk menetapkan baseline efisiensi energi kapal dalam konfigurasi asli sebelum modifikasi yang kemudian berfungsi sebagai refrensi kompratif untuk mengukur peningkatan efisiensi setelah integrasi sistem WHR . Nilai EEXI sebelum dan sesudah modifikasi ini akan menjadi sebuah dasar evaluasi objektif terhadap kontribusi sistem penyimpanan energi dalam meningkatkan kinerja lingkungan kapal dan pemenuhan reegulasi International Organization Maritime.

$$AttainedEEXI = \frac{(10.612 \times 168 \times 3.114) + (3 \times 375 \times 205 \times 3.114)}{33.541 \times 20}$$

$$Attained EEXI = 7,622 \text{ g.co2/ton.mile}$$

### 3.2. Perhitungan Required

Perhitungan required EEXI sebagai nilai acuan dilakukan dengan mengalihkan EEDI reference line (dihitung menggunakan konstanta  $174,22 \times DWT^{-0,201}$  Untuk kapal tipe container digunakan faktor reduksi sebesar 20% sesuai ketentuan IMO. Hasil perhitungan ini menjadi batas minimum efisiensi energi yang harus dipenuhi kapal berdasarkan standar EEXI.

$$\begin{aligned} EEDI Refrence &= 174,22 \times DWT^{-0,201} \\ &= 174,22 \times 33,541^{-0,201} \\ &= 21,45 \end{aligned}$$

Dengan skema ini mendapatkan hasil nial Required EEXI berikut :

$$\begin{aligned} Required &= \left(1 - \frac{20}{100}\right) EEDI \text{ refrence line value} \\ Required EEXI &= 17,16 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile} \end{aligned}$$

### 3.3. Perhitungan Energi WHR

Dengan ini Analisa perhitungan daya oleh WHR dapat dilakukan. Detail spesifikasinya di tabel 2

Tabel 2 Spesifikasi WHR - ORC

Merk Dan Spesifikasi	
Type Of WHR	Alfa Laval – Aalborg WHR / ORC Marine System
Type System	Exhaust Gas HR – ORC NK
Sumber Panas	R245fa (Alva Laval Product Catalogue, 2022)
Working Fluida	
Otput Generator	300 – 800 Kw
Efisiensi Konversi	18 – 22%
Termal	572 Kw
Daya Orc MC Running	308 Kw
Daya DG Operasi 70%	205 G/KWH = 0,205 KG/KWH
SFC AE	3.114 kgCO2/kgfuel
Faktor Emisi co2	230-350°C
Temp Exhaust Gas	± 350°C
Temp Out recovery	
Tegangan Out	440 v / 60 Hz
Generator	Paralel dengan main switchboard
Integrasi Sistem	Modular Skid - Mounted
Tipe Instalasi	

Dan dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$E_{ORC,Bulan} = P_{ORC} \times RH_{ME,Bulan}$$

Dengan ini nilai Running Hours untuk mencari daya energi WHR, dilihat ditabel 3.

Tabel 3 Running Hours

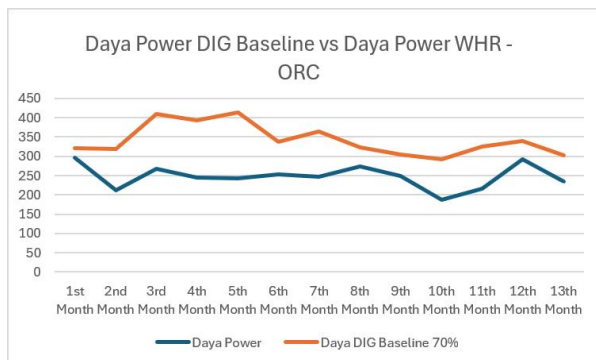
Bulan	RH ME Nilai	RH DIG 1 Nilai	RH DIG 2 Nilai	RH DIG 3 Nilai
Bulan ke 1	517	261	523	258
Bulan ke 2	369	337	362	336
Bulan ke 3	469	329	561	440
Bulan ke 4	429	398	385	496
Bulan ke 5	423	263	589	490
Bulan ke 6	444	396	440	258
Bulan ke 7	430	421	365	399
Bulan ke 8	480	330	406	310
Bulan ke 9	434	438	168	381
Bulan ke 10	326	293	284	370
Bulan ke 11	376	465	314	275
Bulan ke 12	511	448	343	312

Setelah diperoleh running hours tiap bulan, dilakukan perhitungan daya energi WHR sehingga didapatkan nilai daya pada bulan ke-1 hingga bulan ke-12, sebagaimana ditunjukkan ditabel 4.

Tabel 4 Hasil Daya WHR ORC dan DIG

Bulan	RH ME Nilai	RH DIG 1 Nilai
Bulan ke 1	295,724	320,936
Bulan ke 2	211,068	318,780
Bulan ke 3	268,268	409,640
Bulan ke 4	245,388	393,932
Bulan ke 5	241,956	413,336
Bulan ke 6	253,968	336,952
Bulan ke 7	245,960	364,980
Bulan ke 8	274,560	322,168
Bulan ke 9	248,248	303,996
Bulan ke 10	186,472	291,676
Bulan ke 11	215,072	324,632
Bulan ke 12	292,292	339,724

Dengan ini kenaikan dan penurunan daya yang dapat divisualisasikan sebagai berikut.



Gambar 2 Grafik Daya WHR - ORC

Pada grafik gambar 1 tersebut dapat dijelaskan pada bulan Februari, daya “WHR-

ORC” melampaui “DIG Baseline 70%” dengan selisih lebih dari 100.000kWh. menunjukkan fluktuasi yang lebih besar dengan baseline, bisa menunjukkan adanya perbedaan efisiensi atau pengaruh operasional pada sistem tersebut. Nilai daya terendah untuk “WHR-ORC” terjadi pada bulan Oktober, yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai daya pada “DIG Baseline 70%” pada bulan yang sama.

### 3.4. Perhitungan Fuel, Efisiensi Reduksi Emisi.

Menghitung energi DIG yang dapat tergantikan (*offset*) oleh sistem ORC, penghematan bahan bakar, serta penurunan emisi CO<sub>2</sub> menggunakan data hasil perhitungan daya energi WHR-ORC. Pembahasan diawali dengan analisis energi DIG yang dapat tergantikan (*offset*) dari bulan ke-1 hingga bulan ke-12, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5 Hasil Daya Energi Power

Energi DIG Tergantikan (Eoffset)	
Bulan ke 1	min (295.724, 320.936) = 295.724 KWh
Bulan ke 2	min (211.068, 318.780) = 211.068 KWh
Bulan ke 3	min (268.268, 409.640) = 268.268 KWh
Bulan ke 4	min (245.388, 393.932) = 245.388 KWh
Bulan ke 5	min (241.956, 413.336) = 241.956 KWh
Bulan ke 6	min (253.968, 336.952) = 253.968 KWh
Bulan ke 7	min (245.960, 346.980) = 245.960 KWh
Bulan ke 8	min (274.560, 322.168) = 274.560 KWh
Bulan ke 9	min (248.248, 303.996) = 248.248 KWh
Bulan ke 10	min (186.472, 291.676) = 186.472 KWh
Bulan ke 11	min (215.072, 324.632) = 215.072 KWh
Bulan ke 12	min (292.292, 339.724) = 292.292 KWh
Bulan ke 13	min (235.092, 302.1480) = 235.092 KWh

Penghematan fuel, Co2 dan reduksi ini dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut.

#### 1. Penghematan Fuel Save

$$FUEL_{Save, Bulan} = E_{Offset, Bulan} \times SFC_{AE}$$

#### 2. Penghematan Emisi CO<sup>2</sup>

$$CO2_{Save, Bulan} = FUEL_{Save, Bulan} \times CF$$

### 3. Penghematan Reduksi Penghematan Emisi CO<sup>2</sup>

$$\text{REDUKSI}_{\text{CO}_2} = \frac{\text{CO}_2\text{Save.Bulan}}{\text{CO}_2\text{DG.Baseline.Bulan}} \times 100\%$$

Maka setelah menghitung fuel save, emisi, reduksi. Hasil tersebut dilampirkan bulan ke 1 sampai ke 12 di dalam tabel 6 - 8 berikut.

Tabel 6 Hasil Perhitungan Fuel Save

No	Bulan	Penghematan Fuel Save
1	Bulan ke 1	60,62
2	Bulan ke 2	43,27
3	Bulan ke 3	55,00
4	Bulan ke 4	51,00
5	Bulan ke 5	49,60
6	Bulan ke 6	52,00
7	Bulan ke 7	50,42
8	Bulan ke 8	56,30
9	Bulan ke 9	50,90
10	Bulan ke 10	38,22
11	Bulan ke 11	44,90
12	Bulan ke 12	59,92

Tabel 7 Hasil Perhitungan Emisi CO<sup>2</sup>

No	Bulan	Penghematan Emisi Co <sup>2</sup>
1	Bulan ke 1	188,781
2	Bulan ke 2	134,739
3	Bulan ke 3	171,254
4	Bulan ke 4	156,648
5	Bulan ke 5	154,547
6	Bulan ke 6	162,126
7	Bulan ke 7	157,013
8	Bulan ke 8	175,271
9	Bulan ke 9	158,474
10	Bulan ke 10	119,038
11	Bulan ke 11	137,296
12	Bulan ke 12	186,296

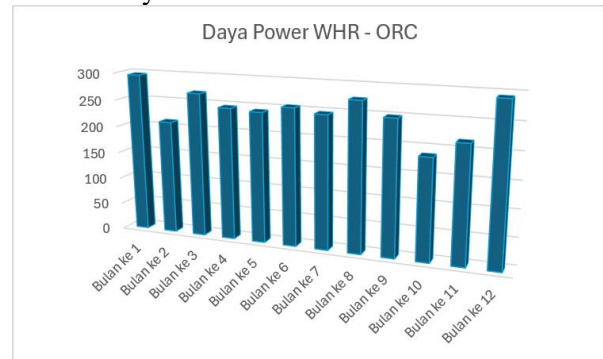
Tabel 8 Hasil Reduksi CO<sup>2</sup>

No	Bulan	Reduksi CO <sup>2</sup>
1	Bulan ke 1	92,14%
2	Bulan ke 2	66,21%
3	Bulan ke 3	65,49%
4	Bulan ke 4	62,29%
5	Bulan ke 5	58,54%
6	Bulan ke 6	75,37%
7	Bulan ke 7	67,39%
8	Bulan ke 8	85,22%
9	Bulan ke 9	81,66%
10	Bulan ke 10	63,93%
11	Bulan ke 11	66,25%
12	Bulan ke 12	86,04%

### 3.5. Pengaruh Implementasi WHR

Dengan mendasarkan pada perhitungan yang telah dilakukan serta hasil yang didapatkan, dapat kita gambarkan kondisi datanya sebagai berikut.

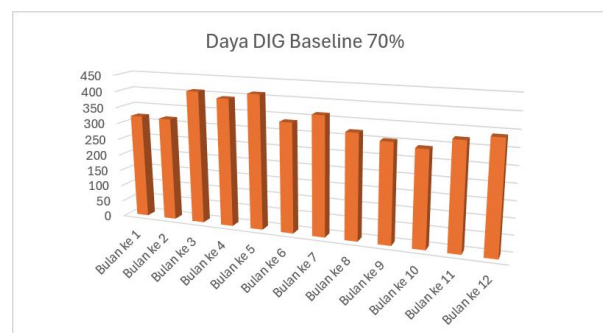
#### 1. Daya Power



Gambar 3 Grafik Daya Power

Pada gambar grafik 3.3 diatas mencatat energi yang dihasilkan oleh sistem WHR-ORC setiap bulan dalam satuan kWh. Di mana energi yang dihasilkan bervariasi tiap bulan, dengan angka tertinggi pada Bulan ke 1 dan terendah pada Bulan ke 10. Sistem WHR-ORC menunjukkan kinerja yang cukup baik dengan variasi produksi energi yang tidak terlalu ekstrem, meski pun itu ada penurunan pada bulan tertentu. Secara keseluruhan reduksi energi dari sistem ORC tetap memberikan kontribusi signifikan sepanjang tahun. Penurunan pada Bulan ke 10 dapat menjadi indikator untuk melakukan analisis lebih lanjut guna mengetahui ke depannya dan mengambil Langkah perbaikan. WHR sangat mempengaruhi daya yang akan digunakan tersebut dan nantinya akan membuat nilai terbaik pada waktu pengurangan bahan bakar dan emisi. Ini dapat membantu Diesel Generator untuk mengurangi emisi reduksi bahan bakar.

#### 2. Energi DIG 70%



Gambar 4 Grafik DIG Tergantikan 70%

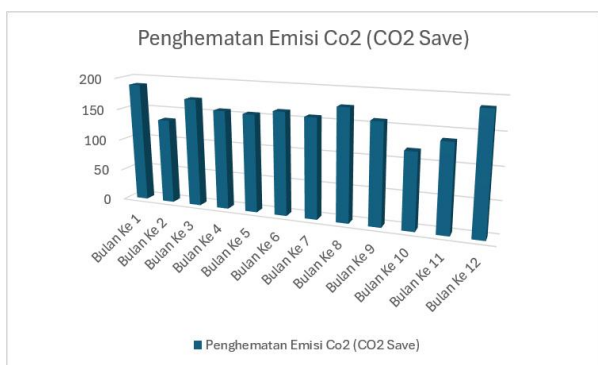
Pada gambar grafik 3.4 diatas menunjukkan fluktuasi energi listrik DIG 70% selama 12 bulan. Puncak konsumsi tertinggi terjadi pada Bulan ke-3 (409.640 kWh), sementara penurunan signifikan ada pada Bulan ke-6 (336.952 kWh). Variasi

beban ini dipengaruhi oleh faktor musiman dan operasional, dengan tren yang kembali meningkat di akhir tahun (Bulan ke-12: 339.724 kWh). Data ini menjadi dasar penting untuk efisiensi dan perencanaan energi ke depan.

### 3. Energi Tergantikan ORC - DIG

Pada gambar grafik 3.4 diatas menunjukkan energi yang tergantikan oleh teknologi ORC (Organic Rankine Cycle) dibandingkan dengan konsumsi energi DIG 70% per bulan dari Bulan ke 1 hingga Bulan ke 12. Lonjakan tinggi pada Bulan ke 1 dan Bulan ke 8, menunjukkan bahwa pada bulan-bulan tersebut terjadi efisiensi energi yang lebih tinggi, mengindikasikan mungkin adanya pengoptimalan penggunaan ORC pada periode tersebut.

### 4. Penghematan Eimisi CO2



Gambar 5 Grafik DIG Tergantikan 70%

Pada Grafik 5 menunjukkan jumlah emisi CO2 yang berhasil dikurangi melalui teknologi ORC. Penghematan emisi paling signifikan terjadi pada Bulan ke-1 (188,781 ton) dan Bulan ke-8 (175,271 ton). Hal ini membuktikan bahwa implementasi ORC memberikan dampak terbesar terhadap pengurangan jejak karbon operasional pada periode tersebut.

### 5. Penghematan Reduksi CO2



Gambar 6 Grafik Reduksi

Gambar 6 menunjukkan penurunan pengurangan CO<sup>2</sup> pada Bulan ke 10 (119,038 ton) dan Bulan ke 12 (186,590 ton) terlihat jelas, menunjukkan adanya penurunan efisiensi teknologi ORC di bulan-bulan tersebut. Secara keseluruhan, meskipun terdapat fluktuasi, pengurangan CO<sup>2</sup>, cenderung mengikuti pola yang sama dengan energi di-offset (tergantikan), dengan beberapa bulan mengalami penurunan efisiensi yang signifikan.

### 3.6. Pembagian Beban Kelistrikan Yang Akan Di Suplai

Berdasarkan daya WHR – ORC yang sudah dihitung perbulannya pada kapal kontainer 27.025 GT. Dimana didapatkan besaran daya yang dihasilkan perbulannya dalam setahun pada bulan yang berbeda. Dengan ini daya yang dihasilkan oleh WHR – ORC dapat dilakukan pembagian beban yang dapat disuplai dari WHR – ORC sebagai pembantu diesel generator (DIG). Menggunakan perhitungan didapatkan pada subbab sebelumnya diketahui daya paling pada bulan Desember. Dari total daya yang dapat dihasilkan selama 511 jam dibulan tersbut bisa disuplai pada kapal. Berdasarkan data diatas yang sudah dihitung, total beban yang akan dialokasikan untuk disuplai adalah

$$\text{Daya Suplai} = \frac{\text{Total Daya}}{511 \text{ jam pelayaran}}$$

$$\text{Daya Suplai} = \frac{264.997}{511}$$

$$\text{Daya Suplai} = 518,47 \text{ kWh}$$

Detail daya yang dihasilkan tersebut akan digunakan untuk menyuplai beban kelistrikan yang ada pada kapal. Detail beban yang bisa disuplai dengan total daya tersebut, pada tabel 7 sebagai berikut:

Equipment	Power (kWh)
FO Transfer Pump	2.0
AC Cooling Pump	2.0
ER Fan	9.3
DG Room Fan	3.7
Exh. Fan EG Room	0.4
DB L-1	4.22
DB L-2	3.14
DB L-3	3.14
DB L-4	3.14
DB DC - 1	0.8

DB D - 1	518.
Main Engine Room Light (P)	1.06
Steering Gear Room Light (P)	1.06
Main Engine Room Light (S)	1.06
Steering Gear Room Light (S)	1.06
Main Engine Room Light (P&S)	1.06
Engine Control Room Light	1.06
Diesel Generator Room Light (S)	1.06
AC Room & Workshop Light	1.06
Diesel Generator Room Light (P)	1.06
Engine Control Room Socket	1.58
Diesel Generator Room Socket	1.58
AC Room & Workshop Socket	1.58
Main Engine Room Socket (P&S)	1.58
Steering Gear Room Socket (P&S)	1.58
AC For ECR	1.58
<b>Total Daya Suplai</b>	<b>518.47 kWh</b>

### 3.7. Perhitungan EEXI Baru

Perhitungan paling akhir, dimana setelah dilakukan perhitungan dan pemilihan sistem WHR – ORC pada kapal kontainer 27.025 GT maka total daya yang dihasilkan oleh WHR – ORC akan digunakan untuk menyuplai perlengkapan dan akan mengurangi emisi yang dihasilkan. Maka selanjutnya dapat dilakukan perhitungan EEXI Attained kembali untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari penerapan sistem WHR – ORC tersebut terhadap kapal. Dimana perhitungan ini bisa untuk semua kapal. Dengan rumus berikut:

$$EEXI_{BARU} = \frac{(PME \times SFC_{ME} \times CF) + (PAE \times PAE_0, Bulan) \times SFC_{AE} \times CF}{Capacity \times V_{ref}}$$

$$EEXI_{BARU} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 283.804) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$EEXI_{BARU} = 6.230 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Maka dapat dicari juga efisiensi existing ships index mendapatkan hasil persen berikut dan dengan rumus berikut:

$$\text{Efisiensi} = \frac{EEXI \text{ Awal} - EEXI \text{ Baru}}{EEXI \text{ Awal}} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{7.622 - 6.230}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi} = 18.26\%$$

Dengan hasil dari bulan ke 1 sampai ke 12 dengan nilai berikut, ditunjukkan pada tabel 8 :

Tabel 8 Attained Baru

No	Bulan	Attained EEXI	Effisiensi
1	Bulan ke 1	6.230	18.26%
2	Bulan ke 2	6.306	17.27%
3	Bulan ke 3	6.308	17.24%
4	Bulan ke 4	6.318	17.11%
5	Bulan ke 5	6.329	16.96%
6	Bulan ke 6	6.279	17.62%
7	Bulan ke 7	6.303	17.31%
8	Bulan ke 8	6.250	18.00%
9	Bulan ke 9	6.261	17.86%
10	Bulan ke 10	6.313	17.17%
11	Bulan ke 11	6.306	17.27%
12	Bulan ke 12	6.248	18.03%

Terlihat dimana nilai EEXI setelah penerapan WHR – ORC mengalami penurunan. Penurunan ini berbeda beda setiap bulannya dikarenakan perbedayaan daya dan running hour yang dihasilkan. Penurunan paling besar dapat dilihat pada bulan ke 1 dan untuk penurunan paling kecil pada bulan ke 4.

### 3.8. Rata Rata EEXI

EEXI baru yang telah didapatkan dari perhitungan sebelumnya bervariasi dengan nilai berbeda beda disetiap bulannya. Dari nilai yang telah didapatkan tersebut maka dapat dilakukan perhitungan untuk nilai rata rata dari EEXI setelah dilakukan penambahan WHR-ORC dengan perhitungan dibawah ini

$$\text{Rata-Rata EEXI} = \frac{EEXI \text{ Baru (ke 1 - ke 12)}}{12 \text{ Bulan}}$$

$$\text{Rata Rata} = \frac{75.451}{12 \text{ Bulan}}$$

$$\text{Rata Rata} = 6.28\%$$

Nilai diatas menunjukkan bahwa nilai EEXI baru didapatkan dengan pemasangan sistem WHR – ORC dapat menunjukkan nilai EEXI sebesar 6.28%

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, pengaruh penerapan sistem Waste Heat Recovery (WHR) pada kapal kontainer MV Ever Obey dalam upaya peningkatan Energy Efficiency Existing Ships Index (EEXI), dapat menghasilkan pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO. Dari optimasi sistem WHR, diperoleh nilai daya dengan nilai tertinggi pada bulan ke 1 yaitu 295,724 kWh, dan nilai terendah pada bulan ke 10 yaitu 186,472 kWh.

Penerapan sistem WHR ini menunjukkan bahwa nilai EEXI pada kapal MV Ever Obey mengalami reduksi, dengan nilai penurunan efisiensi terkecil pada bulan ke 5 sebesar 16,96% dan terbesar pada bulan ke 1 sebesar 18,26%. Rata-rata penurunan EEXI yang tercatat sepanjang tahun adalah 6,28%.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Loadlines and S. Type, “No . No . EEXI Implementation Guidelines,” no. 172, pp. 1–24, 2022.
- [2] Dr. Nebojša Nakic ‘enovic ’, “Greenhouse Gas Emissions Scenarios,” vol. 166, pp. 149–166, 2022.
- [3] R. E. N. Rongcai, W. U. Guoxiong, and C. A. I. Ming, “Amandement To The Annex Of The Protocol Of 1997 To Amend The International Convention For The Prevention Of Pollution From Ships,,” 2021.
- [4] RINA, “What Is The EEXI (Energy Efficiency Existing Ships Index),” 2023. [https://www.rina.org/en/media/news/2022/04/07/what-is-eexi?utm\\_source](https://www.rina.org/en/media/news/2022/04/07/what-is-eexi?utm_source)
- [5] IMO, “Improving the energy efficiency of ships.” Accessed: Jan. 22, 2026. [Online]. Available: [https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving-the-energy-efficiency-of-ships.aspx?utm\\_source=](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving-the-energy-efficiency-of-ships.aspx?utm_source=)
- [6] N. Rivera, E. Monta, L. A. Díaz-secades, R. Gonz, and R. Quevedo, “Waste heat recovery system for marine engines optimized through a preference learning rank function embedded into a Bayesian optimizer,” vol. 281, no. April, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114747.
- [7] M. Vasilev, M. Kalajdžić, and N. Momčilović, “On energy efficiency of tankers: EEDI, EEXI and CII,” *Ocean Eng.*, vol. 317, no. August 2024, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.120028.
- [8] L. A. Díaz-secades, R. Gonz, and N. Rivera, “Waste heat recovery from marine engines and their limiting factors : Bibliometric analysis and further systematic review,” vol. 6, no. July, 2023, doi: 10.1016/j.cles.2023.100083.
- [9] T. H. Joung, S. G. Kang, J. K. Lee, and J. Ahn, “The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050,” *J. Int. Marit. Safety, Environ. Aff. Shipp.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2020, doi: 10.1080/25725084.2019.1707938.
- [10] (IEA), “The Future of Shipbuilding,,” 2020, [Online]. Available: <https://www.iea.org/programmes/technology-collaboration-programme/buildings>
- [11] MEPC 335 (76), “Guidelines Engine System To Comply With The EEXI Requirements And Use Of a Power Reserve,” vol. 335, no. June, p. 6, 2021.