

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Landasan Teori

Pada penelitian terdahulu pertama akan menjadikan pembahasan teori dan materi dapat dijelaskan pada subbab berikut:

#### 2.1.1 Kapal Kontainer Mv Ever Obey



Gambar 2. 1 Kapal Kontainer Mv Ever Obey (Sumber :Google.com)

Merupakan jenis kapal niaga yang dirancang secara khusus untuk mengangkut muatan dalam bentuk kontainer atau peti kemas. Kontainer tersebut umumnya berukuran 20 dan 40 kaki/teu. (Isaac & Mwendapole, 2025)

Tabel 2. 1 Data Kapal Mv Ever Obey

SHIPS PARTICULAR	
Ship's Name	Mv Ever Obey
Nationally	Panama
L.O.A	154,56 M
L.B.P	167,40 M
Breadth	32,20 M
Depth	17,00 M
Draught	11.217 M
IMO No	9919462
Port Of Registry	Panama
Gross Tonnage	27,025
DeadWeight	33,541 (S)

Pada beberapa tabel dibawah ini adalah data Main Engine. Data utama ini diperoleh dari perusahaan yang bersangkutan dan dari dokumen manual book Main Engine, dokumen trial report, engine spesification. Yang mencantumkan nilai maximum continus rating, putaran mesin, konsumsi bahan bakar.

Tabel 2. 2 Data Main Engine

MAIN ENGINE LIST	
Type Of Engine	Hitachi – MAN B&W 8560ME-C10.5
Nominal Power (MCR)	14.150 kW
Nominal Speed	84 rpm
Kecepatan (Vref)	18 knot
Silinder Total	8 Silinder
Bore	600 mm
Stroke	2.400 mm
Mean Effective Preasure	1.80 mPa
Type Of Brake	zollner

Tabel 2. 3 Data Engine Performa

ENGINE PERFORMANCE	
Data Beban & Output	
Load Pengujian	50%
Brake Output	7.084 kw
Engine Speed	66,7 rpm
Fuel Index	65.0
KONSUMSTION OF FUEL LIST	
SFOC Measured	164.7 g/kWh
SFOC ISO Corrected	164.4 g/kWh
EXHAUST GAS DATA	
Exhaust Gas Temprature	245 C
Exhaust Back Preassure	230 mmAq
Exhaust Gas Preassure	0.091 mPa
TURBOCHARGER DATA	
TC Speed	8.300 rpm
Scavenging Preassure	0.01 MPa

### 2.1.2 Energy Efficiency Existing Ships Indeks (EEXI)

*Energy Efficiency Existing Ships Index* (EEXI) merupakan sebuah regulasi wajib yang diperkenalkan oleh International Maritime Organization (IMO) melalui *Marine Environment Protection Commite* (MPEC). Regulasi ini dirancang besar untuk meningkatkan kinerja energi kapal – kapal yang telah beroperasi (existing ships) guna mendukung upaya pengurangan gas emisi karbon di sektor maritim. Secara Teknis, EEXI berfungsi sebagai indicator efisiensi energi yang menghitung Tingkat emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) per ton muatan yang diangkut per mil laut (g/t-nm).

Berdasarkan ketentuan IMO, EEXI berlaku bagi semua kapal berukuran 400 Gross Tonnage (GT) atau lebih yang terlibat di dalam pelayaran International, tanpa mempertimbangkan tahun pembuatannya. Ini bagi kapal yang diluncurkan sebelum 1 Januari 2023. Regulasi mengenai EEXI ini diterbitkan IMO bersama Marpol pada MARPOL Annex VI “*Guidelines On The Method Of Calculation Of The Attained Energy Efficiency Existing Ships*

*Index (EEXI)*”. Kepatuhan terhadap regulasi EEXI harus dipenuhi pada saat survei rutin pertama International Air Pollution Prevention (IAPP) Certificate setelah tanggal tersebut. Selanjutnya, International Energy Efficiency Certificate (IEEC) akan diperbarui untuk mencerminkan pemenuhan standar EEXI perhitungan nilai EEXI dapat dilakukan menggunakan metodologi yang telah ditetapkan IECC akan diterbitkan ulang. EEXI dapat dicari dengan konsep rumus seperti berikut (MEPC, 2021)

$$(\prod_{a \in A} (\sum_{i \in L} P_{a,i} \cdot C_{a,i} - C_{a,i} \cdot SFC_{a,i})) + (P_{a,i} \cdot C_{a,i} \cdot SFC_{a,i}) (\prod_{i=1}^n \sum_{l=1}^n P_{i,l} \cdot F_i - \sum_{l=1}^n P_{i,l} \cdot F_l) C_{a,i} \cdot SFC_{a,i}$$

$$f: f = f \cdot Capacity \cdot f_{vr} \cdot f_n$$

Dimana rumus diatas dapat disederhanakan sebagai berikut :

$$EEXI = \frac{(P_{ME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \cdot CF_{ME(i)}) + (P_{AE(j)} \cdot SFC_{AE(j)} \cdot CF_{AE(j)})}{Capacity \cdot V_{ref}}$$

Dimana,

$P_{ME(i)}$  = Daya ME (kW)

$SFC_{ME(i)}$  = Specific Fuel Consumption ME pada 75% MCR (g/kWh)

$CF_{ME}$  = Faktor Konversi Bahan Bakar ke CO<sub>2</sub> (t- CO<sub>2</sub>)

$P_{AE(i)}$  = Daya AE (kW)

$SFC_{AE(i)}$  = Specific Fuel Consumption AE pada 50% MCR (g/kWh)

$CF_{AE}$  = Faktor Konversi Bahan Bakar ke CO<sub>2</sub> (t- CO<sub>2</sub>)

Capacity = *DeadWeight Tonnage*

$V_{ref}$  = Kecepatan Refrensi Kapal (knot)

IMO telah menetapkan ambang batas EEXI yang berbeda untuk setiap jenis kapal dan kapasitas muatannya. Dimana dengan membandingkan hasil perhitungan aktual terhadap nilai batas yang ditetapkan oleh dengan rumus berikut :

$$Attained EEXI \leq Required EEXI = (1 - \frac{Y}{100}) EEDI \text{ refrence line value}$$

Dimana,

Y = Faktor reduksi

EEDI refrence line value = Nilai refrensi yang ditetapkan oleh IMO

### 2.1.3 Nilai Faktor Konversi Jenis Bahan Bakar ke CO<sub>2</sub> (CF)

Dalam menghitung emisi ini CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh mesin kapal, diperlukan nilai faktor konversi (CF) CO<sub>2</sub> yang bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan. Setiap jenis bahan bakar memiliki kandungan karbon dan karakteristik kapal yang berbeda, sehingga dapat menghasilkan nilai CF yang bervariasi. Dalam panduan EEXI, IMO telah mengeluarkan nilai CF untuk jenis bahan bakar yang umum digunakan dalam industri pelayaran yang dapat dilihat sebagai berikut (Bauzá Sosa et al., 2018). Nilai CF dari masing masing bahan bakar disajikan dalam tabel berikut :

Tabel 2. 4 Nilai Faktor Konversi

Jenis Bahan Bakar	Referensi	Nilai Kalor Rendah (Kj/KG)	Kandungan Karbon	CF (t- CO <sub>2</sub> /t- Fuel)
Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMB	42,700	0.8744	3.206
Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	41,200	0.8594	3.151
Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	40,200	0.8493	3.114
Liquefied PetrGas (LPG)	Propane	46,300	0.8182	3.000
	Butane	45,700	0.8264	3.030
Ethane		46,400	0.7989	2.927

### 2.1.4 Nilai Faktor Reduksi EEXI

Nilai Faktor reduksi yang ditetapkan oleh IMO berdasarkan kategori dan Ukuran Kapal dapat ditemukan dalam tabel berikut : (MEPC, 2021)

Tabel 2. 5 Nilai Faktor Reduksi

Jenis Kapal	Ukuran	Faktor Reduksi
Bulk Carrier	200,000 DWT and Above	15
	20,000 – 200,000 DWT	20
	10,000 – 20,000 DWT	0 – 20
Gas Carrier	5,000 DWT and Above	30
	10,000 – 15,000 DWT	20
	2,000 – 10, 000 DWT	0 - 20
Tanker	200.000 DWT and Above	15
	20,000 – 200,000 DWT	20

	10,000 – 20,000 DWT	0 – 20
LNG Carrier	10,000 DWT and Above	30
Container	200,000 DWT and Above	50
	20,000 – 200,000 DWT	45
	80,000 – 120,000 DWT	35
	40,000 – 80,000 DWT	30
	15,000 – 40,000 DWT	20
	0,000 – 15,000 DWT	0 - 20
General Cargo	15,000 DWT and Above	30
	3,000 – 15,000 DWT	0 – 30
Refrigerated Cargo Carrier	5,000 DWT and Above	15
	3,000 – 5,000 DWT	0 – 15
Combination Carrier	20,000 DWT and Above	20
	4,000 – 20,000 DWT	0 – 20
Vehicle Carrier	10,000 DWT and Above	15
Ro-ro Cargo Ship	2,000 DWT and Above	5
	250 – 2,000 DWT	0 – 5
Ro-ro Passenger Ship	1,000 DWT and Above	5
	250 – 1,000 DWT	0 – 5
Cruise Passenger Ship Having Non-Conventional Propulsion	85,000 GT and Above	30
	25,000 – 85,000 GT	0 - 30

### 2.1.5 Nilai Refrensi EEDI

Nilai refrensi yang diterapkan oleh IMO untuk kapal sejenis berdasarkan DWT terdapat pada tabel berikut : (MEPC, 2021)

Tabel 2. 6 Nilai Refrensi EEDI

Jenis Kapal		Nilai Refrensi
Bulk Carrier	DWT ≤ 279,000	$961.79 \times DWT^{-0.477}$
	DWT > 279,000	$961.7 \times DWT^{-0.477}$
Gas Carrier		$1120.00 \times DWT^{-0.456}$
Tanker		$1218.80 \times DWT^{-0.488}$
Container		$174.22 \times DWT^{-0.201}$
General Cargo		$107.48 \times DWT^{-0.216}$
Refrigerated Cargo Carrier		$227.01 \times DWT^{-0.244}$
Combination Carrier		$1219.00 \times DWT^{-0.488}$
Vehicle Carrier	DWT/GT < 0.3	$(DWT/GT)^{-0.7} \times 780.36 \times DWT^{-0.471}$
	DWT/GT ≥ 0.3	$1812.63 \times DWT^{-0.471}$
Ro-ro Cargo Ship	DWT ≤ 17.000	$1686.17 \times DWT^{-0.498}$

	DWT > 17.000	$1686.17 \times 17.000^{-0.498}$
Ro-ro Passenger Ship	DWT $\leq$ 10.000	$902.59 \times \text{DWT}^{-0.381}$
	DWT > 10.000	$902.59 \times 10.000^{-0.381}$
LNG Carrier		$2253.7 \times \text{DWT}^{-0.474}$
Cruise Passenger Ship Having Non-Conventional Propulsion		$170.84 \times \text{GT}^{-0.214}$

### 2.1.6 Mesin Kapal dan Potensi Panas Buang (WHR)

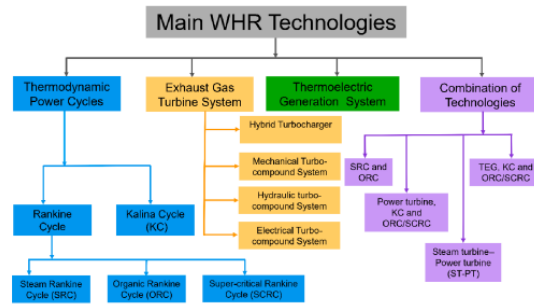
Mesin induk kapal yang digunakan pada kapal kontainer bekerja dengan efisiensi termal yang relatif terbatas. Gas buang dari mesin induk ini mengandung energi panas dengan temperatur yang tinggi umumnya belum dimanfaatkan secara optimal. Berdasarkan karakteristik termodinamika mesin diesel induk ini, sekitar 25% - 30% energi bahan bakar terbuang melalui gas buang. Kondisi ini menunjukkan adanya potensi besar untuk memanfaatkan panas buang sebagai sumber energi skunder guna meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem permesinan kapal. MAN Energy Solution menjelaskan bahwa pemanfaatan panas buang melalui sistem pemulihan panas dapat mengurangi beban kerja mesin bantu dan meningkatkan efisiensi energi total kapal, khususnya pada kapal dengan waktu operasi mesin induk yang tinggi seperti kapal kontainer.

### 2.1.7 Waste Heat Recovery (WHR)

Waste Heat Recovery (WHR) System merupakan teknologi yang memanfaatkan panas buang dari mesin induk kapal, khususnya gas buang dan sistem pendingin. Hal ini untuk dikonversi kembali menjadi energi berguna, umumnya dalam bentuk energi listrik. Pada mesin kapal, sekitar 25-30% energi bahan bakar hilang melalui gas buang, sehingga WHR memiliki potensi besar untuk meningkatkan EEXI total sistem propulsi kapal. Pada kapal kontainer, sistem WHR umumnya terintegrasi dengan turbin uap atau Organic Rankine Cycle (ORC) yang menghasilkan listrik dan digunakan untuk mengurangi beban AE. (Rivera et al., 2023)

WHR ini juga untuk mengambil kembali (recovery) energi panas yang terbuang dari mesin atau lainnya, sehingga energi tersebut dapat dimanfaatkan kembali untuk tujuan yang berguna seperti menghasilkan listrik atau uap. WHR ini memanfaatkan panas dari :

1. Gas buang mesin induk.
2. Pendingin.
3. Panas sisa dari sistem lain.



Gambar 2. 2 Siklus Waste Heat Recovery (Source : (Rivera et al., 2023))

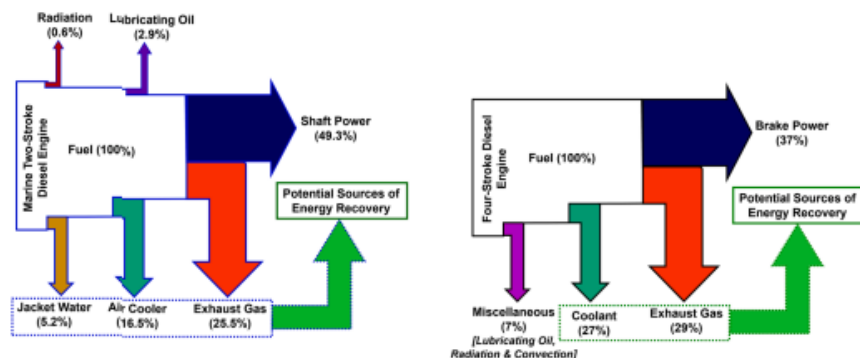
Sistem WHR secara umum meningkatkan efisiensi total sistem pembangkit tenaga kapal dengan cara mengubah panas yang terbuang menjadi energi listrik atau uap kerja, yang selanjutnya digunakan untuk mengurangi beban auxiliary engine. Sistem ini juga memiliki potensi signifikan dalam menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 5-10%, tergantung pada konfigurasi sistem dan kondisi operasi mesin. (Wang et al., 2025)

### 2.1.8 Mekanisme WHR Pada Kapal

Mekanisme kerja WHR yang akan diteliti pada kapal ini didasarkan pada prinsip termodinamika konversi energi panas menjadi kerja mekanik atau listrik. Konsep dasarnya adalah :

1. Panas buang mesin utama
2. Sistem pemulihan panas (Heat Recovery UNIT)
3. Konversi panas menjadi energi
4. Integrasi dengan sistem energi kapal.

Pada mekanisme ini akan mendapatkan design alur dari pemanasan yang nantinya akan dihitung menjadi daya WHR untuk menjadi energi yang keterkaitan dengan EEXI. (Zhu et al., 2020) Ini salah satu teknologi retrofit paling efektif untuk meningkatkan performa energi kapal eksisting dalam jangkang menengah dan panjang.



Gambar 2. 3 Mekanisme WHR (Source : (Zhu et al., 2020))

## **2.1.9 Jenis Siklus Waste Heat Recovery**

### **2.1.9.1 Steam Rankine Cycle (SRC)**

Steam Rankine Cycle (SRC) merupakan siklus termodinamika konvensional yang paling lama digunakan dalam sistem pembangkit tenaga, termasuk pada sistem WHR di kapal. Pada siklus ini air digunakan sebagai fluida kerja yang dipanaskan hingga berubah menjadi uap bertekanan tinggi. Uap tersebut diekspansikan melalui turbin uap untuk menghasilkan energi mekanik yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik.

Pada kapal, SRC ini memanfaatkan panas buang gas buang mesin induk melalui exhaust gas economizer untuk menghasilkan uap. Sistem ini sangat efektif apabila sumber panas memiliki temperatur tinggi, seperti gas buang mesin diesel utama kapal kontainer. SRC memiliki keunggulan yaitu pada efisiensi termal yang relatif tinggi dan teknologi yang telah matang. SRC sangat sesuai diterapkan pada kapal dengan kapasitas mesin besar dan profil operasi stabil, seperti kapal kontainer berukuran besar. (Larsen et al., 2013)

### **3.1.9.2 Organic Rankine Cycle (ORC)**

Organic Rankine Cycle (ORC) merupakan pengembangan dari SRC konvensional yang menggunakan fluida organik sebagai pengganti air. Fluida organik memiliki titik didih yang rendah dibandingkan air, ini memungkinkan pemanfaatan panas buang bersuhu rendah hingga menengah yang tidak dapat dimanfaatkan secara efektif oleh SRC.

Dalam sistem ORC, panas buang dari gas buang mesin induk digunakan untuk memanaskan fluida organik hingga mengalami perubahan fase menjadi uap. Uap tersebut kemudian menggerakkan turbin atau expander untuk menghasilkan energi listrik. Setelah melalui proses ekspansi, fluida dikondensikan dan disirkulasikan kembali ke sistem. Sistem ORC memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi energi kapal tanpa memerlukan modifikasi besar pada sistem permesinan utama. Namun keterbatasannya terletak pada efisiensi termalnya yang relatif lebih rendah dibandingkan SRC serta biaya investasi awal yang masih tergolong tinggi. (Wang et al., 2025)

## **2.1.10 Waste Heat Recovery Dalam Efisiensi Energi Kapal**

Penerapan WHR pada kapal dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi energi keseluruhan sistem propulsi kapal. Sistem WHR memungkinkan sebagian panas terbuang untuk digunakan kembali sebagai energi listrik atau uap kerja sehingga total utilisasi energi dari bahan bakar meningkat dari sekitar 45% - 50% menjadi sekitar 55% - 60%. WHR ini juga tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga berdampak langsung terhadap pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca (CO<sub>2</sub>).



pengurangan nilai Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) dan emisi operasional, yang sejalan dengan kepatuhan terhadap regulasi IMO.

Sementara itu, Benvenuto et al. (2023) dalam studinya yang bertajuk “Organic Rankine Cycle Application For Container Ships” menguji simulasi sistem berbasis data mesin aktual pada kapal kontainer. Hasil penelitian tersebut membuktikan adanya potensi penghematan bahan bakar yang signifikan hingga mencapai 12%, meskipun analisisnya belum mengaitkan hasil penghematan tersebut secara langsung dengan indeks EEXI.

Di sisi lain, evaluasi terhadap penerapan regulasi IMO secara armada luas juga menjadi perhatian para peneliti. (Vasilev et al., 2025) menganalisis pengaruh regulasi EEDI, EEXI, dan CII terhadap performa desain serta operasional armada tanker berskala besar (mencakup 426 unit) menggunakan metode data historis dan analisis statistik. Lebih lanjut, Sang-Su Lee (2024) mengkaji dampak implementasi regulasi tersebut terhadap reduksi emisi CO<sub>2</sub> di kapal menggunakan metode kuantitatif berbasis data regulasi IMO.

Penelitian (Lee, 2024) mengungkapkan sebuah fenomena penting di mana terdapat perbedaan antara nilai *attained EEXI* dengan emisi operasional aktual; hal ini terjadi karena kapal masih dapat memanfaatkan daya mesin yang diizinkan untuk beroperasi pada kecepatan yang lebih tinggi dari perkiraan semula. Fenomena keterbatasan pembatasan daya mesin (*Engine Power Limitation*) ini juga disoroti oleh *International Council On Clean Transportation* (ICCT) melalui studi . (D. . M. X. . & C. B. Rutherford, 2020)

Studi simulasi dan analisis data operasi aktual kapal dunia tersebut mengevaluasi sejauh mana pembatasan daya mesin mampu memberikan pengurangan emisi yang nyata dalam konteks operasional riil global. Selain studi berskala makro, solusi praktis industri maritim dan metodologi matematis tingkat lanjut terus dikembangkan. Sebuah kajian deskriptif mengenai "*Practical Marine WHR System And Industry Solution*" memberikan gambaran nyata mengenai implementasi sistem *Waste Heat Recovery* (WHR) pada kapal-kapal berukuran besar, yang mencatat potensi peningkatan efisiensi keseluruhan berkisar antara 4% hingga 9%.

Selain itu, (Ammar et al., 2023) memperluas cakupan analisis melalui pendekatan teknis dan ekonometrik dengan berbagai skenario. Mereka membandingkan beberapa konfigurasi teknologi propulsi alternatif, termasuk sistem *Parallel Hybrid Dual-Fuel Engine-Fuel Cell Propulsion System* untuk kapal LNG *carrier*, dengan mempertimbangkan implikasi efisiensi biaya serta pembatasan daya mesin.

Guna mengoptimalkan akurasi desain sistem, Luis et al. (2023) mengusulkan pemanfaatan pendekatan matematis dan evaluasi termodinamika terintegrasi melalui judul "*Waste Heat Recovery System for Marine Engines Optimized Through Bayesian Network*". Melalui model jaringan Bayesian tersebut, optimasi sistem terbukti mampu mendongkrak peningkatan efisiensi mesin kapal secara substansial hingga mencapai 15,04%.

Kendati berbagai penelitian di atas telah memberikan kontribusi besar pada aspek efisiensi energi kapal dan teknologi WHR, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) yang nyata. Sebagian besar studi terdahulu memiliki fokus yang terbatas pada aspek tertentu dan cenderung dimulai dari pembahasan teori serta konsep makro, bukan pada implementasi nyata di lapangan. Selain itu, masih terdapat keterbatasan mendalam pada analisis emisi operasional riil dan hubungannya dengan pengurangan CO<sub>2</sub>

Berdasarkan kesenjangan tersebut, belum ada studi yang secara langsung menghubungkan dan mengevaluasi implementasi teknologi WHR terhadap peningkatan nilai EEXI pada objek spesifik kapal kontainer operasional seperti MV Ever Obey. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk

mengisi kekosongan tersebut dengan menganalisis serta mengevaluasi penerapan teknologi siklus WHR secara nyata, guna menyelidiki potensi peningkatan efisiensi energi yang lebih konkret sekaligus dampaknya terhadap pengurangan emisi CO<sub>2</sub> yang lebih luas demi mematuhi regulasi ketat IMO.