

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **4.1 Pendahuluan Hasil Pembahasan**

Bab ini akan membahas hasil dari pengolahan data serta pembahasan terkait dengan potensi penerapan sistem Waste Heat Recovery (WHR) pada kapal kontainer yang menjadi objek pada penelitian kali ini. Penelitian ini berfokus pada analisis pemanfaatan panas buang yang dihasilkan oleh Main Engine kapal untuk menghasilkan energi listrik tambahan Energi tambahan ini kemudian dapat dimanfaatkan untuk mendukung sistem kelistrikan kapal, yang berfungsi untuk mengurangi ketergantungan pada Auxiliary Engine. Dengan begitu penerapan sistem WHR ini diharapkan mampu menurunkan beban kerja Auxiliary Engine dan meningkatkan efisiensi penggunaan energi kapal secara keseluruhan.

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang diambil langsung dari kapal, berupa dokumen teknis, laporan uji coba mesin, manual book mesin, serta data operasional jam kerja main engine dan auxiliary engine (Running Hours) yang tercatat antara januari 2025 hingga januari 2026. Karena kapal yang diteliti saat ini belum dilengkapi dengan sistem WHR, maka analisis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu mengandalkan pendekatan asumsi literatur yang relevan dan spesifikasi sistem WHR dari produsen mesin. Ini terkhusus dari MAN Energy Solutions. Meskipun pendekatan ini menggunakan data yang bersifat asuntif, metode ini telah banyak diterapkan dalam penelitian serupa dan tetap berada dalam rentang teknis yang dapat dipertanggung jawabkan secara akademik. Dengan demikian, meskipun sistem WHR pada kapal yang dipakai untuk penelitian belum ada, hasil analisis ini tetap memberikan gambaran yang valid mengenai potensi penerapan teknologi tersebut.

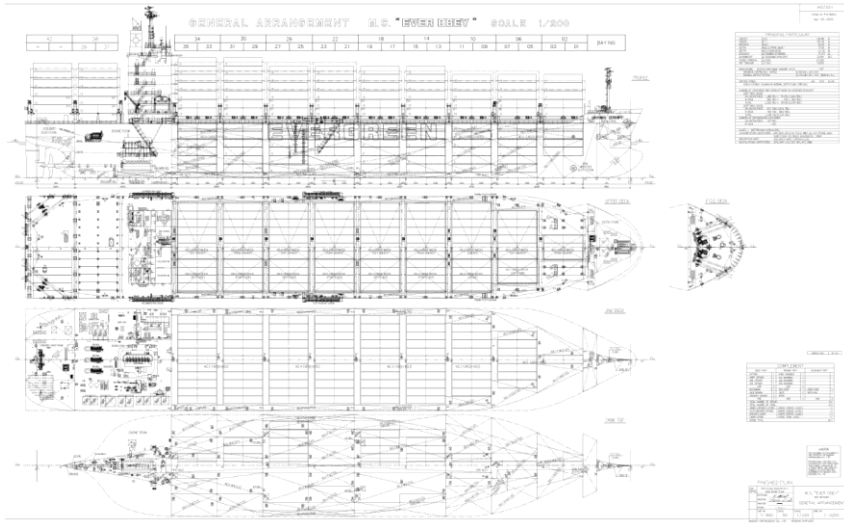
### **4.2 Data Kapal Dan Engine**

Pada penelitian kali ini data kapal yang digunakan sebagai objek penelitian adalah pengaruh penerapan waste heat recovery pada kapal kontainer terhadap perbaikan nilai EEXI. EEXI sendiri berlaku pada kapal dengan ukuran minimal 400 GT ke atas. Oleh karena itu, dipilihlah kapal dengan GT di atas 400, di mana Ship Particulars dari kapal yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 1 *Spesification Of Ship*

Type Of Ship	:	Container Ships
Flag	:	Indonesia
Classification	:	NK
IMO Number	:	9919462
MMSI Number	:	11987625
Year Build	:	2022
L.O.A	:	154,56 M
L.B.P	:	167,40 M
Breadth	:	32,20 M
Depth	:	17,00 M
Draught	:	11,217 M
GT	:	27,025
DWT	:	33,541
Main Engine	:	Hitachi MAN B&W

Auxiliary Engine	:	3X Yanmar 6EY18(A)LW Auxiliary
Service Speed	:	20 Knot



Gambar 4. 1 *General Arrangement (Source. Company)*

### 4.3 Attained EEXI

Energi kapal dalam proses pengangkutan dipengaruhi oleh kapasitas angkut dan kecepatan operasional. Kapasitas kapal umumnya dinyatakan dalam DWT (Deadweight Tonnage), sedangkan kecepatan yang digunakan adalah kecepatan referensi. Mengacu pada IMO (2018), metode perhitungan Energy Efficiency Existing Ships Index (EEXI) pada dasarnya mengadopsi pedoman perhitungan Energy Efficiency Design Index (EEDI). Oleh karena itu, EEXI dihitung berdasarkan hubungan antara konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan kapal terhadap kapasitas dan kecepatan referensinya, yang secara matematis dapat dinyatakan dengan rumus berikut :

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

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

Dengan awal attained EEXI ini menjadikan 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

:

$$P_{ME(i)} = 10.612 \text{ kW (70\%MCR)}$$

$$SFC_{ME(i)} = 168 \text{ (g/kWh)}$$

$$CF_{ME} = 3.114 \text{ (t- CO}_2\text{)}$$

$$P_{AE(i)} = 375 \text{ (50\%MCR)}$$

$$SFC_{AE(i)} = 205 \text{ (g/kWh)}$$

$$CF_{AE} = 3.114 \text{ (t- CO}_2\text{)}$$

$$\text{Capacity} = 33.541$$

$$V_{ref} = 20 \text{ KNOT (knot)}$$

Dengan data diatas maka EEXI dapat dihitung sebagai berikut :

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

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

#### 4.4 Required EEXI

Nilai Required EEXI pada dasarnya sudah ditetapkan oleh International Maritime Organization (IMO) sebagai standar minimum efisiensi energi yang wajib dipenuhi kapal. Standar ini dibuat dengan membedakannya berdasarkan jenis kapal dan kapasitas muatan kapal. Nilai Required EEXI tidak dicari dengan cara menebak atau mengambil angka umum, tetapi dihitung lewat persamaan formula yang sudah disediakan oleh IMO. Dengan parameter seperti kapasitas DWT atau GT pada kapal tersebut.

$$\text{Required EEXI} = \left(1 - \frac{y}{100}\right) \text{EEDI refrence line value}$$

Maka dari itu hasil required EEXI

Dengan

y = Faktor reduksi

EEDI refrence line value : Nilai referensi yang ditetapkan oleh IMO

Nilai faktor reduksi ini bisa didapat jenis dan DWT kapal sesuai tabel 2.5 mengenai nilai reduksi EEXI. Dimana jenis kapal yang dipakai pada penelitian ini adalah *Container Ships* dengan Gross Tonnage sebesar 27.025 maka pada tabel 2.5 tersebut mendapatkan nilai faktor reduksi sebesar

$$\text{Faktor reduksi} = 20\%$$

Selanjutnya kami akan menampilkan nilai referensi EEDI yang dapat dihitung dengan persamaan sesuai tabel 2.6, maka dari itu berikut berdasarkan regulasi pada tabel 2.6.

$$\text{EEDI Refrence Line} = 174,22 \times \text{DWT}^{-0,201}$$

$$\text{EEDI Refrence Line} = 174,22 \times 33,541^{-0,201}$$

EEDI Refrence Line = 21,45

Setelah semua nilai faktor reduksi dan EEDI refrence sudah ditemukan dan dihitung maka lanjutan untuk kapal pada penelitian ini. Mendapatkan sebuah nilai Required EEXI yang dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Required EEXI} = \left(1 - \frac{20}{100}\right) \text{EEDI refrence line value}$$

$$\text{Required EEXI} = 17,16 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

#### 4.5 Perhitungan Waste Heat Recovery

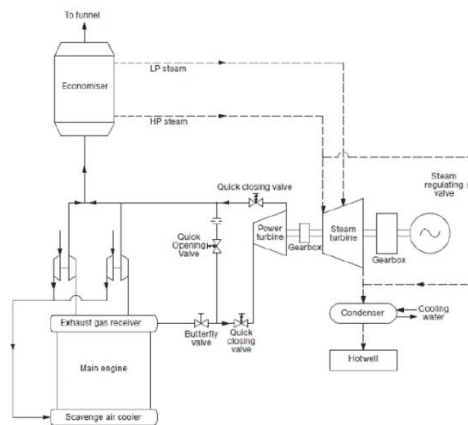
Pada tahap ini dilakukannya analisis potensi pemanfaatan panas buang mesin induk melalui penerapan sistem Waste Heat Recovery (WHR) pada kapal kontainer. Perhitungan diawali dengan mengidentifikasi energi panas yang tersedia dari gas buang pada kondisi operasi representatif mesin sekitar 70 - 75% MCR. Dengan mempertimbangkan laju aliran gas, temperatur masuk serta keluar, konsumsi bahan bakar spesifik.

Berdasarkan hasil estimasi tersebut, ditentukan kapasitas daya yang dapat dibangkitkan melalui konfigurasi sistem yang dipilih. Maka dari itu digunakannya sistem Organic Rankine Cycle. Perencanaan instalasi turut memperhatikan ketersediaan ruang di ruang mesin. Integrasi ini dengan sistem eksisting, serta kemudahan perawatan dan aspek keselamatan.

Analisis ini juga mengevaluasi kontribusi daya WHR terhadap penurunan konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>, khususnya dalam mendukung pencapaian nilai EEXI. Dengan demikian, sistem WHR dirancang tidak hanya sebagai peralatan, tetapi juga sebagai solusi peningkatan efisiensi energi kapal secara menyeluruh dan terintegrasi.

#### 4.6 Analisis Potensi Ketersediaan Energi Terbarukan pada kapal.

Berdasarkan data-data kapal yang telah didapatkan, data WHR yang didapat dari asumsi literatur yang ada cocok untuk kapal kontainer ini. Pada tahap ini penelitian memilih siklus Organic Rankine Cycle (ORC). Penelitian ini memilih siklus ORC karena temperatur dari main engine kapal kontainer ini sebesar 245°C dan siklus ORC adalah yang paling optimal untuk retrofit tersebut.



Gambar 4. 2 Skema WHR ORC EEXI

## 4.7 Perhitungan Daya Sistem WHR

Berdasarkan hasil analisis EEXI pada subbab sebelumnya, diketahui bahwa diperlukan upaya peningkatan efisiensi energi tanpa menurunkan kapasitas angkut maupun kecepatan operasional kapal. Sistem WHR yang digunakan pada penelitian kali ini diasumsikan menggunakan teknologi Organic Rankine Cycle, karena memiliki keunggulan dalam pemanfaatan temperatur exhaust gas menengah ( $230\text{-}350^{\circ}\text{C}$ ), instalasi relatif kompleks dan tidak memerlukan modifikasi besar pada sistem propulsi utama.

Pada subbab ini pencarian type dan spesifikasi sistem WHR sudah ditemukan berdasarkan data teknis pabrikan, asumsi literatur, dan cocok untuk kapal kontainer. Pada subbab ini akan kami jelaskan spesifikasi WHR – ORC yang digunakan dalam analisis ini adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 3 Mesin WHR – ORC (Source, Google.com)

### Spesifikasi sistem WHR - ORC

- Type Of WHR : Alfa Laval – Aalborg WHR / ORC Marine System
- Type System : Exhaust Gas Heat Recovery – ORC
- Sumber Panas : NK
- Working Fluida : R245fa (Alva Laval Product Catalogue, 2022)
- Otput Generator : 300 – 800 Kw
- Efisiensi Konversi Termal : 18 – 22%
- Daya ORC saat ME Running : 572 Kw
- Daya DG rata-rata operasi : 308 Kw
- SFC AE ; 205 G/KWH = 0,205 KG/KWH
- Faktor Emisi CO@ : 3.114 kgCO<sub>2</sub>/kgfuel
- Tempratur exhaust Gas Inlet : 230-350°C
- Temprature Outlet Setelah Recovery :  $\pm 350^{\circ}\text{C}$
- Tegangan Output Generator : 440 v / 60 Hz
- Integrasi Sistem : Paralel dengan main switchboard
- Tipe Instalasi : Modular Skid - Mounted

Setelah mengetahui data dan juga spesifikaasi sistem WHR – ORC Marine System Alfalevel Aalborg yang telah dipilih oleh peneliti maka dapat dilakukan perhitungan total daya yang dapat dihasilkan.

Sistem yang digunakan adalah Exhaust Gas Heat Recovery – ORC Marine System by Alfa Laval / Aalborg. Dengan working fluida R245fa. Untuk menyederhanakan perhitungan seperti pendekatan, daya ORC dianggap konstan saat ME running Hours dan energi bulanan dihitung dari Running Hours. Perhitungan daya WHR – ORC dapat dihitung menggunakan rumus dibawah ini, sebagai berikut :

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

Dimana

$E_{ORC,Bulan}$  = Total Daya energi ORC

$P_{ORC}$  = Power ORC

$RH_{ME,Bulan}$  = Runing Hours (Per-Bulan)

Dengan ini untuk nilai Running Hours sudah diketahui dan mendapatkan data dari perusahaan kapal kontainer itu untuk nilai Running Hourse serta Running Hours DIG 1 – 3 datanya dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4. 2 Running Hours Kapal Berlayar

RUNNING HOURSE MAIN ENGINE							
Running Hourse ME	NILAI	Running Hourse DIG 1	NILAI	Running Hourse DIG 2	NILAI	Running Hourse DIG 3	NILAI
Bulan 1	517	Bulan 1	261	Bulan 1	523	Bulan 1	258
Bulan 2	369	Bulan 2	337	Bulan 2	362	Bulan 2	336
Bulan 3	469	Bulan 3	329	Bulan 3	561	Bulan 3	440
Bulan 4	429	Bulan 4	398	Bulan 4	385	Bulan 4	496
Bulan 5	423	Bulan 5	263	Bulan 5	589	Bulan 5	490
Bulan 6	444	Bulan 6	396	Bulan 6	440	Bulan 6	258
Bulan 7	430	Bulan 7	421	Bulan 7	365	Bulan 7	399
Bulan 8	480	Bulan 8	330	Bulan 8	406	Bulan 8	310
Bulan 9	434	Bulan 9	438	Bulan 9	168	Bulan 9	381
Bulan 10	326	Bulan 10	293	Bulan 10	284	Bulan 10	370
Bulan 11	376	Bulan 11	465	Bulan 11	314	Bulan 11	275
Bulan 12	511	Bulan 12	448	Bulan 12	343	Bulan 12	312
<b>TOTAL</b>	<b>5619</b>	<b>TOTAL</b>	<b>4668</b>	<b>TOTAL</b>	<b>5017</b>	<b>TOTAL</b>	<b>4740</b>

Maka dari tabel di atas dapat dihitung daya yang dapat dihasilkan pada bulan Januari hingga Januari 2026 ketika nantinya sudah memakai sistem WHR. Ini dihitung dari ORC bulanan, Energi DIG bulanan dan pengurangan emisinya.

#### 4.7.1 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 1

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR-ORC PV pada bulan Januari dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini, daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine beroperasi. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar, yaitu energi = daya X waktu operasi. Di mana akan menggunakan data running hours bulan ke-1 sebesar 512 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 517 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 517$$

$$E_{ORC,Bulan} = 295,724$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 1 menghasilkan energi listrik sekitar 295.724 kWh (295,724 MWh) selama ME beroperasi 517 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu. (NICE CXone Expert and Teams, n.d.)

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 1. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

$$\text{Daya DIG rata – rata saat operasi running hours } 70\% = 440$$

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = \text{DIG 1} + \text{DIG 2} + \text{DIG 3} = \text{total RH jam}$$

Bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.042 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.042$$

$$E_{DIG,Bulan} = 320.936 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 1, DIG menghasilkan energi sebesar 320.936 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO2.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO2. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.2 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 2

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan Februari dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 2 sebesar 369 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 369 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 369$$

$$E_{ORC,Bulan} = 211,068$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 2 menghasilkan energi listrik sekitar 211.068 kWh (211.068 MWh) selama ME beroperasi 369 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 2. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

$$\text{Daya DIG rata – rata saat operasi running hours } 70\% = 440$$

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = DIG\ 1 + DIG\ 2 + DIG\ 3 = \text{total RH jam}$$

Bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.035 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.035$$

$$E_{DIG,Bulan} = 318.780 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 2, DIG menghasilkan energi sebesar 318.780 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO<sub>2</sub>.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.3 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 3

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan Maret dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 3 sebesar 469 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 469 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 469$$

$$E_{ORC,Bulan} = 268,268$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 3 menghasilkan energi listrik sekitar 268.268 kWh (268,268 MWh) selama ME beroperasi 469 jam. Hubungan

satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 3. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

Daya DIG rata – rata saat operasi running hours 70% = 440

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = DIG\ 1 + DIG\ 2 + DIG\ 3 = \text{total RH jam}$$

Bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.330 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.330$$

$$E_{DIG,Bulan} = 409.640 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 3, DIG menghasilkan energi sebesar 409.640 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO2.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO2. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.4 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 4

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 4 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 4 sebesar 429 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 429 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 429$$

$$E_{ORC,Bulan} = 245,388$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 4 menghasilkan energi listrik sekitar 245.388 kWh (245,388 MWh) selama ME beroperasi 429 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 4. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

$$\text{Daya DIG rata – rata saat operasi running hours } 70\% = 440$$

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = \text{DIG 1} + \text{DIG 2} + \text{DIG 3} = \text{total RH jam}$$

Bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.279 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.279$$

$$E_{DIG,Bulan} = 393.932 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 4, DIG menghasilkan energi sebesar 392.932 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO2.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO2. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.5 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 5

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 5 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 5 sebesar 423 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 423 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 423$$

$$E_{ORC,Bulan} = 241,956$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 5 menghasilkan energi listrik sekitar 241.956 kWh (241,956 MWh) selama ME beroperasi 423 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 5. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui penderhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

Daya DIG rata – rata saat operasi running hours 70% = 440

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = DIG 1 + DIG 2 + DIG 3 = \text{total RH jam}$$

Bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.342 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.342$$

$$E_{DIG,Bulan} = 413.336 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukan bahwa selama bulan ke 5, DIG menghasilkan energi sebesar 413.336 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO2.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO2. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.6 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 6

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 6 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 6 sebesar 444 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 444 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 444$$

$$E_{ORC,Bulan} = 253,968$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 6 menghasilkan energi listrik sekitar 253.968 kWh (253,968 MWh) selama ME beroperasi 444 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 6. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui penderhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

$$\text{Daya DIG rata – rata saat operasi running hours } 70\% = 440$$

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = \text{DIG 1} + \text{DIG 2} + \text{DIG 3} = \text{total RH jam}$$

Bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.094 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.094$$

$$E_{DIG,Bulan} = 336.952 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 6, DIG menghasilkan energi sebesar 336.952 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO<sub>2</sub>.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.7 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 7

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 7 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 7 sebesar 430 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 430 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 430$$

$$E_{ORC,Bulan} = 245,960$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 7 menghasilkan energi listrik sekitar 245.960 kWh (245,960 MWh) selama ME beroperasi 430 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 7. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

Daya DIG rata – rata saat operasi running hours 70% = 440

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = DIG 1 + DIG 2 + DIG 3 = \text{total RH jam}$$

Bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.185 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.185$$

$$E_{DIG,Bulan} = 364.980 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 7, DIG menghasilkan energi sebesar 364.980 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO2.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO2. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.8 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 8

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 8 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 8 sebesar 480 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 480 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 480$$

$$E_{ORC,Bulan} = 274,560$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 8 menghasilkan energi listrik sekitar 274.560 kWh (274,560 MWh) selama ME beroperasi 480 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 8. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

Daya DIG rata – rata saat operasi running hours 70% = 440

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = DIG 1 + DIG 2 + DIG 3 = \text{total RH jam}$$

Bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.046 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.046$$

$$E_{DIG,Bulan} = 322.168 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 8, DIG menghasilkan energi sebesar 322.168 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO2.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO2. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.9 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan ke 9

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 9 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan

hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan januari sebesar 434 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 434 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 434$$

$$E_{ORC,Bulan} = 248,248$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 9 menghasilkan energi listrik sekitar 248.248 kWh (248,248 MWh) selama ME beroperasi 434 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 9. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

Daya DIG rata – rata saat operasi running hours 70% = 440

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = DIG 1 + DIG 2 + DIG 3 = \text{total RH jam}$$

Maka bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 987 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 987$$

$$E_{DIG,Bulan} = 303.996 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 9, DIG menghasilkan energi sebesar 303.996 kWh yang akan digunakan untuk perbandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO2.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO2. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.10 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan Ke 10

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 10 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 10 sebesar 326 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 326 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 326$$

$$E_{ORC,Bulan} = 186,472$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 10 menghasilkan energi listrik sekitar 186.472 kWh (186,472 MWh) selama ME beroperasi 326 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 10. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

$$\text{Daya DIG rata – rata saat operasi running hours } 70\% = 440$$

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = \text{DIG 1} + \text{DIG 2} + \text{DIG 3} = \text{total RH jam}$$

Maka bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 947 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 947$$

$$E_{DIG,Bulan} = 291.676 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 10, DIG menghasilkan energi sebesar 291.676 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO2.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO2. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.11 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan Ke 11

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 11 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 11 sebesar 376 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 376 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 376$$

$$E_{ORC,Bulan} = 215,072$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 11 menghasilkan energi listrik sekitar 215.072 kWh (215,072 MWh) selama ME beroperasi 376 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 11. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

$$\text{Daya DIG rata – rata saat operasi running hours } 70\% = 440$$

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = DIG\ 1 + DIG\ 2 + DIG\ 3 = \text{total RH jam}$$

Maka bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.054 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.054$$

$$E_{DIG,Bulan} = 324.632 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 11, DIG menghasilkan energi sebesar 324.632 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO<sub>2</sub>.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama.

#### 4.7.12 Perhitungan PV Power Energi listrik WHR – ORC Bulan Ke 12

Energi listrik daya yang dapat dihasilkan sistem WHR - ORC PV pada bulan ke 12 dihitung berdasarkan durasi operasi Main Engine selama satu bulan (Running Hours). Karena pada pendekatan sederhana ini daya keluaran ORC diasumsikan konstan saat Main Engine running. Maka energi listrik bulanan dapat dihitung menggunakan hubungan dasar yaitu energi = daya X waktu operasi. Dimana akan menggunakan data running hours bulan ke 12 sebesar 511 jam.

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

Dimana :

$$P_{ORC} = 572 \text{ kW}$$

$$RH_{ME,Bulan} = 511 \text{ jam}$$

Maka dari data diatas dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$E_{ORC,Bulan} = 572 \times 511$$

$$E_{ORC,Bulan} = 292,292$$

Dengan demikian, sistem WHR – ORC pada bulan ke 12 menghasilkan energi listrik sekitar 292.292 kWh (292,292 MWh) selama ME beroperasi 511 jam. Hubungan satuan Kwh sebagai hasil perkalian kW dan jam (Hours) mengikuti konsep dasar bahwa energi listrik merupakan akumulasi daya terhadap waktu.

WHR – ORC juga menghitung energi DIG baseline ORC dalam operasi beban (70%) selama bulan ke 12. Ini digunakan dengan rumus yang sama dengan perhitungan energi ORC sebelumnya melalui pensederhanaan energi sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

Dimana :

Daya DIG rata – rata saat operasi running hours 70% = 440

$$P_{DIG,AVG} = 0,7 \times 440 = 308 \text{ Kw}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = DIG 1 + DIG 2 + DIG 3 = \text{total RH jam}$$

Maka bisa diketahui :

$$P_{DIG,AVG} = 308 \text{ kW}$$

$$RH_{DIG,Total,Bulan} = 1.103 \text{ jam}$$

WHR – ORC DIG baseline load 70% dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{DIG,Bulan} = P_{DIG,AVG} \times RH_{DIG,Total,Bulan}$$

$$E_{DIG,Bulan} = 308 \times 1.103$$

$$E_{DIG,Bulan} = 339.724 \text{ kWh}$$

Hasil menunjukkan bahwa selama bulan ke 12, DIG menghasilkan energi sebesar 339.724 kWh yang akan digunakan untuk pembandingan dengan energi yang dihasilkan oleh sistem WHR – ORC untuk penghematan energi dan pengurangan emisi CO<sub>2</sub>.

Hasil diatas digunakan untuk mendapatkan nilai baseline energi DIG yang dapat digantikan oleh sistem WHR – ORC, dengan tujuan untuk menghitung potensi pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>. Energi ini akan dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh WHR – ORC yang menggunakan panas gas buang dari mesin utama..

#### 4.8 Perhitungan penghematan Fuel, CO<sub>2</sub> Dan Efisiensi Reduksi Emisi

Pada sub-bab ini akan menghitung Energi DIG yang bisa tergantikan (offset) pada ORC, penghematan fuel dan Co<sub>2</sub>, serta efisiensi reduksi emisi terhadap baseline DIG. Data yang dipakai adalah perhitungan dari Daya power energi WHR – ORC yang ada diatas subbab ini. Untuk pembahasan ini kita mulai dengan data Energi DIG yang bisa tergantikan (offset) antara lain :

$$E_{Offset,Bulan} = \min (E_{ORC,Bulan}, E_{DG,Bulan})$$

Dimulai dari bulan ke 1– 13 antara lain :

Tabel 4. 3 Offset Tergantikan 70% WHR

$E_{Offset, Januari\ 2025} = \min (295.724, 320.936) = 295.724\ KWh$
$E_{Offset, Februari\ 2025} = \min (211.068, 318,780) = 211.068\ KWh$
$E_{Offset, Maret\ 2025} = \min (268.268, 409.640) = 268.268\ KWh$
$E_{Offset, April\ 2025} = \min (245.388, 393.932) = 245.388\ KWh$
$E_{Offset, Mei\ 2025} = \min (241.956, 413.336) = 241.956\ KWh$
$E_{Offset, Juni\ 2025} = \min (253.968, 336.952) = 253.968\ KWh$
$E_{Offset, Juli\ 2025} = \min (245.960, 346.980) = 245.960\ KWh$
$E_{Offset, Agustus\ 2025} = \min (274.560, 322.168) = 274.560\ KWh$
$E_{Offset, September\ 2025} = \min (248.248, 303.996) = 248.248\ KWh$
$E_{Offset, Oktober\ 2025} = \min (186.472, 291.676) = 186.472\ KWh$
$E_{Offset, November\ 2025} = \min (215.072, 324.632) = 215.072\ KWh$
$E_{Offset, Desember\ 2025} = \min (292.292, 339.724) = 292.292\ KWh$
$E_{Offset, Januari\ 2026} = \min (235.092, 302.1480) = 235.092\ KWh$

Maka selanjutnya akan pembahasan mengenai Perhitungan penghematan fuel, Co2 serta perhitungan efisiensi reduksi emisi terhadap baseline DIG.

Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO2 dan efisiensi reduksi dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

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

Dimana :

$E_{Offset, Bulan}$  = Energi yang bisa tergantikan oleh WHR - ORC

$SFC_{AE}$  = 205 g/kWh = 0,205 kg/kWh

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

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

Dimana :

$FUEL_{Save, Bulan}$  = hasil dari hemat bahan bakar perbulan

$CF$  = 3.114 kgCO<sub>2</sub>/kg Fuel

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_2Save,Bulan}{CO_2DG,Baseline,Bulan} \times 100\%$$

Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  persentasenya ekuivalen dengan  $\frac{E_{offset}}{EDG}$

#### 4.8.1 Perhitungan Hemat Fuel, CO<sub>2</sub> Dan Reduksi Emisi Bulan ke 1

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO<sub>2</sub> dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

##### 1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)

Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 211.068 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 298.724 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 60,623,42 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 1 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 60.623,42 kg (60,62 ton)

##### 2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)

Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

$$CO_{2Save,Bulan} = FUEL_{Save,Bulan} \times CF$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 60.632,42 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 60.623,42 \times 3.114$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 188,781 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan januari 2025 sebesar ± 188,781 ton CO<sub>2</sub>

##### 3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)

Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_{2Save,Bulan}}{CO_{2DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 188,781 \text{ ton}$$

$$CO_{2DG,Baseline,Bulan} = 204,876$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{188,781}{204,876} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 92,14\%$$

Maknanya, pada bulan ke 1 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar  $\pm 92,14\%$  dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  persentasenya ekuivalen dengan  $\frac{E_{offset}}{EDG}$

#### 4.8.2 Perhitungan Hemat Fuel, CO<sub>2</sub> Dan Reduksi Emisi Bulan ke 2

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO<sub>2</sub> dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

##### 1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)

Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 211.068 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 211.068 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 43,268,94 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 2 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 43.268,94 kg (43,27 ton)

##### 2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)

Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

$$CO_{2Save,Bulan} = FUEL_{Save,Bulan} \times CF$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 43.268,94 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 43.268,94 \times 3.114$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 134,739 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 2 sebesar  $\pm 134,739$  ton  $CO_2$

3. Penghematan Emisi  $CO_2$  ( $CO_2$  Save)  
Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan  $CO_2$  terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_{2Save,Bulan}}{CO_{2DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 134,739 \text{ ton}$$

$$CO_{2DG,Baseline,Bulan} = 203,500$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{134,739}{203,500} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 66,21\%$$

Maknanya, pada bulan ke 2 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar  $\pm 66,21\%$  dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  presentasinya ekuivalen dengan  $\frac{E_{offset}}{EDG}$

#### 4.8.3 Perhitungan Hemat Fuel, $CO_2$ Dan Reduksi Emisi Bulan ke 3

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel,  $CO_2$  dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 268.268 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 268.268 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 54,994,94 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 3 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 54.994,94 kg (55,00 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
 Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

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

Dimana :

$$CO2_{Save,Bulan} = 54.994,94 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO2_{Save,Bulan} = 54.994,94 \times 3.114$$

$$CO2_{Save,Bulan} = 171,254 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 3 sebesar ± 171,254 ton CO<sub>2</sub>

3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
 Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO2} = \frac{CO2_{Save,Bulan}}{CO2_{DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO2_{Save,Bulan} = 171,254 \text{ ton}$$

$$CO2_{DG,Baseline,Bulan} = 261,502$$

$$\%REDUKSI_{CO2} = \frac{171,254}{261,502} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO2} = 65,49\%$$

Maknanya, pada bulan ke 3 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar ± 65,49% dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO2_{DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  presentasinya ekuivalen dengan  $\frac{E_{offset}}{E_{DG}}$

#### 4.8.4 Perhitungan Hemat Fuel,CO2 Dan Reduksi Emisi Bulan ke 4

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO2 dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil

kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 245.388 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 245.388 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 50,099,54 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 4 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 50.099,54 kg (51,00 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

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

Dimana :

$$CO2_{Save,Bulan} = 50.099,54 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO2_{Save,Bulan} = 50.099,54 \times 3.114$$

$$CO2_{Save,Bulan} = 156,648 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 4 sebesar ± 156,648 ton CO<sub>2</sub>

3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO2} = \frac{CO2_{Save,Bulan}}{CO2_{DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO2_{Save,Bulan} = 156,648 \text{ ton}$$

$$CO2_{DG,Baseline,Bulan} = 251,471$$

$$\%REDUKSI_{CO2} = \frac{156,648}{251,471} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 62,29\%$$

Maknanya, pada bulan ke 4 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar  $\pm 62,29\%$  dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  presentasinya ekuivalen dengan  $\frac{E_{offset}}{EDG}$

#### 4.8.5 Perhitungan Hemat Fuel, CO2 Dan Reduksi Emisi Bulan ke 5

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO2 dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 241.956 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 241.956 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 49,600,98 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 5 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 49.600,98 kg (49,60 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

$$CO_{2Save,Bulan} = FUEL_{Save,Bulan} \times CF$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 49.600,98 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 49.600,98 \times 3.114$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 154,457 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 5 sebesar  $\pm 154,457$  ton CO<sub>2</sub>

3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)

Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_{2Save,Bulan}}{CO_{2DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 154,457 \text{ ton}$$

$$CO_{2DG,Baseline,Bulan} = 263,830$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{154,457}{263,830} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 58,54\%$$

Maknanya, pada bulan ke 5 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar ± 58,54% dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  presentasinya ekuivalen dengan  $\frac{E_{Offset}}{EDG}$

#### 4.8.6 Perhitungan Hemat Fuel,CO2 Dan Reduksi Emisi Bulan ke 6

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO<sub>2</sub> dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 253.968 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 253.968 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 52,063,44 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 6 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 52.063,44 kg (52,00 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

$$CO_{2,Save,Bulan} = FUEL_{Save,Bulan} \times CF$$

Dimana :

$$CO_{2,Save,Bulan} = 52.063,44 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO_{2,Save,Bulan} = 52.063,44 \times 3.114$$

$$CO_{2,Save,Bulan} = 162,126 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 6 sebesar  $\pm 162,126$  ton  $CO_2$

3. Penghematan Emisi  $CO_2$  ( $CO_2$  Save)  
Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan  $CO_2$  terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_{2,Save,Bulan}}{CO_{2,DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_{2,Save,Bulan} = 162,126 \text{ ton}$$

$$CO_{2,DG,Baseline,Bulan} = 215,249$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{162,126}{215,249} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 75,37\%$$

Maknanya, pada bulan ke 6 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar  $\pm 75,37\%$  dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2,DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  presentasinya ekuivalen dengan  $\frac{Offset}{EDG}$

#### 4.8.7 Perhitungan Hemat Fuel, $CO_2$ Dan Reduksi Emisi Bulan ke 7

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel,  $CO_2$  dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 245.960 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 245.960 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 50,421,8 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 7 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 50.421,8 kg (50,42 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
 Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

$$CO_{2Save,Bulan} = FUEL_{Save,Bulan} \times CF$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 50.421,8 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 50.421,8 \times 3.114$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 157,013 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 7 sebesar ± 157,013 ton CO<sub>2</sub>

3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
 Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_{2Save,Bulan}}{CO_{2DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 157,013 \text{ ton}$$

$$CO_{2DG,Baseline,Bulan} = 233,008$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{157,013}{233,008} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 67,39\%$$

Maknanya, pada bulan ke 7 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar ± 67,39% dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  persentasenya ekuivalen dengan  $\frac{E_{offset}}{EDG}$

#### 4.8.8 Perhitungan Hemat Fuel, CO<sub>2</sub> Dan Reduksi Emisi Bulan ke 8

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO<sub>2</sub> dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset, Bulan} = 274.560 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save, Bulan} = 274.560 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save, Bulan} = 56,284,8 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 8 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 56.284,8 kg (56,30 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

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

Dimana :

$$CO2_{Save, Bulan} = 56.284,8 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO2_{Save, Bulan} = 56.284,8 \times 3.114$$

$$CO2_{Save, Bulan} = 175,271 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 8 sebesar ± 175,271 ton CO<sub>2</sub>

3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO2} = \frac{CO2_{Save, Bulan}}{CO2_{DG, Baseline, Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 175,271 \text{ ton}$$

$$CO_{2DG,Baseline,Bulan} = 205,664$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{175,271}{205,664} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 85,22\%$$

Maknanya, pada bulan ke 8 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar  $\pm 85,22\%$  dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  persentasenya ekuivalen dengan  $\frac{E_{Offset}}{EDG}$

#### 4.8.9 Perhitungan Hemat Fuel, CO2 Dan Reduksi Emisi Bulan ke 9

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO2 dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 248.248 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 248.248 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 50,890,84 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 9 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 50.890,84 kg (50,90 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

$$CO_{2Save,Bulan} = FUEL_{Save,Bulan} \times CF$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 50.890,84 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 50.890,84 \times 3.114$$

$$CO_{2,Save,Bulan} = 158,474 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 9 sebesar  $\pm 158,474$  ton  $CO_2$

3. Penghematan Emisi  $CO_2$  ( $CO_2$  Save)  
Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan  $CO_2$  terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_{2,Save,Bulan}}{CO_{2,DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_{2,Save,Bulan} = 158,474 \text{ ton}$$

$$CO_{2,DG,Baseline,Bulan} = 194,078$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{158,474}{194,078} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 81,66\%$$

Maknanya, pada bulan ke 9 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar  $\pm 81,66\%$  dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2,DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  persentasenya ekuivalen dengan  $\frac{E_{Offset}}{EDG}$

#### 4.8.10 Perhitungan Hemat Fuel, $CO_2$ Dan Reduksi Emisi Bulan Ke 10

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel,  $CO_2$  dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 186.472 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 186.472 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 38,226,76 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 10 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 38.226,76 kg (38,22 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
 Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

$$CO_{2Save,Bulan} = FUEL_{Save,Bulan} \times CF$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 38.226,76 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 38.226,76 \times 3.114$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 119,038 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 10 sebesar ± 119,038 ton CO<sub>2</sub>

3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
 Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_{2Save,Bulan}}{CO_{2DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 119,038 \text{ ton}$$

$$CO_{2DG,Baseline,Bulan} = 186,245$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{119,038}{186,245} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 63,93\%$$

Maknanya, pada bulan ke 10 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar ± 63,93% dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto E_{DG,Bulan}$  presentasinya ekuivalen dengan  $\frac{E_{offset}}{EDG}$

#### 4.8.11 Perhitungan Hemat Fuel, CO<sub>2</sub> Dan Reduksi Emisi Bulan Ke 11

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO<sub>2</sub> dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
 Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 215.072 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 215.072 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 44,089,76 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 11 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 44.089,76 kg (44,90 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

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

Dimana :

$$CO2_{Save,Bulan} = 44.089,76 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO2_{Save,Bulan} = 44.089,76 \times 3.114$$

$$CO2_{Save,Bulan} = 137,296 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 11 sebesar ± 137,296 ton CO<sub>2</sub>

3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO2} = \frac{CO2_{Save,Bulan}}{CO2_{DG,Baseline,Bulan}} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO2_{Save,Bulan} = 137,296 \text{ ton}$$

$$CO2_{DG,Baseline,Bulan} = 207,231$$

$$\%REDUKSI_{CO2} = \frac{137,296}{207,231} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO2} = 66,25\%$$

Maknanya, pada bulan ke 11 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar ± 66,25% dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá

Sosa et al., 2018). Karena  $CO_{2DG,Baseline,Bulan} \propto \frac{E_{Offset}}{EDG}$  presentasinya ekuivalen dengan

#### 4.8.12 Perhitungan Hemat Fuel, CO2 Dan Reduksi Emisi Bulan Ke 12

Pada kali ini akan berkelanjutan dari daya power WHR – ORC pada running hour Main Engine. Dengan ini perhitungan penghematan fuel, CO2 dan efisiensi reduksi. Prinsip dasarnya mengikuti konsep energi listrik bahwa energi (kWh) merupakan hasil kali daya (Kw) Dan waktu operasi (jam). Dan dihitung dengan persamaan perhitungan sebagai berikut :

1. Penghematan Bahan Bakar (Fuel Save)  
Penghematan bahan bakar diasumsikan sebanding dengan energi DIG yang dapat digantikan oleh ORC. Dengan spesifik fuel consumption (SFC) AE :

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

Dimana :

$$E_{Offset,Bulan} = 292.292 \text{ kWh}$$

$$SFC_{AE} = 205 \text{ g/kWh} = 0,205 \text{ kg/kWh}$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 292.292 \times 0,205$$

$$FUEL_{Save,Bulan} = 59,919,86 \text{ kg}$$

Artinya, selama bulan ke 12 sistem WHR – ORC berpotensi menghemat bahan bakar DIG sebesar 59.919,86 kg (59,92 ton)

2. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Penghematan CO<sub>2</sub> dihitung dari massa fuel yang dihemat dikalikan carbon conversion factor (CF). (Bauzá Sosa et al., 2018)

Pada rumus emisi dapat dihitung sebagai berikut :

$$CO_{2Save,Bulan} = FUEL_{Save,Bulan} \times CF$$

Dimana :

$$CO_{2Save,Bulan} = 59.919,86 \text{ kg}$$

$$CF = 3.114 \text{ kgCO}_2/\text{kg Fuel}$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 59.919,86 \times 3.114$$

$$CO_{2Save,Bulan} = 186,590 \text{ ton}$$

Jadi, penghematan emisi pada bulan ke 12 sebesar ± 186,590 ton CO<sub>2</sub>

3. Penghematan Emisi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Save)  
Efisiensi reduksi emisi didefinisikan sebagai perbandingan penghematan CO<sub>2</sub> terhadap baseline emisi DIG.

Pada Rumus efisiensi reduksi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{CO_2Save,Bulan}{CO_2DG,Baseline,Bulan} \times 100\%$$

Dimana :

$$CO_2Save,Bulan = 186,590 \text{ ton}$$

$$CO_2DG,Baseline,Bulan = 216,900$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = \frac{186,590}{216,900} \times 100\%$$

$$\%REDUKSI_{CO_2} = 86,04\%$$

Maknanya, pada bulan ke 12 sistem WHR – ORC mampu mengurangi emisi DIG sebesar ± 86,04% dibandingkan emisi baseline DIG pada bulan yang sama (dengan asumsi energi ORC benar-benar dimanfaatkan untuk menggantikan energi DIG) (Bauzá Sosa et al., 2018). Karena  $CO_2DG,Baseline,Bulan \propto E_{DG,Bulan}$  presentasinya ekuivalen dengan  $\frac{E_{offset}}{EDG}$

#### 4.9 Pengaruh Implementasi WHR

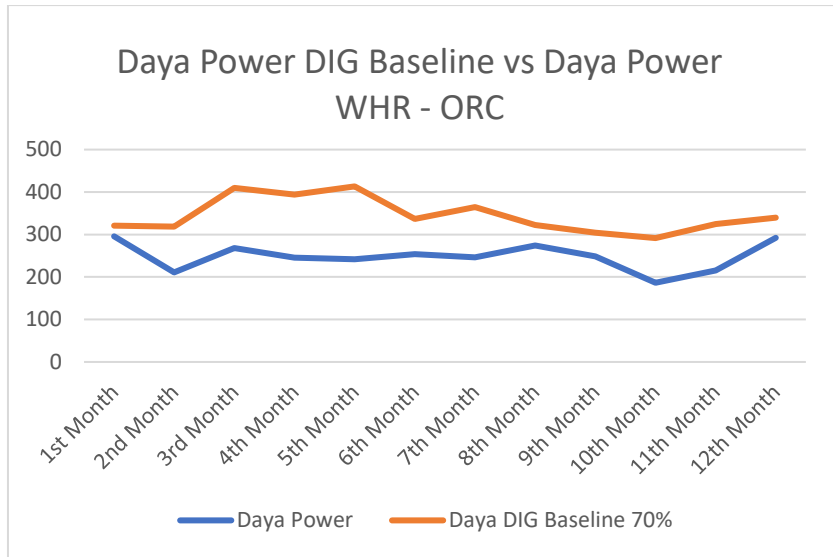
Setelah dilakukan perhitungan pada implementasi WHR – ORC ketika digunakan oleh perusahaan tersebut dengan perbedaan daya, fuel, dan emisi yang dikeluarkan serta dipertahankan, maka dapat kita hasilkan beberapa Analisa pengaruh berdasarkan perhitungan-perhitungan tersebut.

##### 4.9.1 Hasil Perbandingan Daya WHR Dan DIG 70%

Nilai hasil perbandingan daya yang dihasilkan dan 70% ketentuan MARPOL ANNEX IV mengenai Kapal Kontainer dari perhitungan diatas dapat dibubuhkan dan mendapatkan nilai daya pada bulan ke 1 sampai 12. Dapat ditunjukkan di tabel 4.4 dan gambar 4.4 dibawah ini:

Tabel 4. 4 Hasil Nilai Daya dan WHR

Bulan	Power WHR-ORC	Nilai DIG 70%
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 16	253,968	336,952
Bulan ke 17	245,960	364,980
Bulan ke 18	274,560	322,168
Bulan ke 19	248,248	303,996
Bulan ke 110	186,472	291,676
Bulan ke 111	215,072	324,632
Bulan ke 12	292,292	339,724



Gambar 4. 4 Grafik Hasil WHR Dan 70% Annex Marpol IV (Source. Pribadi)

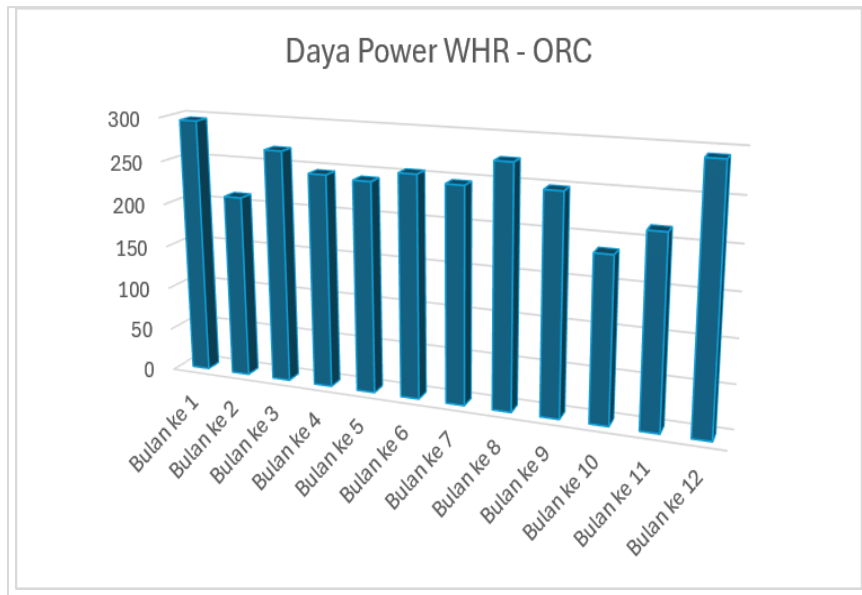
Pada grafik gambar 4.4 tersebut dapat dijelaskan pada bulan Februari, daya “WHR-ORC” melampaui “DIG Baseline 70%” dengan selisih lebih dari 100.000kWh. menunjukkan fluktuasi yang lebih besar dengan baseline, bisa menunjukkan adanya perbedaan efisiensi atau pengaruh operasional pada sistem tersebut. Nilai daya terendsh untuk “WHR-ORC” terjadi pada bulan Oktober, yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai daya pada “DIG Baseline 70%” pada bulan yang sama.

#### 4.9.2 Daya Power

Nilai hasil daya power yang dihasilkan WHR-ORC perhitungan diatas dapat dibubuhkan dan mendapatkan nilai daya pada bulan ke 1 sampai 12. Dapat ditunjukkan di tabel 4.5 dan gambar 4.5 dibawah ini:

Tabel 4. 5 Hasil Daya Power Yang Dihasilkan WHR-ORC

Bulan	Power WHR-ORC
Bulan ke 1	295,724
Bulan ke 2	211,068
Bulan ke 3	268,268
Bulan ke 4	245,388
Bulan ke 5	241,956
Bulan ke <u>16</u>	253,968
Bulan ke <u>17</u>	245,960
Bulan ke <u>18</u>	274,560
Bulan ke <u>19</u>	248,248
Bulan ke <u>110</u>	186,472
Bulan ke <u>111</u>	215,072
Bulan ke 12	292,292



Gambar 4. 5 Grafik Hasil Power Yang Dihasilkan WHR-ORC (Source. Pribadi)

Gambar grafik 4.5 di atas 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, meskipun ada penurunan pada bulan tertentu. Secara keseluruhan, reduksi energi dari sistem ORC tetap memberikan kontribusi signifikan sepanjang tahun. Penurunan pada bulan 10 dapat menjadi indikator untuk melakukan analisis lebih lanjut guna mengetahui ke depannya dan mengambil langkah perbaikan. WHR sangat memengaruhi daya yang akan digunakan tersebut dan nantinya akan membuat nilai terbaik pada waktu pengurangan bahan bakar dan emisi. Ini dapat membantu diesel generator mengurangi emisi dan bahan bakar.

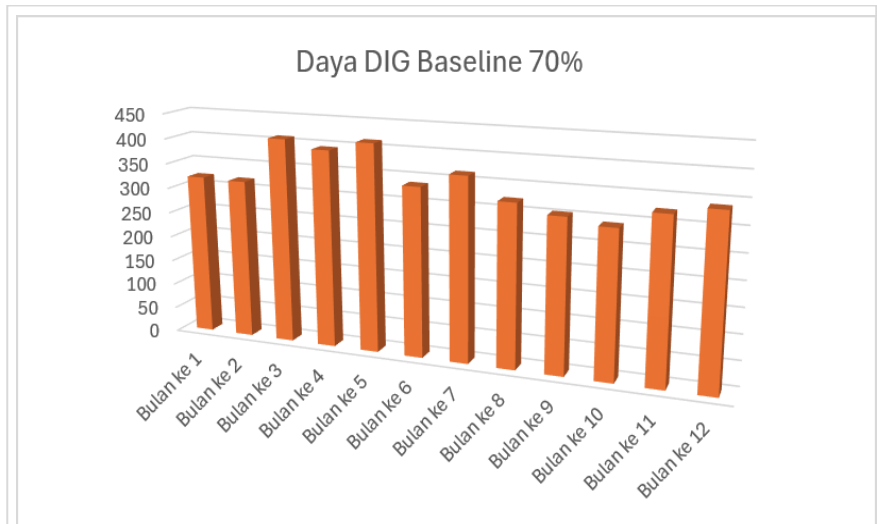
#### 4.9.3 Daya Energi 70% Kontainer Marpol Annex VI

Nilai hasil daya 70% energi yang dihasilkan WHR-ORC pada perhitungan di atas dapat dibubuhkan dan mendapatkan nilai daya pada bulan ke-1 sampai ke-12. Dapat ditunjukkan di tabel 4.6 dan gambar 4.6 dibawah ini:

Tabel 4. 6 Hasil DIG 70%

Bulan	Nilai DIG 70%
Bulan ke 1	320,936
Bulan ke 2	318,780
Bulan ke 3	409,640
Bulan ke 4	393,932
Bulan ke 5	413,336

Bulan ke <u>16</u>	336,952
Bulan ke <u>17</u>	364,980
Bulan ke <u>18</u>	322,168
Bulan ke <u>19</u>	303,996
Bulan ke <u>110</u>	291,676
Bulan ke <u>111</u>	324,632
Bulan ke 12	339,724



Gambar 4. 6 Grafik DIG 70% (Source. Pribadi)

Gambar grafik 4.6 di atas menunjukkan fluktuasi energi listrik DIG 70% selama 12 bulan. Puncak konsumsi tertinggi terjadi pada bulan ke-3 (409.640 kWh), sementara penurunan signifikan terjadi 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 bagi efisiensi dan perencanaan energi ke depan.

#### 4.9.4 Energi Tergantikan ORC – DIG

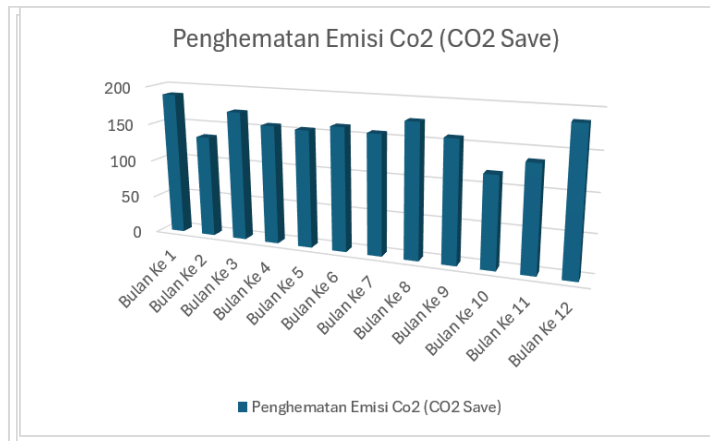
Gambar grafik 4.6 di atas menunjukkan energi yang tergantikan oleh teknologi ORC (Organic Rankine Cycle) dibandingkan dengan konsumsi energi DIG 70% per bulan dari bulan ke-1 hingga bulan ke-12. Lonjakan tinggi pada bulan ke-1 dan bulan ke-8 menunjukkan bahwa pada bulan-bulan tersebut terjadi efisiensi energi yang lebih tinggi, mengindikasikan mungkin adanya pengoptimalan penggunaan ORC pada periode tersebut.

#### 4.9.5 Penghematan Emisi CO<sub>2</sub>

Nilai hasil emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan WHR-ORC pada perhitungan di atas dapat dibubuhkan dan mendapatkan nilai daya pada bulan ke-1 sampai ke-12. Dapat ditunjukkan di tabel 4.7 dan gambar 4.7 dibawah ini:

Tabel 4. 7 Hasil Penghematan Fuel (Bahan Bakar)

Bulan	Penghematan Emisi CO <sub>2</sub>
Bulan ke 1	188,781
Bulan ke 2	134,739
Bulan ke 3	171,254
Bulan ke 4	156,648
Bulan ke 5	154,547
Bulan ke 6	162,126
Bulan ke 7	157,013
Bulan ke 8	175,271
Bulan ke 9	158,474
Bulan ke 10	119,038
Bulan ke 11	137,296
Bulan ke 12	186,296



Gambar 4. 7 Grafik Penghematan Bahan Bakar. (Source. Pribadi)

Pada Grafik 4.7 menunjukkan jumlah emisi CO<sub>2</sub> 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 dalam mengurangi jejak karbon operasional pada periode tersebut.

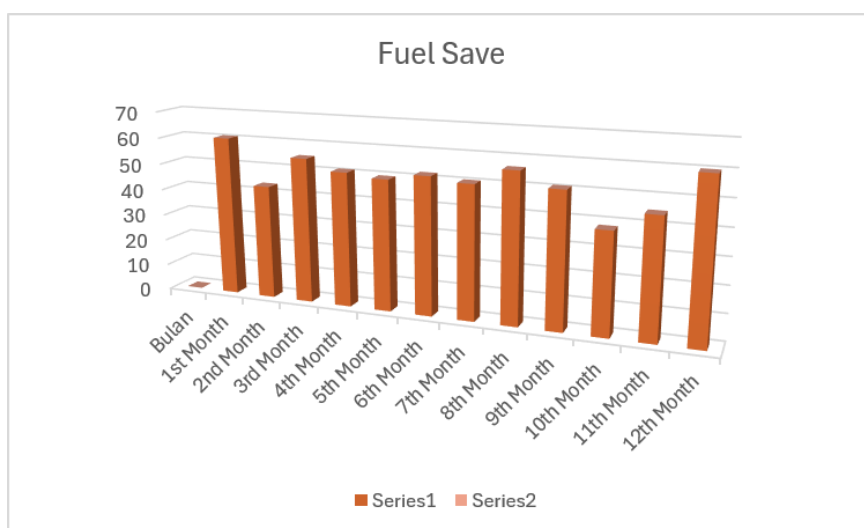
#### 4.9.6 Penghematan Fuel Save

Nilai hasil penghematan bahan bakar yang dihasilkan WHR-ORC pada perhitungan di atas dapat dibubuhkan untuk memperoleh nilai daya pada bulan ke-1 sampai ke-12. Dapat ditunjukkan di tabel 4.8 dan gambar 4.8 dibawah ini:

Tabel 4. 8 Hasil Penghematan Bahan Bakar.

Bulan	Penghematan Bahan Bakar
Bulan ke 1	188,781
Bulan ke 2	134,739

Bulan ke 3	171,254
Bulan ke 4	156,648
Bulan ke 5	154,547
Bulan ke 6	162,126
Bulan ke 7	157,013
Bulan ke 8	175,271
Bulan ke 9	158,474
Bulan ke 10	119,038
Bulan ke 11	137,296
Bulan ke 12	186,296



Gambar 4. 8 Grafik Penghematan Bahan Bakar. (Source. Pribadi)

Grafik 4.8 menjadi **bukti empiris** bahwa sistem WHR-ORC sangat efektif dalam memperbaiki nilai indeks EEXI kapal. Secara konseptual, formulasi EEXI IMO dihitung berdasarkan rasio total emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan terhadap kapasitas angkut dan kecepatan kapal. Melalui pemanfaatan gas buang mesin induk, sistem WHR-ORC mampu menyuplai daya listrik konstan secara mandiri, yang secara langsung memotong (*offset*) beban kerja dan konsumsi bahan bakar *Auxiliary Engine* (Diesel Generator) hingga mencapai titik penghematan tertinggi sebesar 188,781 unit di bulan ke-1.

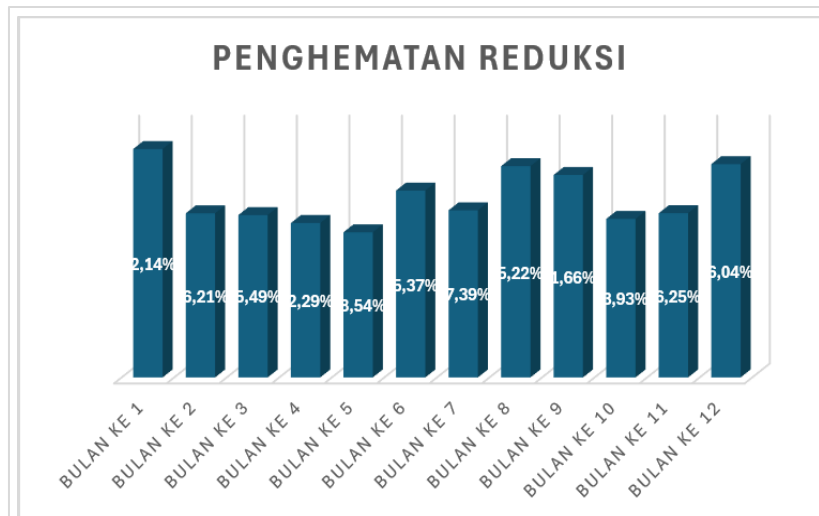
Penurunan konsumsi bahan bakar generator yang konsisten di setiap bulan ini secara otomatis mereduksi total emisi karbon CO<sub>2</sub> yang masuk ke dalam pembilang rumus EEXI. Oleh karena itu, investasi teknologi retrofit WHR-ORC ini secara matematis dan teknis terbukti mampu menekan nilai *Attained EEXI* MV Ever Obey menjadi jauh lebih rendah (lebih efisien), menjadikannya solusi paling praktis untuk meloloskan kapal eksisting dari jerat regulasi lingkungan internasional IMO MARPOL Annex VI.

#### 4.9.6 Penghematan Reduksi CO<sub>2</sub>

Nilai hasil reduksi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan WHR-ORC pada perhitungan di atas dapat dibubuhkan dan mendapatkan nilai daya pada bulan ke-1 sampai ke-12. Dapat ditunjukkan di tabel dan gambar dibawah ini:

Tabel 4. 9 Hasil Penghematan Reduksi.

Bulan	Penghematan Emisi CO <sub>2</sub>
Bulan ke 1	92,14%
Bulan ke 2	66,21%
Bulan ke 3	65,49%
Bulan ke 4	62,29%
Bulan ke 5	58,54%
Bulan ke 6	75,37%
Bulan ke 7	67,39%
Bulan ke 8	85,22%
Bulan ke 9	81,66%
Bulan ke 10	63,93%
Bulan ke 11	66,25%
Bulan ke 12	86,04%



Gambar 4. 9 Grafik Reduksi.(Source. Pribadi)

Gambar 4.9 menunjukkan penurunan pengurangan reduksi CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>, cenderung mengikuti pola yang sama dengan energi di-offset (tergantikan),

dengan beberapa bulan mengalami penurunan efisiensi yang signifikan. Maka ini sangat bagus dan mumpuni untuk kapal agar bisa mengurangi emisi.

#### 4.10 Pembagian Beban Kelistrikan Yang Akan Disuplai WHR – ORC Pada Kapal

Berdasarkan daya WHR – ORC yang sudah dihitung per bulannya pada kapal kontainer 27.025 GT. Di mana didapatkan besaran daya yang dihasilkan per bulannya dalam setahun pada bulan yang berbeda. Dengan ini, daya yang dihasilkan oleh WHR – ORC dapat dibagikan dan disuplai sebagai pembantu diesel generator (DIG). Menggunakan perhitungan, didapatkan pada subbab sebelumnya bahwa daya paling tinggi pada bulan Desember. Dari total daya yang dapat dihasilkan selama 511 jam dibulan tersebut bisa disuplai pada kapal. Berdasarkan data diatas yang sudah dihitung, total beban yang akan dialokasikan untuk disuplai adalah

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

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

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

Ini menunjukkan bahwa beban 518,47 kWh tidak menjadi batas kapasitas ORC, namun tetap berguna menjadi pembuktian bahwa beban – beban tertentu dapat dipindahkan dari Diesel Generator AE (DIG) KE ORC selama ORC menyala (Online).

##### 4.10.1 Beban Suplai

Detail daya yang dihasilkan tersebut akan digunakan untuk menyuplai beban kelistrikan yang ada pada kapal. Detail beban yang bisa disuplai dengan total daya tersebut disebutkan dalam tabel 4.10 sebagai berikut:

Tabel 4. 10 Hasil Beban Yang Akan Di Suplai

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	5.1
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>

Dengan pembagian daya ini, sistem WHR – ORC dapat menyuplai semua beban kapal sesuai dengan kebutuhan masing-masing peralatan. Sehingga mengurangi ketergantungan pada (Diesel Generator) AE.

#### 4.11 Perhitungan EEXI Baru

Perhitungan paling akhir, di mana setelah dilakukan perhitungan dan pemilihan sistem WHR – ORC pada kapal kontainer 27.025 GT, 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 penerapan sistem WHR – ORC tersebut terhadap kapal. Dimana EEXI dapat dihitung dengan rumus berikut :

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

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

Dimana rumus diatas dapat disederhanakan sebagai berikut :

$$EEXI_{BARU} = \frac{(PME \times SFCME \times CF) + (PAE \times PAE0, Bulan) \times SFCAE \times CF}{Capacity \times V_{ref}}$$

##### 4.11.1 EEXI Baru ke 1

Pada bulan ke 1 total daya DIG/AE sebesar 283,804 kW maka daya AE remain yang diperlukan 24,196 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$EEXI_{BARU} = \frac{(PME \times SFCME \times CF) + (PAE \times PAE0, Bulan) \times SFCAE \times CF}{Capacity \times V_{ref}}$$

$$EEXI_{BARU} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 283,804) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

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

Didapatkan pada bulan ke 1 sebesar 6.230 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 1 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 1 2025 sebagai berikut :

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

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

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

#### 4.11.2 EEXI Baru ke 2

Pada bulan ke 2 total daya DIG/AE sebesar 203,930 kW maka daya AE remain yang diperlukan 104,070 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 203.930) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = 6.306 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 2 sebesar 6.306 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 2 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 2 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.306}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 17.27\%$$

#### 4.11.3 EEXI Baru ke 3

Pada bulan ke 3 total daya AE sebesar 201,705 kW maka daya AE remain yang diperlukan 106,295 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 201.705) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = 6.308 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 3 sebesar 6.308 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 3 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 3 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.308}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 17.24\%$$

#### 4.11.4 EEXI Baru ke 4

Pada bulan ke-4, total daya AE sebesar 191,859 kW, maka daya AE remaining yang diperlukan adalah 104,070 kW. Maka didapatrkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$EEXI_{BARU} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 191,859) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$EEXI_{BARU} = 6.318 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 4 sebesar 6.306 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 4 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 4 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.318}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 17.11\%$$

#### 4.11.5 EEXI Baru ke 5

Pada bulan ke 4 total daya AE sebesar 180,295 kW maka daya AE remain yang diperlukan 127,705 kW. Maka didapatrkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$EEXI_{BARU} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 180,295) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$EEXI_{BARU} = 6.329 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 5 sebesar 6.329 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 5 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 5 2025 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.329}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 16.96\%$$

#### 4.11.6 EEXI Baru ke 6

Pada bulan ke 6 total daya AE sebesar 232,146 kW maka daya AE remain yang diperlukan 75,854 kW. Maka didapatrkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$EEXI_{BARU} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 232,146) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$EEXI_{BARU} = 6.279 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 6 sebesar 6.279 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 6 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 6 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.279}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 17.62\%$$

#### 4.11.7 EEXI Baru ke 7

Pada bulan ke 7 total daya AE sebesar 207,561 kW maka daya AE remain yang diperlukan 100,439 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 207,561) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = 6.303 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 7 sebesar 6.303 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 7 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 7 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.303}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 17.31\%$$

#### 4.11.8 EEXI Baru ke 8

Pada bulan ke 8 total daya AE sebesar 262,486 kW maka daya AE remain yang diperlukan 45,514 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 262,486) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = 6.250 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 8 sebesar 6.250 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 8 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 8 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.250}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 18.00\%$$

#### 4.11.9 EEXI Baru ke 9

Pada bulan ke 9 total daya AE sebesar 251,518 kW maka daya AE remain yang diperlukan 56,482 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 251,518) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = 6.261 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 9 sebesar 6.261 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 1 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan September 2025 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.261}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 17.86\%$$

#### 4.11.10 EEXI Baru ke 10

Pada bulan ke 10 total daya AE sebesar 196,908 kW maka daya AE remaun yang diperlukan 111,092 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 196,908) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$\text{EEXI}_{\text{BARU}} = 6.313 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 10 sebesar 6.313 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 1 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 10 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.313}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 17.17\%$$

#### 4.11.11 EEXI Baru ke 11

Pada bulan ke 11 total daya AE sebesar 204,053 kW maka daya AE remaun yang diperlukan 103,947 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$EEXI_{BARU} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 203,070) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$EEXI_{BARU} = 6.306 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 11 sebesar 6.306 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 1 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 11 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.306}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 17.27\%$$

#### 4.11.12 EEXI Baru ke 12

Pada bulan ke 12 total daya AE sebesar 264,997 kW maka daya AE remain yang diperlukan 43,003 kW. Maka didapatkan nilai EEXI terbaru dengan rumus diatas sebagai berikut :

$$EEXI_{BARU} = \frac{(7.959 \times 168 \times 3.114) + (308 \times 264,997) \times 205 \times 3.114}{33.541 \times 20}$$

$$EEXI_{BARU} = 6.248 \text{ g-CO}_2/\text{t-mile}$$

Didapatkan pada bulan ke 12 sebesar 6.248 g-CO<sub>2</sub>/t-mile dimana penggunaan sistem WHR – ORC pada bulan ke 1 berpengaruh terhadap penurunan nilai EEXI yang mana EEXI sebelum pemasangan WHR – ORC sebesar 7.622 g-CO<sub>2</sub>/t-mile yang berarti efektivitas sistem WHR – ORC pada bulan ke 12 sebagai berikut :

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

$$\text{Effisiensi} = \frac{7.622 - 6.248}{7.622} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 18.03\%$$

Tabel 4. 11 Nilai Attained dan Effisiensi Setelah diperlakukan Percobaan WHR-ORC

Month	Attained EEXI g-CO <sub>2</sub> /t-mile	Effisiensi EEXI Baru
Bulan ke 1	6.230 g-CO <sub>2</sub> /t-mile	18.26%
Bulan ke 2	6.306 g-CO <sub>2</sub> /t-mile	17.27%
Bulan ke 3	6.308 g-CO <sub>2</sub> /t-mile	17.24%
Bulan ke 4	6.318 g-CO <sub>2</sub> /t-mile	17.11%
Bulan ke 5	6.329 g-CO <sub>2</sub> /t-mile	16.96%
Bulan ke 6	6.279 g-CO <sub>2</sub> /t-mile	17.62%
Bulan ke 7	6.303 g-CO <sub>2</sub> /t-mile	17.31%

Bulan ke 8	6.250 g-CO2/t-mile	18.00%
Bulan ke 9	6.261 g-CO2/t-mile	17.86%
Bulan ke 10	6.313 g-CO2/t-mile	17.17%
Bulan ke 11	6.306 g-CO2/t-mile	17.27%
Bulan ke 12	6.248 g-CO2/t-mile	18.03%

Terlihat tabel diatas 4.12, di mana 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 penurunan paling kecil pada bulan ke-4. Maka dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik dengan kenaikan dan penurunan Attained baru dan EEXI baru tersebut yang terpublik di Tabel 33 di atas.

#### 4.12 EEXI Baru Rata - Rata

Setelah dilakukannya perhitungan EEXI baru, akhirnya telah didapatkan perhitungan yang bervariasi dengan nilai berbeda-beda setiap bulannya. Dari nilai yang telah didapatkan tersebut, dapat dilakukan perhitungan untuk nilai rata-rata dari EEXI setelah dilakukan implementasi sistem waste heat recovery dengan perhitungan di bawah ini.

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

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

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

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