

## Evaluasi Pemilihan Refrigeran Ramah Lingkungan untuk Sistem Pemanfaatan Panas Buang Mesin Diesel

Nyayu Aisyah<sup>1</sup>, Hifni Mukhtar Ariyadi<sup>2</sup>, Ilham Ayu Putri Pratiwi<sup>1</sup>, dan Sugiyanto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada,  
Jl. Yacaranda, Sekip Unit IV, Yogyakarta 55281

<sup>2</sup> Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,  
Jl. Grafika No.2, Yogyakarta, 55281

\*E-mail: sugiyanto\_t@ugm.ac.id

Diajukan: 26-07-2024; Diterima: 24-08-2024; Diterbitkan: 31-08-2024

### Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi pemilihan refrigeran untuk sistem pemanfaatan panas buang mesin diesel dengan siklus *Organic Rankine Cycle* (ORC). Pemilihan refrigeran yang tepat merupakan faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi sistem ORC, mengurangi dampak lingkungan, dan memastikan keselamatan operasi. Dalam penelitian ini, beberapa refrigeran dievaluasi berdasarkan sifat termofisika dan aspek keselamatan untuk menganalisis *Total Equivalent Warming Impact* (TEWI) dan performa sistem dari masing-masing refrigeran. Performa sistem ORC dievaluasi melalui pemodelan termodinamika secara matematis menggunakan MATLAB. Hasil simulasi menunjukkan bahwa keempat refrigeran memiliki efisiensi termal yang cukup tinggi, namun dengan nilai TEWI yang bervariasi. R600a memiliki nilai total TEWI terendah, yaitu 264.59 kgCO<sub>2</sub>eq/tahun, sedangkan R134a memiliki nilai total TEWI tertinggi, yaitu 4436.96 kgCO<sub>2</sub>eq/tahun. Berdasarkan hasil evaluasi, R600a merupakan refrigeran terbaik untuk digunakan dalam sistem pemanfaatan panas buang mesin diesel dengan siklus ORC, dengan mempertimbangkan efisiensi termal, aspek keselamatan, dan dampak lingkungan.

**Kata kunci:** refrigeran; panas buang; ORC; TEWI; lingkungan.

### Abstract

*This study evaluates the selection of refrigerants for a diesel engine waste heat recovery system using the Organic Rankine Cycle (ORC). Selecting the appropriate refrigerant is a key factor in improving the efficiency of the ORC system, reducing environmental impact, and ensuring operational safety. In this study, several refrigerants were evaluated based on their thermophysical properties and safety aspects to analyze the Total Equivalent Warming Impact (TEWI) and system performance of each refrigerant. The performance of the ORC system was evaluated through thermodynamic modeling using MATLAB. Simulation results indicated that all four refrigerants have relatively high thermal efficiency but vary significantly in their TEWI values. R600a exhibited the lowest total TEWI at 264.59 kgCO<sub>2</sub>eq/year, while R134a had the highest total TEWI at 4436.96 kgCO<sub>2</sub>eq/year. Based on the evaluation results, R600a was identified as the best refrigerant for use in the diesel engine waste heat recovery ORC system, considering thermal efficiency, safety aspects, and environmental impact.*

**Keywords:** refrigerants; waste heat; ORC; TEWI; environmental impact.

### 1. Pendahuluan

Dalam industri alat berat, mesin diesel merupakan komponen utama yang mendukung berbagai kegiatan operasional [1,2]. Namun, mesin diesel menghasilkan panas buang yang signifikan, yang apabila tidak dimanfaatkan, dapat menjadi sumber pemborosan energi [3–5]. Pemanfaatan panas buang ini penting untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Salah satu cara pemanfaatan panas buang yang efektif adalah dengan menggunakan sistem pemanfaatan panas buang yang dikenal sebagai *Waste Heat Recovery* (WHR). Oleh karena itu, pemilihan refrigeran yang ramah lingkungan dalam sistem pemanfaatan panas buang mesin diesel alat berat menjadi hal yang krusial.

Penggunaan refrigeran dalam sistem pendingin sudah umum dilakukan. Namun, banyak refrigeran konvensional yang digunakan saat ini berkontribusi terhadap kerusakan lapisan ozon dan pemanasan global [6–8]. Refrigeran seperti CFC (*Chlorofluorocarbon*) dan HCFC (*Hydrochlorofluorocarbon*) dikenal memiliki *Ozone Depletion Potential* (ODP) dan

*Global Warming Potential* (GWP) yang tinggi. Sebagai respons terhadap masalah lingkungan ini, muncul kebutuhan mendesak untuk mengevaluasi dan memilih refrigeran yang lebih ramah lingkungan.

Refrigeran ramah lingkungan, seperti hidrofluorokarbon (HFC), hidrofluoroolefin (HFO), dan refrigeran alami seperti karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan golongan hidrokarbon (HC), menawarkan alternatif yang lebih aman bagi lingkungan [9]. Masing-masing jenis refrigeran ini memiliki karakteristik termodinamika yang berbeda, yang mempengaruhi efisiensi sistem dan dampak lingkungan. Pemilihan refrigeran yang tepat tidak hanya akan meningkatkan kinerja sistem pendingin tetapi juga mendukung tujuan keberlanjutan lingkungan.

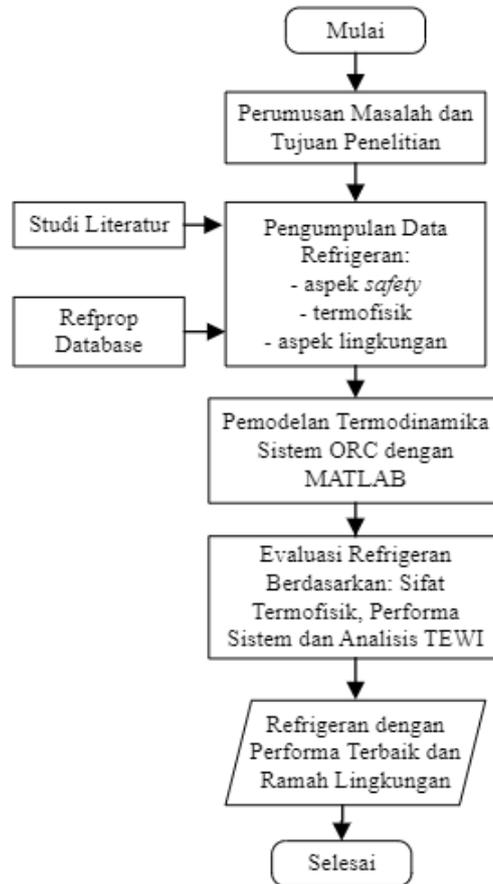
Evaluasi pemilihan refrigeran telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Zidan, M, et al (2023) melakukan rancangulang sistem pendingin mesin *freezer* multifungsi. Pada penelitian tersebut dilakukan analisa performa dengan fluida kerja R134a, R22, R404a menggunakan software Coolpack. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem pendingin dengan fluida kerja R404a memiliki performa yang lebih baik dan dapat mencapai temperatur pendinginan yang diinginkan [10]. Bangse, K et al (2021) juga melakukan evaluasi keunggulan termo-fisik R744 dibandingkan refrigeran lain seperti R404a, R22, R717 dan R747, khususnya pada aplikasi refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. Hasilnya menunjukkan bahwa R744 lebih unggul yakni pada perpindahan panas yang baik di evaporator, kondensor, dan pendingin gas (gas cooler). Dengan demikian penggunaan R744 memungkinkan pemilihan komponen dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan sistem dengan refrigeran HFC [11]. Selain itu peneliti Kuwar, Y (2023) melakukan pemodelan matematika dari sebuah *Air Conditioning* (AC) *system* yang menggunakan refrigeran R1234ze(E) dan R134a. Hasilnya menunjukkan bahwa refrigeran R1234ze(E) lebih unggul dan dapat menggantikan R134a karena memiliki kapasitas pendinginan yang lebih baik [12].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan beberapa peneliti tersebut, dapat diketahui bahwa upaya pencarian refrigeran alternatif dengan efisiensi yang lebih baik terus berjalan. Namun, evaluasi pemilihan refrigeran dalam konteks pemanfaatan panas buang mesin diesel alat berat masih belum banyak ditemui pada literatur. Sedangkan penggunaan alat berat semakin meningkat [13] seiring dengan meningkatnya jumlah industri pertambangan di Indonesia, maka dari itu perlu diperhatikan efisiensi dan dampak dari penggunaannya terhadap lingkungan. Sehingga, studi komparatif antara berbagai jenis refrigeran perlu dilakukan agar sistem bekerja dengan optimal dan meminimalisir efek terhadap lingkungan. Analisis ini akan membantu dalam memahami trade-off antara efisiensi dan dampak lingkungan, serta menemukan solusi yang paling sesuai dengan kebutuhan industri alat berat.

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan panduan dalam memilih refrigeran yang ramah lingkungan untuk sistem pemanfaatan panas buang mesin diesel melalui pemodelan matematis menggunakan MATLAB dan evaluasi dampak lingkungan melalui perhitungan nilai *Total Equivalent Warming Impact* (TEWI). Melalui evaluasi tersebut, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada upaya global dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan meningkatkan keberlanjutan energi dengan memilih refrigeran terbaik dari sisi efisiensi dan dampak lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pembuat kebijakan dan pelaku industri dalam mengimplementasikan praktik dengan memilih fluida kerja yang lebih ramah lingkungan.

## 2. Metodologi

Pada penelitian ini dilakukan evaluasi pemilihan refrigeran dengan pertimbangan *physical properties*, *safety aspect* dan analisis TEWI. Dalam upaya mencapai target hasil yang diinginkan, maka penelitian ini dilakukan dengan rancangan yang dituliskan dalam diagram alir pada Gambar 1 berikut.



**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian

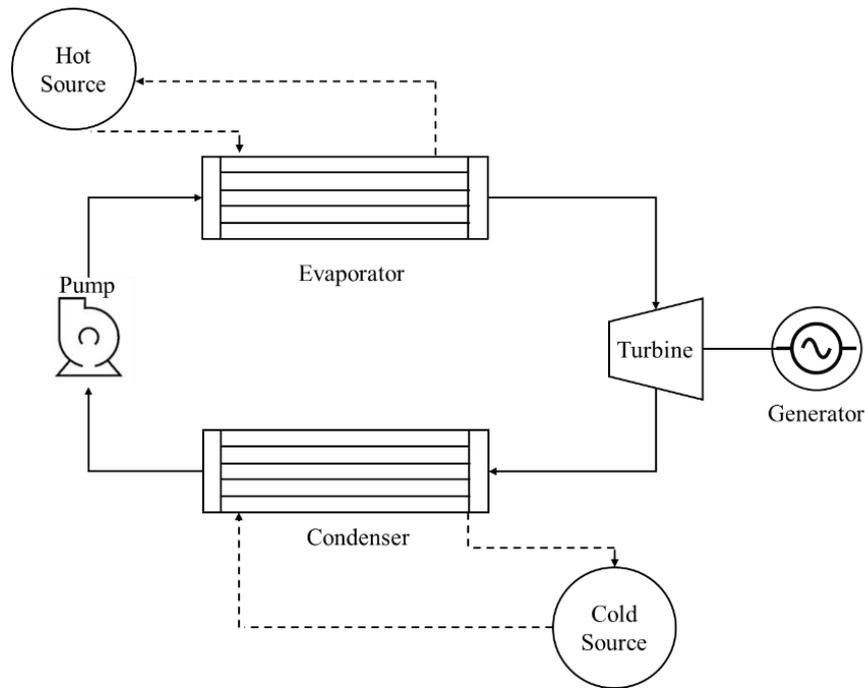
Penelitian dimulai dengan menentukan rumusan masalah dan tujuan penelitian. Masalah yang diangkat pada penelitian ini adalah mengevaluasi beberapa alternatif refrigeran yang cocok untuk sistem WHR. Prinsip dasar dari WHR adalah memindahkan panas dari sumber panas buang ke fluida kerja, seperti air atau refrigeran, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan energi sekunder. Adapun teknologi WHR yang didesain pada penelitian ini adalah yang menerapkan siklus *Organic Rankine Cycle* (ORC). ORC merupakan salah satu solusi yang efektif dan efisien dalam pemanfaatan panas buang, terutama untuk sumber panas dengan suhu rendah hingga menengah [14].

### 2.1 Pemodelan Sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC)

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan software MATLAB yang diintegrasikan dengan REFPROP. MATLAB merupakan software pemrograman yang dapat memodelkan sistem termodinamika secara sistematis, sedangkan REFPROP merupakan software yang menghimpun data-data refrigeran yang ada di seluruh dunia. Adapun pemodelan dilakukan menggunakan hukum termodinamika dan beberapa asumsi sebagai berikut:

1. Temperatur knalpot mesin diesel adalah 80 °C dan tekanan 150 kPa.
2. Temperatur lingkungan 30 °C.
3. Efisiensi turbin dan pompa adalah 85%.
4. Entropi tetap konstan dalam ekspansi ideal.

ORC bekerja berdasarkan prinsip siklus termodinamika rankine, namun menggunakan fluida organik sebagai fluida kerja. Gambaran siklus ORC dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Desain Sistem ORC sebagai WHR Mesin Diesel

Fluida organik ini memiliki titik didih yang lebih rendah dibandingkan air, sehingga lebih cocok untuk pemanfaatan panas buang dengan suhu yang lebih rendah. Adapun tahapan utama dalam siklus ORC:

- a. Pemanasan Pada Evaporator: Panas buang dari sumber panas (seperti mesin diesel atau proses industri) digunakan untuk memanaskan fluida kerja organik dalam penukar panas (evaporator). Fluida kerja ini kemudian berubah fase dari cair menjadi uap.
- b. Ekspansi Pada Turbine: Uap fluida kerja yang bertekanan tinggi mengalir ke turbin, dimana ekspansi uap terjadi dan menghasilkan energi mekanik yang dapat diubah menjadi energi listrik melalui generator yang terhubung dengan turbin.
- c. Kondensasi di Kondenser: Setelah melewati turbin, uap fluida kerja kemudian didinginkan dalam kondensor, di mana uap tersebut kembali ke fase cair.
- d. Pompa: Fluida kerja cair dipompa kembali ke evaporator untuk memulai siklus kembali.

Dalam melakukan pemodelan, digunakan perhitungan termodinamika untuk setiap komponen. Adapun perhitungan daya keluaran turbin menggunakan persamaan sebagai berikut [15]:

$$W_{\text{turbine}} = h_1 - h_{2s} \quad (1)$$

$$h_{2s} = h_1 - \text{eff}_{\text{turbine}} * (h_1 - h_3) \quad (2)$$

Dimana,  $W_{\text{turbine}}$  adalah daya keluaran turbin per kg refrigeran (kJ/kg),  $h_1$  adalah entalpi masuk turbin dan  $h_{2s}$  adalah entalpi keluar turbin.

Selanjutnya yaitu perhitungan daya masukan pompa, dengan volume spesifik ( $v$ ) diketahui 0.001 m<sup>3</sup>/kg. Sehingga kerja pompa dapat dihitung dengan persamaan:

$$W_{\text{pump}} = v * (P_1 - P_3) / \text{eff}_{\text{pump}} \quad (3)$$

Dimana,  $W_{\text{pump}}$  adalah daya masukan pompa per kg refrigeran (kJ/kg),  $P_1$  adalah tekanan masuk pompa dan  $P_3$  adalah tekanan lingkungan, sedangkan  $\text{eff}_{\text{pump}}$  adalah efisiensi pompa.

Sehingga perhitungan efisiensi termal siklus didapat:

$$Q_{in} = h_1 - h_3 \tag{4}$$

$$Q_{out} = h_{2s} - h_3 \tag{5}$$

$$eff = (W_{turbine} - W_{pump}) / Q_{in} \tag{6}$$

Dimana,  $Q_{in}$  adalah kalor masuk per kg refrigeran (kJ/kg),  $Q_{out}$  adalah kalor keluar per kg refrigeran (kJ/kg) dan eff adalah efisiensi termal siklus.

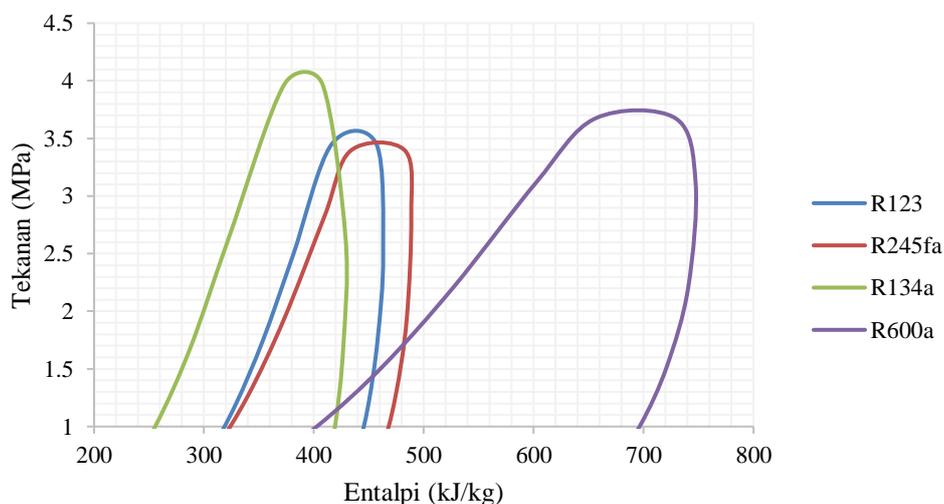
Setelah dilakukan studi pustaka dan kajian sistem ORC, maka dilakukan pemilihan fluida kerja yang tepat untuk sistem ORC.

## 2.2 Identifikasi Refrigeran

Setiap refrigeran atau fluida kerja memiliki karakteristik yang berbeda. Sehingga diperlukan pertimbangan yang baik dalam pemilihan fluida kerja untuk suatu sistem. Pemilihan fluida kerja yang sesuai untuk sistem ORC melibatkan evaluasi beberapa kriteria, termasuk sifat termofisika, pertimbangan keselamatan (toksisitas dan mudah terbakar), dan faktor lingkungan [16–18]. Sifat termofisika seperti suhu dan tekanan kritis memainkan peran penting dalam proses pemilihan ini, sementara faktor lingkungan, terutama Potensi Pemanasan Global (*Global Warming Potential/GWP*), menjadi pertimbangan penting. Refrigeran yang menjadi pertimbangan pada penelitian ini adalah R123, R245fa, R134a dan R600a. Tabel 1 memberikan informasi tentang refrigeran yang dievaluasi, sementara itu Gambar 3 mengilustrasikan diagram Ph untuk masing-masing refrigeran.

**Tabel 1.** Karakteristik Refrigeran

No.	Parameter	R123	R245fa	R134a	R600a
1.	Critical Temp ( $^{\circ}C$ )	183.68	154.01	101.1	134.7
2.	Critical Pressure (MPa)	3.668	3.651	4.059	3.64
3.	GWP	93	1030	1430	3
4.	ODP	0.02	0	0	0
5.	Safety Group	B1	B1	A1	A3



**Gambar 3.** Ph Diagram Refrigeran yang Diteliti

### 2.3 Analisis Total Equivalent Warming Impact (TEWI)

Dalam mengevaluasi pemilihan refrigeran yang digunakan, penelitian ini menganalisis aspek lingkungan, dengan fokus khusus pada TEWI [19–21]. Nilai-nilai TEWI yang dipertimbangkan dalam investigasi ini disajikan di bawah ini.

$$\begin{aligned} \text{TEWI} &= \text{direct emissions} + \text{indirect emissions} \\ &= (\text{GWP} \times \text{L} \times \text{N}) + (\text{Ea} \beta \text{ n}) \end{aligned} \quad (7)$$

dimana,

TEWI = Total Equivalent Warming Impact (TEWI)

GWP = Nilai Potensi Pemanasan Global

L = Tingkat kebocoran dalam Kg (diperkirakan 3% dari muatan)

N = Masa pakai sistem (tahun)

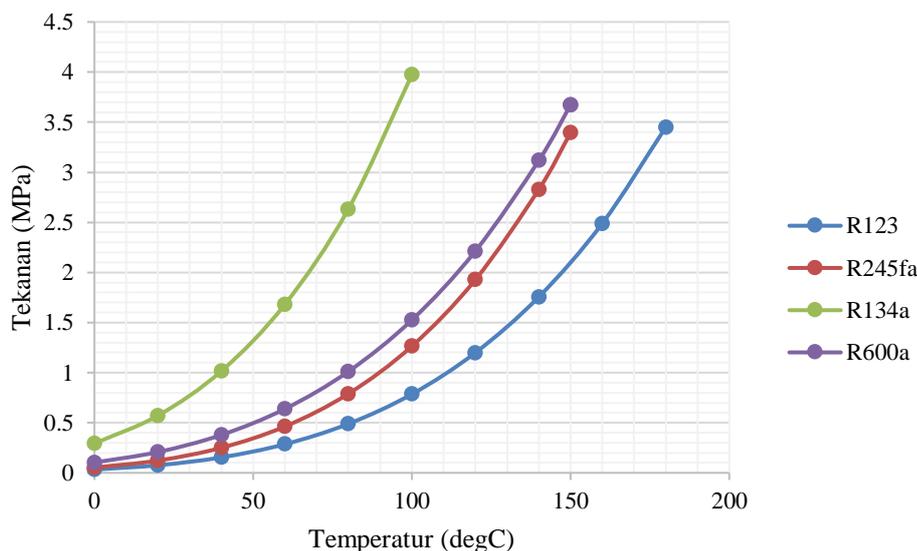
Ea = Konsumsi energi (KWh/tahun)

$\beta$  = Faktor emisi CO<sub>2</sub> (0.483 kg CO<sub>2</sub>/KWh)

N = Waktu operasional sistem dalam satu tahun

### 3 Hasil dan pembahasan

Evaluasi refrigeran merupakan hal yang sangat penting dilakukan, agar sistem memiliki performa yang baik dan tidak berdampak negatif terhadap lingkungan. Gambar 3 berikut ini memperlihatkan dua sifat termofisik yaitu tekanan dan temperatur dari empat refrigeran yang diteliti, R123, R245fa, R134a dan R600a.



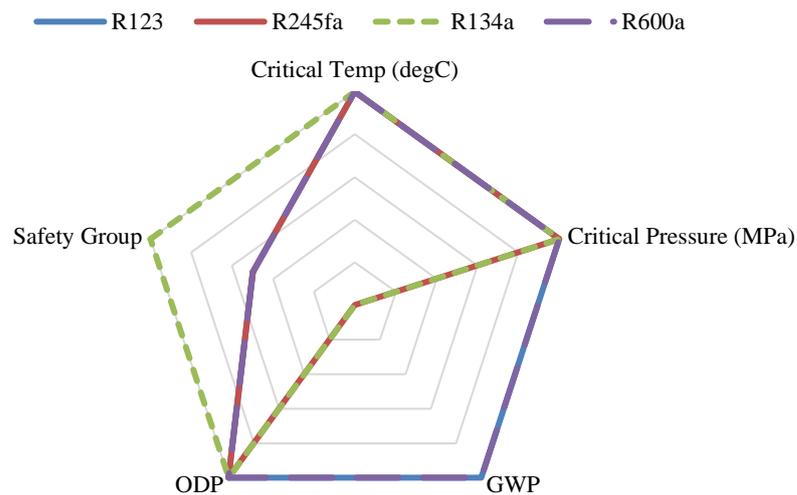
**Gambar 3.** Temperatur vs Tekanan dari Refrigeran yang Diteliti

Diketahui dari Gambar 3, R123 memiliki temperatur kritis yang lebih tinggi jika dibandingkan fluida lainnya, yakni 183°C. Sedangkan R134a memiliki temperatur kritis yang paling rendah dibanding ketiga refrigeran lainnya, yakni 100°C. Namun jika dilihat dari nilai tekanan kritis, R134a memiliki tekanan kritis tertinggi yakni di angka 4 MPa, jika dibandingkan dengan ketiga refrigeran lain yang berkisar 3.5 MPa. Nilai kedua sifat thermofisika ini menjadi penting karena memperhatikan sumber panas dari waste heat yang digunakan, jika dalam kasus ini berupa sumber panas dari *exhaust* mesin diesel yang bisa mencapai angka 100°C hingga 150°C, maka refrigeran dengan temperatur kritis diantara

atau diatas itu akan menjadi pilihan terbaik, dalam hal ini R123 merupakan pilihan terbaik. Selanjutnya, dievaluasi sifat lainnya meliputi, nilai GWP, ODP dan *safety group* dari tiap refrigeran. Nilai tersebut jika ditabulasikan dan diplot dalam sebuah diagram *spider plot*, maka akan tampak seperti Tabel 2 dan Gambar 4.

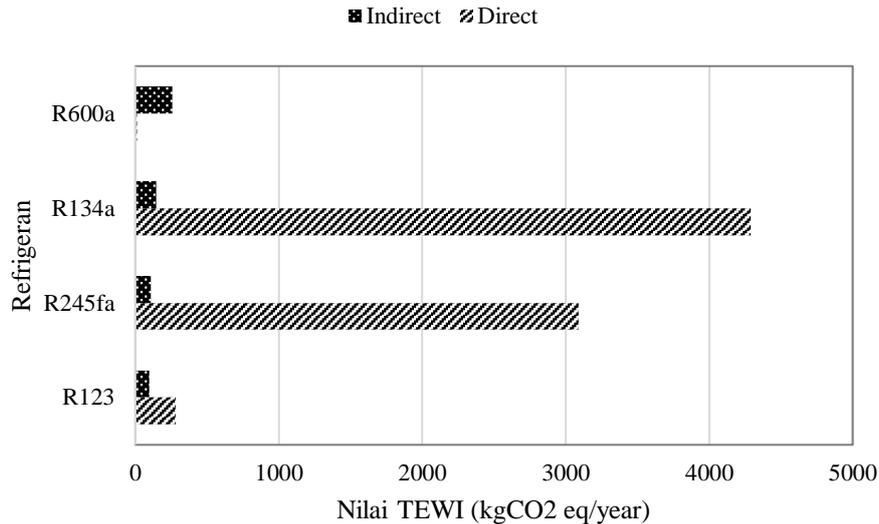
**Tabel 2.** Data Refrigeran yang Distandarisasi

No.	Parameter	R123	R245fa	R134a	R600a
1	Critical Temp (degC)	1	1	1	1
2	Critical Pressure (MPa)	1	1	1	1
3	GWP	1	0	0	1
4	ODP	1	1	1	1
5	Safety Group	0.5	0.5	1	0.5

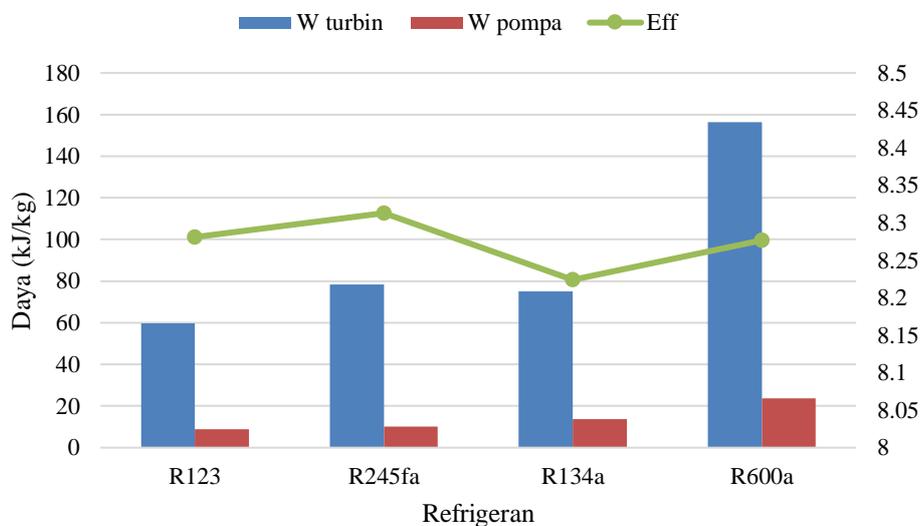


**Gambar 4.** Hasil Evaluasi Alternatif Refrigeran Untuk Sistem ORC dengan *Spider Plot*

Dari Tabel 2, dapat dilihat bahwa, R123 dan R600a memiliki nilai yang lebih besar dibanding R245fa dan R134a. Nilai yang lebih besar ini juga diilustrasikan menjadi cakupan jaring spider plot yang luas seperti Gambar 4. Hal ini menunjukkan bahwa kedua refrigeran R123 dan R600a menjadi alternatif refrigeran terbaik yang dapat dipilih berdasarkan evaluasi 5 parameter, yakni temperatur dan tekanan kritis, nilai GWP dan ODP. Meskipun jika ditinjau dari aspek safety grup, hanya refrigeran R134a yang memiliki nilai terbaik, yakni di golongan A1 yang berarti tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Sedangkan R600a memiliki tingkat toksisitas yang rendah (A) dan tingkat inflamabilitas yang tinggi. Artinya, meskipun R600a tidak beracun, ia sangat mudah terbakar, sehingga perlu penanganan yang hati-hati untuk menghindari risiko kebakaran atau ledakan. Refrigeran R123 memiliki tingkat toksisitas yang lebih tinggi (B) dan tidak mudah terbakar. Artinya, meskipun R123 tidak mudah terbakar, penggunaannya memerlukan perhatian khusus terkait potensi bahaya kesehatan akibat paparan jangka panjang. Selanjutnya adalah evaluasi pemilihan refrigeran dengan melihat dampak lingkungan dengan metode TEWI dan analisis performa sistem yakni efisiensi dan kerja komponen sistem. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6.



**Gambar 5.** Hasil Perhitungan TEWI untuk Masing-masing Refrigeran



**Gambar 6.** Performa Masing-masing Refrigeran

Dari analisis TEWI, diketahui bahwa refrigeran memiliki kontribusi secara langsung (*direct*) dan secara tak langsung (*indirect*) terhadap lingkungan. Berdasarkan perhitungan, untuk kontribusi secara langsung/*direct*, R134a memiliki nilai yang paling tinggi yaitu 4290 kgCO<sub>2</sub> eq/year, yang artinya R134a jika digunakan untuk sistem ORC maka akan memberikan kontribusi negatif terhadap lingkungan yang lebih besar, jika dibandingkan ketiga refrigeran lainnya. Sedangkan R600a memiliki kontribusi terkecil yakni 9 kgCO<sub>2</sub> eq/year. Untuk dampak tak langsung/*indirect* terhadap lingkungan, R600a memiliki kontribusi yang paling besar yakni 255.6 kgCO<sub>2</sub> eq/year, sedangkan R123 memiliki nilai terendah yakni 95.8 kgCO<sub>2</sub> eq/year. Selanjutnya yaitu menganalisis performa sistem. Berdasarkan nilai efisiensi termal siklus dan kerja turbin serta pompa. Dari Gambar 6, dapat dilihat bahwa, untuk kondisi operasi yang sama, R134a memiliki efisiensi termal terendah dibandingkan ketiga refrigeran lainnya, dan R245fa memiliki efisiensi termal tertinggi yakni 8.313% diikuti oleh R123 yaitu 8.281% dan R600a 8.277%.

#### 4 Kesimpulan

Berdasarkan evaluasi pemilihan refrigeran yang telah dilakukan dengan kandidat refrigeran R123, R245fa, R134a dan R600a untuk sistem WHR siklus ORC, didapatkan bahwa R600a merupakan kandidat terbaik berdasarkan evaluasi dari sifat termodinamik, *safety aspect*, dan lingkungan serta performa sistem. R600a memiliki temperatur kritis yang sesuai untuk sistem WHR yang memiliki sumber panas buang diatas 100 °C, meskipun tidak setinggi R123. Dari aspek lingkungan, R600a memiliki dampak lingkungan baik langsung maupun tak langsung yang sangat rendah, yakni 9 kgCO<sub>2</sub> eq/year dan 255.695.7 kgCO<sub>2</sub> eq/year. Berdasarkan pemodelan termodinamika, R600a memiliki performa yang sangat baik dengan efisiensi termal sistem 8.277%.

#### Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Gadjah Mada yang telah mensupport dan membiayai penelitian ini dengan hibah *Academic Excellence* Skema C tahun 2024.

#### Daftar Pustaka

- [1] Hafiz, K., Martianis, E., Analisis Overall Equipment Effectiveness (OEE) pada Mesin Caterpillar Type 3512B. SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin. 2019 Desember; 13(2): p. 87–96.
- [2] Syahputra, D.W., Wahyuningsih, S., Analisis Gangguan dan Perawatan pada Mesin Diesel generator di KM. Egon. Journal of Business Technology and Economics. 2023 November; 1(1): p. 1–7.
- [3] Mustain, I., Analisis Pemanfaatan Gas Buang Pada Mesin Generator Set Melalui Sistem Organic Rankine Cycle. Jurnal Sains Dan Teknologi Maritim. 2021 Maret; 21(2): p. 89–96.
- [4] Poeswanto, H., Yani, A., Perencanaan Pemanfaatan Marine Fuel Oil (Mfo) Sebagai Bahan Bakar Engine Diesel MaK. Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin. 2015 Juni; 4(1): p. 33–40.
- [5] Baride, L., Maturbongs, Y.E.K., Desain Destilator Dua Atap Miring Dengan Memanfaatkan Panas Gas Buang Mesin Diesel. Journal INTEK. 2018 April; 5(1): p. 1–6.
- [6] Sunardi, C., Sutandi, T., Putra, A.D.D., Kosasih, A., Pengaruh Refrigeran R-22 Dan Mc-22 Terhadap Performansi Sistem Refrigerasi Brine Cooling. Edusaintek. 2019;3: p. 44–54.
- [7] Apriliyani, D., Dharen, H., Junjunan, B.A., Muldea, M.A., Analisis Bahan Material Komponen Dan Pemanfaatan Hukum Termodinamika Dalam Desain Kulkas Yang Ramah Lingkungan. Jurnal Arjuna: Publikasi Ilmu Pendidikan, Bahasa dan Matematika. 2024 Februari;2(1): p. 184–201.
- [8] Rahmadania, N., Pemanasan Global Penyebab Efek Rumah Kaca dan Penanggulangannya. Jurnal Ilmu Teknik. 2022 April; 2(3): p. 1–13.
- [9] Suamir, I.N., Temaja, I.W., Yana, I.P.E.I., Analisis perbandingan berbagai sistem AC komersial pada aplikasi gedung hotel. Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology. 2021 November; 2(3): p. 128–134.
- [10] Zidan, M., Kusuma, G.E., Rancang Ulang Sistem Pendingin Pada Mesin Freezer Multifungsi. In: Proceedings Conference on Marine Engineering and its Application; 2023. 6 (1).
- [11] Bangse, K., Suamir, I.N., Susila, I.D.M., Suparwika, I.K., Raditya, I.P.S., Karbon dioksida refrigeran alami untuk sistem refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology. 2021 Juli; 2(2): p. 91–96.

- [12] Kuwar, Y.V., Performance evaluation of ecofriendly R1234ze (E) refrigerant in an automotive air conditioning system. *Heat Transfer*. 2024 Maret; 53(2): p. 472–494.
- [13] Pratas, P.A.K., Kelayakan investasi studi kasus alat berat bulldozer, excavator dan dump truck di Kota Manado. *Jurnal Sipil Statik*. 2016 September; 4(9): p. 533–539.
- [14] Surindra, M.D., Eksperimental Studi Performance Organic Rankine Cycle (ORC) Menggunakan Fluida Kerja R245fa Dengan Sumber Panas di Evaporator 120°C. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 2019 Desember; 14(3): p. 135–141.
- [15] Dincer, I., Rosen, M.A., Ahmadi, P., Optimization of energy systems. United States: John Wiley & Sons; 2017.
- [16] Pribadie, D.A., Kiono, B.F.T., Rozi, K. Analisis Orc Sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Dengan Variasi Fluida Kerja R123, R141b, dan Pentana. *Jurnal Teknik Mesin*. 2023 April; 11(2): p. 157–162.
- [17] Dwinanto, M., Pengaruh Temperatur Kondensasi terhadap Kinerja Siklus Rankine Organik yang Menggunakan R245FA, R600a, R1234YF, dan R1234ZE. *ROTASI*. 2021 Oktober; 23(4): p. 28–34.
- [18] Manopo, D.S., Rusirawan, D., Review Organic Rankine Cycle-: Penerapan di Kapal. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*. 2024 Maret; 8(1): p. 76–86.
- [19] Fischer, S.K., Total equivalent warming impact: a measure of the global warming impact of CFC alternatives in refrigerating equipment. *International journal of Refrigeration*. 1993; 16(6): p. 423–428.
- [20] Islam, M.A., Srinivasan, K., Thu, K., Saha, B.B., Assessment of total equivalent warming impact (TEWI) of supermarket refrigeration systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017 Juli; 42(43): p. 26973–26983.
- [21] Aprea, C., Ceglia, F., Llopis, R., Maiorino, A., Marrasso, E., Petruzzello, F., Sasso, M., Expanded Total Equivalent Warming Impact analysis on experimental standalone fresh-food refrigerator. *Energy Conversion and Management: X*. 2022 Agustus; 15: 100262.