

Analisis Energi dan Eksergi Sistem Rankine Organik dan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap yang Terintegrasi

Ferdyson⁽¹⁾, Berkah Fajar Tamtomo Kiono⁽²⁾, Sutaryo⁽³⁾

Universitas Diponegoro
Jalan Imam Barjo SH No.5 Pleburan Semarang, Indonesia

Email: ¹Ferdyson30@gmail.com, ²fajarberkah10@gmail.com

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima 8 Maret 2025
Direvisi 13 Maret 2025
Disetujui 21 Mei 2025
Dipublikasikan 26 Mei 2025

Keywords:

Energy, Exergy, ORC-VCR, Refrigerant, COP

Kata Kunci:

Energi, Eksergi, ORC-VCR, Refrigeran, COP

Corresponding Author:

Name:
Ferdyson
Email:
Ferdyson30@gmail.com

Abstract: The utilization of waste heat is currently a growing trend that has gained global attention due to its contribution to new and renewable energy. Low-temperature waste heat can be used in an Organic Rankine Cycle (ORC) for cooling purposes. This study aims to utilize waste heat from a ceramic cooling machine by integrating the ORC with the Vapor Compression Refrigeration (VCR) cycle to obtain the optimal refrigerant and system performance. Thermodynamic analysis methods based on energy and exergy analysis were conducted using refrigerants R1234ze(E), R152a, RC318, R236fa, RE245cb2, R600a, R236ea, and R245fa as working fluids under operational conditions, varying the evaporator, condenser, and boiler temperatures, as well as the efficiency of the compressor and turbine. Based on the thermodynamic analysis (energy and exergy), R152a was selected as the best working fluid for this application. The coefficient of performance (COP) of the integrated ORC-VCR system was 0.6122, resulting in a cooling capacity of 16.26 kW and an exergy efficiency of 0.5017.

Abstrak: Penelitian ini menyoroti tren yang semakin berkembang dalam pemanfaatan panas buang, khususnya dalam konteks energi baru dan terbarukan. Dengan memanfaatkan panas buang bersuhu rendah dalam Siklus Rankine Organik (ORC) untuk aplikasi pendinginan, penelitian ini berfokus pada integrasi ORC dengan siklus Refrigerasi Kompresi Uap (VCR) guna mengoptimalkan pemilihan refrigeran dan kinerja sistem secara keseluruhan. Analisis termodinamika, yang mencakup evaluasi energi dan eksergi, dilakukan menggunakan berbagai jenis refrigeran—R1234ze(E), R152a, RC318, R236fa, RE245cb2, R600a, R236ea, dan R245fa—sebagai fluida kerja dalam berbagai kondisi operasional. Studi ini mempertimbangkan

variasi suhu evaporator, kondensor, dan boiler, serta efisiensi kompresor dan turbin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa R152a adalah fluida kerja yang paling sesuai untuk aplikasi ini. Sistem ORC-VCR terintegrasi mencapai koefisien performa (COP) sebesar 0.6122, kapasitas pendinginan sebesar 16.26 kW, dan COP eksergi sebesar 0.5017, yang menunjukkan efektivitasnya dalam memanfaatkan panas buang untuk tujuan pendinginan.

PENDAHULUAN

Pentingnya mengurangi emisi CO₂ dan beralih ke energi terbarukan untuk menghindari dampak perubahan iklim yang lebih parah. (Hansen et al., 2008). Karena dampaknya yang semakin nyata dan serius, banyak ilmuwan serta organisasi lingkungan memperingatkan bahwa jika kita tidak mengambil tindakan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, suhu global dapat terus meningkat, yang pada akhirnya akan menyebabkan konsekuensi yang lebih parah di masa

depan (Masson-Delmotte, 2023). Baru-baru ini, terdapat upaya yang cukup besar dalam pemanfaatan energi terbarukan seperti panas bumi, energi angin, energi surya, dan panas limbah sebagai sumber energi bersih untuk sistem refrigerasi atau produksi listrik (Aneke et al., 2012). Pemanfaatan sumber daya energi dan peningkatan efisiensi dalam penggunaannya paling baik dilakukan dengan mempertimbangkan eksergi. Eksergi adalah kerja teoretis maksimum yang dapat diperoleh dari suatu sistem dan lingkungannya ketika sistem mencapai keseimbangan dengan sekitarnya (Keadaan Mati) (Moran & Shapiro, 2021)

Pemanfaatan panas limbah dari sistem refrigerasi untuk menghasilkan energi terbarukan menawarkan beberapa keuntungan. Pertama, hal ini dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional yang tidak terbarukan, yang pada akhirnya akan habis dan menjadi semakin mahal seiring waktu. Kedua, pemanfaatan ini dapat mengurangi emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim. Dengan memanfaatkan panas limbah, limbah termal dapat dikurangi atau bahkan dihilangkan, sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan (Bahrami & Sheikhi, 2015). Salah satu metode yang umum digunakan adalah penerapan turbin uap dan turbin gas untuk mengonversi panas limbah menjadi energi mekanik, yang kemudian dapat digunakan untuk menggerakkan generator listrik (Ahamed et al., 2011)

Namun, proses konversi panas limbah menjadi energi mekanik masih memerlukan peningkatan efisiensi untuk memaksimalkan potensi energi yang dapat dihasilkan. Selain itu, masalah teknis seperti desain sistem, kontrol operasional, dan pemeliharaan juga harus diselesaikan untuk memastikan keberhasilan pemanfaatan panas limbah (Vankeirsbilck et al., 2011). Oleh karena itu, di era modern, siklus Organic Rankine Cycle (ORC) telah diperkenalkan. ORC adalah siklus Rankine konvensional yang menggunakan fluida kerja organik yang mampu beroperasi pada titik didih rendah. Hal ini sangat menguntungkan karena dapat diterapkan pada industri berskala menengah hingga kecil. ORC menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan sistem pemulihan panas limbah lainnya, termasuk potensi pemanfaatan yang signifikan, kemudahan konstruksi, ketersediaan komponen, fleksibilitas, serta biaya pemeliharaan yang lebih rendah dengan tingkat keamanan yang lebih tinggi (Wahile et al., 2020).

Panas limbah dari kegiatan industri dapat dimanfaatkan kembali untuk meningkatkan efisiensi sistem energi. Siklus Rankine Organik (ORC) yang digerakkan oleh panas merupakan siklus yang menjanjikan untuk konversi energi termal menjadi kerja mekanik atau energi listrik. ORC dapat diintegrasikan dengan siklus refrigerasi kompresi uap (VCR) untuk menghasilkan listrik atau sistem pendinginan (Sun et al., 2017). Pemilihan fluida kerja untuk sistem Rankine Organik-refrigerasi kompresi uap (ORC-VCR) sangat penting. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memilih fluida kerja berdasarkan efisiensi termal sistem (Saleh, 2016). Analisis energi, entropi, dan eksergi dapat memberikan gambaran keseluruhan tentang kinerja sistem (Kanoğlu et al., 2004).

Mempelajari kinerja sistem ORC-VCR dengan menggunakan R123, R134a, R245fa, R600a, R600, dan R290 sebagai fluida kerja. Sistem ini didukung oleh energi panas bumi untuk pendinginan udara atau oleh panas buangan kapal penangkap ikan untuk produksi es. Hasil penelitian menunjukkan bahwa R600a adalah fluida kerja yang paling sesuai. Sistem gabungan pendinginan dan pembangkit listrik yang menggunakan fluida kerja biner amonia-air yang digerakkan oleh panas bersuhu rendah sudah diteliti secara eksperimental oleh (Bu et al., 2013). Keluaran pendinginan adalah 11,67 kW, dan koefisien kinerja (COP) yang sesuai adalah 0,465 (Han et al., 2014).

Secara teoritis dan eksperimental, sebuah sistem ORC-VCR yang ditenagai oleh panas limbah dan menggunakan ekspander berbasis scroll sudah pernah dianalisis. Koefisien kinerja sistem (COPS) mencapai hampir 0,5 (Wang et al., 2011). Sebuah penelitian telah dilakukan terhadap sistem ORC yang dikombinasikan dengan sistem pendingin udara mobil untuk pemanfaatan panas buangan, menggunakan R134a, R245fa, siklopentana, dan n-propane sebagai fluida kerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa R134a adalah fluida kerja yang paling efisien (Yue et al., 2016). Sistem terintegrasi ORC-VCR yang digerakkan oleh energi matahari menawarkan pendekatan yang menjanjikan untuk menghasilkan daya dan pendinginan secara bersamaan (Ashwni & Sherwani, 2022).

Menganalisis sistem VCR dengan satu dan dua evaporator yang digerakkan oleh ORC

menggunakan R134a, R227ea, R600a, dan R1234ze (E) sebagai fluida kerja. R600a ditemukan sebagai fluida kerja terbaik. Nilai maksimum COP dan η_{ex} masing-masing ditentukan sebesar 0,78 dan 19,4%. Selain itu, bahwa penambahan evaporator tambahan dalam sistem menyebabkan penurunan kinerja energetik dan eksergetik dibandingkan dengan sistem yang hanya menggunakan satu evaporator (Saleh et al., 2019).

Dalam penelitian ini, bertujuan untuk mengetahui seberapa efisien siklus *Organic Rankine Cycle* digunakan untuk memanfaatkan panas limbah yang dihasilkan oleh mesin produksi di PT Ceramic Sango. Panas limbah tersebut digunakan kembali untuk menghasilkan uap bagi boiler dalam sistem refrigerasi yang terintegrasi dengan siklus *Organic Rankine Cycle*.

METODE

1. Pemilihan Refrigeran

Dalam pemilihan refrigeran, penelitian ini menggunakan beberapa parameter berdasarkan berbagai pertimbangan. Fluida kerja harus memiliki sifat termodinamika yang optimal untuk meningkatkan efisiensi konversi energi termal menjadi kerja. Oleh karena itu, pemilihan refrigeran bergantung pada beberapa faktor, seperti suhu operasi ORC (rendah, menengah, atau tinggi), tekanan operasi yang moderat untuk memastikan efisiensi pompa dan turbin, sifat fluida kerja (kering atau basah), keamanan, serta dampak lingkungan (GWP dan ODP yang rendah). Dengan demikian, refrigeran harus memenuhi kriteria seperti panas laten yang tinggi untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas, tekanan kritis dan titik didih yang optimal untuk menghindari tekanan kerja ekstrem, serta GWP dan ODP yang rendah agar lebih ramah lingkungan. Berikut adalah delapan refrigeran yang telah dipilih untuk penelitian ini, sebagaimana ditunjukkan dalam tabel berikut:

Tabel 1. Pemilihan Refrigeran untuk Sistem ORC-VCR Terintegrasi

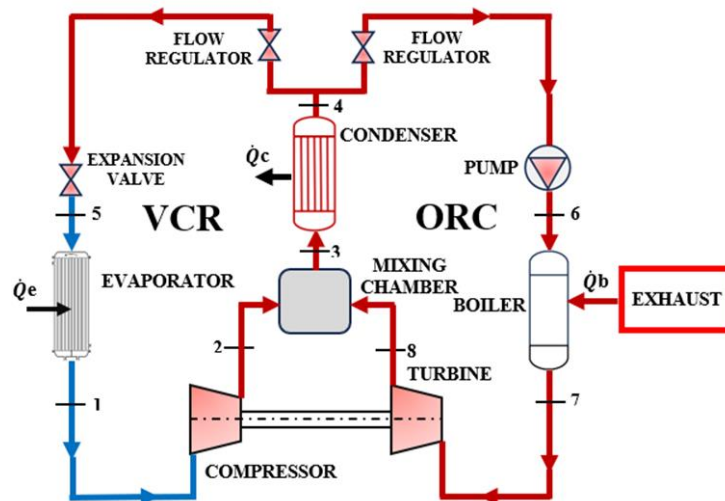
Refrigerant	Chemical Formula	Fluor (F)	Physical Properties			Environment Data		Safety Data	
			M (g/mol)	Tcrit (°C)	Pcrit (bar)	ODP	GWP	LFL (%)	Safety Group
R1234ze(E)	C ₃ H ₂ F ₄	4	114	109,4	36,36	0	<1	7	A2L
R152a	C ₂ H ₄ F ₂	2	66	113,15	44,96	0	124	3,9	A2
RC318	C ₄ F ₈	8	200	115	27.77	0	1	-	A1
R236fa	C ₃ H ₂ F ₆	6	152	124,9	32	0	981	-	A1
RE245cb2	C ₃ H ₃ F ₅	5	150	133	28	0	680	-	-
R600a	C ₄ H ₁₀	0	58.12	134.98	36.6	0	4	1.8	A3
R236ea	C ₃ H ₄ F ₆	6	152	139.29	35	0	1330	-	-
R245fa	C ₃ H ₃ F ₅	5	134	154	36.4	0	858	-	-

2. Skema Sistem ORC-VCR

Sistem ORC-VCR terintegrasi terdiri dari tujuh komponen utama: pompa, boiler, turbin, kompresor, kondensor, evaporator, dan ruang pencampur. Gas buang berfungsi sebagai sumber panas limbah yang dihasilkan dari pembakaran keramik, yang kemudian diarahkan untuk memanaskan boiler ORC. Panas ini berperan sebagai tenaga penggerak bagi subsistem ORC untuk menghasilkan uap panas. Fluida kerja dalam bentuk uap mengalir ke turbin ORC, di mana ia dikonversi menjadi kerja mekanik yang terhubung ke poros silinder untuk menggerakkan kompresor. Masih terdapat sisa uap yang kemudian diarahkan ke ruang pencampur. Fluida dari ruang pencampur mengalir ke kondensor untuk dikondensasikan dan kemudian mengalir ke sisi ORC dan VCR. Pada sisi VCR, fluida mengalir menuju evaporator, sedangkan pada sisi ORC, fluida mengalir ke pompa, dan siklus ini terus berulang.

Subsistem ORC berfungsi sebagai pembangkit daya yang digunakan untuk

menggerakkan siklus refrigerasi. Komponen utama dalam sistem ini menggunakan komponen yang kompatibel dengan Siklus Rankine Organik (ORC), seperti boiler ORC, turbin ORC, kondensor ORC, dan kompresor ORC.



Gambar 1. Diagram Skematik Sistem ORC-VCR Terintegrasi

3. Parameter Sistem

Parameter diperlukan sebagai data untuk perhitungan guna menentukan kinerja sistem dan kelangsungan proses simulasi dalam perangkat lunak.

Tabel 2. Nilai input dan parameter yang digunakan dalam sistem ORC-VCR.

Parameter	Nilai	Range
Exhaust Temperature	500°C	-
Pump Isentropic Efficiency	80%	-
Boiler Temperature	100°C	60-100°C
Turbine Isentropic Efficiency	80%	60-90%
Condenser Temperature	40°C	30-55°C
Evaporator Temperature	0°C	-15-15°C
Compressor Isentropic Efficiency	80%	60-90%
Exhaust Air Mass Rate	439,6 m ³ /s	-

Berdasarkan Tabel 2 di atas, berikut adalah penjelasan sesuai dengan parameter data. Suhu eksternal boiler adalah suhu yang diterima oleh boiler dari gas buang keramik Sango, yaitu 500°C dengan laju aliran udara sebesar 439,6 m³/s. Dari suhu ini, diperoleh suhu gas buang yang dapat digunakan untuk menentukan kinerja gas buang (Q_{gas}). Selanjutnya, nilai suhu boiler dapat digunakan untuk menghitung nilai tekanan dalam boiler. Nilai tekanan boiler ini dapat digunakan untuk menentukan entalpi boiler dalam kondisi uap jenuh. Suhu kondensor digunakan untuk menentukan nilai entropi kondensor dan entalpi kompresor. Setelah entropi kondensor dan tekanan boiler diketahui, nilai ini dapat digunakan untuk menentukan entalpi isentropik dari pompa.

Nilai entalpi isentropik pompa, ketika dikurangi dengan entalpi kondensor dan dibagi dengan efisiensi pompa, menghasilkan entalpi aktual pompa. Selanjutnya, kinerja panas gas buang (Q_{gas}) dibagi dengan selisih antara entalpi boiler dan entalpi aktual pompa, sehingga laju aliran massa Rankine organik ($\dot{m}_{ORC}$) dapat ditentukan. Setelah nilai $\dot{m}_{ORC}$ diperoleh, nilai ini dikalikan dengan selisih antara entalpi boiler dan entalpi aktual pompa untuk menentukan kinerja panas boiler, yang kemudian memungkinkan perhitungan kerja turbin (W_{Turbin}).

Nilai suhu evaporator digunakan untuk menentukan entalpi dan entropi kompresor dalam kondisi uap jenuh. Selanjutnya, entalpi aktual kompresor dapat ditentukan dengan menghitung entalpi isentropik kompresor, menambahkan entalpi isentropik, mengurangi entalpi input, dan

membaginya dengan efisiensi kompresor, yang kemudian menghasilkan entropi aktual kompresor.

4. Analisis Energi

Analisis energi adalah metode yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi sistem termodinamika. Hukum pertama termodinamika, yang juga dikenal sebagai prinsip konservasi energi, menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Prinsip ini juga menegaskan bahwa jumlah total energi selalu terjaga dan tetap konstan, tanpa adanya penciptaan atau penghancuran energi (Dincer, 2018).

Dalam analisis ini, gesekan, kehilangan panas, serta perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan. Proses pencampuran fluida di dalam ruang pencampuran dianggap sebagai proses adiabatik. Sistem diasumsikan berada dalam kondisi tunak (steady-state). Tekanan sistem adalah 101,325 kPa, dan suhu Dead State adalah $T_0 = 293,15$ K. Berdasarkan asumsi-asumsi ini, koefisien kinerja (COP_{Sistem}), kapasitas pendinginan (Q_{Evap}), kapasitas panas kondensor (Q_{Kon}), daya turbin (W_{Turbin}), serta kapasitas panas boiler (Q_{Boiler}) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut di bawah :

$$COP_{System} = \frac{Q_{Evap}}{Q_{Boiler}}$$

$$Q_{Evap} = \dot{m}_{Vcr} \cdot (h_1 - h_5)$$

$$Q_{Boiler} = \dot{m}_{Orc} \cdot (h_7 - h_{6a})$$

$$Q_{Cond} = \dot{m}_{Total} \cdot (h_4 - h_3)$$

$$W_{Turbine} = \dot{m}_{Orc} \cdot (h_7 - h_{8a})$$

$$Q_{Evap} = \dot{m}_{Vcr} \cdot (h_1 - h_5)$$

$$Q_{Boiler} = \dot{m}_{Orc} \cdot (h_7 - h_{6a})$$

$$Q_{Cond} = \dot{m}_{Total} \cdot (h_4 - h_3)$$

$$W_{Turbine} = \dot{m}_{Orc} \cdot (h_7 - h_{8a})$$

$$W_{Comp} = -W_{Turbine}$$

Proses dalam kompresor melibatkan efisiensi isentropik. Namun, pencapaian efisiensi isentropik dalam kondisi aktual kompresor sulit dilakukan karena efisiensi isentropik kompresor mewakili efisiensi optimal (ideal) yang dapat dicapai oleh kompresor pada kondisi tekanan dan suhu tertentu. Dalam penelitian ini, kompresor terhubung dengan turbin melalui poros, sehingga kerja kompresor sama dengan kerja turbin.

5. Analisis Eksergi

Metode analisis eksergi digunakan untuk mengevaluasi sistem refrigerasi dengan mengintegrasikan hukum pertama dan kedua termodinamika dalam kondisi lingkungan tertentu. Dalam penerapannya, metode analisis eksergi telah banyak digunakan untuk mengevaluasi sistem refrigerasi dan terbukti menjadi pendekatan yang sangat efisien serta mudah dalam merumuskan hukum kedua termodinamika. Secara prinsip, analisis eksergi menghubungkan konsep konservasi energi dan konversi energi.

Hukum pertama termodinamika memiliki keterbatasan dalam menggambarkan potensi kerja, jumlah maksimum energi, atau energi yang dapat digunakan dalam suatu sistem atau medium, serta kehilangan energi, ketidakefisienan, dan degradasi energi. Pada kenyataannya, semua sistem mengalami ketidaksempurnaan, kehilangan energi, dan ketidakefisienan, sehingga

diperlukan pendekatan yang lebih luas dari sekadar hukum pertama termodinamika. Salah satu cara untuk mengatasi keterbatasan ini adalah dengan menerapkan hukum kedua termodinamika sebagai pendekatan utama. Berbeda dengan hukum pertama, hukum kedua mempertimbangkan tidak hanya kuantitas energi, tetapi juga kualitasnya. Prinsip ini menyatakan bahwa dalam proses alami, energi akan selalu cenderung bergerak menuju keadaan dengan kualitas yang lebih rendah (Dincer, 2018). Keseimbangan eksergi dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$\frac{dE_{x_{cv}}}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) Q_r - \left(W - P_0 \frac{dV_{cv}}{dT}\right) + \sum_{in} \dot{m}\psi - \sum_{out} \dot{m}\psi - \dot{E}_{x_{dest}}$$

Dalam keadaan kondisi *steady state* :

$$\dot{E}_{x_{destruction}} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) Q_r - W + \sum_{in} \dot{m}\psi - \sum_{out} \dot{m}\psi$$

Penerapan persamaan untuk setiap komponen dalam sistem ORC-VCR terintegrasi:

$$\dot{E}_{d_{pump}} = T_0 * \dot{m}_{ORC} * (s[6_a] - s[4])$$

$$\dot{E}_{d_{Boiler}} = T_0 * \left(-\frac{Q_{Boiler}}{T_{Boiler}}\right) + \dot{m}_{ORC} * (s[7] - s[6_a])$$

$$\dot{E}_{d_{Turbine}} = T_0 * \dot{m}_{ORC} * (s[8_a] - s[7])$$

$$\dot{E}_{d_{Evap}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{Evap}}\right) * Q_{Evap} + T_0 * \dot{m}_{VCR} * (s[1] - s[5])$$

$$\dot{E}_{d_{Comp}} = T_0 * \dot{m}_{VCR} * (s[2_a] - s[1])$$

$$\dot{E}_{d_{Mix\ Chamber}} = T_0 * (\dot{m}_{Total} * s[3] - \dot{m}_{VCR} * s[2_a] - \dot{m}_{ORC} * s[8_a])$$

$$\dot{E}_{d_{Cond}} = T_0 * \dot{m}_{Total} * \left(\left(\frac{h[3] - h[4]}{T_{Cond}}\right) - s[3] - s[4]\right)$$

$$\dot{E}_{d_{Eks\ Valve}} = T_0 * \dot{m}_{VCR} * (s[5] - s[4])$$

$$\dot{E}_{d_{Total}} = \dot{E}_{d_{pump}} + \dot{E}_{d_{Boiler}} + \dot{E}_{d_{Turbine}} + \dot{E}_{d_{Evap}} + \dot{E}_{d_{Comp}} + \dot{E}_{d_{Mix\ Chamber}} + \dot{E}_{d_{Cond}} + \dot{E}_{d_{Eks\ Valve}}$$

Program komputer Engineering Equation Solver (EES) digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam berbagai kondisi operasional serta menganalisis dampak berbagai parameter operasional terhadap kinerja sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

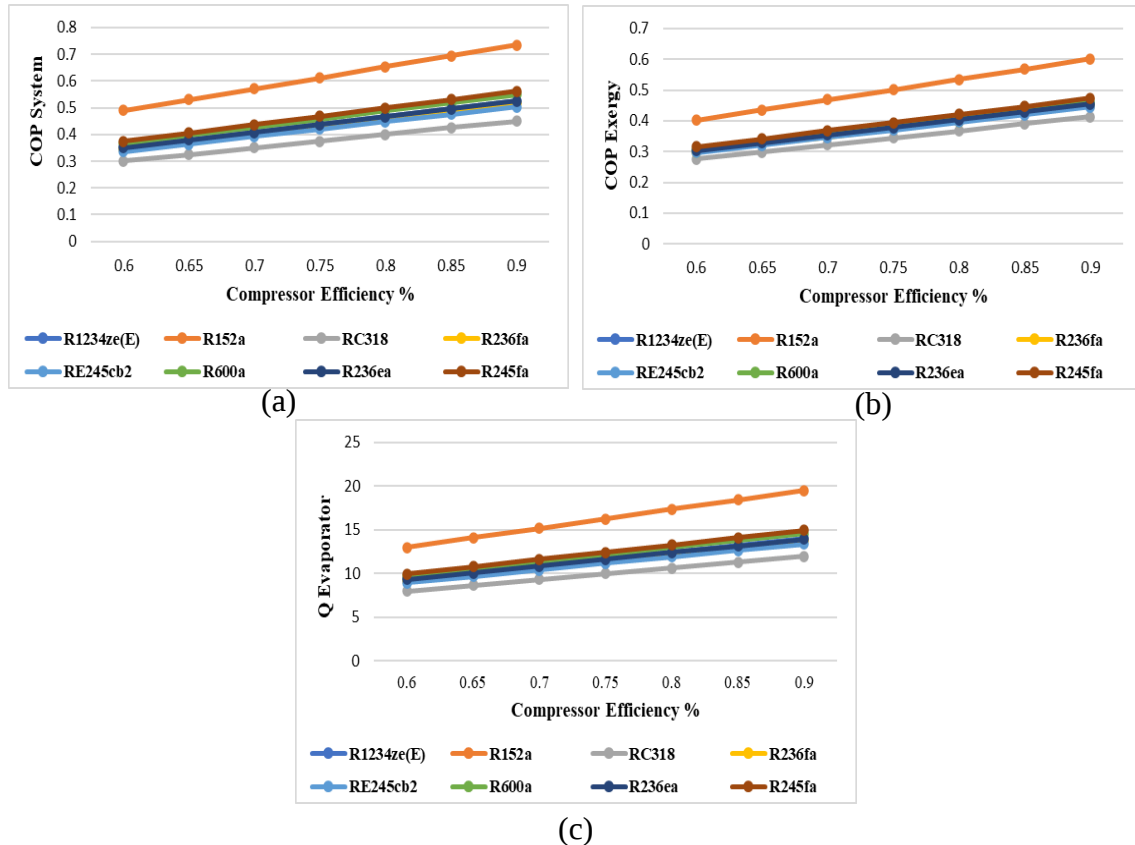
Dalam penelitian ini, dilakukan analisis terhadap sistem pendingin berbasis *Organic Rankine Cycle* (ORC) yang terintegrasi dengan siklus kompresi uap (VCR), dengan memanfaatkan konsep energi baru dan terbarukan menggunakan fluida kerja yang mampu beroperasi pada suhu rendah. Analisis ini bertujuan untuk memanfaatkan energi panas buangan dari gas buang mesin, yang seharusnya terbuang, dan menggunakannya kembali untuk menghasilkan uap di boiler sistem pendingin ORC-VCR.

Tabel 3. Analisis Kinerja Sistem ORC-VCR Terintegrasi

Refrigerant	COP System	COP Exergy	Q Evap (kW)	Q Kon (kW)	Ed Total
R1234ze(E)	0.4383	0.3749	11.64	38.59	14.46
R152a	0.6122	0.5017	16.26	43.2	18.42
RC318	0.3754	0.3446	9.968	36.81	12.91

R236fa	0.4301	0.3731	11.42	38.21	14.11
RE245cb2	0.42	0,3704	11.15	37.88	13.83
R600a	0.4577	0.3839	12.15	38.95	14.75
R236ea	0.4376	0.3789	11,62	38.34	14.22
R245fa	0.4682	0.3943	12.43	39.11	14.88

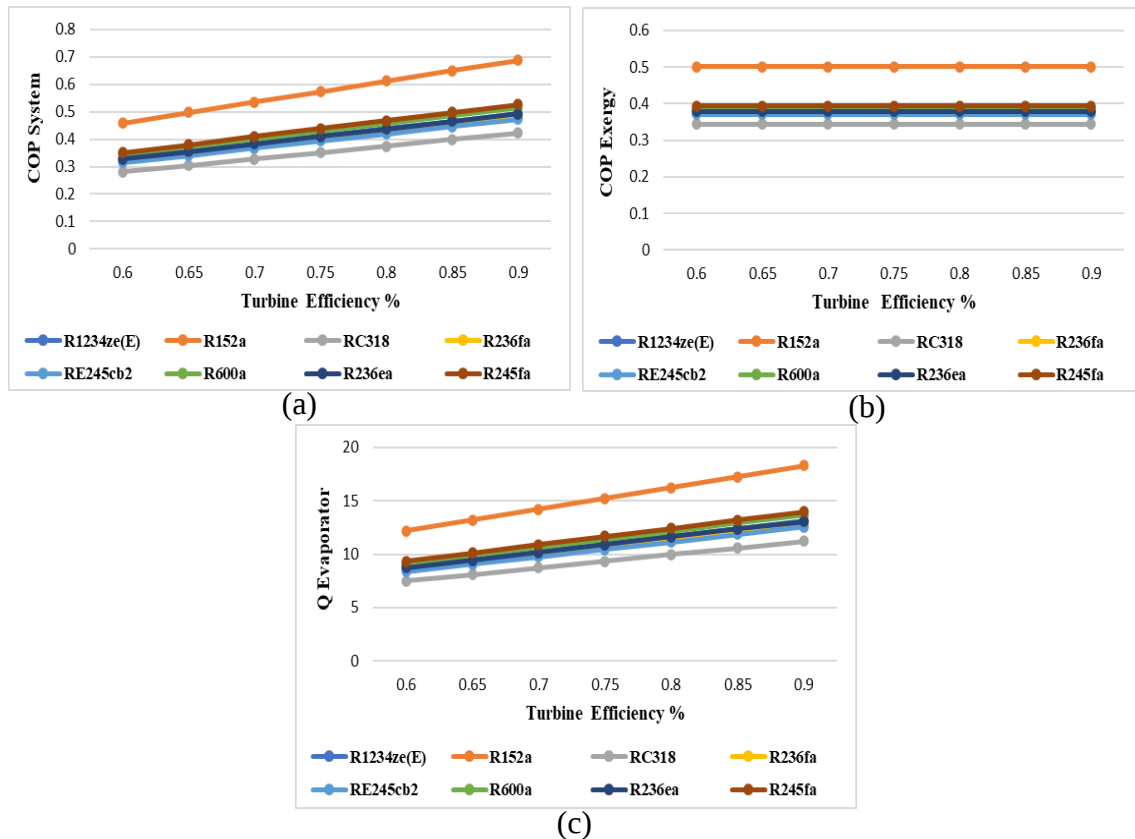
Hasil dalam Tabel 3 di atas menunjukkan bahwa di antara semua jenis refrigeran, R152a memiliki COP sistem tertinggi, COP eksergi tertinggi, kapasitas pendinginan tertinggi, kapasitas kondensor tertinggi, dan total destruksi eksergi tertinggi. Nilai-nilai tersebut masing-masing adalah 0,6122, 0,5017, 16,26 kW, 43,2 kW, dan 18,42 kW.



Gambar 2. (a) Pengaruh Efisiensi Kompresor terhadap COP Sistem, (b) Pengaruh Efisiensi Kompresor terhadap COP Eksergi, (c) Pengaruh Efisiensi Kompresor terhadap Kapasitas Pendinginan

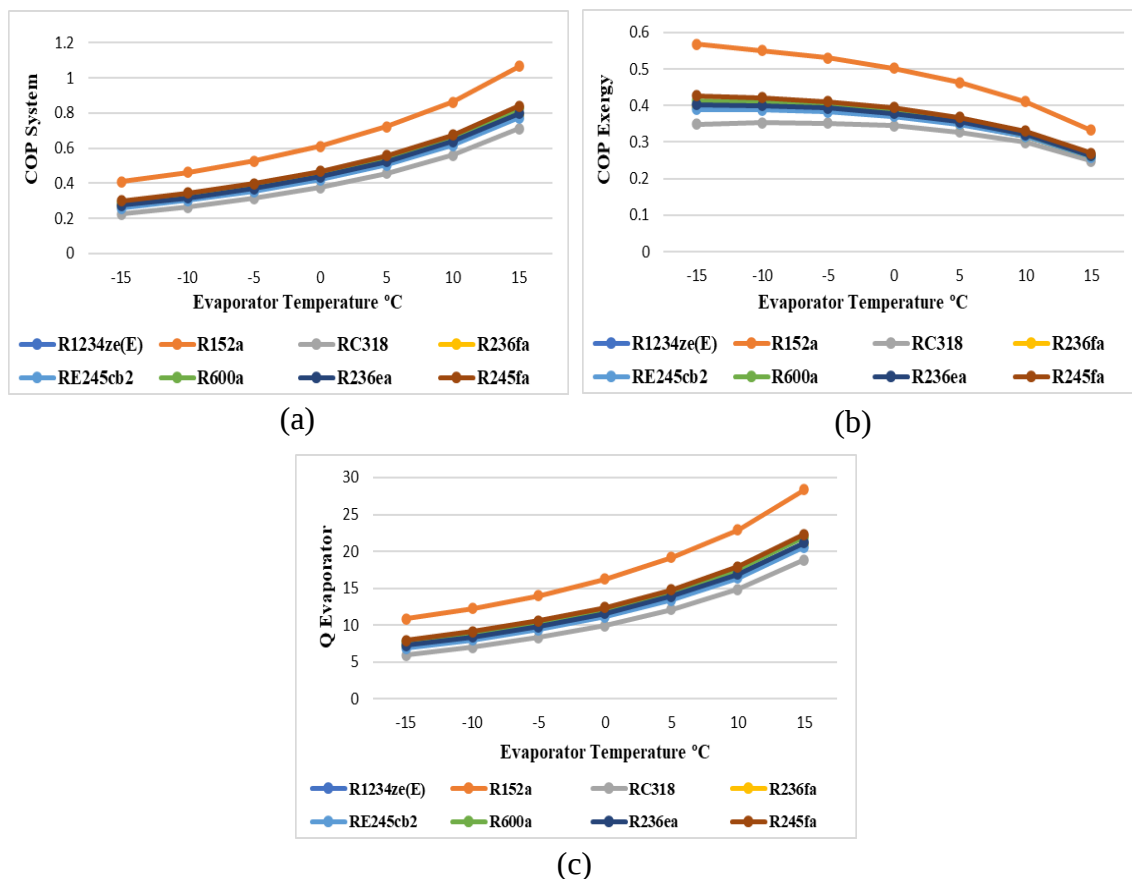
Berdasarkan gambar 2 (a), pengaruh efisiensi kompresor terhadap COP gabungan sangat jelas, karena semakin tinggi efisiensi kompresor, konsumsi daya kompresor berkurang, sehingga meningkatkan rasio pendinginan terhadap energi yang masuk. Dalam grafik, peningkatan COP gabungan sejalan dengan peningkatan kapasitas pendinginan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 (c), karena COP gabungan berbanding lurus dengan kapasitas pendinginan. Hal ini juga berlaku untuk COP eksergi sistem secara keseluruhan, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2 (b), yang juga mengalami peningkatan.

R152a memiliki entalpi penguapan yang lebih tinggi dibandingkan refrigeran lainnya dalam kondisi tekanan dan temperatur yang sama. Dengan entalpi penguapan yang lebih tinggi, lebih banyak energi yang diserap oleh refrigeran di dalam evaporator. Selain itu, R152a memiliki rasio tekanan yang lebih rendah dibandingkan refrigeran lainnya. Rasio tekanan yang lebih rendah menyebabkan beban kerja kompresor berkurang, sehingga mengurangi konsumsi daya dan meningkatkan COP. Hal ini menjelaskan mengapa R152a menunjukkan COP gabungan, COP eksergi, dan kapasitas pendinginan tertinggi di antara refrigeran yang dianalisis.



Gambar 3. (a) Pengaruh Efisiensi Turbin terhadap COP Sistem, (b) Pengaruh Efisiensi Turbin terhadap COP Eksergi, (c) Pengaruh Efisiensi Turbin terhadap Kapasitas Pendinginan

Berdasarkan gambar 3 (a) di atas, menunjukkan pengaruh efisiensi turbin terhadap COP kombinasi, efisiensi turbin dalam ORC menentukan jumlah daya keluaran dari ekspansi uap kerja sistem. Semakin tinggi nya efisiensi turbin, maka semakin tinggi daya yang dihasilkan subsistem ORC. Hal ini, dapat berfungsi untuk menggerakkan kompresor. Karena kompresor membutuhkan kerja untuk beroperasi, peningkatan efisiensi turbin dapat mengurangi konsumsi energi eksternal sehingga kompresor lebih sedikit membutuhkan konsumsi daya yang akhirnya dapat meningkatkan COP kombinasi. Dengan begitu, secara otomatis meningkatkan kapasitas pendinginan seperti pada gambar 3 (c). COP eksergi tidak secara langsung dipengaruhi oleh efisiensi turbin. Namun, COP eksergi akan meningkat seiring dengan kapasitas pendinginan yang meningkat. Karena itu peningkatan efisiensi turbin tidak secara langsung meningkatkan COP eksergi seperti pada gambar 3 (b). sama seperti Ketika efisiensi kompresor di variasikan, R152a tetap menjadi refrigeran yang memiliki COP kombinasi, COP eksergi dan kapasitas pendinginan yang paling tinggi karena sifat termodinamika nya yang paling baik.



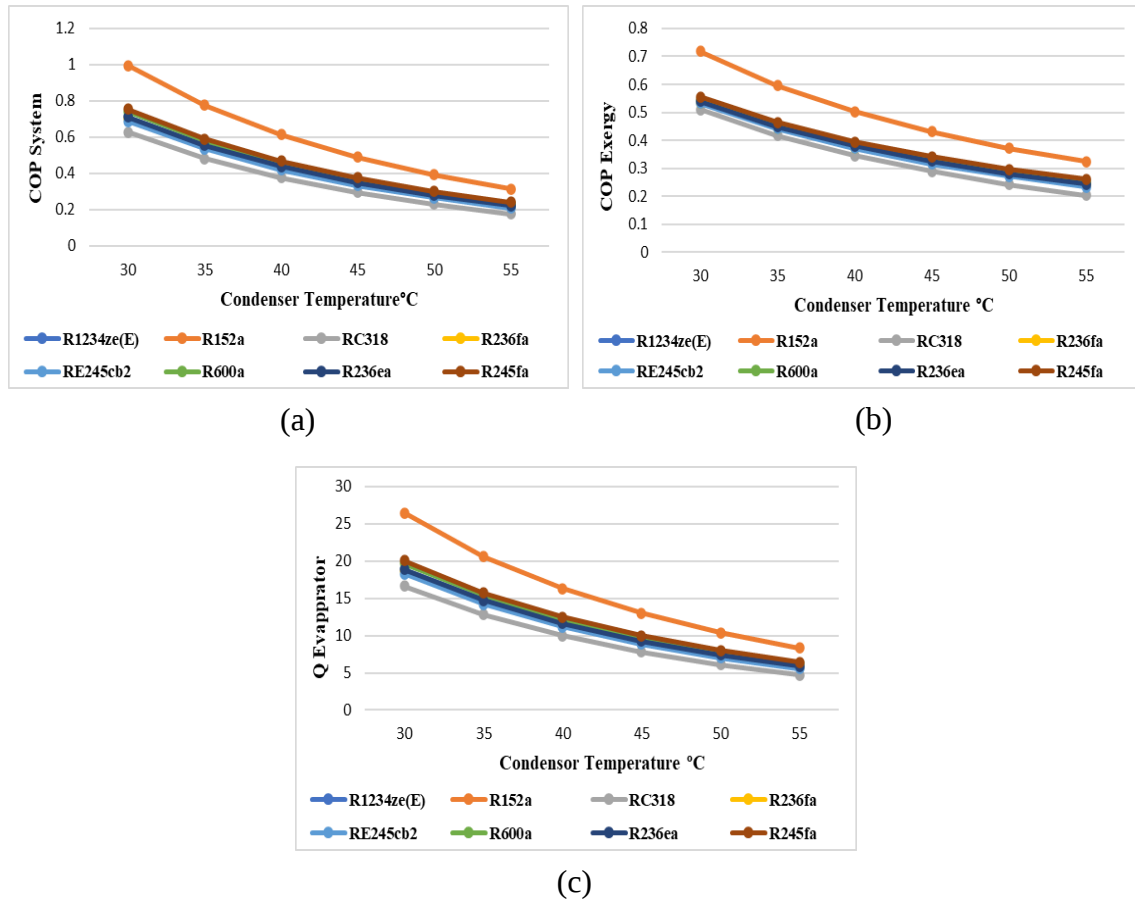
Gambar 4. (a) Pengaruh temperatur evaporator terhadap COP Sistem, (b) Pengaruh Temperatur Evaporator Terhadap COP Eksergi, (c) Pengaruh Temperatur Evaporator Terhadap Kapasitas Pendinginan

Berdasarkan gambar 4 (a) pengaruh temperatur evaporator terhadap COP kombinasi. COP kombinasi meningkat seiring meningkatnya suhu evaporator, hal ini disebabkan karena terjadinya penurunan rasio tekanan yang membuat kompresor bekerja lebih ringan, energi yang dibutuhkan untuk mengompresi refrigeran berkurang. Hal ini juga, meningkatkan efisiensi isentropik kompresor, proses kompresi lebih dekat ke kondisi reversibel.

Ketika temperatur evaporator meningkat, perbedaan temperatur antara refrigeran dan lingkungan berkurang, sehingga lebih banyak energi panas yang dapat diserap oleh refrigeran. Yang menyebabkan entalpi perubahan fase refrigeran meningkat sehingga jumlah energi yang diserap juga bertambah seperti pada gambar 4 (c). Refrigeran dengan entalpi penguapan tinggi cenderung memiliki kapasitas pendinginan yang lebih besar.

Di dalam grafik R152a terlihat yang paling efisien, ini berkaitan dengan dengan massa molekul yang dimilikinya yaitu sebesar 66,05 g/mol paling rendah dibandingkan yang lain. Massa molekul R152a yang paling ringan tersebut membuatnya lebih mudah dikompresi sehingga mengurangi beban kompresor. R152a memiliki ikatan C-F dan C-H sementara refrigeran lainnya seperti R236fa dan R245fa memiliki lebih banyak atom fluor (C-F₃, C-F₂). Ikatan C-H lebih lemah dibandingkan C-F, sehingga molekul R152a lebih mudah menguap dan mengembun, meningkatkan efisiensi perpindahan panas.

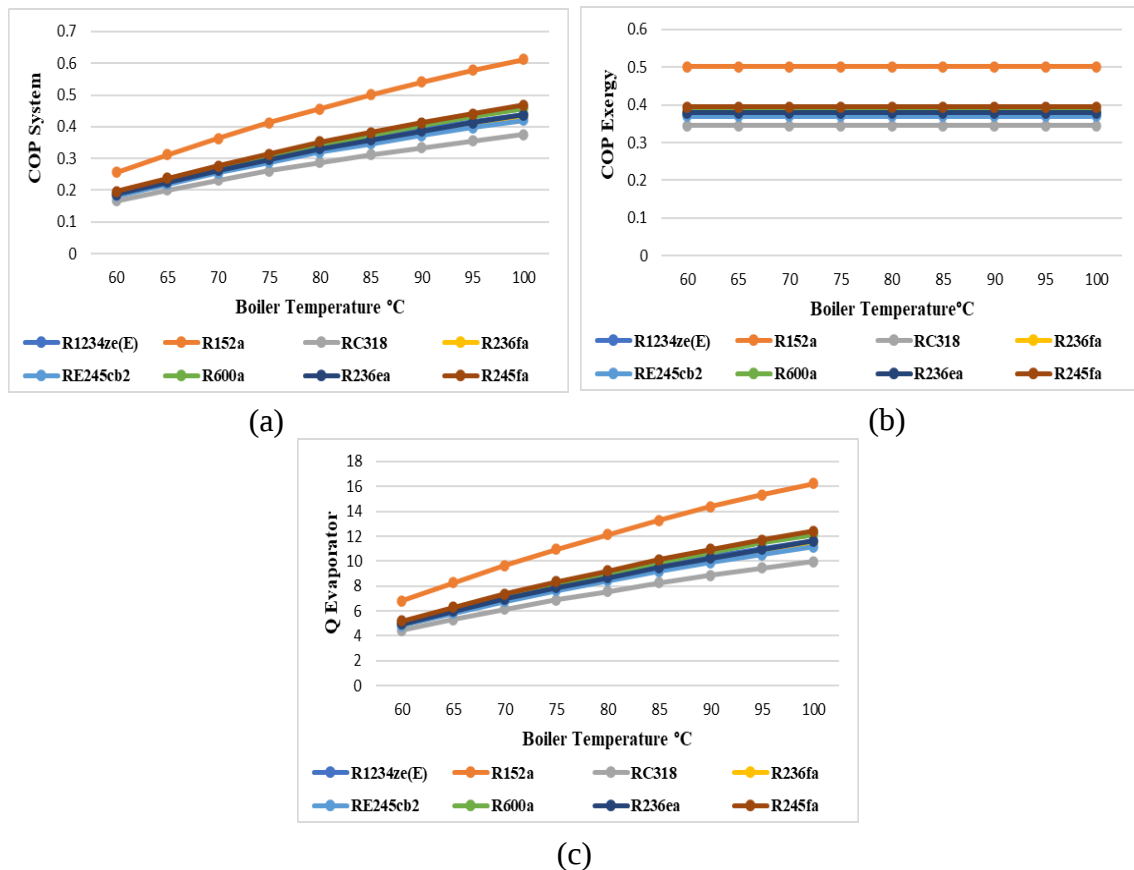
Dalam sistem gabungan ORC-VCR bagian ORC bertanggung jawab untuk menghasilkan daya bagi kompresor. Jika suhu evaporator ditingkatkan, suhu yang lebih tinggi dapat mengurangi efisiensi konversi energi dalam ORC. Dampaknya, jumlah eksergi yang digunakan untuk menghasilkan efek pendinginan menjadi lebih besar daripada peningkatan pendinginan itu sendiri. Dan, perbedaan suhu antara refrigeran dan lingkungan sekitar menjadi lebih kecil menyebabkan transfer panas kurang efisien, terjadi peningkatan entropi dalam sistem, dan bertambahnya kerusakan eksergi karena proses semakin tidak reversibel. Akibatnya, COP eksergi sistem berkurang seperti pada gambar 4 (b).



Gambar 5. (a) Pengaruh temperatur Kondensor terhadap COP Sistem, (b) Pengaruh Temperatur Kondensor Terhadap COP Eksergi, (c) Pengaruh Temperatur Kondensor Terhadap Kapasitas Pendinginan

Berdasarkan gambar 5 (a) pengaruh temperatur kondensor terhadap COP kombinasi. %, temperatur kondensor memiliki pengaruh pada subsistem ORC-VCR (Cui et al., 2022). Dan dibuktikan dengan penelitian bahwa temperatur kondensor memiliki dampak yang signifikan terhadap kinerja sistem ORC-VCR, ditunjukkan dengan menurunnya COP sistem seiring meningkatnya temperatur kondensor (Li et al., 2013). efisiensi mengukur seberapa efektif energi panas termal yang tersedia dapat dikonversi menjadi kerja dan memperhitungkan irreversibilitas dalam sistem (Yunus A. Cengel, 2006). Ketika suhu kondensor meningkat, refrigeran melepaskan panas karena perbedaan temperatur yang lebih tinggi dari lingkungan. Yang menyebabkan tekanan kondensasi meningkat, sehingga kerja kompresor meningkat dan daya yang dikonsumsi juga bertambah. Ketika daya konsumsi bertambah menyebabkan COP kombinasi menurun karena sistem kurang efisien, kerja kompresor yang meningkat, terjadi peningkatan kerusakan eksergi pada kompresor dan kondensor, karena lebih banyak eksergi terbuang dalam bentuk panas yang tidak bisa digunakan kembali atau irreversibel. Hal ini, artinya COP eksergi keseluruhan sistem menurun seperti pada gambar 5 (b). Ketika suhu kondensor meningkat, tekanan kondensasi juga meningkat menyebabkan perbedaan tekanan yang semakin

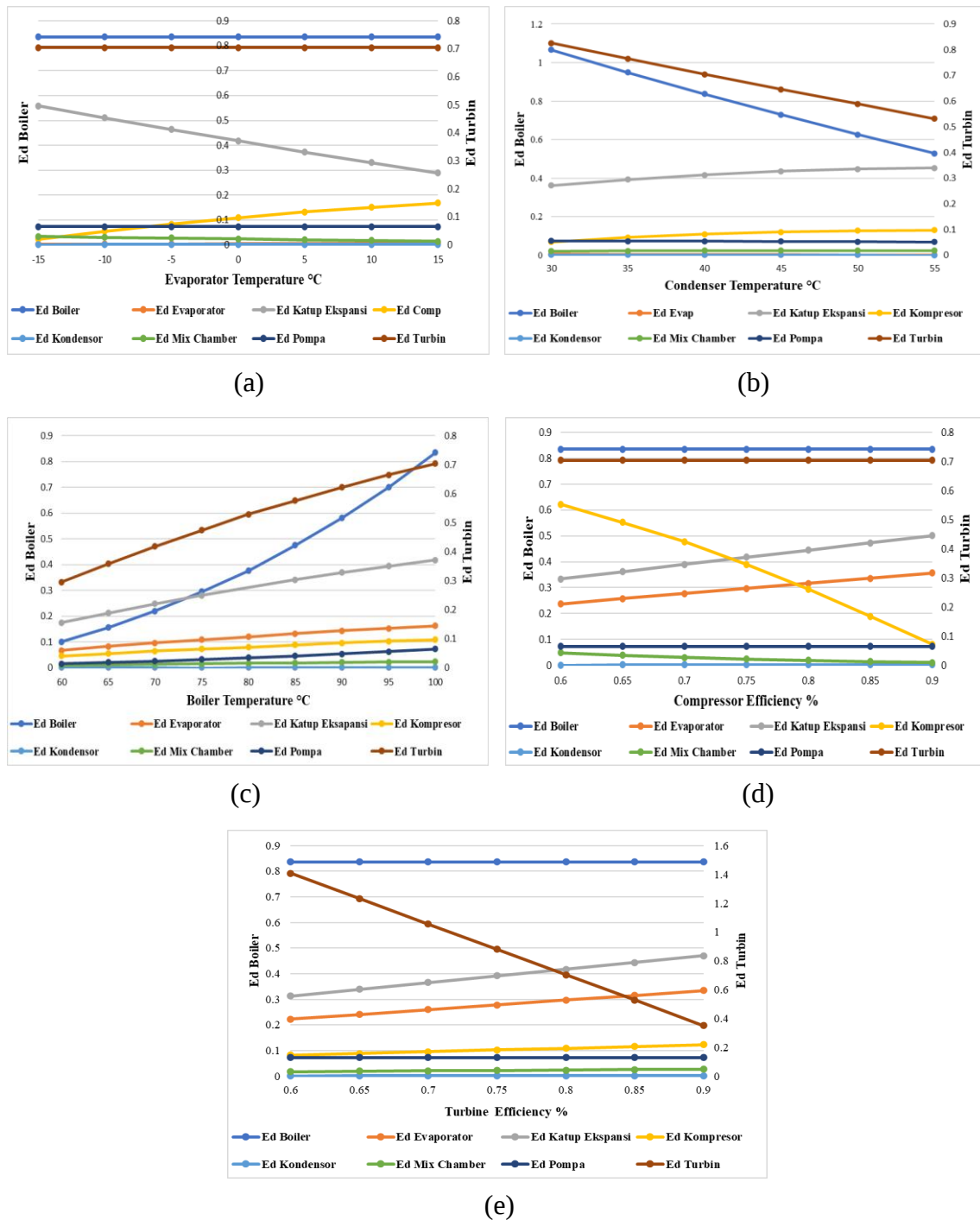
besar antara kondensor dan evaporator. Mengakibatkan, kerja kompresor meningkat dan efisiensi refrigeran dalam menyerap panas dalam evaporator menurun. Penurunan tersebut yang menyebabkan kapasitas pendinginan sistem juga menurun dapat di lihat pada gambar 5 (c). Refrigeran dengan entalpi penguapan tinggi R236ea cenderung memiliki kerusakan kondensor lebih tinggi karena lebih banyak energi yang harus dilepaskan saat kondensasi. Refrigeran seperti R1234ze(E) menunjukkan kerugian eksergi lebih kecil, menunjukkan efisiensi termodinamika yang lebih baik dalam proses kondensasi.



Gambar 6. (a) Pengaruh Temperatur Boiler terhadap COP Sistem, (b) Pengaruh Temperatur Boiler Terhadap COP Eksergi, (c) Pengaruh Temperatur Boiler Terhadap Kapasitas Pendinginan

Berdasarkan gambar 6 (a) pengaruh temperatur boiler terhadap kerusakan COP kombinasi. COP (*Coefficient of Performance*) kombinasi merupakan rasio antara efek pendinginan dengan energi yang digunakan dalam siklus kombinasi ORC-VCR. Seiring dengan meningkatnya temperatur boiler, lebih banyak energi termal yang tersedia untuk diubah menjadi kerja dalam siklus ORC, yang meningkatkan efisiensi kompresi dalam siklus refrigerasi. Akibatnya, COP Kombinasi meningkat karena lebih banyak energi termal yang dimanfaatkan secara efektif dalam sistem. Namun, pada grafik COP Eksergi seperti pada gambar 6 (b). COP eksergi tidak berubah karena efisiensi pemanfaatan eksergi tetap konstan, yang berarti sistem tetap memiliki batasan dalam mengonversi eksergi menjadi kerja, meskipun lebih banyak energi panas tersedia. Pada gambar 6 (c) kapasitas pendinginan meningkat seiring kenaikan temperatur boiler. Ini karena kenaikan temperatur boiler meningkatkan perbedaan entalpi antara fase cair dan gas refrigeran, sehingga panas laten yang dapat diserap oleh refrigeran juga meningkat.

R152a memiliki sifat termodinamika yang lebih baik, efisiensi lebih tinggi dalam ekspansi dan kompresi. R152a memiliki massa molekul paling rendah yaitu 66,05 g/mol. Refrigeran dengan massa molekul lebih besar cenderung memiliki perbedaan entalpi yang lebih tinggi saat mengalami perubahan fasa. Namun, efisiensi pemanfaatan eksergi lebih rendah, karena lebih banyak eksergi yang hilang dalam proses ekspansi. Refrigeran dengan massa molekul kecil umumnya memiliki konduktivitas termal lebih tinggi, sehingga lebih efisien dalam menyerap dan melepaskan panas. Sehingga R152a menjadikannya refrigeran terbaik di antara yang lain.



Gambar 7. (a) Pengaruh Temperatur Evaporator Terhadap Kerusakan Eksergi Sistem, (b) Pengaruh Temperatur Kondensor Terhadap Kerusakan Eksergi Sistem, (c) Pengaruh Temperatur Boiler Terhadap Kerusakan Eksergi Sistem, (d) Pengaruh Efisiensi Kompresor Terhadap Kerusakan Eksergi Sistem, (e) Pengaruh Efisiensi Turbin Terhadap Kerusakan Eksergi Sistem

Eksergi adalah kerja teoritis maksimum yang dapat diperoleh keseluruhan sistem yang terdiri dari sistem dan lingkungan. Ketika sistem mencapai kesetimbangan termal dengan lingkungannya (*Dead state*) (Moran & Shapiro, 2021). Kerusakan eksergi atau *Exergy Destruction (Ed)* komponen yang mencerminkan ketidaksempurnaan kinerja komponen dipisahkan dengan mengurangi kerusakan eksergi refrigeran dari kerusakan eksergi sistem. Kerusakan eksergi pada kompresor sepenuhnya disebabkan oleh kompresor itu sendiri karena proses kompresi bersifat reversibel ketika efisiensi kompresor 100% (Cui et al., 2022). Peningkatan temperatur boiler menyebabkan kerusakan eksergi yang lebih besar di berbagai komponen siklus refrigerasi (Dai et al., 2009). Kerugian eksergi menurun seiring dengan kenaikan suhu evaporator. Hal ini dapat dijelaskan bahwa jika suhu evaporasi meningkat, perpindahan panas antara refrigeran yang masuk ke dalam tabung evaporator dan media yang didinginkan juga meningkat, yang pada akhirnya meningkatkan efek refrigerasi sehingga kerugian eksergi berkurang (Ahamed et al., 2010). Pelepasan dan penambahan panas berbeda untuk setiap jenis refrigeran, yang menyebabkan perubahan efisiensi energi dalam sistem. Kerugian eksergi di berbagai komponen sistem tidaklah sama. Suhu dan tekanan dinotasikan sebagai T_0 dan P_0 . Eksergi dikonsumsi atau dihancurkan akibat entropi yang dihasilkan tergantung pada proses yang terjadi (Şahin et al., 2006). Suhu kondensor memiliki pengaruh besar terhadap eksergi dalam sistem kompresi uap (Kabul et al., 2008). Suhu evaporator yang lebih tinggi meningkatkan COP sistem karena mengurangi pekerjaan kompresor yang dibutuhkan. Sistem ini menunjukkan peningkatan COP yang signifikan dengan kenaikan suhu evaporator dari -15°C hingga 15°C , dengan peningkatan sekitar 179,7% untuk semua fluida kerja (Kamal et al., 2023).

Gambar 6 (a),(b),(c),(d),(e) menunjukkan nilai kerusakan eksergi atau *exergy destruction (Ed)* untuk setiap komponen yang dipengaruhi oleh temperatur evaporator, temperatur kondensor, temperatur boiler, efisiensi kompresor dan efisiensi turbin. Dalam siklus termodinamika pada sistem refrigerasi kompresi uap maupun rankine organik. Terjadinya perubahan entropi disebabkan oleh perubahan fase refrigeran dalam evaporator, kondensor, turbin dan boiler. Tekanan dan temperatur setelah proses kompresi dan transfer panas. Hal ini semua yang dapat menyebabkan terjadinya irreversibilitas. Irreversibilitas merupakan penyebab terjadinya kerusakan eksergi di setiap komponen dalam sistem. Sistem refrigerasi kompresi uap maupun rankine organik selalu mengalami pertukaran panas, sehingga akan selalu ada rugi-rugi panas yang terjadi yang artinya sistem tidak dapat sepenuhnya mencapai kesetimbangan termal antara sistem dengan lingkungan. Disebabkan karena kondisi ruang yang selalu berfluktuasi, oleh karena itu analisis energi dan eksergi dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem ORC-VCR dalam hal ini menggunakan refrigeran R152a karena sudah terbukti menjadi yang terbaik di antara yang lain.

SIMPULAN

Dalam penelitian ini, sistem *organic rankine cycle* (ORC) yang diintegrasikan dengan *vapor compression refrigeration* (VCR) dianalisis untuk dimanfaatkan dalam aplikasi pada panas limbah mesin pendingin keramik. Dalam pemanfaatan panas limbah mesin pendingin keramik, dari sisi *performance* sistem, refrigeran yang paling optimal adalah R152a. Selain performanya yang paling optimal, R152a menjadi fluida yang paling sedikit mengalami kerusakan eksergi secara keseluruhan sistem. Performa kinerja subsistem VCR bergantung pada kinerja subsistem ORC. Karena temperatur boiler menentukan kinerja keseluruhan. Efisiensi kompresor tidak secara langsung mempengaruhi subsistem ORC. Artinya tinggi rendahnya efisiensi kompresor tidak menyebabkan efisiensi subsistem ORC menurun.

DAFTAR RUJUKAN

- Ahamed, J. U., Saidur, R., & Masjuki, H. H. (2010). *Thermodynamic Performance Analysis of R-600 and R-600a As Refrigerant*. 5(1), 11–18. <http://ejum.fsktm.um.edu.my>
- Ahamed, J. U., Saidur, R., & Masjuki, H. H. (2011). A review on exergy analysis of vapor

- compression refrigeration system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1593–1600. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.039>
- Aneke, M., Agnew, B., Underwood, C., & Menkiti, M. (2012). Thermodynamic analysis of alternative refrigeration cycles driven from waste heat in a food processing application. *International Journal of Refrigeration*, 35(5), 1349–1358. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.04.008>
- Ashwni, & Sherwani, A. F. (2022). Analysis of solar energy driven organic Rankine cycle-vapor compression refrigeration system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 35(September), 101477. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101477>
- Bahrami, S., & Sheikhi, A. (2015). *An Optimal Feed-In-Tariff Policy for Renewable Energies Using A Markov Model*. 1(1), 1–8.
- Bu, X., Yu, F., Fu, Z., & Wang, F. (2013). Stability analysis of high-order iterative learning control for a class of nonlinear switched systems. *Abstract and Applied Analysis*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/684642>
- Cui, M., Wang, B., Wei, F., & Shi, W. (2022). A modified exergy analysis method for vapor compression systems: Splitting refrigerant exergy destruction. *Applied Thermal Engineering*, 201(PA), 117728. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117728>
- Dai, Y., Wang, J., & Gao, L. (2009). Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 576–582. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.10.018>
- Dincer, I. (2018). Exergy. In *Comprehensive Energy Systems: Volumes 1-5* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00106-1>
- Han, W., Chen, Q., Sun, L., Ma, S., Zhao, T., Zheng, D., & Jin, H. (2014). Experimental studies on a combined refrigeration/power generation system activated by low-grade heat. *Energy*, 74(C), 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.097>
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D. L., & Zachos, J. C. (2008). Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, 2(1), 217–231. <https://doi.org/10.2174/1874282300802010217>
- Kabul, A., Kizilkan, Ö., & Yakut, A. K. (2008). Performance and exergetic analysis of vapor compression refrigeration system with an internal heat exchanger using a hydrocarbon, isobutane (R600a). *International Journal of Energy Research*, 32(9), 824–836. <https://doi.org/10.1002/er.1396>
- Kamal Singh Rawat, Prabhakar Bhandari, V. S. B. (2023). *Thermodynamic Analysis of Combined ORC-VCR system with Recuperator and Reheater*. 6.
- Kanoğlu, M., Çarpınlioğlu, M. Ö., & Yildirim, M. (2004). Energy and exergy analyses of an experimental open-cycle desiccant cooling system. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 24, Issues 5–6, pp. 919–932). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.10.003>
- Li, H., Bu, X., Wang, L., Long, Z., & Lian, Y. (2013). Hydrocarbon working fluids for a Rankine cycle powered vapor compression refrigeration system using low-grade thermal energy. *Energy & Buildings*, 65, 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.012>
- Masson-Delmotte, V. (2023). *Climate change 2021 : the physical science basis : Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157889>
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2021). FUNDAMENTALS OF ENGINEERING THERMODYNAMICS. In *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems* (Fifth Edit). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821602-6.00004-3>
- Şahin, A. D., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2006). Thermodynamic analysis of wind energy. *International Journal of Energy Research*, 30(8), 553–566. <https://doi.org/10.1002/er.1163>
- Saleh, B. (2016). Parametric and working fluid analysis of a combined organic Rankine-vapor compression refrigeration system activated by low-grade thermal energy. *Journal of Advanced Research*, 7(5), 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.06.006>
- Saleh, B., Aly, A. A., Alogla, A. F., Aljuaid, A. M., Alharthi, M. M., Ahmed, K. I. E., & Hamed, Y. S. (2019). Performance investigation of organic Rankine-vapor compression refrigeration integrated system activated by renewable energy. *Mechanics and Industry*,

- 20(2). <https://doi.org/10.1051/meca/2019023>
- Sun, W., Yue, X., & Wang, Y. (2017). Exergy efficiency analysis of ORC (Organic Rankine Cycle) and ORC-based combined cycles driven by low-temperature waste heat. *Energy Conversion and Management*, 135, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.042>
- Vankeirsbilck, I., Vanslambrouck, B., Gusev, S., & De Paepe, M. (2011). Energetical, Technical and Economical considerations by choosing between a Steam and an Organic Rankine Cycle for Small Scale Power Generation. *First International Seminar on ORC Power Systems ORC 2011*.
- Wahile, G. S., Malwe, P. D., & Kolhe, A. V. (2020). Waste heat recovery from exhaust gas of an engine by using a phase change material. *Materials Today: Proceedings*, 28, 2101–2107. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.247>
- Wang, H., Peterson, R., Harada, K., Miller, E., Ingram-goble, R., Fisher, L., Yih, J., & Ward, C. (2011). Performance of a combined organic Rankine cycle and vapor compression cycle for heat activated cooling. *Energy*, 36(1), 447–458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.020>
- Yue, C., You, F., & Huang, Y. (2016). Thermal and economic analysis of an energy system of an ORC coupled with vehicle air conditioning. *International Journal of Refrigeration*, 64, 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.01.005>
- Yunus A. Cengel, M. A. B. (2006). Thermodynamics an engineering approach. In *Laws of Thermodynamic* (fifth edit, p. 988).