

STUDI KOMPARASI TERMODINAMIKA DAN PEMILIHAN FLUIDA KERJA OPTIMAL PADA *ORGANIC RANKINE CYCLE* (ORC) BERBASIS KOMPUTASI *HELMHOLTZ EQUATION OF STATE* MENGGUNAKAN PUSTAKA *COOLPROP*

Rendy Satriawan¹, Primawati², Arwizet K³, Andre Kurniawan⁴

Universitas Negeri Padang^{1,2,3,4}

e-mail: rendysatriawan660@gmail.com

Diterima: 14/07/2026; Direvisi: 20/07/2026; Diterbitkan: 28/07/2026

ABSTRAK

Pemanfaatan sumber panas bersuhu rendah hingga menengah masih menghadapi kendala karena efisiensi siklus *Rankine* konvensional berbasis air relatif rendah. Meskipun *Organic Rankine Cycle* (ORC) telah banyak dikembangkan sebagai solusi konversi energi panas suhu rendah, kajian komparatif mengenai pemilihan *fluida kerja* menggunakan pendekatan komputasi berbasis *Helmholtz Equation of State* (EOS) melalui pustaka *CoolProp* masih terbatas. Penelitian ini penting untuk memberikan dasar ilmiah dalam menentukan *fluida kerja* yang mampu menghasilkan kinerja termodinamika optimal sekaligus memenuhi aspek operasional. Penelitian bertujuan membandingkan performa termodinamika lima *fluida kerja*, yaitu R245fa, R1233zd(E), Isobutane, R134a, dan *n*-Pentane, pada sistem *Organic Rankine Cycle* subkritis dengan temperatur sumber panas 120°C. Metode yang digunakan berupa simulasi komputasi menggunakan *Python* dan pustaka *CoolProp* berbasis *Helmholtz Equation of State* untuk menghitung parameter termodinamika setiap *fluida kerja*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan *fluida kerja* berpengaruh signifikan terhadap efisiensi termal, kerja bersih, dan kelayakan operasi sistem. *n*-Pentane memberikan performa keseluruhan terbaik, sedangkan R1233zd(E) menjadi alternatif yang kompetitif untuk aplikasi dengan persyaratan keselamatan tinggi. Sebaliknya, R134a tidak layak digunakan pada kondisi operasi yang dikaji karena melampaui batas kritisnya. Temuan ini menegaskan bahwa karakteristik termodinamika *fluida kerja* merupakan faktor utama dalam optimasi kinerja *Organic Rankine Cycle* berbasis sumber panas bersuhu rendah.

Kata Kunci: *Organic Rankine Cycle, Coolprop, Persamaan Keadaan Helmholtz, Fluida Kerja, Kinerja Termodinamika.*

ABSTRACT

The utilization of low- to medium-temperature heat sources remains constrained by the relatively low efficiency of conventional water-based Rankine cycles. Although the *Organic Rankine Cycle* (ORC) has been widely developed as an effective technology for converting low-grade heat into electricity, comparative studies on *working fluid* selection using a computational approach based on the *Helmholtz Equation of State* (EOS) through the *CoolProp* library remain limited. This study is important because it provides a scientific basis for identifying *working fluids* capable of delivering optimal thermodynamic performance while satisfying operational requirements. The objective of this study is to compare the thermodynamic performance of five *working fluids* R245fa, R1233zd(E), Isobutane, R134a, and *n*-Pentane in a subcritical *Organic Rankine Cycle* operating with a heat source temperature of 120°C. The study employed computational simulations using *Python* integrated with the *CoolProp* library based on the *Helmholtz Equation of State* to evaluate the thermodynamic properties of each *working fluid*. The results demonstrate that *working fluid* selection significantly affects thermal efficiency, *net power output*, and system feasibility. *n*-Pentane exhibits the best overall performance, whereas

Copyright (c) 2026 NATURAL : Jurnal Ilmu Sains dan Terapan

 <https://doi.org/10.51878/natural.v1i2>

R1233zd(E) represents a competitive alternative for applications requiring higher safety standards. In contrast, R134a is unsuitable under the investigated operating conditions because its operating temperature exceeds the critical limit. These findings confirm that the thermophysical characteristics of the *working fluid* are the primary determinant in optimizing *Organic Rankine Cycle* performance for low-temperature heat source applications.

Keywords: *Organic Rankine Cycle, CoolProp, Helmholtz Equation of State, working fluid, thermodynamic analysis.*

PENDAHULUAN

Transisi menuju sistem energi berkelanjutan mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan yang mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus menekan emisi gas rumah kaca. Salah satu sumber energi yang memiliki prospek besar adalah panas bersuhu rendah hingga menengah (*low- to medium-temperature heat source*), baik yang berasal dari panas bumi, panas buangan (*waste heat*) industri, pembangkit listrik, maupun proses manufaktur. Indonesia memiliki potensi panas bumi terbesar di dunia dengan karakteristik sumber daya yang didominasi oleh temperatur rendah hingga menengah sehingga berpotensi dikembangkan melalui teknologi konversi energi yang lebih efisien. Namun demikian, sebagian besar sumber panas tersebut belum dimanfaatkan secara optimal karena pembangkit uap konvensional berbasis air kurang efektif beroperasi pada temperatur di bawah 150°C. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengembangan teknologi yang mampu mengonversi panas bersuhu rendah menjadi energi listrik merupakan kebutuhan strategis untuk meningkatkan bauran energi nasional, memperkuat ketahanan energi, dan mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan dalam mendukung transisi menuju sistem energi berkelanjutan (Apriliyanti & Rizki, 2023; Herindrasti et al., 2024; Nisa et al., 2025).

Salah satu teknologi yang dinilai paling sesuai untuk memanfaatkan sumber panas bersuhu rendah adalah *Organic Rankine Cycle* (ORC). Berbeda dengan siklus Rankine konvensional, ORC menggunakan fluida kerja organik yang memiliki titik didih lebih rendah sehingga mampu menghasilkan daya listrik pada temperatur sumber panas yang relatif rendah. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa ORC dapat diaplikasikan pada panas bumi temperatur rendah, panas buangan industri, biomassa, hingga energi surya termal dengan tingkat efisiensi yang kompetitif. Keberhasilan sistem ORC sangat ditentukan oleh karakteristik termofisika fluida kerja karena setiap fluida memiliki sifat tekanan, temperatur kritis, entalpi penguapan, serta karakteristik ekspansi yang berbeda. Oleh sebab itu, pemilihan fluida kerja menjadi salah satu faktor utama yang menentukan efisiensi termal, *net power output*, keandalan operasi, serta aspek keselamatan dan keberlanjutan lingkungan suatu sistem ORC (Manopo & Rusirawan, 2024; Hidayat & Rusirawan, 2024; Melysa et al., 2025).

Berdasarkan hasil telaah literatur, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada aspek tertentu dari kinerja *Organic Rankine Cycle* (ORC) tanpa melakukan evaluasi komprehensif terhadap berbagai kandidat fluida kerja pada kondisi operasi yang sama. Ahmed et al. (2021) menitikberatkan pada analisis efisiensi termodinamika maksimum pada siklus ORC, sedangkan Engineer et al. (2021) mengkaji optimasi turbin aksial untuk meningkatkan performa sistem ORC. Sementara itu, Harmen et al. (2021) meneliti karakteristik perpindahan panas konveksi fluida organik pada kondisi tekanan superkritis dengan fokus pada perilaku termofisika fluida. Meskipun ketiga penelitian tersebut memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan teknologi ORC, belum terdapat kajian yang secara komprehensif membandingkan beberapa fluida kerja berdasarkan efisiensi termal, *net power output*, tekanan operasi, serta kelayakan penggunaannya pada kondisi subkritis. Selain itu, sebagian besar penelitian masih mengandalkan perangkat lunak komersial atau model termodinamika tertentu

Copyright (c) 2026 NATURAL : Jurnal Ilmu Sains dan Terapan

 <https://doi.org/10.51878/natural.v1i2>

sehingga fleksibilitas reproduksi hasil penelitian relatif rendah. Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian berupa belum tersedianya kajian komparatif yang mengintegrasikan evaluasi efisiensi termal, *net power output*, tekanan operasi, dan kelayakan penggunaan beberapa fluida kerja melalui pendekatan komputasi *open-source* yang memiliki akurasi tinggi.

Sebagai solusi atas keterbatasan tersebut, penelitian ini menerapkan simulasi komputasi menggunakan pustaka *CoolProp* yang dibangun berdasarkan *Helmholtz Equation of State* (EOS). Pendekatan ini memungkinkan perhitungan sifat termofisika, seperti entalpi, entropi, tekanan saturasi, dan temperatur kritis, dilakukan secara otomatis dengan tingkat akurasi yang tinggi sehingga mampu meminimalkan kesalahan perhitungan dibandingkan penggunaan tabel termodinamika secara manual (Bell et al., 2014). Integrasi *CoolProp* dengan bahasa pemrograman Python juga memberikan fleksibilitas dalam melakukan simulasi berbagai kondisi operasi dan berbagai kandidat fluida kerja secara lebih efisien. Penelitian Eddouibi et al. (2022) menunjukkan bahwa integrasi SAM, Python, dan *CoolProp* mampu membangun kerangka simulasi dinamis ORC berbasis *open-source* dengan prediksi daya listrik yang memiliki galat kurang dari 2,25% terhadap data acuan, sehingga membuktikan bahwa pendekatan komputasi tersebut memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan andal untuk analisis performa sistem ORC. Melalui pendekatan tersebut, proses evaluasi dalam penelitian ini tidak hanya berfokus pada efisiensi termal, tetapi juga mempertimbangkan kelayakan operasi setiap fluida kerja berdasarkan batas temperatur kritis dan tekanan kerja sistem. Dengan demikian, hasil simulasi diharapkan mampu memberikan dasar analisis yang lebih objektif dalam menentukan fluida kerja yang paling sesuai untuk aplikasi ORC pada sumber panas bersuhu rendah.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi simulasi termodinamika berbasis *CoolProp* dengan formulasi *Helmholtz Equation of State* untuk membandingkan lima kandidat fluida kerja, yaitu R245fa, R1233zd(E), Isobutane, R134a, dan *n*-Pentane, pada kondisi *Organic Rankine Cycle* (ORC) subkritis dengan temperatur sumber panas 120°C. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menitikberatkan pada parameter efisiensi, optimasi komponen, atau metode pemilihan fluida kerja tertentu, penelitian ini melakukan evaluasi secara simultan terhadap efisiensi termal, *net power output*, tekanan evaporator, tekanan kondensor, serta kelayakan operasi setiap fluida kerja berdasarkan batas temperatur kritisnya. Pendekatan tersebut menghasilkan dasar pengambilan keputusan yang lebih komprehensif dalam proses pemilihan fluida kerja, sekaligus melengkapi kerangka evaluasi fluida kerja ORC yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya (Yin et al., 2023; Groniewsky et al., 2023). Dari sisi teoritis, penelitian ini memperkaya pengembangan metode simulasi termodinamika berbasis *Helmholtz Equation of State* untuk analisis ORC. Dari sisi praktis, hasil penelitian diharapkan menjadi referensi bagi peneliti, industri, maupun perancang sistem pembangkit dalam memilih fluida kerja yang sesuai untuk pemanfaatan sumber panas bersuhu rendah secara lebih efisien dan aman.

Berdasarkan uraian latar belakang, hasil telaah penelitian terdahulu, kesenjangan penelitian, serta kebaruan yang ditawarkan, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan performa termodinamika lima kandidat fluida kerja pada sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) subkritis menggunakan simulasi berbasis *CoolProp* yang menerapkan *Helmholtz Equation of State*. Secara khusus, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh jenis fluida kerja terhadap efisiensi termal, *net power output*, tekanan operasi, serta kelayakan penggunaan masing-masing fluida pada temperatur sumber panas 120°C. Selain itu, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi fluida kerja yang memberikan performa paling optimal berdasarkan aspek efisiensi, keamanan operasi, dan batas temperatur kritis. Hasil penelitian diharapkan dapat

Copyright (c) 2026 NATURAL : Jurnal Ilmu Sains dan Terapan

 <https://doi.org/10.51878/natural.v1i2>

menjadi acuan dalam pengembangan sistem *Organic Rankine Cycle* berbasis sumber panas bersuhu rendah di Indonesia maupun pada aplikasi *waste heat recovery* di sektor industri. Kontribusi tersebut diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem konversi energi berbasis siklus Rankine yang lebih efisien melalui pendekatan simulasi dan optimasi performa sebagaimana menjadi arah pengembangan teknologi pembangkit pada penelitian-penelitian terkini (Marzouk, 2024; Petrovic et al., 2025). Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu termodinamika terapan, tetapi juga mendukung implementasi teknologi konversi energi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan berbasis simulasi komputasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian simulasi numerik (*numerical simulation*) dengan pendekatan pemodelan komputasi berbasis analisis termodinamika untuk mengevaluasi kinerja *Organic Rankine Cycle* (ORC) subkritis pada sumber panas bersuhu rendah. Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan evaluasi yang akurat terhadap karakteristik termodinamika berbagai *fluida kerja* tanpa memerlukan pengujian eksperimental yang memerlukan biaya tinggi dan waktu yang panjang. Simulasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman *Python* 3.11 yang terintegrasi dengan pustaka *CoolProp* versi 7.0 berbasis *Helmholtz Equation of State* (EOS) untuk memperoleh properti termofisika setiap *fluida kerja*, meliputi entalpi, entropi, temperatur, dan tekanan pada setiap titik siklus. Lima kandidat *fluida kerja* yang dianalisis terdiri atas R245fa, R1233zd(E), Isobutane, R134a, dan *n*-Pentane. Kondisi operasi ditetapkan pada temperatur sumber panas 120°C dengan laju aliran massa *fluida kerja* sebesar 1,5 kg/s dan temperatur kondensasi 35°C. Efisiensi isentropik turbin dan pompa masing-masing diasumsikan sebesar 80% dan 75% untuk merepresentasikan kondisi operasi sistem yang mendekati aplikasi nyata.

Model simulasi dikembangkan berdasarkan beberapa asumsi untuk menyederhanakan analisis tanpa mengurangi validitas hasil perhitungan. Siklus diasumsikan beroperasi pada kondisi tunak (*steady-state*) sehingga seluruh parameter termodinamika tidak berubah terhadap waktu. Proses aliran fluida dianggap satu dimensi, sedangkan perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan karena pengaruhnya relatif kecil terhadap keseimbangan energi sistem. Rugi-rugi tekanan pada pipa, evaporator, kondensor, dan komponen pendukung juga diabaikan sehingga tekanan hanya berubah pada turbin dan pompa sesuai proses ideal yang telah dikoreksi menggunakan efisiensi isentropik masing-masing komponen. Selain itu, perpindahan kalor ke lingkungan di luar evaporator dan kondensor dianggap tidak terjadi sehingga seluruh energi panas diasumsikan hanya berpindah melalui kedua komponen tersebut. Analisis dilakukan dengan menghitung tekanan evaporator, tekanan kondensor, kalor masuk (*heat input*), kerja bersih (*net power output*), dan efisiensi termal setiap *fluida kerja*. Sistem komputasi secara otomatis mengidentifikasi *fluida kerja* yang melampaui temperatur kritisnya sehingga fluida yang mengalami kegagalan perhitungan (*flash calculation failure*) dinyatakan tidak memenuhi kriteria operasi ORC subkritis dan dikeluarkan dari proses evaluasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Perbandingan Performa Termodinamika Lima *Fluida Kerja*

Simulasi komputasi menggunakan pustaka *CoolProp* menghasilkan data performa termodinamika lima kandidat *fluida kerja*, yaitu R245fa, R1233zd(E), Isobutane, R134a, dan *n*-Pentane, pada sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) subkritis dengan temperatur sumber panas 120 °C. Parameter yang dianalisis meliputi tekanan evaporator (*P_{evap}*), tekanan

kondensor (P_{cond}), kerja bersih (W_{net}), kalor masuk (Q_{in}), dan efisiensi termal. Seluruh parameter dihitung menggunakan model komputasi yang sama sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara langsung antarfluida. Ringkasan hasil simulasi disajikan pada Tabel 1 sebagai dasar untuk mengevaluasi karakteristik performa masing-masing *fluida kerja*. Penyajian data tersebut menunjukkan adanya variasi nilai pada seluruh parameter yang diamati meskipun kondisi operasi sistem dibuat identik.

Tabel 1. Performa termodinamika lima *fluida kerja* pada sistem *Organic Rankine Cycle* subkritis dengan temperatur evaporasi 120 °C.

<i>Fluida Kerja</i>	P_{evap} (kPa)	P_{cond} (kPa)	W_{net} (kW)	Q_{in} (kW)	Efisiensi Termal (%)
R245fa	1.930,38	211,96	46,17	356,28	12,96
R1233zd(E)	1.574,99	183,19	47,26	353,63	13,37
Isobutane	2.836,64	464,77	72,93	595,39	12,25
R134a	Gagal	Gagal	Gagal	Gagal	Gagal
<i>n</i> -Pentane	907,44	97,71	98,72	736,66	13,40

Berdasarkan Tabel 1, tekanan evaporator (P_{evap}) menunjukkan variasi yang cukup besar antarfluida. Isobutane menghasilkan tekanan evaporator tertinggi sebesar 2.836,64 kPa, diikuti R245fa sebesar 1.930,38 kPa, R1233zd(E) sebesar 1.574,99 kPa, dan *n*-Pentane sebesar 907,44 kPa. Nilai tekanan evaporator *n*-Pentane sekitar 68,0% lebih rendah dibandingkan Isobutane dan sekitar 42,2% lebih rendah dibandingkan R1233zd(E). Sementara itu, R134a tidak menghasilkan nilai tekanan evaporator karena simulasi tidak dapat diselesaikan pada kondisi operasi yang digunakan. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa setiap *fluida kerja* memerlukan tekanan evaporasi yang berbeda meskipun menerima temperatur sumber panas yang sama.

Perbedaan karakteristik juga terlihat pada tekanan kondensor (P_{cond}). Nilai tekanan kondensor tertinggi diperoleh Isobutane sebesar 464,77 kPa, kemudian diikuti R245fa sebesar 211,96 kPa, R1233zd(E) sebesar 183,19 kPa, dan *n*-Pentane sebesar 97,71 kPa. Dibandingkan Isobutane, tekanan kondensor *n*-Pentane lebih rendah sekitar 79,0%, sedangkan dibandingkan R245fa lebih rendah sekitar 53,9%. Variasi tekanan kondensor tersebut menunjukkan bahwa masing-masing *fluida kerja* memiliki rentang tekanan operasi yang berbeda pada sisi kondensasi. Selain itu, R134a kembali tidak menghasilkan data karena proses simulasi tidak memberikan keluaran yang valid pada kondisi penelitian.

Hasil simulasi terhadap kerja bersih (W_{net}) menunjukkan adanya perbedaan performa yang cukup signifikan antarfluida. *n*-Pentane menghasilkan kerja bersih tertinggi sebesar 98,72 kW, diikuti Isobutane sebesar 72,93 kW, R1233zd(E) sebesar 47,26 kW, dan R245fa sebesar 46,17 kW. Kerja bersih *n*-Pentane meningkat sekitar 35,4% dibandingkan Isobutane, 108,9% dibandingkan R1233zd(E), dan 113,8% dibandingkan R245fa. Selisih kerja bersih antara R1233zd(E) dan R245fa hanya sekitar 2,4%, sehingga kedua *fluida kerja* tersebut menunjukkan performa yang relatif berdekatan. Adapun R134a tidak menghasilkan nilai kerja bersih sehingga tidak dapat dibandingkan dengan kandidat *fluida kerja* lainnya.

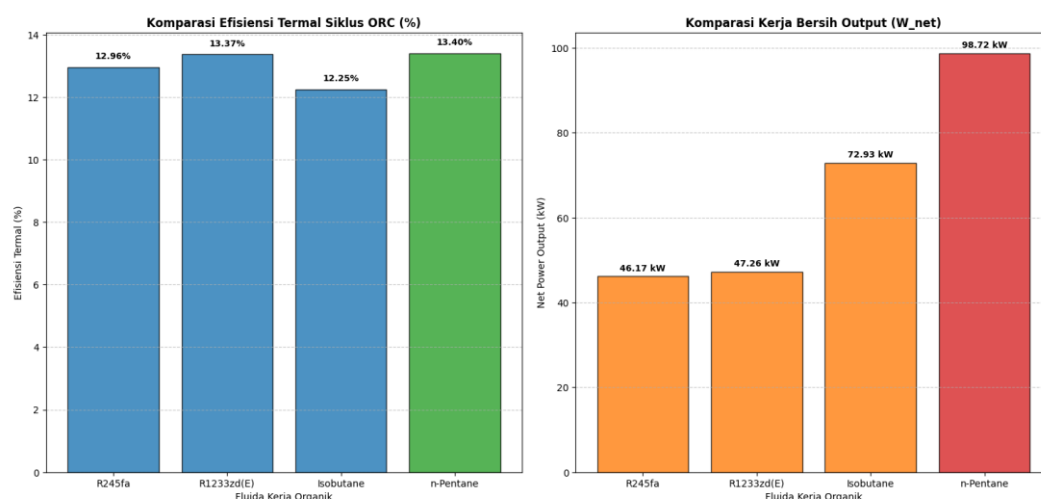
Parameter kalor masuk (Q_{in}) juga memperlihatkan variasi yang jelas pada setiap *fluida kerja*. Nilai Q_{in} terbesar diperoleh *n*-Pentane sebesar 736,66 kW, kemudian Isobutane sebesar

595,39 kW, R245fa sebesar 356,28 kW, dan R1233zd(E) sebesar 353,63 kW. Kalor masuk yang dibutuhkan *n*-Pentane sekitar 24,0% lebih besar dibandingkan Isobutane dan lebih dari dua kali lipat dibandingkan R245fa maupun R1233zd(E). Sementara itu, selisih Q_{in} antara R245fa dan R1233zd(E) hanya sekitar 0,75%, sehingga keduanya memiliki kebutuhan energi panas yang hampir sama. Hasil tersebut menunjukkan bahwa setiap *fluida kerja* memiliki karakteristik penyerapan kalor yang berbeda selama proses evaporasi.

Efisiensi termal hasil simulasi berada pada rentang 12,25% hingga 13,40%. Efisiensi tertinggi dicapai oleh *n*-Pentane sebesar 13,40%, diikuti R1233zd(E) sebesar 13,37%, R245fa sebesar 12,96%, dan Isobutane sebesar 12,25%. Selisih efisiensi antara *n*-Pentane dan R1233zd(E) hanya sekitar 0,03 poin persentase atau 0,22%, sehingga kedua *fluida kerja* tersebut memiliki performa yang hampir setara. Dibandingkan Isobutane, efisiensi *n*-Pentane lebih tinggi sekitar 9,39%, sedangkan dibandingkan R245fa meningkat sekitar 3,40%. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan efisiensi antarfluida relatif kecil, tetapi tetap menghasilkan variasi performa yang dapat diamati pada kondisi operasi yang sama.

Performa Kerja Bersih dan Batas Operasi *Fluida Kerja*

Setelah dilakukan analisis terhadap seluruh parameter termodinamika pada Tabel 1, perbandingan kerja bersih (*net power output*) setiap *fluida kerja* selanjutnya disajikan dalam bentuk visual untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai perbedaan performa antarfluida. Penyajian grafik bertujuan memudahkan identifikasi pola keluaran daya yang dihasilkan oleh masing-masing *fluida kerja* pada kondisi operasi yang sama. Selain menunjukkan besarnya kerja bersih yang diperoleh, visualisasi ini juga memperlihatkan variasi performa setiap kandidat *fluida kerja* secara lebih mudah dibandingkan penyajian dalam bentuk tabel. Dengan demikian, Gambar 1 melengkapi informasi pada Tabel 1 melalui penyajian visual yang mempermudah proses perbandingan antarfluida. Hasil visualisasi tersebut selanjutnya dijelaskan berdasarkan pola keluaran daya yang diperoleh dari masing-masing *fluida kerja*.



Gambar 1. Komparasi Kerja Bersih Output.

Gambar 1 menyajikan perbandingan kerja bersih (*net power output*) yang dihasilkan oleh masing-masing *fluida kerja* pada sistem ORC subkritik. Visualisasi tersebut memperlihatkan bahwa *n*-Pentane menghasilkan nilai kerja bersih paling tinggi dibandingkan seluruh kandidat *fluida kerja* yang dianalisis. Isobutane berada pada posisi kedua dengan nilai kerja bersih yang masih cukup tinggi, sedangkan R1233zd(E) dan R245fa membentuk

kelompok dengan nilai keluaran yang hampir sama. Sebaliknya, R134a tidak menampilkan nilai keluaran pada grafik karena simulasi tidak menghasilkan data yang valid. Perbedaan tinggi batang pada grafik menunjukkan bahwa variasi jenis *fluida kerja* menghasilkan perbedaan keluaran daya yang cukup nyata meskipun seluruh simulasi dilakukan menggunakan kondisi operasi yang identik.

Apabila dibandingkan secara kuantitatif, selisih kerja bersih antara *n*-Pentane dan Isobutane mencapai sekitar 25,79 kW, sedangkan dibandingkan R1233zd(E) mencapai 51,46 kW dan dibandingkan R245fa mencapai 52,55 kW. Di sisi lain, perbedaan kerja bersih antara R1233zd(E) dan R245fa hanya sekitar 1,09 kW, sehingga kedua *fluida kerja* tersebut memperlihatkan karakteristik keluaran yang hampir sama. Tidak munculnya batang grafik pada R134a menunjukkan bahwa *fluida kerja* tersebut tidak menghasilkan keluaran yang memenuhi kriteria simulasi. Secara keseluruhan, Gambar 1 memperlihatkan adanya tiga kelompok performa, yaitu kelompok dengan kerja bersih tinggi (*n*-Pentane), kelompok menengah (Isobutane), dan kelompok dengan kerja bersih yang relatif berdekatan (R1233zd(E) dan R245fa). Penyajian visual tersebut memperkuat informasi yang telah ditampilkan pada Tabel 1 mengenai perbedaan performa setiap *fluida kerja* pada kondisi operasi yang sama.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa kelima kandidat *fluida kerja* menghasilkan karakteristik performa yang berbeda pada seluruh parameter yang diamati. Perbedaan tersebut terlihat pada tekanan evaporator, tekanan kondensor, kebutuhan kalor masuk, kerja bersih, serta efisiensi termal yang dihasilkan. Dari lima *fluida kerja* yang dianalisis, empat fluida berhasil menyelesaikan proses simulasi, sedangkan R134a tidak menghasilkan keluaran yang valid pada kondisi operasi yang ditetapkan. Hasil ini menunjukkan bahwa tidak semua *fluida kerja* dapat dioperasikan pada temperatur sumber panas yang sama meskipun menggunakan konfigurasi sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)* yang identik. Dengan demikian, pemilihan *fluida kerja* memberikan konsekuensi langsung terhadap karakteristik operasi dan keluaran energi yang dihasilkan sistem.

Berdasarkan seluruh parameter yang dianalisis, *n*-Pentane menunjukkan performa paling tinggi pada dua indikator utama, yaitu kerja bersih dan efisiensi termal, serta memiliki tekanan operasi yang lebih rendah dibandingkan sebagian besar *fluida kerja* lainnya. Isobutane menghasilkan kerja bersih yang relatif tinggi, tetapi membutuhkan tekanan evaporator dan tekanan kondensor paling besar di antara seluruh kandidat yang berhasil disimulasikan. Sementara itu, R1233zd(E) dan R245fa memperlihatkan karakteristik performa yang relatif berdekatan, baik dari sisi kerja bersih, kebutuhan kalor masuk, maupun efisiensi termal. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa setiap *fluida kerja* memiliki kombinasi karakteristik operasi yang berbeda meskipun seluruh simulasi dilakukan pada kondisi sumber panas dan parameter operasi yang sama. Temuan ini memberikan gambaran komprehensif mengenai variasi performa masing-masing *fluida kerja* berdasarkan seluruh parameter termodinamika yang dievaluasi.

Hasil penelitian juga memperlihatkan adanya hubungan yang konsisten antara parameter operasi dan keluaran performa yang dihasilkan oleh setiap *fluida kerja*. Variasi tekanan operasi diikuti oleh perbedaan kebutuhan kalor masuk, kerja bersih, serta efisiensi termal yang diperoleh pada masing-masing kandidat. Selain itu, simulasi berhasil mengidentifikasi *fluida kerja* yang tidak memenuhi kriteria operasi sehingga tidak menghasilkan keluaran numerik pada kondisi penelitian. Secara umum, data hasil simulasi menunjukkan bahwa evaluasi performa *Organic Rankine Cycle* tidak cukup dilakukan hanya berdasarkan satu parameter, tetapi perlu mempertimbangkan seluruh parameter termodinamika secara terpadu. Oleh karena itu, keseluruhan hasil penelitian ini memberikan dasar data yang

lebih lengkap untuk membandingkan performa lima *fluida kerja* sebelum dilakukan interpretasi lebih lanjut pada bagian pembahasan.

Pembahasan

Pengaruh Karakteristik *Fluida Kerja* terhadap Performa Termodinamika *Organic Rankine Cycle*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan fluida kerja memberikan pengaruh yang nyata terhadap performa termodinamika sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) subkritis. Temuan ini secara langsung menjawab tujuan penelitian pertama, yaitu membandingkan performa termodinamika lima kandidat fluida kerja pada kondisi operasi yang sama. Berdasarkan hasil simulasi, *n*-Pentane menghasilkan efisiensi termal dan *net power output* tertinggi dibandingkan kandidat lainnya, sedangkan R1233zd(E), R245fa, dan Isobutane menunjukkan karakteristik performa yang berbeda pada setiap parameter operasi. Variasi tersebut mengindikasikan bahwa karakteristik termofisika masing-masing fluida kerja berkontribusi terhadap perbedaan keluaran energi yang dihasilkan sistem, sejalan dengan penelitian Ahluriza et al. (2023) yang menunjukkan bahwa sifat termodinamika fluida kerja memengaruhi kinerja energi dan eksergi pada sistem ORC terintegrasi. Hasil penelitian ini juga memperkuat temuan Ferdysen et al. (2025) bahwa optimasi performa sistem ORC tidak hanya dipengaruhi oleh konfigurasi sistem, tetapi juga oleh karakteristik fluida kerja yang menentukan efisiensi konversi energi dan besarnya daya yang dihasilkan. Dengan demikian, hasil penelitian menegaskan bahwa pemilihan fluida kerja merupakan salah satu faktor utama dalam optimasi performa sistem ORC.

Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Pane (2024) yang menunjukkan bahwa karakteristik termodinamika fluida kerja merupakan faktor utama yang menentukan kinerja sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) dalam mengonversi energi panas bersuhu rendah menjadi energi listrik. Analisis termodinamika pada pemanfaatan gas buang boiler menunjukkan bahwa pemilihan fluida kerja yang sesuai dengan karakteristik sumber panas mampu meningkatkan efisiensi siklus, kerja bersih, serta efektivitas pemanfaatan energi panas yang tersedia. Hasil tersebut menguatkan teori *Organic Rankine Cycle* bahwa sifat termofisika fluida kerja, seperti temperatur kritis, tekanan jenuh, kalor laten, dan bentuk kurva saturasi, sangat menentukan efisiensi konversi energi pada sistem pembangkit bersuhu rendah. Ahmed et al. (2021) melaporkan bahwa *working fluid* dengan karakteristik *dry fluid* umumnya mampu menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan *wet fluid* pada sumber panas bertemperatur rendah karena mampu mempertahankan kondisi uap selama proses ekspansi turbin. Hasil penelitian ini juga konsisten dengan penelitian Marzouk (2024) yang menunjukkan bahwa karakteristik temperatur kritis fluida kerja menjadi parameter penting dalam menentukan kesesuaian operasi pada siklus Rankine subkritis. Selain itu, Petrovic et al. (2025) menjelaskan bahwa pemilihan fluida kerja tidak hanya memengaruhi efisiensi termal, tetapi juga tekanan operasi, dimensi komponen, dan kebutuhan material sistem pembangkit. Oleh karena itu, temuan penelitian ini memperkuat teori bahwa evaluasi fluida kerja perlu dilakukan secara menyeluruh dengan mempertimbangkan seluruh parameter termodinamika, bukan hanya efisiensi termal.

Evaluasi Kelayakan Operasi Berdasarkan Hasil Simulasi Berbasis *CoolProp*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap fluida kerja memiliki karakteristik tekanan evaporator dan tekanan kondensor yang berbeda meskipun seluruh simulasi dilakukan pada temperatur sumber panas yang sama. Selain itu, penelitian ini menemukan bahwa R134a tidak menghasilkan solusi numerik pada kondisi operasi yang digunakan sehingga tidak dapat dievaluasi bersama kandidat fluida kerja lainnya. Temuan tersebut secara langsung menjawab

tujuan penelitian kedua, yaitu mengevaluasi kelayakan operasi masing-masing fluida kerja berdasarkan parameter termodinamika yang diperoleh melalui simulasi komputasi. Perbedaan karakteristik tekanan operasi tersebut menunjukkan bahwa pemilihan fluida kerja harus mempertimbangkan kesesuaian sifat termofisika terhadap kondisi operasi sistem, sejalan dengan temuan Aisyah et al. (2024) yang menegaskan bahwa karakteristik refrigeran atau fluida kerja menjadi faktor penting dalam menentukan kelayakan penerapannya pada sistem konversi energi. Di samping itu, Andriyuda dan Rusirawan (2024) menunjukkan bahwa tekanan operasi, khususnya pada sisi kondensor, berpengaruh terhadap kinerja dan keandalan sistem sehingga evaluasi parameter tekanan menjadi aspek yang tidak dapat diabaikan dalam proses perancangan. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa proses pemilihan fluida kerja tidak cukup didasarkan pada besarnya daya yang dihasilkan, tetapi juga harus mempertimbangkan kesesuaian karakteristik operasi terhadap kondisi sistem yang dirancang sehingga kelayakan operasi menjadi bagian penting dalam proses seleksi fluida kerja pada sistem ORC.

Dari perspektif teori, pendekatan komputasi berbasis *Helmholtz Equation of State* memungkinkan evaluasi sifat termofisika dilakukan dengan tingkat akurasi yang tinggi pada berbagai kondisi operasi. Bell et al. (2014) menjelaskan bahwa pustaka *CoolProp* menyediakan model termodinamika yang mampu menghitung sifat fluida secara konsisten dan telah banyak digunakan sebagai alternatif REFPROP dalam penelitian maupun aplikasi rekayasa. Hasil penelitian ini mendukung temuan tersebut karena simulasi mampu mengidentifikasi fluida kerja yang memenuhi maupun yang tidak memenuhi batas operasi pada kondisi subkritis. Sejalan dengan itu, Budianto et al. (2024) menunjukkan bahwa simulasi termodinamika mampu mengevaluasi pengaruh karakteristik berbagai fluida kerja terhadap efisiensi termal, daya keluaran, dan rasio tekanan sebelum dilakukan pengujian eksperimental, sehingga menjadi pendekatan yang efektif dalam proses perancangan sistem ORC. Oleh karena itu, pendekatan berbasis *CoolProp* memberikan kontribusi metodologis yang penting dalam proses seleksi fluida kerja secara lebih efisien, objektif, dan dapat direplikasi.

Berdasarkan keseluruhan hasil penelitian, *n*-Pentane menunjukkan performa paling baik pada kombinasi parameter kerja bersih, efisiensi termal, dan tekanan operasi, sedangkan R1233zd(E) memperlihatkan performa yang relatif kompetitif pada sebagian besar parameter yang dianalisis. Temuan tersebut secara langsung menjawab tujuan penelitian ketiga, yaitu mengidentifikasi *fluida kerja* yang paling sesuai untuk sistem *Organic Rankine Cycle* subkritis pada temperatur sumber panas 120 °C. Hasil penelitian tidak hanya menghasilkan urutan performa masing-masing *fluida kerja*, tetapi juga memberikan informasi mengenai karakteristik operasi setiap kandidat berdasarkan hasil simulasi komputasi. Dengan demikian, penelitian ini menghasilkan dasar evaluasi yang lebih komprehensif dalam proses pemilihan *fluida kerja*. Informasi tersebut dapat digunakan sebagai acuan pada tahap perancangan maupun optimasi sistem ORC untuk pemanfaatan sumber panas bersuhu rendah.

Dari sisi kontribusi ilmiah, penelitian ini melengkapi penelitian-penelitian sebelumnya yang umumnya hanya membandingkan efisiensi atau daya keluaran tanpa mengevaluasi seluruh parameter termodinamika secara simultan. Integrasi simulasi menggunakan *CoolProp* berbasis *Helmholtz Equation of State* memungkinkan proses evaluasi dilakukan terhadap beberapa *fluida kerja* dalam satu kerangka analisis yang sama sehingga menghasilkan perbandingan yang lebih objektif. Temuan ini memperluas hasil penelitian Ahmed et al. (2021), Marzouk (2024), dan Petrovic et al. (2025) dengan menunjukkan bahwa proses seleksi *fluida kerja* perlu mempertimbangkan efisiensi, kerja bersih, tekanan operasi, serta kelayakan simulasi secara bersamaan. Dari sisi praktis, hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai referensi dalam pemilihan *fluida kerja* pada pengembangan pembangkit *Organic Rankine Cycle* berbasis panas

bumi temperatur rendah maupun sistem *waste heat recovery* di sektor industri. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baik terhadap pengembangan teori optimasi *Organic Rankine Cycle* maupun terhadap implementasi teknologi konversi energi berbasis simulasi komputasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan *fluida kerja* merupakan faktor yang sangat menentukan performa termodinamika sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)* pada pemanfaatan sumber panas bersuhu rendah. Melalui simulasi komputasi berbasis *CoolProp* yang menerapkan *Helmholtz Equation of State*, penelitian ini berhasil membandingkan karakteristik lima kandidat *fluida kerja* secara komprehensif berdasarkan tekanan operasi, kerja bersih, kebutuhan kalor, efisiensi termal, dan kelayakan operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap *fluida kerja* memiliki karakteristik operasi yang berbeda sehingga proses pemilihannya tidak dapat didasarkan pada satu indikator performa saja, melainkan harus mempertimbangkan seluruh parameter termodinamika secara terpadu. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk mengidentifikasi dan membandingkan performa *fluida kerja* pada sistem *ORC* subkritis telah tercapai melalui pendekatan simulasi yang sistematis dan terukur. Temuan ini memperkuat bahwa pendekatan komputasi dapat menjadi alternatif yang efektif dalam mendukung proses evaluasi dan pengambilan keputusan pada tahap perancangan sistem konversi energi.

Penelitian ini memberikan kontribusi teoretis berupa penguatan penerapan simulasi berbasis *Helmholtz Equation of State* sebagai pendekatan yang andal dalam analisis performa *Organic Rankine Cycle*, sekaligus memberikan kontribusi praktis sebagai referensi dalam pemilihan *fluida kerja* untuk pemanfaatan panas bumi temperatur rendah maupun *waste heat recovery* di sektor industri. Hasil penelitian diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem pembangkit yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan sesuai dengan kebutuhan transisi energi serta peningkatan pemanfaatan sumber panas bersuhu rendah di Indonesia. Meskipun demikian, penelitian ini masih dibatasi pada simulasi kondisi operasi subkritis dengan satu temperatur sumber panas dan belum mempertimbangkan aspek ekonomi maupun dampak lingkungan dari masing-masing *fluida kerja*. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan analisis pada berbagai variasi kondisi operasi, konfigurasi *Organic Rankine Cycle*, serta melakukan integrasi analisis termodinamika, ekonomi, dan lingkungan agar diperoleh rekomendasi pemilihan *fluida kerja* yang lebih komprehensif. Pengembangan tersebut diharapkan dapat memperluas penerapan hasil penelitian sebagai dasar perancangan dan optimasi sistem konversi energi panas bersuhu rendah pada skala laboratorium maupun industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahluriza, P., Kiono, B. F. T., & Utomo, M. S. K. T. S. (2023). Analisis Energi Dan Eksergi Pada Siklus Rankine Organik Terintergerasi Untuk Pemulihan Panas Limbah Dari Sistem Ac. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 11(3), 567.
<https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/elkomika/article/view/8646>
- Ahmed, A. M., Kondor, L., & Imre, A. R. (2021). Thermodynamic Efficiency Maximum Of Simple Organic Rankine Cycles. *Energies*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/en14020307>
- Aisyah, N., Ariyadi, H. M., Pratiwi, I. A. P., & Sugiyanto, S. (2024). Evaluasi Pemilihan Refrigeran Ramah Lingkungan Untuk Sistem Pemanfaatan Panas Buang Mesin Diesel. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 19(2), 317-326.
<https://doi.org/10.32497/jrm.v19i2.5761>



- Andriyuda, F., & Rusirawan, D. (2024). Evaluasi Evaluasi Kondensor Berpendingin Udara Dan Air Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jurnal Tekno Insentif*, 18(2), 89-103.
<https://doi.org/10.36787/jti.v18i2.1457>
- Apriliyanti, K., & Rizki, D. (2023). Kebijakan Energi Terbarukan: Studi Kasus Indonesia Dan Norwegia Dalam Pengelolaan Sumber Energi Berkelanjutan. *Jurnal Ilmu Pemerintahan Widya Praja*, 49(2), 186-209.
<https://ejournal.ipdn.ac.id/JIPWP/article/view/3684>
- Budianto, D., Cahyadi, Ismoyo, B., Lubis, A., & Alhamid, M. I. (2024). Modeling And Experimental Approach Of An Organic Rankine Cycle Using A Scroll Expander. *Evergreen*, 11(3). <https://scholar.ui.ac.id/en/publications/modeling-and-experimental-approach-of-an-organic-rankine-cycle-us/>
- Eddouibi, J., Abderafi, S., Vaudreuil, S., & Bounahmidi, T. (2022). Dynamic Simulation Of Solar-Powered ORC Using Open-Source Tools: A Case Study Combining SAM And Coolprop Via Python. *Energy*, 239(121935).
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121935>
- Engineer, Y., Rezk, A., & Hossain, A. K. (2021). Energy Analysis And Optimization Of A Small-Scale Axial Flow Turbine For Organic Rankine Cycle Application. *International Journal of Thermofluids*, 12, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100119>
- Ferdyson, F., Kiono, B. F. T., & Sutaryo, S. (2025). Analisis Energi Dan Eksergi Sistem Rankine Organik Dan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Yang Terintegrasi. *Briliant: Jurnal Riset dan Konseptual*, 10(2), 466-480.
<https://doi.org/10.28926/briliant.v10i2.2236>
- Groniewsky, A., Kustán, R., & Imre, A. R. (2023). Simultaneous Working Fluid And Expander Selection Method For Reaching Low-Threshold Technology Organic Rankine Cycle (ORC) Design. *Energy Science & Engineering*, 11(7), 2330–2350.
<https://doi.org/10.1002/ese3.1457>
- Harmen, H., Zulhanif, Z., & Yonanda, A. (2021). *Kajian Numerik Karakteristik Perpindahan Panas Konveksi Fluida Organik Pada Kondisi Tekanan Superkritik*.
<http://repository.lppm.unila.ac.id/36121/>
- Herindrasti, S., Angelina, B., & Putriwinata, P. (2024). Pengembangan Kebijakan Energi Terbarukan Di Indonesia, Vietnam, Dan Laos. *Sospol*, 10(2), 154-172.
<https://doi.org/10.22219/jurnalsospol.v10i2.35634>
- Hidayat, J., & Rusirawan, D. (2024). Studi Konfigurasi Organic Rankine Cycle (ORC) Dan Pemilihan Fluida Kerja Pada Pembangkit Listrik Geotermal. *Jurnal Tekno Insentif*, 18(2), 76-88. <https://doi.org/10.36787/jti.v18i2.1308>
- Manopo, D. S., & Rusirawan, D. (2024). Review Organic Rankine Cycle Penerapan di Kapal. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 8(1), 76-86.
<https://ejournal.itenas.ac.id/index.php/rekayasahijau/article/view/10987>
- Marzouk, O. A. (2024). Subcritical And Supercritical Rankine Steam Cycles, Under Elevated Temperatures Up To 900°C And Absolute Pressures Up To 400 Bara. *Advances in Mechanical Engineering*, 16(1). <https://doi.org/10.1177/16878132231221065>
- Melysa, R., Padilah, Y., Anwar, I., Wardianto, D., & Afdal, A. (2025). Analisis Potensi Listrik Dengan Pemanfaatan Panas Limbah Brine Dengan Organic Rankine Cycle (Orc) Di Sumur X Lapangan Panas Bumi Sorik Marapi. *Jurnal Teknologi dan Vokasi*, 3(1), 35-41. <https://doi.org/10.21063/jtv.2025.3.1.35-41>
- Nisa, R. U. F., Thamrin, S., & Saputro, G. E. (2025). Implementasi Integrated Gasification Combined Cycle Sebagai Alternatif Strategis Dalam Mendukung Ketahanan Energi



- Nasional Di Era Transisi. *Citizen: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 5(4), 1144-1152. <https://www.journal.das-institute.com/index.php/citizen-journal/article/view/965>
- Pane, A. H. (2024). Analisa Termodinamika Pemanfaatan Gas Buang Boiler Untuk Pembangkit Daya Melalui Organic Rankine Cycle. *Majamecha*, 6(1), 69-80. <https://doi.org/10.36815/majamecha.v6i1.3243>
- Petrovic, M. V., Milic, S., Petkovic, D., Madzar, T., & Markovic, N. M. (2025). Improving Steam Turbine Plants Performance Through Advanced Testing And Simulation. *Energies*, 18(7). <https://doi.org/10.3390/en18071615>
- Yin, Y., Yang, F., Zhang, H., Pan, Y., Xu, P., & Ge, Z. (2023). Study On Performance Evaluation Framework And Design/Selection Guidelines Of Working Fluids For Subcritical Organic Rankine Cycle From Molecular Structure Perspective. *Energy*, 282(128582). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128582>