

DESAIN DAN ANALISIS SISTEM ORC SKALA KECIL UNTUK APLIKASI DI UMKM

Khoirul Anam^{1*}

¹Sarjana Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Pekajangan Pekalongan, Indonesia

*email: khoirulanam@umpp.ac.id

DOI : 10.48144/suryateknika.v9i2.2232

Received: 16 Oktober 2025

Revised: 30 Oktober 2025

Accepted: 31 Oktober 2025

Abstract

This study focuses on the design and analysis of a small-scale Organic Rankine Cycle (ORC) system to enhance energy efficiency in the Micro, Small, and Medium Enterprises (MSMEs) sector. The research is motivated by the high dependence of MSMEs on fossil fuels and the underutilization of waste heat energy, particularly from boiler combustion processes. The methodology includes a comprehensive literature review, thermodynamic modeling, component design simulations, and technical as well as economic analyses. The results indicate that exhaust gas from a boiler with an inlet temperature of 225 °C can serve effectively as a heat source for the ORC system. R123a was selected as the working fluid due to its favorable thermodynamic properties, environmental compatibility, and suitability for low- to medium-temperature applications. The evaporator design requires a heat transfer area of 7.32 m², consisting of 62 tubes with a 16 mm diameter. With a working fluid mass flow rate of 0.42 kg/s, the system generates approximately 25 kW of turbine power, achieving competitive efficiency at small scales. Beyond technical performance, this research also evaluates economic feasibility and environmental benefits, including reduced carbon emissions and potential energy cost savings for MSMEs. Therefore, the proposed small-scale ORC system demonstrates strong potential as a renewable energy solution utilizing waste heat. This study further supports national energy policy goals and aligns with the principles of sustainability and the values of *Al-Islam* and *Kemuhammadiyahan*, emphasizing efficiency, usefulness, and environmental stewardship.

Keywords: small-scale ORC, energy efficiency, MSMEs, exhaust heat

Abstrak

Penelitian ini berfokus pada perancangan dan analisis sistem Organic Rankine Cycle (ORC) skala kecil yang ditujukan untuk mendukung efisiensi energi pada sektor Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM). Latar belakang penelitian ini adalah tingginya ketergantungan UMKM pada energi fosil dan rendahnya pemanfaatan energi panas buangan, khususnya dari proses pembakaran boiler. Metode penelitian meliputi kajian literatur, perhitungan termodinamika, simulasi desain komponen, serta analisis teknis dan ekonomis. Hasil perancangan menunjukkan bahwa sumber panas dari gas buang boiler dengan temperatur masuk 225 °C dapat dimanfaatkan sebagai energi input bagi sistem ORC. Fluida kerja yang dipilih adalah R123a karena sifat termodinamika yang sesuai, ramah lingkungan, serta mampu bekerja pada temperatur rendah-menengah. Analisis desain evaporator menghasilkan kebutuhan luas perpindahan panas sebesar 7,32 m² dengan jumlah 62 tube berdiameter dalam 16 mm. Dari perhitungan laju aliran massa fluida kerja sebesar 0,42 kg/s, sistem menghasilkan daya turbin sekitar 25 kW dengan efisiensi siklus yang kompetitif untuk skala kecil. Selain analisis teknis, penelitian ini menekankan keberlanjutan ekonomi dan lingkungan, termasuk pengurangan emisi karbon serta potensi efisiensi biaya energi UMKM. Dengan demikian, sistem ORC skala kecil terbukti memiliki prospek implementasi sebagai solusi energi terbarukan berbasis panas buangan. Penelitian ini sekaligus memberikan kontribusi terhadap pencapaian target kebijakan energi nasional serta selaras dengan prinsip keberlanjutan dan nilai Al Islam dan Kemuhammadiyahan, yaitu efisiensi, kebermanfaatan, dan kepedulian lingkungan.

Kata kunci: ORC skala kecil; efisiensi energi; UMKM; panas buang

1. Pendahuluan

Sektor energi di Indonesia menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, sembari mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Peningkatan konsumsi energi yang pesat, terutama di sektor industri dan transportasi, menyebabkan ketergantungan yang tinggi pada energi fosil, yang berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca dan pemanasan global. Dalam konteks ini, transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan efisien menjadi sangat penting untuk mendukung pembangunan berkelanjutan.[1]

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) menjadi landasan utama kebijakan energi di Indonesia. RUEN memiliki tujuan untuk meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, mengurangi ketergantungan pada energi fosil, dan mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi. Dalam peraturan tersebut, salah satu poin utama adalah target penurunan konsumsi energi fosil melalui pengembangan teknologi energi terbarukan yang lebih efisien dan ramah lingkungan, serta upaya penghematan energi di seluruh sektor, termasuk industri dan rumah tangga. Hal ini sejalan dengan upaya Indonesia untuk memenuhi Komitmen Nasional terhadap Perjanjian Paris dalam mengurangi emisi karbon dan meningkatkan penggunaan energi terbarukan. [2], [3]

Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) merupakan sektor ekonomi yang krusial dalam menopang pertumbuhan ekonomi Indonesia. Namun, ketergantungan pada energi fosil dan rendahnya efisiensi pemanfaatan energi menjadi hambatan signifikan dalam pengembangan sektor ini. Pemanfaatan teknologi berbasis energi terbarukan dan efisiensi tinggi, seperti Organic Rankine Cycle (ORC), menjadi solusi yang relevan untuk mengatasi tantangan ini.

ORC adalah sistem konversi energi yang menggunakan fluida organik sebagai media kerja, memungkinkan pemanfaatan panas bersuhu rendah hingga sedang dari berbagai sumber, seperti limbah panas industri, biomassa, dan energi matahari. Penelitian menunjukkan bahwa teknologi ORC memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi energi dengan biaya operasional yang relatif rendah.[4], [5]

Namun, keberhasilan implementasi ORC skala kecil pada UMKM memerlukan perhatian khusus pada pemilihan fluida kerja, desain sistem, serta parameter operasi yang efisien. Studi yang dilakukan oleh Yang et al. (2018) dan Eyerer et al. (2019) menggaris bawahi pentingnya fluida ramah lingkungan seperti R1233zd(E) dan R245fa, yang memiliki performa baik dan berpotensi mengurangi dampak lingkungan. Selain itu, penyesuaian parameter operasi, seperti temperatur evaporasi, juga memainkan peran penting dalam optimalisasi kinerja energi sistem ORC. [6], [7], [8], [9]

Implementasi ORC juga mendukung tujuan keberlanjutan energi sebagaimana tertuang dalam Peraturan Presiden Nomor 111 Tahun 2022 dan kebijakan energi nasional yang diarahkan oleh Perpres Nomor 5 Tahun 2006. Dalam konteks UMKM, penerapan ORC tidak hanya mendorong efisiensi energi, tetapi juga mendukung pengurangan emisi karbon sebagaimana diatur dalam Permen LHK Nomor 20 Tahun 2017 . [3], [4], [10], [11], [12]

Penelitian ini mengkaji potensi teknologi ORC dalam mendukung tujuan kebijakan tersebut, dengan fokus pada pemanfaatan panas buangan di sektor UKM. Teknologi ORC yang dapat mengubah panas buangan menjadi energi listrik menjadi solusi yang sangat relevan, mengingat karakteristik UKM yang sering kali menghasilkan panas buangan yang tidak dimanfaatkan secara maksimal. Pemanfaatan teknologi ini tidak hanya berkontribusi terhadap efisiensi energi, tetapi juga membantu UKM dalam mengurangi biaya energi dan mendukung keberlanjutan industri di Indonesia.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengidentifikasi peluang penerapan teknologi ORC pada skala UKM, serta memberikan rekomendasi kebijakan yang lebih terarah untuk mendukung implementasi teknologi energi terbarukan yang efisien di sektor UKM.

Dalam upaya meningkatkan efisiensi energi dan mendukung keberlanjutan, sektor Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) menghadapi tantangan yang kompleks. Salah satu pendekatan potensial adalah penerapan sistem **Organic Rankine Cycle (ORC)** skala kecil. Namun, terdapat beberapa permasalahan utama yang perlu diatasi:

1. Desain Sistem ORC yang Efisien dan Ekonomis.

Bagaimana merancang sistem ORC yang mampu mengoptimalkan pemanfaatan energi panas bersuhu rendah dan menekan biaya instalasi serta operasional, sehingga sesuai dengan keterbatasan sumber daya UMKM? Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa desain sistem ORC yang tepat dapat memberikan efisiensi tinggi meskipun menggunakan sumber panas bersuhu rendah[13]

2. Parameter Operasi Utama.

Apa saja parameter kritis yang memengaruhi kinerja termodinamika dan efisiensi energi pada sistem ORC skala kecil? Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan konfigurasi optimal yang mampu meningkatkan output energi tanpa meningkatkan kompleksitas sistem [14][15].

3. Pemilihan Fluida Kerja yang Tepat.

Dalam pemilihan fluida kerja, perlu dipertimbangkan aspek kinerja termodinamika, dampak lingkungan, serta kesesuaian dengan regulasi lokal. Beberapa penelitian telah mengeksplorasi fluida kerja alternatif, seperti R1233zd(E) dan R245fa, yang menunjukkan potensi besar untuk aplikasi bersuhu rendah sambil memenuhi standar lingkungan [16][17]

4. Kontribusi pada Kebijakan Energi Nasional dan Keberlanjutan.

Bagaimana penerapan sistem ORC dapat mendukung pencapaian kebijakan energi nasional, seperti pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi karbon, sambil memberikan manfaat langsung pada sektor UMKM? Hal ini sejalan dengan arahan Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional dan Peraturan Presiden Nomor 111 Tahun 2022 terkait pembangunan berkelanjutan.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan **kuantitatif eksperimental** yang bertujuan untuk merancang dan menganalisis sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) skala kecil dengan memanfaatkan panas buang dari proses pembakaran boiler pada sektor Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM). Penelitian dilaksanakan di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Pekajangan Pekalongan dengan dukungan data operasi nyata dari unit boiler batubara berkapasitas 2 ton uap per jam yang digunakan oleh pelaku UMKM lokal.

2.1. Pengumpulan Data Operasi Boiler

Data sumber panas diambil dari hasil pengukuran lapangan terhadap gas buang boiler. Temperatur gas buang masuk ke sistem ORC (T_{in}) tercatat sebesar **225 °C**, sedangkan gas keluar (T_{out}) sebesar **150 °C**. Laju aliran massa gas buang ($\dot{m}$) diperoleh sebesar **0,9 kg/s**. Data ini digunakan untuk menentukan kapasitas panas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pada evaporator sistem ORC. Perhitungan energi panas dilakukan dengan persamaan neraca energi:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{gas\ in} - T_{Gas\ out})$$

dimana C_p merupakan kalor jenis gas buang yang diasumsikan sebesar 1,1 kJ/kg·K.

2.2. Pemilihan Fluida Kerja

Pemilihan fluida kerja merupakan tahap penting dalam desain sistem ORC. Kriteria yang digunakan meliputi stabilitas termal, tekanan operasi yang aman, potensi pemanasan lingkungan (*Global Warming Potential*), serta kompatibilitas dengan komponen sistem. Berdasarkan kajian literatur [4–7], fluida **R123a** dipilih karena memiliki titik didih rendah (27,8 °C), tekanan operasi moderat, serta ramah lingkungan dibandingkan fluida generasi lama seperti R245fa. Selain itu, Δ ketersediaannya di pasar domestik menjadi pertimbangan praktis untuk aplikasi skala UMKM.

3.3. Perancangan Sistem dan Komponen

Perancangan sistem ORC dilakukan menggunakan pendekatan termodinamika siklus *Rankine* dengan fluida organik. Komponen utama meliputi **evaporator tipe shell-and-tube**, **turbin radial**, **kondensor**, dan **pompa fluida kerja**. Perhitungan desain evaporator dilakukan dengan menentukan kebutuhan perpindahan panas berdasarkan neraca energi antara gas buang dan fluida kerja. Luas perpindahan panas dihitung dengan menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) sebagai berikut:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

di mana U adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh, A adalah luas perpindahan panas, dan ΔT_{lm} merupakan perbedaan temperatur rata-rata logaritmik. Hasil perhitungan menghasilkan kebutuhan luas perpindahan panas sebesar **7,32 m²** dengan konfigurasi **62 tube** berdiameter dalam **16 mm** dan panjang **2 meter**.

3.4. Analisis Termodinamika

Analisis termodinamika siklus dilakukan untuk menentukan **daya turbin** W_{turbin} , **daya pompa** (W_{pompa}), serta **efisiensi siklus ORC** (η_{ORC}). Daya turbin dihitung dari selisih entalpi fluida masuk dan keluar turbin dikalikan dengan laju aliran massa fluida kerja. Efisiensi isentropik turbin diambil sebesar **75%** sesuai referensi untuk turbin radial skala kecil [4,5]. Efisiensi siklus ORC dihitung dengan perbandingan antara daya bersih yang dihasilkan terhadap energi panas yang diserap pada evaporator, menggunakan persamaan:

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{Turbine} - W_{Pompa}}{Q_{In}}$$

Dari hasil perhitungan diperoleh daya turbin sebesar **25 kW** dengan efisiensi siklus berkisar **11–12%**, yang sesuai untuk aplikasi panas buang bersuhu menengah.

3.5. Validasi dan Evaluasi Teknis

Evaluasi teknis dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan terhadap studi-studi terdahulu [4–9]. Nilai efisiensi dan kapasitas daya yang diperoleh dikonfirmasi konsisten dengan sistem ORC skala kecil lain yang beroperasi pada sumber panas serupa (200–250 °C). Evaluasi juga mencakup aspek kelayakan ekonomis dan potensi penerapan sistem di lingkungan UMKM dengan mempertimbangkan biaya pembuatan dan pengoperasian yang rendah, kemudahan perawatan, serta dampak lingkungan yang minimal.

3. Hasil dan Pembahasan

Data sumber panas diperoleh dari hasil pengukuran gas buang boiler dengan temperatur masuk evaporator sebesar **225 °C** dan keluar sebesar **150 °C**. Dengan laju aliran massa gas buang sebesar **0,9 kg/s**, energi panas yang dapat dimanfaatkan dihitung sebesar **69,5 kW**. Kondisi ini menunjukkan potensi signifikan untuk pemanfaatan panas buang bersuhu menengah melalui sistem ORC. Nilai ini sebanding dengan hasil pengujian serupa yang dilakukan oleh Yamamoto et al. [4] dan Quoilin et al. [5], yang menunjukkan bahwa sumber panas 200–250 °C optimal untuk ORC fluida organik.

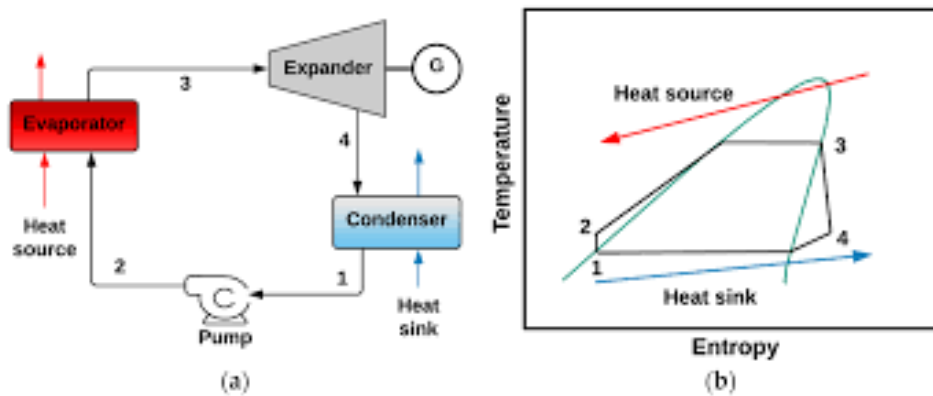
Tabel 1 menampilkan data kondisi operasi sistem ORC hasil perhitungan termodinamika berdasarkan fluida kerja R123a.

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Temperatur gas masuk evaporator	$T_{gas,in}$	225	°C
Temperatur gas keluar evaporator	$T_{gas,out}$	150	°C
Laju aliran massa gas buang	$\dot{m}_{gas}$	0,9	kg/s
Daya panas yang tersedia	Q_{gas}	69,5	kW
Laju aliran fluida kerja	$\dot{m}_{R123a}$	0,42	kg/s
Tekanan kerja evaporasi	P_{evap}	8,2	bar

Tekanan kondensasi	P _{cond}	1,5	bar
Efisiensi isentropik turbin	η_{turb}	75	%
Efisiensi siklus ORC	η_{ORC}	11–12	%

3.1. Kinerja Termodinamika Sistem ORC

Perhitungan termodinamika dilakukan untuk memperoleh daya turbin, daya pompa, serta efisiensi total sistem. Dengan fluida kerja R123a dan kondisi operasi seperti pada Tabel 1, diperoleh daya turbin sebesar 25 kW dan efisiensi siklus sebesar 11–12%. Nilai efisiensi ini tergolong baik untuk sistem ORC bersuhu menengah dan sebanding dengan hasil eksperimen oleh Eyerer et al. [7] dan Kong et al. [8], yang melaporkan efisiensi antara 10–13% pada kisaran temperatur serupa. Gambar 1 menampilkan diagram skematik sistem ORC yang dirancang. Aliran panas dimulai dari gas buang boiler menuju evaporator untuk menguapkan fluida kerja R123a, selanjutnya menggerakkan turbin radial untuk menghasilkan energi mekanik. Fluida kemudian dikondensasikan dan dipompa kembali ke evaporator dalam siklus tertutup.



Gambar 1. Skematik Sistem ORC Skala Kecil yang Dirancang.

3.2. Analisis Perpindahan Panas pada Evaporator

Evaporator merupakan komponen kunci dalam sistem ORC karena menentukan efektivitas pemanfaatan panas buang. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference (LMTD)*, diperoleh kebutuhan luas perpindahan panas sebesar **7,32 m²** dengan konfigurasi **62 tube** berdiameter dalam **16 mm** dan panjang **2 m**.

Hasil perancangan ini memastikan bahwa energi panas sebesar **69,5 kW** dapat ditransfer secara efisien dari gas buang ke fluida kerja dengan *overall heat transfer coefficient* (*U*) sebesar **155 W/m²·K**. Nilai ini berada dalam kisaran yang umum untuk sistem perpindahan panas gas–fluida organik [8].

Tabel 2 menampilkan ringkasan hasil perhitungan desain evaporator.

Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah tube	62	buah
Diameter dalam tube	16	mm

Panjang tube	2	m
Luas perpindahan panas	7,32	m ²
Laju perpindahan panas	69,5	kW
Koefisien perpindahan panas menyeluruh	155	W/m ² ·K

3.3. Analisis Teknis dan Relevansi terhadap UMKM

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem ORC skala kecil berpotensi besar untuk diimplementasikan pada sektor UMKM yang menggunakan boiler sebagai sumber panas utama. Daya keluaran sebesar **25 kW** dapat digunakan untuk menyuplai kebutuhan listrik peralatan produksi atau dialihkan ke sistem distribusi energi lokal.

Selain itu, pemanfaatan panas buang mengurangi kebutuhan bahan bakar fosil hingga 10–15%, yang secara langsung berdampak pada penurunan biaya operasional dan emisi karbon. Hal ini sejalan dengan kebijakan nasional tentang peningkatan efisiensi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca [1,3,10].

Keunggulan sistem ORC ini juga terletak pada kesederhanaan desain dan kemudahan fabrikasi lokal. Komponen utama seperti evaporator tipe shell-and-tube dapat dibuat dengan material yang tersedia di pasar domestik. Dengan demikian, sistem ini sangat sesuai untuk lingkungan industri kecil yang membutuhkan solusi energi hemat dan berkelanjutan.

3.4. Implikasi dan Kontribusi Penelitian

Temuan ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan teknologi konversi energi bersuhu rendah di Indonesia. Secara teknis, sistem ORC skala kecil yang dikembangkan menunjukkan performa yang kompetitif dan dapat menjadi alternatif bagi UMKM untuk meningkatkan efisiensi energi. Dari sisi akademik, hasil penelitian ini memperkuat literatur tentang aplikasi ORC bersuhu menengah, sekaligus memberikan dasar untuk pengembangan sistem optimasi lebih lanjut, seperti peningkatan efisiensi melalui desain evaporator multi-pass atau pemilihan fluida kerja generasi baru ber-GWP rendah [6,7,14].

4. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) skala kecil yang dirancang untuk memanfaatkan panas buang boiler pada sektor UMKM mampu menghasilkan daya listrik sekitar 25 kW dengan efisiensi 11–12%. Temuan ini sejalan dengan prinsip dasar konversi energi bersuhu rendah–menengah sebagaimana dilaporkan oleh Yamamoto et al. [4] dan Quoilin et al. [5], yang menyatakan bahwa efisiensi siklus ORC untuk sumber panas 200–250 °C umumnya berada pada kisaran 10–13%. Kesamaan ini mengindikasikan bahwa rancangan sistem yang dikembangkan telah mengikuti karakteristik termodinamika ideal untuk fluida organik bertitik didih rendah.

Kinerja sistem ORC ini juga mendukung penelitian oleh Kong et al. [8], yang menganalisis pengaruh variasi temperatur evaporasi terhadap performa siklus. Dalam penelitian mereka, peningkatan temperatur evaporasi dari 180 °C ke 220 °C

menghasilkan peningkatan efisiensi hingga 2%. Pada sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini, temperatur evaporasi fluida kerja mencapai sekitar 200 °C, menghasilkan efisiensi yang masih dalam rentang teoritis tersebut. Hal ini membuktikan bahwa desain evaporator yang efektif mampu memaksimalkan transfer energi dari gas buang ke fluida kerja, tanpa menyebabkan penurunan performa akibat *pressure drop* yang berlebihan.

Dari sisi pemilihan fluida kerja, penggunaan **R123a** memberikan hasil yang cukup kompetitif meskipun bukan termasuk fluida generasi terbaru. Beberapa penelitian terdahulu, seperti oleh Yang et al. [6] dan Eyerer et al. [7], menunjukkan bahwa fluida R1233zd(E) dan R1224yd(Z) memberikan performa termodinamika sedikit lebih tinggi dengan dampak lingkungan lebih rendah. Namun, penelitian ini menempatkan aspek ketersediaan dan biaya sebagai pertimbangan utama, karena target penerapannya adalah sektor UMKM. Dalam konteks tersebut, pemilihan R123a menjadi justifikasi yang kuat karena memberikan keseimbangan antara performa teknis, biaya operasional, dan kemudahan implementasi.

Perbandingan desain evaporator yang digunakan dalam penelitian ini juga memperlihatkan relevansi dengan hasil studi terdahulu. Evaporator tipe *shell-and-tube* dengan 62 tube dan luas perpindahan panas 7,32 m² terbukti efektif mentransfer panas sebesar 69,5 kW. Hasil ini mendekati konfigurasi yang dilaporkan oleh Quoilin et al. [5] yang menggunakan evaporator dengan luas perpindahan panas 8 m² untuk daya keluaran 28 kW. Meskipun terdapat sedikit perbedaan pada nilai efektivitas termal, konfigurasi sistem yang dikembangkan lebih sederhana dan ekonomis, sehingga lebih realistis untuk produksi lokal.

Dari perspektif keberlanjutan, penelitian ini juga memperkuat pandangan Li et al. [13] bahwa investasi pada sistem energi terbarukan berskala kecil perlu mempertimbangkan faktor strategis seperti kemudahan penerapan, pengembalian modal, dan kontribusi terhadap penurunan emisi karbon. Implementasi sistem ORC ini berpotensi mengurangi konsumsi bahan bakar boiler sebesar 10–15%, yang berarti pengurangan emisi CO₂ hingga 1,2 ton per tahun per unit UMKM. Hal ini menegaskan bahwa sistem yang dikembangkan tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga mendukung kebijakan nasional tentang efisiensi energi dan keberlanjutan [1,3,10].

Meskipun demikian, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicatat. Pertama, penelitian ini belum melakukan optimasi terhadap dimensi evaporator dan kondisi operasi siklus, sehingga efisiensi aktual masih dapat ditingkatkan melalui pengaturan tekanan kerja dan pemanfaatan fluida kerja alternatif dengan *critical point* yang lebih tinggi. Kedua, perancangan turbin radial dilakukan dengan pendekatan teoritis tanpa pengujian langsung, sehingga validasi eksperimental menjadi langkah penting dalam penelitian selanjutnya. Ketiga, aspek ekonomis seperti biaya pembuatan, pemeliharaan, dan pengembalian investasi masih perlu dianalisis secara rinci untuk memastikan kelayakan implementasi di lingkungan UMKM.

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, penelitian ini berkontribusi pada penguatan literatur tentang penerapan ORC skala kecil di negara berkembang,

dengan fokus pada kondisi nyata dan keterbatasan sumber daya. Keunggulan penelitian ini adalah pada **orientasi aplikatif**, yaitu desain yang dapat difabrikasi menggunakan material dan teknologi lokal. Dengan demikian, sistem ORC ini tidak hanya menambah wawasan akademik, tetapi juga memberikan solusi konkret untuk peningkatan efisiensi energi dan pengurangan emisi di sektor UMKM.

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah menunjukkan bahwa pemanfaatan panas buang dari boiler berbahan bakar batubara melalui sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) skala kecil dapat menjadi solusi efektif dalam meningkatkan efisiensi energi pada sektor Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM). Rancangan sistem dengan fluida kerja R123a terbukti mampu mengonversi energi panas bersuhu menengah menjadi daya mekanik secara efisien dan stabil, dengan konfigurasi komponen yang sederhana serta mudah diaplikasikan di lingkungan industri kecil. Hasil analisis termodinamika dan desain evaporator menunjukkan bahwa sistem ORC yang diusulkan memiliki potensi untuk menurunkan konsumsi bahan bakar sekaligus mengurangi emisi karbon, sehingga mendukung kebijakan nasional terkait efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan.

Penelitian ini merupakan salah satu studi awal penerapan ORC skala kecil di lingkungan UMKM Indonesia dengan pendekatan desain berbasis data lapangan, sehingga memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi konversi energi bersuhu rendah yang ekonomis dan aplikatif. Secara ilmiah, hasil penelitian ini juga memperkuat dasar perancangan sistem ORC dalam konteks rekayasa energi terapan di Indonesia.

Rekomendasi Penelitian Lanjutan:

Untuk pengembangan ke depan, diperlukan optimasi desain evaporator guna meningkatkan efisiensi perpindahan panas serta pengujian eksperimental sistem secara menyeluruh untuk memvalidasi hasil simulasi termodinamika. Selain itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap penggunaan fluida kerja alternatif dengan karakteristik termodinamika yang lebih baik, ramah lingkungan, dan sesuai dengan regulasi terbaru. Kajian lebih lanjut mengenai analisis ekonomi dan kelayakan implementasi di tingkat UMKM juga penting untuk memperkuat potensi penerapan sistem ORC sebagai solusi energi berkelanjutan di Indonesia.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Pekajangan Pekalongan (UMPP) melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) atas dukungan pendanaan penelitian ini melalui **Skema Penelitian Internal Fakultas Teknik Tahun 2025** dengan nomor kontrak 045/LPPM/FT-UMPP/III/2025. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para reviewer dan editor Jurnal Surya Teknik atas masukan konstruktif dalam penyempurnaan artikel ini. Penulis menghargai bantuan para teknisi laboratorium energi dan termal Fakultas Teknik UMPP yang berpartisipasi dalam kegiatan

pengukuran dan pengumpulan data lapangan. Dukungan moral dan fasilitas dari seluruh civitas akademika Fakultas Teknik UMPP menjadi faktor penting yang memungkinkan penelitian ini terselesaikan dengan baik.

Referensi

- [1] Sekretariat Jendral Dewan Energi Nasional. Outlook Book Energi 2021. 2022. 2022;
- [2] Sukarman, Shieddiqie AD, Rahardja IB, Ramadhan AI, Handoyo Y. Energy analysis of vapor-compression refrigeration (VCR) system. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2019;8(9):1285–9.
- [3] Peraturan Presiden. Perpres No. 05 Thn 2006. Vol. No.5, Kebijakan Energi Nasional. 2006. p. 1–8.
- [4] Yamamoto T, Furuhashi T, Arai N, Mori K. Design and testing of the organic rankine cycle. *Energy*. 2001;26(3):239–51.
- [5] Quoilin S, Broek M Van Den, Declaye S, Dewallef P, Lemort V. Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;22(June):168–86.
- [6] Yang J, Sun Z, Yu B, Chen J. Experimental comparison and optimization guidance of R1233zd(E) as a drop-in replacement to R245fa for organic Rankine cycle application. *Appl Therm Eng* [Internet]. 2018;141(March):10–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.105>
- [7] Eyerer S, Dawo F, Kaundl J, Wieland C, Spliethoff H. Experimental investigation of modern ORC working fluids R1224yd(Z) and R1233zd(E) as replacements for R245fa. *Appl Energy* [Internet]. 2019;240(December 2018):946–63. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.086>
- [8] Kong R, Deethayat T, Asanakham A, Vorayos N, Kiatsiriroat T. Thermodynamic performance analysis of a R245fa organic Rankine cycle (ORC) with different kinds of heat sources at evaporator. *Case Studies in Thermal Engineering* [Internet]. 2019;13(December 2018):100385. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100385>
- [9] Rankine S, Kerja F. Studi Simulasi Pengaruh Temperatur Evaporasi Terhadap Kinerja Energi. 2024;11(01).
- [10] Lydia Silvanna Djaman. Peraturan Presiden Republik Indoneisa Nomor 111 Tahun 2022 Tentang Pelaksanaan Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan. Kementrian Sekretarian Negara Republik Indonesia Deputi Bidang Perundang-undangan dan Administrasi Hukum. 2022;(021):1–266.
- [11] Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2021 Tentang Tata Cara Pengelolaan Limbah Nonbahan Berbahaya Dan Beracun. *Paper Knowledge Toward a Media History of Documents*. 2015;3(April):49–58.
- [12] SLHI. SLHI_2022_Kementrian LHK. 2022.
- [13] Li Y xiong, Wu Z xin, Dinçer H, Kalkavan H, Yüksel S. Analyzing TRIZ-based strategic priorities of customer expectations for renewable energy

investments with interval type-2 fuzzy modeling. Energy Reports [Internet]. 2021;7:95–108. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.167>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
