

Studi Eksperimental Kinerja Sistem Organic Rankine Cycle 2 kW Scroll Ekspander dengan Fluida Kerja R134a Pada Sumber Panas Temperatur Rendah

M. Idrus Alhamid ^{a,1}, Arnas Lubis ^a, Imansyah Ibnu Hakim ^a, Dwika Budiarto ^{a,b}

^aDepartemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

^bPusat Riset Konversi dan Konservasi Energi

Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Kawasan Sains Tekno Park BJ. Habibie Serpong, Tangerang Selatan 15314, Indonesia

¹mamak@eng.ui.ac.id

ABSTRACT

Organic Rankine Cycle (ORC) is one of the promising technology developments for energy conservation. It is environmentally friendly because it effectively converts low-temperature waste heat into mechanical work and even generates electrical power. This study focuses on the experimental performance of a 2 kW scale ORC prototype using a scroll-type expander and R134a working fluid. The scroll expander utilizes an air-cooled scroll compressor with a 57 cc/rev volume. The heat source uses thermal oil media heated by an electric heater to represent a low-temperature waste heat source. The flow rate of the R134a working fluid is regulated by the frequency variable on the centrifugal pump. The prototype system is equipped with temperature and pressure sensor instrumentation at each inlet outlet of the pump, evaporator, expander, and condenser components. In addition, the flow rate parameters of the working fluid, cooling water, and thermal oil are monitored by a turbine flow meter. The ORC performance testing method was carried out with a constant heat source at 80 oC, a working fluid flow rate at 30 - 45 Hz, and a loading variation of 3, 6, and 9 lamps (capacity 100 Watts per lamp). The performance of the thermodynamic cycle was investigated by analyzing the parameters of temperature data, pressure, and fluid flow rate on the main components to obtain the values of turbine shaft power, pump work, net thermal efficiency, and superheat temperature. The analysis showed that turbine power and thermal efficiency tended to increase with increasing working fluid flow rate and optimization of the degree of superheat temperature. The best experimental performance was obtained at a pump frequency of 45 Hz with a net thermal efficiency of 6.79%, a superheat degree of 11 oC, a turbine power of 2.03 kWth with a loading of 9 lamps so that it was able to produce an average electric power of 808 Watts, an expander frequency of 49.5 Hz, a voltage of 370 volts, a current of 1.25 ampere. This experimental research study provides an overview of the characterization of the operation of the ORC scroll expander system along with the achievement of its thermodynamic cycle performance.

Keywords: ORC, scroll expander, R134a, net thermal efficiency, turbine power, electric power

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590793

PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi organik Rankine cycle (ORC) yang mampu menghasilkan listrik dari energi terbarukan dari sumber panas berkualitas rendah mendapat perhatian lebih mendalam dalam aplikasinya. Pemulihan panas buang telah diterapkan secara efektif oleh ORC. Berbeda dengan siklus tenaga uap, ORC menggunakan hidrokarbon, refrigeran, minyak silikon, pelarut, atau senyawa organik lainnya sebagai fluida kerjanya. Karakteristik fluida organik yang memiliki titik didih rendah menyebabkan siklus ORC dapat beroperasi pada sumber panas yang rendah dan memutarakan expander. Pengoperasian yang lebih sederhana dengan tekanan operasi

yang relatif rendah, serta minim perawatan menjadikannya pilihan yang sangat baik untuk konversi panas ke listrik berkualitas rendah hingga menengah. Sumber panas yang berasal dari sumber daya terbarukan memiliki karakteristik yang unik, termasuk keandalan pasokan yang relatif intermiten dan kapasitas yang terbatas. Oleh karena itu, sangat penting untuk meningkatkan penyimpanan panas dari sumber energi terbarukan dengan menggabungkan berbagai sumber, termasuk energi matahari, biomassa, dan panas bumi, ke dalam pengaturan perangkat konversi panas yang ada.

Konfigurasi ORC sangat mirip dengan siklus Rankine uap tetapi memiliki seperangkat komponen yang lebih kompak. Komponen ORC mengalami proses fase yang dimulai dengan pompa yang memberikan tekanan tinggi pada fluida organik, diikuti dengan pemanasan di evaporator ke fase uap dan superheat, dan akhirnya mengubah uap bertekanan menjadi energi mekanik pada expander. Di dalam kondensor, air pendingin membuang panas fluida organik bertekanan uap rendah mengarah ke kondensasi fase liquid. Lalu cairan fluida organik dipompakan kembali ke seluruh sistem ORC secara berulang hingga kembali ke dalam sistem dari kondensor memulai siklus baru. Penambahan recuperator setelah expander dalam sistem dengan memanfaatkan suhu keluaran expander yang tinggi dapat meningkatkan efisiensi termal dengan bertindak sebagai penukar panas internal (Wang dkk., 2011a; Wang dkk., 2011b). Panas rata-rata yang ditransfer ke siklus lebih besar daripada di basic ORC, sementara panas yang dibuang ke lingkungan relatif rendah. Perbedaan suhu perpindahan panas ini mengarah pada peningkatan efisiensi siklus secara keseluruhan (Saleh et al., 2007).

Pemilihan fluida organik adalah aspek penting dari sistem ORC. Karakteristik termal-fisik fluida organik memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi termal, daya output expander, stabilitas sistem, ukuran komponen, keamanan, dan faktor lingkungan (Bao & Zhao, 2013). Untuk memaksimalkan ekstraksi panas dari aliran termal dan mencapai efisiensi tinggi dalam siklus, pemilihan fluida kerja sangat penting. Fluida organik mengandung molekul kompleks dengan berat molekul tinggi, suhu didih rendah, dan tekanan rendah.

Tchanche dkk. (2009) melakukan penelitian dengan memeriksa kesesuaian berbagai cairan organik untuk ORC pada suhu rendah. Dua puluh cairan yang berbeda diperiksa dan sifat-sifatnya dibandingkan dalam hal sifat mudah terbakar, toksisitas, rasio ekspansi, laju volume, dan efisiensi termal. Hasilnya menunjukkan bahwa tidak satu pun dari cairan yang diteliti memiliki semua kualitas yang diinginkan; pilihan harus mempertimbangkan kelebihan dan kekurangan masing-masing cairan. R134a memiliki kualitas cairan organik yang paling baik untuk aplikasi, diikuti oleh R152a, R290, butana, dan isobutana. Dalam penelitian Branchini dkk. (2013) meneliti ORC dengan mencari tahu enam parameter

termodinamika yang berbeda untuk melihat seberapa efektif kinerjanya. Variabel-variabel ini termasuk efisiensi pemulihan, parameter ukuran penukar panas, efisiensi siklus, dan kerja spesifik. Bahan kimia aromatik, senyawa siloksan, refrigeran, dan hidrokarbon digunakan sebagai cairan organik dalam penyelidikan. Selain itu, analisis ini menawarkan rekomendasi yang berharga untuk memilih desain fluida dan ORC yang optimal tergantung pada karakteristik operasional dan aplikasi yang diberikan. Untuk mengklasifikasikan fluida organik yang paling tepat untuk sumber panas yang mencakup berbagai macam suhu, Larsen dkk. (2014) menggunakan beberapa analisis regresi untuk menetapkan kinerja siklus termal yang optimal. Temuan penelitian menyimpulkan bahwa refrigeran dan alkana kering adalah fluida utama yang menunjukkan sifat ideal. Cairan organik terbaik dicantumkan oleh Rahbar dkk. (2017) dalam tinjauan aplikasi ORC kecil dengan konfigurasi subkritis. Cairan organik terbaik dalam kategori suhu rendah termasuk R134a, R245fa, R152a, R236fa, R227ca, R143a, R236ca, isobutana, dan amonia.

Selain pemilihan fluida organik, hal yang tidak kalah penting dalam mempengaruhi kinerja ORC adalah pemilihan jenis perangkat ekspansi. Pemilihan alat ekspansi sangat dipengaruhi oleh jenis fluida organik, kapasitas output daya, serta kondisi operasi siklus. Ada dua kategori mesin ekspansi: tipe volumetrik (*screw*, *piston*, *vane*, dan *scroll*) dan tipe kecepatan (aliran aksial dan radial). Ekspander *scroll* adalah perangkat ekspansi terbesar yang sesuai untuk ORC skala mikro dengan kapasitas daya antara 0,1 dan 2 kWe. Secara umum, *scroll* expander memanfaatkan dan memodifikasi kompresor gulir pada sistem AC dan pendingin. Kinerja aktualnya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan teori karena tidak dirancang khusus untuk kondisi operasi ORC.

Para peneliti telah bereksperimen dengan ORC menggunakan R134a dan expander tipe *scroll*. Zanelli dkk. (1994) mempelajari sifat-sifat daya listrik yang dibangkitkan, faktor pengisian (*filling factor*), dan efisiensi isentropik terhadap fluktuasi rasio tekanan pada expander *scroll hermetic* ORC skala kecil. Daya listrik yang dihasilkan adalah 1-3,5 kW dengan efisiensi isentropik antara 63% - 65%. Prototipe uji dirancang oleh Wang dkk. (2009) untuk memeriksa kinerja *scroll* expander R134a dengan volume *displacement* 6,8 cm³.

Kinerja scroll expander ORC dievaluasi menggunakan dinamometer terkait kecepatan, rasio tekanan (2,65 - 4,84). Menurut hasil pengujian dicapai efisiensi isentropik sekitar 70%. Moradi dkk. (2021) memantau pencapaian ORC skala mikro pada rentang suhu 120 °C dan 138 °C. Efisiensi isentropik untuk expander dan pompa masing-masing berkisar antara 17% - 34% dan 35% - 55%. Hasil daya output net yang tertinggi adalah sebesar 200 Watt. Martin dkk. (2018) menggunakan R134a untuk mengubah kompresor scroll mobil menjadi ekspander dengan kapasitas ORC 1 kW. Martin dkk. bereksperimen untuk mendapatkan efisiensi termal dan daya listrik pada suhu sumber panas yang ideal dari 75 °C hingga 95 °C. Hasilnya menunjukkan kinerja yang optimal, dengan efisiensi 3,3% dan 279,58 Watt pada tekanan input 1,25 MPa dan suhu 67,7 °C pada turbin. Mu dkk. (2015) memodifikasi kompresor scroll udara sebagai ekspander scroll dalam ORC skala mikro dengan fluida R134a. Prototipe uji dioperasikan pada kisaran suhu 55°C hingga 65°C dengan memanfaatkan *Waste Heat Recovery* sebagai sumber panas. Hasilnya menunjukkan efisiensi isentropik rata-rata screw expander sebesar 68%, sedangkan kisaran efisiensi termal sebesar 1,2% hingga 4,56%. Muslim dkk. (2020) juga menggunakan kompresor gulung sebagai turbin expander untuk melakukan studi eksperimental pada fluida kerja R134a. Hasil efisiensi termal yang dicapai berkisar antara 2,5% hingga 4,45% saat temperatur 90,5 °C. Zhu dkk. (2015) melakukan studi eksperimental pada ORC skala kecil dengan enam variasi resistansi beban yaitu 18.6, 19.4, 26.2, 34.7, 64.0, dan 75.6 Ohm dari segi output daya listrik, efisiensi listrik, serta rasio tekanan scroll ekspander. Peningkatan linear yang cepat dalam daya output dengan kecepatan adalah hasil dari beban resistif yang rendah. Apabila beban resistif diterapkan pada RPM yang konstan, output daya dan laju output daya akan terus menurun.

Temperatur operasi mempengaruhi bagaimana sistem ORC memilih fluida kerjanya dalam upaya mendapatkan desain sistem yang optimal (Nemati et al., 2017). Sementara hal ini terjadi, informasi tentang termodinamika fluida kerja diperlukan untuk menentukan efisiensi aplikasi pada berbagai rentang suhu (Johnson et al., 2008). Semua fluida organik dapat dipertimbangkan memiliki titik didih yang rendah serta suhu dan tekanan kritis yang lebih rendah daripada air (Lukawski., 2009 dan Bamorovat dkk., 2015) karena pertimbangan

faktor keamanan yang menguntungkan, yang mencakup fitur-fiturnya yang tidak beracun dan tidak mudah terbakar, refrigeran R134a sering digunakan dalam sistem ORC (National Refrigerant, 2016). Penggunaan scroll expander (Duta & Borah, 2018 dan Moradi dkk., 2021), yang memiliki dua bilah spiral, gulungan yang berputar dan tetap, laju aliran dan kecepatan rotasi yang sangat terbatas, serta rasio tekanan yang tinggi, mendominasi sistem berkapasitas rendah. Namun, dibandingkan dengan ekspander volumetrik alternatif, model khusus ini telah meningkatkan efisiensi isentropik, mengurangi kebisingan dan getaran, ketergantungan yang tinggi, dan lebih sedikit bagian yang bergerak-semuanya membuatnya cocok untuk sistem skala kecil 5 kW (Imron dkk, 2016; Dumont dkk, 2017; Alshammari & Usman, 2018; Clemente dkk, 2012; Campana dkk, 2019; Hijriawan dkk, 2022). Banyak peneliti yang telah membahas kinerja termodinamika unit ORC dengan penukar panas internal (IHE). Pemasangan IHE meningkatkan performa termodinamika, meningkatkan efisiensi energi dan termal (Li, 2016; Li dkk., 2011; Zhu dkk., 2014; Guo dkk., 2014; Saleh dkk., 2007; Budianto dkk., 2023). Bahkan penelitian Saleh dkk. (2013) serta Budianto dkk. (2023) dapat ditingkatkan lebih jauh lagi dengan menggabungkan IHE dan superheat.

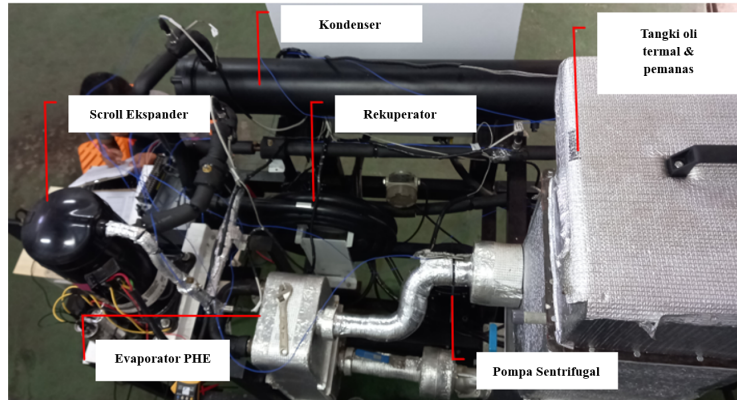
Berdasarkan latar belakang penelitian ORC tersebut, kami melakukan penelitian tentang *hermetic scroll expander* pada prototipe ORC skala kecil yang dilengkapi dengan recuperator serta memanfaatkan fluida organik R134a. Penelitian ini mengkaji performa ORC dalam beberapa variasi laju alir dan beban output daya listrik pada temperatur sumber panas 80 °C.

EKSPERIMENTAL SET UP & METODE

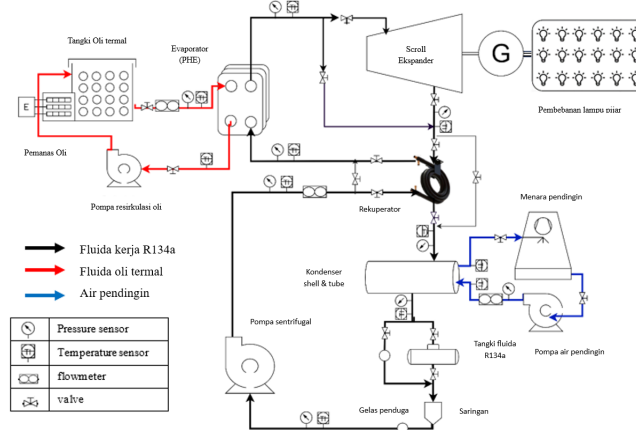
Fasilitas pengujian eksperimental prototipe ORC skala 2 kW dan skema diagram garis besar ORC ditunjukkan dalam Gambar 1 dan 2. Peralatan utama ORC ini terdiri dari pompa sentrifugal, recuperator, evaporator penukar panas, scroll expander yang terintegrasi dengan generator, kondensor, dan kontrol instrumen. Pemanas listrik digunakan untuk memanaskan termal oil sekaligus media sumber panas ke komponen evaporator. Recuperator menggunakan model *double pipe* yang dikonfigurasi dengan aliran berlawanan, di mana dua jenis fluida yang berbeda dimasukkan dari sisi yang berlawanan.

Sensor tekanan dan suhu dipasang pada aliran masuk dan keluar dari setiap komponen utama. Pembangkitan daya listrik dibaca menggunakan power meter, yang memonitor pembacaan tegangan, arus, dan frekuensi pada generator scroll expander. Flowmeter tipe turbin dipasang pada sisi keluaran pompa untuk menghitung laju

aliran fluida kerja R134a. Pompa sentrifugal dilengkapi dengan *Variable speed drive (VSD)* untuk mengatur besarnya laju aliran fluida organik. Spesifikasi rinci dari komponen dan instrumen pengukuran prototipe ORC ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 1. prototipe uji eksperimental ORC skala 2 kW



Gambar 2: Schematic diagram a small-scale ORC

Tabel 1. Spesifikasi komponen utama dan instrumen sensor

Komponen	Spesifikasi
Tipe ORC	Scroll expander, kapasitas 2 kW
Fluida kerja	Refrigerant R134a
Ekspander	Tipe hermetic scroll expander hingga 5 kW
Pompa utama	Laju alir maks. 3 m ³ /h, head 92.5 m, maks. operasi 25 bar/120 C, daya maks. 1.5 kW, speed 2890-2910 rpm, 380 volt 3 fase 50 Hz dilengkapi dengan <i>variable frequency drive</i>
Evaporator	Tipe <i>Plate Heat Exchanger (PHE)</i> Kapasitas 30 kW, tekanan max 30 bar, aliran berlawanan
Condenser	Tipe shell and tube
Internal Heat Exchanger	Penukar kalor coaxial pipa ganda 1 1/4 and 7/8 inch, 6 roll, konfigurasi counter flow
Pressure sensor	SPKT 0041 DO Carel, Pressure sensor rentang 0-18.2 bar, output 4-20 mA, power 24 VDC
Thermocouple	Tipe K, bahan stainless steel (1370 °C), akurasi ±0.4%
Power meter	Schneider PM5110, error frekuensi 0.1 Hz, akurasi 0.3% F.S. voltage & current
Flow meter fluida kerja	flow meter tipe turbine, rentang 0.2 – 1.2 m ³ /h
Flow meter termal	Elektromagnetik <i>flow meter</i> , rentang 0-10

oil m³/h

Sistem ORC ini terdiri dari penyediaan sumber panas, sirkulasi fluida organik dalam komponen utama, dan sistem pendingin yang mensirkulasikan air pendingin dalam kondensor. Sistem suplai termal memindahkan panas dari thermal oil ke cairan organik R134a melalui penukar kalor evaporator. Fluida R134a bertekanan berubah fasanya dari cair menjadi fasa uap dalam evaporator. Lalu uap bertekanan digunakan untuk memutar scroll expander. Dengan ekspander, daya putar mekanikal diubah menjadi daya output listrik. Uap fluida kerja yang keluar dari ekspander tekanan dan temperturnya turun, kemudian dialirkan melewati recuperator dan kondensor. Dalam kondensor, fluida organik terkondensasi & berubah fasa menjadi fasa cair. Oleh pompa sentrifugal cairan fluida kerja diresirkulasikan

kembali ke evaporator, ekspander, rekuperator, kondensator secara berulang & kontinyu.

Tabel 2. Persamaan energi untuk analisis kinerja termodinamika

No.	Komponen	Persamaan energi
1.	Pompa	$W_p = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_1)$ (1)
2.	Evaporator	$Q_{evap} = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_2)$ (2)
3.	Ekspander	$W_T = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_4)$ (3)
		$\eta_{is_exp} = (h_3 - h_4)/(h_3 - h_{4s})$ (4)
4.	Kondensator	$Q_{cond} = \dot{m}_{wf}(h_4 - h_1)$ (5)
5.	Suplai termal	$Q_{in} = \dot{m}_{oil} \cdot C_p \cdot (T_5 - T_6)$ (6)
6.	Efisiensi termal net	$\eta_{net} = \frac{W_T - W_p}{Q_{in}}$ (7)

Table 3. Parameter operasi prototipe ORC

Parameter	Rentang nilai
Temperatur termal oil	78 - 81 °C
Laju alir termal oil	4 m ³ /h
Total suplai termal	8 – 13 kW
Temperatur air pendingin	28 – 30 °C
Laju alir air pendingin	4 m ³ /h
Frekuensi pompa sentrifugal	30 Hz, 32,5 Hz, 35 Hz, 37,5 Hz, 40 Hz, 42,5 Hz, 45 Hz
Pembebanan daya output listrik	3 lampu, 6 lampu, 9 lampu (kapasitas lampu 100 watt/lampu)
Temperatur udara ambien & kelembaban	Temp. 28 – 30 °C, RH 60 – 85%

Perhitungan kinerja termodinamika sistem ORC dijelaskan dalam persamaan energi yang tercantum dalam Tabel 2.

Temperatur suplai panas yang digunakan dalam pengujian ORC diatur pada 80 °C sementara kontrol laju aliran massa fluida organik melalui pengaturan frekuensi pompa sentrifugal sebesar 30Hz, 32,5 Hz, 35 Hz, 37,5 Hz, 40 Hz, 42,5 Hz, dan 45 Hz. Pembebanan dummy load menggunakan lampu tipe pijar kapasitas 100 Watt/ lampu. Variasi pembebanan masing-masing terdiri dari 3 lampu, 6 lampu, 9 lampu. Sehingga diperoleh matrik uji sebanyak 15 variasi baik laju alir serta kapasitas pembebanan lampu. Kondisi parameter operasi ORC saat uji eksperimental dijelaskan dalam Tabel 3 sedangkan untuk matriks variasi pengujian ditunjukkan dalam Tabel 4.

Table 4. Matriks variasi pengujian

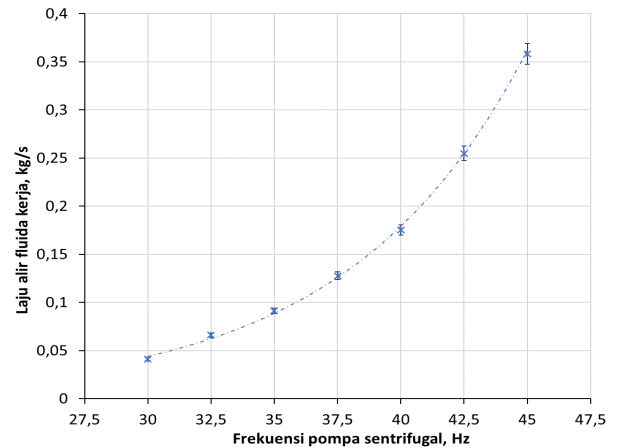
No.	Variasi pengujian		
	Temperatur sumber panas, °C	Frekuensi pompa, Hz	Beban lampu
1	80	30	3
2	80	32,5	3
3	80	35	3
4	80	35	6
5	80	37,5	3
6	80	37,5	6
7	80	37,5	9
8	80	40	3
9	80	40	6
10	80	40	9
11	80	42,5	3
12	80	42,5	6

13	80	42,5	9
14	80	45	3
15	80	45	6

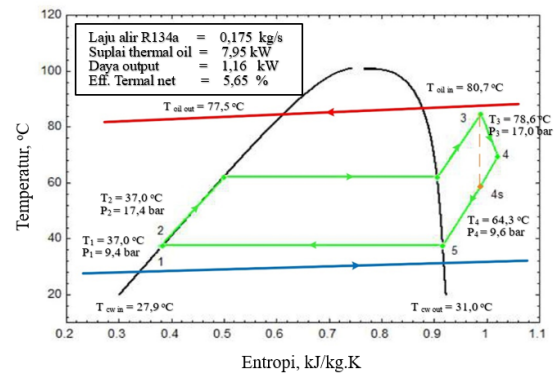
ANALISIS HASIL EKSPERIMENTAL

Hasil pengukuran kondisi tunak dilakukan untuk sistem ORC pada variasi laju alir 0,175 kg/s dan pembebanan 9 lampu pijar untuk mengekspresikan proses operasi secara terperinci ditunjukkan pada Gambar 5. Suhu sumber panas harus dijaga antara 80 °C. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, suhu inlet dan suhu outlet dari sumber panas masing-masing rata-rata adalah 81,1 °C dan 77,7 °C, sedangkan suhu saluran masuk dan keluar air pendingin masing-masing adalah 27,9 °C dan 31,0 °C. Suhu dan tekanan saluran masuk pompa R134a masing-masing adalah 37 °C dan 9,4 bar. R134a dipanaskan hingga 80,7 °C dan diberi tekanan hingga 17,4 bar setelah tekanan pompa. Setelah menyerap panas dari termal oil, suhu dan tekanan fluida kerja mencapai nilai maksimum dari 80,7 °C dan 17,0 bar. Penurunan tekanan sebesar 0,4 bar tidak dapat dihindari. Setelah kerja ekspansi, tekanan dan suhu pada outlet expander masing-masing adalah 9,6 bar dan 64,3 °C. Detail parameter tekanan dan temperatur pada kondisi laju alir fluida 0,175 kg/s dalam diagram T-s ditampilkan dalam Gambar 4.

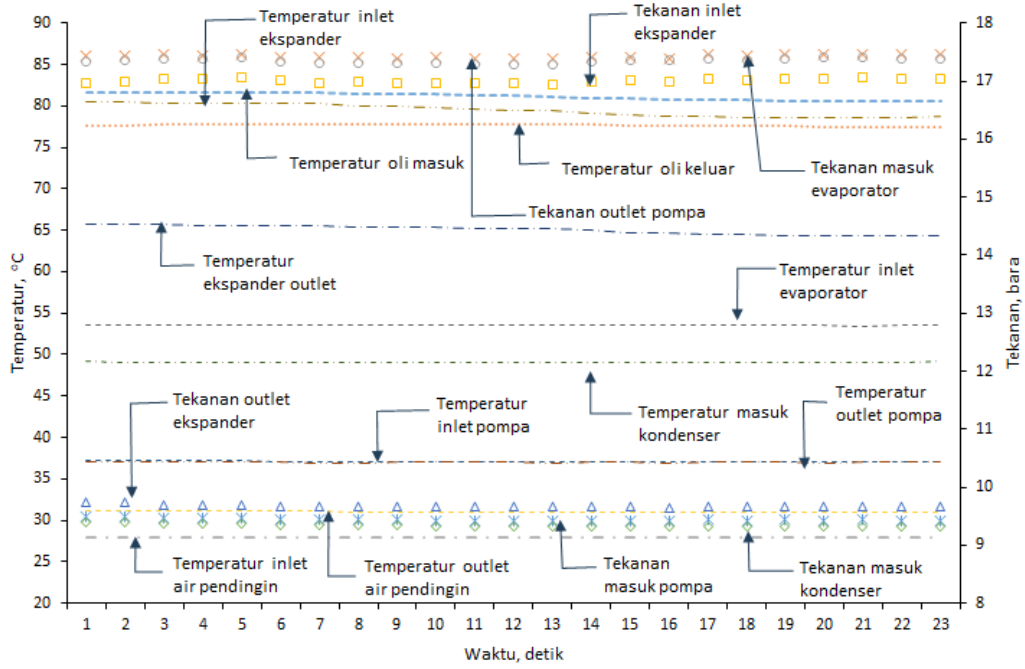
Laju alir fluida kerja R134a divariasikan pada rentang laju aliran massa 0,0409 kg/s, 0,066 kg/s, 0,091 kg/s, 0,127 kg/s, 0,175 kg/s, 0,255 kg/s dan 0,358 kg/s. Korelasi variasi laju alir terhadap pengaturan frekuensi pompa sentrifugal ditunjukkan dalam Gambar 3.



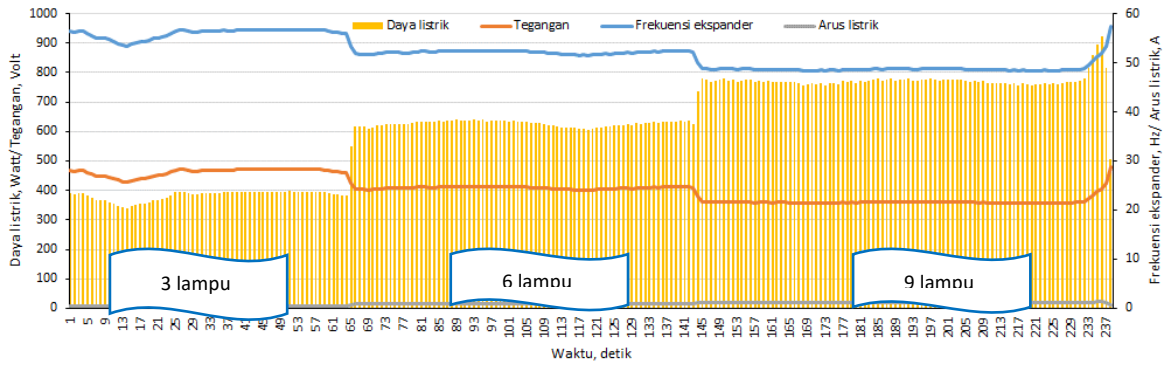
Gambar 3: Korelasi hubungan frekuensi pompa sentrifugal terhadap laju alir fluida R134a.



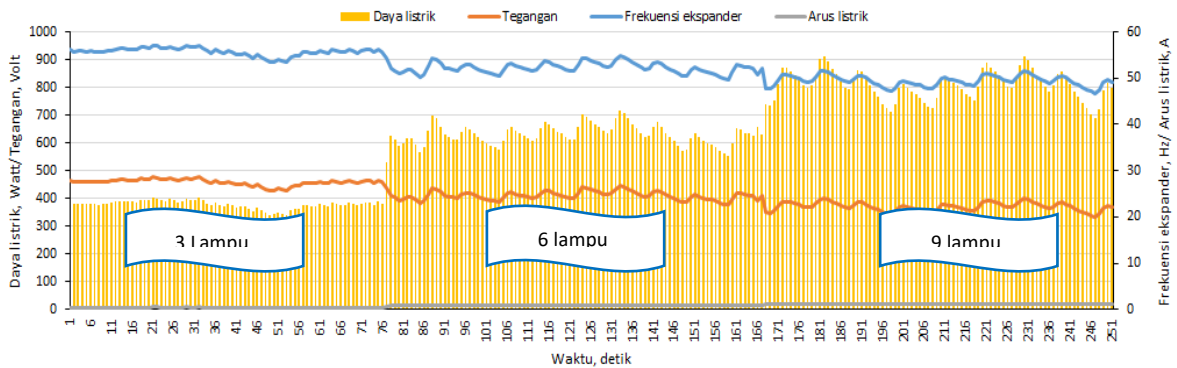
Gambar 4: Diagram T-s pada kondisi set sumber panas 80 C, laju alir 0,175 kg/s, pembebanan 9 lampu



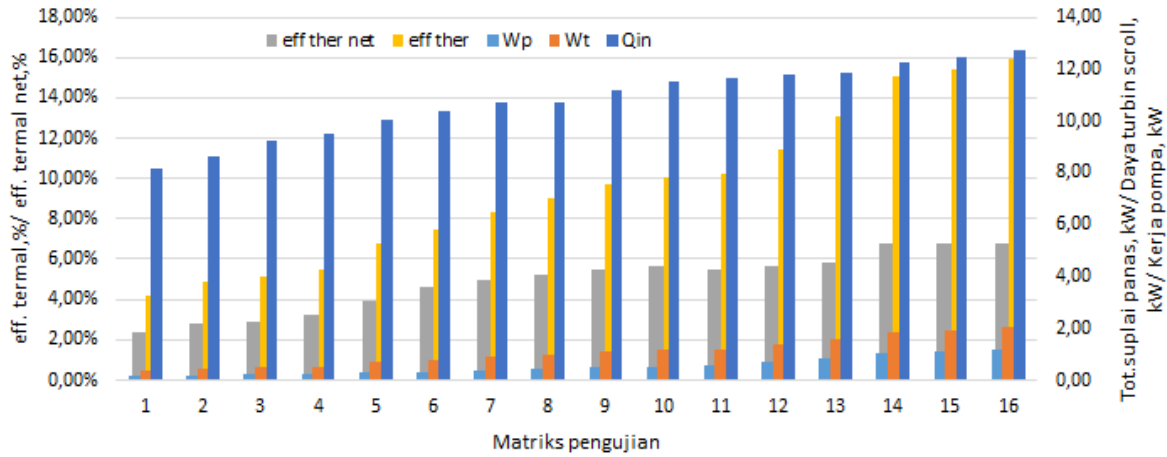
Gambar 5. Parameter operasi saat temperatur sumber panas stabil 80 oC, laju alir 0,175 kg/s, pembebanan 9 lampu



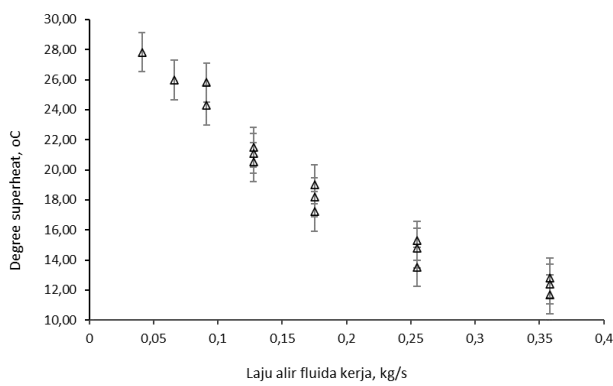
Gambar 6. Daya listrik saat temperatur sumber panas 80 C, laju alir 0,175 kg/s



Gambar 7. Daya listrik saat temperatur sumber panas 80 C, laju alir 0,358 kg/s



Gambar 8. Hasil kinerja termodinamika sistem ORC secara keseluruhan



Gambar 9. Derajat superheat terhadap laju alir fluida organik

Table 5. Keluaran daya listrik pada variasi laju alir fluida organik

Flowrate R134a	0,175 kg/s			0,358 kg/s		
	3L	6L	9L	3L	6L	9L
Load	3L	6L	9L	3L	6L	9L
Freq. Hz	55,9	52,1	48,7	55,7	52,2	49,4
Voltage, V	461	408	361	459	410	370
Current, A	0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2
Power electric, W	382	625	773	388	629	807

Dapat diketahui bahwa ketika suplai panas adalah 63 kW, daya bersih 3,94 kW dan efisiensi pembangkitan daya bersih 6,25% dapat diperoleh. Pada kondisi operasi saat temperatur sumber panas 80 °C, laju alir 0,175 kg/s, pembebanan 9 lampu dibutuhkan suplai panas 7,95 kW sehingga mampu menghasilkan daya output scroll expander sebesar 1,16 kW dan net efisiensi termal 5,65% serta daya listrik rata-rata sebesar 773 Watt.

Hasil keluaran daya listrik pada laju alir 0,175 kg/s dengan 3 variasi beban (3, 6, 9 lampu) dijelaskan dalam Gambar 6 sedangkan pada laju alir 0,358 kg/s ditunjukkan dalam Gambar 7. Dalam grafik keluaran daya listrik keduanya menunjukkan bahwa semakin meningkat laju alir fluida kerja maka juga akan menghasilkan daya listrik yang lebih besar pada kondisi sumber termal yang sama. Parameter laju alir fluida organik secara langsung mempengaruhi kecepatan putar scroll expander sehingga berdampak peningkatan produksi daya listrik baik itu pada beban 3 lampu, 6 lampu maupun 9 lampu. Hasil perbandingan keluaran daya listrik dengan kedua

variasi laju alir fluida R134a dijelaskan secara detail dalam Tabel 5.

Data kinerja termodinamika uji eksperimental ORC dengan 15 matrik variasi uji mulai dari efisiensi termal, efisiensi termal net, total suplai termal, daya output turbin scroll expander, dan kerja pompa disajikan dalam Gambar 8. Variasi matriks uji merujuk pada Tabel 4 untuk masing-masing kondisi uji. Berdasarkan grafik kinerja termodinamika ORC secara keseluruhan mengindikasikan bahwa semakin meningkat laju alir fluida kerja dan semakin besar pembebanan maka akan mendapatkan efisiensi termal dan efisiensi termal net yang semakin bagus. Selain itu suplai panas yang dibutuhkan juga semakin meningkat, daya turbin scroll dan kerja pompa juga meningkat. Dari sisi daya keluaran listrik juga terjadi perbaikan daya output listrik, meskipun secara frekuensi generator, dan tegangan mengalami sedikit penurunan karena terlalu besar kapasitas pembebanan. Kondisi terbaik diperoleh pada variasi laju alir 0,358 kg/s dengan pembebanan 9 lampu dimana mampu menghasilkan efisiensi termal net 6,79%, daya

turbin 2,03 kW, kerja pompa 1,16 kW, total suplai panas sebesar 12,76 kW. Daya listrik yang dibangkitkan 807 Watt (3 fasa), pada frekuensi 49 Hz, tegangan 370 volt, arus listrik 1,2 ampere.

Derajat superheat temperatur merupakan selisih antara temperatur fluida organik pada sisi inlet expander terhadap temperatur saturasi pada tekanan aktual pada lokasi yang sama. Gambar 9 menggambarkan korelasi derajat superheat temperatur terhadap variasi laju alir fluida organik pada kondisi sumber panas 80 °C. Pada laju alir yang relatif rendah dan pembebanan listrik yang rendah, maka derajat temperatur superheat akan meningkat tajam, dan begitu sebaliknya derajat superheat akan turun sejalan dengan meningkatnya laju alir fluida organik. Kondisi derajat superheat yang terlalu tinggi tentu akan mempengaruhi penurunan kinerja efisiensi termal dan daya output expander. Hal ini dikarenakan temperatur fluida organik yang terlalu tinggi dalam fase uap sehingga volumenya meningkat, sedangkan scroll expander dibatasi oleh kapasitas volumetrik.

KESIMPULAN

Studi eksperimental pada scroll expander ORC telah dilakukan dengan 15 variasi matriks pengujian yang memvariasikan laju alir fluida R134a serta pembebanan daya listrik pada kondisi sumber panas 80 °C. Dari hasil kinerja termodinamika terhadap keseluruhan variasi matriks uji dapat disimpulkan bahwa:

1. Semakin meningkat laju alir fluida kerja dan semakin besar pembebanan maka akan menghasilkan efisiensi termal dan efisiensi termal net yang semakin bagus. Selain itu, suplai panas yang dibutuhkan juga semakin meningkat, daya turbin scroll expander dan kerja pompa juga meningkat. Dari sisi daya keluaran listrik juga terjadi perbaikan daya output listrik, meskipun secara frekuensi generator, dan tegangan mengalami sedikit penurunan karena terlalu besar kapasitas pembebanan dibandingkan dengan daya yg dihasilkan scroll expander.
2. Kondisi terbaik diperoleh pada variasi laju alir 0,358 kg/s dengan pembebanan 9 lampu dimana mampu menghasilkan efisiensi termal net 6,79%, daya turbin 2,03 kW, kerja pompa 1,16 kW, total suplai panas sebesar

12,76 kW. Daya listrik yang dibangkitkan 807 Watt.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset & Inovasi Nasional (BRIN) dan Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia yang telah mendukung pendanaan riset ORC dan supervisi kegiatan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Wang EH, Zhang HG, Fan BY, Ouyang MG, Zhao Y, Mu QH. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery. *Energy* 2011;36(5):3406–18.
- [2]. Wang W, Wu Y-T, Ma C-F, Liu L-D, Yu J. Preliminary experimental study of single screw expander prototype. *Appl Therm Eng* 2011;31(17–18):3684–8.
- [3]. Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, Fischer J. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy* 2007;32(7):1210–21.
- [4]. Bao J, Zhao L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;24:325–42.
- [5]. Tchanche BF, Papadakis G, Lambrinos G, Frangoudakis A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Appl Therm Eng* 2009;29(11–12):2468–76.
- [6]. Branchini L, De Pascale A, Peretto A. Systematic comparison of ORC configurations by means of comprehensive performance indexes. *Appl Therm Eng* 2013;61(2):129–40.
- [7]. Larsen U, Pierobon L, Wronski J, Haglind F. Multiple regression models for the prediction of the maximum obtainable thermal efficiency of organic Rankine cycles. *Energy* 2014;65:503–10.
- [8]. Rahbar K, Mahmoud S, Al-Dadah RK, Moazami N, Mirhadizabeh SA. Review of organic Rankine cycle for small-scale applications. *Energy Conversion and Management* 2017; 135-155

- [9]. Zanelli R, Favrat D. Experimental investigation of a hermetic scroll expander generator. In: The 12th international compressor engineering conference, Purdue, USA 1994.
- [10]. Wang H, Peterson RB, Herron T. Experimental performance of a compliant scroll expander for an organic Rankine cycle. *Proc Inst Mech Eng, Part A: J Power Energy* 2009;223(7):863–72.
- [11]. Moradi, R.; Habib, E.; Bocci, E.; Cioccolanti, L. Component-Oriented Modeling of a Micro-Scale Organic Rankine Cycle System for Waste Heat Recovery Applications. *Appl. Sci.* 2021.
- [12]. Martin, A.; Romy, R.; Agustina, D.; Ibra, A.M. Experimental study of an organic rankine cycle system using r134a as working fluid with helical evaporator and condenser. In *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bali, Indonesia, 24–25 October 2018; Volume 539, p. 012026.*
- [13]. Mu, Y.; Zhang, Y.; Deng, N.; Nie, J. Experimental Study of a Low-Temperature Power Generation System in an Organic Rankine Cycle. *J. Energy Eng.* 2015, 141, 04014017.
- [14]. M. Muslim., M.I. Alhamid, Nasruddin, B. Ismoyo, “Analysis of the Scroll Compressor Changing into an Expander for Small Scale Power Plants Using an Organic Rankine Cycle System,” *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, Vol. 07, Issue 04, 2020, p.615-620.
- [15]. J Zhu, Z Chen, H Huang, Y Yan, “Effect of resistive load on the performance of an organic Rankine cycle with a scroll expander,” *Energy* 95 (2016) 21-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.048>
- [16]. Nemati, H. Nami, F. Ranjbar, M. Yari, Case studies in thermal engineering a comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: a case study for CGAM cogeneration system, *Case Stud. Therm. Eng.* 2017 (9) (2016) 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.11.003>.
- [17]. Johnson, W.T. Choate, A. Davidson, *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*; BCS Inc., Laurel, MD: United State, 2008. 10.2172/1218716.
- [18]. M. Lukawski, *Design and optimization of standardized organic Rankine cycle power plant for European conditions*, RES: The School for Renewable Energy Science: Akuyreyri, 2009.
- [19]. G. Bamorovat Abadi, E. Yun, K.C. Kim, Experimental study of a 1 Kw organic Rankine cycle with a zeotropic mixture of R245fa/R134a, *Energy* 93 (2015) 2363–2373, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.092>.
- [20]. National Refrigerant, *National Refrigerant Reference Guide*, 6th ed., National Refrigerant Inc, Philadelphia, 2016.
- [21]. S.P. Dutta, R.C. Borah, Design of a solar organic Rankine cycle prototype for 1 KW power output, *Int. J. Eng. Trends Technol.* 62 (1) (2018) 23–33.
- [22]. R. Moradi, M. Villarini, L. Cioccolanti, Experimental modeling of a lubricated, open drive scroll expander for micro-scale organic Rankine cycle systems, *Appl. Therm. Eng.* 190 (February) (2021), <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116784> 116784.
- [23]. M. Imran, M. Usman, B. Park, D. Lee, Volumetric expanders for low-grade heat and waste heat recovery applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57 (2016) 1090–1109, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.139>.
- [24]. Dumont, R. Dickes, V. Lemort, Experimental investigation of four volumetric expanders, *Energy Procedia* 129 (2017) 859–866, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.206>.
- [25]. F. Alshammari, M. Usman, A. Pesyridis, Expanders for Organic Rankine Cycle Technology, *IntehcOpen*, 2018, pp. 41–59, <https://doi.org/10.5772/intechopen.78720>.
- [26]. S. Clemente, D. Micheli, M. Reini, R. Taccani, Energy efficiency analysis of organic Rankine cycles with scroll

- expanders for cogenerative applications, *Appl. Energy* 97 (2012) 792–801, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.029>.
- [27]. C. Campana, L. Cioccolanti, M. Renzi, F. Caresana, Experimental analysis of a small-scale scroll expander for low-temperature waste heat recovery in organic Rankine cycle, *Energy* 187 (2019) 115929, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115929>.
- [28]. M Hijriawan, NA Pambudi, DS Wijayanto, MK Biddinika, Experimental analysis of R134a working fluid on Organic Rankine Cycle (ORC) systems with scroll-expander, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 29 (2022) 101036. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.06.016>
- [29]. G. Li, “Organic Rankine cycle performance evaluation and thermo-economic assessment with various applications part II: economic assessment aspect,” *Renew Sustain Energy Rev* 2016;64:490-505.
- [30]. W. Li, X. Feng, L.J. Yu, J. Xu, “Effects of evaporating temperature and internal heat exchanger on organic Rankine cycle,” *Appl. Therm. Eng.* 2011;31(17): 4014-23.
- [31]. Y. Zhu, Z. Hu, Y. Zhou, L. Jiang, L. Yu, “Discussion of the internal heat exchangers effect on the Organic Rankine Cycle,” *Appl. Therm. Eng.* 2015;75:334-43. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.037>.
- [32]. C. Guo, X. Du, L. Yang, Y. Yang, “Performance analysis of organic Rankine cycle based on location of heat transfer pinch point in evaporator,” *Appl. Therm. Eng.* 2014;62(1):176-86. doi:10.1016/J.Appl Thermal. Eng.2013.09.036.
- [33]. B. Saleh, G. Koglbauer, M. Wendland, J. Fischer, “Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles,” *Energy* 32(7):1210-1221(2007). DOI:10.1016/j.energy.2006.07.001.
- [34]. D Budianto , B Ismoyo, Cahyadi, E Djubaedah, A Lubis, MI Alhamid, “Small-Scale Organic Rankine Cycle Performance Using an Additional Heat Exchanger,” *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy* Vol. 10 Issue 3, pp 1717-1725, September 2023
- [35]. Y Feng, H Liang, K Xu, Y Wang, Y Lu, C Lin, T Hung, “Experimental study on performance of a great progress 10 kW organic Rankine cycle for low-grade heat source based on scroll-type expander,” *Energy* 284 (2023) 128627. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128627>
- [36]. Z Wu, D Pan, N Gao, T Zhu, F Xie, “Experimental testing and numerical simulation of scroll expander in a small scale organic Rankine cycle system,” *Applied Thermal Engineering* 87 (2015) 529-537. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.040>
- [37]. J Oh, H Jeong, J Kim, H Lee, “Numerical and experimental investigation on thermal-hydraulic characteristics of a scroll expander for organic Rankine cycle”, *Applied Energy* 278 (2020) 115672. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115672>