

## Analisa Termodinamika Pemanfaatan Gas Buang Boiler Untuk Pembangkit Daya Melalui *Organic Rankine Cycle*

Ali Hasimi Pane  
Universitas Asahan, Kisaran  
[ali.h.pane@gmail.com](mailto:ali.h.pane@gmail.com)

### Abstrak

Dalam tulisan ini, kajian termodinamika adalah dilakukan pada *organic Rankine cycle* (ORC) subkritis untuk pembangkit daya menggunakan lima fluida kerja berbeda, diantaranya: R123, R245fa, n-butane, n-pentane dan isopentane. Gas buang boiler dari pabrik kelapa sawit (PKS) pada temperatur rata-rata 325°C digunakan untuk memanaskan air sampai temperatur 150°C. Kemudian air panas tersebut digunakan sebagai sumber energi thermal untuk sistem ORC. Fluida kerja keluar dari evaporator dan dialirkan masuk ke ekspander adalah dalam kondisi uap saturasi. Kemudian sistem ORC disimulasikan berdasarkan pada temperatur evaporator dengan kondisi batas  $55 \leq T_{ev} \leq (T_6-10)^\circ\text{C}$  dan temperatur kondensor adalah diatur tetap pada 35°C. Untuk menentukan daya netto maksimal dan efisiensi thermal sistem ORC adalah disimulasikan menggunakan *EES*. Berdasarkan dari perhitungan simulasi, parameter daya netto maksimal untuk semua fluida kerja adalah terjadi pada temperatur evaporator optimal. Sementara itu, untuk parameter efisiensi thermal adalah ditentukan berdasarkan pada perolehan parameter temperatur evaporator optimal. Hasilnya, R245fa adalah sebagai fluida kerja dengan parameter daya netto maksimal tertinggi dan R123 adalah sebagai fluida dengan parameter efisiensi thermal tertinggi. Sementara itu, n-pentane adalah sebagai fluida kerja dengan hasil parameter terendah, baik untuk daya netto maksimal maupun efisiensi thermal. Kesimpulannya, gas buang boiler dari industri PKS adalah sangat mungkin dan berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit daya bertemperatur rendah melalui sistem ORC.

**Kata Kunci:** gas buang boiler, ORC, fluida kerja, daya netto maksimal, efisiensi thermal.

### Abstract

*In this paper, a thermodynamic study is conducted on a subcritical organic Rankine cycle (ORC) for power generation using five different working fluids, including: R123, R245fa, n-butane, n-pentane and isopentane. The boiler exhaust gas from the palm oil mill (POM) at an average temperature of 325°C is used to heat water to a temperature of 150°C. Then the hot water is used as a source of thermal energy for the ORC system. The working fluid out of the evaporator and flowed into the expander is in saturation vapor condition. Then the ORC system is simulated based on the evaporator temperature with a boundary condition of  $55 \leq T_{ev} \leq (T_6-10)^\circ\text{C}$  and the condenser temperature is fixed at 35°C. To determine the maximum net power and thermal efficiency of the ORC system is simulated using *EES*. Based on simulation calculations, the maximum net power parameter for all working fluids occurs at the optimal evaporator temperature. Meanwhile, the thermal efficiency parameter is determined based on the acquisition of the optimal evaporator temperature parameter. As a result, R245fa is the working fluid with the highest maximum net power parameter and R123 is the working fluid with the highest thermal efficiency parameter. Meanwhile, n-pentane is the working fluid with the lowest parameter results, both for maximum net power and thermal efficiency. In conclusion, boiler exhaust gas from the POM industry is very possible and has the potential to be utilized as an energy source for low-temperature power generation through the ORC system.*

**Keywords:** boiler exhaust gas, ORC, working fluid, maximum net power, thermal efficiency.

## Pendahuluan

Pada umumnya, sistem boiler pada pabrik kelapa sawit (PKS) adalah jenis pipa air dengan bahan bakar serat dan cangkang kelapa sawit. Persentase perbandingan antara serat dan cangkang yang digunakan adalah sebesar (70:30)% dan dibakar langsung dalam boiler untuk menghasilkan uap air saturasi atau superpanas [Nasution M. A. et al., 2014]. Uap air yang dihasilkan oleh boiler selain akan digunakan sebagai energi thermal untuk proses produksi kelapa sawit menjadi *crude palm oil* (CPO) dan juga dikonversi menjadi energi listrik melalui turbin uap dikopel dengan generator listrik.

Gas buang boiler dari PKS yang dibuang kelingkungan melalui cerobong asap adalah merupakan limbah energi panas masih dalam kondisi bertemperatur tinggi. Dengan kata lain masih memiliki rugi energi panas dalam jumlah yang besar terbuang begitu saja. Jika gas buang boiler tersebut dimanfaatkan untuk sistem pemanas air pengisi boiler dan sistem thermal lainnya, maka dapat meningkatkan efisiensi boiler. Gas buang atau limbah energi panas dari sistem konversi energi dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi untuk pembangkit daya melalui *organic Rankine cycle* (ORC). Karena teknologi sistem ORC dapat beroperasi dengan menggunakan sumber energi bertemperatur rendah. Itu dikarenakan sifat dari fluida kerja sistem ORC dapat menguap pada temperatur rendah.

Penelitian tentang pemanfaatan limbah energi panas sebagai sumber energi sistem ORC adalah banyak dilakukan melalui pendekatan analisa permodelan termodinamika dimana fluida kerja dipilih dan ditentukan berdasarkan kondisi batas parameter penelitian. Dari hal tersebut, nantinya akan diperoleh baik untuk besaran daya output maupun efisiensi thermal sistem ORC. Dari review literatur, Ahluriza et al., (2023) melakukan penelitian dengan memanfaatkan limbah energi panas dari sistem pengkondisian udara (AC) sebagai sumber energi sistem ORC. Analisa termodinamika dilakukan berdasarkan analisa energi dan eksergi dengan fluida kerja yang berbeda, dan diperoleh bahwa fluida kerja R227ea untuk sistem ORC dan R600a untuk sistem AC menjadi pasangan fluida kerja yang berkinerja lebih baik dengan COP naik berkisar antara 3,65 sampai 5,37, daya netto dihasilkan sebesar 4,14 kW, efisiensi thermal dan eksergi dihasilkan sebesar 5,129% dan 25,37%. Wang S. et al., (2023) melakukan penelitian pemulihan limbah energi panas dari gas buang dan air pendingin mesin Diesel kapal laut. Dalam hal ini, diusulkan kombinasi antara mesin Diesel dengan

sistem ORC. Analisa termodinamika dilakukan dengan lima fluida kerja berbeda dengan potensi pemanasan global yang rendah dan parameter potensi penipisan ozon dan untuk menentukan parameter daya netto dan efisiensi dari kombinasi mesin Diesel-sistem ORC. Hasilnya, fluida kerja butane memiliki kinerja lebih baik dari pada fluida kerja lainnya dengan daya netto sistem kombinasi sebesar 1048 kW dan efisiensi daya sistem ORC dibawah beban 100% adalah sebesar 12,27%. Oyedepo S. O. & A. B. Fakeye, (2020) melakukan penelitian untuk kelayakan teknis konversi limbah energi panas menjadi listrik dari gas buang pembangkit listrik turbin gas berkapasitas 5,77 MW dengan menggunakan siklus Rankine organik (ORC). Analisa termodinamika dilakukan menggunakan 5 fluida kerja berbeda dan fluida kerja toluene menunjukkan kinerja terbaik pada kondisi beban generator listrik penuh dan parsial dengan daya netto 532,70 kW pada beban penuh dan 412,95 kW pada beban parsial 75%, sedangkan pada beban parsial 50%, R245fa memiliki daya netto tertinggi 469,09 kW. Kemudian Efisiensi siklus dari sistem siklus Rankine organik meningkat dari 34,67% pada beban penuh menjadi 40,51%. Kilic, Bayram & Osman Ipek, (2018) melakukan analisis termodinamika pada sistem ORC untuk pemulihan limbah energi panas mesin diesel dengan 5 fluida kerja berbeda. Hasilnya, R123 adalah sebagai fluida kerja dengan kinerja lebih baik dari fluida kerja lainnya pada kondisi operasi yang sama, dimana efisiensi thermal diperoleh sebesar 23% dan daya turbin sebesar 7,2 kW. Guo, Cong et al., (2015) adalah meneliti sistem ORC dengan memanfaatkan gas buang boiler dan disimulasi berdasarkan pada analisa termodinamika dan efek dari temperatur pinch point evaporator untuk menentukan kinerja sistem melalui 3 fluida kerja berbeda, yaitu: fluida kerja murni, fluida kerja campuran sesuai sumber energi panas dan fluida campuran sesuai *heat sink*. Hasilnya, fluida kerja Campuran yang sesuai *heat sink* menunjukkan kinerja terbaik di antara tiga fluida kerja dengan hasil efisiensi thermal sebagai acuannya. Efisiensi termalnya mencapai 6,01% lebih tinggi dibandingkan dengan campuran yang sesuai dengan sumber panas, dan hingga 8,81% lebih tinggi dibandingkan dengan fluida kerja murni.

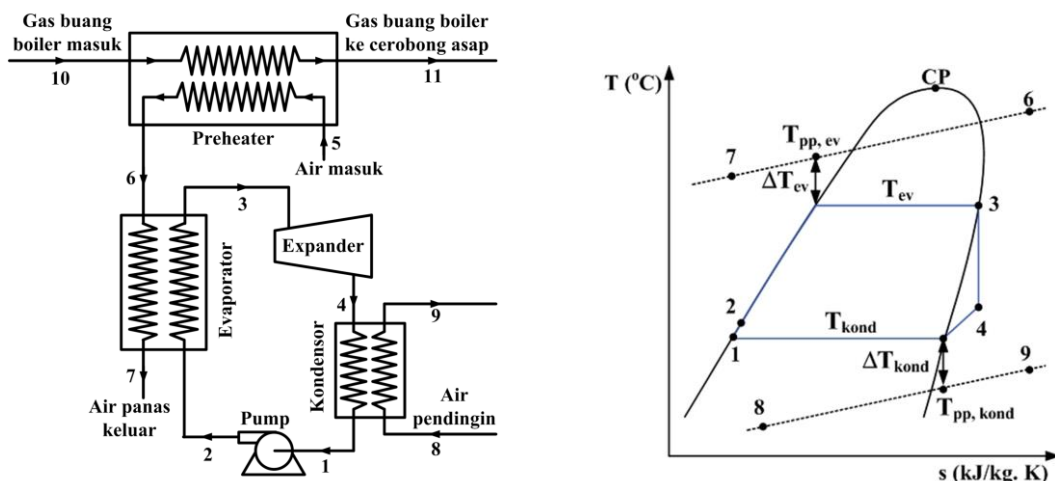
Berdasarkan dari review literatur diatas, maka pemanfaatan gas buang boiler sebagai limbah energi panas dari pabrik PKS dapat digunakan sebagai sumber energi sistem ORC. Karena berdasarkan dari hasil observasi melalui survei dilapangan diketahui bahwa temperatur gas buang boiler pada sebuah pabrik PKS swasta PT XYZ

(pihak terkait tidak mengizinkan untuk menulis nama perusahaannya) adalah berkisar antara 300 sampai dengan 360°C. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besaran daya netto dan efisiensi thermal yang dapat dihasilkan oleh sistem ORC subkritis melalui lima fluida kerja yang berbeda, yaitu: R123, R245fa, n-butane, n-pentane dan isopentane.

### Metode

Dalam tulisan ini, sistem ORC akan dianalisa berdasarkan pada kajian teoritis melalui permodelan thermodinamika. Proses penyelesaian permodelan thermodinamika tersebut, baik untuk database sifat-sifat thermodinamika dari kelima fluida kerja sistem ORC yang dipilih maupun untuk proses penyelesaian perhitungan akan disimulasikan dengan menggunakan sebuah program komputer *engineering equation solver* (EES).

### Sistem ORC dan analisa thermodinamika



Gambar 1. Skematik dan diagram T-s sistem ORC

Sistem ORC dasar adalah terdiri dari pompa, evaporator, expander dan kondensor. Pada gambar 1, gas buang boiler (proses 10-11) adalah tidak dialirkan secara langsung ke evaporator sistem ORC, akan tetapi dialirkan melintasi preheater (proses 5-6) untuk memanaskan air sebagai sumber energi thermal sistem ORC. Kemudian air panas keluaran dari preheater dialirkan ke evaporator untuk proses evaporasi fluida kerja (proses 2-3). Fluida kerja pada kondisi uap saturasi yang dihasilkan oleh evaporator dialirkan masuk ke ekspander (proses 3-4) dan berlangsung proses ekspansi untuk menghasilkan daya. Kemudian fluida kerja keluaran dari ekspander dialirkan ke

kondensor (proses 4-1) untuk didinginkan dan diubah menjadi cairan jenuh. Setelah itu, dialirkan kembali ke evaporator melalui pompa (proses 1-2) secara berkesinambungan.

Analisa termodinamika yang dilakukan pada sistem ORC adalah dengan asumsi bahwa proses termodinamika yang berlangsung pada sistem dalam kondisi ideal dan *steady*. Kemudian penurunan tekanan dan rugi energi thermal pada heat exchanger dapat abaikan. Dan untuk efisiensi isentropis baik pada pompa maupun ekspander adalah diasumsi konstan. Dari pernyataan tersebut, maka dapat dituliskan persamaan-persamaan termodinamika yang digunakan untuk analisa perhitungan terhadap sistem ORC berdasarkan dari gambar 1 dan 2.

Berdasarkan dari persamaan keseimbangan energi antara gas buang dan air yang mengalir melintasi preheater, maka dapat ditentukan laju aliran massa air sebagai berikut:

$$\dot{m} \times cp(T_{10} - T_{11})|_{gb} = \dot{m} \times cp(T_6 - T_5)|_{air} \quad (1)$$

atau

$$\dot{m}_{air} = \frac{\dot{m} \times cp(T_{10} - T_{11})|_{gb}}{cp(T_6 - T_5)|_{air}} \quad (2)$$

dimana notasi *gb* adalah gas buang boiler. Kemudian untuk laju aliran massa fluida kerja dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\dot{m} \times cp(T_6 - T_7)|_{air} = \dot{m}(h_3 - h_2)|_{fk} \quad (3)$$

dimana notasi *fk* adalah fluida kerja sistem ORC, dan nilai  $T_7$  belum diketahui, maka:

$$\dot{m} \times cp(T_6 - T_{pp, ev})|_{ap} = \dot{m}_{fk} h_{fg} \quad (4)$$

sehingga

$$\dot{m}_{fk} = \frac{\dot{m} \times cp(T_6 - T_{pp, ev})|_{ap}}{h_{fg}} \quad (5)$$

untuk

$$T_{pp, ev} = T_{ev} + \Delta T_{ev} \quad (6)$$

dimana notasi *ap* adalah air panas,  $h_{fg}$  adalah enthalpi panas laten fluida kerja pada temperatur evaporator ( $T_{ev}$ ),  $T_{pp, ev}$  adalah temperatur pinch point pada evaporator dan  $\Delta T_{ev}$  adalah beda temperatur *pinch point* evaporator.

Sementara itu, untuk laju aliran massa air pendingin pada kondensor dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut,

$$\dot{m}_{fk}(h_4 - h_1) = \dot{m} \times cp(T_9 - T_8)|_{ad} \quad (7)$$

karena nilai  $T_9$  tidak diketahui dan harus dihitung, maka

$$\dot{m}_{fk}h_{fg} = \dot{m} \times cp(T_{pp,kond} - T_8)|_{ad} \quad (8)$$

sehingga

$$\dot{m}_{ad} = \frac{\dot{m}_{fk}h_{fg}}{cp(T_{pp,kond} - T_8)} \quad (9)$$

untuk

$$T_{pp,kond} = T_{kond} + \Delta T_{kond} \quad (10)$$

dimana notasi  $ad$  adalah air pendingin kondensor,  $h_{fg}$  adalah enthalpi panas laten fluida kerja pada temperatur kondensor ( $T_{kond}$ ) dan  $T_{pp,kond}$  adalah temperatur pinch point pada kondensor dan  $\Delta T_{kond}$  adalah beda temperatur *pinch point* kondensor.

Persamaan termodinamika untuk setiap komponen dan efisiensi sistem ORC adalah sebagai berikut:

Daya yang dibutuhkan oleh pompa

$$\dot{W}_p = \frac{\dot{m}_{fk}(h_2 - h_1)}{\eta_{p,s}} \quad (11)$$

Jumlah energi thermal evaporator

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_{fk}(h_3 - h_2) \quad (12)$$

Daya yang dihasilkan oleh ekspander

$$\dot{W}_{exp} = \dot{m}_{fk}(h_2 - h_1)\eta_{T,s} \quad (13)$$

Jumlah energi thermal kondensor

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{fk}(h_4 - h_1) \quad (14)$$

Daya netto yang dihasilkan oleh sistem ORC

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{exp} - \dot{W}_p \quad (15)$$

Efisiensi thermal sistem ORC

$$\eta_{Th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{ev}} \quad (16)$$

## Parameter penelitian

Untuk parameter penelitian baik untuk gas buang boiler, preheater maupun data input dan asumsi untuk sistem ORC adalah terangkum dalam tabel 1.

Tabel 1. Parameter penelitian.

Parameter		Satuan
<b>Gas buang boiler</b>		
Temperatur masuk	325	°C
Temperatur keluar	200	°C
Laju aliran massa	13,1321	kg/s
<b>Preheater (pemanas air)</b>		
Temperatur air masuk	27	°C
Temperatur air keluar	150	°C
<b>Sistem ORC</b>		
Temperatur evaporator	Tsat (55 ; T <sub>6-10</sub> )	°C
Temperatur kondensor	35	°C
Beda temperatur pinch point pada evaporator ( $\Delta T_{ev}$ ) dan kondensor ( $\Delta T_{kond}$ )	5	°C
Efisiensi isentropis expander dan pompa	80	%

Tabel 2. Temperatur, tekanan dan beda temperatur kritis fluida kerja.

Fluida kerja	T <sub>krt</sub> (°C)	p <sub>krt</sub> (MPa)	$\Delta T_{krt}$ (°C)
R123	183,68	3,6618	33,68
R245fa	154,01	3,651	4,01
n-butane	151,98	3,796	1,98
n-pentane	196,55	3,37	46,55
Isopentane	187,2	3,378	37,2

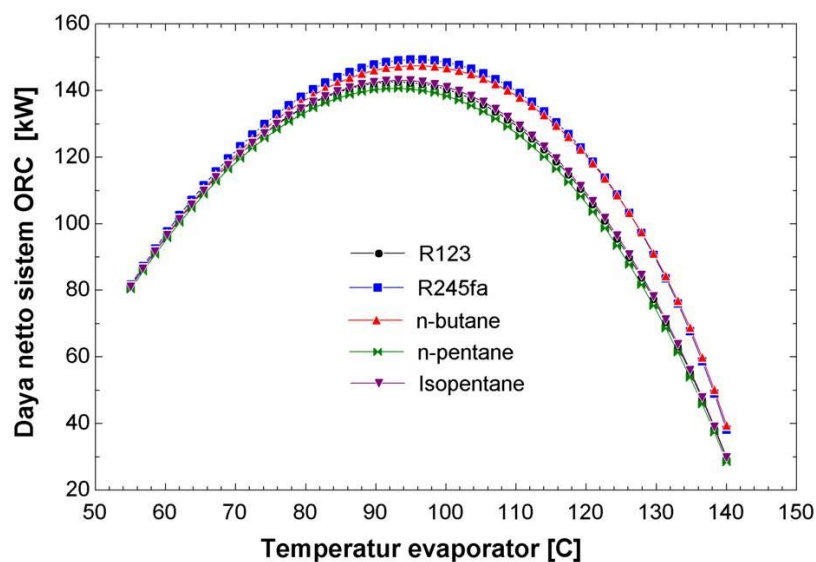
## Pemilihan fluida kerja

Dalam pemilihan fluida kerja untuk sistem ORC harus mempertimbangkan beberapa faktor, diantaranya: sifat termodinamika, tidak beracun, ramah lingkungan, tidak mudah terbakar, kestabilan thermal dan non-corrosive. Ditinjau dari sifat termodinamika ada dua hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan fluida kerja yaitu kurva uap saturasi dalam T-s diagram dan temperatur kritis (Cataldo et al., 2014; Iwan Gunawan et al., 2021; Setiawan et al., 2018). Dari kurva uap saturasi, fluida kerja sistem ORC dapat dibedakan berdasarkan pada jenisnya, yaitu: basah, isentropik dan kering. Untuk jenis isentropik dan kering adalah lebih dianjurkan sebagai fluida kerja sistem ORC untuk menghindari kandungan air yang mungkin terjadi dalam proses ekspansi pada ekspander. Kemudian untuk sistem ORC subkritis, temperatur kritis fluida kerja harus lebih tinggi dari pada temperatur masuk sumber energinya (Cataldo et al., 2014). Dalam tulisan ini, ada lima fluida kerja yang dipilih untuk proses kajian perhitungan termodinamika pada sistem ORC. Sementara itu, untuk sifat thermo-

dinamika diantaranya temperatur kritis ( $T_{krt}$ ) dan tekanan kritis ( $p_{krt}$ ), dan juga beda temperatur kritis ( $\Delta T_{krt} = T_{krt} - T_6$ ) dari kelima fluida kerja dapat dilihat dalam tabel 2.

### Hasil dan Pembahasan

Sebelum proses perhitungan simulasi dilakukan, maka terlebih dahulu adalah dengan menuliskan semua persamaan termodinamika dari persamaan 1 sampai dengan 16 dalam layar *equation windows EES*. Begitu juga untuk parameter data input (dalam tabel 1). Kemudian untuk temperatur evaporator ( $T_{ev}$ ) adalah diatur berdasarkan pada kondisi batas  $55 \leq T_{ev} \leq (T_6 - 10)^\circ\text{C}$ . Sementara itu, kondisi fluida kerja yang masuk ke ekspander adalah dalam kondisi uap saturasi pada temperatur keluaran evaporator. Ketika proses simulasi selesai dilakukan maka semua besaran parameter output sistem ORC akan diketahui.

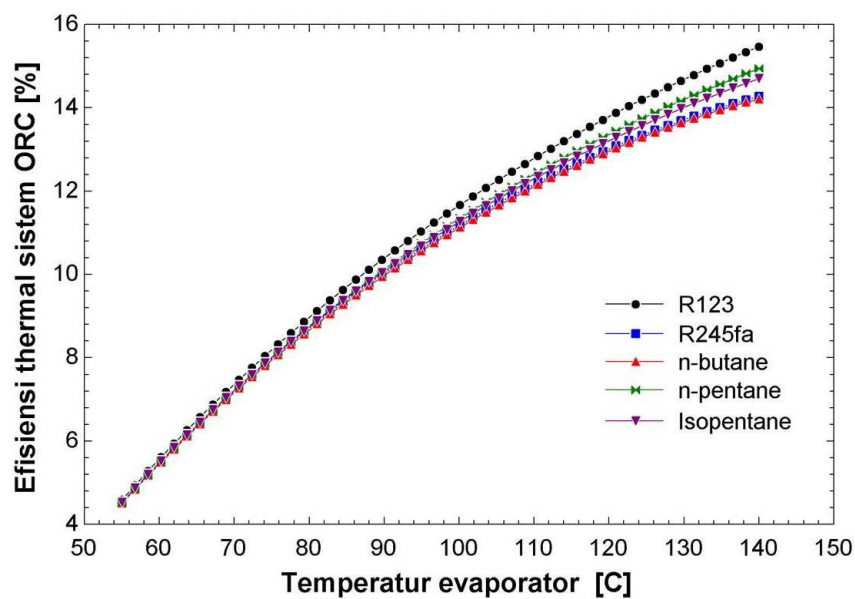


Gambar 2. Variasi daya netto dengan temperatur evaporator dari 5 fluida

Dalam gambar 2 adalah menunjukkan hubungan antara variasi daya netto terhadap temperatur evaporator yang dihasilkan oleh sistem ORC dari 5 fluida kerja berbeda melalui persamaan 15. Dalam gambar tersebut, dapat diperhatikan bahwa karakteristik garis grafik dari daya netto ( $\dot{W}_{netto}$ ) yang dihasil oleh ekspander untuk semua fluida kerja adalah pada awalnya meningkat sampai titik puncak dan kemudian terus menurun dengan meningkatnya temperatur evaporator ( $T_{ev}$ ) sesuai kondisi batas yang ditentukan. Pada titik puncak dari garis grafik tersebut adalah merupakan posisi parameter daya netto maksimal ( $\dot{W}_{netto,maks}$ ) pada temperatur evaporator optimal



( $T_{ev,opt}$ ) yang dihasilkan oleh sistem ORC. Dimana temperatur air panas ( $T_6$ ) masuk ke evaporator adalah sebesar  $150^\circ\text{C}$  dengan laju aliran massa air panas ( $\dot{m}_{ap}$ ) hasil perhitungan dari persamaan 2 adalah sebesar  $4,086 \text{ kg/s}$  untuk semua fluida kerja. Kemudian untuk menentukan nilai dari kedua parameter output tersebut,  $\dot{W}_{netto,maks}$  dan  $T_{ev,opt}$ , dapat diselesaikan melalui prosedur perhitungan min/max dengan *quadratic approximations method* pada program *EES*. Tabel 3 adalah merupakan hasil perhitungan parameter output daya netto maksimal dan temperatur evaporator optimal sistem ORC dari lima fluida kerja yang dipilih.



Gambar 3. Variasi efisiensi thermal sistem ORC dengan temperatur evaporator dari 5 fluida kerja

Dalam tabel 3, dari kelima fluida kerja yang menghasilkan nilai daya netto maksimal tertinggi oleh sistem ORC adalah fluida kerja R245fa sebesar  $149,340 \text{ kW}$  pada temperatur evaporator optimal  $95,617^\circ\text{C}$ . Sementara itu, untuk nilai daya netto maksimal terendah adalah dihasilkan oleh fluida kerja n-pentane sebesar  $140,679 \text{ kW}$  pada temperatur evaporator optimal  $92,825^\circ\text{C}$ .

Tabel 3. Daya netto maksimal dan efisiensi thermal sistem ORC pada temperatur evaporator optimal.

Fluida kerja	$T_{ev,opt}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\dot{W}_{netto,maks}$ (kW)	$\eta_{th,maks}$ (%)
R123	93,051	142,586	10,797
R245fa	95,617	149,340	10,697
n-butane	95,737	147,495	10,656
n-pentane	92,825	140,679	10,485
Isopentane	93,298	143,082	10,492

Untuk parameter output efisiensi thermal sistem ORC ( $\eta_{Th}$ ) dapat ditentukan melalui persamaan 16. Dimana dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, seperti ditunjukkan dalam gambar 3, karakteristik garis grafik efisiensi thermal sistem ORC untuk semua fluida kerja adalah terus meningkat dengan meningkatnya temperatur evaporator ( $T_{ev}$ ). Kemudian untuk nilai efisiensi thermal maksimal sistem ORC ( $\eta_{th,maks}$ ) dapat ditentukan berdasarkan temperatur evaporator optimal ( $T_{ev,opt}$ ). Dalam Tabel 3, adalah nilai efisiensi maksimal sistem ORC pada temperatur evaporator optimal. Berdasarkan pada tabel 3, fluida kerja R123 adalah dengan nilai efisiensi thermal maksimal tertinggi sebesar 10,797%. Sementara itu, untuk fluida kerja R245fa dengan nilai daya netto maksimal tertinggi adalah dengan nilai efisiensi thermal tertinggi kedua sebesar 10,697%. Dan fluida kerja n-pentane adalah dengan nilai efisiensi thermal maksimal terendah sebesar 10,485%.

Tabel 4. Parameter output pada temperatur evaporator optimal.

Fluida kerja	Parameter output	Satuan
R123	$\dot{m}_{fk}$	6,554 kg/s
	$\dot{Q}_{ev}$	1320,6 kW
	$\dot{Q}_{kond}$	1178,015 kW
	$T_7$	73,845 °C
R245fa	$\dot{m}_{fk}$	6,209 kg/s
	$\dot{Q}_{ev}$	1396,040 kW
	$\dot{Q}_{kond}$	1246,700 kW
	$T_7$	69,437 °C
n-butane	$\dot{m}_{fk}$	3,222 kg/s
	$\dot{Q}_{ev}$	1384,121 kW
	$\dot{Q}_{kond}$	1236,626 kW
	$T_7$	70,134 °C
n-pentane	$\dot{m}_{fk}$	2,983 kg/s
	$\dot{Q}_{ev}$	1341,708 kW
	$\dot{Q}_{kond}$	1201,028 kW
	$T_7$	72,612 °C
Isopentane	$\dot{m}_{fk}$	3,201 kg/s
	$\dot{Q}_{ev}$	1363,735 kW
	$\dot{Q}_{kond}$	1220,653 kW
	$T_7$	71,325 °C

Kemudian untuk fluida kerja R245fa adalah lebih efektif berkaitan dengan proses perpindahan energi thermal antara air panas dengan fluida kerja dalam evaporator dibandingkan dengan fluida kerja lainnya. Itu dapat dilihat dalam tabel 4, dimana nilai kapasitas evaporatornya lebih tinggi sebesar 1396,040 kW dan temperatur air panas keluar dari evaporator adalah lebih rendah sebesar 69,437°C.

### Simpulan dan Saran

Dari hasil proses perhitungan, dimana sistem ORC adalah disimulasikan dengan parameter operasi yang sama untuk semua fluida kerja yang dipilih. Diketahui bahwa sistem ORC pada temperatur evaporator optimal yang menghasilkan daya netto maksimal tertinggi adalah fluida kerja R245fa sebesar 149,340 kW. Dan fluida kerja dengan efisiensi thermal tertinggi adalah R123 sebesar 10,797%. Sementara itu, fluida kerja n-pentane adalah sebagai fluida kerja dengan hasil parameter terendah, baik untuk daya netto maksimal maupun efisiensi thermal, masing-masing adalah 140,679 kW dan 10,485%. Kemudian diketahui juga bahwa fluida kerja R245fa adalah lebih efektif dalam proses perpindahan energi thermal di-evaporator dibandingkan dengan fluida kerja lainnya.

Pada akhirnya, dapat dinyatakan bahwa gas buang boiler dari industri PKS sangat mungkin dan berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit daya bertemperatur rendah melalui sistem ORC. Kemudian R245fa dapat dipertimbangkan untuk digunakan sebagai fluida kerja sistem ORC, karena memiliki keunggulan baik untuk menghasilkan daya netto maksimal maupun efektif dalam proses penyerapan energi thermal dalam evaporator. Dan untuk mendapatkan hasil yang lebih spesifik, maka untuk kajian berikutnya dapat melibatkan lebih banyak opsi pilihan fluida kerja yang disimulasikan dan dapat dilakukan kajian termodinamika berdasarkan parameter exergy maupun thermo-ekonomi pada sistem ORC tersebut.

### Daftar Pustaka

- Ahluriza, Pradipta & Berkah Fajar Tamtomo Kiono & Mohamad Said Kartono Tony Suryo Utomo, (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 – 580. <http://dx.doi.org/10.26760/elkomika.v11i3.567>.
- Castelli, Alessandro & Elsidio, Cristina & Scaccabarozzi, Roberto & Nord, Lars & Martelli, Emanuele. (2019). Optimization of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery From Aluminum Production Plants. *Frontiers in Energy Research*. 7. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00044>.
- Cataldo, Filippo & Mastrullo, Rita & Mauro, Alfonso & Vanoli, G.P. (2014). Fluid selection of Organic Rankine Cycle for low-temperature waste heat recovery based on thermal optimization. *Energy*. 72. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.019>.
- Fierro, Jose & Escudero-Atehortua, Ana & Nieto, Cesar & Giraldo, Mauricio & Jouhara, Hussam & Wrobel, Luiz. (2020). Evaluation of waste heat recovery

- technologies for the cement industry. *International Journal of Thermofluids*. 7-8. 100040. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100040>.
- Guo, Cong & Du, Xiaoze & Yang, Lijun & Yang, Yongping. (2015). Organic Rankine cycle for power recovery of exhaust flue gas. *Applied Thermal Engineering*. 75. 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.080>.
- Iwan Gunawan, & Nazaruddin Sinaga. (2021). Review Fluida Kerja Pada Sistem Organic Rankine Cycle (ORC). *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 6(1), 53-64. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v6i1.188>.
- Jung, Hyung-chul & Krumdieck, Susan & Vranjes, Tony. (2014). Feasibility assessment of refinery waste heat-to-power conversion using an organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*. 77. 396-407. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.057>.
- Kılıç, B., & İpek, O. (2019). Thermodynamic Analysis of The Organic Rankine Cycle Using Diesel Engine Waste Heat Recovery. *European Journal of Science and Technology* (15), 112-117. <https://doi.org/10.31590/ejosat.498908>.
- Nasution, Muhammad & Herawan, Tjahjono & Rivani, Meta. (2014). Analysis of Palm Biomass as Electricity from Palm Oil Mills in North Sumatera. *Energy Procedia*. 47. 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.210>.
- Oyedepo, S.O., Fakeye, A.B. Electric power conversion of exhaust waste heat recovery from gas turbine power plant using organic Rankine cycle. *Int J Energ Water Res* 4, 139–150 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00055-3>.
- Setiawan, Dwi & Subrata, I.D.M. & Purwanto, Y Aris & Tambunan, Armansyah. (2018). Evaluation of Working Fluids for Organic Rankine Cycle Based on Exergy Analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 147. 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/147/1/012035>.
- Wang, Shucheng & Chen, Xinna & Li, Hongwei & Fu, Zhongguang & Han, Zhicheng. (2023). Thermodynamic analysis of exhaust heat recovery of marine ice using organic rankine cycle. *Thermal Science*. 27. 166-166. <https://doi.org/10.2298/TSCI220718166W>.