

# Analisis Energi dan Eksergi pada Siklus Rankine Organik Terintergerasi untuk Pemulihan Panas Limbah dari Sistem AC

PRADIPTA AHLURIZA<sup>1</sup>, BERKAH FAJAR TAMTOMO KIONO<sup>2</sup>, MOHAMAD SAID KARTONO TONY SURYO UTOMO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magister Energi, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro

Email: [pradiptaahluriza@students.undip.ac.id](mailto:pradiptaahluriza@students.undip.ac.id)

Received 30 Maret 2023 | Revised 4 Mei 2023 | Accepted 10 Mei 2023

## ABSTRAK

*Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa energi dan eksergi sistem gabungan AC dan ORC dengan parameter jenis refrigeran yang berbeda. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh permasalahan dimana limbah panas dari sistem AC menjadi salah satu penyebab rusaknya lingkungan. Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan software EES (Engineering Equation Program). Analisis data yang digunakan adalah analisis data kuantitatif dengan perbedaan nilai performa subsistem AC dan ORC terhadap jenis refrigeran yang berbeda. Berdasarkan analisis termodinamika (energi dan eksergetik), R600a-R227ea dipilih sebagai pasangan fluida untuk siklus rankine organik dan AC terintergerasi. Koefisien kinerja kombinasi (COP Kombinasi) sistem terintergerasi dapat ditingkatkan dari 3,65 hingga 5,37. Sistem siklus rankine organik dapat menghasilkan 4,14 kW energi listrik bersih dengan efisiensi termal 5,129%. Sistem siklus gabungan AC-ORC terintergerasi beroperasi dengan efisiensi exergi 25,37%.*

**Kata kunci:** EES, Energy, Exergy, AC, ORC

## ABSTRACT

*This study aims to analyze the energy and exergy of ac and ORC combined systems with different refrigerant type parameters. This research is motivated by a problem where waste heat from the air conditioning system is one of the causes of environmental damage. The research was conducted by simulation using EES (Engineering Equation Program) software. The data analysis used is quantitative data analysis with differences in the performance values of the AC and ORC subsystems against different types of refrigerants. Based on thermodynamic analysis (energy and exergetic), R600a-R227ea was selected as the fluid pair for the organic rankine cycle and integrated AC. The combined performance coefficient (COP Combination) of integrated systems can be increased from 3.65 to 5.37. The organic rankine cycle system can produce 4.14 kW of clean electrical energy with a thermal efficiency of 5.129%. The integrated AC-ORC combined cycle system operates with an exergetic efficiency of 25.37%.*

**Keywords:** EES, Energy, Exergy, AC, ORC

## 1. PENDAHULUAN

Pemanasan global yang terkait dengan pembakaran bahan bakar fosil terus mendorong pertumbuhan konsumsi energi yang sangat besar yang dapat menciptakan masalah lingkungan tertentu (**Borikar, dkk, 2021**). Menurut (**Li, dkk, 2014**), penggunaan AC melonjak sekitar 30-50% dari total konsumsi listrik di daerah perkotaan. Akibatnya, aplikasi AC telah mempercepat kerusakan iklim perkotaan karena limbah panas yang dibuang. Oleh karena itu, sangat penting untuk pemulihan panas limbah (*Waste Heat Recovery*/WHR) melalui aplikasi AC untuk meningkatkan perlindungan lingkungan dan penghematan energi.

Wahile (**Wahile, dkk, 2022**) mengemukakan bahwa masih banyak cara lain untuk memanfaatkan limbah panas ini dengan menggunakan bahan pengubah fasa. *Waste Heat Recovery System* (WHRS) merupakan metode penghematan energi yang efektif dan ramah lingkungan, oleh karena itu penerapan teknologi ini, yang meliputi siklus termodinamika dikaitkan dengan produksi energi listrik dan pengurangan konsumsi. Selain itu, ada juga indikasi peningkatan efisiensi sistem. Studi banding telah membuktikan penerapan siklus termodinamika dengan *Organic Rankine Cycle* (ORC) lebih efisien dan ekonomis dalam pemanfaatan limbah panas pada suhu rendah hingga sedang.

Terdapat tiga sistem pembangkit listrik *waste heat recovery*, salah satunya adalah *Organic Rankine Cycle* (ORC) (**Yansuri, 2018**). Dalam studi terbaru, sistem siklus rankine organik telah terbukti efektif untuk memanfaatkan dan memulihkan panas limbah untuk pembangkit listrik (**Aphornratana & Sriveerakul, 2010**). Namun, pada penggunaan ORC ada beberapa keunggulan tertentu dibandingkan dengan sistem pemulihan panas limbah lainnya, seperti potensi pemanfaatan yang besar, kemudahan dalam pembuatannya, ketersediaan komponen yang mudah, fleksibilitas, serta biaya perawatan yang lebih murah dan aman (**Wahile, dkk, 2020**). Karena fluida organik memiliki titik didih yang lebih rendah daripada air, hal ini memungkinkan pemulihan energi dari sumber panas limbah bersuhu rendah. Teknologi *Organic Rankine Cycle* (ORC) merupakan teknologi bersih untuk sumber daya energi yang berkelanjutan. ORC biasanya menggunakan fluida kerja organik bermassa molekul tinggi seperti butana atau pentana yang memiliki titik didih lebih rendah, tekanan uap lebih tinggi, massa molekul lebih tinggi, dan aliran massa lebih tinggi dibandingkan dengan air. Hal ini memungkinkan efisiensi turbin yang lebih tinggi daripada sistem uap.

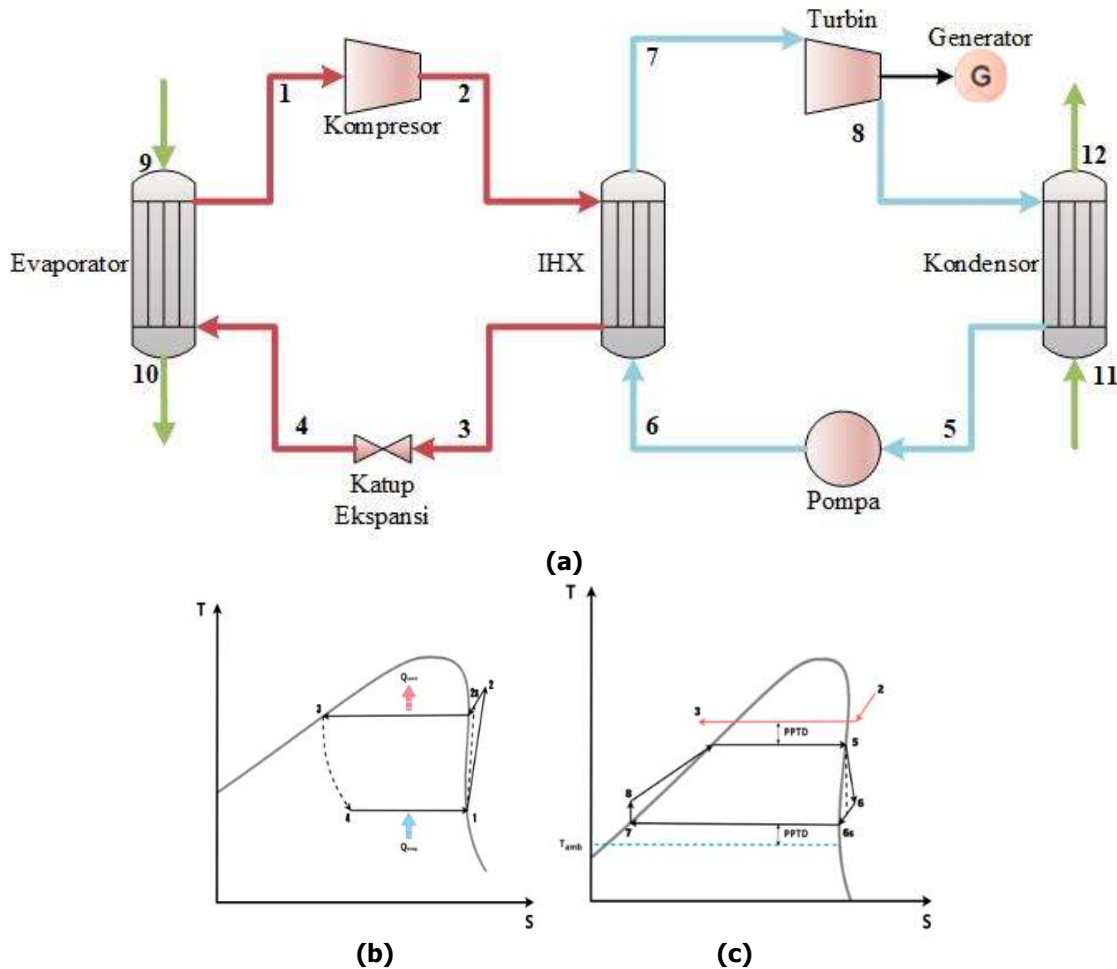
Malwe (**Malwe, dkk, 2022**) telah melakukan tinjauan komprehensif terhadap penggunaan orc sebagai metode pemulihan limbah panas. Hasil analisis exergetic ekstraksi panas dari vcrs menggunakan 9 cairan orc yang berbeda. Dalam penelitian ini, sistem ac dan orc diintegrasikan untuk memiliki konservasi energi dengan memanfaatkan limbah panas. Dengan memanfaatkan limbah panas dari kondensor sistem ac sebagai sarana pemulihan limbah panas untuk sistem orc, sehingga menghasilkan output daya dari limbah panas. Selain itu, karakteristik orc seperti pemilihan fluida kerja, termodinamika, dan dampak lingkungan terhadap kinerja fluida kerja.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Pemodelan Sistem

Sistem AC-ORC terintegrasi dibagi menjadi dua bagian, subsistem AC dan ORC. Bagian ORC juga terdiri dari empat komponen utama, evaporator turbin, kondensor dan pompa. Fluida kerja memulihkan panas limbah tingkat rendah dari kondensor AC yang dapat meningkatkan nilai entalpinya. Energi ini dipulihkan dalam turbin dengan membuat fluida kerja bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi menghasilkan daya. Fluida kerja bertekanan rendah ini kemudian

dikondensasikan dalam kondensator dan di pompa kembali ke tekanan tinggi di pompa dalam pompa untuk menyelesaikan siklus ORC.



**Gambar 1. (a) Skematik Sistem AC-ORC Terintegrasi (b) T-s Diagram Sistem AC (c) T-s Diagram Sistem ORC.**

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1(a), sistem AC-ORC yang terjadi adalah kombinasi dari siklus kompresi uap (VCC) di sisi sebelah kiri dan ORC di sisi sebelah kanan. Dapat terlihat bahwa *Internal Heat Exchanger* (IHX) antara VCC dan ORC bekerja sebagai kondensator di VCC, serta evaporator di ORC. Melalui penerapan sistem AC-ORC, panas buangan yang dibuang oleh VCC dapat diubah menjadi listrik oleh sistem ORC. Model simulasi menggunakan software *Engineering Equation Solver* (EES). Untuk mengetahui properti fluida kerja dapat dilihat dalam *properties table*. Model simulasi dibagi menjadi tiga bagian, yaitu model AC, ORC dan analisis energi eksergi.

## 2.2 Asumsi

Persamaan pemodelan pada analisis energi, dan eksergi diprogram dalam *Software EES* (Engineering Equation Solver). Pemodelan didasarkan pada asumsi umum berikut:

- Sistem dianggap dalam keadaan tunak.
- Gesekan, *heat loss*, perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan.
- Penurunan tekanan dalam *heat exchanger* diabaikan.
- Fluida kerja di dalam AC masuk ke kompresor pada keadaan uap jenuh dan keluar dari kondensator pada keadaan cair jenuh.

- Proses ekspansi pada AC adalah proses adiabatik.
- Suhu kondensasi yang dirancang dari subsistem AC tidak terpengaruh oleh subsistem ORC.

Fluida kerja di ORC keluar dari kondensator pada keadaan cair jenuh dan memasuki turbin pada keadaan uap jenuh. Kriteria detail desain terdapat dalam Tabel 1. berikut.

**Tabel 1. Parameter Sistem AC-ORC**

Item	Nilai
Temperatur air dingin	12°C
Temperatur air pendingin	30°C
Desain temperatur kondensasi AC	50°C
Temperatur kondensasi ORC	35°C
Perbedaan suhu <i>pinch point</i> di evaporator AC	5°C
Perbedaan suhu <i>pinch point</i> di IHX	1,5°C
Perbedaan suhu <i>pinch point</i> kondensator	2,4°C
Suhu <i>dead state</i>	25°C
Tekanan air dingin	0,101 MPa
Tekanan masuk air pendingin	0,101 MPa
Efisiensi kompresor	70%
Efisiensi pompa	80%
Efisiensi turbin	80%
Efisiensi Generator	95%
Laju aliran massa air dingin	1,7 kg/s
Kapasitas pendingin subsistem AC	35 kW

### 2.3 Pemilihan Fluida Kerja

Franchetti (**Franchetti, dkk, 2016**) mengemukakan bahwa pemilihan fluida kerja yang ditentukan adalah dasar dalam desain ORC. Rajabloo (**Rajabloo, 2017**) mengungkapkan bahwa peningkatan kinerja dari ORC terjadi dengan baik dan campuran fluida kerja karena peningkatan laju aliran massa fluida panas. Tahir dan Yamada (**Tahir & Yamada, 2009**) membuat ORC menggunakan fluida kerja R245fa yang memiliki fungsi objektif yang menghasilkan daya turbin lebih rendah dari 1 kW. Caceres (**Encabo, dkk, 2017**) melakukan optimalisasi ORC untuk memilih fluida organik yang paling cocok dari 39 kombinasi fluida kerja yang berbeda. Kaushik (**Kaushik, dkk, 2012**) memperkenalkan *canopus heat exchanger* yang melewati kompresor dan kondensator dengan refrigerant R134a dan R507a sebagai fluida kerja untuk meningkatkan COP sistem. Sarkar (**Sarkar, 2018**) telah menunjukkan metode *pinch point* analisis ORC untuk pemulihan limbah panas maksimum. Bonk (**Bonk, dkk, 2017**) mempresentasikan penelitian tentang perancangan sistem micro-ORC dengan output daya 1 kW. Ali (**Ali, 2022**) melakukan manajemen termal yang efektif dari perangkat elektronik dengan menggunakan busa nikel dengan lilin parafin dengan meningkatkan luas permukaan aliran panas.

Enam refrigeran yang dipilih sebagai fluida untuk subsistem AC adalah (R22, R134a, R290, R407C, R600a dan R410A ). Dengan meningkatnya proses dalam pemulihan limbah panas, Bao dan Zaho (**Bao & Zhao, 2013**) mempresentasikan kategori fluida kerja berdasarkan suhu

sumber panas yang berbeda. Oleh karena itu, tiga cairan isentropik dan kering (R600, R123, R141b, R227ea, R245fa dan R1233zd(E)) dipilih untuk subsistem ORC.

## 2.4 Pendekatan Berbasis Energi

Analisis energi merupakan metode yang paling umum untuk mengevaluasi sistem termodinamika. Hal ini didasarkan pada hukum pertama termodinamika, di mana energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya, tetapi jumlah total energinya tetap sama. Sistem dianggap dalam keadaan tunak. Gesekan, kehilangan panas, perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan. Penurunan tekanan dalam penukar panas dan tabung diabaikan. Fluida kerja dalam siklus kompresi uap masuk ke kompresor pada keadaan uap jenuh dan keluar dari kondensor pada keadaan cair jenuh. Proses ekspansi pada siklus kompresi uap adalah proses adiabatik. Suhu kondensasi yang dirancang dari subsistem AC tidak terpengaruh oleh subsistem ORC. Fluida kerja di ORC keluar dari kondensor pada keadaan cair jenuh dan memasuki turbin pada keadaan uap jenuh. Berdasarkan asumsi tersebut, kapasitas pendinginan ( $Q_{evap}$ ), *Log Mean Temperature Different* (LMTD), Kalor yang dilepas *Chilled Water* ( $Q_{Chilled}$ ), kerja kompresor ( $W_{comp}$ ), laju panas limbah ( $Q_{waste}$ ), COP awal subsistem AC (COP), menggunakan persamaan berikut.

$$Q_{evap} = m (h_1 - h_4) \quad (1)$$

$$LMTD = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (2)$$

$$Q_{Chilled} = U \times A \times LMTD \quad (3)$$

$$W_{comp} = m (h_2 - h_3) \quad (4)$$

$$Q_{waste} = m (h_2 - h_3) \quad (5)$$

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{comp}} \quad (6)$$

Proses pada kompresor, terdapat efisiensi isentropic. Efisiensi isentropic adalah efisiensi yang dicapai pada saat kondisi entropi tidak berubah. Kondisi isentropic sulit dicapai, karena efisiensi isentropic adalah efisiensi maksimum yang dapat dicapai oleh kompresor dalam kondisi tekanan dan suhu tertentu.

Setelah menerapkan metode kondensasi penuh, seluruh panas buangan di *internal heat exchanger* (IHX) dapat dipulihkan oleh subsistem ORC. Oleh karena itu, pada subsistem ORC laju panas limbah yang dipulihkan ( $Q_{reco}$ ) berada dalam kesetimbangan dengan laju panas limbah ( $Q_{waste}$ ). Sedangkan keluaran daya turbin ( $W_{turb}$ ), kerja pompa ( $W_{pump}$ ) dinyatakan menggunakan persamaan berikut.

$$Q_{reco} = m_{ORC} (h_7 - h_6) \quad (7)$$

$$W_{turb} = m_{ORC} (h_7 - h_8) \quad (8)$$

$$W_{pump} = m_{ORC} (h_6 - h_5) \quad (9)$$

Oleh karena itu, keluaran listrik ( $E_{net}$ ) dan efisiensi termal ( $\eta_{thermal}$ ) dari subsistem ORC dapat ditulis sebagai berikut.

$$E_{net} \text{ (kW)} = W_{turb} \eta_g - W_{pump} \quad (10)$$

$$\eta_{thermal} = \frac{E_{net}}{Q_{reco}} \times 100\% \quad (11)$$

Listrik netto adalah hasil dari daya turbin setelah dikurangi dengan daya pompa.

Dengan pemanfaatan kembali limbah panas, COP gabungan dari sistem AC-ORC ( $COP_{comb}$ ) dapat menggunakan persamaan berikut.

$$COP_{comb} = \frac{Q_{evap}}{W_{comp} - E_{net}} \quad (12)$$

## 2.5 Pendekatan Berbasis Exergi

Metode eksergi digunakan untuk mengevaluasi sistem energi yang mengintegrasikan hukum termodinamika pertama dan kedua pada keadaan kondisi lingkungan tertentu. Analisis eksergi dengan menggunakan metode evaluasi, prosesnya telah terbukti menjadi metode yang efisien untuk merumuskan efisiensi hukum kedua termodinamika. Pada hakekatnya, analisis eksergi menggabungkan prinsip-prinsip kekekalan energi dan konversi energi.

Hukum pertama termodinamika hanya berkaitan dengan kekekalan energi, dan akibatnya tidak dapat menunjukkan dimana atau bagaimana reversibilitas terjadi dalam komponen sistem. Analisis eksergi bergantung pada prinsip kekekalan energi dan massa yang dikombinasikan dengan hukum kedua termodinamika. Keseimbangan eksergi pada kondisi terbuka dalam keadaan *steady state* didefinisikan sebagai keseimbangan antara eksergi yang rusak dan transfer eksergi netto oleh kerja, panas, atau aliran massa yang melintasi batas volume atur. Keseimbangan eksergi ditunjukkan oleh persamaan berikut.

Persamaan kesetimbangan eksergetik untuk volume atur ditunjukkan pada Persamaan (13).

$$\frac{dE_{Xcv}}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) \dot{Q}_r - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{cv}}{dT}\right) + \sum_{in} \dot{m}\psi - \sum_{out} \dot{m}\psi - \dot{E}_{Xdest}. \quad (13)$$

Untuk keadan *steady state*, Persamaan (14) menjadi Persamaan (15)

$$\dot{E}_{Xdestroyed} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) \dot{Q}_r - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}\psi - \sum_{out} \dot{m}\psi \quad (14)$$

Untuk menerapkan persamaan keseimbangan eksergetik untuk masing-masing komponen sistem refrigerasi kompresi uap, maka dapat digunakan Persamaan (15)-(18).

$$\dot{E}d_e = \left(1 - \frac{T_0}{T_E}\right) \dot{Q}_E + m(h_4 - T_0s_4) - \dot{m}(h_1 - T_0s_1) \quad (15)$$

$$\dot{E}d_{cpr} = -\dot{W}_{cv} + m(h_1 - T_0s_1) - \dot{m}(h_2 - T_0s_2) \quad (16)$$

$$\dot{E}d_{Cond} = m(h_2 - T_0s_2) - m(h_3 - T_0s_3) \quad (17)$$

$$\dot{E}d_{ex} = \dot{m}(h_3 - T_0s_3) - \dot{m}(h_4 - T_0s_4) \quad (18)$$

Maka, nilai kehancuran eksergi total adalah sebagai berikut.

$$\dot{E}x_{tot} = \dot{E}x_e + \dot{E}x_{cpr} + \dot{E}x_{Cond} + \dot{E}x_{ev} \quad (19)$$

Efisiensi eksergetic sistem keseluruhan ( $\eta_{Ex}$ ) adalah rasio dari keluaran exergi yang keluar ( $\dot{E}x_{out}$ ) terhadap exergi yang masuk ( $\dot{E}x_{in}$ ) dan dapat dinyatakan dengan Persamaan (20).

$$\eta_{Ex} = \left( \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} \right) \times 100\% \quad (20)$$

Dimana:

$$\dot{E}x_{out} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{tot} \quad (21)$$

Satu-satunya sumber input exergi ke sistem adalah melalui daya listrik yang disuplai ke kompresor ( $\dot{W}_{cpr}$ ), yang mana  $\dot{E}x_{in} = \dot{W}_{cpr}$ .

Pada umumnya, efisiensi eksergi didefinisikan sebagai rasio output eksergi terhadap input eksergi. Dapat juga ditulis dalam fungsi eksergi yang dapat dihancurkan dalam sistem dengan Persamaan (22) berikut.

$$\eta_{Ex,AC} = \left( \frac{\dot{W}_{cpr} - \dot{E}x_{tot}}{\dot{W}_{cpr}} \right) \times 100\% \quad (22)$$

Atau dapat ditulis seperti Persamaan (23).

$$\eta_{Ex,AC} = \left( 1 - \frac{\dot{E}x_{tot}}{\dot{W}_{cpr}} \right) \times 100\% \quad (23)$$

Efisiensi eksergi dapat ditentukan untuk sistem yang berubah-ubah. Hal ini adalah fungsi utama dari eksergi.

Efisiensi eksergetic dapat diambil dalam beberapa bentuk. Pendekatan yang digunakan berfungsi sebagai model untuk pengembangan ekspresi efisiensi eksergetic untuk komponen lain. Setiap komponen dipertimbangkan melibatkan volume atur pada keadaan *steady state* dan diasumsikan tidak ada perpindahan panas antara volume dan sekelilingnya.

$$Ed_{Turbine} = W_{CV} + \dot{m}(e_{f7} - e_{f8}) \quad (24)$$

$$Ed_{Pump} = -W_{CV} + \dot{m}(e_{f5} - e_{f6}) \quad (25)$$

$$Ed_{HE} = \dot{m}_{ORC}(e_{f6} - e_{f7}) + \dot{m}(e_{f2} - e_{f3}) \quad (26)$$

$$Ed_{ORC,Cond} = \dot{m}_{ORC}(e_{f8} - e_{f5}) + \left( 1 - \frac{T_0}{T_K} \right) \dot{Q}_{ORC,Cond} \quad (27)$$

Maka, nilai kehancuran eksergi total adalah sebagai berikut.

$$\dot{E}x_{ORC,Tot} = \dot{E}d_{Turbine} + \dot{E}d_{Pump} + \dot{E}d_{HE} + \dot{E}d_{ORC,Cond} \quad (28)$$

Efisiensi eksergi ( $\eta_{ex,ORC}$ ) dari sistem ORC secara keseluruhan menggunakan Persamaan (30) berikut.

$$\eta_{ex,ORC} = \frac{E_{net}}{m_{AC}[h_2 - h_3 - T_0(s_2 - s_3)]} \times 100\% \quad (30)$$

$$EX_{Total} = EX_{AC} + EX_{ORC} \quad (31)$$

$$\eta_{ex,net} = \frac{Q_{Evap}(1 - \frac{T_0}{T_4})}{W_{Comp} - E_{Net}} \times 100\% \quad (32)$$

Efisiensi eksergetik digunakan untuk mengevaluasi efektivitas langkah-langkah rekayasa yang diambil untuk meningkatkan kinerja sistem. Hal ini dilakukan dengan membandingkan nilai efisiensi yang ditentukan sebelum dan sesudah dilakukannya modifikasi untuk menunjukkan seberapa besar peningkatan yang telah tercapai. Selain itu, efisiensi eksergetik dapat digunakan untuk mengukur potensi peningkatan kinerja sistem tertentu dengan membandingkan efisiensi sistem dengan efisiensi sistem serupa. Perbedaan yang signifikan antara nilai-nilai ini menandakan bahwa adanya kemungkinan peningkatan kerja.

Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan hasil perancangan simulasi yang digunakan untuk mengukur sejauh mana performa sistem AC-ORC setelah mendapatkan perlakuan perbedaan jenis refrigeran. Selain itu, penelitian ini juga dimaksudkan untuk mengevaluasi besaran nilai efisiensi eksergi pada kondisi simulasi sistem, sehingga mendapatkan gambaran mengenai parameter-parameter yang mempengaruhi nilai eksergi pada sistem AC-ORC. Pada penelitian ini, data simulasi yang digunakan untuk evaluasi dan analisis sistem dilakukan dengan menggunakan *Software EES*.

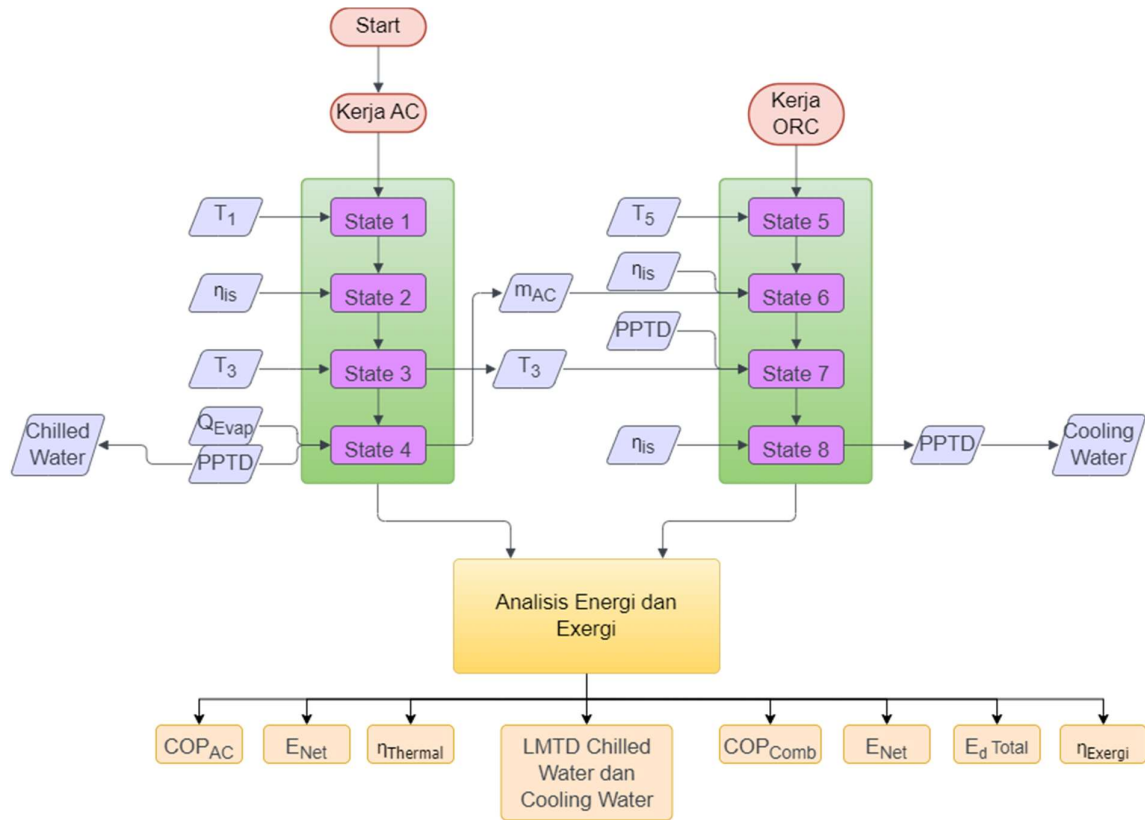
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam Penelitian ini, kinerja sistem AC-ORC yang menggunakan sumber energi baru dan terbarukan bersuhu rendah dengan menggunakan fluida kerja yang berbeda dihitung dan dianalisis. Fluida yang digunakan untuk subsistem AC adalah R22, R134a, R290, R407C, R600a dan R410, serta untuk subsistem ORC menggunakan fluida R600, R123, R141b, R227ea, R245fa, dan R1233zd(E). *Critical Temperature* fluida ini berada diantara 72,8°C untuk R404A dan 204,35 untuk R141b. Kisaran ini dipilih dengan harapan dapat menemukan pasangan fluida dengan performa terbaik untuk sistem AC-ORC untuk pemulihan energi baru terbarukan bersuhu rendah.

Untuk mensimulasikan pemodelan sistem, parameter input bervariasi secara linear pada suatu rentang. Dalam penelitian ini, suhu evaporator, suhu kondensor AC dan suhu kondensor ORC yang bervariasi masing-masing pada kisaran 0°C-10°C, 45°C-60°C, dan 30°C-40°C. Gambar 1 menunjukkan proses secara umum dari pemodelan EES. Parameter input digambarkan dalam blok berwarna *orange*. Model AC menggunakan  $T_1$ ,  $T_3$ ,  $Q_{evap}$ , dan  $\eta_{is}$  sebagai parameter input untuk menghitung point 1 hingga point 4. Model AC menghasilkan  $m_{AC}$  sebagai outputnya, dan digunakan bersama dengan PPTD,  $T_3$ ,  $T_{amb}$ , dan  $\eta_{is}$ . Keluaran dari pemodelan AC dan ORC digunakan dalam model analisis energi dan eksergi untuk menghitung  $COP_{AC}$ ,  $E_{Net}$ ,  $\eta_{th}$ ,  $COP_{Comb}$ ,  $\eta_{ex,Net}$ , dan  $EX_{Net}$ .



Analisis Energi dan Eksergi pada Siklus Rankine Organik Terintegrasi untuk Pemulihan Panas Limbah dari Sistem AC



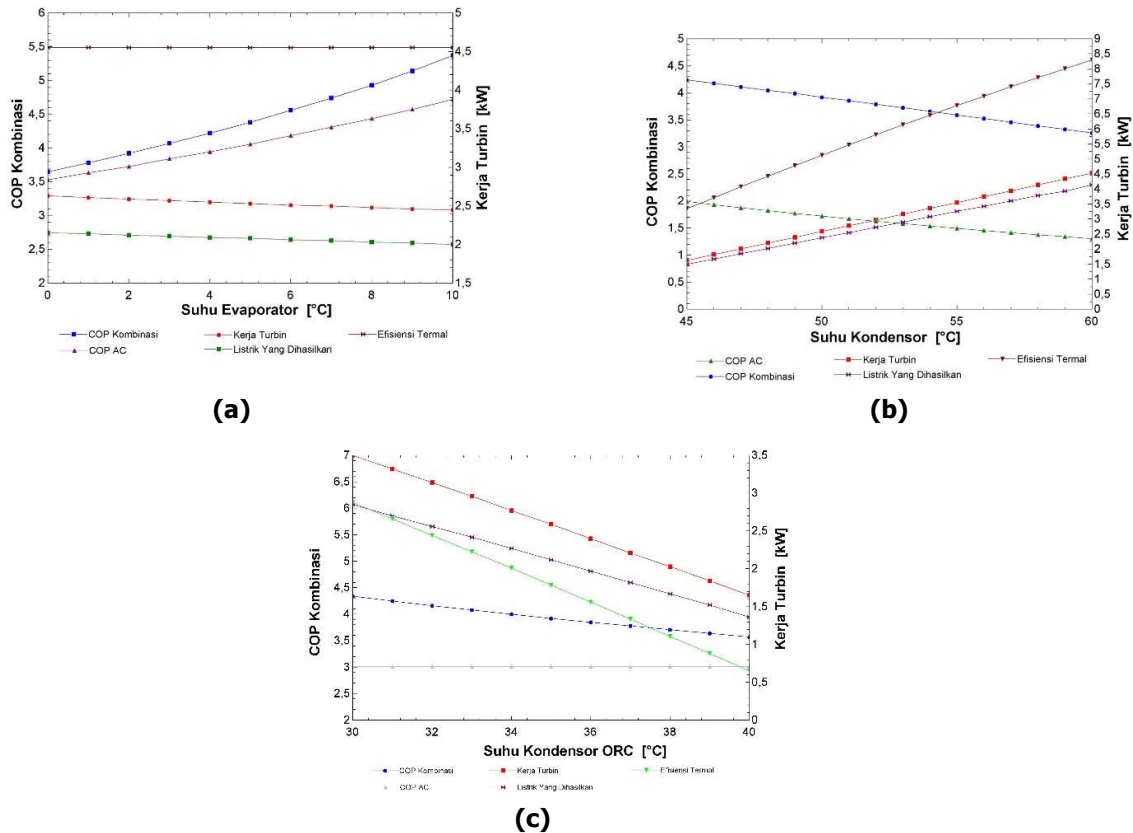
Gambar 2. Flowchart Simulasi EES Sistem Terintegrasi AC-ORC

Tabel 2. Kinerja Sistem AC-ORC Terintegrasi

Refrigeran VCRS	Refrigeran ORC	COP AC	COP Kombinasi	W Turbin (kW)	E <sub>net</sub> (kW)	Efisiensi Termal (%)	Kerusakan Exergy Total (kW)	Efisiensi Eksergi Total (%)
R600a	R600	3,097	3,807	2,252	2,107	4,55	8,119	16,73
	R123	3,097	3,766	2,126	2,006	4,333	8,083	16,54
	R141b	3,097	3,677	1,887	1,782	3,849	8,254	16,16
	R227ea	3,097	3,922	2,586	2,375	5,129	8,049	17,23
	R245fa	3,097	3,792	2,2	2,069	4,468	8,103	16,66
	R1233zd(E)	3,097	3,771	2,143	2,017	4,357	8,111	16,56

Hasil pada Tabel 2 diatas menggambarkan bahwa diantara semua jenis fluida yang dipasangkan, R600a-R227ea memiliki nilai COP Kombinasi,  $W_{Turbin}$ ,  $E_{Net}$ , Kerusakan Exergy dan  $\eta_{Exergy}$  Sistem maksimum. Nilai-nilai ini masing-masing adalah 3,922, 2,586 kW, 2,375 kW, 8,049 kW dan 17,23%. Di sisi lain R407C-R123 memiliki nilai COP Kombinasi terendah yaitu 3,023. Jadi, dari sudut pandang analisis energi dan eksergi, R600a-R227ea dianggap sebagai pasangan fluida kerja dengan kinerja terbaik untuk sistem AC-ORC.

Efek dari parameter operasi yang berbeda seperti suhu kondensor, evaporator dan *heat exchanger*, selain efisiensi isentropik turbin dan kompresor pada kinerja sistem, dibahas dalam subbab berikut. Dalam setiap penelitian, parameter yang berpengaruh diubah yang diasumsikan pada Tabel 1. Sedangkan parameter lainnya adalah tetap dan sama dengan nilai yang tercantum pada Tabel 1.



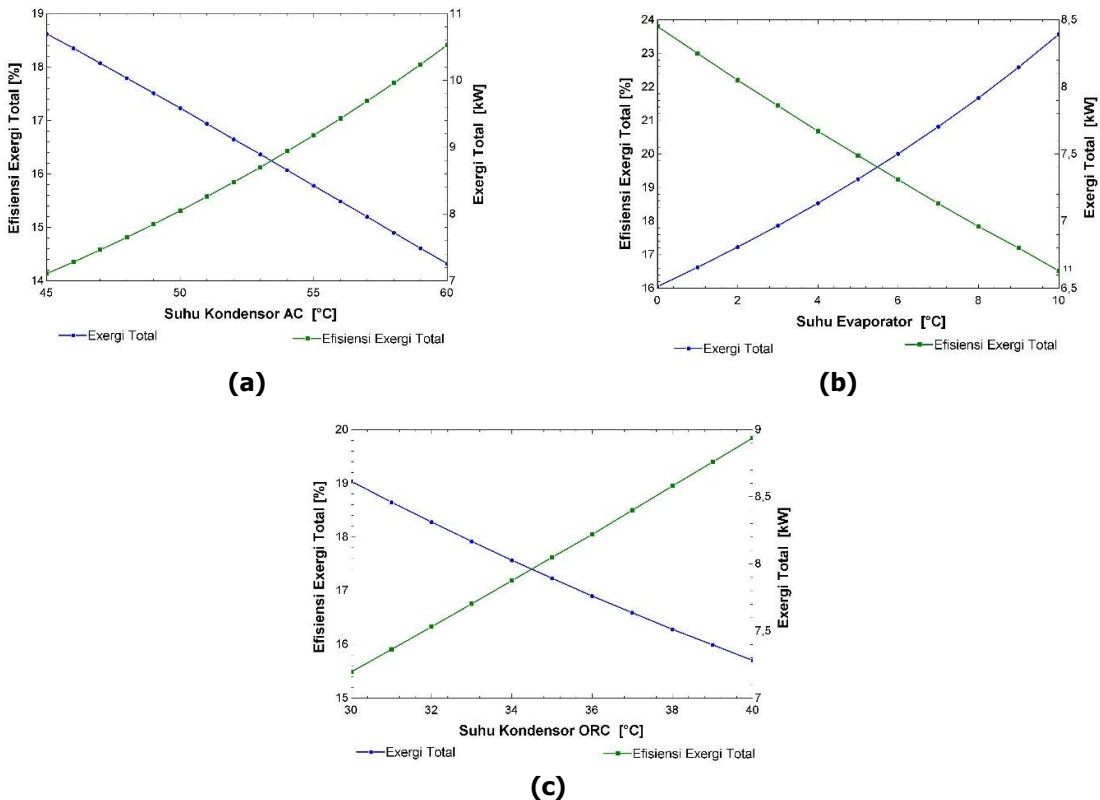
**Gambar 3. (a) Variasi COP Kombinasi, Kerja Turbin, Energi Listrik yang Dihasilkan dan Efisiensi Termal Terhadap Suhu Evaporator; (b) Variasi COP VCRS, COP Kombinasi, Kerja Turbin, Energi Listrik yang Dihasilkan dan Efisiensi Termal Terhadap Suhu Kondensor VCRS; (c) Variasi COP VCRS, COP Kombinasi, Kerja Turbin, Energi Listrik yang Dihasilkan dan Efisiensi Termal Terhadap Suhu Kondensor ORC**

Kinerja sistem AC-ORC terintegrasi untuk pasangan refrigeran R600a-R227ea menggunakan berbagai kurva kinerja diantara parameter yang dihitung. Gambar 3 (a). menunjukkan variasi nilai COP Kombinasi, kerja turbin dan energi listrik yang dihasilkan terhadap suhu evaporator sistem AC. Dihasilkan bahwa dengan peningkatan suhu evaporator AC yang bervariasi dari 0°C hingga 10°C, COP Kombinasi meningkat dari 3,65 menjadi 5,37, *output* kerja turbin di sistem ORC menurun dari 2,63 kW menjadi 2,45 kW, serta berbanding lurus dengan *output* kerja turbin maka energi listrik yang dihasilkan pun menurun dari 2,41 kW menjadi 2,25 kW. Hal ini dikarenakan nilai COP Kombinasi berbanding lurus dengan suhu evaporator, sehingga nilainya meningkat. Dengan asumsi pompa bekerja secara konstan, hal ini menyebabkan penurunan keluaran daya turbin dan listrik yang dihasilkan. Variasi suhu evaporator tidak berpengaruh pada ORC. Akibatnya, efisiensi termal ORC tetap konstan untuk semua variasi suhu evaporator. Tekanan evaporator meningkat saat suhunya meningkat. Hal ini menyebabkan pengurangan kerja kompresor yang diperlukan pada suhu kondensor konstan.

Nilai berbeda ditunjukkan pada Gambar 3(a) dengan variasi suhu kondensor yang dimulai dari 45°C menjadi 60°C. Dengan peningkatan suhu kondensor AC, COP Kombinasi nilainya menurun dari 4,24 menjadi 3,26, namun kerja turbin dan listrik yang dihasilkan meningkat dengan nilai masing-masing adalah 1,63 kW menjadi 4,53 kW dan 1,50 kW menjadi 4,14 kW. Suhu kondensor memiliki efek yang besar pada COP Kombinasi seperti yang terlihat pada Gambar 3(b). suhu dan tekanan masuk pada kompresor adalah konstan, dengan kenaikan suhu kondensor, tekanan dan entalpi keluar kompresor meningkat. Hal ini menyebabkan

peningkatan  $W_{Comp}$  yang mengakibatkan penurunan COP AC. Selain itu, peningkatan suhu kondensor menyebabkan peningkatan  $W_{Turbin}$ , karena diasumsikan  $W_{Turbin} = W_{Comp}$ .

Gambar 3(c) menunjukkan bahwa ketika suhu dari kondensor ORC berubah dari 30°C sampai 40°C, performa sistem melalui pendekatan energi mengalami penurunan. Suhu kondensor ORC memiliki pengaruh yang besar terhadap performa sistem. Perubahan suhu pada kondensor ORC tidak berpengaruh terhadap nilai COP pada sistem AC, tetapi COP Kombinasi mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan suhu kondensor ORC berbanding terbalik dengan COP Kombinasi.



**Gambar 4. (a) Variasi Efisiensi Exergy dan Kerusakan Exergy Sistem Terhadap Suhu Evaporator; (b) Variasi Efisiensi Exergy dan Kerusakan Exergy Sistem Terhadap Suhu Kondensor AC; (c) Variasi Efisiensi Exergy dan Kerusakan Exergy Sistem Terhadap Suhu Kondensor ORC**

Gambar 4(a), 4(b) dan 4(c) menunjukkan variasi efisiensi exergy dari sistem gabungan, serta penghancuran eksergi sistem terhadap suhu evaporator, kondensor AC, dan kondensor ORC. Pada siklus termodinamika dalam sistem refrigerasi maupun siklus rankine organik, seperti perubahan fase pada evaporator dan kondensor serta turbin dan pompa, meningkatnya tekanan dan temperatur setelah proses kompresi dan ekspansi, ini semua merupakan alah satu penyebab terjadinya perubahan nilai entropi, sehingga mengakibatkan terjadinya ireversibilitas. Ireversibilitas menyebabkan terjadinya kehancuran exergy (*exergy destruction*) pada sistem. Sistem refrigerasi dan siklus rankine organik akan selalu mengalami pertukaran panas, sehingga akan selalu ada kerugian yang terjadi, dalam artian sistem tidak dapat mengalami kondisi setimbang dengan lingkungannya.

Karena kondisi ruangan yang berfluktuasi, maka suhu *cooling water* bervariasi. Oleh karena itu, analisis energi dan eksergetik dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem AC-ORC R600a-R227ea. Secara umum, perubahan kondisi operasi subsistem ORC dapat mempengaruhi kinerja subsistem AC. Namun demikian, suhu kondensasi sistem AC dirancang konstan pada suhu 50°C. Oleh karena itu, kinerja sistem AC dan suhu penguapan subsistem ORC dianggap tidak berubah dengan suhu *cooling water* yang bervariasi. Berdasarkan persamaan yang telah ditentukan sebelumnya, penurunan dan kenaikan efisiensi termal, serta nilai COP Kombinasi dari sistem AC-ORC.

#### 4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, sistem AC-ORC terintegrasi dianalisis untuk pemanfaatan kembali limbah panas. Secara total, 36 kombinasi fluida kerja terbentuk dan kinerja sistem dengan kombinasi ini dianalisis dan dibandingkan. Berdasarkan analisis termodinamika (analisis energi dan eksergetik), dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk pemulihan panas limbah, dari segi performansi sistem, fluida kerja yang optimal untuk sistem ORC adalah R227ea.
2. Performa sistem AC\_ORC terintegrasi sangat bergantung pada performa awal sistem AC. Sistem AC dengan kinerja yang lebih baik menghasilkan performa keseluruhan yang lebih baik bila dikombinasikan dengan sistem ORC. R600a dipilih sebagai fluida kerja untuk sistem AC.
3. Ketika dioperasikan dengan suhu *chilled water* yang berubah-ubah, maka suhu evaporator pun ikut berubah dan nilai COP dan *output* listrik bersih naik dengan meningkatnya suhu *chilled water*. Sedangkan efisiensi termal tidak terpengaruh oleh perubahan suhu *chilled water*.
4. Berdasarkan asumsi yang dibuat pada sistem ac-orc terintegrasi, cop kombinasi, efisiensi termal, *output* listrik bersih, dan efisiensi exergi keseluruhan menurun dengan semakin tingginya suhu *cooling water*.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Ali, H. M. (2022). Heat transfer augmentation of porous media (metallic foam) and phase change material based heat sink with variable heat generations: An experimental evaluation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(PC), 102218. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102218>
- Aphornratana, S., & Sriveerakul, T. (2010). Analysis of a combined Rankine-vapour-compression refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2557–2564. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.04.016>
- Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 325–342. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>
- Bonk, C. D., Laux, C., Rödder, M., & Neef, M. (2017). Design of a 1 KW Organic Rankine Cycle

- for Teaching and Research Issues. *Energy Procedia*, 129, 931–938. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.117>
- Borikar, S. A., Gupta, M. M., Alazawi, M. A., Malwe, P. D., Moustafa, E. B., Panchal, H., & Elsheikh, A. (2021). A case study on experimental and statistical analysis of energy consumption of domestic refrigerator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28(November), 101636. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101636>
- Encabo, C. I., Agromayor, R., & Nord, L. O. (2017). Thermodynamic Optimization Of An Organic Rankine Cycle For Power Generation From A Low Temperature Geothermal Heat Source. *Proceedings of the 58th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 58) Reykjavik, Iceland, September 25th – 27th, 2017*, 138, 251–262. <https://doi.org/10.3384/ecp17138251>
- Franchetti, B., Pesiridis, A., Pasmazoglou, I., Sciubba, E., & Tocci, L. (2016). Thermodynamic and technical criteria for the optimal selection of the working fluid in a miniORC. *ECOS 2016 - Proceedings of the 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimisation, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 1–15.
- Kaushik, S. C., Panwar, N. L., & Reddy, V. S. (2012). Thermodynamic evaluation of heat recovery through a Canopus heat exchanger for vapor compression refrigeration (VCR) system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 110(3), 1493–1499. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-2111-7>
- Li, C., Zhou, J., Cao, Y., Zhong, J., Liu, Y., Kang, C., & Tan, Y. (2014). Interaction between urban microclimate and electric air-conditioning energy consumption during high temperature season. *Applied Energy*, 117, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.057>
- Malwe, P. D., Shaikh, J., & Gawali, B. S. (2022). Exergy assessment of a multistage multi-evaporator vapor compression refrigeration system using eighteen refrigerants. *Energy Reports*, 8, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2021.11.072>
- Rajabloo, T. (2017). Thermodynamic study of ORC at different working and peripheral conditions. *Energy Procedia*, 129, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.165>
- Sarkar, J. (2018). Generalized pinch point design method of subcritical-supercritical organic Rankine cycle for maximum heat recovery. *Energy*, 143, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.057>
- Tahir, M. B. M., & Yamada, N. (2009). Characteristics of Small ORC System for Low Temperature Waste Heat Recovery. *Journal of Environment and Engineering*, 4(2),

- 375–385. <https://doi.org/10.1299/jee.4.375>
- Wahile, G. S., Malwe, P. D., & Aswalekar, U. (2022). Latent heat storage system by using phase change materials and their application. *Materials Today: Proceedings*, *52*, 513–517. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.268>
- Wahile, G. S., Malwe, P. D., & Kolhe, A. V. (2020). Waste heat recovery from exhaust gas of an engine by using a phase change material. *Materials Today: Proceedings*, *28*, 2101–2107. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.247>
- Yansuri, D. S. (2018). Perencanaan Sistem Waste Heat Recovery Power Generation (WHRPG) Pabrik Semen. *Jurnal Teknik Elektro*, *8*(2), 1–8.