

Perbandingan R245fa Dan R1234ze Sebagai Fluida Kerja Pada Sistem Siklus Rankine Organik

Tasya Rahmawati¹

¹Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : tasya.rahmawati.tken19@polban.ac.id

ABSTRAK

Kebutuhan energi semakin meningkat selaras dengan pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Kementerian ESDM 2021 menyatakan bahwa 38% kesediaan energi listrik di Indonesia didominasi oleh PLTU sementara sumber energi fosil semakin lama semakin menipis. Salah satu pengembangan teknologi yang prinsip kerja-nya sama dengan PLTU adalah *Organic Rankine Cycle* (ORC). Komponen utama ORC yaitu pompa, evaporator, turbin uap, dan kondenser. Sumber panas ORC bisa diperoleh dari panas buang, panas bumi, panas surya, biomassa, dan lain sebagainya. ORC menggunakan refrigeran sebagai fluida kerja karena sifatnya yang mampu menguap dalam temperatur rendah. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi kinerja ORC menggunakan fluida kerja R245fa dan R1234ze pada simulator *Aspen Plus* V.11. Sistem bekerja pada tekanan keluaran pompa 6 bar, temperatur masuk turbin 70-110°C dan laju alir massa 40.000 kg/s. Berdasarkan hasil simulasi dan analisa, fluida R1234ze memberikan kinerja dan efisiensi sistem yang lebih baik dibanding R245fa. Efisiensi model ORC tertinggi dengan fluida kerja R1234ze diperoleh pada saat temperatur masuk turbin 110°C sebesar 13.36%.

Kata Kunci

ORC, fluida kerja, temperatur, turbin uap, simulasi.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi semakin meningkat selaras dengan pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Era sekarang ini hampir semua aspek kehidupan membutuhkan energi listrik untuk menjalankan aktivitas. Data statistik ketenagalistrikan kementerian ESDM tahun 2021 menyebutkan 38% dari total penyediaan listrik di Indonesia dibangkitkan menggunakan tenaga uap dengan sumber energi berupa batu bara. PLTU konvensional menggunakan fluida kerja air dalam bentuk uap yang bersirkulasi secara tertutup dengan suhu berkisar 541°C dan tekanan 138 bar [1] Salah satu pengembangan teknologi sistem konversi uap dengan prinsip kerja yang sama adalah siklus rankine organik (ORC), meskipun penggunaan ORC dikhususkan untuk pembangkitan energi skala kecil, ORC menjadi solusi dari beberapa kekurangan sistem pembangkitan listrik tenaga uap seperti persediaan bahan bakar fosil yang terbatas, sumber panas besar, dan penggunaan bahan bakar batu bara yang menyebabkan pencemaran udara, selain itu ORC juga bertujuan sebagai

pemanfaatan sumber panas bertemperatur rendah.

Teknologi siklus rankine organik atau ORC memiliki prinsip kerja yang sama dengan PLTU. Jika pada sistem konversi uap konvensional menggunakan air sebagai fluida kerja, sistem ORC menggunakan fluida berupa refrigerant sebagai fluida kerja. Penggunaan refrigerant sebagai fluida memberikan ruang berbagai sumber panas untuk bisa dimanfaatkan dikarenakan titik didih refrigerant yang lebih rendah dari air. Sumber panas yang digunakan pada sistem ORC bisa didapat dari panas matahari, panas bumi, biomassa, dan panas buang dari berbagai mesin atau teknologi.

Kajian – kajian tentang pengujian performa fluida kerja untuk sistem siklus rankine organik, diantaranya Sirodz Gaos telah melakukan pengujian pada R134a, R141b, dan n-pentane sebagai fluida kerja, menyimpulkan bahwa n-pentane memiliki nilai efisiensi yang paling tinggi[2]. S., Masheiti, B., Agnew mengevaluasi fluida R134a dan R245fa sebagai fluida kerja ORC dengan rentang sumber panas dari 68°C

sampai 80°C yang menunjukkan bahwa R245fa memiliki performansi lebih baik[3]. Lalu, Perangin-angin & Hutaeruk membandingkan 4 jenis refrigerant dengan kapasitas laju alir sebesar 40000 kg/j dan temperatur yang masuk adalah 60°C[4].

Kajian penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan performansi/kinerja sistem siklus rankine organik menggunakan dua fluida kerja berbeda pada variasi temperatur masuk turbin rentang 70–110°C, dikarenakan tujuan ORC sendiri untuk pemanfaatan sumber panas bertemperatur rendah dan kajian-kajian yang menganalisa potensi temperatur dari sumber panas. Pemilihan utama fluida didasari oleh faktor keselamatan, keamanan, kesehatan baik untuk makhluk hidup maupun lingkungan sekitar disertai karakter fluida dengan titik didih yang rendah. R245fa dan R1234ze memiliki kesamaan dalam aspek keamanan lingkungan berdasarkan ODP (Ozone Depletion Potential) dan GWP (Global Warming Potential) serta memiliki karakter viskositas dan kondisi kritis yang mendekati sama.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja fluida kerja R245fa dan R1234ze dalam pemodelan sistem ORC menggunakan *software* simulasi Aspen Plus V.11.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Organic Rankine Cycle (ORC)

Sistem Organik rankine cycle (ORC) merupakan suatu siklus Rankine konvensional yang dimodifikasi dengan menggunakan fluida kerja dari jenis fluida organik menggantikan air yang digunakan pada siklus Rankine konvensional[5]. Fluida organik ini mempunyai sifat fisik yang menguap pada temperatur yang cukup rendah sehingga tidak membutuhkan sumber panas yang tinggi untuk merubah fasanya menjadi uap panas lanjut (*superheated*). Siklus Rankine Organik tepat digunakan pada pembangkitan energi listrik tenaga panas bumi dengan temperatur yang rendah, selain itu bisa memanfaatkan dari sumber panas matahari, biomassa, dan panas buang teknologi. Siklus Rankine organik secara sederhana dapat dibangun menggunakan empat komponen utama yakni evaporator, turbin uap, kondensor dan pompa dengan

pipa-pipa penghubung antar komponen. Satu siklus terjadi apabila fluida kerja telah berubah dari cair dengan tekanan tertentu menjadi uap pada *heat exchanger* kemudian fluida menggerakkan rotor turbin. Setelah melewati turbin dikondensasi oleh kondensor, dan dipompakan kembali ke *heat exchanger* oleh pompa[6]. Pada siklus rankine organik, digunakan fluida kerja bahan organik/*refrigerant* yang pada tekanan tertentu dengan panas tertentu akan berubah fasa dari cair menjadi uap.

2.2 Komponen-komponen Sistem ORC

Komponen-komponen utama sistem ORC diantaranya adalah pompa, evaporator, turbin uap, dan kondensor. Setiap komponen dianggap beroperasi pada kondisi tunak (*steady state*). Dengan menggunakan prinsip konservasi massa dan konservasi energi bersama-sama dengan idealisasi tersebut maka akan dikembangkan persamaan untuk perpindahan energi pada masing-masing komponen pembangkit.

Persamaan kesetimbangan energi:

$$(\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}) + (\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}) = \dot{m} (h_{out} - h_{in}) \quad (1)$$

2.2.1 Pompa

Fluida kerja dalam fasa cair meninggalkan kondenser, dihisap pompa dari kondenser masuk ke dalam evaporator sehingga tekanannya naik. Dengan menggunakan volume atur di sekitar pompa dan mengasumsikan tidak ada perpindahan kalor di sekitarnya, kesetimbangan laju massa dan energi adalah:

$$\dot{W}_{pompa} = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (2)$$

2.2.2 Evaporator

Fluida kerja meninggalkan pompa, masuk ke evaporator. Evaporator di sini adalah sebuah alat penukar kalor yang berfungsi menguapkan fluida kerja dari fasa cair menjadi fasa uap menggunakan energi panas. Proses tersebut merupakan proses isobarik karena tidak ada perbedaan tekanan antara saluran masuk dan keluar evaporator. Rumus pemanasan untuk proses ini dapat dijelaskan sebagai:

$$\dot{Q}_{evaporator} = \dot{m} (h_3 - h_2) \quad (3)$$

2.2.3 Turbin Uap

Uap dari evaporator yang berada pada temperatur dan tekanan yang sudah dinaikkan, berekspansi melalui turbin untuk menghasilkan kerja dan kemudian dibuang ke kondenser pada kondisi 4 dengan tekanan yang relative rendah. Dengan mengabaikan

perpindahan kalor dengan sekelilingnya, kesetimbangan laju energi dan massa untuk volume air di sekitar turbin pada kondisi tunak menjadi:

$$\dot{W}_{\text{turbin uap}} = \dot{m} (h_3 - h_4) \quad (4)$$

2.2.4 Kondensor

Dalam kondensor terjadi perpindahan kalor dari uap fluida kerja ke air pendingin yang mengalir dalam aliran yang terpisah. Uap terkondensasi dan suhu air pendingin meningkat. Pada kondisi tunak, kesetimbangan energi pada kondensor memberikan persamaan berikut:

$$\dot{Q}_{\text{kondensor}} = \dot{m} (h_4 - h_1) \quad (5)$$

2.3 Efisiensi Sistem ORC

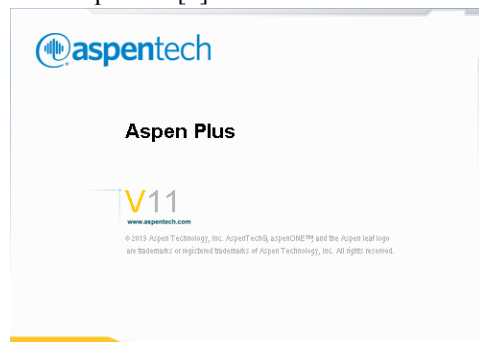
Efisiensi energi mengukur berapa banyak energi yang masuk dalam fluida kerja yang dikonversi menjadi keluaran kerja[6]. Efisiensi dari siklus ORC diperoleh dengan rumus:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{out}} - \dot{W}_{\text{in}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \times 100\%$$

(6)

2.4 Aspen Plus V.11

Aspen Plus merupakan sebuah perangkat lunak berbayar yang pemakaiannya dapat mempermudah bangun model proses serta melakukan simulasi dengan perhitungan kompleks. Perangkat lunak ini dapat mensimulasikan yang berhubungan dengan dunia termodinamika, kimia proses dan industri polimer[7].



Gambar 2.1 Tampilan Utama Aspen Plus V.11

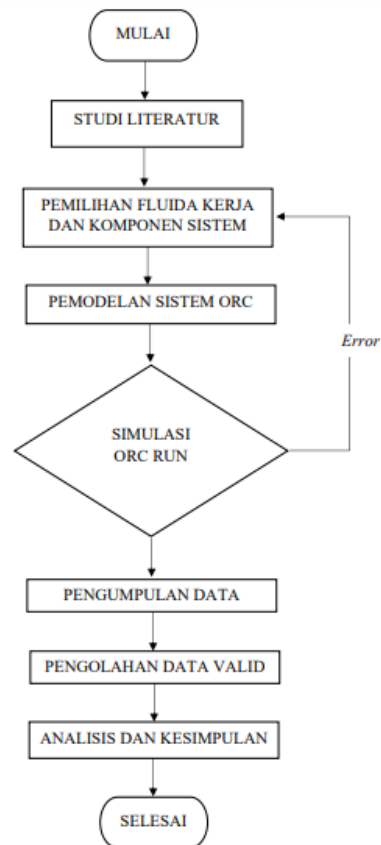
Perangkat lunak ini didesain untuk dapat menganalisa proses dan berbagai karakteristik setiap material. Aspen Plus dilengkapi dengan fitur – fitur otomatis sesuai dengan pemilihan solusi yang dibutuhkan. Aspen plus menyediakan pengaturan yang luas guna mengoptimalkan model dan sistem proses. Selain itu, perangkat lunak ini dibekali kemampuan kompleks dalam menangani berbagai jenis

material baik itu material padat, cair, gas, dan lainnya.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode pendekatan simulasi. Simulasi sistem ORC dilakukan menggunakan Aspen Plus V.11 dengan parameter yang sama untuk kedua fluida kerja yang akan dibandingkan. Setelah diperoleh data kinerja komponen sistem ORC dari Aspen Plus V.11, akan dilakukan perhitungan termodinamika manual untuk memvalidasi data hasil simulasi Aspen Plus V.11. Jika hasil simulasi dan hasil perhitungan termodinamika manual tidak berbeda atau mendekati sama dengan selisih perbedaan di bawah 3%, data hasil simulasi Aspen Plus V.11 dapat digunakan. Perhitungan efisiensi dilakukan secara manual menggunakan data kinerja hasil simulasi.

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Karakteristik Fluida Kerja

Batasan yang dapat membantu dalam menentukan fluida kerja ini berhubungan dengan sifat termodinamika fluida, pertimbangan kesehatan, keselamatan, dan keramahan lingkungan. Berikut tabel 3.1

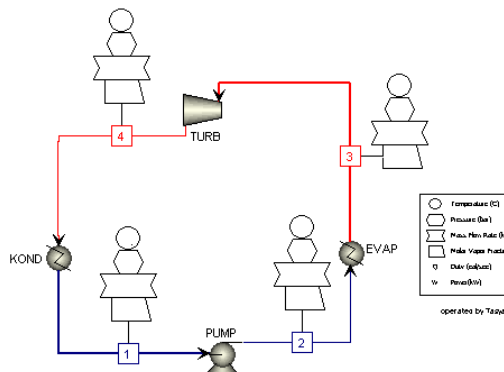
merangkum sifat fluida kerja R245fa dan R1234ze.

Tabel 3.1 Karakteristik Fluida R245fa dan R1234ze

	Satuan	R245fa	R1234ze
Massa Molekul	kg/kmol	134.05	114.04
Densitas	kg/m ³	1340.0	1163.5
Titik Didih	°C	15.14	-18.95
Temperatur Kritis	°C	154.01	109.37
Tekanan Kritis	Bar	36.51	36.36
Klasifikasi		Kering	Kering
ODP		0	0
Aspek Keamanan ASHRAE		A1	A2L

3.3 Simulasi Sistem ORC Menggunakan Aspen Plus V.11

Pelaksanaan simulasi fluida kerja R245fa dan R1234ze membutuhkan desain yang menghubungkan antar komponen sistem Siklus Rankine Organik seperti pompa, evaporator, turbin, dan kondensor. Aliran (stream) yang menghubungkan antar komponen memberikan informasi atau kondisi fluida yang berbeda-beda. Skema simulasi ditunjukkan oleh gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema Simulasi ORC Aspen Plus V.11

Sistem terdiri dari 4 komponen (pompa, evaporator, kondensor, turbin) dan garis-garis aliran penghubung antar komponen. Garis biru menunjukkan fluida dalam kondisi temperatur suhu ruang (ambient) dan fluida pada fasa cair, sedangkan garis merah menunjukkan fluida dalam temperatur tinggi dan fluida pada fasa uap panas.

Setiap garis penghubung terdapat kombinasi bentuk yang menampilkan data tiap kondisi aliran antar komponen. Lingkaran menunjukkan temperatur dalam derajat celcius, hexagon menunjukkan nilai tekanan dalam bar, segienam menunjukkan nilai laju alir massa fluida dalam kilogram per jam,

trapezium siku menunjukkan fraksi atau kualitas fluida, 'Q' menunjukkan nilai kalor dalam cal/s dan W menunjukkan nilai kerja dalam kW.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Hasil simulasi memberikan informasi mengenai nilai kerja untuk tiap komponen sistem siklus rankine organik baik untuk fluida kerja R245fa maupun R1234ze. Kondisi batas untuk simulasi di setiap fluida kerja diperlakukan sama yaitu tekanan keluaran pompa sebesar 6 bar dan laju alir massa fluida 40.000 kg/jam.

Setelah dilakukan simulasi, dan olah data valid (perhitungan termodinamika manual) berikut tabel 3.2 dan 3.3 menunjukkan kinerja sistem ORC menggunakan fluida kerja R245fa dan R1234ze.

Tabel 3.2 Kinerja Sistem ORC Fluida Kerja R245fa

N o	Laju Alir Massa	W pump	Q evap	W turbin	Q kond	Efisiensi
	kg/j	kW	kJ/s	kW	kJ/s	%
1	40000	7	249 1.2	261	223 5.7	10 .0
2	40000	7	261 0.3	273	234 3.5	10 .1
3	40000	7	272 9.2	283	245 1.4	10 .1
4	40000	7	284 8.3	294	255 9.9	10 .2
5	40000	7	296 7.9	304	266 9.3	10 .2

Tabel 3.3 Kinerja Sistem ORC Fluida Kerja R1234ze

N o	Laju Alir Massa	W pump	Q evap	W turbin	Q kond	Efisiensi
	kg/j	kW	kJ/s	kW	kJ/s	%
1	40000	2	233 4.9	314	202 1.2	12 .8
2	40000	2	244 7.7	326	212 2.2	12 .9
3	40000	2	256 1.2	338	222 4.2	13 .1
4	40000	2	267 5.7	349	232 7.2	13 .2
5	40000	2	279 1.2	360	243 1.5	13 .4

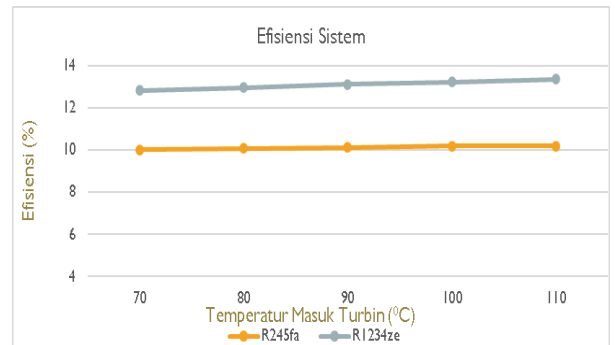
4.2 Pembahasan

Pompa bekerja menaikkan tekanan pada fluida kerja. Tekanan keluaran pompa diasumsikan sama untuk seluruh skema yaitu sebesar 6 bar. Tekanan 6 bar menghasilkan kerja pompa untuk R245fa sebesar 7 kW dan 2 kW untuk fluida kerja R1234ze. Faktor yang mempengaruhi perbedaan kerja pompa ini diantaranya massa jenis, tekanan kondensasi fluida sebelum masuk pompa, dan perbedaan selisih entalpi sebelum dan sesudah masuk pompa. Massa molekul adalah massa suatu zat yang diukur dalam satuan volume, berdasarkan data REFPROP properti diketahui pada tekanan 6 bar dan temperatur 250C massa jenis R245fa sebesar 1340.0 kg/m³ sedangkan massa jenis R1234ze sebesar 1163.5 kg/m³. Massa jenis mempengaruhi kerja pompa karena semakin besar massa jenisnya maka pompa pun akan bekerja.

Besarnya temperatur mempengaruhi banyaknya panas yang diserap evaporator dan yang dibuang kondensor. Kenaikan temperatur pada evaporator berbanding lurus dengan jumlah panas yang diserap evaporator. Semakin besar temperatur yang digunakan untuk memanaskan fluida, maka semakin banyak pula kalor yang diserap evaporator. Tabel 3.2 dan 3.3 menunjukkan pengaruh temperatur keluaran evaporator terhadap panas yang diserap evaporator, pada grafik ditunjukkan bahwa fluida R245fa menyerap lebih banyak panas dibandingkan fluida R1234ze. Sebagaimana rumus perpindahan kalor, $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ (Q = banyaknya kalor yang diperlukan (J) m = massa suatu zat yang diberi kalor (kg) c = kapasitas kalor (J/kg°C) ΔT = kenaikan/perubahan suhu zat (°C)), dari rumus tersebut dinyatakan bahwa banyaknya kalor yang diperlukan dalam satuan Joule dipengaruhi oleh massa zat, kalor jenis zat, dan kenaikan/perubahan suhu zat. Kapasitas kalor (C_p) adalah besaran terukur yang menggambarkan banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu suatu zat (benda). Nilai C_p fluida R245fa pada range temperatur 70-110°C dalam satuan kJ/kg-K adalah 1.1420;1.1139;1.0993;1.0932;1.0927, sedangkan fluida R1234ze dengan range temperatur dan satuan yang sama nilai C_p nya adalah 1.0178;1.0252;1.0339;1.0435;1.0538. Jika dibandingkan, R245fa memiliki nilai C_p yang lebih tinggi dari R1234ze pada kondisi

yang sama. Maka dari itu, R245fa dapat menyerap kalor lebih banyak dibandingkan R1234ze.

Berdasarkan data hasil percobaan, perhitungan efisiensi sistem ORC dengan fluida kerja R245fa dan R1234ze yang ditunjukkan pada tabel 3.2 dan 3.3 maka dapat dibentuk grafik efisiensi sistem terhadap temperatur masuk inlet turbin uap yang dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Efisiensi Siste, terhadap Temperatur Masuk Turbin

Efisiensi sistem siklus rankine organik mengukur berapa banyak energi yang masuk dalam fluida kerja yang dikonversi menjadi keluaran kerja. Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa besar temperatur masuk turbin terhadap efisiensi sistem mengalami kenaikan dan cenderung linier. Kenaikan nilai efisiensi dipengaruhi oleh tinggi temperatur uap panas yang masuk ke dalam turbin uap. Semakin tinggi temperatur masuk turbin uap, maka efisiensi sistemnya semakin meningkat.

Sebagaimana ditampilkan oleh grafik di atas, menunjukkan bahwa penggunaan R1234ze dalam model sistem siklus rankine organik ini memiliki nilai efisiensi sistem yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan R245fa sebagai fluida kerja. Efisiensi model ORC tertinggi dengan fluida kerja R1234ze diperoleh pada saat temperatur masuk turbin 110°C sebesar 13.36%.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Model sistem siklus rankine organik aspen plus V.11 mampu memberikan informasi kinerja. Sistem siklus rankine organik menggunakan fluida kerja R245fa dengan variasi temperatur masuk turbin range 70-110°C menghasilkan nilai kerja pompa sebesar 7 kW, kalor masuk evaporator dari 2491.2 hingga 2967.9 kJ/s,

kalor buang kondensor dari 2235.7 hingga 2669.3 kJ/s, serta daya turbin uap tertinggi sebesar 304 kW. Pada kondisi yang sama, sistem siklus rankine organik aspen plus V.11 menggunakan fluida kerja R1234ze menghasilkan nilai kerja pompa sebesar 2 kW, kalor masuk evaporator dari 2334.9 hingga 2791.2 kJ/s, kalor buang kondensor dari 2021.2 hingga 2431.5 kJ/s, serta daya turbin tertinggi-nya sebesar 360 kW.

2. Analisis model sistem siklus rankine organik aspen plus menunjukkan penggunaan fluida kerja R1234ze mampu memberikan kinerja yang lebih baik, serta efisiensi sistem tertinggi terletak pada saat temperatur masuk turbin sebesar 110°C dengan nilai efisiensi 13.36%

Untuk percobaan atau pengujian selanjutnya, penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Perancangan sistem lebih detail mengenai spesifikasi dan kapasitas komponen perlu dilakukan agar desain sistem ORC bisa dijadikan acuan pada pembangunan pembangkit siklus rankine organik.
2. Perhitungan *heatsource* sebaiknya dilakukan agar bisa menyesuaikan kondisi sumber panas yang mumpuni untuk sistem siklus rankine organik.
3. Kajian ekonomi perlu dilakukan sebagai pertimbangan pemilihan fluida kerja karena banyak variasi-nya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Widyasanti, D. N. Maulfia, and D. Rohdiana, "ANALISIS PERFORMA FLUIDA KERJA PADA MODEL ORGANIC RANKIE CYCLE (ORC) DENGAN SUMBER PANAS ENERGI BIOMASSA," *J. Tek. Pertan. Lampung*, vol. 8, no. 4, pp. 256–264, 2019, [Online]. Available: http://jurnal.fp.unila.ac.id/index.php/JTP/article/download/3350/pdf_1
- [2] Y. Sirodz Gaos, M. Juarsa, E. Marzuki, and M. Yulianto, "Pemilihan Fluida Kerja pada Pengembangan Organic Rankine Cycle Selection Working Fluids in the Organic Rankine Cycle Development".
- [3] W. S., Masheiti, B., Agnew, and S., "An Evaluation of R134a and R245fa as the Working Fluid in an Organic Rankine Cycle Energized from a Low Temperature Geothermal Energy Source," *J. Energy Power Eng.*, vol. 5, pp. 392–402, 2011.
- [4] S. E. Perangin-angin and S. Hutaeruk, "Perbandingan Performansi Sistem ORC Dengan Varian R-216CA, R-112a, R-141b dan n-Pentane Menggunakan Aspen HYSYS," *Sprocket J. Mech.*

- Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 42–48, 2021, doi: 10.36655/sproket.v2i2.526.
- [5] U. G. Mada, "Analisis Siklus Rankine Organik Memanfaatkan Tenaga Surya Dengan Kolektor Tipe Tabung Vakum," pp. 1–15, 2002.
- [6] Ignatius Riyadi Mardiyanto, Dinny Niaty, and Ika Yuliani, "Konsep Desain Pembangkit Listrik Tenaga Uap Memanfaatkan Sumber Panas Bertemperatur Rendah Dengan Memakai Siklus Rankine Organik," *J. Tek. Energi*, vol. 2, no. 1, pp. 137–141, 2020, doi: 10.35313/energi.v2i1.1784.
- [7] A. N. Salim and A. A. Melkias, "Desain Model Siklus Rankine Organik Dengan Recuperator," *Pros. Ind. Res. Work. ...*, pp. 4–5, 2021, [Online]. Available: <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/2738/2130>