

## Studi Pengaruh Temperatur Kondensasi Terhadap Kinerja Siklus Rankine Organik Menggunakan Fluida Kerja R245FA Dan R515A

Jefrianto Lobo<sup>1</sup>, Matheus M. Dwinanto<sup>1</sup>, Nurhayati<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana  
Jl. Adi Sucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001, Tlp: (0380)881597  
E-mail: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

### ABSTRAK

Sejak tahun 2000 pembangkit listrik dengan siklus Rankine organik (*organic Rankine cycle/ORC*) adalah yang paling banyak digunakan di dunia yang memanfaatkan sumber kalor bertemperatur rendah seperti limbah kalor industri, biomassa, geothermal, dan energi surya. Fluida kerja untuk sistem ORC harus memenuhi beberapa kriteria sifat fisik diantaranya, ramah lingkungan, tidak mudah terbakar, tidak beracun, dan tidak korosif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur kondensasi terhadap kinerja termodinamika siklus Rankine organik standar berdaya turbin 20 kW dengan fluida kerja R245fa, dan R515A. Simulasi kinerja sistem menggunakan perangkat lunak Genetron Properties dengan temperatur evaporasi dipertahankan konstan pada 80°C dan temperatur kondensasi divariasikan pada 30 – 40°C. Hasil studi ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur kondensasi sangat berdampak pada meningkatnya konsumsi daya pemompaan tetapi menurunkan rasio tekanan di turbin, dan efisiensi termal sistem. Daya pemompaan yang digunakan untuk mensirkulasikan R515A ±2,2 kali lebih tinggi dibandingkan mensirkulasikan. Efisiensi termal sistem ORC yang menggunakan kedua fluida kerja yang ditinjau tidak memiliki perbedaan yang signifikan.

### ABSTRACT

*Since 2000 power plants with the organic Rankine cycle (ORC) are the most widely used in the world that utilize low-temperature heat sources such as industrial heat waste, biomass, geothermal and solar energy. The working fluid for the ORC system must meet several criteria of physical properties including, environmentally friendly, non-flammable, non-toxic, and non-corrosive. Therefore, this study aims to analyze the effect of condensation temperature on the thermodynamic performance of a standard organic Rankine cycle with turbine power of 20 kW with working fluids R245FA, and R515A. Simulation of system performance using Genetron Properties software with evaporation temperature held constant at 80°C and condensation temperature varied at 30 – 40°C. The results of this study indicate that increasing the condensing temperature greatly increases the pumping power consumption but decreases the pressure ratio in the turbine, and the thermal efficiency of the system. The pumping power used to circulate the R515A is ±2.2 times higher than that of circulating it. The thermal efficiency of the ORC system that uses the two working fluids reviewed does not have a significant difference.*

*Keywords: Condensation, organic Rankine cycle, performance, R245FA, R515A*

### PENDAHULUAN

Di era modern ini, listrik telah menjadi kebutuhan dasar sehingga sangat diperlukan dalam kehidupan masyarakat dan pertumbuhan ekonomi suatu daerah sehingga dapat meningkatkan taraf hidup masyarakatnya. Namun, pada kenyataannya sampai dengan saat ini masih banyak masyarakat di pelosok-pelosok desa di Propinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) yang belum menikmati listrik yang disediakan oleh

pemerintah karena adanya keterbatasan yang dimiliki oleh PLN. Hal ini dikuatkan oleh data PLN Unit Induk Wilayah NTT bulan Juni 2020 yaitu rasio elektrifikasi Propinsi NTT 86,81% [1].

Permintaan akan kebutuhan listrik sebagian besar ditutupi oleh pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil, seperti PLTD yang menggunakan solar dan PLTU yang menggunakan batubara. Penggunaan bahan bakar fosil ini akan menyebabkan masalah lingkungan yang

serius, seperti pemanasan global dan polusi udara. Oleh karena itu, diperlukan teknologi konversi energi baru yang lebih ramah lingkungan, dan sejak tahun 2000 pembangkit listrik siklus Rankine organik (*organic Rankine cycle/ORC*) adalah yang paling banyak digunakan di dunia. Sistem ini menggunakan fluida kerja dari komponen organik yang memiliki temperatur evaporasi yang lebih rendah daripada air sehingga memungkinkan pembangkitan daya dari sumber kalor bertemperatur rendah diterapkan pada temperatur masuk turbin dibawah 80°C [2, 3].

Sampai dengan saat ini, telah banyak fluida kerja yang telah dikaji penggunaannya sebagai fluida kerja sistem ORC baik itu secara teoritis, numerik, dan eksperimental. Namun, secara eksperimental diputuskan untuk menggunakan fluida kerja R245fa, karena tidak mudah terbakar dan tidak beracun. Menurut analisis, R245fa adalah salah satu fluida kerja terbaik dalam hal efisiensi. Analisis teoritis untuk fluida R245fa telah menunjukkan bahwa koefisien efisiensi energi total untuk seluruh sistem berada pada level 4,72%, sementara hasil eksperimen, mencapai tingkat efisiensi 2,51% [4]. Fluida kerja untuk sistem ORC harus memenuhi beberapa kriteria sifat fisik diantaranya, ramah lingkungan, tidak mudah terbakar, tidak beracun, dan tidak korosif [5].

Pengaruh temperatur kondensasi juga telah diteliti dengan menggunakan fluida kerja zeotropik. Hasil studi ini menunjukkan bahwa temperatur kondensasi yang lebih tinggi menyebabkan kehilangan kalor yang besar di sumbu kalor dan penghancuran eksergi di kondensor. Hanya ada satu fraksi mol fluida kerja optimal yang memaksimalkan efisiensi termal, efisiensi eksergi, dan keluaran daya bersih ketika kenaikan temperatur air pendingin lebih besar daripada temperatur kondensasi [6]. Studi temperatur evaporasi dan kondensasi terhadap kinerja sistem ORC juga telah diteliti di mana hasilnya menunjukkan bahwa terdapat sepasang temperatur evaporasi dan temperatur kondensasi yang optimal untuk

memaksimalkan kinerja sistem. Keluaran daya bersih dan kinerja sistem mencapai nilai tertinggi pada temperatur evaporasi yang sama, tetapi kinerja sistem sesuai dengan temperatur kondensasi yang lebih rendah daripada keluaran daya bersih [7].

Pengaruh temperatur kondensasi R245FA, R600a, R1234YF, dan R1234ZE terhadap kinerja sistem ORC juga telah dikaji. Hasil studi ini menunjukkan bahwa fluida kerja hidrokarbon dan hidrofluoroolefin yang dikaji memiliki efisiensi termal yang sama dengan R245FA. Di samping itu, hidrokarbon dan hidrofluoroolefin lebih ramah lingkungan dibandingkan R245FA sehingga penggunaannya pada masa yang akan datang lebih dianjurkan, walaupun memiliki sifat lebih mudah terbakar [8]. Dengan memperhatikan beberapa kriteria tersebut, maka dipilih R245fa dan R515A sebagai fluida kerja sistem ORC standar yang akan dianalisis secara termodinamika dalam penelitian ini.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Genetron Properties versi 1.4. yang dapat mensimulasikan kinerja termodinamika sistem ORC standar. Analisa termodinamika sistem ORC terdiri dari penerapan keseimbangan massa dan energi untuk setiap proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Keempat komponen yang terkait dengan ORC (pompa, generator uap, turbin, dan kondensor) diasumsikan adalah perangkat dengan aliran stedi, dan dengan demikian keempat proses yang membentuk ORC dapat dianalisis sebagai [9, 10]:

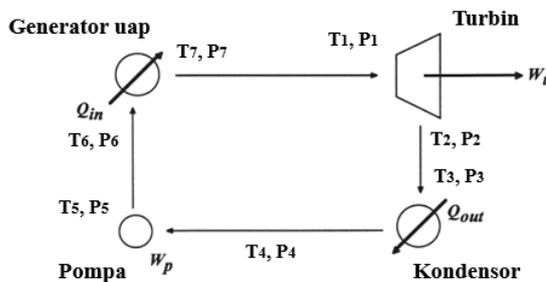
$$(Q_{in} - Q_{out}) + (W_p - W_t) = \dot{m}_r (h_{out} - h_{in}) \quad (1)$$

Generator uap dan kondensor tidak melibatkan kerja apapun, dan pompa serta turbin dianggap isentropik maka hubungan

kekekalan energi untuk setiap komponen dapat dinyatakan sebagai berikut:

- a. Daya pemompaan fluida kerja menuju sisi masuk generator uap adalah :

$$W_p = \frac{\dot{m}_r (h_5 - h_4)}{\eta_p} \quad (2)$$



Gambar 1. Diagram skematik ORC

- b. Dalam generator uap, kalor ditambahkan ke fluida kerja cair sehingga fasenya berubah menjadi gas maka kalor yang Nilai kalor yang dibutuhkan adalah :

$$Q_{in} = \dot{m}_r (h_7 - h_6) \quad (3)$$

- c. Proses ekspansi fluida kerja dalam bentuk gas dari tekanan tinggi menuju tekanan kondensasi menghasilkan daya turbin maka daya keluaran tersebut dihitung dengan persamaan:

$$W_t = \dot{m}_r \cdot \eta_t \cdot (h_1 - h_2) \quad (4)$$

- d. Di kondensator sejumlah kalor tertentu dibuang ke udara lingkungan, dan kalor yang dilepaskan tersebut dihitung dengan persamaan:

$$Q_{out} = \dot{m}_r (h_3 - h_4) \quad (5)$$

- e. Efisiensi termal sistem ORC dihitung dengan persamaan:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{(W_t - W_p)}{Q_{in}} \quad (6)$$

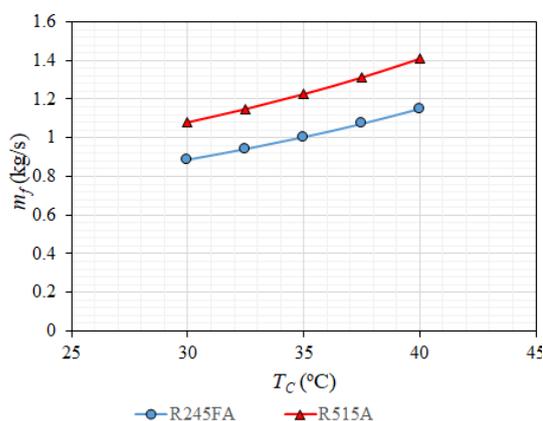
Beberapa parameter dan asumsi dalam studi ini disajikan pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Parameter-Parameter Penelitian

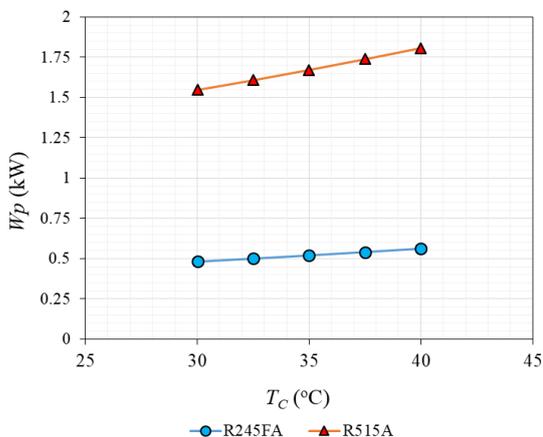
Parameter	Satuan	Nilai
Keluaran daya turbin	kW	20
Temperatur evaporasi	°C	70 – 80
Temperatur kondensasi	°C	30 – 40
Temperatur masuk kondensator	°C	45
Temperatur masuk turbin	°C	86,85
Efisiensi isentropik turbin	-	0,8
Efisiensi isentropik pompa	-	0,85

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 menyajikan pengaruh temperatur kondensasi terhadap laju aliran massa fluida kerja R245FA dan R515A dalam sistem ORC dengan temperatur evaporasi dipertahankan konstan 80°C. Terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur kondensasi mengakibatkan peningkatan laju aliran massa fluida kerja dalam sistem, begitupun sebaliknya. Laju aliran massa R515A lebih tinggi ±22,55% dibandingkan dengan R245FA. Hal ini disebabkan oleh densitas R515A dua kali lebih tinggi dibandingkan densitas R245FA. Densitas yang lebih rendah akan mengakibatkan laju aliran volume yang lebih tinggi sehingga berdampak pada peningkatan ukuran penukar kalor (kondensator dan generator uap) untuk membatasi penurunan tekanan yang terjadi sehingga dapat dipastikan bahwa ukuran generator uap dan kondensator untuk sistem ORC yang menggunakan R515A akan lebih kecil dibandingkan dengan sistem ORC yang menggunakan R245FA.



Gambar 2. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap laju aliran massa fluida kerja

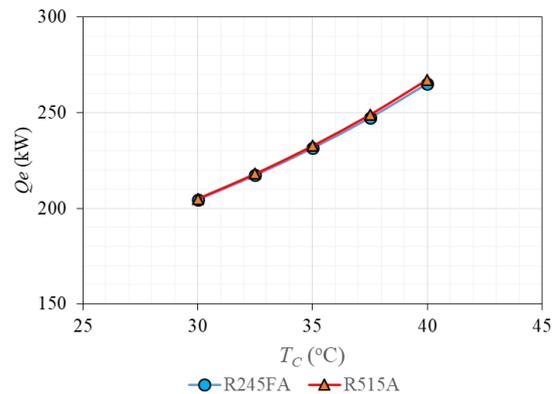


Gambar 3. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap konsumsi daya pemompaan

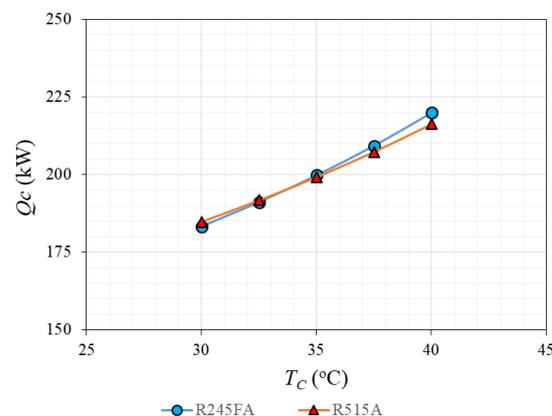
Peningkatan temperatur kondensasi akan berdampak pada konsumsi daya pemompaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Dari gambar ini terlihat bahwa daya pemompaan yang digunakan untuk mensirkulasikan R515A jauh lebih tinggi dibandingkan dengan R245FA ( $\pm 2,2$  kali lebih tinggi dibandingkan mensirkulasikan R245FA).

Penurunan temperatur kondensasi akan mengakibatkan kalor yang diserap oleh generator uap juga akan menurun, begitupun sebaliknya. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 4 dan ini terjadi untuk kedua fluida kerja yang ditinjau, di mana besar kalor yang

diserap oleh kedua fluida kerja tidak memiliki perbedaan yang signifikan.



Gambar 4. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap penyerapan kalor di generator uap

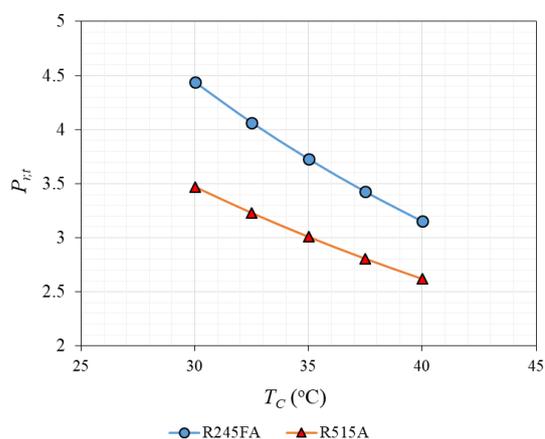


Gambar 5. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap pelepasan kalor di kondensor

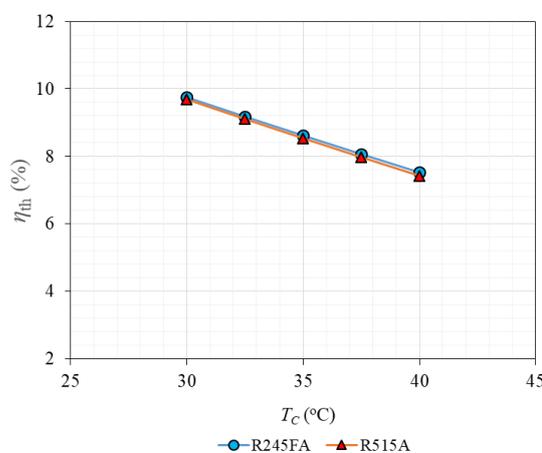
Gambar 5 menyajikan hubungan antara temperatur kondensasi terhadap pelepasan kalor di kondensor. Nilai pelepasan kalor diperlukan untuk merancang kondensor, dan menghitung besarnya aliran fluida pendingin kondensor (misalnya air yang digunakan oleh *cooling tower*). Terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur kondensasi maka pelepasan kalor di kondensor akan meningkat, begitupun sebaliknya. Pelepasan kalor untuk sistem ORC yang menggunakan kedua fluida kerja tersebut tidak memiliki perbedaan yang

signifikan. Hal ini disebabkan tekanan kondensasi kedua fluida kerja saat berubah fase dari gas menjadi cairan tidak jauh berbeda pada berbagai tingkat keadaan.

Meningkatnya temperatur kondensasi akan berdampak pada rasio tekanan di turbin, dan hal ini ditunjukkan pada Gambar 6 di mana meningkatnya temperatur kondensasi maka rasio tekanan di turbin akan menurun, begitupun sebaliknya. Sistem ORC yang menggunakan R245fa memiliki rasio tekanan di turbin lebih tinggi  $\pm 20,3\%$  dibandingkan dengan R515A.



Gambar 6. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap rasio tekanan di turbin



Gambar 7. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap efisiensi termal sistem

Dikarenakan tidak adanya perbedaan yang signifikan akibat perubahan temperatur kondensasi terhadap penyerapan kalor di boiler dan pelepasan kalor di kondensor maka efisiensi termal sistem ORC yang menggunakan kedua fluida kerja yang ditinjau juga tidak memiliki perbedaan yang signifikan, dan hal ini ditunjukkan pada Gambar 7. Namun, peningkatan temperatur kondensasi akan mengakibatkan penurunan efisiensi termal sistem, begitupun sebaliknya.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi maka disimpulkan bahwa peningkatan temperatur kondensasi sangat berdampak pada meningkatnya konsumsi daya pemompaan tetapi menurunkan rasio tekanan di turbin, dan efisiensi termal sistem. Daya pemompaan yang digunakan untuk mensirkulasikan R515A lebih tinggi dibandingkan mensirkulasikan R245FA. Namun, efisiensi termal sistem ORC yang menggunakan kedua fluida kerja yang ditinjau tidak memiliki perbedaan yang signifikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. <http://www.nttonlinenow.com/new-2016/2020/07/15/rasio-elektifikasi-provinsi-ntt-sampai-juni-2020-capai-8681/> (diakses Sabtu, 19 Desember 2020)
- [2]. Velez, F., Segovia, J. J., Martin, M. C., Antolin, G., Chejne, F., & Quijano, A., 2021, "A Technical, Economical and Market Review of Organic Rankine Cycles for the Conversion of Low-Grade Heat for Power Generation", *Renewable and Sustainable Energy Rivew*, Vol. 16, 4175 – 4189.
- [3]. Quoilin, S., *et al.*, 2013, "Techno-Economic Survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, 168 – 186.

- [4]. Kajurek, J., *et al.*, 2019, "Selection of Refrigerants for a Modified Organic Rankine Cycle", *Energy*, Vol. 168, 1 – 8.
- [5]. Datla, B. V., & Brasz, J. J., 2014, "Comparing R1233zd and R245fa for Low Temperature ORC Applications", *Proceeding of 15<sup>th</sup> International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2546, 1 – 7.
- [6]. Liu, Q., Duan, Y., & Yang, Z., 2014, "Effect of Condensation Temperature Glide on the Performance of Organic Rankine Cycle with Zeotropic Mixture Working Fluids." *Applied Energy*, Vol. 115, 394 – 404.
- [7]. Hua, Y., Nan, M., & Tai-lu, L., 2019, "Coupling Effect of Evaporation and Condensation Processes of Organic Rankine Cycle for Geothermal Power Generation Improvement." *Journal of Central South University*, Vol. 26, 3372 – 3387.
- [8]. Dwinanto, M. M., Bunganaen, W., Nurhayati, Gusnawati, Tobe, A. Y., & Tarigan, B. V., 2021, "Pengaruh Temperatur Kondensasi terhadap Kinerja Siklus Rankine Organik yang Menggunakan R245FA, R600a, R1234YF, dan R1234ZE." *ROTASI*, Vol. 23, No. 4, 28 – 34.
- [9]. Kong, R., Deethayat, T., Asanakham, A., Vorayos, N., & Kiatsiriroat, T., 2019, "Thermodynamic Performance Analysis of a R245fa Organic Rankine Cycle (ORC) with Different Kinds of Heat Sources at Evaporator", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 13, 1 – 10.
- [10]. Cengel, Y. A., & Boles, M. A., 2015, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, Eighth Edition, McGraw-Hill Education, New York.