

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

Matheus M. Dwinanto<sup>1\*</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana  
Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001, Tlp. (0380)881597

\*Corresponding author: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

### ABSTRAK

Dewasa ini banyak pembangkit listrik dengan siklus Rankine organik (*organic Rankine cycle/ORC*) telah banyak digunakan di dunia karena dapat 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 evaporasi terhadap kinerja energi siklus Rankine organik standar berdaya turbin 20 kW dengan fluida kerja R245fa, dan R515A. Simulasi sistem menggunakan perangkat lunak Genetron Properties dengan temperatur kondensasi dipertahankan konstan pada 40°C dan temperatur evaporasi divariasikan pada 70 – 80°C. Hasil studi ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur evaporasi akan sangat berdampak pada meningkatnya konsumsi daya pemompaan tetapi menurunkan rasio tekanan di turbin, dan efisiensi termal sistem. Daya pemompaan yang digunakan untuk mensirkulasikan R515A  $\pm 2,2$  kali lebih tinggi dibandingkan dengan mensirkulasikan R245FA tetapi efisiensi termalnya lebih tinggi  $\pm 9,75\%$ .

### ABSTRACT

*Nowadays, many power plants with the organic Rankine cycle (ORC) have been widely used in the world because they can utilize low temperature heat sources such as industrial waste heat, biomass, geothermal and solar energy. The working fluid for the ORC system must meet several physical property criteria including, environmentally friendly, non-flammable, non-toxic, and non-corrosive. Therefore, this study aims to analyze the effect of evaporation temperature on the energy performance of a standard organic Rankine cycle with a turbine power of 20 kW with working fluids R245fa and R515A. System simulation using Genetron Properties software with the condensation temperature maintained constant at 40oC and the evaporation temperature varied at 70 – 80oC. The results of this study show that increasing the evaporation temperature will greatly increase pumping power consumption but reduce the pressure ratio in the turbine and the thermal efficiency of the system. The pumping power used to circulate R515A is  $\pm 2.2$  times higher than circulating R245FA but the thermal efficiency is  $\pm 9.75\%$  higher.*

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

### PENDAHULUAN

Listrik telah menjadi kebutuhan dasar sehingga sangat diperlukan dalam kehidupan masyarakat dan pertumbuhan ekonomi suatu daerah karena 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 sumur kalor dan penghancuran eksergi di kondensator. 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].

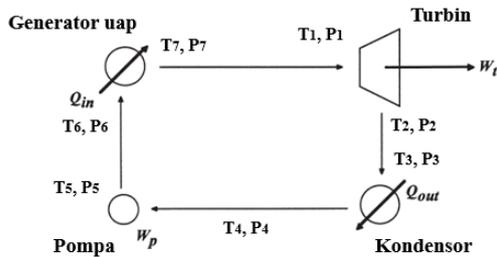
Pengaruh temperatur kondensasi R245FA, R515A, dan R1234ZE terhadap kinerja sistem ORC juga telah dikaji. Hasil studi ini menunjukkan bahwa fluida kerja R1234ZE memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan R245FA dan R515A. Namun, daya pemompaan yang digunakan untuk mensirkulasikan R515A dan R1234ZE lebih besar dibandingkan dengan menyirkulasikan R245FA. Di samping itu, R1234ZE 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]:

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



Gambar 1. Diagram skematik ORC

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 :

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

- 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 kondensor 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 1 sebagai berikut :

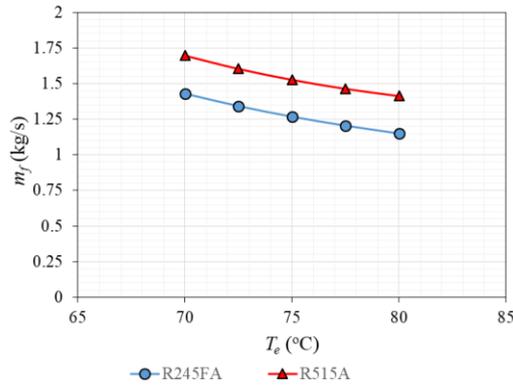
Tabel 1. Parameter-parameter penelitian.

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

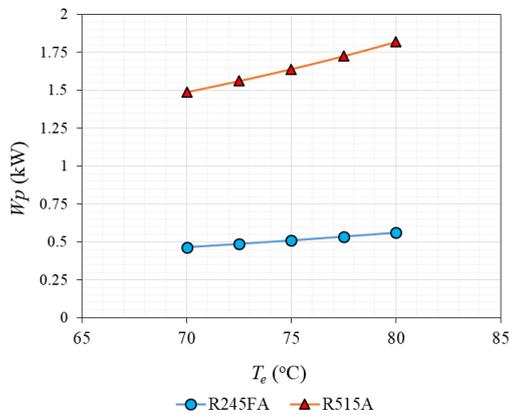
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 menyajikan pengaruh temperatur evaporasi terhadap laju aliran massa fluida kerja R245FA dan R515A dalam sistem ORC dengan temperatur kondensasi dipertahankan konstan pada 40°C. Terlihat bahwa meningkatnya temperatur evaporasi mengakibatkan penurunan laju aliran massa fluida kerja dalam sistem, begitupun sebaliknya. Laju aliran massa R515A lebih besar ±22,75% dibandingkan dengan R245FA. Hal ini disebabkan oleh densitas R245FA pada setiap tingkat keadaan lebih rendah dibandingkan dengan R515A. Densitas fluida kerja yang lebih rendah akan mengakibatkan laju aliran volume fluida

tersebut yang lebih tinggi sehingga berdampak pada peningkatan ukuran penukar kalor (kondensor dan boiler) untuk membatasi penurunan tekanan.



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

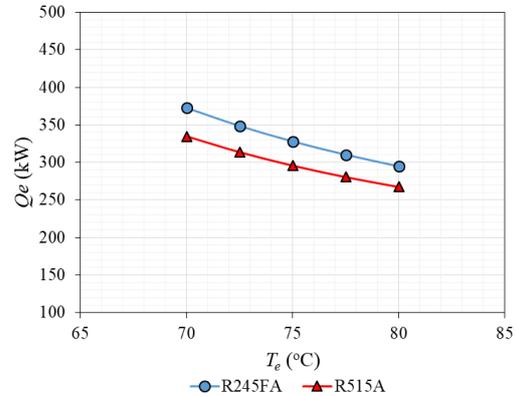


Gambar 3. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap konsumsi daya pemompaan

Peningkatan temperatur evaporasi akan sangat berdampak pada konsumsi daya pemompaan seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Daya pemompaan untuk mensirkulasikan R515A jauh lebih besar daripada R245FA ( $\pm 2,2$  kali lebih besar dibandingkan dengan mensirkulasikan R245FA), dan dengan meningkatnya temperatur evaporasi maka daya pemompaan yang dibutuhkan juga akan meningkat, begitupun sebaliknya.

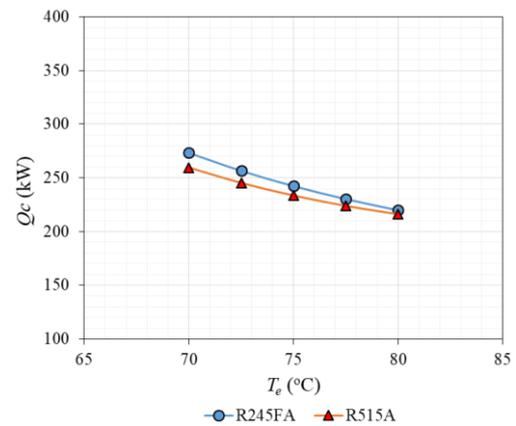
Selama proses evaporasi berlangsung, peningkatan temperatur evaporasi akan mengakibatkan kalor yang diserap oleh boiler akan menurun, begitupun sebaliknya.

Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 4, di mana ini terjadi untuk R245FA dan R515A, dan besar kalor yang diserap oleh R245FA lebih tinggi  $\pm 10,32\%$  dibandingkan bila menggunakan R515A.



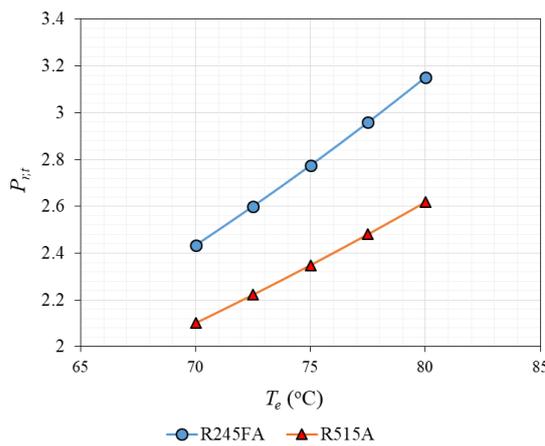
Gambar 4. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap penyerapan kalor di generator uap

Gambar 5 menyajikan hubungan antara temperatur evaporasi terhadap pelepasan kalor di kondensor. Nilai pelepasan kalor diperlukan untuk merancang kondensor, dan menghitung besarnya aliran fluida pendingin kondensor. Terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur evaporasi maka pelepasan kalor di kondensor akan menurun, begitupun sebaliknya. Pelepasan kalor di kondensor untuk sistem ORC yang menggunakan R245FA akan lebih tinggi rata-rata  $\pm 3,47\%$  dibandingkan dengan penggunaan R515A.

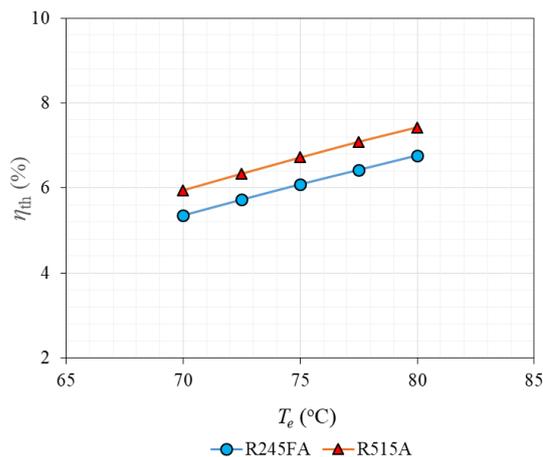


Gambar 5. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap pelepasan kalor di kondensor

Perubahan temperatur evaporasi akan berdampak pada rasio tekanan di turbin, dan hal ini ditunjukkan pada Gambar 6 di mana meningkatnya temperatur evaporasi maka rasio tekanan di turbin juga akan meningkat, begitupun sebaliknya. Sistem ORC yang menggunakan R245FA memiliki rasio tekanan lebih tinggi  $\pm 20,36\%$  dibandingkan dengan penggunaan R515A.



Gambar 6. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap rasio tekanan di turbin



Gambar 7. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap efisiensi termal sistem

Untuk kasus temperatur kondensasi dipertahankan konstan dan temperatur evaporasi divariasikan terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur evaporasi maka

efisiensi termal sistem ORC juga akan meningkat. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 7 dan pada gambar ini juga terlihat bahwa sistem ORC yang menggunakan R515A efisiensi termalnya lebih tinggi  $\pm 9,75\%$  dibandingkan dengan penggunaan R245FA.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi pengaruh temperatur evaporasi di sistem ORC yang menggunakan fluida kerja R245FA dan R515A menggunakan perangkat lunak Genetron Properties maka diambil kesimpulan bahwa peningkatan temperatur evaporasi akan sangat berdampak pada meningkatnya konsumsi daya pemompaan, meningkatkan rasio tekanan di turbin, dan efisiensi termal sistem. Daya pemompaan untuk mensirkulasikan R515A  $\pm 2,2$  kali lebih besar dibandingkan dengan mensirkulasikan R245FA tetapi sistem ORC yang menggunakan R515A efisiensi termalnya lebih tinggi  $\pm 9,75\%$  dibandingkan dengan penggunaan R245FA.

## 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]. Etu, M. R. V. T., Dwinanto, M. M., & Pah, J. C. A., 2022, "Studi Pengaruh Suhu Kondensasi R245FA, R515A, dan R1234ZE terhadap Kinerja Siklus Rankine Organik" *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, Vol. 17, No. 2, 158 – 163.
- [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.