

Studi Simulasi Pengaruh Temperatur Evaporasi Terhadap Kinerja Energi Siklus Rankine Organik dengan Fluida Kerja R245FA, R515A, dan R1233ZD

Matheus M. Dwinanto^{1*}, Rima Nindia Selan², Elshaday Y. Pala¹

¹) Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana

²) Program Studi Tenun Ikat, 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

Dewasa ini, siklus Rankine organik telah menjadi salah satu solusi alternatif pembangkit listrik ramah lingkungan karena dapat menggunakan sumber kalor bertemperatur rendah atau sumber kalor berdaya rendah. Namun, penggunaan fluida kerja organik yang lebih ramah lingkungan sebagai pengganti R245FA telah menjadi tuntutan pada masa yang akan datang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh temperatur evaporasi terhadap kinerja energi siklus Rankine organik standar dengan fluida kerja R245FA, R515A, dan R1233ZD. Kinerja termodinamika didasarkan pada variasi temperatur evaporator menggunakan perangkat lunak Genetron Properties. Besaran-besaran penting yang dianalisis adalah laju aliran massa, daya pemompaan, penyerapan kalor, pelepasan kalor, rasio tekanan turbin, dan efisiensi termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur evaporasi sangat berdampak pada peningkatan konsumsi daya pemompaan, rasio tekanan di turbin, dan efisiensi termal sistem. Namun, dibutuhkan daya pemompaan yang lebih besar untuk mensirkulasikan R515A dibandingkan dengan mensirkulasikan R245FA dan R1233ZD. Sistem ORC yang menggunakan R1233ZD memiliki efisiensi termal tertinggi dibandingkan R245FA dan R515A sehingga pada masa yang akan datang fluida kerja tersebut sangat cocok untuk menggantikan R245FA.

ABSTRACT

Nowadays, the organic Rankine cycle has become an alternative solution for environmentally friendly electricity generation because it can use low-grade heat sources or low-power heat sources. However, the use of more environmentally friendly organic working fluids as a replacement for R245FA has become a demand in the future. Therefore, this study aims to analyze the effect of evaporation temperature on the energy performance of a standard organic Rankine cycle with working fluids R245FA, R515A, and R1233ZD. Thermodynamic performance is based on evaporator temperature variations using Genetron Properties software. The important quantities analyzed are mass flow rate, pumping power, heat absorption, heat release, turbine pressure ratio, and thermal efficiency. The research results show that increasing the evaporation temperature has a significant impact on increasing pumping power consumption, pressure ratio in the turbine, and system thermal efficiency. However, greater pumping power is required to circulate R515A compared to circulating R245FA and R1233ZD. The ORC system that uses R1233ZD has the highest thermal efficiency compared to R245FA and R515A so that in the future this working fluid is very suitable to replace R245FA.

Keywords: Organic Rankine cycle, thermal efficiency, evaporation temperature, R245FA, R515A, R1233ZD

PENDAHULUAN

Perkembangan industri, dan meningkatnya jumlah kendaraan di jalan serta peralatan rumah tangga yang mengkonsumsi energi listrik telah menyebabkan bertambahnya permintaan energi listrik. Permintaan ini sebagian besar ditutupi oleh

konsumsi besar bahan bakar fosil, yang menyebabkan banyak masalah lingkungan yang serius, seperti pemanasan global atau polusi udara. Oleh karena itu, diperlukan teknologi konversi energi baru untuk memastikan produksi listrik tanpa menghasilkan polusi lingkungan. Salah satu langkah yang sedang dilakukan pemerintah

adalah meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan sampai dengan 17% pada tahun 2025 (Perpres No. 5, 2006) [1].

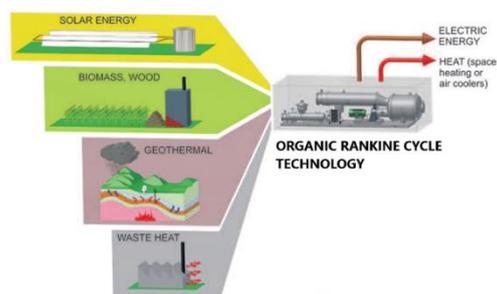
Sejumlah penting solusi baru telah diusulkan untuk menghasilkan listrik dari sumber kalor alternatif, seperti sumber kalor bertemperatur rendah (*low-grade*) atau sumber kalor berdaya rendah. Di antara solusi yang diusulkan, sistem siklus Rankine organik (*organic Rankine cycle/ORC*) adalah yang paling banyak digunakan di dunia. Sistem ini melibatkan komponen yang sama seperti pembangkit listrik daya uap konvensional (*boiler*, alat ekspansi penghasil kerja (turbin), kondensor, dan pompa). Namun, fluida kerjanya adalah komponen organik yang ditandai dengan temperatur pembakaran lebih rendah daripada air sehingga memungkinkan pembangkitan daya dari sumber kalor bertemperatur rendah tersebut diterapkan pada temperatur masuk turbin dibawah 80°C sedangkan air harus diatas 100°C [2].

Pemanfaatan ORC, selain mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang tidak terbarukan dan terbatas, dapat juga mengurangi emisi karbon sehingga kualitas lingkungan lebih baik, dan kompetitif secara ekonomi [3]. Sampai dengan saat ini, telah banyak refrigeran yang telah dikaji penggunaannya sebagai fluida kerja sistem ORC baik itu secara teoritis, numerik, dan eksperimental. Namun, secara eksperimental diputuskan untuk menggunakan refrigeran R245FA, karena tidak mudah terbakar dan tidak beracun. Menurut analisis, R245FA adalah salah satu refrigeran 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]. Dengan memperhatikan beberapa kriteria tersebut, maka dipilih R245FA, R515A, dan R1233ZD sebagai fluida kerja sistem ORC standar yang akan dianalisis secara

termodinamika dalam penelitian ini. Hal inilah yang mendorong dilakukan penelitian ini guna menganalisis pengaruh temperatur evaporasi terhadap kinerja energi siklus Rankine organik standar yang digunakan untuk pembangkit listrik skala kecil dengan fluida kerja R245FA, R515A, dan R1233ZD berbasis perangkat lunak Genetron Properties versi 1.4.

Siklus Rankine organik (*Organic Rankine Cycle/ORC*) merupakan teknologi yang sudah dikenal sejak awal 1980-an. Sejumlah besar pembangkit listrik ORC telah dibangun, terutama sumber kalor biomassa, energi surya, panas bumi (geotermal), dan pemanfaatan kembali limbah kalor (Gambar 1). Teknologi ini menunjukkan sejumlah keunggulan dibandingkan siklus uap Rankine standar yang membuatnya lebih menguntungkan untuk pembangkit listrik dengan daya keluaran listrik dibatasi (biasanya lebih rendah dari 1 MW), walaupun efisiensinya jauh lebih rendah. Quoilin, dkk., meninjau secara tekno-ekonomi berbagai sistem ORC yang telah diaplikasikan untuk pembangkit daya dengan sumber kalor berasal dari biomassa, geotermal, energi surya, dan pemulihan limbah kalor. Dalam makalah ini juga disajikan secara lengkap aspek teknologi beberapa fluida kerja yang telah diaplikasikan untuk ORC pembangkit listrik, pengembangan komponen-komponen dan sistem ORC, sistem ORC generasi akan datang, dan aspek-aspek ekonomi seperti proses manufaktur serta pemasarannya [3].



Gambar 1. Sumber-sumber kalor untuk sistem ORC.

Sampai dengan saat ini, telah banyak refrigeran yang dikaji penggunaannya sebagai fluida kerja sistem ORC baik itu secara

teoritis, numerik, maupun eksperimental. Namun, secara eksperimental diputuskan untuk menggunakan refrigeran R245FA, karena tidak mudah terbakar dan tidak beracun. Menurut analisis, R245FA adalah salah satu refrigeran 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].

Aplikasi ORC standar bertemperatur rendah dengan daya turbin 75 kW juga telah dilakukan untuk mengkaji kemungkinan penggantian R245FA dengan R1233ZD yang lebih ramah lingkungan di masa yang akan datang. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan R1233ZD menghasilkan efisiensi siklus 8,7% dan ini lebih tinggi dibandingkan dengan R245FA. R1233ZD dapat digunakan dalam sistem ORC berbasis R245FA yang ada dengan sedikit atau tanpa modifikasi [5].

Refrigeran R245FA yang umum digunakan sebagai fluida kerja sistem ORC dalam waktu dekat akan dihapus karena memiliki dampak pemanasan global yang signifikan terhadap perubahan iklim (GWP = 1050) sehingga penggunaan R1233ZD dengan GWP sangat rendah (GWP = 1) diusulkan sebagai pengganti fluida kerja di sistem ORC. Sebuah studi eksperimen dan optimasi sistem ORC dilakukan untuk membandingkan penggunaan kedua refrigeran tersebut. Hasil yang diperoleh menunjukkan R1233ZD merupakan alternatif yang sesuai sebagai pengganti R245FA. Efisiensi termal maksimum siklus yang menggunakan R1233ZD lebih tinggi 3,4% dan daya listrik keluaran maksimum lebih tinggi 4,5% dibandingkan dengan penggunaan R245FA [6].

Studi eksperimen penggunaan tiga refrigeran HFO yaitu R1234ZE, R1233ZD, dan R1336MZZ sebagai pengganti R245FA juga telah dilakukan untuk menganalisis kinerja sistem ORC berskala mikro. Hasilnya efisiensi termal siklus maksimum untuk R245FA adalah 4,6% sementara R1233ZD, R1234ZE, dan R1336MZZ masing-

masingnya 4,7%, 4,5% dan 3,1%. Daya keluaran bersih maksimum, R245FA menghasilkan 11,4% dan 3,1% lebih besar daripada R1233ZD, dan R1234ZE [7].

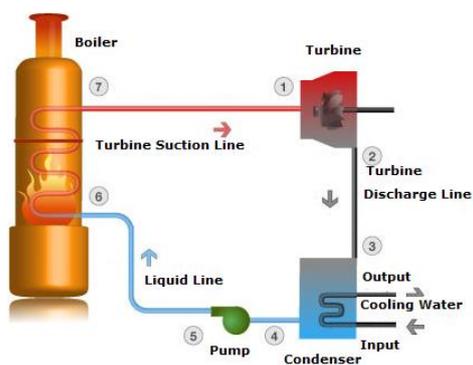
Penggunaan R1233ZD dan R1224YD juga telah diteliti secara eksperimen untuk menganalisis kinerja sistem dalam hubungannya sebagai pengganti R245FA. Sebagai kesimpulan studi ini dinyatakan, bahwa R1233ZD dan R1224YD cocok untuk pengganti R245FA dalam sistem ORC. Namun, kompatibilitas R1233ZD dengan polimer khas yang diselidiki lebih buruk dibandingkan dengan R245FA dan R1224YD sehingga perlu dilakukan penyelidikan kompatibilitas individu ketika R1233ZD harus diterapkan. Mengenai kinerja sistem, daya keluaran tertinggi masih diperoleh ketika menggunakan R245FA. Daya keluaran maksimum R245FA adalah 326 W yaitu 9% lebih tinggi dibandingkan dengan R1233ZD, dan 12% lebih tinggi dibandingkan dengan R1224YD. Dalam hal efisiensi termal sistem ORC, R1233ZD mengarah ke nilai sekitar 2% lebih tinggi dibandingkan dengan R245FA. Berbeda dengan itu, efisiensi termal R245FA dan R1224YD sama pada berbagai kondisi operasi [8].

Perangkat lunak Genetron Properties telah digunakan oleh beberapa peneliti baik itu di dalam negeri maupun di luar negeri diantaranya, analisis kinerja mesin pendingin kompresi uap menggunakan FE36 sebagai alternatif pengganti R22 [9], dan pada tahun yang sama digunakan oleh untuk menganalisis perbandingan kinerja pengkondisian udara kompresi uap menggunakan R438A dan campuran R32/R125/R600a sebagai pengganti R22 [10]. Pada tahun 2018 perangkat lunak ini digunakan untuk membandingkan kinerja aktual dan simulasi di mesin pendingin kompresi uap yang menggunakan R22 [11]. Pada tahun 2019, Genetron Properties digunakan untuk menganalisis kinerja mesin pendingin kompresi uap menggunakan HFC-236fa sebagai alternatif pengganti R22 [12].

METODE PENELITIAN

Studi simulasi ini menggunakan Genetron Propeties versi 1.4, di mana perangkat lunak ini dapat menyimulasikan dengan baik kinerja termodinamika sistem ORC standar menggunakan fluida kerja ramah lingkungan untuk penggunaan pada masa yang akan datang. Genetron Propeties merupakan perangkat lunak berbasis *graphic user interface* yang dikembangkan oleh anggota tim pemodelan di Laboratorium Penelitian Buffalo – Honeywell International, Inc. Semua perhitungan *properties* fluida kerja didasarkan pada database NIST (Refprop 9.1) yang dihubungkan dengan simulasi siklus [13, 14].

Analisa termodinamika sistem ORC terdiri dari penerapan keseimbangan massa dan energi untuk setiap proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Keempat komponen yang terkait dengan ORC (pompa, boiler, turbin, dan kondensor) adalah perangkat dengan aliran stedi, dan dengan demikian keempat proses yang membentuk ORC dapat dianalisis sebagai proses aliran stedi yang dapat dinyatakan sebagai [15, 16]:



Gambar 2. Diagram skematik siklus Rankine organik standar

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

Boiler 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 yang dibutuhkan untuk memompa fluida kerja cair hasil kondensasi menuju sisi masuk boiler dihitung dengan persamaan:

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

- b. Dalam boiler, kalor ditambahkan ke fluida kerja cair sehingga fasenya berubah menjadi gas. Nilai kalor yang dibutuhkan oleh boiler dihitung dengan persamaan:

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

- 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 :

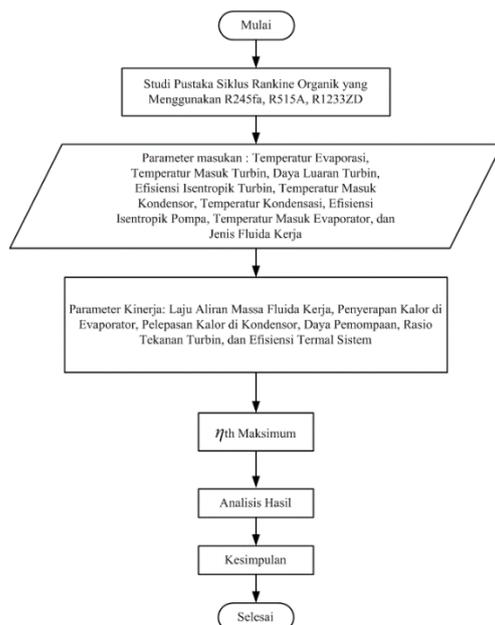
Tabel 2. Parameter-parameter penelitian

Parameter	Satuan	Nilai
Keluaran daya turbin	kW	20
Temperatur evaporasi	°C	70 – 80
Temperatur kondensasi	°C	40
Temperatur masuk kondensor	°C	50
Temperatur masuk turbin	°C	86,85
Efisiensi isentropik turbin	-	0,8
Efisiensi isentropik pompa	-	0,85

Analisis data dilakukan terhadap hasil simulasi berupa parameter-parameter kinerja sebagai hasil variasi temperatur evaporasi di sistem ORC. Simulasi ini menghasilkan beberapa besaran terpenting sistem ORC, diantaranya:

- Laju aliran massa fluida kerja.
- Masukan kalor generator uap.
- Pelepasan kalor di kondensor.
- Rasio tekanan turbin.
- Daya pemompaan.
- Efisiensi termal sistem ORC.

Selanjutnya dibuat grafik hubungan temperatur kondensasi dan evaporasi terhadap nilai besaran-besaran tersebut. Dari grafik-grafik yang terbentuk selanjutnya dilakukan analisis dan pembahasan. Kesimpulan dibuat berdasarkan tujuan penelitian, dan hasil analisis yang telah dilakukan. Adapun langkah-langkah penelitian ini disajikan dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.

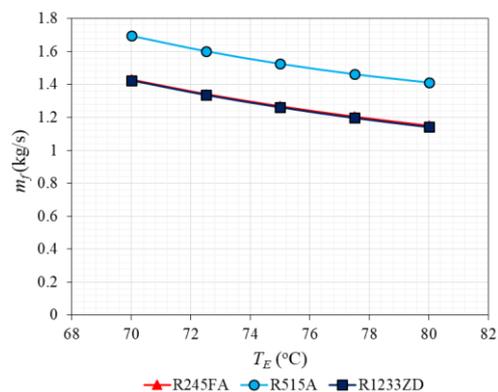


Gambar 3. Diagram alir penelitian

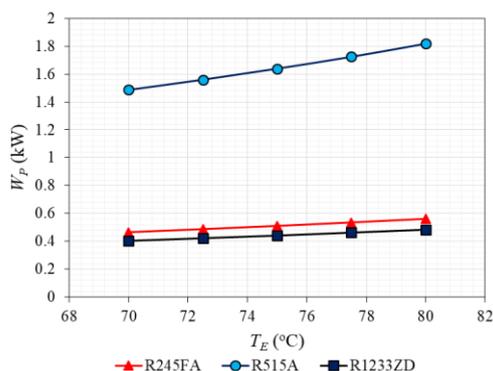
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4 menyajikan pengaruh variasi temperatur evaporasi terhadap laju aliran massa ketiga fluida kerja 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, dan dari ketiga fluida kerja yang ditinjau terlihat bahwa penggunaan laju aliran massa R515A dalam sistem ORC lebih tinggi $\pm 22,76\%$ dibandingkan dengan penggunaan R245FA dan R1233ZD. Laju aliran massa R245FA dan R1233ZD tidak memiliki perbedaan yang signifikan atau dapat dikatakan sama besar.

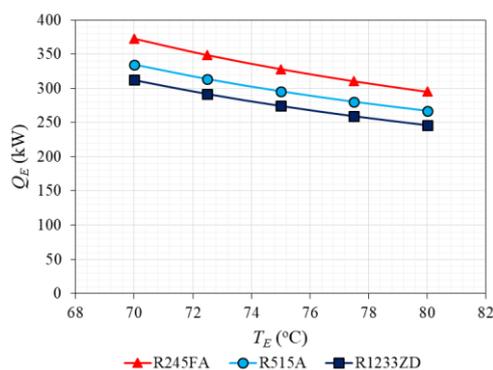
Peningkatan temperatur evaporasi akan sangat berdampak pada konsumsi daya pemompaan seperti ditunjukkan pada Gambar 5, dimana meningkatnya temperatur evaporasi akan meningkatkan daya pemompaan yang dibutuhkan, begitupun sebaliknya. Sama seperti pengaruh temperatur kondensasi daya pemompaan yang digunakan untuk mensirkulasikan R515A lebih besar dibandingkan kedua fluida kerja, yaitu masing-masingnya $\pm 3,21$ kali lebih besar dan $\pm 3,73$ kali lebih besar dibandingkan mensirkulasikan R245FA dan R1233ZD.



Gambar 4. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap laju aliran massa



Gambar 5. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap daya pemompaan

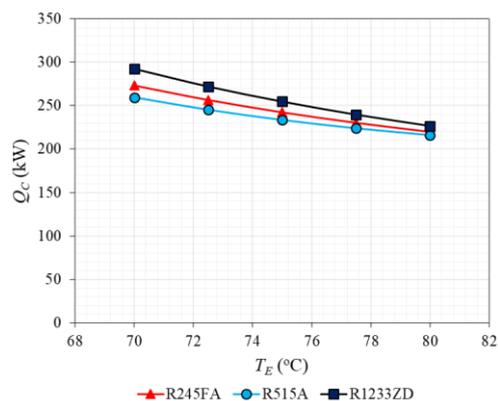


Gambar 6. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap penyerapan kalor di generator uap

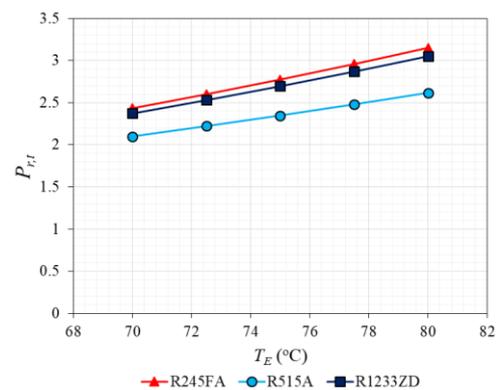
Selama proses evaporasi berlangsung, peningkatan temperatur evaporasi akan mengakibatkan kalor yang diserap oleh boiler akan menurun, begitupun sebaliknya. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 6 dimana ini terjadi untuk ketiga fluida kerja yang ditinjau, dan besar kalor yang diserap oleh R245FA lebih tinggi $\pm 10,32\%$ dibandingkan bila menggunakan R515A dan lebih tinggi $\pm 19,8\%$ dibandingkan penggunaan R1233ZD.

Gambar 7 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 R1233ZD akan lebih tinggi $\pm 3,08\%$ dibandingkan dengan penggunaan R245FA, dan lebih tinggi $\pm 4,83\%$ dibandingkan dengan R515A.



Gambar 7. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap pelepasan kalor di kondensor

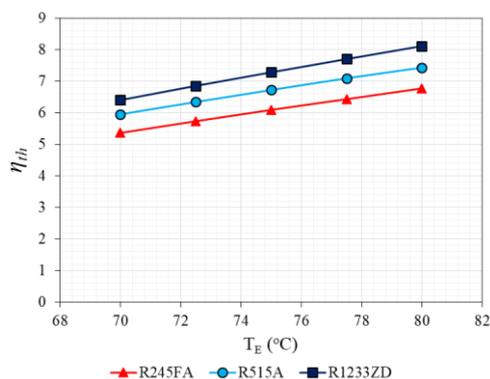


Gambar 8. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap rasio tekanan di turbin

Perubahan temperatur evaporasi akan berdampak pada rasio tekanan di turbin, dan hal ini ditunjukkan pada Gambar 8 di mana meningkatnya temperatur evaporasi maka rasio tekanan di turbin juga akan meningkat, begitupun sebaliknya. Sistem ORC yang menggunakan R245FA memiliki rasio tekanan di turbin lebih tinggi $\pm 3,28\%$ dibandingkan dengan penggunaan R1233ZD, dan lebih tinggi $\pm 20,36\%$ dibandingkan dengan R515A.

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 9 dan pada gambar ini terlihat bahwa sistem ORC yang menggunakan R1233ZD memiliki efisiensi termal lebih tinggi $\pm 9,15\%$ dibandingkan dengan penggunaan R515A dan lebih tinggi $\pm 19,79\%$ dibandingkan dengan penggunaan R245FA.



Gambar 9. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap efisiensi termal

KESIMPULAN

- Berdasarkan hasil analisis kinerja energi yang dilakukan maka disimpulkan bahwa peningkatan temperatur evaporasi sangat berdampak pada peningkatan konsumsi daya pemompaan, rasio tekanan di turbin, dan efisiensi termal sistem. Dibutuhkan daya pemompaan yang lebih besar untuk mensirkulasikan R515A dibandingkan dengan mensirkulasikan R245FA dan R1233ZD. Sistem ORC yang menggunakan R1233ZD memiliki efisiensi termal tertinggi dibandingkan R245FA dan R515A sehingga pada masa yang akan datang fluida kerja tersebut sangat cocok untuk menggantikan R245FA.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 Tentang Kebijakan Energi Nasional.
- [2]. Bachtiyar, C., dan Ambarita, H., 2010, Identifikasi dan Analisa Refrigeran sebagai Fluida Kerja Siklus Rankine Organik untuk Aplikasi di Indonesia, *Jurnal Riset Industri*, Volume IV, Nomor 2, hal. 19 – 28.
- [3]. Yamamoto, T., et al., 2001, Design and Testing of the Organic Rankine Cycle, *Energy*, Volume 26, pp. 239–251.
- [4]. Quoilin, S., et al., 2013, Techno-Economic Survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 22, pp. 168 – 186.
- [5]. Kajurek, J., et al., 2019, Selection of Refrigerants for a Modified Organic Rankine Cycle, *Energy*, Volume 168, pp. 1 – 8.
- [6]. Datla, B. V., and Brasz, J. J., 2014, Comparing R1233zd and R245fa for Low Temperature ORC Applications, *Proceeding of 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2546, pp. 1 – 7.
- [7]. Yang, J., Sun, Z., Yu, B., and Chen, J., 2018, Experimental Comparison and Optimization Guidance of R1233zd(E) as a Drop-in Replacement to R245fa for Organic Rankine Cycle Application, *Applied Thermal Engineering*, Volume 141, pp. 10 – 19.
- [8]. Yang, J., Ye, Z., Yu, B., Ouyang, H., and Chen, J., 2019, Simultaneous Experimental Comparison of Low-GWP Refrigerants as Drop-In Replacements to R245fa for Organic Rankine Cycle Application: R1234ze(Z), R1233zd(E), and R1336mzz(E), *Energy*, Volume 173, pp. 721 – 731.
- [9]. Eyerer, S., Dawo, F., Kaindl, J., Wieland, C., and Spliethoff, H., 2019, Experimental investigation of modern ORC working fluids R1224yd(Z) and

- R1233zd(E) as replacements for R245fa, *Applied Energy*, Volume 240, pp. 946 – 963.
- [10]. Majanasastra, R. B. S., 2015, Analisis Kinerja Mesin Pendingin Kompresi Uap Menggunakan FE-36 Sebagai Alternatif Pengganti R-22, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Volume 3, Nomor 1, hal. 1 – 15.
- [11]. Kalla, S. K., Arora, B. B., and Usmani, J. A., 2015, Comparative Performance of R438A and R32/R125/R600A Mixture for Replacing HCFC22 used in Air-Conditioners, *International Journal of Engineering Research and Technology*, Volume 4, Issue 8, pp. 692 – 696.
- [12]. Ramadan, H., dan Cappenberg, A. D., 2018, Uji Prestasi Refrigeran R22 pada Mesin Pendingin Kompresi Uap dengan Metode Pengujian Aktual dan Simulasi, *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, Edisi II, hal. 74 – 81.
- [13]. Sukarman, Shieddiqie, A. D., Rahardja, I. B., Ramadhan, A. I., and Handoyo, Y., 2019, “Energy Analysis of Vapor Compression Refrigeration (VCR) System”, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(9): 1285 – 1289.
- [14]. <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/genetron-properties-suite/>
- [15]. Cengel, Y. A., and Boles, M. A., 2015, “Thermodynamics: An Engineering Approach”, Eighth Edition, McGraw-Hill Education, New York.
- [16]. Kong, R., Deethayat, T., Asanakhm, A., Vorayos, N., and 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*, 13: 1 – 10.