

Pengaruh Temperatur Kondensasi terhadap Kinerja Siklus Rankine Organik yang Menggunakan R245fa, R600a, R1234yf, dan R1234ze

Matheus M. Dwinanto*, Wenseslaus Bunganaen, Nurhayati, Gusnawati, Adi Y. Tobe, Ben V. Tarigan

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

Jl. Adi Sucipto, Penfui, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur, 85001 Indonesia

*E-mail: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

Abstract

The organic Rankine cycle (ORC) is an unconventional technology and has been widely used to conversion of thermal energy at low temperatures into electrical energy on a small scale. For this reason, the use of more environmentally friendly hydrocarbons and hydrofluoroolefins has become a demand and a central issue in the future. This paper presents a performance study of using R600a, R1234yf and R1234ze as drop-in replacement to R245fa in an ORC system. The system performance is based on the variation of the condensation temperature using Genetron Properties software with the evaporation temperature being held constant. The important quantities analyzed are mass flow rate, pumping power, heat absorption, heat rejected, turbine outlet temperature, turbine outlet superheat temperature, turbine pressure ratio, and thermal efficiency. The results show that the condensation temperature is very influential on system performance. It is not easy to determine the optimal performance for each working fluid used in the system independently so that the cycle simulation approach with a thermodynamic model while comparing the three working fluids with R245fa is the most common way. The results of this study indicate that the studied hydrocarbons and hydrofluoroolefins working fluid candidates have the same thermal efficiency as R245fa.

Keywords: organic Rankine cycle, condensing temperature, efficiency, hydrocarbon, hydrofluoroolefin

Abstrak

Siklus Rankine organik (ORC) adalah teknologi yang tidak konvensional dan telah banyak digunakan untuk mengubah energi termal pada suhu rendah menjadi energi listrik dalam skala kecil. Untuk itu penggunaan hidrokarbon dan hidrofluoroolefin yang lebih ramah lingkungan telah menjadi tuntutan dan isu sentral pada masa yang akan datang. Makalah ini menyajikan studi kinerja penggunaan R600a, R1234yf, dan R1234ze sebagai pengganti R245fa di sistem ORC. Kinerja sistem didasarkan pada variasi temperatur kondensasi menggunakan perangkat lunak Genetron Properties dengan temperatur evaporasi dipertahankan konstan. Besaran-besaran penting yang dianalisis adalah laju aliran massa, daya pemompaan, penyerapan kalor, pelepasan kalor, temperatur keluar turbin, temperatur panas lanjut keluar turbin, rasio tekanan turbin, dan efisiensi termal. Hasilnya menunjukkan bahwa pada temperatur kondensasi sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem. Tidak mudah untuk menetapkan kinerja optimal untuk setiap fluida kerja yang digunakan dalam sistem secara bebas sehingga pendekatan simulasi siklus dengan model termodinamika sambil membandingkan ketiga fluida kerja dengan R245fa merupakan cara yang paling umum. Hasil studi ini menunjukkan bahwa kandidat fluida kerja hidrokarbon dan hidrofluoroolefin yang dikaji memiliki efisiensi termal yang sama dengan R245fa.

Kata kunci: siklus Rankine organik, temperatur kondensasi, efisiensi, hidrokarbon, hidrofluoroolefin

1. Pendahuluan

Sampai dengan saat ini, daerah-daerah pelosok dan pulau-pulau terluar di Propinsi Nusa Tenggara Timur masih mengandalkan PLTS dan atau generator diesel sebagai sumber listrik untuk penerangan dan peralatan elektronik lainnya [1-4]. Namun, pemenuhan kebutuhan listrik ini sangat bergantung pada cuaca dan distribusi bahan bakar diesel. Bila cuaca buruk dan distribusi bahan bakar diesel terhambat maka sudah dapat dipastikan listrik tidak dapat dihasilkan. Oleh karena itu, dibutuhkan siklus Rankine organik (ORC) yang dapat mengonversi energi termal bersuhu rendah dan menengah menjadi energi listrik berskala kecil sebagai pembangkit listrik tambahan dengan memanfaatkan potensi sumber energi lokal seperti biomassa, panas bumi, dan energi surya. Sistem ORC merupakan siklus Rankine yang menggunakan fluida kerja organik dan umumnya digunakan untuk pembangkit listrik berdaya dibawah 2 MW dengan fluida kerja yang paling banyak digunakan saat ini adalah R245fa [5]. Walaupun, fluida kerja ini tidak berpotensi merusak lapisan ozon tetapi masih memiliki potensi pemanasan global yang tinggi sehingga pada masa yang akan datang perlu untuk menggunakan fluida kerja dengan GWP sangat rendah, yaitu hidrokarbon dan hidrofluoroolefin. Di sisi lain, temperatur kondensasi juga sangat mempengaruhi kinerja termodinamika sistem ORC. Tabel 1 menyajikan sifat-sifat dan efek terhadap lingkungan dari R245fa, R600a, R1234yf, dan R1234ze.

Tabel 1. Sifat-sifat dan efek fluida kerja terhadap lingkungan [6,7]

Refrigeran	Grup	T_{crit} (°C)	NBT (°C)	P_{crit} (kPa)	Ozon Depleting Potential (ODP)	Global Warming Potential (GWP)	Tingkat Keamanan (ASHRAE)
R245fa	HFC	154,0	14,9	3651	0	1030	A1
R600a	HC	135	-12,2	3629	0	0	A3
R1234yf	HFO	94,7	-29,8	3382	0	4	A2L
R1234ze	HFO	109,4	-19,6	3634	0	6	A2L

Dewasa ini, penelitian akan penggunaan fluida kerja yang lebih ramah lingkungan di sistem ORC terus dilakukan guna menghadirkan sistem termal yang optimal, diantaranya optimasi desain empat konfigurasi ORC dengan dua puluh tujuh fluida kerja telah dilakukan dengan hasilnya menunjukkan bahwa perbedaan antara temperatur sumber kalor dan temperatur kritis memainkan peran penting dalam pemilihan fluida kerja [6]. Studi terhadap sistem ORC yang menggunakan R245fa, R1234ze, R600, dan R600a dengan memanfaatkan gas buang mesin diesel kapal laut juga telah dilakukan untuk mendapatkan kinerja termodinamika yang optimal. Hasilnya menunjukkan bahwa R1234ze memiliki efisiensi termal terbesar diikuti oleh R600a, R245fa, dan R600. Efisiensi termal maksimum sistem ORC yang menggunakan R1234ze lebih besar 2,2% dibandingkan dengan R600 [7]. Studi perbandingan kinerja sistem ORC yang menggunakan R245fa dan lima belas fluida kerja alternatif juga telah dilakukan di mana hasilnya menunjukkan bahwa dengan pemilihan fluida kerja yang sesuai maka tidak akan mengorbankan desain turbin dan pompa sehingga dapat digunakan dalam beberapa sistem ORC. Ini menawarkan peluang untuk meningkatkan skala ekonomi sistem ORC skala kecil saat ini sehingga pada akhirnya dapat mengarah pada sistem yang lebih ekonomis untuk pemanfaatan sumber kalor berkelanjutan suhu rendah [8]. Sebelas fluida kerja murni dari golongan alkane dan alkane terfluorinasi juga telah diteliti untuk mengoptimalkan kinerja termodinamika sistem ORC yang menggunakan sumber kalor laten. Hasilnya menunjukkan bahwa parameter siklus dan pemilihan fluida kerja adalah dua aspek utama yang harus dipertimbangkan untuk pembangkit ORC yang sebenarnya, dan kinerja sistem harus dioptimalkan berdasarkan tingkat temperatur sumber kalor dan sumur kalor [9].

Pengaruh temperatur kondensasi terhadap kinerja sistem ORC 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 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 [10]. Studi pasangan 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 [11]. Sebuah studi pengaruh temperatur kondensasi dua fluida kerja terhadap kinerja sistem ORC energi surya menunjukkan bahwa efisiensi termal dan jumlah listrik yang dihasilkan oleh sistem ORC tersebut dapat ditingkatkan dengan menurunkan temperatur kondensasi [12]. Makalah ini bertujuan untuk membahas analisis energi sistem ORC yang menggunakan fluida kerja dari golongan hidrofluorokarbon, hidrokarbon, dan hidrofluoroolefin.

2. Metode penelitian

Studi ini menggunakan perangkat lunak Genetron Properties versi 1.4 yang dapat mensimulasikan dengan baik kinerja termodinamika sistem ORC standar menggunakan fluida kerja ramah lingkungan untuk penggunaan pada masa yang akan datang. Genetron Properties 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 1. 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]:

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

Boiler dan kondensor tidak melibatkan kerja apapun, dan pompa serta turbin dianggap isentropik maka hubungan kekekalan energi untuk setiap komponen dapat dinyatakan sebagai berikut:

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

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

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

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

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

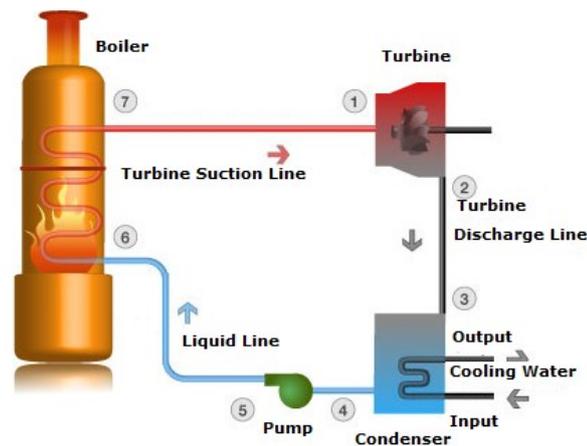
$$W_t = \dot{m}_r \cdot \eta_t \cdot (h_1 - h_2) \tag{4}$$

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

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

Kinerja sistem ORC biasanya dinyatakan dengan efisiensi termal, dan dihitung dengan persamaan:

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



Gambar 1. Diagram skematik siklus Rankine organik

Beberapa parameter dan asumsi dalam studi ini disajikan pada Tabel 2 yang dipilih berdasarkan rentang kerja dari sistem ORC yang telah digunakan sebagai pembangkit listrik berskala kecil.

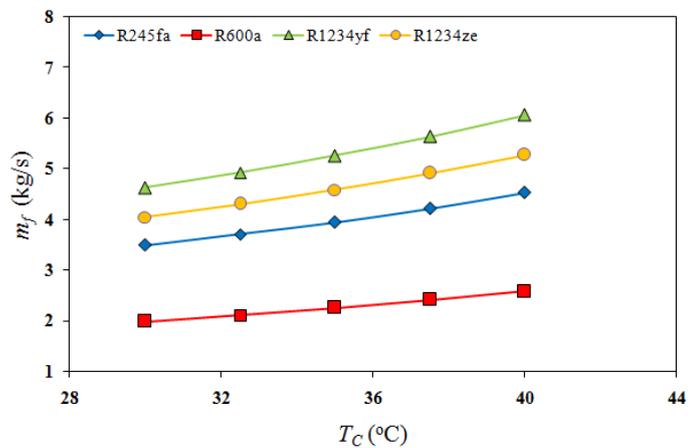
Tabel 2. Parameter penelitian dan asumsi

Parameter	Satuan	Nilai
Daya keluaran turbin	kW	80
Temperatur masuk turbin	°C	90
Temperatur kondensasi	°C	30 - 40
Temperatur masuk boiler	°C	28
Temperatur evaporasi di boiler	°C	80
Efisiensi isentropik turbin	-	0,8
Efisiensi isentropik pompa	-	0,75

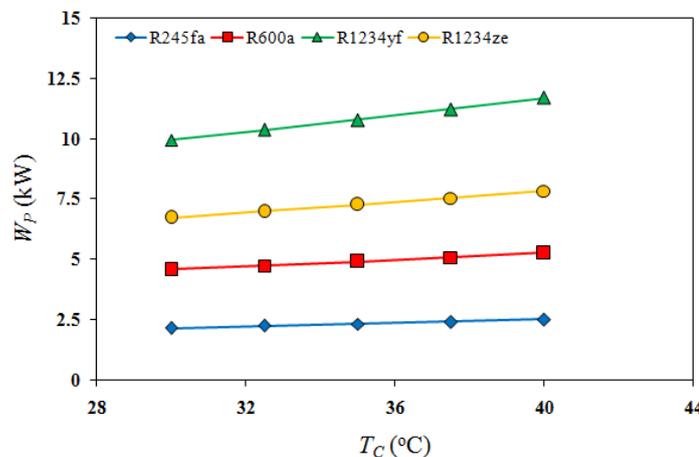
3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 2 menyajikan pengaruh temperatur kondensasi terhadap laju aliran massa keempat fluida kerja dalam sistem ORC dengan temperatur evaporasi dipertahankan konstan pada 80 °C. Terlihat bahwa meningkatnya temperatur kondensasi mengakibatkan peningkatan laju aliran massa fluida kerja dalam sistem, begitupun sebaliknya. Laju aliran massa R1234yf merupakan yang paling besar dibandingkan dengan ketiga fluida kerja lainnya, dan laju aliran massa R1234ze, R245fa, dan R660a masing-masingnya lebih rendah dari R1234yf yaitu ±13,03%; ±25,25% dan 57,42%. Hal ini disebabkan oleh densitas R1234ze, R245fa, dan R600a pada setiap tingkat keadaan lebih rendah dibandingkan dengan R1234yf. Namun, densitas yang rendah akan mengakibatkan laju aliran volume yang lebih tinggi sehingga berdampak pada peningkatan ukuran penukar kalor (kondensator dan boiler) untuk membatasi penurunan tekanan.

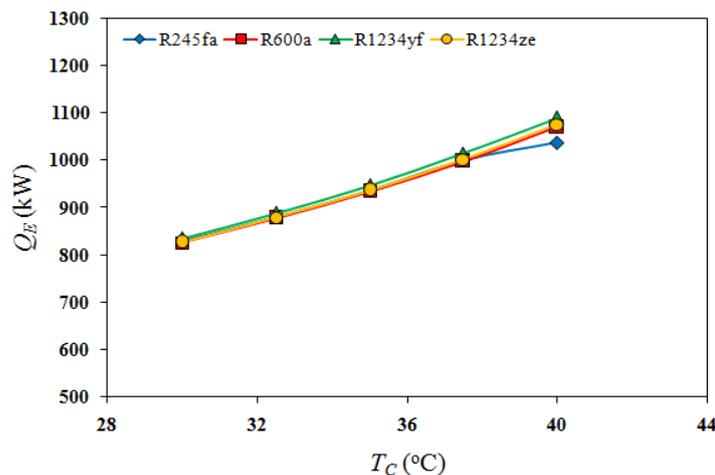
Peningkatan temperatur kondensasi akan sangat berdampak pada konsumsi daya pemompaan seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Walaupun laju aliran massa R245fa lebih tinggi daripada R600a tetapi daya pemompaan yang digunakan untuk mensirkulasikan R245fa dalam sistem ORC lebih rendah $\pm 52,33\%$ dibandingkan dengan R600a. Daya pemompaan untuk mensirkulasikan R1234yf jauh lebih besar dari ketiga fluida lainnya, dan dengan meningkatnya temperatur kondensasi maka daya pemompaan yang dibutuhkan juga akan meningkat, begitupun sebaliknya. Selama proses kondensasi berlangsung, penurunan temperatur kondensasi akan mengakibatkan kalor yang diserap oleh boiler juga akan menurun, begitupun sebaliknya. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 4 di mana ini terjadi untuk semua fluida kerja yang ditinjau, dan besar kalor yang diserap oleh keempat fluida kerja yang tidak memiliki perbedaan yang signifikan.



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

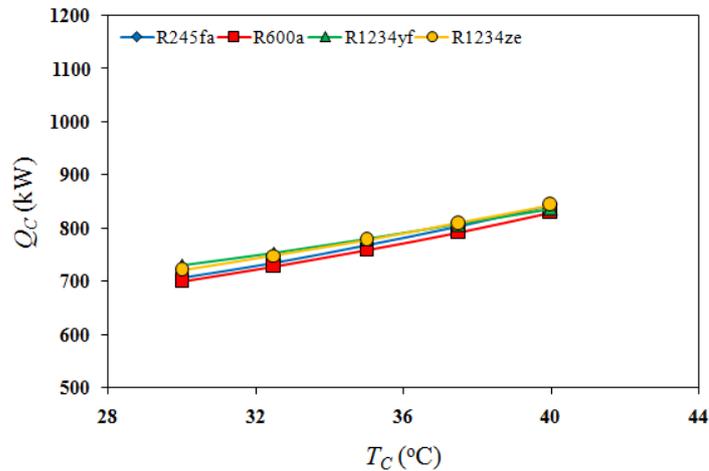


Gambar 3. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap konsumsi daya pemompaan



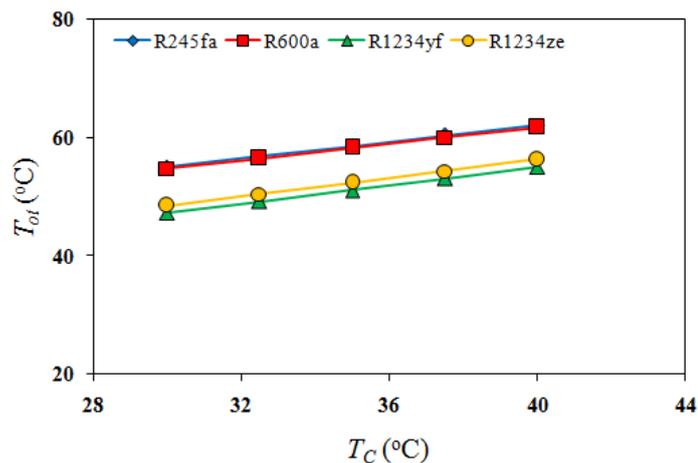
Gambar 4. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap penyerapan kalor di boiler

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. Terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur kondensasi maka pelepasan kalor di kondensor akan meningkat, begitupun sebaliknya. Pelepasan kalor untuk sistem ORC yang menggunakan keempat fluida kerja tersebut tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Hal ini disebabkan tekanan kondensasi keempat fluida kerja saat berubah fase dari gas menjadi cairan tidak jauh berbeda pada berbagai tingkat keadaan.



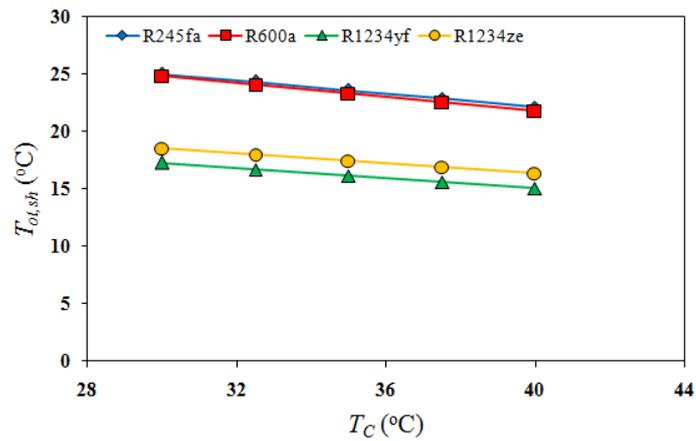
Gambar 5. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap pelepasan kalor di kondensor

Temperatur fluida kerja keluar turbin dan temperatur panas lanjutnya sangat dipengaruhi temperatur kondensasi di mana saat temperatur kondensasi meningkat maka temperatur fluida kerja keluar turbin juga akan meningkat. Temperatur keluar turbin R245fa dan R600a memiliki nilai yang sama besar, dan lebih tinggi $\pm 9,84\%$ dibandingkan dengan temperatur keluar turbin R1234yf dan R1234ze. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 6, dan pada gambar ini juga terlihat bahwa temperatur R1234yf dan R1234ze saat keluar turbin tidak memiliki perbedaan yang signifikan.

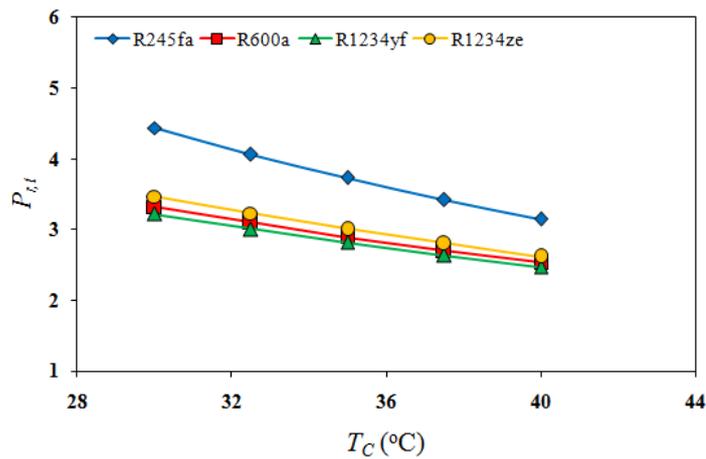


Gambar 6. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap temperatur keluar turbin

Gambar 7 menunjukkan temperatur panas lanjut fluida kerja saat keluar turbin. Pada gambar ini terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur kondensasi maka temperatur panas lanjut untuk keempat fluida kerja yang ditinjau mengalami penurunan, begitupun sebaliknya. Temperatur panas lanjut R245fa dan R600a saat keluar turbin memiliki nilai yang sama besar dan lebih tinggi $\pm 27,3\%$ dibandingkan dengan penggunaan R1234yf dan R1234ze.



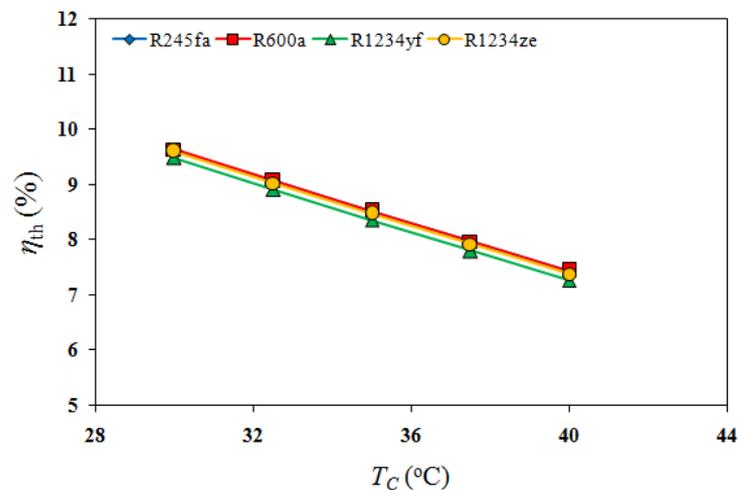
Gambar 7. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap temperatur panas lanjut keluar turbin



Gambar 8. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap rasio tekanan di turbin

Meningkatnya temperatur kondensasi akan berdampak pada rasio tekanan di turbin, dan hal ini ditunjukkan pada Gambar 8 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 $\pm 20,6\%$ dibandingkan dengan ketiga fluida kerja lainnya.

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 keempat fluida kerja yang ditinjau juga tidak memiliki perbedaan yang signifikan, dan hal ini ditunjukkan pada Gambar 9. Namun, peningkatan temperatur kondensasi akan mengakibatkan penurunan efisiensi termal sistem, begitupun sebaliknya.



Gambar 9. Pengaruh temperatur kondensasi terhadap efisiensi termal sistem.

4. Kesimpulan

Studi ini mengkaji kemungkinan penggunaan fluida kerja hidrokarbon dan hidrofluoroolefin di sistem ORC pada masa yang akan datang. Tidak mudah untuk menetapkan kinerja optimal untuk setiap fluida kerja yang digunakan dalam sistem secara bebas sehingga pendekatan simulasi siklus dengan model termodinamika sambil membandingkan ketiga fluida kerja dengan R245fa merupakan cara yang paling umum. Hasil studi ini menunjukkan bahwa kandidat 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.

Daftar Pustaka

- [1] Meilanova, D.R., 2021, "PLN Terangi Desa Terpencil NTT dengan SPEL dan APDAL", www.ekonomi.bisnis.com, diakses 8 Agustus 2021.
- [2] Utama, A., 2021, "Setengah Juta Rumah Tangga Indonesia Hidup Tanpa Listrik, Bisakah Energi Bersih Jadi Solusi?", www.bbc.com, diakses 8 Agustus 2021.
- [3] Amalo, P., 2021, "PLN Terus Menerangi Sabu Raijua", www.mediaindonesia.com, diakses 25 Agustus 2021.
- [4] Bere, S.G., 2021, "Warga di Pulau yang Berbatasan Laut dengan Australia Kini Menikmati Listrik 24 Jam" www.regional.kompas.com, diakses 25 Agustus 2021.
- [5] 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*, 16: 4175–4189.
- [6] Yang, M.H., Yeh, R.H., 2015, "Thermodynamic and Economic Performance Optimization of an Organic Rankine Cycle System Utilizing Exhaust Gas of a Large Marine Diesel Engine", *Applied Energy*, 149: 1–12.
- [7] Vivan, J., Manente, G., Lazzaretto, A., 2015, "A General Framework to Select Working Fluid and Configuration of ORCs for Low-to-Medium Temperature Heat Sources", *Applied Energy*, 156: 727–746.
- [8] Whit, M., Sayma, A.I., 2016, "Improving the Economic-of-Scale of Small Organic Rankine Cycle Systems through Appropriate Working Fluid Selection", *Applied Energy*, 183: 1227–1239.
- [9] Peng, X., Jian, L., Tai-lu, L., Jia-ling, Z., 2019, "Thermodynamic Optimization and Fluid Selection of Organic Rankine Cycle Driven by a Latent Heat Source", *Journal of Central South University*, 24: 2829–2841.
- [10] 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*, 115: 394–404.
- [11] 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*, 26: 3372–3387.
- [12] Stanciu, D.D., Saghebian, S.M., Kurchania, A., 2020, "The Influence of Condensing Temperature on the Efficiency of Solar Power System with ORC", *Procedia Manufacturing*, 46: 359–363.
- [13] Sukarman, Shieddiqie, A.D., Rahardja, I.B., Ramadhan, A.I., 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., Boles, M.A., 2015, "Thermodynamics: An Engineering Approach", Eighth Edition, McGraw-Hill Education, New York.
- [16] 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*, 13: 1–10.