

Studi pengaruh suhu kondensasi R245FA, R515A, dan R1234ZE terhadap kinerja siklus Rankine organik

Marianus R. V. T. Etu¹, Matheus M. Dwinanto², Jack Carol Adolf Pah¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana
Jl. Adi Sucipto, Penfui, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur 85001
Email korespondensi: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

Abstrak

Siklus Rankine organik telah digunakan sebagai pembangkit listrik yang memanfaatkan sumber kalor bersuhu rendah seperti biomassa, panas bumi, dan limbah kalor dari pembangkit listrik konvensional. Kajian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja energi siklus Rankine organik sebagai akibat perubahan suhu kondensasi menggunakan fluida kerja yang lebih ramah lingkungan sebagai pengganti R245FA, yaitu R515A dan R1234ZE. Kinerja sistem didasarkan pada variasi suhu kondensasi menggunakan perangkat lunak Genetron Properties dengan suhu evaporasi dipertahankan konstan. Besaran-besaran penting yang dianalisis adalah laju aliran massa, daya pemompaan, penyerapan kalor, rasio tekanan turbin, dan efisiensi termal. Hasil kajian ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu kondensasi sangat berdampak pada meningkatnya konsumsi daya pemompaan tetapi menurunkan rasio tekanan di turbin, dan efisiensi termal sistem. Daya pemompaan yang digunakan untuk menyirkulasikan R515A dan R1234ZE lebih besar dibandingkan dengan untuk menyirkulasikan R245FA, tetapi efisiensi termal sistem ORC yang menggunakan R1234ZE lebih besar dibandingkan R245FA dan R515A.

Kata kunci: siklus Rankine organik, kondensasi, kinerja, hidrofluoroolefin.

Abstract

The organic Rankine cycle has been used as a power plant that utilizes low temperature heat sources such as biomass, geothermal, and waste heat from conventional power plants. This study was conducted to analyze the energy performance of the organic Rankine cycle as a result of changes in condensation temperature using a more environmentally friendly working fluid as a substitute for R245FA, namely R515A and R1234ZE. 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, turbine pressure ratio, and thermal efficiency. 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 R515A and R1234ZE is greater than that of circulating R245FA, but the thermal efficiency of the ORC system using R1234ZE is greater than that of R245FA and R515A.

Keywords: organic Rankine cycle, condensation, performance, hydrofluoroolefin.

1. Pendahuluan

Pertumbuhan ekonomi di daerah-daerah pelosok Nusa Tenggara Timur telah menyebabkan bertambahnya permintaan energi listrik. Permintaan ini sebagian besar ditutupi oleh pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang menyebabkan pemanasan global dan polusi udara [1, 2]. Oleh karena itu, dibutuhkan teknologi konversi energi menggunakan sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan untuk menghasilkan listrik dari sumber kalor bersuhu rendah yaitu siklus Rankine organik (ORC). Fluida kerja organik yang digunakan dalam siklus ini memiliki titik didih yang jauh lebih rendah dibandingkan air, sehingga pemilihannya merupakan salah satu kunci utama kinerja dan pengembangan ORC [3].

Dewasa ini, telah banyak fluida kerja organik yang dikaji penggunaannya di sistem ORC, baik itu secara

teoritis, numerik, maupun eksperimental. Namun, secara eksperimental diputuskan untuk menggunakan R245FA, karena tidak mudah terbakar, tidak beracun, dan terbaik dalam hal efisiensi [4]. Aplikasi ORC standar bersuhu rendah dengan daya turbin 75 kW juga telah dilakukan untuk mengkaji kemungkinan penggantian R245FA dengan R1233ZD yang lebih ramah lingkungan pada 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].

R245FA yang telah 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

sistem ORC. Kajian berbasis eksperimen dan optimasi sistem ORC telah dilakukan oleh Yang, dkk [6] untuk membandingkan penggunaan kedua fluida kerja 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.

Penggunaan tiga fluida kerja dari golongan HFO yaitu R1234ZE, R1233ZD, dan R1336MZZ sebagai pengganti R245FA juga telah dilakukan oleh Yang, dkk [7] untuk menganalisis kinerja sistem ORC berskala mikro. Hasilnya menunjukkan bahwa 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.

R1233ZD dan R1224YD juga telah dikaji secara eksperimen oleh Eyerer, dkk [8] untuk menganalisis kinerja sistem sebagai pengganti R245FA. Hasilnya menunjukkan bahwa R1233ZD dan R1224YD cocok sebagai 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. 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, R1233ZD mengarah ke nilai sekitar 2% lebih tinggi dibandingkan dengan R245FA. Namun, efisiensi termal R245FA dan R1224YD sama pada berbagai kondisi operasi.

Kajian terhadap sistem ORC yang menggunakan R245FA, R1234ZE, R600, dan R600a dengan memanfaatkan gas buang mesin diesel kapal laut juga telah dilakukan oleh Vivan, dkk [9] 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. Kajian perbandingan kinerja sistem ORC yang menggunakan R245FA dan lima belas fluida kerja alternatif juga telah dilakukan oleh Whit dan Sayma [10], 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.

Pengaruh suhu kondensasi terhadap kinerja sistem ORC juga telah dikaji oleh Liu, dkk [11] dengan menggunakan fluida kerja zeotropik. Hasil kajian ini menunjukkan bahwa suhu 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 suhu air pendingin lebih besar daripada suhu kondensasi. Kajian suhu evaporasi dan kondensasi terhadap kinerja sistem ORC juga telah dikaji oleh Hua, dkk [12], di mana hasilnya menunjukkan bahwa terdapat sepasang suhu evaporasi dan suhu kondensasi yang optimal untuk memaksimalkan kinerja sistem. Keluaran daya bersih dan kinerja sistem mencapai nilai tertinggi pada suhu evaporasi yang sama, tetapi kinerja sistem sesuai dengan suhu kondensasi yang lebih rendah daripada keluaran daya bersih.

Sebuah kajian pengaruh suhu 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 suhu kondensasi [13]. Pengaruh suhu kondensasi R245FA, R600a, R1234YF, dan R1234ZE terhadap kinerja sistem ORC juga telah dikaji. 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 kajian 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 [14].

Sistem ORC merupakan siklus Rankine yang menggunakan fluida kerja organik dan umumnya digunakan untuk pembangkit listrik berdaya di bawah 2 MW dengan fluida kerja yang paling banyak digunakan saat ini adalah R245FA [15]. 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 rendah, yaitu hidrofluoroolefin atau campurannya. Di samping itu, suhu kondensasi juga sangat mempengaruhi kinerja termodinamika sistem ORC, sehingga kajian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suhu kondensasi R245FA, R515A (campuran 88% R1234ZE dan 12% R227EA), dan R1234ZE terhadap kinerja sistem ORC standar.

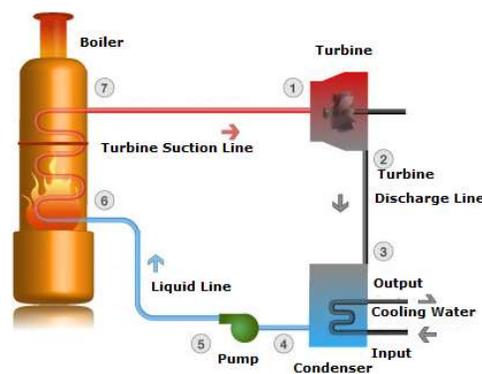
Tabel 1. Sifat-sifat termofisik, lingkungan dan keamanan dari R245FA, R515A.

Parameter	R245FA	R515A	R1234ZE
Suhu kritis T_{crit} (°C)	154,01	108,73	166,45
Tekanan kritis p_{crit} (kPa)	3651	3598,3	3623,7
Densitas kritis ρ_{crit} (kg/m ³)	516,08	499,84	480,22
Titik didih normal T_{boil} (°C)	15,14		18,26
Slope ds/dT	Positif	Positif	Positif
ODP	0	0	0
GWP ₁₀₀	858	403	5
ASHREA safety classification	B1	A1	A1

2. Metode

Kajian ini menggunakan perangkat lunak Genetron Properties versi 1.4 yang dapat menyimulasikan 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 [16, 17].

Analisis 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 *steady*, dan dengan demikian keempat proses yang membentuk ORC dapat dianalisis sebagai proses aliran *steady* yang dapat dinyatakan sebagai Persamaan 1 [18, 19].



Gambar 1. 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.

Daya yang dibutuhkan untuk memompa fluida kerja cair hasil kondensasi menuju sisi masuk *boiler* dihitung dengan Persamaan 2.

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

Dalam *boiler*, kalor ditambahkan ke fluida kerja cair, sehingga fasanya berubah menjadi gas. Nilai kalor yang dibutuhkan oleh *boiler* dihitung dengan Persamaan 3.

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

Proses ekspansi fluida kerja dalam bentuk gas dari tekanan tinggi menuju tekanan kondensasi menghasilkan daya turbin maka daya keluaran tersebut dihitung dengan Persamaan 4.

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

Di kondensor sejumlah kalor tertentu dibuang ke udara lingkungan, dan nilai kalor yang dilepaskan tersebut dihitung dengan Persamaan 5.

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

Kinerja sistem ORC biasanya dinyatakan dengan efisiensi termal, dan dihitung dengan Persamaan 6.

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

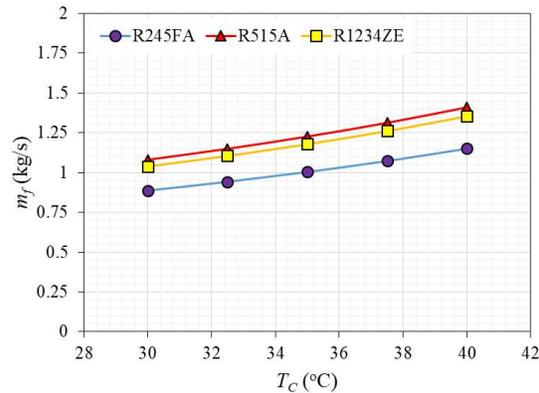
Beberapa parameter dan asumsi dalam kajian ini disajikan pada Tabel 2 yang dipilih berdasarkan rentang kerja dari sistem ORC yang telah digunakan sebagai pembangkit listrik berskala kecil.

Tabel 2. Parameter kajian dan asumsi.

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

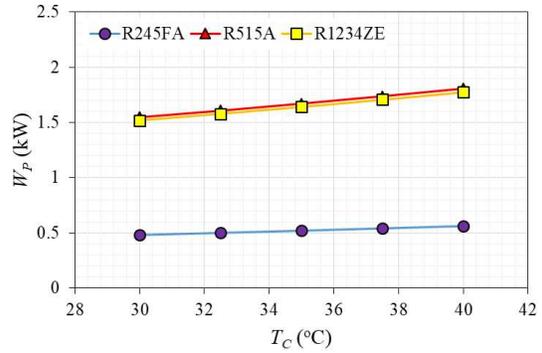
3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 2 menunjukkan pengaruh variasi suhu kondensasi terhadap laju aliran massa R245FA, R515A, dan R1234ZE dalam sistem ORC dengan suhu evaporasi dipertahankan konstan pada 80°C. Dapat dilihat bahwa meningkatnya suhu kondensasi mengakibatkan meningkatnya laju aliran massa fluida kerja dalam sistem, begitupun sebaliknya. Laju aliran massa R245FA adalah yang terendah dibandingkan dengan R515A dan R1233ZD, yaitu masing-masingnya lebih rendah ±17,40% dan ±15,01%. Bila dibandingkan laju aliran massa R515A dan R1234ZE, maka terdapat sedikit perbedaan di mana R515A lebih tinggi ±3,99% dibandingkan dengan penggunaan R1234ZE.



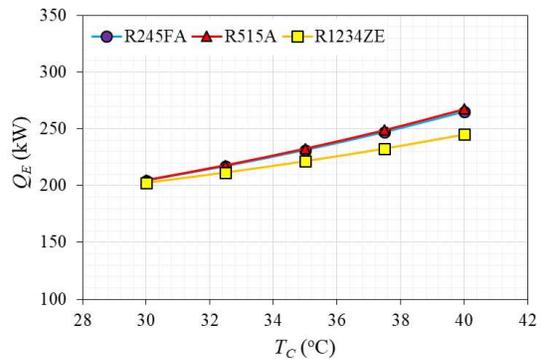
Gambar 2. Pengaruh suhu kondensasi terhadap laju aliran massa.

Meningkatnya suhu kondensasi dalam sistem ORC akan sangat berdampak pada konsumsi daya pemompaan, dan hal ini ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3, dapat dilihat bahwa daya pemompaan yang digunakan untuk menyirkulasikan R245FA jauh lebih rendah dibandingkan dengan R515A dan R1234ZE. Penggunaan R515A akan membutuhkan daya pemompaan ±3,21 kali lebih besar daripada R245FA sedangkan penggunaan R1234ZE akan membutuhkan daya pemompaan ±3,15 kali lebih besar dibandingkan mensirkulasikan R245FA.



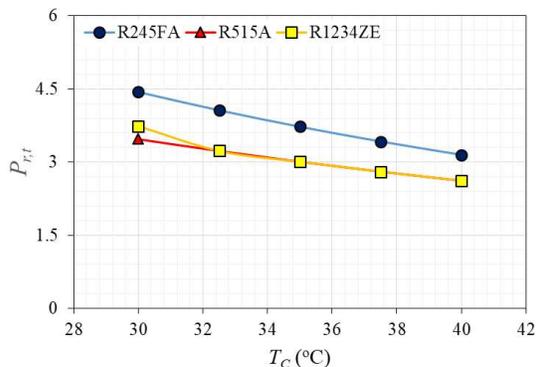
Gambar 3. Pengaruh suhu kondensasi terhadap daya pemompaan.

Selama proses kondensasi berlangsung, peningkatan suhu kondensasi akan mengakibatkan kalor yang diserap oleh generator uap (boiler) juga akan meningkat, begitupun sebaliknya. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 4 dan ini terjadi untuk ketiga fluida kerja yang ditinjau (R245FA, R515A, dan R1234ZE). Namun, pada suhu kondensasi 40°C besar kalor yang diserap oleh R1234ZE sedikit lebih rendah dibandingkan dengan kedua fluida kerja lainnya, yaitu lebih rendah ±8,35%.



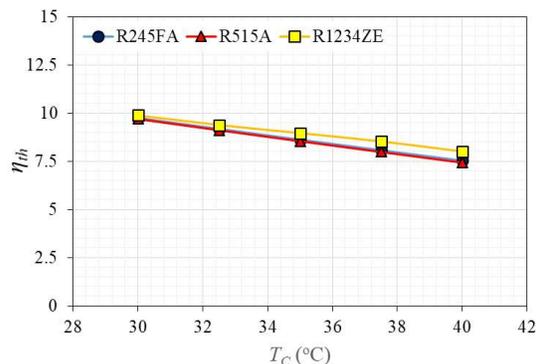
Gambar 4. Pengaruh suhu kondensasi terhadap penyerapan kalor di generator uap.

Meningkatnya suhu kondensasi akan berdampak pada rasio tekanan di turbin, dan hal ini ditunjukkan pada Gambar 5 di mana meningkatnya suhu kondensasi, maka rasio tekanan di turbin akan menurun, begitupun sebaliknya. Sistem ORC yang menggunakan R245FA memiliki rasio tekanan turbin tertinggi dibandingkan dengan R515A dan R1234ZE, yaitu lebih tinggi ±20,3%.



Gambar 5. Pengaruh suhu kondensasi terhadap rasio tekanan di turbin.

Dikarenakan tidak adanya perbedaan yang signifikan akibat perubahan suhu kondensasi terhadap penyerapan kalor di generator uap, dan pelepasan kalor di kondensator maka efisiensi termal sistem ORC yang menggunakan ketiga fluida kerja yang ditinjau juga tidak memiliki perbedaan yang signifikan, meskipun penggunaan R1234ZE menghasilkan efisiensi termal sedikit lebih tinggi dibandingkan kedua fluida kerja lainnya. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 6, dan peningkatan suhu kondensasi akan mengakibatkan penurunan efisiensi termal sistem ORC, begitupun sebaliknya.



Gambar 6. Pengaruh suhu kondensasi terhadap efisiensi termal sistem.

4. Kesimpulan

Peningkatan suhu kondensasi sangat berdampak pada meningkatnya konsumsi daya pemompaan tetapi menurunkan rasio tekanan di turbin, dan efisiensi termal sistem. Daya pemompaan yang digunakan untuk menyirkulasikan R515A dan R1234ZE lebih besar dibandingkan dengan menyirkulasikan R245FA, tetapi efisiensi termal sistem ORC yang menggunakan R1234ZE lebih besar dibandingkan R245FA dan R515A.

Daftar Pustaka

[1] D. R. Meilanova, 2021, PLN Terangi Desa Terpencil NTT dengan SPEL dan APDAL, www.ekonomi.bisnis.com, diakses 8 Agustus 2021.

[2] S. M. Bere, 2021, Warga di Pulau yang Berbatasan Laut dengan Australia Kini Menikmati Listrik 24 Jam, www.regional.kompas.com, diakses 25 Agustus 2021.

[3] S. Quoilin, M. V. D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef, V. Lemort. 2013, "Techno-Economic Survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, 168 – 186.

[4] J. Kajurek, A. Rusowicz, A. Grzebielec, W. Bujalski, K. Futyma, Z. Rudowicz. 2019, "Selection of Refrigerants for a Modified Organic Rankine Cycle." *Energy*, Vol. 168, 1 – 8.

[5] B. V. Datla, J. J. Brasz. 2014, Comparing R1233zd and R245fa for Low Temperature ORC Applications, *Proc of 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue, 14-17 July, 1 – 7.

[6] J. Yang, Z. Sun, B. Yu, J. Chen. 2018, "Experimental Comparison and Optimization Guidance of R1233zd(E) as a Drop-in Replacement to R245fa for Organic Rankine Cycle Application." *Applied Thermal Engineering*, Vol. 141, 10 – 19.

[7] J. Yang, Z. Ye, B. Yu, H. Ouyang, J. Chen. 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*, Vol. 173, 721 – 731.

[8] S. Eyerer, F. Dawo, J. Kaindl, C. Wieland, H. Spliethoff. 2019, "Experimental investigation of modern ORC working fluids R1224yd(Z) and R1233zd(E) as replacements for R245fa." *Applied Energy*, Vol. 240, 946 – 963.

[9] J. Vivan, G. Manente, A. Lazzaretto. 2015, "A General Framework to Select Working Fluid and Configuration of ORCs for Low-to-Medium Temperature Heat Sources." *Applied Energy*, Vol. 156, 727 – 746.

[10] M. Whit, A. I. Sayma. 2016, "Improving the Economic-of-Scale of Small Organic Rankine Cycle Systems through Appropriate Working Fluid Selection." *Applied Energy*, Vol. 183, 1227 – 1239.

[11] Q. Liu, Y. Duan, Z. Yang. 2014, "Effect of Condensation Temperature Glide on the Performance of Organic Rankine Cycle with Zeotropic Mixture Working Fluids." *Applied Energy*, Vol. 115, 394 – 404.

[12] Y. Hua, M. Nan, L. Tai-lu. 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.

- [13] D. D. Stanciu, S. M. Saghebian, A. Kurchania. 2020, "The Influence of Condensing Temperature on the Efficiency of Solar Power System with ORC." *Procedia Manufacturing*, Vol. 46, 359 – 363.
- [14] M. M. Dwinanto, W. Bunganaen, Nurhayati, Gusnawati, A. Y. Tobe, B. V. Tarigan. 2021, "Pengaruh Temperatur Kondensasi terhadap Kinerja Siklus Rankine Organik yang Menggunakan R245FA, R600a, R1234YF, dan R1234ZE." *ROTASI*, Vol. 23, No. 4, 28 – 34.
- [15] F. Velez, J. J. Segovia, M. C. Martin, G. Antolin, F. Chejne, A. Quijano. 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.
- [16] 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.
- [17] <https://www.honeywellrefrigerants.com/europe/genetron-properties-suite/>
- [18] Y. A. Cengel, and M. A. Boles. 2015, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, Eighth Edition, McGraw-Hill Education, New York.
- [19] R. Kong., T. Deethayat, A. Asanakhm, N. Vorayos, T Kiatsiriroat, 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.