

Simulasi Kinerja Termodinamika Refrigerator Dengan Injeksi Cairan Menggunakan R515A Dan R515B

Alexander C. Amalo¹, Matheus M. Dwinanto^{*2}, Gusnawati³

¹⁻³) 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

Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja termodinamika sistem refrigrasi kompresi uap bertemperatur rendah dengan *liquid injection* menggunakan R515A dan R515B sebagai pengganti R134a berdasarkan perangkat lunak *Genetron Properties* versi 1.4.2. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja termodinamika refrigerator dengan penggunaan dua jenis refrigeran, yaitu R515A dan R515B, dengan teknik injeksi cairan. Refrigerator adalah perangkat yang penting dalam berbagai aplikasi, termasuk industri makanan, farmasi, dan pendinginan rumah tangga. Simulasi ini mencakup variabel-variabel penting seperti tekanan, suhu, aliran massa, dan properti termofisik dari kedua refrigeran. Selain itu, juga mempertimbangkan variabel teknik injeksi cairan seperti jumlah injeksi, waktu injeksi, dan properti cairan yang diinjeksikan. Hasil penelitian menunjukkan perbandingan kinerja antara R515A dan R515B dalam hal efisiensi termal, kapasitas pendinginan, dan konsumsi daya. Ditemukan bahwa penggunaan R515B dengan injeksi cairan tertentu menghasilkan peningkatan signifikan dalam efisiensi keseluruhan sistem refrigerator. Hasil menunjukkan bahwa pengaturan yang tepat dari jumlah injeksi dan waktu injeksi dapat mengoptimalkan kinerja sistem refrigerator. Pemilihan refrigeran dan strategi injeksi cairan yang tepat dapat menghasilkan sistem yang lebih efisien. Penelitian ini memberikan wawasan mendalam tentang aspek termodinamika dalam sistem refrigerator dan mengilustrasikan pentingnya pemilihan refrigeran dan teknik operasional dalam mencapai efisiensi maksimum.

ABSTRACT

The aim of this research is to analyze the thermodynamic performance of a low temperature vapor compression refrigeration system with liquid injection using R515A and R515B as a replacement for R134a based on Genetron Properties software version 1.4.2. This research aims to analyze and compare the thermodynamic performance of refrigerators using two types of refrigerants, namely R515A and R515B, with liquid injection techniques. Refrigerators are important devices in a variety of applications, including the food, pharmaceutical, and household refrigeration industries. This simulation includes important variables such as pressure, temperature, mass flow, and thermophysical properties of both refrigerants. In addition, it also considers fluid injection technique variables such as injection amount, injection time, and injected fluid properties. The research results show a performance comparison between R515A and R515B in terms of thermal efficiency, cooling capacity, and power consumption. It was found that the use of R515B with certain liquid injection resulted in a significant increase in the overall efficiency of the refrigerator system. The results show that proper setting of the injection amount and injection time can optimize the performance of the refrigerator system. Selecting the right refrigerant and liquid injection strategy can produce a more efficient system. This research provides in-depth insight into the thermodynamic aspects of refrigerator systems and illustrates the importance of refrigerant selection and operational techniques in achieving maximum efficiency.

Keywords: Refrigerator, liquid injection, performance, thermodynamic, R515A, R515B

PENDAHULUAN

Pendinginan (refrigerasi) dapat didefinisikan sebagai suatu proses untuk

menurunkan temperatur sebuah ruangan atau bahan sehingga temperturnya berada dibawah temperatur lingkungannya. Salah satu aplikasi pendinginan yang penting adalah

refrigerasi kompresi uap untuk pengawetan ikan pada temperatur rendah yaitu ikan harus berada pada $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ atau lebih rendah. Oleh karena itu, temperatur ruang pendingin ikan harus berada pada $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1][2].

Refrigerasi kompresi uap tingkat tunggal (*single stage*) untuk pembekuan dengan temperatur rendah ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai dengan $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) akan mengakibatkan rasio kompresi di kompresor menjadi tinggi sehingga mengakibatkan kompresor mengalami panas berlebih (*overheating*) [3], [4]. Panas berlebih ini akan menyebabkan minyak pelumas kompresor menjadi rusak sehingga menyebabkan elemen-elemen kompresor rusak. Untuk mengatasi hal ini maka diberikan pendinginan tambahan dengan cara menginjeksi refrigeran cair yang keluar dari kondensor langsung ke sisi hisap kompresor atau ke dalam ruang kompresi tertutup yang bertujuan untuk mendinginkan kompresor agar umur pakainya menjadi lebih lama [5][6].

Dewasa ini, penggunaan refrigeran yang ramah lingkungan telah menjadi keharusan di refrigerator kompresi uap, dan beberapa refrigeran baru mulai diperkenalkan seperti R515A dan R515B yang tidak merusak lapisan ozon dan memiliki potensi pemanasan global yang rendah dibandingkan dengan refrigeran lama seperti R134a yang masih memiliki potensi pemanasan global yang tinggi. Di samping itu, R515A dan R515B memiliki sifat tidak mudah terbakar dan tidak beracun sehingga sangat aman untuk penggunaan di refrigerator bertemperatur rendah [7][8].

Banyak literatur tentang sistem refrigerasi yang dapat digunakan untuk menghitung kinerja termodinamika tetapi proses perhitungan secara manual akan membutuhkan banyak waktu. Oleh karena itu, dibutuhkan perangkat lunak yang dapat membantu dengan cepat untuk menghitung kinerja termodinamika sistem refrigerasi dengan *liquid injection* yang menggunakan kedua refrigeran tersebut. Perangkat lunak *Genetron Properties* versi 1.4.2 merupakan salah satu perangkat lunak yang dapat mensimulasikan kinerja termodinamika sistem refrigerasi dengan *liquid injection*

menggunakan beberapa jenis refrigeran [3], [4] [9].

Perangkat lunak ini dikembangkan oleh anggota tim pemodelan refrigeran di Laboratorium Penelitian Buffalo – Honeywell International, Inc. Semua perhitungan *properties* refrigeran didasarkan pada database NIST (Refprop 9.1) yang dihubungkan dengan simulasi siklus sehingga memudahkan pengguna (*user*) saat melakukan analisis kinerja termodinamika.

Hal inilah yang mendorong dilakukan penelitian untuk menambah pengetahuan penulis dalam melakukan analisis termodinamika sistem refrigerasi bertemperatur rendah yang menggunakan *liquid injection* dengan R515A dan R515B sebagai pengganti R134a [10] berbasis perangkat lunak *Genetron Properties* versi 1.4.2.[11]

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi kinerja termodinamika sistem refrigrasi kompresi uap bertemperatur rendah dengan *liquid injection* menggunakan R515A dan R515B sebagai pengganti R134a berdasarkan perangkat lunak *Genetron Properties* versi 1.4.2. Data parameter yang ditentukan dan temperatur yang disimulasikan dalam perangkat lunak *Genetron Properties* 1.4.2 dapat di lihat pada Tabel 1.

Berdasarkan latar belakang di atas maka permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana kinerja sistem refrigerasi kompresi uap bertemperatur rendah dengan *liquid injection* yang menggunakan R515A dan R515B sebagai pengganti R134a berdasarkan perangkat lunak *Genetron Properties* versi 1.4.2.

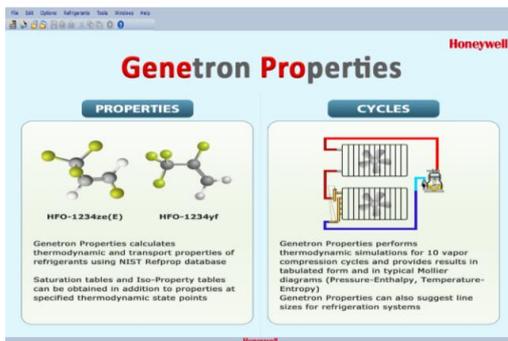
Analisis Sistem Pengkondisian Udara Standar

Analisis sistem pengkondisian udara standar dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Genetron Properties* 1.4.2. Data untuk perhitungan pengkondisian udara

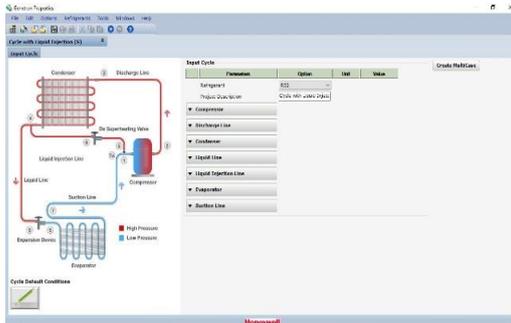
standar yang dibutuhkan adalah data kapasitas volumetrik, efisiensi insentropik, efisiensi volumetrik, Suhu Keluar Maksimum, Perubahan suhu, parameter kondensasi, pengaturan suhu, parameter penguapan, pengaturan suhu, perubahan suhu dan refrigeran.

Tabel 1. Parameter dan asumsi penelitian

Parameters	Option	Unit	Value
Refrigerant	R515A & R515B		
Project Description	Cycle With Liquid Injection		
Compressor			
Volumetrik Capacity	Cooling Load	W	5300
Isentropic Efficiency	-	-	0,75
Volumetric Efficiency	-	-	0,95
Maximum Outlet Temperature	-	°C	135
Discharge Line			
Temperature Change	Condenser Inlet Temperature	°C	0
Condenser			
Condensing Parameter	Condensing Temperature	°C	50
Temperature Setting	Outlet Temperature	°C	2
Evaporator			
Evaporating Parameter	Evaporating Temperature	°C	-10
Temperature Setting	Outlet SuperHeat	°C	5
Suction Line			
Temperature Change	Compressor Suction Temperature	°C	43



Gambar 1. Perangkat lunak Genetron Properties



Gambar 2. Siklus dengan injeksi cairan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi kinerja sistem refrigerasi dengan *liquid injection* dengan fluida kerja R515A untuk temperatur kondensasi dipertahankan konstan, karena temperatur gas refrigeran yang melalui kondensor harus lebih tinggi dari suhu lingkungan maka di kondensor terjadi kondensasi, sehingga refrigeran berubah wujud menjadi cair. Maka temperature kondensasi di pertahankan konstan pada $T_c = 50^\circ\text{C}$ dan temperatur evaporasi divariasikan pada $T_e = -10^\circ\text{C}$ sampai dengan -40°C , sehingga melihat sebab akibat dari perubahan temperature evaporasi dan temperature kondensasi dipertahankan konstan untuk sistem *liquid injection*, terhadap kinerja pelepasan kalor di kondensor, daya kompresor, laju aliran massa, koefisien prestasi, rasio efisiensi energi dan rasio kompresi di kompresor, disajikan pada Tabel 2 untuk siklus dengan *liquid injection*.

Tabel 2. Hasil simulasi untuk R515A

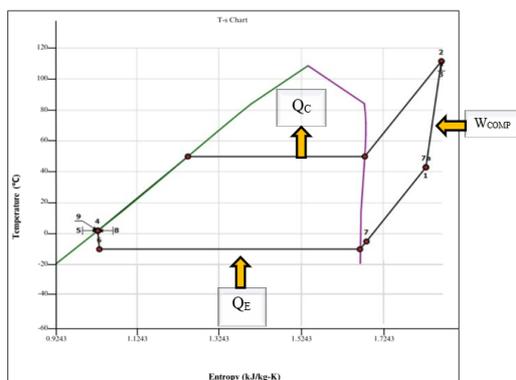
No	T_e (°C)	T_c (°C)	Q_e (kW)	Q_c (kW)	\dot{H}_{Comp} (kW)	\dot{m} (kg/s)	COP	EER (Btu/W.h)	CR
1	-10	50	5,3	8,379	1,771	0,03094	2,99	10,205	6,767
2	-15	50	5,3	8,792	2,033	0,03159	2,60	8,894	8,305
3	-20	50	5,3	9,239	2,321	0,03228	2,28	7,790	10,302
4	-25	50	5,3	9,717	2,637	0,03299	2,00	6,856	12,894
5	-30	50	5,3	10,253	3,003	0,03465	1,76	6,021	16,325
6	-35	50	5,3	10,842	3,415	0,03664	1,55	5,294	20,930
7	-40	50	5,3	11,490	3,879	0,03883	1,36	4,661	27,163

Hasil simulasi kinerja sistem refrigerasi dengan *liquid injection* dengan fluida kerja R515B untuk temperatur kondensasi dipertahankan konstan, karena temperatur gas refrigeran yang melalui kondensor harus lebih tinggi dari suhu lingkungan maka di kondensor terjadi kondensasi, sehingga refrigeran berubah wujud menjadi cair. Maka temperature kondensasi di pertahankan konstan pada $T_c = 50^\circ\text{C}$ dan temperatur evaporasi divariasikan pada $T_e = -10^\circ\text{C}$ sampai dengan -40°C , sehingga melihat sebab akibat dari perubahan temperature evaporasi dan temperature kondensasi dipertahankan konstan

untuk sistem *liquid injection* terhadap kinerja pelepasan kalor di kondensor, daya kompresor, laju aliran massa, koefisien prestasi, rasio efisiensi energi dan rasio kompresi di kompresor, disajikan pada Tabel 3 untuk siklus dengan *liquid injection*.

Tabel 3. Hasil simulasi untuk R515B

No	T_E (°C)	T_C (°C)	Q_E (kW)	Q_C (kW)	W_{Comp} (kW)	\dot{m} (kg/s)	COP	EER (Btu/W.h)	CR
1	-10	50	5,3	8,369	1,773	0,0306	2,99	10,201	6,764
2	-15	50	5,3	8,780	2,033	0,03124	2,60	8,893	8,305
3	-20	50	5,3	9,224	2,321	0,03191	2,28	7,791	10,300
4	-25	50	5,3	9,704	2,638	0,03262	2,00	6,854	12,888
5	-30	50	5,3	10,239	3,004	0,03435	1,76	6,018	16,338
6	-35	50	5,3	10,823	3,415	0,03631	1,55	5,294	20,903
7	-40	50	5,3	11,467	3,877	0,03847	1,36	4,663	27,185

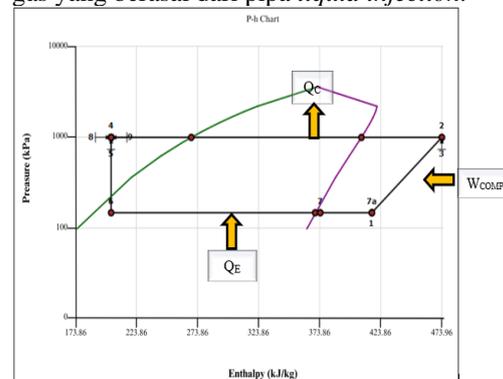


Gambar 3. Diagram $T-s$ untuk siklus *liquid injection* dengan R515A pada -10°C

Pada gambar diagram $T-s$ merupakan diagram dengan sumbu x menunjukkan temperatur (T) dan sumbu y menunjukkan entropy (s) dan $P-h$ *liquid injection* -10°C merupakan diagram dengan sumbu x menunjukkan entalpy (h) dan sumbu y menunjukkan tekanan (P). Seperti terlihat dalam Gambar 3 diagram $P-h$ *liquid injection* -10°C . Selain dua besaran tersebut terdapat garis-garis kurva lain yaitu suhu, entropi dan volume spesifik. Terdapat 3 daerah penting yang menunjukkan kondisi dari refrigeran ketika berada dalam suatu sistem refrigerasi.

Proses 1 - 2 kinerja kompresor, temperatur masuk untuk kompresor (43°C)

dan keluar ($111,63^{\circ}\text{C}$) dan suhu saturasi untuk masuk (-10°C) dan keluar (50°C). Kondensasi dapat dilihat pada proses 3 masuk untuk temperatur ($111,63^{\circ}\text{C}$) dan pada proses 4 keluar (2°C) dan suhu saturasi untuk masuk (50°C) dan keluar (50°C). Proses ekspansi dapat dilihat pada proses 5 masuk temperatur (2°C) dan proses 6 keluar temperatur (-10°C) dan suhu saturasi untuk masuk (50°C) dan keluar (-10°C) dan Evaporasi dapat dilihat pada proses 6 masuk untuk temperatur (-10°C) dan 7 keluar untuk temperatur (-5°C) dan suhu saturasi untuk masuk (-10°C) dan keluar (-10°C) dan *liquid injection* dapat dilihat pada proses 8 masuk untuk temperatur (2°C) dan 9 keluar untuk temperatur (43°C) dan suhu saturasi untuk masuk (50°C) dan keluar (43°C). Proses 7a refrigeran dalam bentuk gas meninggalkan evaporator dan sebelum bercampur dengan refrigeran dalam bentuk gas yang berasal dari pipa *liquid injection*.



Gambar 4. Diagram $P-h$ untuk siklus *liquid injection* dengan R515A pada -10°C

Daerah penting yang menunjukkan kondisi dari refrigeran ketika berada dalam suatu sistem refrigerasi.

- Daerah subcooled liquid
Pada daerah ini refrigeran dalam kondisi fasa cair. Terjadi pada saat posisi refrigeran keluar dari kondensor dan masuk katup ekspansi. Daerah ini dibatasi oleh garis cair jenuh dimana kondisi refrigeran 100% cair.
- Daerah campuran saturated
Pada daerah ini refrigeran berada dalam kondisi 2 fasa cair dan uap. Itulah

mengapa daerah ini dibatasi oleh 2 jenis garis jenuh garis cair jenuh dan garis uap jenuh.

- Daerah superheated vapor
Pada daerah ini kondisi refrigeran adalah uap dipanaskan lanjut. Daerah ini dibatasi oleh garis uap jenuh dimana kondisi refrigeran adalah 100% uap.

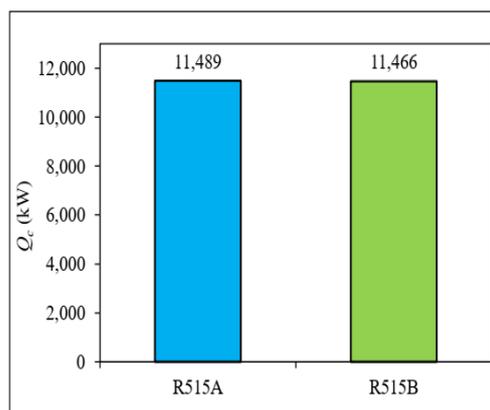
Selain garis-garis tersebut diatas dan 3 daerah penting yang menunjukkan kondisi refrigeran terdapat pula kubah saturasi (ditunjukkan dengan garis ungu dan hijau). Kubah yang menunjukkan fasa zat. Didalam kubah merupakan daerah dimana fasa dari zat berupa gas dan cair.

Di bagian kanan terdapat garis saturasi gas (gas jenuh) berwarna ungu. Di garis ini zat dalam keadaan tepat jenuh gas. Jika sedikit saja kekiri maka sudah terjadi *superheated*. *Superheated* adalah keadaan dimana pada saat suatu zat yang sudah dalam keadaan gas jenuh, kemudian mengalami kenaikan suhu, biasa disebut uap panas lanjut. Di bagian kiri terdapat garis saturasi cair (cair jenuh). Di garis ini zat dalam keadaan tepat cair jenuh, jika sedikit saja ke kanan maka sebagian zat akan menguap menjadi gas dan sedikit saja ke kiri maka zat akan menjadi cair jenuh kemudian mengalami penurunan suhu.

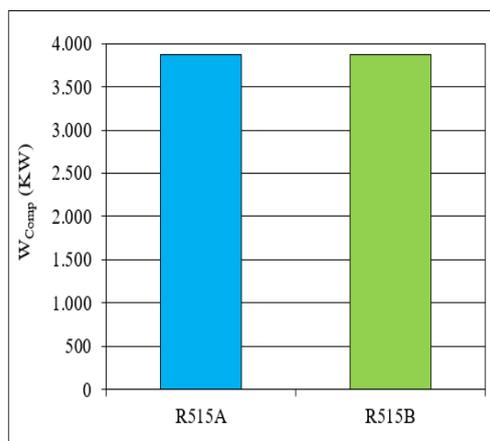
Gambar 5 menyajikan pengaruh variasi temperatur evaporasi terhadap laju aliran massa refrigeran dalam kinerja termodinamika *refrigerator* dengan sistem *liquid injection* untuk refrigeran R515A dan R515B. Temperatur kondensasi dipertahankan konstan pada 50°C. Terlihat bahwa meningkatnya temperatur evaporasi mengakibatkan penurunan laju aliran massa refrigeran dalam sistem, dari kedua refrigeran yang ditinjau untuk refrigeran R515A dan R515B, terlihat bahwa laju aliran massa refrigeran untuk kedua yang ditinjau memiliki nilai yang tidak jauh berbeda atau tidak ada perbedaan yang signifikan untuk kedua refrigeran, ini dikarenakan nilai entalpi refrigeran R515A dan R515B yang sama besar.

Penurunan temperatur evaporasi akan sangat berdampak pada konsumsi daya

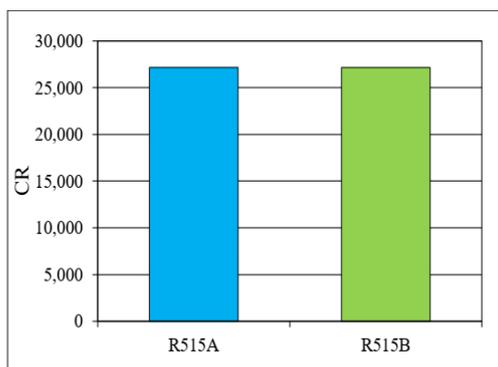
kompresor, dimana penurunan temperatur evaporasi akan meningkatkan daya kompresor yang dibutuhkan. Hubungan antara temperatur evaporasi dengan daya kompresor untuk refrigeran R515A dan R515B, dalam Gambar 6 terlihat bahwa dari kedua refrigeran yang ditinjau untuk refrigeran R515A dan R515B memiliki nilai yang sama besar. Hal ini juga disebabkan karena nilai entalpi refrigeran R515A dan R515B yang sama besar. Maka dapat dipastikan daya kompresor untuk R515A dan R515B akan membutuhkan daya kompresor yang sama besar.



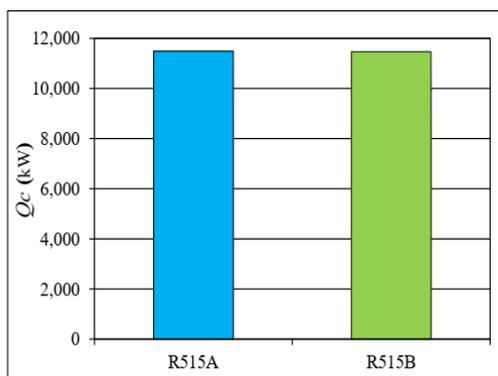
Gambar 5. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap laju aliran massa refrigeran



Gambar 6. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap daya kompresor



Gambar 7. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap rasio kompresi di kompresor



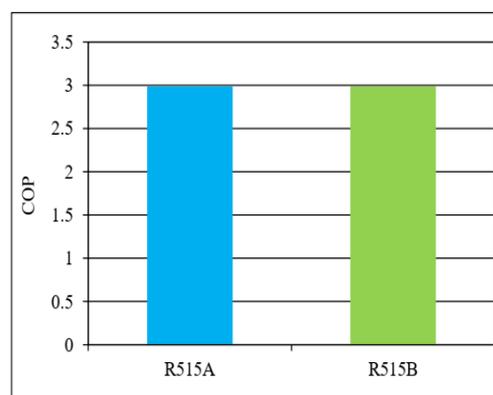
Gambar 8. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap pelepasan kalor di kondensor.

Dalam hubungannya dengan pengaruh temperatur evaporasi terhadap rasio kompresi di kompresor maka dari Gambar 7 terlihat bahwa meningkatnya temperatur evaporasi akan mengakibatkan menurunnya rasio kompresi di kompresor. Pada gambar ini terlihat bahwa rasio kompresi untuk kedua sistem yang ditinjau memiliki nilai yang sama besar tetapi bila dihubungkan dengan Gambar 7 maka dapat dipastikan bahwa kompresor untuk kedua sistem tersebut memiliki dimensi (ukuran) yang sama, di mana refrigeran R515A dan R515B akan menggunakan kompresor yang ukurannya sama besar.

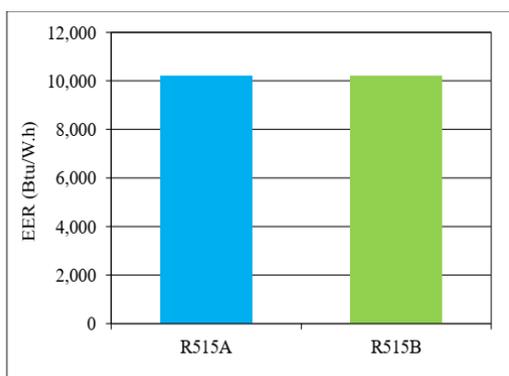
Gambar 8 menyajikan hubungan antara temperatur evaporasi terhadap laju pelepasan kalor di kondensor untuk refrigeran R515A dan R515B. Nilai pelepasan kalor diperlukan untuk merancang kondensor, dan

menghitung besarnya aliran fluida pendingin kondensor. Terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur evaporasi maka pelepasan kalor di kondensor akan menurun. Pelepasan kalor di kondensor untuk refrigeran R515A dan R515B akan memiliki nilai yang sama besar dari kedua refrigeran yang ditinjau. Oleh karena itu, sistem refrigerasi yang menggunakan refrigeran R515A akan membutuhkan dimensi kondensor yang sama besar dengan refrigeran R515B. ini dikarenakan nilai entalpi refrigeran dari kedua refrigerant yang sama besar. Hal ini menyebabkan kalor yang di buang ke lingkungan untuk refrigeran R515A sama besar dengan refrigeran R515B.

Gambar 9 menunjukkan pengaruh temperatur evaporasi terhadap koefisien prestasi (COP) dari kedua refrigeran yang ditinjau untuk refrigerant R515A dan R515B, di mana terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur evaporasi maka koefisien kinerja kedua refrigerant akan meningkat. Koefisien kinerja untuk refrigerant R515A dan R515B akan memiliki nilai yang sama besar dari kedua refrigeran yang ditinjau. Oleh karena itu, refrigeran R515A dan refrigeran R515B menunjukkan bahwa kerja dari kedua refrigerant sama atau baik. Hal ini dikarenakan nilai entalpi refrigerant dari kedua refrigerant yang sama besar, karena semakin besar koefisien prestasi maka semakin baik kerja suatu mesin pendingin.



Gambar 9. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap koefisine kinerja



Gambar 10. Pengaruh temperatur evaporasi terhadap efisiensi energi

Gambar 10 menunjukkan pengaruh temperatur evaporasi terhadap rasio efisiensi energi (*Energy Efficiency Ratio* = EER) dari kedua refrigeran yang ditinjau untuk refrigeran R515A dan R515B, di mana terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur evaporasi maka EER kedua refrigeran R515A dan R515B akan meningkat. EER untuk refrigeran R515A dengan refrigeran R515B. EER untuk refrigeran R515A dan R515B akan memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dari kedua refrigeran yang ditinjau. Oleh karena itu, refrigeran R515A dan refrigeran R515B menunjukkan bahwa kerja dari kedua refrigerant ini hampir sama. Hal ini dikarenakan nilai entalpi refrigerant dari kedua refrigeran yang sama besar. Oleh karena itu, refrigeran R515A dan refrigeran R515B yang menggunakan *liquid injection* akan sama hemat energi karena memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dari kedua refrigeran. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya nilai EER akan semakin hemat energi.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, telah dilakukan simulasi kinerja termodinamika refrigerator dengan menggunakan dua jenis refrigeran, yaitu :

- Penggunaan Refrigeran R515A dan R515B: Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan kedua jenis

refrigeran, R515A dan R515B, dalam refrigerator memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja sistem. Refrigeran R515A menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam beberapa aspek tertentu, seperti efisiensi pendinginan, sementara R515B memiliki karakteristik yang lebih baik dalam hal efisiensi energi.

- Efisiensi dan kapasitas refrigerator: Penelitian ini mengungkapkan bahwa efisiensi refrigerator dengan injeksi cairan dapat ditingkatkan dengan pemilihan refrigeran yang tepat. Dalam hal ini, R515A memiliki efisiensi yang lebih tinggi dalam menghasilkan pendinginan daripada R515B.
- Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca: Penggunaan refrigeran R515A, yang memiliki potensi penurunan emisi gas rumah kaca, dapat berkontribusi pada upaya pelestarian lingkungan dan pengurangan dampak perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. Dwinanto, I. S. Limbong, and D. G. H. Adoe, "Analysis of the performance of air blast freezer by using hydrofluorocarbon and hydrocarbon refrigerants," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2021, p. 012016.
- [2] I. Dincer, *Refrigeration systems and applications*. John Wiley & Sons, 2017.
- [3] A. J Hamad, A. H. N Khalifa, and D. Z Khalaf, "Performance investigation of vapor compression cycle with a variable speed compressor and refrigerant injection/Ahmed J. Hamad...[et al.]," *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*, vol. 16, no. 2, pp. 63–76, 2019.
- [4] Y. Jeon, S. Lee, J. Jung, and Y. Kim, "Analytical Study on the Performance Characteristics of a Liquid Injection Refrigeration Cycle.," 2014.
- [5] X. Xu, Y. Hwang, and R. Radermacher, "Refrigerant injection

- for heat pumping/air conditioning systems: literature review and challenges discussions,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, no. 2, pp. 402–415, 2011.
- [6] R. L. Doménech, E. T. Alcaraz, R. C. López, and J. A. L. Bernad, “Experimental energetic analysis of the liquid injection effect in a two-stage refrigeration facility using a compound compressor,” *HVAC&R Res*, vol. 13, no. 5, pp. 819–831, 2007.
- [7] G. Li, “Performance evaluation of low global warming potential working fluids as R134a alternatives for two-stage centrifugal chiller applications,” *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 38, no. 7, pp. 1438–1451, 2021.
- [8] X. Shuxue and M. Guoyuan, “Performance Evaluation of a Vapor Injection Refrigeration System Using Mixture Working Fluid R32/R1234ze,” in *12th IEA Heat Pump Conference*, 2017.
- [9] A. Praveen and S. Debjyoti, “Numerical analysis of a two-phase injection refrigeration cycle using R32,” *Journal of Thermal Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 157–168, 2021.
- [10] A. Mota-Babiloni, C. Mateu-Royo, J. Navarro-Esbrí, and Á. Barragán-Cervera, “Experimental comparison of HFO-1234ze (E) and R-515B to replace HFC-134a in heat pump water heaters and moderately high temperature heat pumps,” *Appl Therm Eng*, vol. 196, p. 117256, 2021.
- [11] “Genetron Properties.” Honeywell International Inc, 2024. [Online]. Available: <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/>