

Studi Kinerja Teoritis *Batch Air Blast Freezer* yang Menggunakan Refrigeran R290 dan R600a sebagai Pengganti R404A

Yohanes Viva Servianus, Matheus M. Dwinanto, Muhamad Jafri

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

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

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

Abstract

The batch air blast freezers have been used as a quick freezing method in the fish processing unit before being frozen for a long time in cold storage. For this reason, the use of hydrocarbon refrigerants that are more environmentally friendly has become a demand and a central issue in the future. This paper presents a theoretical performance study of the use of R290 and R600a instead of R404A in a batch of blast freezer water. The theoretical performance of the system is based on evaporation temperature variations using CoolPack software with condensation temperatures held constant. Important quantities analyzed are mass flow rate, pressure ratio, discharge temperature, heat rejected, power consumption and coefficient of performance. The results show that at minimum evaporation temperature, system performance using R290 and R600a is on average $\pm 14\%$ higher compared to R404A. R290 has characteristics that are closer to R404A so it is more suitable to replace the two refrigerants compared to R600a. However, this is a theoretical analysis of the system which can lead to higher performance than normal conditions.

Keywords: *air blast freezer, performance, refrigeration, environment friendly*

Abstrak

Batch air blast freezer telah digunakan sebagai cara pembekuan cepat di unit pengolahan ikan sebelum dibekukan untuk waktu yang lama di dalam *cold storage*. Untuk itu penggunaan refrigeran hidrokarbon yang lebih ramah lingkungan telah menjadi tuntutan dan isu sentral pada masa yang akan datang. Makalah ini menyajikan studi kinerja teoritis penggunaan R290 dan R600a sebagai pengganti R404A di *batch air blast freezer*. Kinerja teoritis sistem didasarkan pada variasi temperatur evaporasi menggunakan perangkat lunak CoolPack dengan temperatur kondensasi dipertahankan konstan. Besaran-besaran penting yang dianalisis adalah laju aliran massa, rasio tekanan, temperatur keluar kompresor, pelepasan kalor, konsumsi daya, dan koefisien kinerja. Hasilnya menunjukkan bahwa pada temperatur evaporator minimum, kinerja sistem yang menggunakan R290 dan R600a rata-rata lebih tinggi $\pm 14\%$ dibandingkan dengan R404A dan R507A. R290 memiliki karakteristik yang lebih dekat pada R404A dan R507A sehingga lebih sesuai menggantikan kedua refrigeran tersebut dibandingkan dengan R600a. Namun, ini adalah analisis teoritis sistem yang dapat mengarah pada kinerja yang lebih tinggi daripada kondisi normal.

Kata kunci: *air blast freezer, kinerja, refrigerasi, ramah lingkungan*

1. Pendahuluan

Unit Pengolahan Ikan (UPI) DKP Kupang merupakan tempat aktifitas pengolahan ikan yang dilengkapi dengan refrigerator untuk meningkatkan nilai tambah produk perikanan sebelum diekspor atau diolah lebih lanjut. UPI ini menghasilkan produk pengolahan ikan beku maupun segar, sehingga harus dilengkapi dengan fasilitas pengolahan, pembekuan, dan penyimpanan beku (*cold storage*) bertemperatur ruang -25°C . Ikan yang akan disimpan dalam *cold storage* untuk jangka waktu lama, terlebih dahulu harus dibekukan dalam ruang pembekuan cepat agar temperatur pusat ikan mencapai -18°C dalam waktu yang tidak terlalu lama. Metode pembekuan cepat yang umum digunakan adalah *Batch Air Blast Freezer* (BABF). Dalam BABF produk ikan dibekukan dengan pendinginan cepat selama rentan waktu 8 jam/shift [1].

BABF menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap untuk mencapai proses pembekuan dengan fluida kerja adalah R404A yang merupakan refrigeran dari golongan hidroflokrokarbon. Refrigeran ini tidak mengandung *chlorine* sehingga tidak merusak lapisan ozon ($\text{ODP} = 0$) tetapi masih memiliki potensi pemanasan global yang tinggi ($\text{GWP} = 3260$). Oleh karena itu, pada masa yang akan datang perlu digunakan refrigeran yang memiliki GWP lebih rendah, yaitu dari golongan hidrokarbon seperti R290 dan R600a. Saat ini, kedua jenis refrigeran tersebut mulai digunakan di sistem refrigerasi rumah tangga, dan pengkondisian udara. Tabel 1 menyajikan sifat-sifat dan efek terhadap lingkungan dari R404A, R290, dan R600a [2, 3].



Gambar 1. Dalam BABF ikan digantung di rak dan dibekukan dengan udara dingin yang dihembuskan

Tabel 1. Sifat-sifat dan efek refrigeran terhadap lingkungan

Refrigeran	Titik Didih Normal (°C)	Tekanan pada -25°C (bar)	Kapasitas volumetrik pada -25/45/32°C (kJ/m ³)	Ozon Depleting Potential (ODP)	Global Warming Potential (GWP) (100 Tahun)	Waktu Hidup di Atmosfir (Tahun)	Tingkat Keamanan (ASHRAE)
R404A	-45,8	2,50	1334	0	3260	40,36	A1
R290	-42,1	2,03	1164	0	3	0	A3
R600a	-11,6	0,58	373	0	3	0	A3

Sumber: [2, 3]

Kinerja termodinamika BABF sangat dipengaruhi oleh refrigeran yang digunakan sebagai fluida kerja karena terdapat beda temperatur yang terbatas antara sistem dan lingkungannya, di mana ini merupakan sumber utama ireversibilitas sistem refrigerasi. Penurunan temperatur evaporasi akan mengakibatkan penurunan kinerja dan efisiensi sistem, begitupun sebaliknya [4, 5]. Hal ini mendorong beberapa peneliti melakukan studi teoritis dan eksperimen penggunaan refrigeran hidrokarbon terhadap kinerja sistem refrigerasi, diantaranya membandingkan kinerja energi dan *exergy* siklus refrigerasi kompresi uap yang menggunakan R404A, R290, dan R744. Hasil studi ini menunjukkan pada berbagai variasi temperatur evaporasi dan kondensasi, R290 memiliki kinerja yang lebih baik daripada R404A, dan R744 [6].

Penggunaan R290, R600a, dan R1270 sebagai alternatif pengganti R22 di sistem refrigerasi yang menggunakan penukar kalor *subcooling* terhadap kinerja teoritis juga telah dilakukan. Hasil studi ini menunjukkan bahwa sifat termodinamika R290 dan R1270 cocok dengan R22, dan menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada R22. R600a memiliki kinerja sedikit lebih baik dalam hal daya per ton refrigerasi yang lebih rendah, dan COP yang lebih tinggi tetapi tekanan saturasi dan volume spesifiknya menyimpang secara signifikan dari R22 sehingga membutuhkan desain ulang sistem sebelum digunakan sebagai pengganti R22 [7]. Studi eksperimental penggunaan R600a dan R436A (campuran 45% R600a dan 56% R290) sebagai pengganti R134a di refrigerator rumah tangga juga telah dilakukan untuk membandingkan efisiensi energi dari penggunaan ketiga refrigeran tersebut. Hasilnya menunjukkan R600a memiliki efisiensi energi terbesar dibandingkan dengan dua refrigeran lainnya pada berbagai kondisi operasi [8].

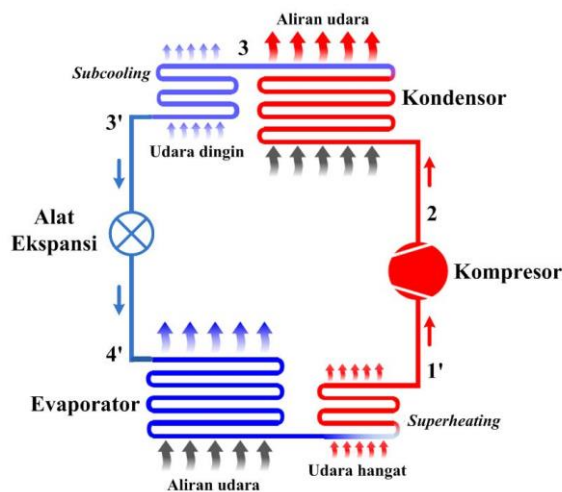
Perangkat lunak CoolPack telah digunakan untuk menganalisis penggunaan tujuh refrigeran diantaranya R404A, R290, dan R600a sebagai alternatif pengganti R22. Hasil simulasi menunjukkan bahwa R290 dan R600a menghasilkan laju aliran massa terkecil sedangkan R404A adalah yang terbesar sehingga konsumsi dayanya paling besar dari semua refrigeran. Secara umum R600a memiliki kinerja tertinggi dibandingkan semua refrigeran yang ditinjau [9]. Efektivitas penukar kalor *liquid suction* dalam sistem refrigerasi yang menggunakan R22, R404A, dan campuran R290/R600a (50:50) juga telah diteliti secara eksperimen untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kinerja *cold storage*. Hasilnya menunjukkan bahwa dalam keadaan stedi sistem yang menggunakan campuran R290/R600a memiliki kinerja yang lebih baik dari kedua refrigeran lainnya, dan memiliki karakteristik yang sama dengan R404A sehingga dapat digunakan sebagai pengganti R22 dan R404A [10]. Makalah ini membahas analisis termodinamika penggunaan dua refrigeran hidrokarbon yaitu R290 dan R600a sebagai pengganti R404A di BABF ketika diaplikasikan di *batch air blast freezer* pada masa yang akan datang.

2. Metode penelitian

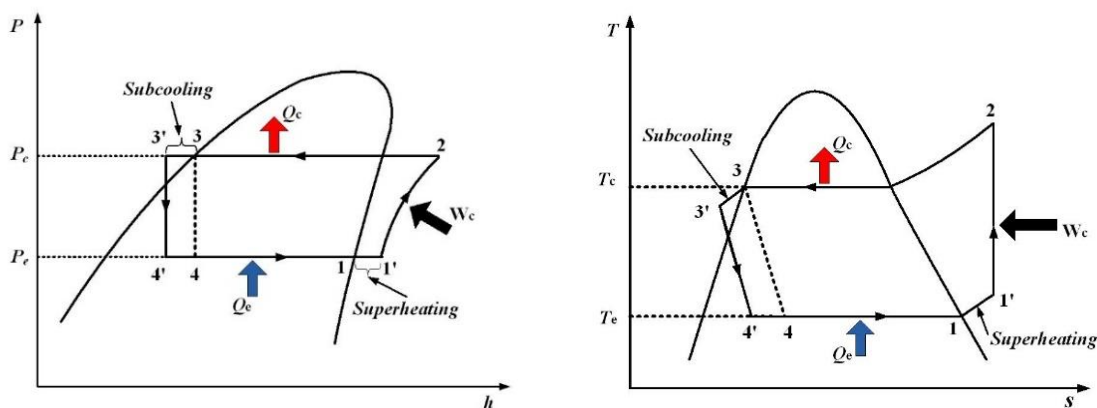
Studi ini menggunakan perangkat lunak CoolPack versi 1.50 yang dapat mensimulasikan dengan baik analisis siklus, perhitungan dimensi sistem, perhitungan kondisi operasi, evaluasi efisiensi sistem dan komponen serta simulasi transien sistem. CoolPack berisi kumpulan program simulasi yang mudah digunakan dan kuat secara numerik [11].

Dalam refrigerator kompresi uap sederhana, uap refrigeran diasumsikan memasuki kompresor sebagai uap jenuh, dan cairan refrigeran diasumsikan sebelum memasuki alat ekspansi sebagai cairan jenuh. Jika dimensi evaporator sedikit diperbesar, uap jenuh biasanya akan terus menyerap kalor dan karenanya menjadi *superheated* sebelum mencapai kompresor. Dalam praktiknya, ini dikendalikan oleh katup ekspansi. Jika dimensi kondensor sedikit diperbesar, cairan

jenuh akan terus melepaskan kalor dan menjadi *subcooled* sebelum memasuki katup ekspansi (Gambar 2). *Superheating* dan *subcooling* diterapkan untuk meningkatkan efisiensi sistem [12].



Gambar 2. Skematik refrigerator kompresi uap dengan *subcooling* dan *superheating*



Gambar 3. Diagram P-h dan T-s dengan *subcooling* dan *superheating*

Gambar 3 menyajikan perbandingan diagram P-h dan T-s untuk siklus kompresi uap dengan *subcooling* dan *superheating* (1'-2-3'-4'-1') dan siklus kompresi uap jenuh (1-2-3-4-1). Kapasitas pendinginan per unit massa lebih besar untuk siklus *subcooled* dan *superheated* sehingga laju aliran massa refrigeran per unit kapasitas lebih kecil untuk siklus tersebut daripada siklus jenuh. Disamping itu, peningkatan kapasitas pendinginan secara proporsional lebih besar daripada peningkatan kalor kompresi, sehingga COP siklus *subcooled* dan *superheated* lebih tinggi daripada siklus jenuh. Dari Gambar 3 dapat ditentukan laju aliran massa refrigeran dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{m} = \frac{Q_e}{h_{1'} - h_{4'}} \quad (2.1)$$

dengan Q_e adalah kapasitas pendinginan. Kalor yang dilepaskan selama proses kondensasi adalah:

$$Q_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2.2)$$

maka kerja kompresi dapat ditentukan dari:

$$W_c = Q_c - Q_e \quad (2.3)$$

Kapasitas *subcooling* dan *superheating* dapat ditentukan dari persamaan:

$$Q_{SC} = \dot{m}(h_3 - h_{3'}) \quad (2.4)$$

$$Q_{SH} = \dot{m}(h_{1'} - h_1) \quad (2.5)$$

Koefisien kinerja sistem merupakan rasio kapasitas pendinginan terhadap kerja kompresor, yang dihitung menggunakan persamaan:

$$COP = \frac{h_{1'} - h_{4'}}{h_2 - h_{1'}} \quad (2.6)$$

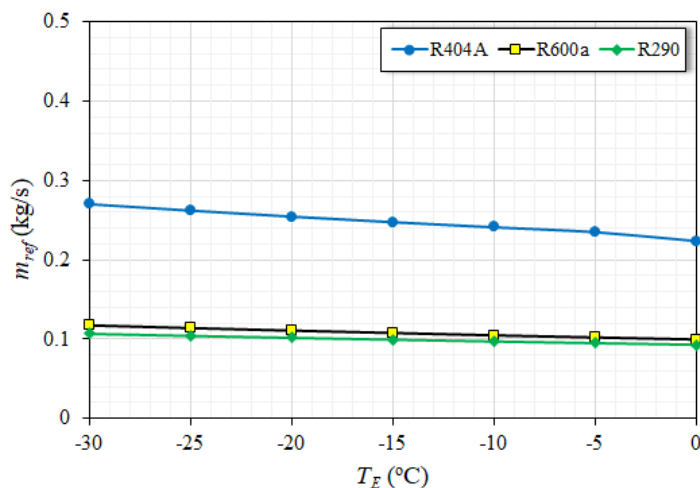
Beberapa parameter dan asumsi dalam studi ini disajikan pada Tabel 2 yang dipilih berdasarkan rentang kerja dari BABF di UPI DKP Kupang.

Tabel 2. Parameter penelitian dan asumsi

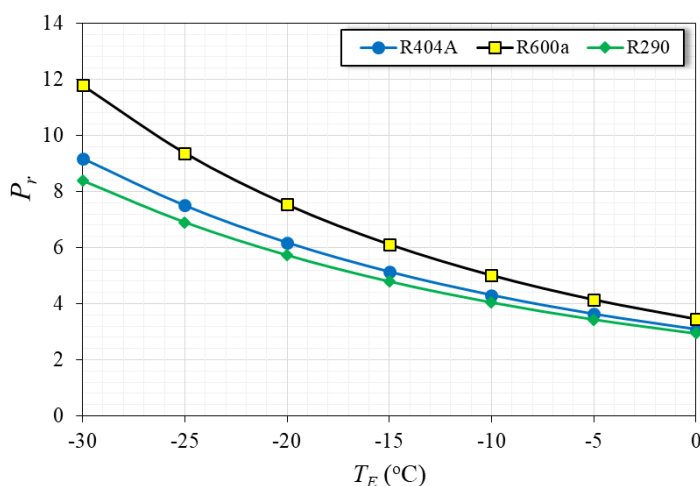
Parameter	Satuan	Nilai
Kapasitas pendinginan	kW	26,79
Temperatur evaporasi	°C	-30 – 0
Temperatur kondensasi	°C	40
Temperatur <i>subcooling</i>	°C	2
Temperatur <i>superheating</i>	°C	8
Efisiensi isentropik kompresor	-	0,8
Rugi kalor kompresor	%	10

3. Hasil dan pembahasan

Gambar 4 menyajikan hubungan antara variasi temperatur evaporasi terhadap laju aliran massa refrigeran untuk kapasitas pendinginan, dan temperatur kondensasi dipertahankan konstan. Terlihat bahwa laju aliran massa refrigeran yang menggunakan R290 dan R600a masing-masingnya lebih rendah ±59,45% dan 56% dibandingkan dengan penggunaan R404A. Hal ini disebabkan oleh densitas R290 dan R600a pada setiap tingkat keadaan jauh lebih rendah. Namun, densitas yang rendah akan mengakibatkan laju aliran volume refrigeran yang lebih tinggi sehingga berdampak pada peningkatan ukuran penukar kalor (kondensator dan evaporator) untuk membatasi penurunan tekanan.



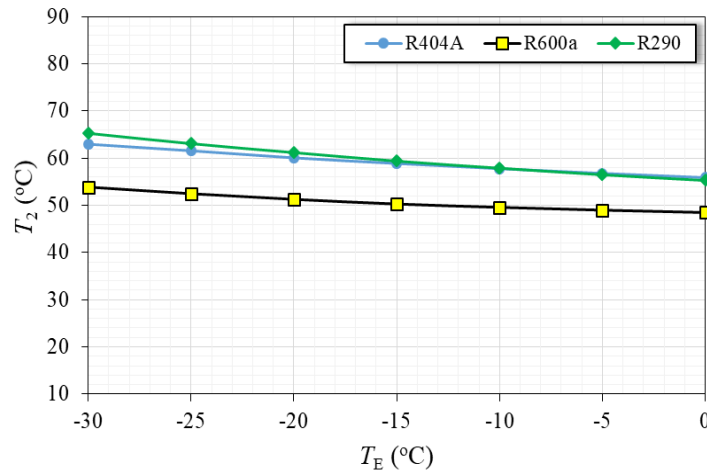
Gambar 4. Temperatur evaporasi vs laju aliran massa refrigeran



Gambar 5. Temperatur evaporasi vs rasio tekanan kompresor

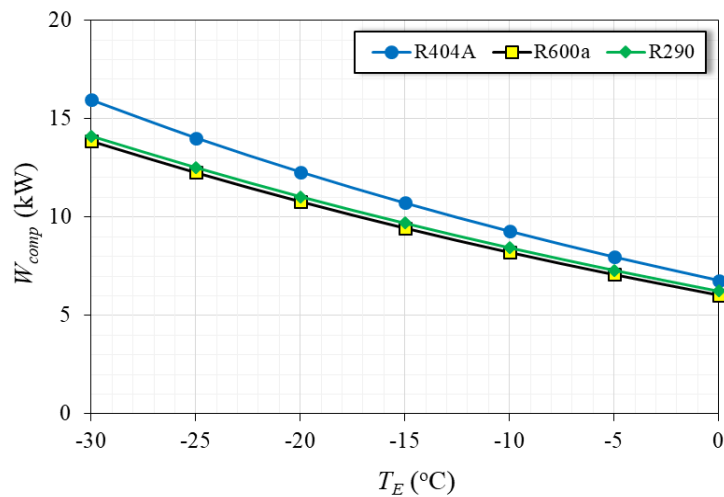
Selama proses pendinginan berlangsung, penurunan temperatur evaporasi akan mengakibatkan rasio tekanan di kompresor meningkat, begitupun sebaliknya. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 5, dan ini terjadi untuk semua refrigeran yang ditinjau. Rasio tekanan kompresor R290 lebih rendah ±6,8% bila dibandingkan dengan penggunaan R404A sedangkan rasio tekanan kompresor R600a lebih tinggi ±20% daripada R404A.

Temperatur gas refrigeran keluar kompresor adalah salah satu parameter penting dalam memilih refrigeran alternatif. Temperatur keluar kompresor yang lebih rendah akan meningkatkan umur pakai kompresor karena stabilitas refrigeran dan pelumasan yang lebih baik. Pada Gambar 6 temperatur gas refrigeran keluar kompresor untuk sistem dengan R600a jauh lebih rendah dibandingkan dengan R290 dan R404A.

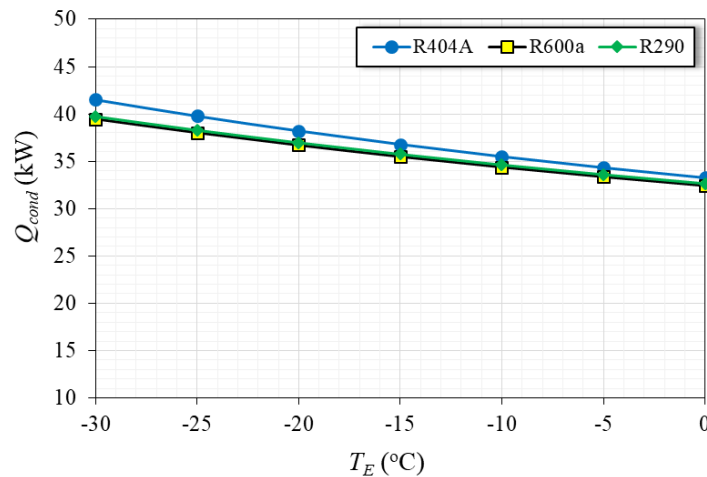


Gambar 6. Temperatur evaporasi vs temperatur gas refrigeran keluar kompresor

Peningkatan rasio tekanan di kompresor akan berdampak pada kenaikan daya kompresor untuk setiap penurunan temperatur evaporasi, begitupun sebaliknya, dan ini ditunjukkan pada Gambar 7. Daya kompresor sistem yang menggunakan R290 nilainya rata-rata lebih kecil ±9,82% bila dibandingkan dengan yang menggunakan R404A sedangkan penggunaan R600a lebih kecil ±12,09%.



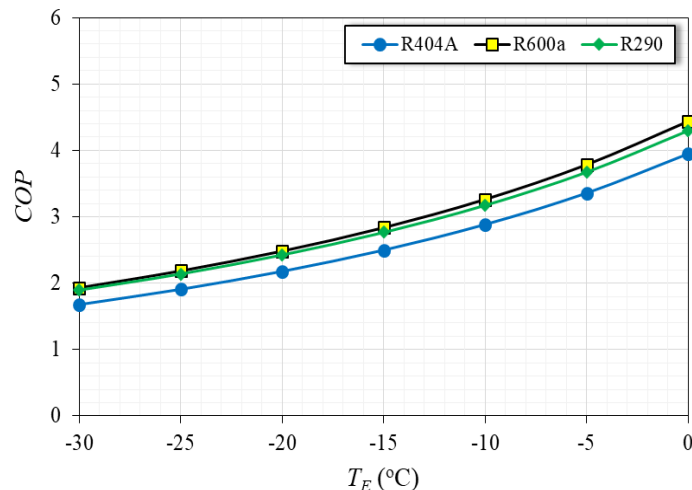
Gambar 7. Temperatur evaporasi vs daya kompresor



Gambar 8. Temperatur evaporasi vs pelepasan kalor di kondensor

Gambar 8 menyajikan hubungan antara temperatur evaporasi terhadap laju 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 laju pelepasan kalor di kondensor akan menurun, begitupun sebaliknya. Laju pelepasan kalor untuk sistem yang menggunakan R600a dan R290 masing-masingnya rata-rata lebih kecil $\pm 3,7\%$ dan $\pm 3,1\%$ R404A dibandingkan dengan yang menggunakan R404A. Hal ini disebabkan tekanan kondensasi saat refrigeran berubah fase dari gas menjadi cairan untuk R600a adalah lebih kecil dibandingkan dengan R290 dan R404A.

Gambar 9 menyajikan hubungan antara temperatur evaporasi dengan koefisien kinerja (COP). Dalam gambar ini terlihat bahwa dengan menurunnya temperatur evaporasi maka koefisien kinerja sistem juga akan menurun, begitupun sebaliknya. Pada temperatur minimum, koefisien kinerja sistem yang menggunakan R600a dan R290 masing-masingnya lebih tinggi $\pm 15,1\%$ dan 13% . Dalam gambar ini juga terlihat bahwa sistem yang menggunakan R600a dan R290 memiliki kinerja yang sama pada temperatur evaporasi minimum.



Gambar 9. Temperatur evaporasi vs koefisien kinerja

4. Kesimpulan

Studi teoritis ini mengkaji kemungkinan penggunaan refrigeran hidrokarbon di *batch air blast freezer* pada masa yang akan datang. Tidak mudah untuk menetapkan kinerja optimal untuk setiap refrigeran hidrokarbon yang digunakan dalam siklus secara bebas sehingga pendekatan simulasi siklus dengan model termodinamika sambil membandingkan kedua refrigeran hidrokarbon (R290 dan R600a) dengan hidrofluorokarbon (R404A) merupakan cara yang paling umum. Hasil studi ini menunjukkan bahwa dua kandidat refrigeran hidrokarbon yang dikaji memiliki kinerja termodinamika lebih baik dibandingkan dengan R404A.

Pada temperatur evaporator minimum (-30°C) sistem yang menggunakan R290 dan R600a memiliki COP, dan efisiensi refrigerasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan R404A. R290 memiliki karakteristik yang lebih dekat pada R404A dan R507A sehingga lebih sesuai menggantikan kedua refrigeran tersebut dibandingkan dengan R600a. Di samping itu, refrigeran hidrokarbon lebih ramah lingkungan dibandingkan refrigeran hidrofluorokarbon sehingga penggunaannya pada masa yang akan datang lebih dianjurkan, walaupun memiliki sifat lebih mudah terbakar. Namun, ini adalah analisis teoritis sistem yang dapat mengarah pada kinerja yang lebih tinggi daripada kondisi normal.

Daftar Pustaka

- [1] Anonim, 2017, "Buku Manual Cold Storage Kapasitas 100T DKP Kupang," Kementerian Kelautan dan Perikanan, Republik Indonesia.
- [2] Benhadid-Dib, S., Benzaoui, A., 2012, "Refrigerants and Their Environmental Impact Substitution of Hydrochlorofluorocarbon HCFC and HFC Hydrofluorocarbon. Search for an Adequate Refrigerant," *Energy Procedia*, 18: 807–816.
- [3] Bhatkar, V.W. Kriplani, V.M., Awari, G.K., 2013, "Alternative Refrigerants in Vapour Compression Refrigeration Cycle for Sustainable Environment: A Review of Recent Research," *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10: 871–880.
- [4] Dwinanto, M. M., Koehuan, V. A., Monteiro, J. M., 2015, "Analysis of Dual Evaporator Refrigeration System via Exergetic Performance Coefficient Criterion," *Prosiding SEMNASTEK*, hal. 1-17.
- [5] Dwinanto, M. M., Suhanan, Prajitno, 2017, "Exergy Analysis of a Dual-Evaporator Refrigeration Systems," *AIP Conference Proceedings*, 1788: 030011:1–8.
- [6] Shiliday, J. A., Tassou, S. A., Shiliday, N., 2009, "Comparative Energy and Exergy Analysis of R744, R404A and R290 Refrigeration Cycles," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 00: 1–8.

- [7] Bukola O. B., Zhongjie H., 2012, "Comparative Analysis of the Performance of Hydrocarbon Refrigerants with R22 in A Sub-Cooling Heat Exchanger Refrigeration System," *Journal of Power and Energy*, 226(7):882–891.
- [8] Rasti, M., Aghamiri, S. F., Hatamipour, M. S., 2013, "Energy efficiency enhancement of a domestic refrigerator using R436A and R600a as alternative refrigerants to R134a," *International Journal of Thermal Sciences*, 74: 86–94.
- [9] Venkataiah, S., Rao, G. V., 2014, "Analysis of Alternative Refrigerants to R22 for Air-Conditioning Applications at Various Evaporating Temperatures," *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(3): 39–46.
- [10] Prayudi, Nurhasanah, R., Diantari, R. A., 2017, "The Effect the Effectiveness of the Liquid Suction Heat Exchanger to Performance of Cold Storage with Refrigerant R22, R404A and R290/R600a," *AIP Conference Proceedings*, 1788: 030067:1–8.
- [11] Jakobsen, A, Rasmussen, B. D., Skovrup, M. J., Andersen, S. E., 2001, "*CoolPack—A Collection of Simulation Tools for Refrigeration*," Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark (DTU), Denmark.
- [12] Sencan, A., Selbas, R., Kizilkan, O., Kalogiru, S. A., 2006, "Thermodynamic analysis of subcooling and superheating effects of alternative refrigerants for vapour compression refrigeration cycles," *International Journal of Energy Research*, 30:323–347.