

Simulasi Kinerja *Batch Air Blast Freezer* Dengan Menggunakan Refregeran R404A dan R1234YF

Stefanus Senu¹⁾, Matheus M. Dwinanto^{2*)}, Muhamad Jafri³

1, 2, 3 Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana,
Jl. Adisucipto Penfui, Kupang, NTT.

Email: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Simulasi kinerja pada batch air blast freezer menggunakan dua jenis refrigeran yaitu R404A dan R123YF. *Air blast freezer* adalah alat yang digunakan dalam industri pengolahan makanan dan minuman untuk mendinginkan produk secara cepat dengan memanfaatkan udara dingin yang dihasilkan melalui pendinginan konveksi. Dalam penelitian ini, pemodelan dan simulasi sistem *batch air blast freezer* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak pemodelan komputer Coolselector®2 versi 3.6.1. Coolselector®2. Variabel yang dipertimbangkan dalam simulasi meliputi ukuran ruang pendingin, kecepatan aliran udara, distribusi udara, dan karakteristik geometri produk. Analisis dilakukan terhadap kinerja kedua refrigeran R404A dan R123yf. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan refrigeran R123yf sebagai alternatif pengganti R404A juga dapat memberikan panduan dalam memilih refrigeran yang lebih ramah lingkungan tanpa mengorbankan kinerja sistem. Terjadi peningkatan efisiensi dan kualitas produk industri pengolahan sehingga dapat mengoptimalkan proses pendinginan dan meningkatkan produktivitas secara keseluruhan.

ABSTRACT

Performance simulation on a batch air blast freezer using two types of refrigerant, namely R404A and R123YF. Air blast freezers are devices used in the food and beverage processing industry to cool products quickly by utilizing cold air produced by convection cooling. In this research, modeling, and simulation of a batch air blast freezer system was carried out using Coolselector®2 version 3.6.1 computer modeling software. Coolselector®2. The variables considered in the simulation include the size of the cooling chamber, air flow velocity, air distribution, and product geometric characteristics. Analysis was carried out on the performance of the two refrigerants R404A and R123yf. The analysis results show that the use of R123yf refrigerant as an alternative to R404A can also provide guidance in selecting a more environmentally friendly refrigerant without sacrificing system performance. There has been an increase in the efficiency and quality of processing industry products so that they can optimize the cooling process and increase their overall productivity.

Keywords: *Air blast freezer simulation; refrigerants R404A and R1234yf; a collection of air blast freezers; Coolselector®2 version 3.6.1. Coolselector®2*

PENDAHULUAN

Sistem refrigerasi dalam kehidupan manusia sangat berguna dalam bidang industri maupun untuk keperluan komersil lainnya. Sistem refrigerasi telah digunakan secara khusus untuk proses pengawetan makanan atau bahan pangan dengan cara didinginkan atau dibekukan. Pendinginan umumnya merupakan metode pengawetan yang ringan, pengaruhnya kecil sekali terhadap perubahan mutu suatu bahan pangan secara keseluruhan. Oleh karena itu, pendinginan seperti lemari pendingin sangat cocok untuk memperpanjang

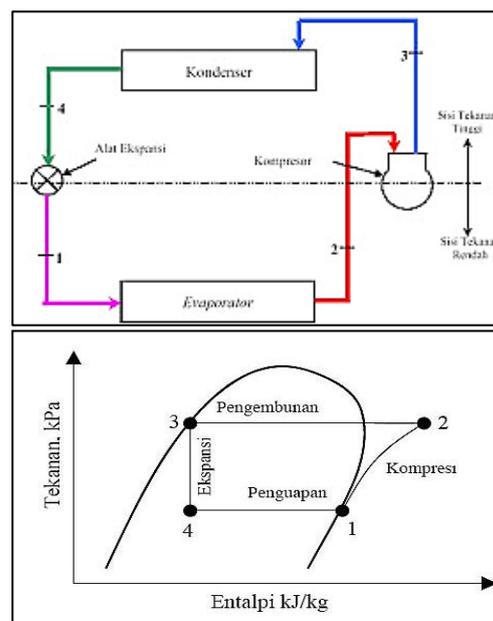
kesegaran atau masa simpan dari suatu produk bahan makanan tertentu [1].

Salah satu industri yang melihat peluang ini adalah industri perikanan untuk memenuhi kebutuhan pangan hewani khususnya ikan bagi masyarakat, para pelaku usaha pengolahan hasil perikanan pada Unit Pengolahan Ikan (UPI) melakukan aktifitas pengolahan ikan yang dilengkapi dengan mesin refrigerasi untuk pengawetan ikan dalam rangka meningkatkan nilai tambah produk hasil perikanan [2]. Menurut [3], sistem pendinginan salah satu cara pengawetan makanan yang menarik karena mempunyai

potensi untuk menghindari penggunaan bahan pengawet, sesuatu yang menjadi semakin penting bagi konsumen.

Air Blast Freezer merupakan teknik pembekuan yang umum digunakan di seluruh dunia untuk membekukan berbagai komoditas pangan mulai dari karkas hingga barang kemasan. Proses pembekuan produk pada suhu rendah tetapi kadang-kadang pada suhu kamar yang dilakukan dengan cepat, antara 12 dan 48 jam, hingga suhu penyimpanan yang diinginkan bervariasi sesuai produk (misalnya ikan = $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, daging sapi = $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$). Prinsip kerja dan komponen utama *Air Blast Freezer* adalah Siklus refrigerasi kompresi uap. Produk yang disimpan di rak atau troli, atau digantung pada pengait pada rel geser (untuk karkas) dimasukkan secara manual ke dalam *Air Blast Freezer*. Saat freezer dihidupkan, kipas meniupkan udara bertemperatur rendah dengan laju aliran tinggi dari evaporator ke produk dan kembali lagi ke evaporator. Sehingga, sirkulasi udara bersuhu rendah yang digerakkan oleh kipas bersentuhan langsung dengan makanan. Lama pembekuan tergantung pada; suhu, kecepatan udara, ukuran produk, bentuk, sifat termal, serta tingkat kontak antara masing-masing bagian atau kemasan produk dan udara pendingin. Jika dimensi produk kecil dan geometrinya sesuai, waktu pembekuan singkat dan kualitas produk yang memadai dapat dicapai. Freezer beroperasi hingga produk dibekukan dan mencapai suhu yang diinginkan, dan kemudian dimatikan untuk pembongkaran manual [4].

Siklus kerja utama dari sistem kompresi uap adalah [4] adalah pertama proses dalam kompresor dimana fasa yang masuk ke kompresor adalah uap jenuh, dengan tekanan dan temperatur yang rendah. Kerja diberikan pada refrigeran dengan cara dikompresi agar tekanannya naik sehingga temperaturnya ikut naik. Proses ini menyebabkan uap refrigeran menjadi uap *superheat* yang akan keluar dari kompresor dengan tekanan tinggi, selanjutnya uap refrigeran yang bertekanan dan bertemperatur tinggi akan masuk ke kondenser.



Gambar 1. Sistem kompresi uap standar dan diagram P-h [5].

Dalam kondenser, karena temperatur refrigeran lebih tinggi dari temperatur lingkungan, maka kalor dari refrigeran akan dilepas melalui dinding pipa kondenser ke lingkungan sekitar. Proses pelepasan atau perpindahan kalor secara konveksi dari refrigeran ini dapat dilakukan secara konveksi alami maupun secara konveksi paksa dengan bantuan *fan*. Pada saat uap refrigeran yang berasal dari *discharge* kompresor masuk ke kondenser maka uap *superheat* tersebut akan didinginkan dan diembunkan pada keadaan saturasi. Di kondenser temperatur akan tetap tinggi namun refrigeran akan berubah fasa menjadi cair.

Proses ini terjadi dalam kondisi entalpi yang konstan, hal ini berarti tidak terjadi penambahan entalpi tetapi terjadi drop tekanan dan penurunan temperatur. Proses ini terjadi di alat ekspansi dan selanjutnya akan mengalami proses evaporasi.

Proses evaporasi terjadi di evaporator, temperatur refrigeran didalam pipa evaporator lebih rendah dari ruang refrigerasi, sehingga terjadi proses penguapan pada fluida refrigeran karena menyerap kalor dari beban pendingin yang ada di dalam ruang refrigerasi.

Setelah masuk ke evaporator refrigeran akan berubah *fasa* dari *fasa* campuran menjadi *fasa* uap jenuh.

Salah satu industri yang menggunakan siste ABF ini adalah PT. Holy Mina Jaya Kupang untuk mendinginkan dan membekukan ikan sebelum produk tersebut dimasukan dalam *cold storage* untuk disimpan dalam waktu yang lebih lama. Namun pada ABF yang terdapat di PT. Holy Mina Jaya Kupang memiliki beberapa kekurangan seperti suhu pada ABF tersebut sering tidak menentu dan melebihi suhu maksimal untuk pendinginan produk pada saat digunakan serta penggunaan refrigerant.

Hal inilah yang mendorong peneliti untuk melakukan perancangan ulang (*redesign*) *batch air blast freezer* menggunakan perangkat lunak *Coolselector*®2 versi 4.6.2 dengan dan menganalisis kinerja ABF tersebut menggunakan perangkat lunak *CoolTools* versi 1.01 di PT. Holy Mina Jaya Kupang guna melakukan optimasi konsumsi energy serta meningkatkan efisien sistem refrigerasi tersebut sehingga dapat membandingkan hasil *redesign* tersebut dengan kondisi riil di lapangan.

Dengan bantuan diagram *T-s* dan *P-h* dan tabel sifat-sifat termodinamika refrigeran, maka besaran-besaran penting dalam analisis energi ABF dapat diketahui. Besaran ini adalah daya kompresor, laju pelepasan kalor, kapasitas refrigerasi, dan koefisien prestasi (*COP*). Untuk melakukan analisis energi ABF sistem kompresi uap maka analisis harus dilakukan pada kondisi sistem yaitu stedi.

Pada saat refrigeran melewati evaporator, perpindahan kalor dari ruang yang didinginkan menghasilkan penguapan refrigeran, maka laju perpindahan kalor di evaporator adalah [5] :

$$Q_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (1)$$

Dimana m adalah laju aliran massa refrigeran. Laju perpindahan kalor QL dapat disebut sebagai kapasitas refrigerasi. Refrigeran yang meninggalkan evaporator dikompresikan ke tekanan dan temperatur yang relatif tinggi oleh kompresor. Diasumsi

tidak ada perpindahan kalor ke atau dari kompresor, maka daya kompresor adalah:

$$W_C = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

Selanjutnya, refrigeran melalui kondensor, di mana refrigerant terkondensasi dan terjadi perpindahan kalor dari refrigeran ke lingkungan sekitarnya yang lebih dingin. Laju perpindahan kalor dari refrigeran adalah:

$$Q_C = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (3)$$

Akhirnya, refrigeran pada kondisi 3 memasuki katup ekspansi dan berekspansi hingga mencapai tekanan evaporator. Proses ini biasanya dimodelkan sebagai proses trol (pencekikan) sehingga

$$h_4 = h_3 \quad (4)$$

Di dalam sistem kompresi uap, masukan daya bersih sebanding dengan daya kompresor, karena pipa tidak melibatkan masukan atau keluaran daya. Dengan menggunakan persamaan-persamaan yang diperkenalkan di atas, maka koefisien prestasi (*COP*) untuk sistem refrigerasi kompresi uap dari adalah:

$$COP = \frac{Q_E}{W_C} \quad (5)$$

Kinerja termodinamika ABF sangat dipengaruhi oleh refrigeran yang digunakan sebagai fluida kerja (zat pendingin) karena terdapat beda temperatur yang terbatas antara sistem dan lingkungannya, di mana ini merupakan sumber utama ireversibilitas sistem refrigerasi. Potensi pemanasan global (GWP) dari zat pendingin yang digunakan dalam sistem pendingin dan freezer komersial kecil, harus lebih rendah dari 150 sesuai dengan aturan UE [6].

Salah satu topik penelitian yang banyak diminati saat ini adalah tentang pemilihan pasangan refrigeran [7]. Pasangan refrigeran yang sesuai mampu memberikan kenaikan suhu yang besar sekaligus meningkatkan kinerja sistem [8]. Penurunan temperatur evaporasi pada hakikatnya akan mengakibatkan penurunan kinerja, dan efisiensi sistem, begitupun sebaliknya [9]. Karena kekhawatiran terhadap pemanasan global, konsumsi atau produksi hidrofluorokarbon (HFC) berkurang [10]. Maka berbagai pilihan untuk mengganti zat

pendingin dengan *global warming potential* GWP tinggi, di antara semua cairan hidrofluorolefin (HFO), seperti R404A, R1234yf, merupakan alternatif yang sangat baik. Dengan GWP <1, R1234yf merupakan pengganti R134a yang menjanjikan. Studi menggambarkan bahwa R1234yf dapat direkomendasikan untuk sistem skala kecil dibandingkan R134a, namun proses optimasi diperlukan untuk mencapai kondisi pengoperasian optimal.

Penggunaan R404A sebagai refrigerant dapat digunakan dengan peningkatan efek refrigerasi sehingga heat yang ditangkap dari lingkungan menjadi lebih baik [11]. Dalam pengujian [12], tentang analisis perbandingan efisiensi energi dan kinerja antara sistem kaskade CO₂ dan sistem konvensional ekspansi langsung menggunakan R404A dan R22, ditemukan bahwa COP dan kapasitas panas sistem R-134a mengalami penurunan 0-27%. Perbandingan antara R-404A dan 4 jenis refrigerant alternatif; R-448A, R-449A, R-455A, R-454C menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas R-404A lebih tinggi dibandingkan dengan refrigeran alternatif. Namun, penurunan tekanan R-404A lebih kecil dibandingkan dengan penurunan tekanan alternatif. Penjelasan yang mungkin diberikan berdasarkan sifat termodinamik dan perubahan suhu di antara zat pendingin. Pada fluks panas yang rendah, koefisien perpindahan panas meningkat seiring dengan peningkatan fluks massa atau kualitas uap. Namun, pada fluks panas yang tinggi, koefisien perpindahan panas relatif tidak bergantung pada fluks massa atau kualitas uap [13]. Pengujian selanjutnya oleh [14], Dimana Sistem pendingin terdiri dari siklus kaskade (CO₂/HFC-404A), HFC-404A, juga HFC-404A dan HCFC-22. Hasil pengujian menunjukkan dampak sistem kaskade yang beroperasi dengan CO₂ di atmosfer jauh lebih kecil dibandingkan dengan dua sistem ekspansi langsung.

Terjadi penghematan energi dan peningkatan kapasitas pendinginan Ketika menggunakan HFO1234yf [15]. Hasil penelitian analisis energi dan eksergi sistem refrigerasi domestik dengan menggunakan

R1234yf sebagai pengganti drop-in untuk R134a menunjukkan bahwa ireversibilitas terkonsentrasi pada kompresor, hal ini terjadi pada R1234yf dan R134a. Analisis eksergi R1234yf mungkin bukan alternatif untuk R134a [16].

METODE PENELITIAN

Simulasi Air Blast Freezer

Simulasi ABF menggunakan perangkat lunak *Coolselector@2* versi 3.6.1. *Coolselector@2* merupakan kumpulan program yang digunakan untuk desain, analisis energi, dan optimasi sistem refrigerasi (*air conditioning, refrigeration, dan freezer*). Perangkat lunak ini dikembangkan oleh Grup Danfoss yang merupakan perusahaan berkantor pusat di Nordborg, Denmark. Perusahaan ini menghasilkan komponen - komponen, dan sistem refrigerasi untuk pengkondisian udara, refrigerasi, dan freezer. *Coolselector@2* versi 3.6.1 (Gambar 2) adalah perangkat lunak yang *freeware (open source)* [17].

Coolselector@2 terdiri dari sejumlah program yang semuanya dapat diakses melalui *user-friendly interface*. Program dapat dibagi menjadi 7 kelompok utama antara lain : *Valve and Line Components, Components in Series, Commercial Applications, Industrial Applications, Compressors and Condensing Units, Electronic Controls dan Sensor and Switches*.

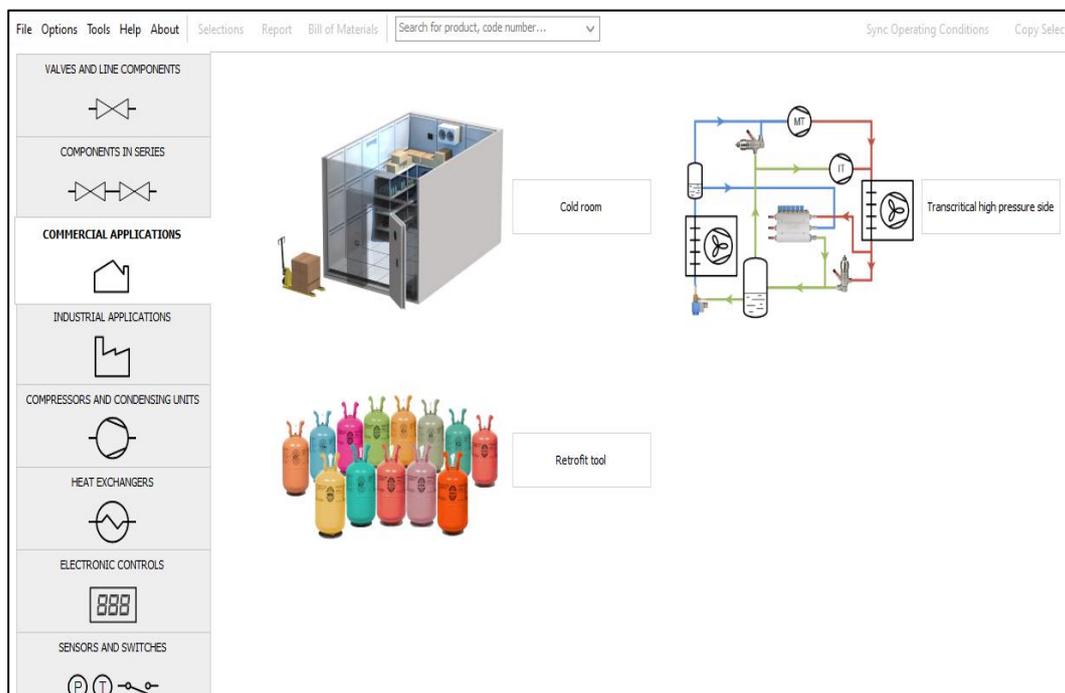
Data awal

Data awal yang dimaksud dalam penelitian ini diperoleh dari lokasi penelitian, yaitu di *Air Blast Freezer* milik PT. Holly Mina Jaya Kupang. Data awal penelitian ini berhubungan dengan kondisi dalam dan luar ruangan *Air Blast Freezer*. Data awal tersebut nantinya dapat digunakan untuk membantu perancangan dan analisis kinerja sistem pendingin pada *Air Blast Freezer*. Berikut data awal penelitian yang diperoleh dari lokasi penelitian.

Analisis Kinerja Unit Kondensasi

Analisis kinerja *unit kondensasi* untuk ruang *ABF* menggunakan perangkat lunak *CoolTools* (Gambar 3). *CoolTools* adalah kumpulan model simulasi untuk sistem pendingin dan masing-masing memiliki tujuan tertentu misalnya analisis siklus, ukuran

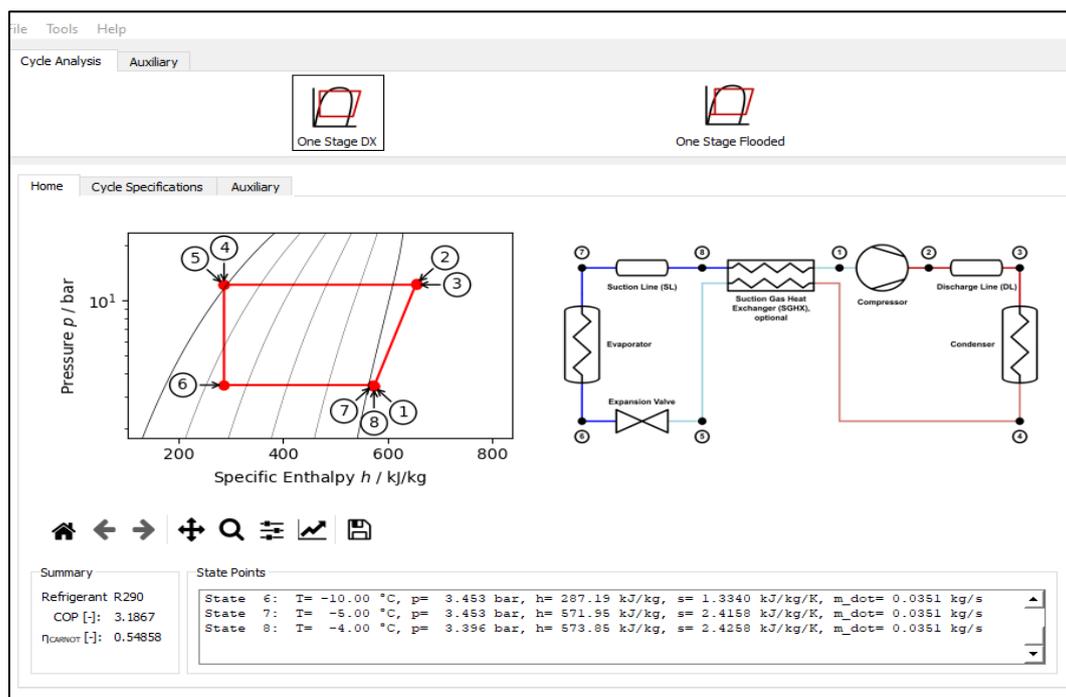
komponen utama, analisis energi dan optimasi [18]. Nilai total beban kalor ruangan (Q_{TOT}) yang digunakan sebagai data kapasitas pendinginan (*cooling capacity*) diperoleh dari perhitungan pada perangkat lunak *Coolselector®2*.



Gambar 2. Layar Utama Perangkat Lunak Coolselector®2

Tabel 1. Data awal kondisi ruangan ABF

No.	Data Awal Penelitian	Kapasitas	
1.	Dimensi	Panjang	5,5 m
		Lebar	2,8 m
		Tinggi	2,8 m
2.	Kapasitas Air Blast Freezer	4 Ton	
3.	Dinding Polyurethane	Tebal	150 mm
4.	Temperatur	Ruangan	-35°C
		Lingkungan	30°C
		Evaporasi	-30°C
		Lantai	10°C
5.	Kelembaban Udara	Ruangan	25%
		Lingkungan	20%
6.	2 Buah fan	1600 W	
7.	Heater Defrosts	Coil	11.200 W
		Drip tray	11.200 W
8.	Pekerja	2 Orang	



Gambar 3. Layar Utama Perangkat Lunak CoolTools.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi

Simulasi ruangan ABF (Gambar 4), memiliki panjang 6 meter, lebar 3 meter dan tinggi 3 meter. Temperatur lingkungan sekitar ruangan 30°C (303K) dengan kelembaban relatif 55%, kuantitas per hari produk ikan sebesar 4000 kg dengan temperatur ikan masuk 278 K (5°C), temperatur ruangan ABF diatur pada suhu 238K (-35°C).

Temperatur tersebut dijaga agar mencapai temperatur produk yaitu -18°C (255K). Kelembaban relatif pada ruangan ABF dengan temperatur ruangan 238 K adalah 90%. Lamanya pengoperasian ruangan ABF diperkirakan 17 jam. Dinding ruangan ABF dipilih tipe *Polyurethane* dengan tebal 150 mm (0,15 m). Dalam proses perhitungan *cooling capacity* pada perancangan ini nilai beban tambahan tersebut diantaranya lampu (108 W), *fan* (1600 W), pekerja (2 jam per hari) dan *defrost* (4 jam per hari tiap 60 menit).

Hasil analisis pada tampilan kondisi operasi (Gambar 5), menunjukkan *cooling capacity* yang diperoleh dari desain ABF adalah 4,656 kW.

Hasil Analisis Kinerja Unit Kondensasi

Kinerja unit kondensasi dengan varian refrigeran pada kondisi lapangan yaitu 404A (Gambar 6) serta refrigeran R1234yf (Gambar 7) sebagai refrigeran pembanding dihitung menggunakan perangkat lunak CoolTools versi 1.01 dimana nilai *cooling capacity* didapat dari perhitungan sebelumnya menggunakan perangkat lunak Coolselector®2. Analisis dilakukan dengan memvariasikan temperatur evaporasi kedalam beberapa tingkat (-15°C, -20°C, -25°C, -30°C, -35°C) dan temperatur kondensasi konstan pada 35°C.

Hasil lengkap analisis kinerja unit kondensasi menggunakan refrigeran R404A dengan variasi temperatur evaporasi dari -15°C sampai -35°C dapat dilihat pada tabel 2. Hasil lengkap analisis kinerja unit kondensasi menggunakan refrigeran R1234yf dengan

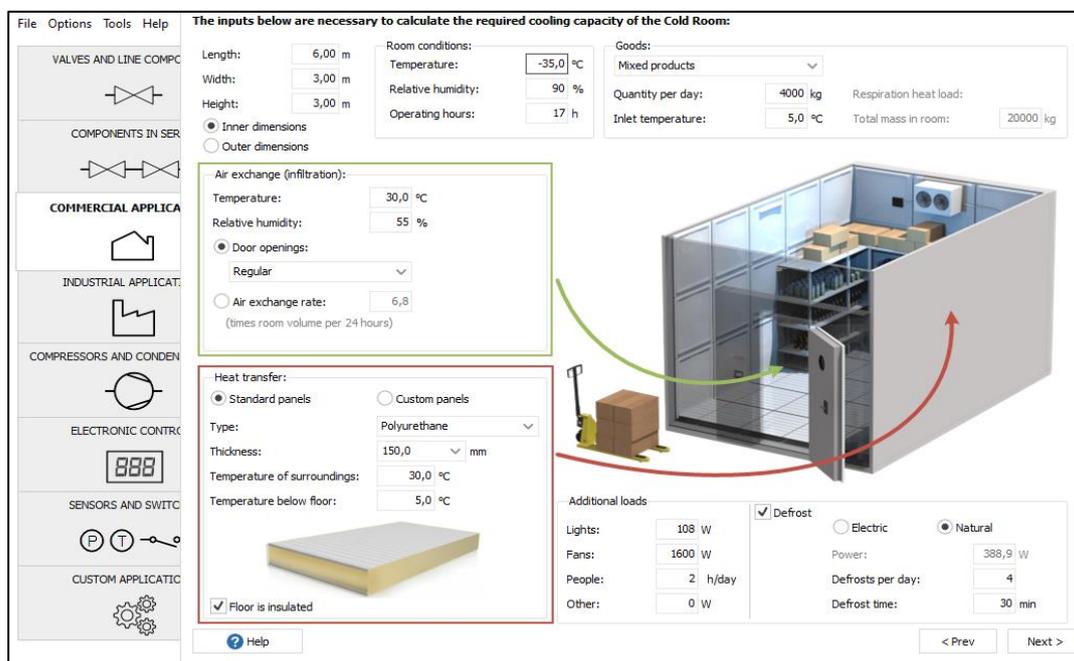
variasi temperatur evaporasi dari -15°C sampai -35°C dilihat pada tabel 3.

Tabel 2. Hasil lengkap perhitungan kinerja siklus refrigerant R404A

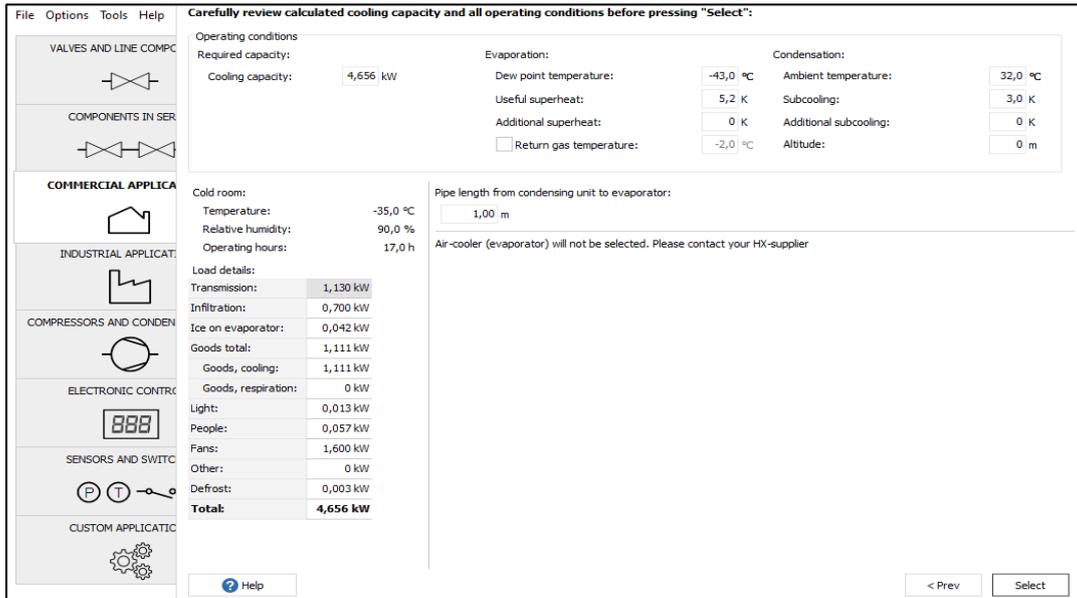
No	T_E ($^{\circ}\text{C}$)	T_C ($^{\circ}\text{C}$)	Q_E (kW)	Q_C (kW)	W (kW)	COP	\dot{m} (kg/s)
1	-15	35	4656	6371	1857	2,5073	40,92
2	-20	35	4656	6627	2142	2,1739	41,99
3	-25	35	4656	6908	2455	1,8968	43,14
4	-30	35	4656	7218	2799	1,6785	44,37
5	-35	35	4656	7561	3180	1,4641	45,69

Tabel 3 Hasil analisis perhitungan kinerja siklus refrigerant R1234yf.

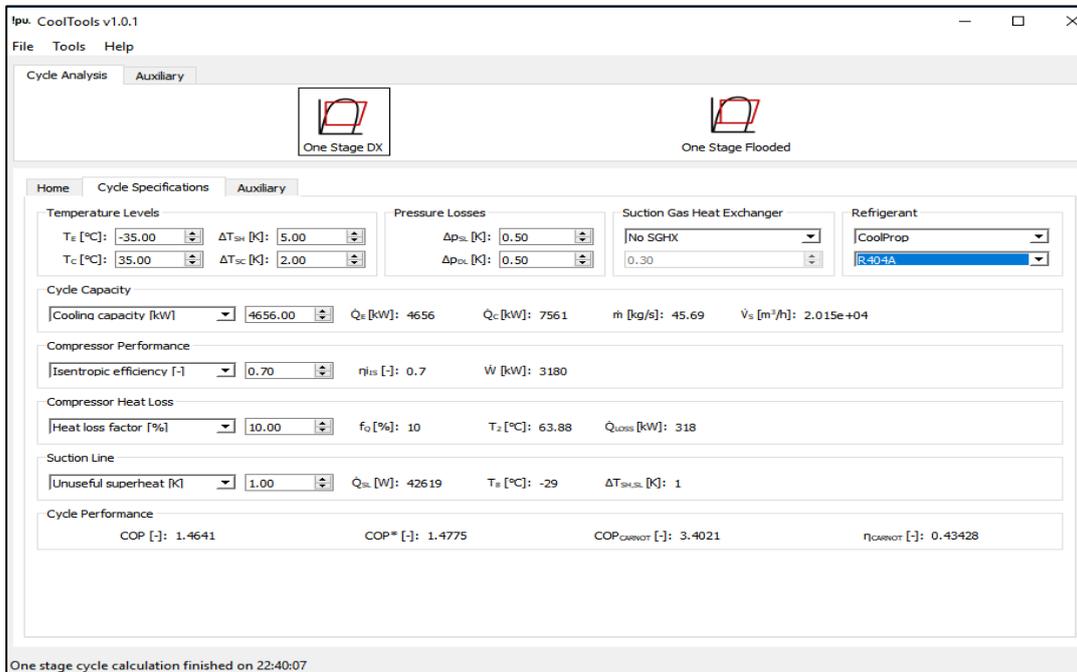
No	T_E ($^{\circ}\text{C}$)	T_C ($^{\circ}\text{C}$)	Q_E (kW)	Q_C (kW)	W (kW)	COP	\dot{m} (kg/s)
1	-15	35	4656	6273	1753	2,6565	41,22
2	-20	35	4656	6517	2024	2,3003	42,52
3	-25	35	4656	6788	2323	2,0046	43,89
4	-30	35	4656	7083	2653	1,7558	45,37
5	-35	35	4656	7410	3015	1,5441	46,95



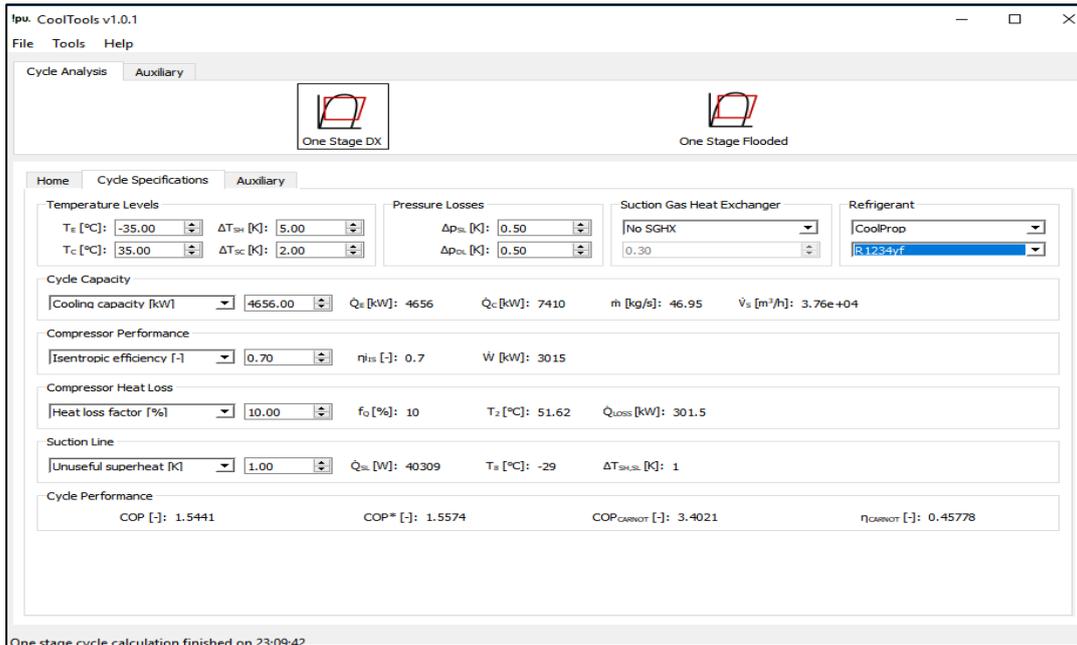
Gambar 4. Tinjauan beban kalor ABF



Gambar 5. Kondisi operasi



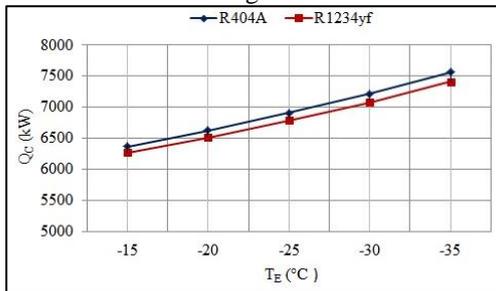
Gambar 6. Cycle specifications refrigeran R404A temp. -35°C.



Gambar 7. Cycle specifications refrigeran R1234yf temp. -35°C.

PEMBAHASAN

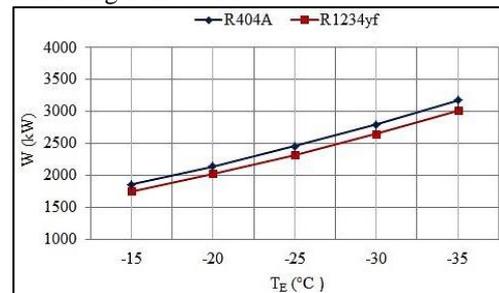
Gambar 8 menyajikan hubungan antara temperatur evaporasi terhadap laju pelepasan kalor di kondensor untuk refrigeran R404A dan R1234yf, di mana terlihat bahwa dengan menurunnya temperatur evaporasi dalam evaporator maka laju pelepasan kalor di kondensor akan meningkat.



Gambar 8. Hubungan tempeatur evaporasi dan laju pelepasan kalor di kondensor

Gambar ini terlihat laju pelepasan kalor refrigeran R404A lebih besar dibandingkan dengan refrgeran R1234yf, ini dikarenakan nilai entalpi refrigeran R404A lebih kecil dari refrgeran R1234yf. Sehingga kalor yang

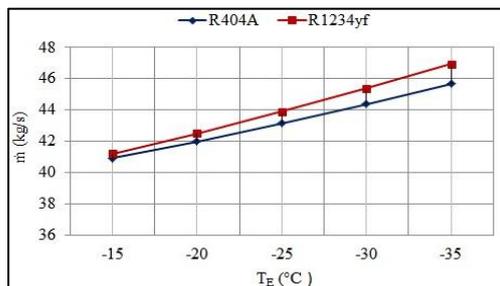
dilepaskan ke udara lingkungan oleh refrigrant 1234yf memiliki nilai lebih tinggi dari refrigerant 404A.



Gambar 9. Hubungan tempeatur evaporasi dan daya kompresor

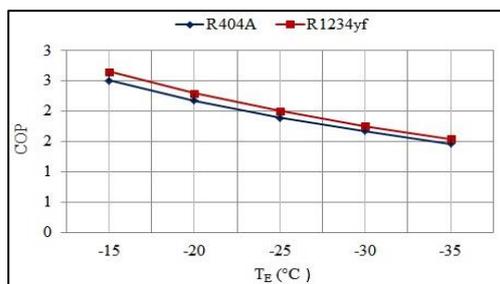
Gambar 9. Menyajikan hubungan antara temperatur evaporasi dengan daya kompresor untuk refrigeran R404A dan R1234yf, dalam gambar ini terlihat bahwa dengan menurunnya temperatur evaporasi maka daya kompresor akan meningkat dimana refrigeran R404A lebih besar dibandingkan dengan refrgeran R1234yf. Hal ini juga disebabkan karena nilai entalpi refrigeran R404A lebih besar dari refrigeran R1234yf sehingga daya kompresor

sistem yang menggunakan R404A akan menjadi lebih besar.



Gambar 10. Hubungan temperatur evaporasi dan laju aliran massa refrigerant

Gambar 10. Menyajikan hubungan antara temperatur evaporasi dengan laju aliran massa refrigeran refrigeran R404A dan R1234yf. Dalam gambar terlihat bahwa laju aliran massa pada AC *split* yang menggunakan refrigeran R404A lebih kecil dibandingkan dengan refrigerant R1234yf, ini dikarenakan nilai densitas refrigerant R404A lebih kecil dibandingkan refrigerant R1234yf.



Gambar 11. Hubungan temperatur evaporasi dan COP

Gambar 11. Menyajikan hubungan antara temperatur evaporasi dengan koefisien kinerja (COP). Dalam gambar ini terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur evaporasi maka koefisien kinerja unit kondensasi akan menurun. Menurunnya koefisien kinerja ini disebabkan oleh saat kapasitas pendinginan konstan, daya kompresor unit pendingin mengalami peningkatan. Terlihat juga bahwa koefisien kinerja (COP) untuk sistem yang menggunakan refrigerant R1234yf memiliki koefisien kinerja tertinggi dibandingkan dengan refrigerant R404A

KESIMPULAN

- Hasil simulasi dan analisis kinerja *Air Blast Freezer* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa: Kapasitas pendinginan (*cooling capacity*) yang dibutuhkan untuk mendinginkan ruangan *Air Blast Freezer* sesuai hasil desain menggunakan *software Coolselector®2* adalah 4,656 kW. Perbandingan refrigerant R404A dan R1234yf, terlihat laju pelepasan kalor refrigerant R404A lebih besar dibandingkan dengan refrigerant R1234yf.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Ridhuan and A. Rifai, "ANALISA KEBUTUHAN BEBAN PENDINGIN DAN DAYA ALAT PENDINGIN AC UNTUK AULA KAMPUS 2 UM METRO."
- [2] F. Bennett, D. Clarke, J. B. Evans, A. Hopper, A. Jones, and D. Leask, "Piconet: embedded mobile networking," *IEEE Personal Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 8–15, 1997, doi: 10.1109/98.626977.
- [3] D. K. Hoang and J. K. Carson, "Air blast freezing in the food industry," in *Low-Temperature Processing of Food Products*, Elsevier, 2024, pp. 117–146. doi: 10.1016/b978-0-12-818733-3.00004-7.
- [4] P. Dempsey and P. Bansal, "The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations," in *Applied Thermal Engineering*, Aug. 2012, pp. 71–83. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.12.013.
- [5] Yunus A. Cengel and Michael A. Boles, *THERMODYNAMICS An Engineering Approach*, 2nd ed. McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [6] Official Journal of the European Union, "Regulation (EU) No 5172014 of the European Parliament and the Council of 16 April 2014".
- [7] R. Llopis, E. Torrella, R. Cabello, and D. Sánchez, "Performance evaluation of

- R404A and R507A refrigerant mixtures in an experimental double-stage vapour compression plant,” *Appl Energy*, vol. 87, no. 5, pp. 1546–1553, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.10.020.
- [8] O. Rezayan and A. Behbahaninia, “Thermoeconomic optimization and exergy analysis of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems,” *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 888–895, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.12.022.
- [9] M. M. Dwinanto, Suhanan, and Prajitno, “Exergy analysis of a dual-evaporator refrigeration systems,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jan. 2017. doi: 10.1063/1.4968264.
- [10] UN Environment Programme, “The Kigali amendment to the montreal protocol: HFC Phase-down,” <https://www.unep.org/ozonaction/resources/factsheet/kigali-amendment-montreal-protocol-hfc-phase-down>.
- [11] I. Dzulkarnaen *et al.*, “ANALISIS EFEK REFRIGERASI DAN DAYA KOMPRESI PADA AIRCOOLED CHILLER MENGGUNAKAN REFRIGERAN R404A SEBAGAI REFRIGERAN ALTERNATIF PENGGANTI R22.”
- [12] C. C. Wang, “System performance of R-1234yf refrigerant in air-conditioning and heat pump system - An overview of current status,” *Appl Therm Eng*, vol. 73, no. 2, pp. 1412–1420, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.012.
- [13] C. H. Kim and N. H. Kim, “Evaporation heat transfer and pressure drop of low GWP R-404A alternative refrigerants in a multiport tube,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 184, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122386.
- [14] A. Da Silva, E. P. Bandarra Filho, and A. H. P. Antunes, “Comparison of a R744 cascade refrigeration system with R404A and R22 conventional systems for supermarkets,” in *Applied Thermal Engineering*, Aug. 2012, pp. 30–35. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.12.019.
- [15] C. Aprea, A. Greco, and A. Maiorino, “An experimental investigation on the substitution of HFC134a with HFO1234YF in a domestic refrigerator,” *Appl Therm Eng*, vol. 106, pp. 959–967, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.098.
- [16] J. M. Belman-Flores, V. H. Rangel-Hernández, S. Usón, and C. Rubio-Maya, “Energy and exergy analysis of R1234yf as drop-in replacement for R134a in a domestic refrigeration system,” *Energy*, vol. 132, pp. 116–125, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.05.074.
- [17] AFT-Applied Flow Technology, “Transitioning from HCFCs to HFCs and Natural Refrigerants: A Comprehensive Guide,” <https://hvac-eng.com/category/software/>.
- [18] IPU, “CoolTools,” <https://www.ipu.dk/products/cooltools/>.