

Studi Komputasional Sistem Refrigerasi *Cascade* R290/R404A pada *Reefer Container* ½ Ton

Verrill Rafi Hadidaffa, Sutopo Purwono Fitri, dan Ede Mehta Wardhana
Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: sutopopf@gmail.com

Abstrak—*Reefer Container* konvensional pada umumnya menggunakan siklus kompresi uap satu tingkat dimana suhu yang dihasilkan sekitar -20°C . Maka dari itu untuk peningkatan suhu yang lebih baik dan efisiensi sistem sendiri dalam penelitian ini dilakukan yaitu pengubahan sistem refrigerasi dari satu tingkat atau *single-stage* menjadi *cascade* dimana pada sistem tersebut merupakan penggabungan sistem kompresi uap satu tingkat menjadi dua dengan dua jenis refrigeran, dua kompresor dan ditambahkan *Heat Exchanger* dimana pada HE (*Heat Exchanger*) terdapat kondensor LS (*Low Stage*) dan evaporator HS (*High Stage*). Sistem *cascade* sendiri dapat mencapai suhu yang lebih rendah dibandingkan konvensional atau *single-stage*. Pada sistem refrigerasi *cascade* juga memiliki efisiensi sistem pendinginan yang lebih baik COP (*Coefficient of Performance*) akan tetapi konsumsi energi yang dihasilkan lebih tinggi dikarenakan pengaruh daya kompresor yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem refrigerasi konvensional atau *single-stage*. Penelitian ini ditujukan untuk menentukan parameter desain yang lebih optimal dan baik. Untuk sistem refrigerasi konvensional menggunakan refrigeran R404A dan sistem refrigerasi *cascade* menggunakan refrigeran R290 untuk HS (*High State*) dan R404A untuk LS (*Low State*) dengan parameter pada evaporator -20°C dan temperatur kondensor 35°C kemudian pada *Heat Exchanger Low Stage* -5°C dan pada *High Stage* -10°C , serta menganalisa konsumsi energi dan biaya tarif nilai ekonomi tiap sistem refrigerasi per hari dan per bulan. Untuk parameter yang telah ditetapkan sebelumnya akan disimulasikan dengan *software Pack Calculation Pro* dan didapatkan nilai COP (*Coefficient of Performance*) untuk sistem refrigerasi konvensional R404A sebesar 1,71 dan untuk sistem *cascade* R290/R404A sebesar 2,03. Sedangkan untuk konsumsi energi total pada konvensional R404A sekitar 8176,3 kWh dan untuk *cascade* R290/R404A sebesar 19235,2 kWh. Kemudian untuk tarif biaya listrik sistem *cascade* lebih mahal dengan total tarif sebesar Rp 21.442.246,8 per tahunnya dibandingkan konvensional sebesar Rp 9.114.448,66 dengan perbedaan tarif sekitar Rp 12.327.798,19.

Kata Kunci—*Cascade*, COP, Konsumsi Energi, *Reefer Container*, Sistem Refrigerasi.

I. PENDAHULUAN

SISTEM refrigerasi *cascade* adalah modifikasi yang efektif untuk menjaga kualitas dan kesegaran ikan selama pengiriman. Dalam sistem ini, dua jenis refrigeran berbeda digunakan dalam dua siklus yang terhubung menjadi satu sistem. Sistem ini menggabungkan unit kompresi uap satu tingkat dengan komponen *heat exchanger* dari evaporator pada siklus *high stage* (HS) dan *low stage* (LS). Sistem refrigerasi *cascade* memiliki kemampuan untuk memenuhi rentang temperatur rendah dalam *reefer container* dengan efisiensi tinggi. Berbeda dengan sistem tunggal yang menggunakan satu kompresor, sistem *cascade* menggunakan lebih dari satu kompresor seperti pada sistem refrigerasi bertingkat (*multistage*) atau kombinasi dua atau lebih sistem refrigerasi tunggal (*cascade*) dengan satu sebagai *high-stage*

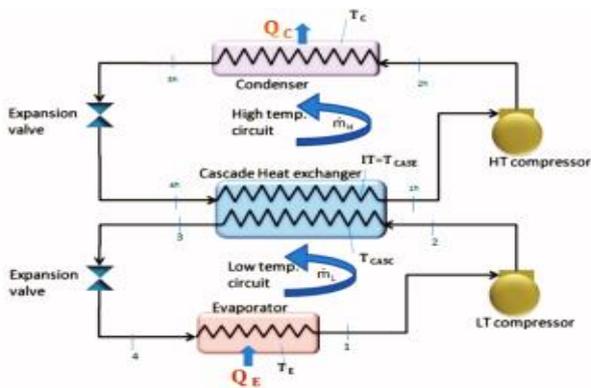
(HS) dan yang lain sebagai *low-stage* (LS). Dari kedua pilihan tersebut, sistem refrigerasi *cascade* dianggap sebagai pilihan terbaik untuk menghasilkan penghematan daya dan meningkatkan performa unjuk kerja (*Coefficient Of Performance*) [1]. Sistem refrigerasi *cascade* merupakan salah satu alternatif yang banyak digunakan pada sistem refrigerasi temperatur rendah, aplikasi di bidang komersial pada pengawetan dan penyimpanan makanan dibutuhkan temperatur -18°C sampai dengan -35°C [2]. Skema dapat dilihat pada Gambar 1. Sistem kompresi uap satu tahap tidak efisien dalam situasi di mana suhu evaporator sangat rendah atau suhu kondensor sangat tinggi. Hal ini menyebabkan penurunan kinerja pendinginan dan peningkatan beban kerja pada kompresor. Sebagai alternatif, disarankan untuk menggunakan sistem refrigerasi *cascade* atau multi tingkat. Sistem ini terdiri dari dua atau lebih siklus yang saling terhubung, seperti multi-tingkat kompresi, multi-tingkat evaporator, atau kombinasi keduanya. Sistem *cascade* atau multi tingkat lebih efisien dalam memenuhi kebutuhan pendinginan dengan *temperature lift* yang tinggi [3].

Kondensor pada sistem *high temperature* (HT) yang disebut sebagai tahap pertama atau tahap tekanan tinggi, biasanya didinginkan oleh kipas dengan udara sekitarnya. Dalam beberapa kasus dapat menggunakan pendingin air akan tetapi pendinginan udara lebih umum digunakan. Evaporator pada sistem *low temperature* (LT) digunakan untuk mendinginkan kondensor pada sistem LT yang disebut tahap kedua atau tahap tekanan rendah. Unit yang merupakan evaporator sistem HT dan kondensor sistem LT sering disebut sebagai kondensor antar tahap (*inter-stage*) atau kondensor *cascade* [4]. Penggunaan sistem refrigerasi multi-tingkat atau *cascade* dapat mengatasi keterbatasan sistem kompresi uap satu tahap dan memberikan solusi yang lebih efisien dan sesuai dengan kebutuhan penggunaan yang diinginkan.

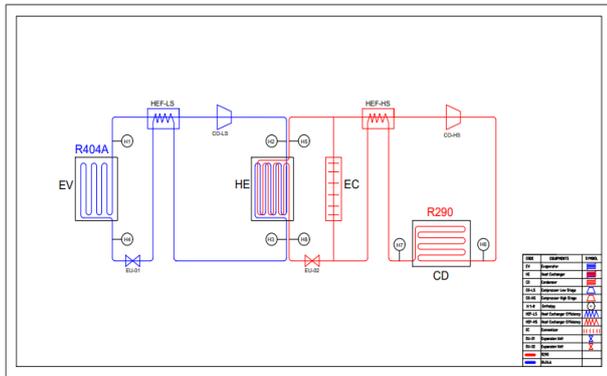
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Reefer Container*

Reefer container adalah kontainer khusus yang digunakan untuk menjaga kualitas dan ketahanan muatan selama pengiriman dengan suhu ruangan yang rendah. Setiap muatan atau komoditas memiliki persyaratan temperatur yang berbeda sesuai dengan karakteristiknya agar tidak mengalami degradasi atau pembusukan sebelum sampai ke tujuan. *Reefer container* merupakan salah satu jenis petikemas dengan sistem pendingin tertutup. Untuk menjaga temperatur muatan, *reefer container* menggunakan *power supply* diesel atau genset selama transportasi. Namun, saat berada di kapal atau dalam perjalanan, sistem refrigerasi mendapatkan suplai daya dari kapal. Suhu yang diatur dalam *reefer container*



Gambar 1. Skema Sistem Refrigerasi Cascade.



Gambar 2. Perancangan Sistem Refrigerasi Cascade R290/R404A.

biasanya berkisar antara -40°C hingga $+30^{\circ}\text{C}$. Sensor *flow rate* terdapat pada panel monitor dan jumlahnya dipengaruhi oleh bukaan ventilasi. Dengan menggunakan *reefer container*, muatan dapat tetap terjaga kualitasnya selama pengiriman, dan berbagai suhu dapat diatur sesuai dengan persyaratan muatan untuk mencegah kerusakan atau pembusukan sebelum mencapai tujuan akhir [3].

B. Sistem Refrigerasi Konvensional

Pada dasarnya *reefer container* menggunakan sistem referigerasi atau sistem pendingin yang memanfaatkan kompresi uap. Sistem tersebut merupakan sistem yang paling sederhana daripada alternatif sistem yang ada atau yang lain, dimana komponen-komponen setiap prosesnya hanya ada satu buah sistem kerja. Sebuah sistem kompresi uap sederhana hanya terdiri dari sebuah kompressor, sebuah kondensor, sebuah katup ekspansi dan sebuah evaporator yang dihubungkan dengan instalasi perpipaan. Sistem refrigerasi sendiri juga bisa didefinisikan dengan suatu proses penurunan suhu dalam sebuah ruangan maupun kontainer sehingga suhu didalam ruangan tersebut lebih rendah dari suhu lingkungan di sekitar ruangan maupun benda tersebut [3]. Sistem refrigerasi adalah usaha untuk mempertahankan suhu rendah yaitu suatu proses mendinginkan udara sehingga dapat mencapai temperatur dan kelembaban yang sesuai dengan kondisi yang dipersyaratkan terhadap kondisi udara dari suatu ruangan tertentu.

C. Komponen Utama Sistem Refrigerasi

Komponen – komponen utama dalam sistem refrigerasi terdiri dari beberapa komponen. Jika salah satu dari komponen tersebut tidak ada maka sistem refrigerasi tidak akan dapat bekerja karena komponen tersebut merupakan komponen penting untuk membuat suatu sistem refrigerasi

Tabel 1.
Resume Total Beban Pendinginan Konvensional

Beban Pendinginan Konvensional R404A	
Nama	Q (Watt)
Q Produk	1910.714
Q Infiltrasi	0
Q Transmisi	222.383
Q Peralatan	5
Q Irradiation	0
Subtotal	2138.097
Safety factor, 10%	213.809
Total Beban	2351.907121

Tabel 2.

Resume Total Beban Pendinginan Cascade	
Beban Pendinginan Cascade R290/R404A	
Nama	Q (Watt)
Q Produk	1910.714
Q Infiltrasi	0
Q Transmisi	222.383
Q Peralatan	5
Q Irradiation	0
Subtotal	2138.097
Safety factor, 10%	213.809
Total Beban	2351.907
Beban <i>Low Stage</i> R404A	2351.907
Beban <i>High Stage</i> R290	4887.025

kompresi uap sederhana. Berikut ini adalah beberapa komponen utama dari sistem refrigerasi konvensional:

1) Kompresor

Kompresor merupakan bagian inti dari komponen utama sistem refrigerasi atau sistem pendingin, kompresor sendiri menurunkan tekanan dari sistem pada sisi tekanan rendah yang akan meliputi evaporator dan menaikkan tekanan pada sisi tekanan tinggi, dengan adanya perbedaan tekanan tersebut yang bisa mengakibatkan refrigeran mengalir.

2) Kondensor

Fungsi kondensor merubah uap menjadi cairan dengan beberapa metode atau cara pendinginan. menjelaskan bahwa kondensor menolak panas sensibel dan panas laten dari sistem pendingin. Panas yang dihasilkan tersebut diserap langsung oleh evaporator seperti dari panas kompresi dan gesekan mekanis yang dihasilkan pada langkah kompresi dan setiap panas tersebut diserap oleh refrigeran pada saluran hisap sebelum memasuki kompresor [5].

3) Evaporator

Evaporator merupakan sebuah media penguapan cairan refrigeran yang berasal dari katup ekspansi. Penguapan ini bertujuan untuk menyerap energi panas dari kompartemen yang akan didinginkan melalui perpindahan panas dari dindingnya. Evaporator menghilangkan panas dari ruangan yang didinginkan. Saat udara didinginkan, evaporator mengembunkan uap air [6].

4) Katup Ekspansi

Fungsi utama dari katup ekspansi ini ialah untuk mengontrol laju aliran refrigeran dari sisi kondensasi yang bertekanan tinggi pada sistem kedalam evaporator yang bertekanan rendah, pengurangan tekanan tersebut dapat dicapai melalui *orifice*. Selanjutnya juga katup ekspansi juga mengontrol atau mengatur pemasukan refrigeran sesuai

Tabel 3.
Nilai Entalpi dan Tekanan Konvensional R404A

Nilai Entalpi dan Tekanan		
h1	361.7	kJ/kg
h2	430	kJ/kg
h3	248	kJ/kg
h4	248	kJ/kg
Low Pressure	303	kPa
High Pressure	1608	kPa

Tabel 4.
Nilai Entalpi dan Tekanan Cascade R404A LS

Nilai Entalpi dan Tekanan		
Low Stage R404A		
h1	356.5	kJ/kg
h2	569.3	kJ/kg
h3	187.59	kJ/kg
h4	172.8	kJ/kg
Low Pressure	301	kPa
High Pressure	406	kPa

Tabel 5.
Nilai Entalpi dan Tekanan Cascade R290 HS

Nilai Entalpi dan Tekanan		
High Stage R290		
h5	563.65	kJ/kg
h6	650.1	kJ/kg
h7	292.84	kJ/kg
h8	175.35	kJ/kg
Low Pressure	345.3	kPa
High Pressure	1218	kPa

dengan beban pendinginan yang harus diserap oleh evaporator.

D. Sistem Refrigerasi Cascade

Sistem refrigerasi kompresi uap bertingkat merupakan sistem kompresi uap lanjutan yang memiliki dua atau lebih jumlah kompresor sebagai komponen yang dapat memompa dan mensirkulasikan refrigeran dan menaikkan tekanannya. Sistem refrigerasi bertingkat berdasarkan sistem kerjanya dibagi menjadi dua, yaitu sistem refrigerasi bertingkat tertutup dan sistem refrigerasi bertingkat terbuka. Sistem refrigerasi bertingkat tertutup biasanya diwakilkan oleh sistem refrigerasi cascade, sedangkan untuk sistem yang bertingkat biasanya diwakilkan dengan sistem refrigerasi multi-stage yang menggunakan satu fluida kerja [7]. Sistem *cascade* sangat efektif jika kita menginginkan temperatur yang sangat rendah. Pada aplikasinya dapat terdapat 2 sistem kompresi uap dimana evaporator pada kompresi uap pertama yang memiliki temperatur relatif lebih tinggi digunakan untuk menyerap kalor pada kondensator di kompresi uap kedua, sehingga evaporator pada kompresi uap kedua memiliki temperatur yang lebih rendah. Sistem *cascade* sendiri menggunakan refrigeran yang berbeda pula tergantung dari tekanan kerja maupun jenis kompresor yang digunakan pada sistem pendinginan tersebut. Penggunaan kompresor sendiri akan lebih kecil dan jumlah panas yang diserap akan lebih meningkat jika menggunakan siklus *cascade* dan hasilnya tersebut memberikan dampak ke *coefficient of performance* (COP) dari sistem pendingin akan meningkat sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan [1].

E. Refrigeran R290 dan R404A

Pemilihan refrigeran untuk sistem kompresi uap harus dipertimbangkan dengan baik, dikarenakan terdapat faktor yang mempengaruhi sistem kompresi uap, dari segi ekonomis, ramah lingkungan dan keamanan dari refrigeran dipilih. Jika didalam sistem kompresi uap yang akan di terapkan dalam *cold storage* dipilih refrigeran yang berbahaya, tentunya akan berdampak buruk untuk bahan yang disimpan. Pertimbangan ini dapat lebih dikerucutkan dengan mendahulukan dampak apa yang menjadi prioritas dari refrigeran yang akan digunakan apakah keekonomisan, dampak lingkungan yang dapat ditimbulkan ataupun keamanan terhadap muatan yang akan didinginkan [8].

1) Refrigeran R290

Refrigeran R290 (*propane*) yang memiliki formula senyawa kimia C₃H₈ dengan NBP (*Normal Boiling Point*) sebesar -42,2°C, dan temperatur kritis sebesar 96,7°C, kemudian refrigeran R290 adalah bahan yang tidak memiliki ODP (*Ozon Depleting Potential*) dan memiliki nilai GWP (*Global Warming Potential*) yang sangat rendah kurang lebih sebesar ~20^d[9]. Produk R290 yang berada di pasaran adalah Musicool 22 (MC22) dari PT Pertamina. Musicool 22 merupakan refrigeran yang aman dan ramah lingkungan hal itu bisa menggantikan refrigeran yang dapat merusak lingkungan antara lainnya seperti R-12 (CFC), R-22 (HCFC), dan R-134a (HFC). Adapun kelebihan dari Musicool ini sendiri adalah tidak diperlukannya pergantian oli, tidak diperlukannya pergantian komponen, jumlah pengisian media pendinginan hanya sekitar 30% dibandingkan CFC dan HFC, menurunkan konsumsi listrik sekitar 18-23%, dan pencapaian temperatur dingin lebih cepat.

2) Refrigeran R404A

Refrigeran yang sering digunakan dalam aplikasi pengkondisian udara dan refrigerasi adalah R404A. Untuk jenis refrigeran R404A sendiri adalah salah satu jenis dari beberapa jenis refrigeran dari fraksi HFC. Refrigeran R404A dapat digunakan atau diaplikasikan untuk sistem refrigerasi cascade yang bertemperatur menengah maupun refrigerasi cascade temperatur rendah [3].

F. Software Pack Calculation Pro

Software Pack Calculation Pro sendiri dirancang khusus untuk membandingkan beberapa desain dari sistem refrigerasi yang akan digunakan, kemudian strategi kontrol dan refrigeran untuk pembuatan refrigerasi maupun *heat pump* yang akan disimulasikan, dengan menghitung konsumsi energi tahunan, serta *Life Cycle Costing* (LCC) dan *Total Equivalent Warming Impact* (TEWI). Hal tersebut juga memperhitungkan perhitungan yang ada kemudian mengurangi jumlah data yang sudah dimasukkan maupun diberikan antara lainnya dengan menggunakan data beban dan data cuaca untuk menghitung kinerja dari sistem refrigerasi tersebut.

III. URAIAN PENELITIAN

A. Identifikasi Masalah

Dalam penelitian ini terdapat dua lingkup pembahasan, untuk pembahasan yang pertama yaitu bagaimana pemodelan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A pada *reefer container* 1 ton dan bagaimana kinerja termal pada sistem

Konvensional		Constant	
Configuration	One stage	Evaporation temp profile [-]	Constant
Refrigerant [-]	R404A	Temp for const profile [°C]	-20,0
Design condition [-]	Custom, MBP (Te/Tc = -20,0 / 35,0 °C)	Supply temperature [°C]	-
Capacity [-]	2.1 kW / 3.2 kW	Additional	-
Comp 1 [-]	H101CC, R404A, 50Hz	Internal hx eff. [-]	1,0
Suction side		Discharge side	
Cooling capacity		Condenser type [-]	Air cooled
Profile [-]	Cooling Load	Cond. cap. chrt.	-
Dimensioning capacity [kW]	2,40	Tc profile [-]	-
Tamb at dim [°C]	32,0	Temp for const profile [°C]	-
Profile change [-]	1,0	Const Tc [°C]	35,0
Profile const below Tamb [°C]	20,0	Tc = A*Tamb+DT [°C]	-
Dry Expansion Evaporators		Fan with compressor [-]	-
Total superheat [K]	20,0	Minimum Tc [°C]	20,0
Non-useful superheat [K]	10,0	Subcooling [K]	2,0
Evaporator def.		Speed chrt. fans [-]	False
Known evaporator size [-]	False	Speed chrt. pump [-]	-
Qe [kW]	-	Condenser def.	-
DT [K]	-	Qc_100 [kW]	3,2
Evaporation temperature		W_fan [kW]	0,1
		W_pump [kW]	-
		DT_0 [K]	12,0
		Qc_0 [kW]	0,1
		DT_100 [K]	12,0

Gambar 3. Sistem Konfigurasi Konvensional R404A.

refrigerasi *cascade* R290/R404A pada *reefer container* 1 ton dengan menggunakan *software Pack Calculation Pro*.

B. Studi Literatur

Pada tahap ini digunakan untuk memperoleh informasi tentang dasar – dasar teori dan informasi pendukung untuk memecahkan masalah. Studi literatur dapat berasal dari makalah, jurnal, tesis, maupun buku – buku yang berkaitan dengan dengan suatu masalah yang akan diteliti.

C. Studi Empiris

Studi empiris sendiri dilakukan setelah mengidentifikasi masalah dan studi literatur dimana pada tahap ini melakukan pengumpulan data dan penunjang untuk melaksanakan penelitian yang dilakukan.

D. Perancangan Model Sistem Refrigerasi Cascade

Perancangan model sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A pada *reefer container* 1 ton yaitu model sistem yang akan digunakan pada *reefer container* 1 ton, refrigeran *High State* dan *Low State*, setting evaporator, dan setting kondensor yang akan digunakan seperti Gambar 2.

Pada Gambar 2 dapat dilihat sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A berupa *p&id*, berikut ini adalah fungsi dari keterangan komponen – komponen dimana pada *Low Stage* (R404A) dan *High Stage* (R290) sendiri seperti berikut ini:

1) EV

Merupakan Evaporator pada *low stage* R404A dimana evaporator pada LS sendiri memiliki fungsi yaitu menyerap panas dari udara dan disalurkan ke refrigeran.

2) HE

Heat Exchanger pada sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A merupakan bagian dari sistem *cascade* dimana ada dua buah komponen yaitu kondensor LS dan evaporator HS.

3) CD

Condensor merupakan bagian dari high stage R290 dimana kondensor pada CD sendiri memiliki fungsi yaitu kebalikan dari evaporator dimana *condensor* untuk mendinginkan refrigeran.

4) CO-LS

Merupakan kompresor utama pada bagian *low stage* R404A dan memiliki fungsi untuk mengompres udara bertekanan atau refrigeran bertekanan yang kemudian

	Konvensional (reference)
Load fulfilment	
% of time:	98,7%
% of energy:	100,0%
Energy delivered:	
Total [kWh]:	13.942
COP	
Average System COP (COSP) [-]:	1,71
Energy consumption	
Pumps and fans [kWh]:	606
Compressor [kWh]:	7.570
Total [kWh]:	8.176
Savings	
Yearly energy savings [kWh]:	-
Yearly energy savings [%]:	-

Gambar 4. Final Report Sistem Refrigerasi Konvensional R404A.

disalurkan menuju heat exchanger *low stage* R290 (kondensor).

5) CO-HS

Merupakan kompresor utama pada bagian high stage R290 dan memiliki fungsi untuk mengompres udara bertekanan atau refrigeran bertekanan.

6) HEF- LS&HS

Heat Exchanger Efficiency berfungsi untuk meningkatkan suhu refrigeran yang ingin diinginkan sesuai dengan perancangan di awal.

7) EC

Economizer berfungsi untuk mendinginkan sebagian refrigeran total dari kondensor untuk mendinginkan sisa aliran yang akan menuju ke heat exchanger (evaporator HS).

8) EU-1&2

Expansion Unit berfungsi untuk menurunkan atau mendinginkan suhu refrigeran yang menyebabkan refrigeran berubah wujud dari cair menjadi uap yang kemudian menuju evaporator.

E. Simulasi Software Pack Calculation Pro

Mensimulasikan sistem refrigerasi konvensional dengan refrigeran R404A dan sistem refrigerasi *cascade* dengan refrigeran R290/R404A dan pada tahap ini pun membandingkan beberapa desain sistem refrigerasi, kemudian setelah menghitung beban pendinginan yang telah dilakukan dimana pada *software* ini juga bisa memilih nilai *Coefficient of Performance* (COP) yang lebih baik.

F. Pengecekan Hasil Simulasi Software

Selanjutnya pengecekan atau validasi yang bertujuan untuk melihat apakah ada *error* saat menjalankan simulasi. Apabila terdapat *error* dan dapat tidak dapat dianalisa maka dilakukan kembali proses pemodelan struktur sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A pada *reefer container* 1 ton dan *running simulation* ulang. Apabila telah memperoleh data dari hasil simulasi yang sesuai dengan keinginan, maka dapat dibandingkan dengan hasil data dari perhitungan manual untuk mencari tahu perbedaan antara kedua metode mana yang lebih akurat.

G. Kesimpulan

Kesimpulan yang dibuat harus sesuai dengan rumusan masalah yang telah dibuat pada bab 1 sebelumnya.

Cascade R290/R404A		Evaporator def.	
Configuration MT	Two stage cascade	Known evaporator size [-]	False
Refrigerant [-]	R290	Qe [kW]	-
Design condition [-]	Custom, MBP (Te/Tc = -10.0 / 35.0 °C)	Evaporation temperature	-
Capacity [-]	5.5 kW / 7.3 kW	Evaporation temp profile [-]	Constant
Comp. 1 [-]	EX4H22e125-4 S 3HC, R290, 30Hz	Temp for const profile [°C]	-10.0
Configuration LT	Reference system	Supply temperature [°C]	-
Refrigerant [-]	R404A	Additional	-
Design condition [-]	Custom, LBP (Te/Tc = -20.0 / -5.0 °C)	Internal to off. [-]	1.0
Capacity [-]	3.1 kW / 3.5 kW	Cascade temp. diff. [K]	5.0
Comp. 1 [-]	HEX11CS, R404A, 50Hz	Suction side LT	-
Suction side MT		Cooling capacity	-
Cooling capacity		Profile [-]	Cooling Load
Profile [-]	Cooling Load	Dimensioning capacity [kW]	2.45
Dimensioning capacity [kW]	4.90	Temp at dim [°C]	32.0
Temp at dim [°C]	32.0	Profile change [-]	1.0
Profile change [-]	1.0	Profile const below Tamb [°C]	20.0
Profile const below Tamb [°C]	20.0	Dry Expansion Evaporators	-
Dry Expansion Evaporators		Total superheat [K]	20.0
Non-useful superheat [K]	10.0	Non-useful superheat [K]	10.0
Evaporator def.		Evaporator def.	False
Known evaporator size [-]		Qe [kW]	-
Qe [kW]		DT [K]	-

Evaporation temperature	
Evaporation temp profile [-]	Constant
Temp for const profile [°C]	-20.0
Supply temperature [°C]	-
Additional	-
Internal to off. [-]	1.0
Discharge side MT	
Condenser type [-]	Air cooled
Cond. cap. cbr.	-
To profile [-]	-
Temp for const profile [°C]	-
Const. To [°C]	35.0
Tc = A * Tamb + DT [°C]	-
Fan with compressor [-]	-
Minimum To [°C]	20.0
Subcooling [K]	2.0
Speed cbr. fans [-]	False
Speed cbr. pump [-]	-
Qc_100 [kW]	7.3
W_fan [kW]	0.2
W_pump [kW]	-
DT_0 [K]	12.0
Qc_0 [kW]	0.3
DT_100 [K]	12.0

Gambar 5. Sistem Konfigurasi Cascade R290/R404A.

	Cascade R290/R404A (reference)
Load fulfillment in % of time	
LT:	100,0%
MT:	56,2%
Total:	56,2%
Load fulfillment in % of energy	
LT:	100,0%
MT:	92,3%
Total:	94,2%
Energy delivered	
LT [kWh]:	13.948
MT [kWh]:	25.066
Total [kWh]:	39.014
Average System COP (COSP)	
LT [-]:	7.75
MT [-]:	2.36
Total [-]:	2.03
Pumps and fans energy consumption	
LT [kWh]:	0
MT [kWh]:	1.758
Total [kWh]:	1.758
Compressor energy consumption	
LT [kWh]:	1.799
MT [kWh]:	15.677
Total [kWh]:	17.477
Total energy consumption	
LT [kWh]:	1.799
MT [kWh]:	17.436
Total [kWh]:	19.235
Savings	
Yearly energy savings [kWh]:	-
Yearly energy savings [%]:	-

Gambar 6. Final Report Sistem Cascade R290/R404A.

IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Perhitungan Beban Pendingin Konvensional R404A

Beban pendinginan merupakan beban total yang harus diatasi oleh sistem refrigerasi untuk mencapai suhu yang diinginkan selama pengoperasian *reefer container* yang digunakan pada penelitian ini. Perhitungan beban pendinginan ini harus di hitung terlebih dahulu dikarenakan akan mempengaruhi desain sistem refrigerasi, beban pendinginan diperoleh melalui persamaan seperti berikut:

$$Q_{total} = Q_{t1} + Q_{t2} + Q_t \quad (1)$$

Dari Persamaan (1) diatas dapat disimpulkan bahwa total beban pendinginan merupakan akumulasi perhitungan dari beberapa jenis bebean dimana Q_{t1} merupakan beban produk, Q_{t2} merupakan beban infiltrasi, Q_{t3} merupakan beban transmisi, Q_{t4} merupakan beban peralatan dan Q_{t5} merupakan beban irradiation.

1) Beban Produk

Beban produk adalah beban panas yang dikeluarkan oleh kargo dan harus diatasi oleh sistem refrigerasi. Pada penelitian ini dirancang menggunakan *dummy cargo* ikan sebesar 100% dari muatan dengan C_p (*specific heat*) sebesar 2,14 kJ/kg°C, massa total beban produk 1000 kg, suhu muatan masuk $T_1 = 25^\circ\text{C}$, suhu yang direncanakan yaitu $T_2 = -20^\circ\text{C}$ dan waktu yaitu selama 14 jam. Dimana perhitungan diperoleh Persamaan (2) dan (3).

$$Q = M \times C_p \times \Delta T \quad (2)$$

$$Q_{t1} = Q/s \quad (3)$$

2) Beban Infiltrasi

Beban infiltrasi pada penelitian ini akan dilakukan pada prototipe dan diasumsikan tidak ada udara dari luar yang masuk ke dalam prototipe, maka beban infiltrasi ditiadakan dan ditunjukkan seperti Persamaan (4)

$$Q_{t2} = 0 \quad (4)$$

3) Beban Transmisi

Beban transmisi merupakan beban yang harus diatasi oleh sistem refrigerasi selama pendinginan berlangsung dimana diperoleh Persamaan (5) seperti berikut ini:

$$Q_{t3} = \frac{A \times T}{\frac{1}{h_0} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \dots + \frac{1}{h_1}} \quad (5)$$

4) Beban Peralatan

Beban peralatan sendiri merupakan beban yang terdapat pada *reefer container* dimana beban tersebut harus diatasi oleh sistem refrigerasi yaitu berupa fan akibat evaporator, dan didapatkan Persamaan (6):

$$Q_{t4} = 5 \quad (6)$$

5) Beban Irradiation

Beban irradiation sendiri diasumsikan menjadi 0 karena *reefer container* diletakkan pada tempat yang tertutup sehingga tidak terjadi beban irradiation, dan didapatkan Persamaan (7) seperti berikut:

$$Q_{t5} = 0 \quad (7)$$

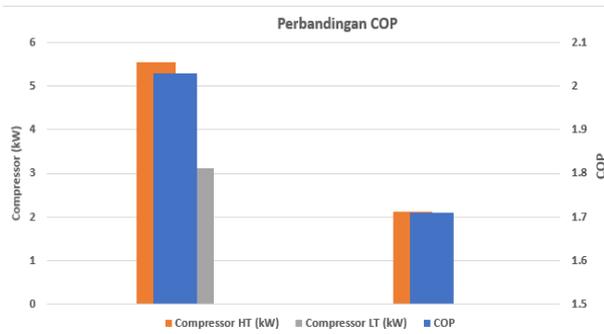
B. Perhitungan Beban Pendingin Cascade R290/R404A

Perhitungan beban pendinginan merupakan beberapa beban yang harus diatasi dan ditangani oleh sistem refrigerasi yang digunakan jika beban dapat diatasi maka suhu yang diinginkan akan tercapai selama pengoperasian *reefer container*. Beban pendinginan sistem refrigerasi *cascade* harus di hitung terlebih dahulu dikarenakan akan mempengaruhi desain sistem refrigerasi, beban pendinginan diperoleh melalui persamaan (1).

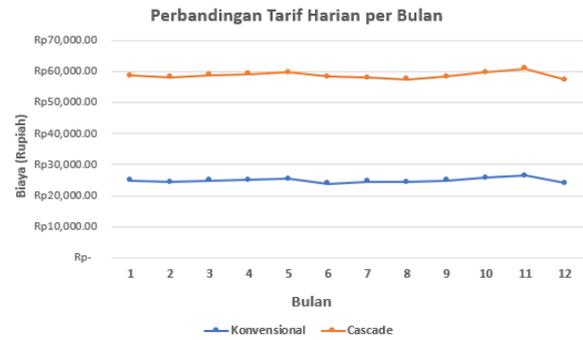
Kemudian setelah didapatkan persamaan tersebut maka harus menghitung terlebih dahulu beban – beban yang ada, dimana antara lainnya yaitu beban produk, beban infiltrasi, beban transmisi, beban peralatan, dan beban *irradiation*.

1) Beban Produk

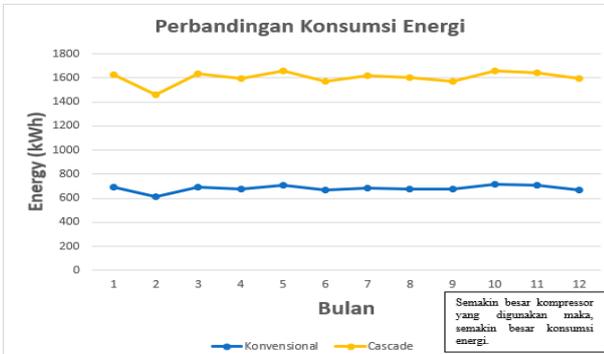
Beban panas yang dihasilkan oleh kargo dan bagaimana sistem refrigerasi mengatasinya. Dalam penelitian ini menggunakan sebuah *dummy cargo* berbentuk ikan yang



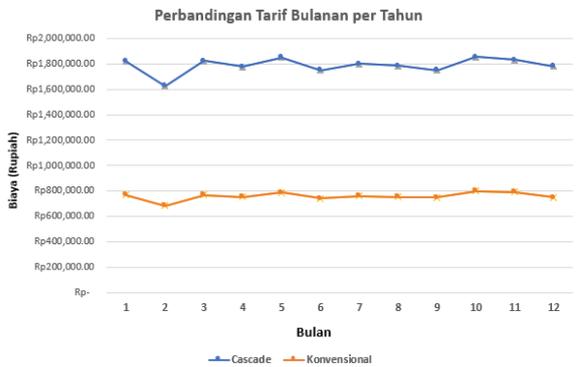
Gambar 7. Perbandingan COP Sistem Refrigerasi Konvensional R404A & Cascade R290/R404A.



Gambar 9. Perbandingan Tarif Harian per Bulan.



Gambar 8. Perbandingan Konsumsi Energi Konvensional & Cascade.



Gambar 10. Perbandingan Tarif Biaya Bulanan per Tahun.

mewakili 100% muatan *reefer container*. *Dummy cargo* ini memiliki nilai Cp (*specific heat*) sebesar 2,14 kJ/kgC. Total massa dari beban produk adalah 1000 kg, dan suhu saat memasuki sistem adalah T1 = 25°C. Suhu yang ingin dicapai adalah T2 = -20°C, dan proses ini akan berlangsung selama 14 jam. Dimana persamaan yang digunakan yaitu Persamaan (2) dan Persamaan (3).

2) *Beban Infiltrasi*

Dalam penelitian ini, akan menggunakan prototipe yang diasumsikan kedap udara, sehingga tidak ada infiltrasi udara dari luar yang masuk ke dalamnya. Oleh karena itu, beban infiltrasi diabaikan dalam analisis kami maka perhitungan yang dilakukan menggunakan Persamaan (4).

3) *Beban Transmisi*

Beban transmisi adalah beban yang harus diatasi oleh sistem refrigerasi saat proses pendinginan berlangsung, dan persamaannya yang digunakan untuk menghitung beban transmisi menggunakan Persamaan (5).

4) *Beban Peralatan*

Beban peralatan adalah beban yang ada pada *reefer container* dan harus diatasi oleh sistem refrigerasi melalui penggunaan kipas pada evaporator. Persamaan untuk beban peralatan menggunakan Persamaan (6).

5) *Beban Irradiation*

Beban irradiation sendiri diasumsikan nol karena *reefer container* ditempatkan di area yang sepenuhnya tertutup, sehingga tidak ada paparan radiasi yang mempengaruhi *reefer container* tersebut. Dengan demikian, persamaan untuk perhitungan beban irradiation sendiri diabaikan, maka persamaannya menggunakan Persamaan (7).

C. *Setting Sistem Refrigerasi Konvensional & Cascade*

Pada *setting* sistem refrigerasi konvensional dan *cascade* sendiri menggunakan refrigeran yang berbeda, untuk

konvensional menggunakan refrigeran R404A dan *cascade* menggunakan refrigeran HS (*High State*) R290 dan LS (*Low State*) R404A. Kemudian untuk *setting* kondensor 35°C untuk konvensional dan *cascade*, *setting* evaporator 20°C untuk konvensional dan *cascade*, kemudian *heat exchanger cascade* R290 -10°C dan *heat exchanger cascade* R404A -5°C. Resume total beban pendinginan konvensional dimuat oleh Tabel 1, sedangkan untuk *cascade* dimuat oleh Tabel 2.

D. *Energy Balance / Kesetimbangan Energi*

Kesetimbangan energi dalam sistem refrigerasi diperoleh dengan melakukan pembacaan diagram *Pressure-Enthalpy* (P-H) dari refrigeran yang digunakan untuk menentukan parameter dari operasi sistem refrigerasi, adapun beberapa persamaan yang digunakan dalam mencari kesetimbangan energi pada sistem refrigerasi konvensional, sebelum melakukan perhitungan kesetimbangan energi diperlukan nilai entalpi dan tekanan dari refrigeran seperti yang dimuat dalam Tabel 3.

$$Q_{evaporator} = Q_{total} \tag{8}$$

$$Evaporator = massflowrate \times (h_2 - h_1) \tag{9}$$

$$W_{compressor} = massflowrate \times (h_3 - h_2) \tag{10}$$

$$Q_{condensator} = massflowrate \times (h_4 - h_3) \tag{11}$$

Kemudian, kesetimbangan energi dalam sistem refrigerasi *cascade* berbeda dengan sistem refrigerasi konvensional pada persamaan rumus yang digunakan akan tetapi sama dalam hal pembacaan diagram *Pressure-Enthalpy* (P-H) dari refrigeran yang digunakan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A, Tabel 4 serta Tabel 5 memuat entalpi dan tekanan tiap refrigeran yang digunakan dan persamaan yang digunakan untuk mencari kesetimbangan energi.

$$Q_{evaporator} = m_{ls}(h_1 - h_4)$$

$$m_{ls} = \frac{Q_{evaporator}}{(h_1 - h_4)} \tag{12}$$

$$Q_{kondensorLS} = Q_{evaporatorHS}$$

$$m_{ls}(h_2 - h_3) = m_{hs}(h_5 - h_8)$$

$$m_{hs} = \frac{(m_{ls}(h_2 - h_3))}{(h_5 - h_8)} \quad (13)$$

$$Q_{kondensorHS} = m_{hs}(h_6 - h_7) \quad (14)$$

$$W_{compLS} = m_{ls}(h_2 - h_1) \quad (15)$$

$$W_{compHS} = m_{hs}(h_6 - h_5) \quad (16)$$

E. Hasil Software Pack Calculation Pro

Pada penelitian ini didapatkan hasil simulasi menggunakan *software Pack Calculation Pro* dimana pada *software* tersebut didapatkan *coefficient of performance* (COP) tiap sistem refrigerasi konvensional R404A dan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A kemudian juga menghitung tarif listrik dari *consumption energy* tahunan, Gambar 3, Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 merupakan hasil dari sistem refrigerasi konvensional R404A dan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A.

F. Perbandingan Coefficient of Performance (COP)

Pada perbandingan *coefficient of performance* (COP) untuk sistem refrigerasi konvensional R404A dan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A didapatkan hasil yang berbeda, Gambar 7 menunjukkan perbandingan *coefficient of performance* (COP) dari kedua sistem tersebut.

Didapatkan hasil *coefficient of performance* (COP) dimana pada sistem refrigerasi konvensional R404A didapatkan COP sebesar 1,71 sedangkan untuk COP sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A didapatkan COP sebesar 2,03. Dengan perbedaan tersebut maka konsumsi energi tiap sistem refrigerasi berbeda dengan lebih banyak konsumsi energi pada sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A dikarenakan jumlah dan daya kompresor yang digunakan lebih banyak dibandingkan sistem refrigerasi konvensional R404A.

G. Perbandingan Consumption Energy

Perbandingan konsumsi energi sistem refrigerasi konvensional R404A dan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A yang telah didapatkan sebelumnya pada simulasi *software pack calculation pro*, dari Gambar 8 dapat dilihat konsumsi energi tiap sistem refrigerasi.

Pada Gambar 8 didapatkan konsumsi energi sebesar 8176,3 kWh untuk sistem refrigerasi konvensional R404A dan 19235,2 kWh untuk sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A dimana terdapat perbedaan konsumsi dikarenakan adanya perbedaan daya kompresor dan jumlah kompresor yang digunakan pada sistem tersebut.

H. Perbandingan Tarif Biaya Sistem Refrigerasi

Pada perbandingan tarif biaya sistem refrigerasi, diperlukan tarif dasar listrik industri besar dimana biaya tersebut diambil dari sumber PLN wilayah Jawa Timur, Perbandingan tarif biaya harian per bulannya sistem refrigerasi konvensional R404A dan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A ditunjukkan oleh Gambar 9.

Kemudian Gambar 10 merupakan perbandingan tarif bulanan per tahun dari sistem refrigerasi konvensional R404A dan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A, dimana terdapat perbedaan yang cukup jauh untuk tarif biaya dimana untuk total per tahunnya sebesar Rp 9.114,448 untuk sistem

refrigerasi konvensional R404A dan Rp 21.442,246 untuk sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A.

V. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan berdasarkan pembahasan yang sudah dijelaskan sebelumnya, maka diperoleh beberapa kesimpulan pada penelitian ini antara lainnya sebagai berikut: (1) Dengan menggunakan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A untuk *reefer container* 1 ton, berdasarkan simulasi dimana didapatkan nilai *coefficient of performance* (COP) sebesar 2,03 dibandingkan dengan sistem refrigerasi konvensional atau *single-stage* R404A dimana nilai COP hanya 1,71 lebih rendah daripada sistem *cascade* dengan refrigeran R290 untuk *High State* dan R404A untuk *Low Stage*. (2) Konsumsi energi yang lebih rendah didapatkan oleh sistem refrigerasi konvensional R404A dengan total konsumsi energi per tahunnya sebesar 8176,3 kWh dibandingkan dengan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A sebesar 19235,2 kWh. Hal tersebut terjadi dikarenakan kebutuhan daya kompresor lebih tinggi dibandingkan konvensional R404A.

Kesimpulan (3) Sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A lebih tinggi dalam hal biaya tarif listrik dimana total per tahunnya sebesar Rp 21.442 dibandingkan dengan sistem refrigerasi konvensional sebesar Rp 9.114,448 dan memiliki perbedaan biaya tarif listrik cukup berbeda sebesar Rp 12.327,798. (4) Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan ini, dengan menggunakan usulan sistem refrigerasi *cascade* R290/R404A bisa meningkatkan efisiensi dan performa sistem pada *reefer container* akan tetapi untuk konsumsi energi dan biaya tarif listrik lebih mahal dibandingkan konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nazaruddin, "Analisa Teknis dan Ekonomis Perancangan Cold Storage Ikan Kapasitas 500 Ton dengan Sistem Refrigerasi Cascade Menggunakan Variasi Kombinasi Refrigeran," Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2019.
- [2] I. W. A. Subagia and I. D. M. Susila, "Pengaruh variasi diameter pipa kapiler pada siklus temperatur rendah terhadap performansi trainer unit sistem refrigerasi cascade," *J. Ranc. Bangun dan Teknol.*, vol. 16, no. 3, pp. 161–165, 2016.
- [3] Y. S. Bimantara, "Perancangan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Cascade Untuk Aplikasi Hybrid Reefer Container," Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [4] B. J. B. B. J. Bhardia, S. R. S. S. R. Sunasara, and J. J. M. J. J. Makadia, "Theoretical aspect of thermodynamic analysis of cascade refrigeration system: A review," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 2, no. 5, pp. 194–196, Jun. 2012, doi: 10.15373/22778179/MAY2013/64.
- [5] B. Whitman, B. Johnson, J. Tomczyk, and E. Silberstein, *Refrigeration & Air Conditioning Technology*, 7th ed. Boston: Cengage Learning, ISBN-13: 978-1111644475, 2012.
- [6] R. Miller and M. R. Miller. *Air Conditioning and Refrigeration*. New York: The McGraw-Hill Companies, ISBN: 9780071467889, 2006.
- [7] M. F. Prihandani, "Studi Variasi Laju Pengeluaran Kalor Kondensor High Stage Sistem Refrigerasi Casade Menggunakan Refrigeran MC22 Dan R404A Dengan Heat Exchanger Tipe Plate Heat Exchanger," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [8] I. N. Arighi, "Cooling Management Sistem Refrigerasi pada Cold Storage Bahan Makanan dengan Variasi Beban Pendinginan," Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [9] C. S. Choudhari and S. N. Sapali, "Performance investigation of natural refrigerant R290 as a substitute to R22 in refrigeration systems," *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 346–352, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.084.