

Perancangan Sistem Refrigerasi *Cascade* R404A/MC22 pada *Reefer Container* ½ Ton

Aulinnuha Fathony, Sutopo Purwono Fitri, dan Alam Baheramsyah
Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: sutopopf@gmail.com

Abstrak—Saat ini *reefer container* 20 ft dan 40 ft diperkirakan memiliki konsumsi energi sekitar 3,6 kW per TEU. *Reefer container* biasanya menggunakan sistem refrigerasi konvensional siklus kompresi uap satu tingkat yang mana temperatur ruangan pendingin yang dapat dihasilkan untuk operasional normal adalah sekitar -20°C . Untuk meningkatkan kemampuan dan variasi muatan yang dapat dimuat oleh *reefer container*, dalam penelitian ini sistem refrigerasi konvensional akan diubah dengan sistem refrigerasi *cascade*. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang sistem refrigerasi *cascade* serta menganalisis kinerja sistem refrigerasi *cascade*. Berdasarkan hasil penelitian, perancangan sistem refrigerasi *cascade* hanya mampu mencapai suhu ruang -11°C . Hasil percobaan pada sistem refrigerasi *cascade* tanpa beban, waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu ruang hingga -11°C adalah 6 jam 59 menit dengan rata-rata *high pressure* HS sebesar 12,10 bar, *low pressure* HS sebesar 3,05 bar, *high pressure* LS sebesar 5,32 bar, dan *low pressure* LS sebesar 2,37 bar. Sedangkan pada sistem refrigerasi *cascade* dengan beban, waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu ruang hingga -11°C adalah 13 jam 16 menit dengan rata-rata *high pressure* HS sebesar 12,13 bar, *low pressure* HS sebesar 3,64 bar, *high pressure* LS sebesar 5,39 bar, dan *low pressure* LS sebesar 2,41 bar. Sementara itu, pada sistem refrigerasi konvensional *single stage* tanpa beban, waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu hingga -11°C adalah 2 jam 45 menit dengan rata-rata *low pressure* sebesar 3,3 bar dan *high pressure* sebesar 16,7 bar. Sedangkan pada sistem refrigerasi konvensional *single stage* dengan beban adalah 10 jam 30 menit dengan rata-rata *low pressure* sebesar 3,4 bar dan *high pressure* sebesar 17,4 bar. COP sistem refrigerasi *cascade* adalah sebesar 3,125. COP sistem refrigerasi konvensional *single stage* adalah sebesar 0,972.

Kata Kunci—*Reefer Container*, *Cascade*, MC22, R404A.

I. PENDAHULUAN

JUMLAH total sistem refrigerasi, AC, dan pompa panas di seluruh dunia yang beroperasi adalah sekitar tiga miliar, yang mana telah menyumbang sekitar 17% dari keseluruhan konsumsi listrik di seluruh dunia. Angka ini diperkirakan akan meningkat karena terus meningkatnya standar hidup dan permintaan sistem pendinginan di berbagai bidang [1]. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan, untuk *cold storage* dengan jenis *reefer container* 20 ft dan 40 ft diperkirakan memiliki konsumsi energi sekitar 3,6 kW per TEU [2].

Salah satu penerapan sistem refrigerasi yang paling sering dijumpai adalah digunakan pada proses pendinginan atau penanganan ikan. Penanganan dan pengolahan seperti proses pendinginan pada ikan harus dilakukan secara tepat agar tidak terjadi kesalahan yang dapat menurunkan kualitas dan nilai jual dari ikan tersebut [3]. Dalam hal ini, salah satu tempat penyimpanan ikan adalah dapat dilakukan pada *cold storage*.

Cold storage sendiri mempunyai ukuran ruangan yang besar dibandingkan lemari pendingin lainnya dengan temperatur ruangnya bisa mencapai kurang lebih dari 15°C

hingga -45°C . *Cold storage reefer container* biasanya menggunakan sistem refrigerasi konvensional siklus kompresi uap satu tingkat. Untuk siklus kompresi uap satu tingkat, temperatur ruangan pendingin yang dapat dihasilkan untuk operasional normal adalah sekitar -20°C . Untuk meningkatkan kemampuan dan variasi muatan khusus yang dapat dimuat oleh *reefer container*, dalam penelitian ini sistem refrigerasi akan diubah dengan sistem refrigerasi kompresi uap *cascade*. Sistem refrigerasi *cascade* pada dasarnya adalah dua sistem refrigerasi yang dihubungkan dengan satu penukar panas. Sistem *cascade* dapat mencapai temperatur ruangan yang lebih rendah dibandingkan siklus refrigerasi kompresi uap satu tingkat. Sistem refrigerasi *cascade* merupakan cara terbaik untuk mendapatkan peningkatan performa unjuk kerja (COP) serta penghematan daya [4].

Dengan melihat beberapa permasalahan di atas, maka dalam penelitian ini nantinya akan dilakukan perancangan bangun sistem refrigerasi *cascade* pada *reefer container* ½ ton serta dilakukan analisis terkait kinerja dari sistem refrigerasi *cascade* pada *reefer container* ½ ton. Pada penelitian ini nantinya juga akan membandingkan beberapa parameter antara sistem refrigerasi konvensional *single stage* dengan sistem refrigerasi *cascade*. Adapun parameter yang akan diteliti adalah tekanan kerja sistem refrigerasi, *coefficient of performance* (COP) untuk sistem refrigerasi, dan distribusi suhu pendinginan di dalam ruang *reefer container*.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

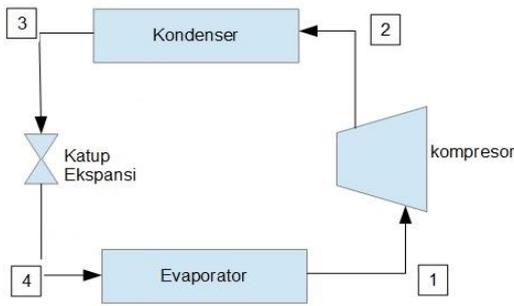
Secara umum, sistem refrigerasi kompresi uap terdiri atas empat komponen utama, yaitu kompresor, kondensor, alat ekspansi (*expansion device*), dan evaporator. Serangkaian komponen tersebut mempunyai peranan masing-masing dalam siklus kompresi uap. Untuk penjelasan lebih lanjutnya, proses siklus sistem refrigerasi kompresi uap dapat dijelaskan melalui skema di bawah ini.

1) Siklus 1

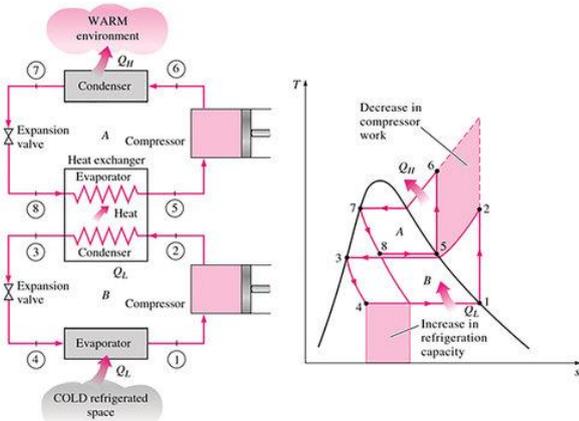
Refrigeran keluar dari evaporator dalam bentuk uap jenuh atau uap panas dengan temperatur dan tekanan yang relatif rendah. Refrigeran yang mengalir ini kemudian akan masuk ke dalam kompresor untuk selanjutnya dikompres sehingga temperatur dan tekanan refrigeran menjadi relatif tinggi. Dalam tahap ini, fluida atau refrigeran yang masuk ke dalam kompresor harus dalam fase gas guna menghindari kerusakan pada kompresor seperti disajikan pada Gambar 1.

Persamaan daya kompresor pada kondisi *superheated vapor* dapat dirumuskan dengan:

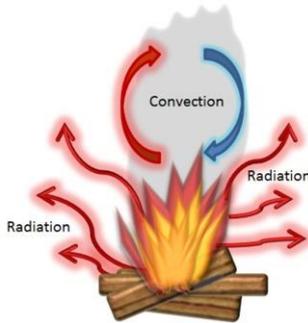
$$W_{\text{comp}} = m_{\text{ref}} \times (h_1 - h_2) \quad (1)$$



Gambar 1. Siklus sistem refrigerasi kompresi uap.



Gambar 2. Siklus sistem refrigerasi cascade.



Gambar 3. Perpindahan panas.

Dengan m_{ref} adalah laju aliran massa refrigeran (kg/s), h_2 adalah entalpi *output* kompresor (kJ/kg), h_1 adalah entalpi *input* kompresor (kJ/kg), dan W_{comp} adalah daya *input* kompresor (kJ/s).

2) Siklus 2

Kondenser merupakan tempat refrigeran didinginkan dan mengembun. Agar terjadi perubahan wujud refrigeran (pengembunan atau *condensing*), maka kalor harus dibuang dari uap refrigeran. Kalor yang dilepaskan dari kondensor dapat diketahui melalui persamaan berikut:

$$Q_{cond} = m_{ref} \times (h_2 - h_3) \tag{2}$$

dengan Q_{cond} adalah kalor yang dilepas dari kondensor ke lingkungan (kJ/s), m_{ref} adalah laju aliran massa refrigeran (kg/s), h_2 adalah entalpi *output* kompresor atau *input* kondensor (kJ/kg), dan h_3 adalah entalpi *input expansion device* atau *output* kondensor (kJ/kg).

3) Siklus 3

Refrigeran yang telah berbentuk cair (*subcooled*) jenuh dengan temperatur dan tekanan yang tinggi selanjutnya masuk ke alat ekspansi atau *expansion device* yang di mana

tekanan dan temperatur dari refrigeran akan didinginkan sampai titik yang diinginkan.

4) Siklus 4

Campuran uap-cair mengalir dengan tekanan dan temperatur yang relatif rendah pada sebuah *heat exchanger* yaitu evaporator. Pada kondisi ini, temperatur jenuh refrigeran lebih rendah dari pada temperatur sekitarnya, sehingga terjadi penyerapan kalor pada sistem oleh refrigeran terhadap sekitarnya.

Kalor yang diserap oleh evaporator dari lingkungan dengan temperatur yang lebih tinggi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{evap} = m_f \times (h_1 - h_4) \tag{3}$$

Dengan Q_{evap} adalah kalor yang diserap evaporator (kJ/s), m_{ref} adalah laju aliran massa refrigeran (kg/s), h_1 adalah entalpi *input* kompresor (kJ/kg), dan h_4 adalah entalpi *input* evaporator (kJ/kg).

B. Sistem Refrigerasi Cascade

Sistem refrigerasi *cascade* terdiri dari dua sistem refrigerasi siklus tunggal. Sistem pertama disebut *high-stage* (HS) dan sistem kedua disebut *low-stage* (LS) seperti pada Gambar 2. Pada prinsipnya efek refrigerasi yang dihasilkan oleh evaporator HS dimanfaatkan untuk menyerap kalor yang dilepas oleh kondensor LS sehingga dihasilkan temperatur yang sangat rendah pada evaporator LS [5].

Pada sistem refrigerasi *cascade*, besarnya kerja kompresor total didapat dengan menjumlahkan kerja kompresor pada sistem HS dan LS.

$$W_{total} = W_{HS} + W_{LS} \tag{4}$$

Nilai koefisien kinerja (COP) didapat dengan:

$$COP = Q_{evap} \times \frac{LS}{W_{kompresortotal}} \tag{5}$$

C. Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*heat transfer*) merupakan disiplin ilmu yang mempelajari bagaimana panas dapat berpindah dari suatu benda ke benda lainnya melalui berbagai macam medium perambatan. Panas dapat berpindah dari suatu tempat ke tempat lain akibat adanya perbedaan suhu. Perpindahan panas atau kalor merupakan proses perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material yang dipengaruhi oleh laju perpindahan suatu benda yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu [6]. Dalam ilmu perpindahan panas, dikenal tiga proses perpindahan panas dilihat dari medium perambatannya, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Ilustrasi perpindahan panas disajikan pada Gambar 3.

1) Konduksi

Konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi karena adanya kontak langsung antar permukaan benda. Jika pada suatu benda terdapat perbedaan suhu, maka akan terjadi perpindahan energi dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah. Berikut persamaan kalor secara konduksi:

$$q = -kA \frac{\delta T}{\delta x} \tag{6}$$

dengan q adalah laju perpindahan kalor (W), k adalah konduktivitas termal benda (W/m°C), A adalah luas bidang

yang tegak lurus dengan arah laju perpindahan kalor (m^2), dan $\frac{\delta T}{\delta x}$ adalah gradien suhu ke arah perpindahan kalor ($^{\circ}C/m$).

2) *Konveksi*

Konveksi adalah proses perpindahan kalor melalui zat penghantar yang disertai dengan perpindahan bagian zat-zat nya. Laju perpindahan secara konveksi dirumuskan melalui persamaan berikut:

$$q = hA(T_s - T_f) \tag{7}$$

dengan q adalah laju perpindahan kalor (W), h adalah koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^{\circ}C$), A adalah luas Penampang (m^2), T_s adalah temperatur plat/benda ($^{\circ}C$), dan T_f adalah temperatur fluida yang mengalir dekat permukaan benda ($^{\circ}C$)

3) *Radiasi*

Radiasi merupakan perpindahan panas melalui pancaran atau radiasi elektromagnetik tanpa melalui suatu media. Perpindahan panas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$q = \epsilon_1 \times \sigma \times A_1 \times (T_1^4 - T_2^4) \tag{8}$$

dengan q adalah laju perpindahan kalor (W), ϵ adalah emisivitas atau sifat radiasi pada permukaan, σ adalah konstanta Stefan Boltzman ($5,669 \times 10^{-8} W/m^2K^4$), T_1^4 adalah temperatur Absolut permukaan (K^4), dan T_2^4 adalah temperatur lingkungan (K^4).

D. *Refrigeran*

Refrigeran merupakan fluida kerja pada sistem refrigerasi. Refrigeran ini berfungsi menyerap kalor/panas dari suatu daerah dan membuangnya ke daerah yang lain, biasanya hal ini dilakukan melalui proses evaporasi (penguapan) dan kondensasi (pengembunan).

1) *Refrigeran R404-A*

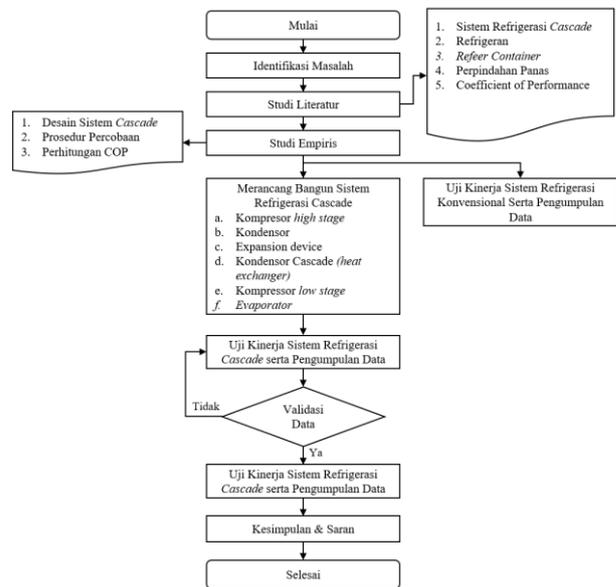
Salah satu jenis refrigeran yang sering digunakan dalam aplikasi pengondisian udara dan refrigerasi adalah R-404A. Refrigeran R-404A adalah salah satu jenis refrigeran dari fraksi HFC. Refrigeran ini dapat diaplikasikan untuk sistem refrigerasi temperatur menengah maupun refrigerasi temperatur rendah [7].

2) *Refrigeran R290 (Musicool-22)*

R-290 (*propane*) termasuk ke dalam klasifikasi hidro-karbon karena memiliki ODP dan GWP yang rendah ($ODP = 0$ dan $GWP = \sim 20^4$). R-290 memiliki rumus senyawa kimia $CH_3CH_2CH_3$ dengan Normal Boiling Point (NBP) sebesar $-42^{\circ}C$ yang memiliki sifat mudah terbakar (*flammable*) (ASHRAE, 2009). Salah satu produk R-290 yang berada di pasaran adalah Musicool dari PT. Pertamina. Musicool (MC-22) merupakan refrigeran ramah lingkungan untuk menggantikan refrigeran yang berpotensi merusak lingkungan seperti R-12 (CFC), R-22 (HCFC), dan R-134a (HFC).

E. *Coefficient of Performance (COP)*

Coefficient of Performance (COP) merupakan salah satu indikator pada suatu sistem refrigerasi yang sangat menentukan kerja dari sistem itu sendiri. Dengan melihat nilai dari COP pada satu sistem refrigerasi kita dapat mengetahui kerja dari sistem tersebut, apakah sistem bekerja sesuai dengan perancangan yang dibutuhkan.



Gambar 4. Diagram alir penelitian.

COP untuk pemanasan dan pendinginan berbeda satu sama lain, karena reservoir panas yang diamati berbeda. Ketika penelitian dilakukan untuk mengamati seberapa baik mesin mendingin, COP adalah rasio panas yang dikeluarkan dari reservoir dingin untuk memasukkan pekerjaan. Namun, untuk pemanasan, COP adalah rasio panas yang dikeluarkan dari reservoir dingin ditambah masukan untuk kerja masukan [7].

Pada siklus kompresi uap *cascade* di mana digunakan dua buah kompresor maka perhitungan daya pada COP adalah jumlah total dari daya kompresor yang digunakan. Untuk menghitung nilai COP dapat digunakan persamaan:

$$COP = \frac{Q_c}{W_{total}} \tag{9}$$

F. *Reefer container*

Reefer container adalah unit tertutup yang digunakan untuk mengangkut kargo yang sensitif terhadap suhu. Kontainer ini membutuhkan catu daya eksternal untuk pengoperasiannya. Saat ini ada berbagai macam *reefer container* yang ada di pasaran. Jenis *reefer container* yang digunakan ini tergantung pada persyaratan efisiensi dan muatan yang harus dibawa. Adapun beberapa jenis *reefer container* adalah sebagai berikut:

1) *Closed Reefer*

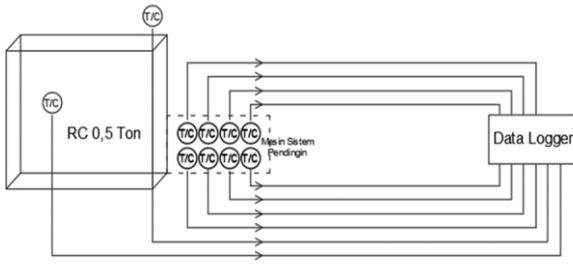
Kontainer ini merupakan jenis *reefer container* tipe konvensional. Kontainer ini akan berada dalam satu bagian dengan unit pendingin dan pemanas otomatis secara elektrik.

2) *Reefer container Modified/Controlled Atmosphere (MA/CA)*

Jenis kontainer berinsulasi ini akan mempertahankan atmosfer konstan dengan mengganti oksigen yang dikonsumsi menggunakan *air exchange system* serta akan menjaga atmosfer ideal dalam keseimbangan dengan tingkat kerusakan produk.

3) *Automatic Fresh Air Management Containers*

Kontainer ini dikenal dengan *reefer container* AFAM yang menggunakan teknologi canggih untuk mengatur kombinasi udara dengan menyesuaikan skala pertukaran udara segar



Gambar 5. Skema aparatus uji kinerja distribusi suhu.

secara otomatis. Cara kerjanya mirip dengan *reefer container Controlled Atmosphere* yang mana akan mengontrol komposisi oksigen, karbon dioksida dan lain-lain. Kontrol kontainer berpendingin AFAM dapat disesuaikan untuk mempengaruhi dan memperpanjang umur simpan kargo yang dibawa.

III. METODOLOGI

A. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini disajikan pada Gambar 4.

B. Identifikasi Masalah

Identifikasi dan perumusan masalah merupakan tahap awal dalam pelaksanaan penelitian. Rumusan masalah menjadi aspek pokok dalam analisis pada penelitian berdasarkan data yang telah didapatkan.

C. Rancang Bangun Sistem Refrigerasi Cascade

Pada tahap ini akan dilakukan perancangan desain dari sistem refrigerasi cascade. Desain nantinya akan diaplikasikan pada *reefer container* berukuran 1/2 ton.

D. Skema Percobaan

Setelah perancangan bangun desain sudah divalidasi, kemudian percobaan dilakukan untuk diuji coba, yaitu pada sistem refrigerasi *cascade*. Skema aparatus uji kinerja distribusi suhu disajikan pada Gambar 5.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Beban Pendinginan Sistem Refrigerasi Cascade

Cooling load atau beban pendinginan merupakan total beban yang harus dapat diatasi oleh sistem refrigerasi guna mencapai kondisi yang telah direncanakan. Total beban pendingin *cascade* seperti tertera pada Tabel 1.

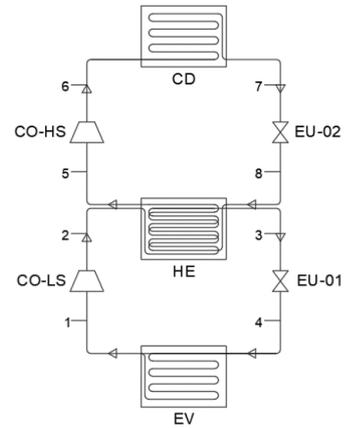
B. Perancangan Sistem Refrigerasi Cascade

Pada bagian ini akan dilakukan perhitungan untuk menentukan parameter-parameter perancangan dan mengetahui nilai performa sistem refrigerasi *cascade*. Skema sistem refrigerasi *cascade* disajikan pada Gambar 6.

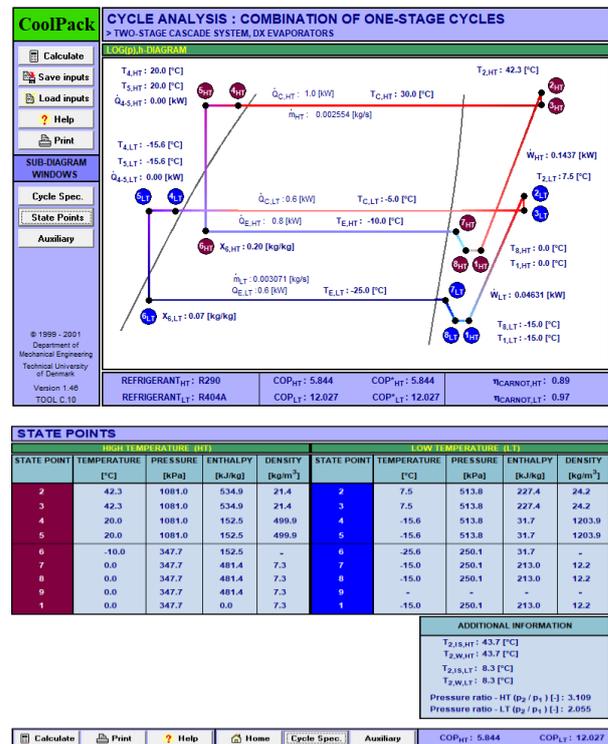
1) Parameter Perancangan

Parameter perancangan dalam perhitungan sistem refrigerasi berupa temperatur atau tekanan pada kondensor dan evaporator. Parameter perancangan *cascade* disajikan pada Tabel 2. Kondisi refrigeran yang keluar dari kondensor berupa cair jenuh dan saat memasuki kompresor refrigeran berupa uap jenuh.

Selanjutnya, perlu dilakukan pembacaan log P-H diagram menggunakan *software CoolPack-EES* agar lebih akurat



Gambar 6. Skema sistem refrigerasi cascade.



Gambar 7. Hasil pembacaan log P-H diagram.

dalam pembacaannya. Pembacaan log P-H diagram ini dilakukan dengan memilih refrigeran R404a pada *low stage*, dan refrigeran MC22 (R290) pada kondisi *high stage*.

Berdasarkan pembacaan log P-H diagram untuk refrigeran R404a/MC22 didapatkan hasil sebagai berikut atau yang disajikan pada Gambar 7.

Untuk *low stage*:

- h_1 : 213 kJ/kg
- h_2 : 227,4 kJ/kg
- h_3 : 31,7 kJ/kg
- h_4 : 31,7 kJ/kg
- Low pressure : 250,1 kPa
- High pressure : 513,8 kPa

Untuk *high stage*:

- h_5 : 481,4 kJ/kg
- h_6 : 534,9 kJ/kg
- h_7 : 152,5 kJ/kg
- h_8 : 152,5 kJ/kg
- Low pressure : 347,7 kPa
- High pressure : 1081 kPa

Tabel 1.
Total Beban Pendinginan *Cascade*

Nama	Q (Watt)
Q Produk	453,6108474
Q Infiltrasi	0
Q Transmisi	117,9476048
Q Peralatan	5
Q Irradiation	0
Sub total	576,5584522
<i>Safety factor</i> , 10%	57,65584522
Total Beban	634,2142975

Tabel 2.
Parameter Perancangan *Cascade*

Komponen	Parameter
Evaporator MC22 (LS)	-25 °C
Penukar panas <i>Cascade</i> MC22 (LS)	-5 °C
Penukar panas <i>Cascade</i> R404A (HS)	-10 °C
Kondensor R404A (HS)	30 °C

Tabel 3.
Properti R-404A untuk Evaporator LS

Lokasi	Temperatur (°C)	Tekanan (kPa)	Entalpi	Kondisi
h ₁	-25	250,1	213	uap jenuh
h ₄	-25	250,1	31,7	cair-uap

Tabel 4.
Properti R-404A untuk Kondensor LS

Lokasi	Temperatur (°C)	Tekanan (kPa)	Entalpi	Kondisi
h ₂	-5	513,8	227,4	uap <i>superheated</i>
h ₃	-5	513,8	31,7	cair jenuh

Tabel 5.
Properti R290 untuk evaporator HS

Lokasi	Temperatur (°C)	Tekanan (kPa)	Entalpi	Kondisi
h ₅	-10	347,7	481,4	uap jenuh
h ₈	-10	347,7	152,5	cair-uap

Tabel 6.
Properti R290 untuk evaporator HS

Lokasi	Temperatur (°C)	Tekanan (kPa)	Entalpi	Kondisi
h ₆	30	1081	534,9	uap <i>superheated</i>
h ₇	30	1081	152,5	cair jenuh

2) Laju Aliran Massa Refrigeran

Dengan mengasumsikan tidak ada *heat loss* yang terjadi, maka Q_{evap} dianggap sama dengan nilai beban pendinginan. Nilai untuk h₁ dan h₄ disajikan pada Tabel 3.

$$Q_{evap} = m_{ls} \times (h_1 - h_4)$$

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

$$m_{ls} = 0,634 / (213 - 31,7)$$

$$m_{ls} = 0,00349 \text{ kg/s}$$

Pada sisi HS temperatur keluaran refrigeran dirancang sebesar -10° C, dengan nilai h₂ dan h₃ seperti pada Tabel 4, serta h₅ dan h₈ pada Tabel 5.

$$Q_{kond LS} = Q_{evap HS}$$

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

$$m_{hs} = 0,00208 \text{ kg/s}$$

3) Perpindahan Panas pada Kondensor HS

Pada sisi kondensor HS perpindahan panas yang dikeluarkan ke lingkungan dapat dihitung dari nilai laju aliran massa refrigeran pada HS, refrigeran yang masuk ke dalam kondensor adalah uap *superheated* pada tekanan kompresor. Tekanan kompresor dipilih pada 1.000 kPa dengan temperatur 30°C. Temperatur dan entalpi refrigeran yang masuk ke dalam kondensor didapatkan dari mencari nilai temperatur

dan entalpi refrigeran pada kondisi uap *superheated* dengan tekanan 1.000 kPa dan dengan nilai entropi yang sama pada saat refrigeran keluar evaporator HS. Nilai h₆ dan h₇ disajikan pada Tabel 6.

$$Q_{kond} = m_{hs} \times (h_6 - h_7)$$

$$Q_{kond} = m_{hs} (h_6 - h_7)$$

$$Q_{kond} = 0,00208 (534,9 - 152,2)$$

$$Q_{kond} = 0,795 \text{ kW}$$

4) Daya Masukan Kompresor

Dari nilai laju aliran massa refrigeran dan entalpi pada uap jenuh dan uap *superheated*, selanjutnya dapat dihitung daya masukan dari kompresor untuk *low stage* dan *high stage* sebagai berikut.

$$W_{ls} = m_{ls} (h_2 - h_1)$$

$$W_{ls} = 0,00349 (227,4 - 213)$$

$$W_{ls} = 0,05037 \text{ kW}$$

$$W_{hs} = m_{hs} (h_6 - h_5)$$

$$W_{hs} = 0,00208 (534,9 - 481,4)$$

$$W_{hs} = 0,1113 \text{ kW}$$

5) COP (Coefficient of Performance)

Pada sistem refrigerasi *cascade* nilai COP didapatkan dengan membagi nilai Q_{evap} dengan daya masukan total kompresor yang bekerja pada sistem. Dari perhitungan yang telah dilakukan didapat dengan perhitungan sebagai berikut.

$$COP = Q_{evap} / (W_{ls} + W_{hs})$$

$$COP = 0,634 / (0,0503 + 0,1113)$$

$$COP = 3,921$$

6) Perhitungan Penukar Panas *Cascade*

Jenis penukar panas yang digunakan adalah *Shell and Tube Heat Exchanger*. Di mana refrigeran dari sirkuit *low temperature* direncanakan pada saat keluar dari penukar panas yang melalui pipa-pipa di dalam penukar panas adalah bertemperatur -5°C. Sedangkan refrigeran dari sirkuit *high temperature* masuk ke dalam penukar panas dengan temperatur -10°C.

$$Q_{kondensor LS} = Q_{evaporator HS}$$

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

$$0,00349 (227,4 - 31,7) = 0,00208 (481,4 - 152,5)$$

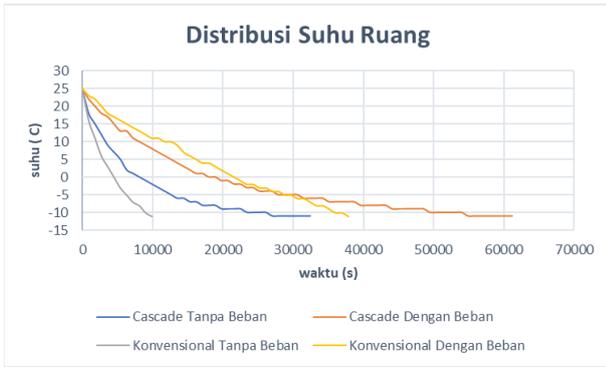
$$0,68 \text{ kW} = 0,68 \text{ kW}$$

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, maka kebutuhan Q minimal pada penukar panas adalah sebesar 0,68 kW~1 PK.

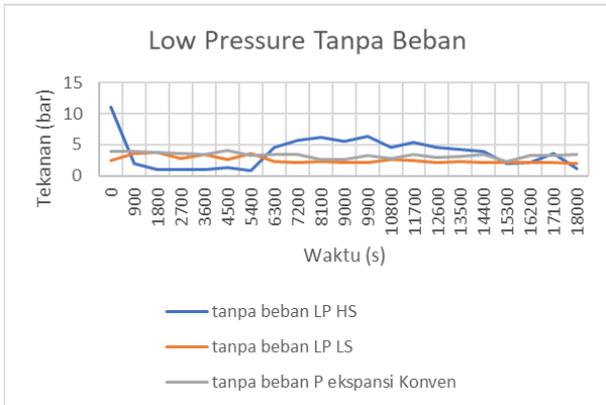
C. Hasil Percobaan

Pada bab ini akan menjelaskan bagaimana kinerja dari hasil perancangan sistem refrigerasi *cascade* pada *reefer container* ½ ton. Parameter kinerja sistem refrigerasi adalah berupa distribusi suhu, tekanan kerja, serta nilai COP sistem refrigerasi *cascade*.

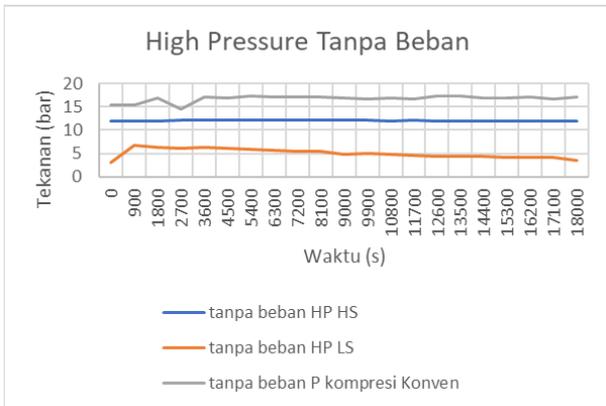
Gambar 8 merupakan perbandingan suhu ruang pada uji coba sistem refrigerasi *cascade* dibandingkan dengan hasil percobaan sistem refrigerasi konvensional *single stage*. Dari percobaan yang telah dilakukan maka dapat diketahui bahwa sistem refrigerasi *cascade* yang telah dirancang hanya dapat mencapai suhu maksimal pada suhu -11 °C. Adapun untuk percobaan sistem refrigerasi *cascade* tanpa beban mampu mencapai suhu -11 °C dalam waktu 6 jam 59 menit. Selanjutnya untuk percobaan sistem refrigerasi *cascade*



Gambar 8. Grafik distribusi suhu ruang.



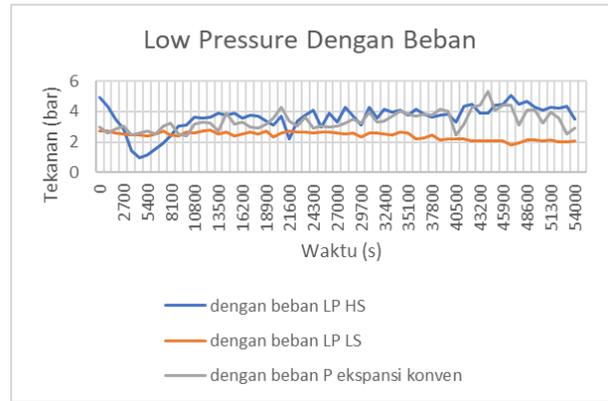
Gambar 9. Grafik perbandingan tekanan rendah pada sistem refrigerasi konvensional tanpa beban dan cascade tanpa beban.



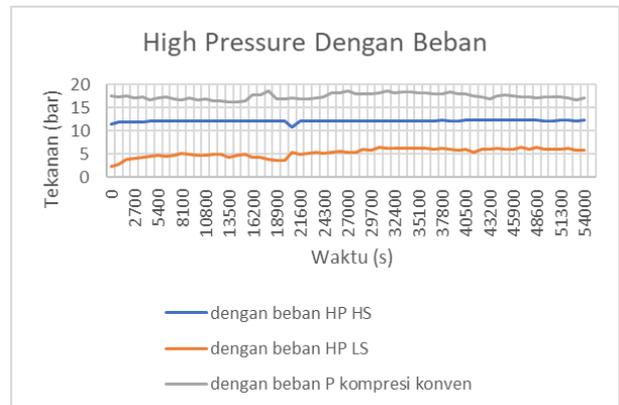
Gambar 10. Grafik perbandingan tekanan tinggi pada sistem refrigerasi konvensional tanpa beban dan cascade tanpa beban.

dengan beban mampu mencapai suhu -11°C dalam waktu 13 jam 16 menit. Sementara itu, pada sistem refrigerasi konvensional tanpa beban mampu mencapai suhu -11°C dalam waktu 2 jam 45 menit. Sedangkan pada sistem refrigerasi konvensional dengan beban mampu mencapai suhu -11°C dalam waktu 10 jam 30 menit.

Pada Gambar 9 dan Gambar 10 di atas menunjukkan perbandingan tekanan pada sistem refrigerasi konvensional tanpa beban dan cascade tanpa beban. Pada sistem refrigerasi konvensional tanpa beban, rata-rata *high pressure* sebesar 16,7 bar, sedangkan pada *low pressure* rata-rata sebesar 3,3 bar. Sementara itu, pada sistem refrigerasi cascade tanpa beban memiliki rata-rata *high pressure* pada *low stage* sebesar 5,32 bar, dan tekanan rata-rata *low pressure* pada *low stage* sebesar 2,37 bar. Sedangkan pada kondisi high stage, *high pressure* rata-rata sebesar 12,10 bar dan *low pressure* rata-rata sebesar 3,05 bar.



Gambar 11. Grafik perbandingan tekanan rendah pada sistem refrigerasi konvensional dengan beban dan cascade dengan beban.



Gambar 12. Grafik perbandingan tekanan rendah pada sistem refrigerasi konvensional dengan beban dan cascade dengan beban.

Pada Gambar 11 dan Gambar 12 di atas menunjukkan perbandingan tekanan pada sistem refrigerasi konvensional dengan beban dan cascade dengan beban. Pada sistem refrigerasi konvensional dengan beban, rata-rata *high pressure* sebesar 17,4 bar, sedangkan pada *low pressure* rata-rata sebesar 3,4 bar. Sementara itu, pada sistem refrigerasi cascade dengan beban memiliki rata-rata *high pressure* pada *low stage* sebesar 5,39 bar, dan tekanan rata-rata *low pressure* pada *low stage* sebesar 2,41 bar. Sedangkan pada kondisi high stage, *high pressure* rata-rata sebesar 12,13 bar dan *low pressure* rata-rata sebesar 3,64 bar.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen, perancangan sistem refrigerasi cascade hanya mampu mencapai suhu maksimal pada suhu -11°C . Terdapat beberapa faktor yang menyebabkan hal tersebut terjadi, di antaranya adalah terkait performa *heat exchanger* tipe *shell and tube* yang dirasa kurang optimal untuk diaplikasikan pada sistem refrigerasi cascade. Hasil di atas didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Singh, R., Ahmad, S., dan Jain, S. (2013) yang meneliti tentang perbandingan kinerja dari *heat exchanger* tipe *plate heat exchanger* dengan *shell and tube heat exchanger* pada sistem refrigerasi cascade [8]. Dari penelitiannya didapatkan hasil bahwa dengan penukar panas tipe pelat adalah tipe *heat exchanger* yang direkomendasikan dalam mencapai suhu kabinet yang lebih rendah. Faktor lain yang menyebabkan perancangan sistem refrigerasi cascade kurang optimal yaitu masih belum adanya *excess area* (*safety factor*) yang diberikan dalam pemilihan *heat exchanger shell*

and tube. Dalam menentukan *heat exchanger*, disarankan untuk memilih penukar panas yang berukuran 30%–40% lebih besar dari yang dibutuhkan. Berikut ini adalah beberapa parameter yang dapat digunakan dalam menarik kesimpulan pada penelitian. (1) Pada sistem refrigerasi *cascade* tanpa beban memiliki rata-rata tekanan *high pressure* pada *low stage* sebesar 5,32 bar dan tekanan rata-rata *low pressure* pada *low stage* sebesar 2,37 bar. Sedangkan pada kondisi *high stage*, tekanan *high pressure* rata-rata sebesar 12,10 bar dan tekanan *low pressure* rata-rata sebesar 3,02 bar. Pada sistem refrigerasi *cascade* dengan beban memiliki rata-rata tekanan *high pressure* pada *low stage* sebesar 5,39 bar dan tekanan rata-rata *low pressure* pada *low stage* sebesar 2,41 bar. Sedangkan pada kondisi *high stage*, tekanan *high pressure* rata-rata sebesar 12,13 bar dan tekanan *low pressure* rata-rata sebesar 3,64 bar. Pada sistem refrigerasi konvensional tanpa beban, rata-rata tekanan *high pressure* sebesar 16,7 bar, sedangkan pada tekanan *low pressure* rata-rata sebesar 3,3 bar. Sementara itu, pada sistem refrigerasi konvensional dengan beban, rata-rata tekanan *high pressure* sebesar 17,4 bar, sedangkan pada tekanan *low pressure* rata-rata sebesar 3,4 bar. (2) COP pada sistem refrigerasi *cascade* lebih tinggi dibandingkan dengan sistem refrigerasi konvensional. Adapun COP pada sistem refrigerasi konvensional yaitu sebesar 0,972. Sementara pada sistem refrigerasi *cascade* nilai COP sebesar 3,125. Pada sistem konvensional *single stage* memerlukan daya masukan rata-rata pada kompresor sebesar 410,80 Watt, sedangkan untuk sistem refrigerasi *cascade* pada kompresor *low stage* sebesar 406,99 Watt dan untuk kompresor *high stage* sebesar 158,10 Watt. (3) Pada sistem refrigerasi *cascade* tanpa beban, waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu hingga $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ yaitu 6 jam 59 menit, sedangkan pada sistem refrigerasi *cascade*

dengan beban membutuhkan waktu 13 jam 16 menit. Pada sistem refrigerasi konvensional tanpa beban waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu hingga $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ yaitu 2 jam 45 menit, sedangkan pada sistem refrigerasi konvensional dengan beban, yaitu 10 jam 30 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. D. Mselle, D. Vérez, G. Zsembinszki, E. Borri, dan L. F. Cabeza, "Performance study of direct integration of phase change material into an innovative evaporator of a simple vapour compression system," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 13. 2020. doi: 10.3390/app10134649.
- [2] M. Soleh, "Analisa Kinerja dan Karakteristik Eutectic Water-Salt Phase Change Material (PCM) untuk Mengurangi Konsumsi Energi Cold Storage," Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [3] M. M. Merdiagung, H. H. Prastowo, dan T. F. Nugroho, "Modifikasi kinerja cold storage 10 ton menggunakan cfd (computational fluid dynamic)," *J. Tek. ITS*, vol. 3, no. 1, hal. F4–F7, 2014, doi: 10.12962/j23373539.v3i1.6037.
- [4] Nazaruddin, "Analisa Teknis dan Ekonomis Perancangan Cold Storage Ikan Kapasitas 500 Ton dengan Sistem Refrigerasi Cascade Menggunakan Variasi Kombinasi Refrigeran," Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2019.
- [5] R. T. W. Rosadi, "Pengujiian Sistem Refrigerasi Cascade dengan Menggunakan Refrigeran Alami Campuran R744 dengan R170 untuk Aplikasi Temperatur Rendah," Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [6] H. Haryowidagdo, "Kajian Teknis dan Ekonomis Perancangan Berbasis Teknologi Phase untuk Aplikasi di Kapal," Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [7] Y. S. Bimantara, "Perancangan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Cascade untuk Aplikasi Hybrid Reefer Container," Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [8] R. Singh, S. Ahmad, dan S. Jain, "Performance Study of Cascade Refrigeration System using Natural Refrigerants (R290-R744)," Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, 2013.