

Studi Variasi Laju Pengeluaran Kalor Kondensor *High Stage* Sistem Refrigerasi *Cascade* Menggunakan Refrigeran MC22 dan R404A dengan Heat Exchanger Tipe *Concentric Tube*

Faberto Subrida, Ary Bachtiar Krishna Putra

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: arybach@me.its.ac.id

Abstrak—Masih adanya kekurangan pada alat penukar panas tipe compact yang digunakan pada sistem refrigerasi cascade sebelumnya, pada studi eksperimental ini dibuat kembali suatu sistem refrigerasi cascade dengan alat penukar panas tipe concentric. Data didapatkan dengan melakukan pengujian pada peralatan sistem Pendingin dan Pengkondisian Udara di laboratorium pendingin, dengan menguji sistem cascade menggunakan refrigeran MC22 di high stage dan R404A di low stage. Memvariasikan laju pengeluaran kalor pada kondensor dengan mengatur kecepatan aliran udara yang melalui kondensor yaitu 0,7 m/s, 1,7 m/s, 2 m/s, 2,4 m/s, dan 2,8 m/s. Hasil yang didapatkan dari studi eksperimen ini adalah dengan bertambahnya laju pengeluaran kalor pada kondensor HS, temperatur dan tekanan kondensor HS semakin kecil yang mengakibatkan efek refrigerasi, kapasitas refrigerasi, dan koefisien prestasi akan semakin naik. Pada saat variasi kecepatan fan tertinggi 2,8 m/s, nilai *effectiveness* alat penukar kalor tipe concentric sebesar 94,35%, COP sistem sebesar 1,14, kapasitas refrigerasi sebesar 1,819 kW, HRR sistem sebesar 1,303, temperatur evaporator LS sebesar $-35,4^{\circ}\text{C}$, dan temperatur kabin terendah sebesar $-35,1^{\circ}\text{C}$.

Kata Kunci—coefficient of performance, efek refrigerasi, high stage, low stage, siklus cascade.

I. PENDAHULUAN

PROSES penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi dan memindahkan kalor tersebut ke suatu medium tertentu yang memiliki temperatur lebih rendah serta menjaga kondisi tersebut sesuai dengan yang dibutuhkan disebut sebagai proses refrigerasi. Penggunaan dari sistem refrigerasi ini biasanya digunakan untuk mengatur temperatur pada suatu ruangan tertentu seperti ruang kelas, ruang penyimpanan daging bahkan ruang untuk pembekuan sehingga manfaatnya sangat besar di dunia industri. Penggunaan teknik pendinginan dimana temperatur sedikit diatas 0°C , memungkinkan bahan makanan/daging dapat disimpan selama beberapa hari sampai beberapa minggu tergantung jenis makanan, suhu dan teknik penyimpanannya. Sedangkan pada temperatur dibawah 0°C atau sekitar -18°C , bahan makanan/daging dapat disimpan selama beberapa bulan. Bahkan daging dapat disimpan sampai beberapa tahun pada temperatur -30°C .

Pada saat ini banyak material tertentu yang secara khusus membutuhkan pendinginan hingga temperatur yang sangat dingin dengan kapasitas kecil namun sistem pendinginan yang umum hanya memiliki kemampuan pendinginan yang kecil dan belum berskala *cold storage*. Maka untuk mendapatkan temperatur evaporasi yang lebih rendah biasanya digunakan sistem refrigerasi bertingkat. Sistem pendinginan *cascade* adalah salah satu solusi yang dapat digunakan untuk permasalahan seperti ini. Dengan

menggunakan sistem ini, maka kalor pada kondensor *low-stage* dapat didinginkan oleh evaporator *high-stage* sehingga temperatur evaporator yang dicapai pada *low-stage* lebih rendah. Pada tugas akhir sebelumnya nian [1] telah melakukan studi eksperimental dengan menggunakan dua buah alat penukar panas tipe compact dengan cara menempelkan kondensor *low-stage* pada evaporator *high-stage*. Kemudian konveksinya dibantu dengan aliran udara dari fan. Selain dibutuhkan fan tambahan yang menggunakan daya cukup besar pada alat penukar panasnya, cara penukaran panas seperti ini juga tidak terlalu baik. Karena kondensor *low-stage* dan evaporator *high-stage* masih terpisah. Sehingga temperatur yang dihasilkan pada evaporator *low-stage* belum sesuai dengan yang diharapkan. Pada tugas akhir ini komponen yang digunakan sebagai alat penukar panas antara *low-stage* dengan *high-stage* adalah *heat exchanger* (HE) tipe konsentris. Diharapkan temperatur yang dihasilkan pada evaporator *low-stage* jauh lebih baik dari penelitian sebelumnya, dan daya keseluruhan yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem refrigerasi *cascade* lebih kecil. Karena penggunaan fan pada alat penukar panas tipe konsentris sudah tidak dibutuhkan.

Sering berubah-ubahnya temperatur lingkungan juga mempengaruhi kinerja dari kondensor pada *high-stage*. Jadi pada studi eksperimental ini dilakukan variasi terhadap salah satu parameter yang menentukan kinerja dari sistem untuk mengetahui kembali kinerja optimal yang dicapai. Adapun salah satu caranya adalah dengan memvariasikan laju pengeluaran kalor pada kondensor *high-stage* sehingga dapat diketahui dampaknya terhadap keseluruhan sistem.

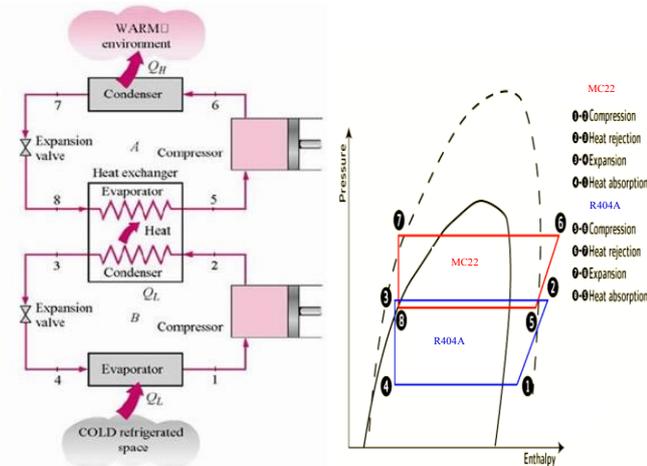
II. URAIAN PENELITIAN

A. Sistem Refrigerasi Cascade

Di industri sering dibutuhkan kondisi refrigerasi dengan temperatur yang cukup rendah dan sekaligus dalam rentang temperatur yang lebar. Rentang temperatur yang lebar berarti bahwa sistem refrigerasi harus bisa beroperasi dalam beda tekanan yang besar dimana hal ini hanya bisa dipenuhi apabila tingkat refrigerasi dibuat lebih dari satu. Prinsipnya adalah menggabungkan dua buah siklus kompresi uap di mana kondensor dari siklus dengan tekanan kerja lebih rendah akan membuang panas ke evaporator dari siklus dengan tekanan kerja lebih tinggi dalam sebuah alat penukar kalor (*heat exchanger*).

Sistem refrigerasi cascade terdiri dari dua sistem refrigerasi siklus tunggal. Sistem pertama disebut *highstage* dan sistem kedua disebut *lowstage*. Pada prinsipnya efek refrigerasi yang dihasilkan oleh evaporator

highstage dimanfaatkan untuk menyerap kalor yang dikeluarkan oleh kondensor *lowstage* sehingga didapatkan temperatur yang sangat rendah pada evaporator *lowstage*. Secara skematis dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 1 Skema sistem refrigerasi cascade dan P-h Diagram

Dalam sistem cascade, jenis refrigeran untuk siklus *high stage* dan siklus tekanan *low stage* tidak perlu sama sehingga pemilihan refrigeran akan bisa lebih leluasa.

B. Komponen Sistem Refrigerasi Cascade

Agar dapat bekerja dengan baik, sistem refrigerasi *cascade* secara umum mempunyai lima komponen utama. Kelima komponen tersebut adalah :

1. Kompresor

Unjuk kerja nyata kompresor dapat diketahui dari daya yang diberikan terhadap kompresor dengan rumus:

$$W_c = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \quad (1)$$

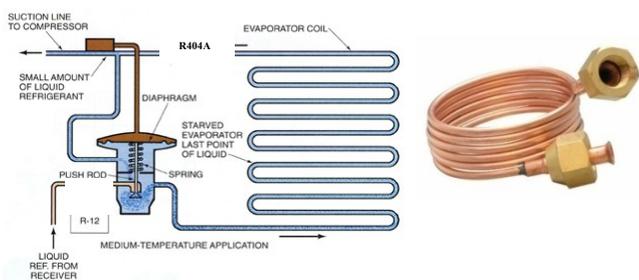
2. Kondensator

Kondensator berfungsi sebagai pembuang panas (*heat rejection*) dari dalam sistem ke luar sistem. Pada saat refrigeran memasuki kondensator, maka refrigeran akan mengalami perubahan fase dari gas menjadi cair (terkondensasi). Perubahan ini mengakibatkan pengecilan entalpi refrigeran. Alat penukar panas yang digunakan sebagai kondensator pada *high stage* tipe *compact heat exchanger*.

$$Q_{cond} = \dot{m} \times (h_{in} - h_{out}) = \dot{m}_{HS} \times (h_6 - h_7) \quad (2)$$

3. Expansion device

Katup ekspansi yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa kapiler pada *high stage* dan TXV eksternal pada *low stage*.



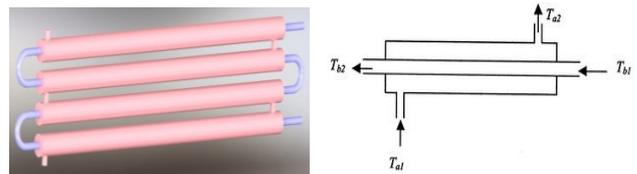
Gambar 2 Katup ekspansi TXV eksternal (kiri) dan pipa kapiler (kanan)

4. Evaporator

Komponen ini berfungsi untuk menyerap panas dari ruangan. Panas tersebut diserap dan dialirkan melalui *heat exchanger* kemudian dipindahkan ke refrigeran. Pada saat refrigeran menyerap panas, maka entalpi refrigeran akan meningkat. Semakin banyak kenaikan entalpi pada refrigeran selama di evaporator maka semakin baik pula kinerja perangkat pendinginan udara yang terpasang. Bentuk evaporator sama persis dengan kondensator. Tetapi ukuran evaporator biasanya lebih kecil daripada kondensator. Alat penukar panas yang digunakan sebagai evaporator pada *low stage* tipe *compact heat exchanger*.

$$Q_{evap} = \dot{m} \times (h_{in} - h_{out}) = \dot{m}_{LS} \times (h_1 - h_4) \quad (3)$$

5. Alat penukar panas tipe konsentris



Gambar 3 Alat penukar kalor konsentris(kiri) dan sketsanya(kanan)

Pada studi eksperimen ini menggunakan *heat exchanger* tipe *concentric*. Tipe ini biasanya digunakan untuk eksperimen di laboratorium. *Heat exchanger* tipe *concentric* biasanya hanya terdiri dari satu *tube* saja. Perpindahan panas terjadi akibat perbedaan temperatur antara pipa dalam dan pipa luar. Alat penukar panas ini digunakan sebagai evaporator pada *high stage* (pipa luar) dan sebagai kondensator pada *low stage* (pipa dalam). Karena pada eksperimen ini dianggap tidak ada *losses* (diisolasi) pada alat penukar kalor *concentric*. Maka dapat digunakan kesetimbangan energi di bawah ini.

$$Q_{kondensator} = Q_{evaporatorHS} \quad (4)$$

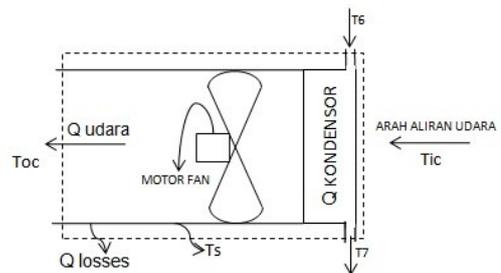
$$\dot{m}_{LS} \times (h_2 - h_3) = \dot{m}_{HS} \times (h_5 - h_8) \quad (5)$$

C. Coefficient Of Performance (COP) Sistem Cascade

Performansi dari sistem refrigerasi *cascade* dinyatakan dalam *coefficient of performance (COP)*. Nilai COP aktual didapatkan dari perbandingan kalor yang diserap oleh evaporator *low stage* dengan daya total yang dibutuhkan oleh kompresor *low stage* dan *high stage*:

$$COP = \frac{Q_{evapLS}}{W_{total}} \quad (6)$$

D. Laju Aliran Massa Refrigeran High Stage



Gambar 4 Balance energy pada ducting dan kondensator HS

Laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage* dengan asumsi panas yang dikeluarkan oleh $\dot{m}_{refrigeran}$ dan yang diterima oleh \dot{m}_{udara} pada kondensor *high stage* adalah sama. Maka kesetimbangan energi pada kondensor *high stage* sebagai berikut :

$$Q_{loss} = h \times A (T_{oc} - T_s) \quad (7)$$

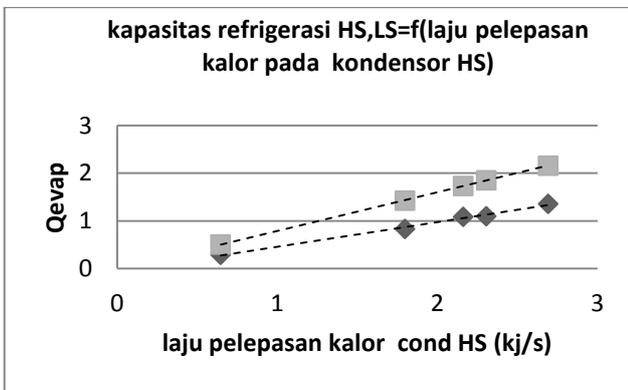
$$Q_{udara} = \dot{m}_{udara} \times C_{p_{udara}} \times (T_{oc} - T_{ic}) \quad (8)$$

$$Q_{cond} = Q_{udara} + Q_{loss} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{m}_{udara} \times C_{p_{udara}} \times (T_{oc} - T_{ic}) + Q_{loss}}{(h_6 - h_7)} \quad (10)$$

E. Penelitian Terdahulu

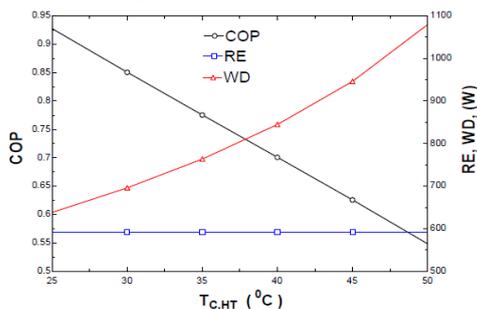
Nian [1] melakukan studi eksperimental pada sistem pendingin cascade menggunakan alat penukar panas dengan metode mendekatkan evaporator *highstage* pada kondensor *low stage*.



Gambar 5 Pengaruh laju pengeluaran kalor kondensor *high stage* terhadap kapasitas refrigerasi HS dan LS (Nian [1])

Pada grafik diatas terlihat bahwa grafik memiliki tren yang relatif menurun, nilai kapasitas refrigerasi turun seiring dengan naiknya suhu kondensor *high stage*. Beban di dalam ruangan yang di-isolasi akan memberikan kalornya kepada refrigerannya pada evaporator. Refrigeran akan mengalami proses penguapan yang akan mengakibatkan perubahan entalpi dari sebelum masuk evaporator dan setelah keluar. Perubahan entalpi ini merepresentasikan efek refrigerasi. Kapasitas refrigerasi adalah hasil kali antara efek refrigerasi dengan laju aliran masa.

Parekh dan Tailor [2] melakukan studi eksperimen dengan menggunakan refrigeran R507A pada *high-stage* dan R23 pada *low-stage*.



Gambar 6 Pengaruh temperatur *condensing* pada *highstage* terhadap COP, RE, dan WD

Pada grafik di atas saat variasi temperatur *condensing* pada *high-stage* dari 25°C hingga 50°C, COP total mengalami penurunan dari 0,9274 menjadi 0,5486. Sedangkan daya total kompresor (WD) mengalami kenaikan. Dampak refrigerasi cenderung konstan atau tidak ada pengaruh temperatur kondensasi pada *high stage* terhadap dampak refrigerasi sistem.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Peralatan Yang Digunakan

Peralatan yang digunakan pada studi eksperimen ini adalah sistem refrigerasi bertingkat dengan MC22 pada HS dan R404A pada LS sebagai fluida kerjanya.



Gambar 7 Sistem refrigerasi cascade yang digunakan

B. Alat Ukur

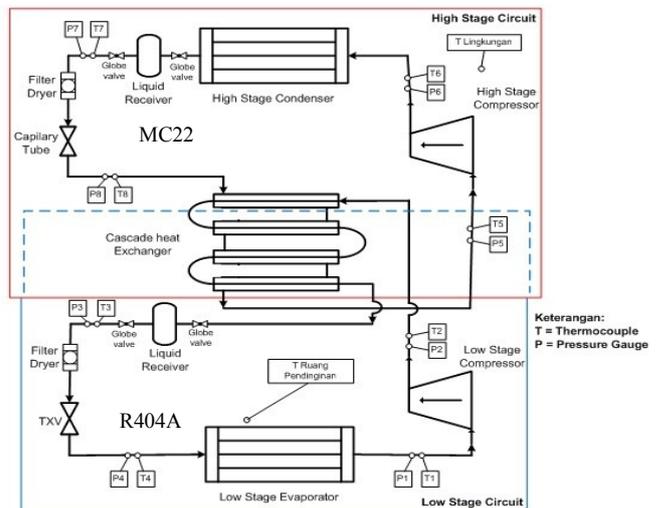
Alat ukur yang digunakan dalam studi eksperimen ini adalah sebagai berikut :

1. Thermocontrol dan thermocouple
2. Pressure gauge
3. Ampere meter dan cosphimeter
4. Volt meter
5. Anemometer

C. Prinsip Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mengosongkan *box* pendingin, kemudian menghidupkan kompresor HS dan LS sampai kondisi *steady state* lalu mengatur variasi laju pengeluaran kalor pada kondensor dengan mengatur kecepatan aliran udara yang melalui kondensor yaitu 0,7 m/s, 1,7 m/s, 2 m/s, 2,4 m/s, dan 2,8 m/s.

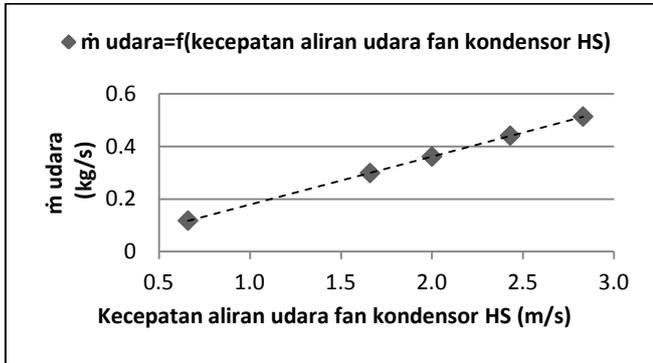
D. Skema Peralatan



Gambar 8 Skema peralatan sistem pendingin *cascade*

Pengukuran pada setiap titik yaitu dari titik 1 sampai titik 8 dilakukan pengukuran tekanan dan temperature. Kemudian pengukuran arus, tegangan, cosphi pada kompresor *high stage* dan *low stage*.

IV. HASIL DAN ANALISA

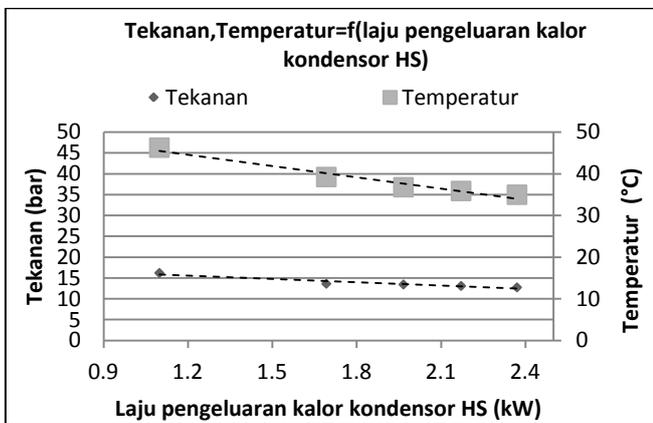


Gambar 8 Grafik pengaruh kecepatan aliran udara fan kondensor HS terhadap ṁ udara

Pada grafik di atas terlihat bahwa grafik memiliki tren yang semakin naik, nilai ṁ udara naik seiring dengan bertambah besarnya laju aliran udara pada kondensor *high stage*. Hal ini sesuai dengan teori yang telah dipelajari. Bila ditinjau dari sisi perumusan, kita dapat menggunakan persamaan-persamaan berikut ini :

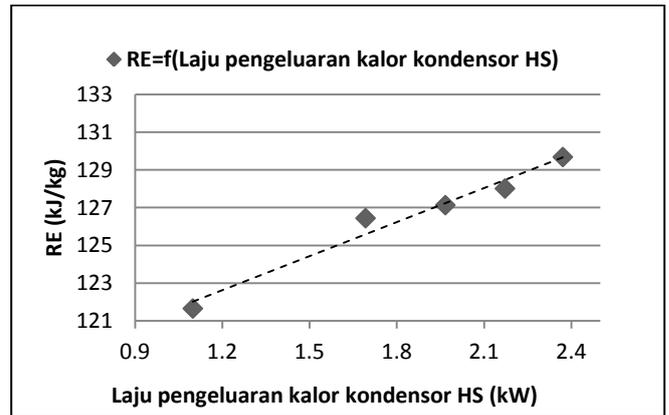
$$\dot{m}_{udara} = v_{udara} \times A_{udara} \times \rho_{udara} \quad (11)$$

Dari persamaan di atas ketika laju aliran udara kondensor *high stage* semakin besar nilai luasan dan massa jenis udara yang relatif konstan maka akan menyebabkan nilai ṁ udara semakin besar karena berbanding lurus.



Gambar 9 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor terhadap tekanan dan temperatur kondensor HS

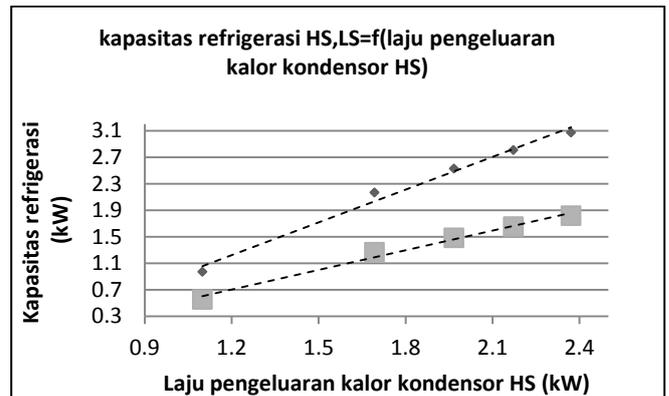
Ketika nilai laju pengeluaran kalor pada kondensor HS bertambah besar, maka mengakibatkan kalor yang dikeluarkan oleh kondensor semakin banyak. Sehingga temperatur kondensor HS mengalami penurunan. Karena tekanan berbanding lurus dengan temperatur, maka tekanan kondensor HS akan menurun seiring dengan turunnya temperatur.



Gambar 10 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor terhadap tekanan dan temperatur kondensor HS

$$RE = h_1 - h_4 \quad (12)$$

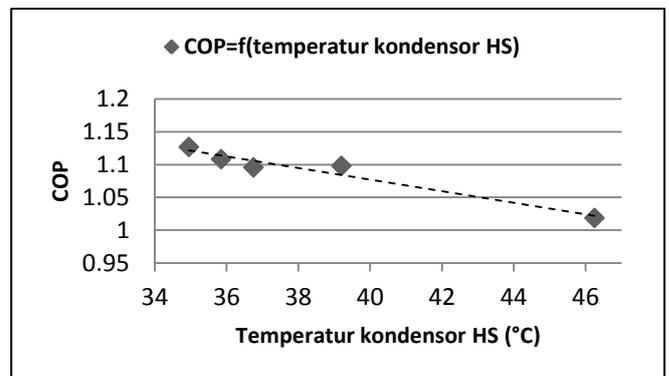
Ketika nilai laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage* semakin besar, maka banyak kalor yang dibuang ke lingkungan yang menyebabkan kapasitas refrigerasi semakin besar. Jika perubahan nilai ṁ dalam hal ini diabaikan karena terlalu kecil, maka nilai selisih entalpi pada evaporator akan semakin besar. Sehingga nilai efek refrigerasi semakin besar.



Gambar 11 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor pada kondensor HS terhadap kapasitas refrigerasi HS,LS

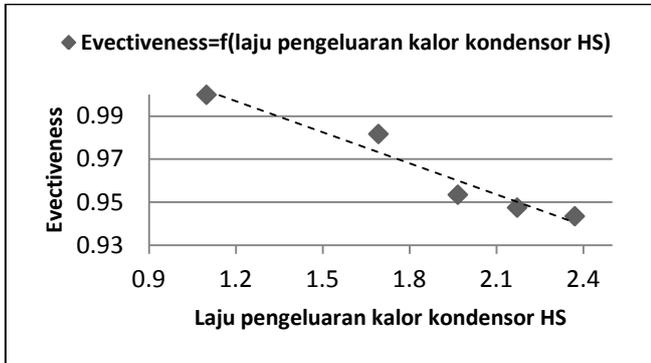
$$Q_{evap} = \dot{m}_{LS} \times (h_1 - h_4) \quad (13)$$

Ketika laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage* semakin besar, maka banyak kalor yang dibuang ke lingkungan. Sehingga menyebabkan temperatur kondensor semakin kecil. Temperatur kondensor yang turun akan menyebabkan nilai efek refrigerasi dan nilai kapasitas refrigerasi semakin besar.



Gambar 12 Grafik pengaruh temperatur kondensor HS terhadap COP

Pada grafik diatas terlihat tren yang cenderung semakin turun, nilai COP sistem *cascade* semakin kecil seiring dengan naiknya temperatur pada kondensor *high stage*. Nilai koefisien prestasi yang semakin besar menunjukkan bahwa kerja mesin tersebut semakin baik. Besarnya COP dipengaruhi oleh efek refrigerasi dan kerja kompresi. Kenaikan kecepatan udara pendingin kondensor menyebabkan efek refrigerasi meningkat, sedangkan kerja kompresi mengalami penurunan sehingga nilai koefisien prestasi (COP) akan menjadi semakin naik.



Gambar 13 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor kondensor HS terhadap *effectiveness* alat penukar kalor *cascade*

Pada grafik diatas terlihat tren yang cenderung semakin turun, hal ini diakibatkan karena kemampuan mendinginkan pada alat penukar panas konsentris adalah konstan, sedangkan beban refrigerasi yang harus didinginkan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya laju alir massa refrigerasi. Bila ditinjau dari sisi perumusan, kita dapat menggunakan persamaan-persamaan berikut ini :

$$\epsilon = \frac{q_{actual}}{q_{maks}} = \frac{Ch(Th,i - Th,o)}{C_{min}(Th,i - Tc,i)} \quad (14)$$

Nilai *effectiveness* alat penukar panas konsentris akan semakin turun seiring dengan naiknya laju pengeluaran kalor kondensor HS. Hal ini terjadi karena *q actual* naik secara konstan sedangkan *q maks* naik secara signifikan. Kenaikan *qmaks* yang signifikan terjadi karena seiring dengan naiknya laju alir massa refrigerasi dan selisih suhu *Thi* dikurangi dengan *Tci* lebih besar dibandingkan dengan selisih suhu *Thi* dikurangi dengan *Tho*. Dengan spesifikasi alat penukar panas konsentris yang tetap, maka kemampuan dari alat penukar panas untuk memindahkan energi panas dari kondensor LS ke evaporator HS akan semakin berkurang.

V. KESIMPULAN

Dari studi yang dilakukan serta pembahasan terhadap data yang didapatkan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Temperatur dan tekanan kondensor HS semakin kecil dengan bertambahnya laju pengeluaran kalor pada kondensor HS yang mengakibatkan efek refrigerasi, kapasitas refrigerasi, dan koefisien prestasi akan semakin naik. Dengan turunnya temperatur kondensor HS maka *heat rejection ratio* (HRR) sistem *cascade* akan semakin turun.
2. Nilai *effectiveness* dari alat penukar kalor tipe *concentric* semakin turun seiring dengan bertambahnya laju pengeluaran kalor kondensor HS. Nilai

*effectiveness*sterkecil adalah 94,35% pada saat kecepatan fan tertinggi 2,8 m/s.

3. Pada saat variasi kecepatan fan tertinggi 2,8 m/s, COP sistem sebesar 1,14, kapasitas refrigerasi sebesar 1,819 kW, HRR sistem sebesar 1,303, temperatur evaporator LS sebesar -35,4⁰C, dan temperatur kabin terendah sebesar -35,1⁰C.

NOMENKLATUR

- Wc* = Daya kompresor (watt)
- ṁ* = Laju aliran massa refrigeran (kg/s)
- h₁* = Entalpi refrigeran masuk kompresor *low stage* (kJ/kg)
- h₂* = Entalpi refrigeran keluar kompresor *low stage* (kJ/kg)
- Q_{cond}* = Laju pengeluaran kalor kondensor (kW)
- ṁ_{HS}* = Laju aliran massa refrigeran *high stage* (kg/s)
- ṁ_{LS}* = Laju aliran massa refrigeran *high stage* (kg/s)
- h₇* = Entalpi refrigeran keluar kondensor *high stage* (kJ/kg)
- h₆* = Entalpi refrigeran masuk kondensor *high stage* (kJ/kg)
- Q_{evap}* = Kapasitas pendinginan (kW)
- ṁ_{ref}* = Laju aliran massa refrigeran (kg/s)
- h₄* = Entalpi refrigeran masuk evaporator (kJ/kg)
- h₁* = Entalpi refrigeran keluar evaporator (kJ/kg)
- W_{total}* = Daya total kompresor *high stage* dan *low stage* (watt)
- Q_{evap}* = Energi panas yang diterima udara (kW)
- Q_{loss}* = Energi panas yang diterima permukaan ducting (kW)
- ṁ_{udara}* = Laju aliran massa udara melewati kondensor *high stage*(kg/s)
- Cp_{udara}* = Kalor spesifik dari udara (kJ/kg.K)
- T_{oc}* = Temperatur udara keluar kondensor (⁰C)
- T_{ic}* = Temperatur udara masuk kondensor (⁰C)
- T_s* = Temperatur permukaan ducting (⁰C)
- v_{udara}* = kecepatan udara melewati kondensor *high stage* (m/s)
- A_{duct}* = Luas penampang ducting kondensor *high stage*(m²)
- ρ_{udara}* = Massa jenis udara (kg/m³)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N.A.Wiguna.(2012). Studi Eksperimental Sistem Pendingin Cascade Menggunakan Refrigeran Musicool 22 di High Stage dan R-404a di Low Stage Dengan Variasi Laju Pelepasan Kalor Pada Kondensor High Stage. Surabaya:Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] A. D. Parekh & P. R. Tailor. (2012). Thermodynamic Analysis of R507A-R23Cascade Refrigeration System. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering.