

Studi Variasi Laju Pelepasan Kalor Kondensator *High Stage* Sistem Refrigerasi *Cascade* R22 Dan R404a Dengan *Heat Exchanger* Tipe *Concentric Tube*

Royyan Firdaus, Ary Bachtiar Khrisna 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— Sistem refrigerasi *cascade* merupakan kombinasi dua sistem refrigerasi tunggal yang digunakan untuk mendapatkan temperatur sangat rendah dimana aplikasinya adalah sebagai *cold storage*. Salah satu kelebihan dari *cascade* ini adalah dalam hal penghematan daya kompresor yang berkaitan langsung dengan penghematan konsumsi listrik bila dibandingkan dengan *multistage*. Eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan refrigerant R-22 pada *high stage* dan R-404A pada *low stage*. Metode pada penelitian ini adalah pengambilan data dilakukan dengan cara *switching* kecepatan *fan* yang berbeda dengan 5 variasi kecepatan *fan* pada kondensator *high stage*. Hasil yang didapatkan pada saat variasi kecepatan *fan* tertinggi adalah nilai *effectiveness* alat penukar kalor tipe *concentric* sebesar 90,42%, COP sistem sebesar 1,28, kapasitas refrigerasi sebesar 0,55 kW, HRR sistem sebesar 1,78, temperatur evaporator LS sebesar -36,95°C, dan temperatur kabin terendah sebesar -37,3°C.

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

I. PENDAHULUAN

PADA kemajuan dunia industri, khususnya di bidang industri perikanan, dibutuhkan tempat menyimpan ikan hasil tangkapan dari laut yang disimpan pada tempat yang dinamakan *cold storage*. *Cold storage* sangat diperlukan di saat industri maju saat ini, dikarenakan kapal penangkap ikan yang bisa sampai berminggu-minggu bahkan berbulan-bulan lamanya mengelilingi lautan untuk menangkap ikan. Sehingga sangat dibutuhkan tempat penampung ikan hasil tangkapan mereka yang dapat mengawetkan ikan untuk waktu yang cukup lama. Dari sinilah peran ilmu refrigerasi dan pengkondisian udara sangat dibutuhkan untuk mengatasi masalah tersebut.

Salah satu sistem alat terbaik untuk persoalan diatas yang dapat membantu mengawetkan ikan hasil tangkapan yaitu sistem refrigerasi *cascade*, karena sistem refrigerasi ini merupakan penurunan ilmu refrigerasi dan pengkondisian udara yang paling efisien untuk tempat penampung sekaligus sebagai *freezer* ikan dengan waktu yang cukup lama. Dan aplikasi dari sistem refrigerasi inilah dimana pada dunia industri saat ini disebut *cold storage*. Sering berubah-ubahnya temperatur lingkungan juga mempengaruhi kinerja dari kondensator 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 kondensator *high-stage* sehingga dapat diketahui dampaknya terhadap keseluruhan sistem. Sistem refrigerasi bertingkat atau sistem refrigerasi *cascade*

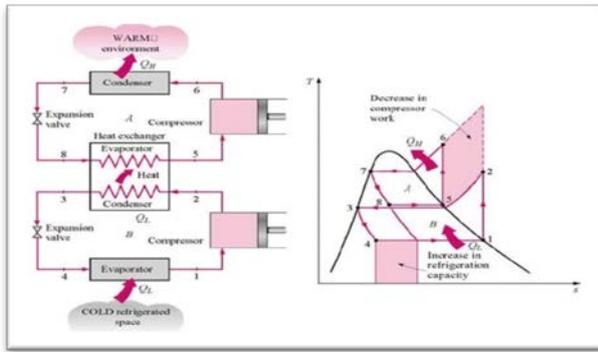
adalah salah satu solusi yang dapat digunakan untuk permasalahan seperti ini. Dengan menggunakan sistem ini, maka kalor pada kondensator *low-stage* dapat didinginkan oleh evaporator *high-stage* sehingga temperatur evaporator yang dicapai pada *low-stage* lebih rendah. Pada tugas akhir sebelumnya telah melakukan studi eksperimental dengan menggunakan dua buah alat penukar panas tipe *compact* dengan cara menempelkan kondensator *low-stage* pada evaporator *high-stage*. Dan 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 efektif. Pada tugas akhir ini komponen yang digunakan sebagai alat penukar panas antara *low-stage* dengan *high-stage* adalah *heat exchanger (HE)* tipe *concentric*. Diharapkan temperatur yang dihasilkan pada evaporator *low-stage* lebih dingin dari studi eksperimental sebelumnya dan daya keseluruhan yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem refrigerasi *cascade* lebih kecil. Akan tetapi minimnya kesadaran akan pentingnya analisa laju alir massa dari *fan* kondensator *high-stage* berdampak pada keefisienan daya kompresor yang membuat penelitian ini dilakukan. Oleh karena masalah tersebut, maka dilakukan studi eksperimen tentang pengaruh variasi laju alir massa fan kondensator *high-stage* terhadap unjuk kerja dan daya kompresor pada sistem refrigerasi *cascade*.

Manfaat dari dilakukannya studi eksperimen ini adalah untuk mendapatkan performansi sistem refrigerasi *cascade* yang sesuai dari pengaruh variasi laju pendinginan yang terjadi pada sistem tersebut.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Sistem Refrigerasi *Cascade*

Sistem refrigerasi *cascade* terdiri dari dua sistem refrigerasi siklus tunggal. Sistem pertama disebut sirkuit temperatur tinggi (*high stage*) dan sistem kedua disebut sirkuit temperatur rendah (*low stage*). Pada prinsipnya efek refrigerasi yang dihasilkan oleh evaporator sirkuit temperatur tinggi (*high stage*) dimanfaatkan untuk menyerap kalor yang dilepas oleh kondensator sirkuit temperatur rendah (*low stage*) sehingga dihasilkan temperatur yang sangat rendah pada evaporator sirkuit temperatur rendah. Secara teoritis, sistem refrigerasi *cascade* menjanjikan keunggulan dalam hal penghematan kebutuhan daya kompresor sekaligus menghemat konsumsi listrik, dan meningkatkan kapasitas refrigerasi apabila dibandingkan dengan sistem pendinginan tunggal. Gambar 1 menyajikan titik-titik keadaan sistem refrigerasi *cascade* dua tingkat.



Gambar 1 Skema refrigerasi Cascade^[1] dan T-s Diagram.

Gambar 1 menunjukkan bahwa sistem refrigerasi dapat dilakukan dengan bertingkat untuk mendapatkan performansi yang lebih baik sehingga dapat meningkatkan kapasitas refrigerasi.

B. Komponen Sistem Refrigerasi Cascade

Sistem pendinginan udara secara umum mempunyai empat komponen utama yang mensirkulasikan refrigeran secara terus-menerus. Keempat komponen tersebut adalah:

1. Kompresor

Kompresor berfungsi untuk mengkompresi refrigeran uap agar mempunyai tekanan yang tinggi untuk memasuki kondensor. Unjuk kerja nyata kompresor dapat diketahui dari daya yang diberikan terhadap kompresor dengan rumus^[2]:

$$\dot{W}_c = \dot{m}_{ref} \cdot (h_{out} - h_{in}) \tag{1}$$

2. Kondensor

Kondensor merupakan salah satu komponen yang berada pada daerah tekanan tinggi dari sistem. Kondensor berfungsi sebagai pembuang panas (*heat rejection*) dari dalam sistem ke luar sistem. Unjuk kerja kondensor dinyatakan dengan rumus^[2]:

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

Pada studi eksperimental ini, laju alir massa akan dicari dari persamaan balans energy pada kondensor. Dengan memberikan luasan *ducting* pada sisi udara maka dari rumus perpindahan panas^[3] dan juga hukum kekekalan energi^[4] diperoleh persamaan:

Q yang dilepas refrijeran = *Q* yang diterima udara

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{Q}_{udara} + \dot{Q}_{losses}$$

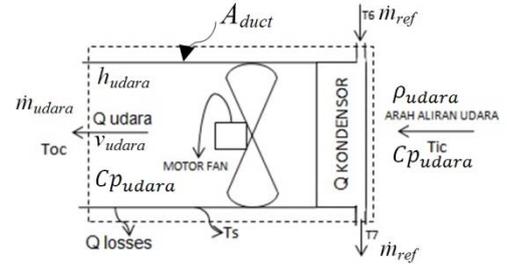
$$\dot{m}_{ref,HS} \cdot \Delta h_{6-7} = (\dot{m}_{udara} \cdot C_p_{udara} \cdot \Delta T_{out-in}) + (h \cdot A_s \cdot \Delta T_{out-surface})$$

$$\dot{m}_{ref,HS} = \frac{(\dot{m}_{udara} \cdot C_p_{udara} \cdot \Delta T_{out-in}) + (h \cdot A_s \cdot \Delta T_{out-surface})}{\Delta h_{6-7}}$$

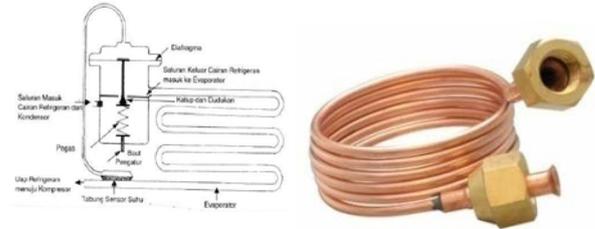
$$\dot{m}_{ref,HS} = \frac{((\rho_{udara} \cdot v \cdot A) \cdot C_p_{udara} \cdot \Delta T_{out-in}) + (h \cdot A_s \cdot \Delta T_{out-surface})}{\Delta h_{6-7}} \tag{3}$$

3. Expansion device

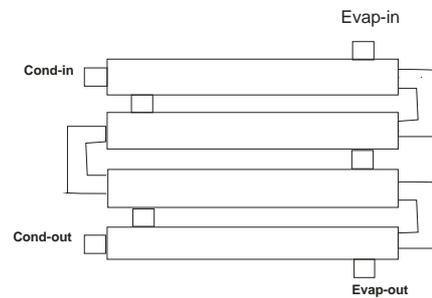
Expansion valve menjadi komponen penentu dalam sistem pendinginan udara. Komponen ini fungsinya menurunkan tekanan serta mengatur laju aliran massa refrigerant. Berikut adalah katup ekspansi yang kami gunakan dalam penelitian ini:



Gambar 2 Model sistem pada ducting dan kondensor HS



Gambar 3 Katup ekspansi TXV eksternal (kiri) dan pipa kapiler (kanan)



Gambar 4 Heat-exchanger tipe konsentris

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 *enthalphy* refrigeran akan meningkat. Semakin banyak kenaikan entalpi pada refrigeran selama di evaporator maka semakin baik pula kinerja perangkat pendinginan udara yang terpasang. Unjuk kerja evaporator dapat diketahui dengan rumusan^[2]:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{ref} (h_{out_evap} - h_{in_evap}) \tag{3}$$

5. Alat penukar panas tipe konsentris

Heat exchanger adalah alat penukar panas yang proses perpindahan panasnya disebabkan oleh perbedaan temperatur. Fluida yang digunakan biasanya berupa cairan atau gas. Ada tiga tipe *heat exchanger*, tipe *shell and tube*, tipe *compact*, dan tipe *concentric*.

Dengan mengasumsikan tidak ada *heat loss*, persamaan^[4] adalah sebagai berikut:

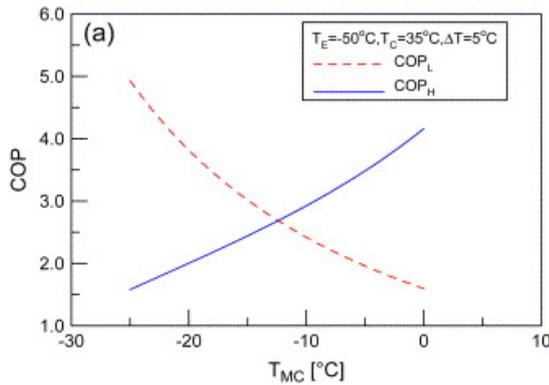
$$\dot{Q}_{KondensorLS} = \dot{Q}_{EvaporatorHS}$$

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

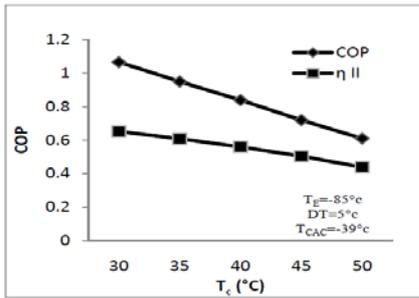
$$\dot{m}_{LS} = \frac{\dot{m}_{HS}(h_5 - h_8)}{(h_2 - h_3)} \tag{4}$$

C. Coefficient Of Performance (COP) Sistem Cascade

Performansi dari sistem refrigerasi *cascaded* dinyatakan dalam *coefficient of performance* (COP). Nilai COP aktual didapatkan dari perbandingan kalor yang diserap oleh evaporator *low staged* dengan daya total yang dibutuhkan oleh



Gambar 5 Grafik perbandingan COP dengan temperatur kondensor *low stage*



Gambar 6 Grafik perbandingan antara COP dengan temperatur kondensor *high stage* sistem refrigerasi cascade

kompresor *low stage* dan *high stage*:

$$COP = \frac{Q_{evapLS}}{W_{total}} \quad (5)$$

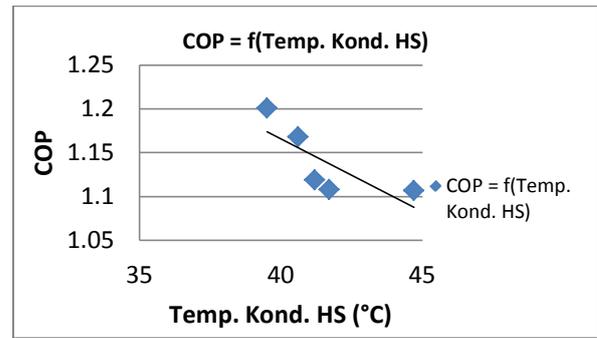
E. Penelitian Terdahulu

Tzong-Shing Lee^[5], melakukan analisa performansi dari mesin refrigerasi cascade dengan menggunakan refrigeran CO₂ dan NH₃. Dari hasil percobaan tersebut, didapatkan beberapa hasil grafik, diantaranya adalah grafik pengaruh perubahan temperatur kondensor pada *low stage* terhadap COP.

Dari gambar 5 dapat disimpulkan jika temperatur pada kondensor *low stage* semakin tinggi, maka unjuk kerja (COP) pada sirkuit temperatur tinggi (*high stage*) akan semakin baik. Dan sebaliknya, jika temperatur pada evaporator *low stage* semakin tinggi, maka unjuk kerja (COP) pada sirkuit temperatur rendah (*low stage*) akan semakin buruk.

Devanshu^[6], melakukan analisis performansi pada sistem refrigerasi *cascade* dengan refrigeran R-404A dan R-508B. Dimana dari hasil analisisnya pada gambar 2.17 memperlihatkan *Coefficient of Performance* (COP) secara sistem mengalami penurunan ketika temperature kondensor pada sirkuit temperatur tinggi (*high stage*) mengalami kenaikan secara konstan.

Dari gambar 6 dapat disimpulkan bahwa jika temperatur pada kondensor *high stage* naik, maka performansi sistem akan mengalami penurunan. Dan sebaliknya jika temperatur pada kondensor *high stage* menurun, maka performansi sistem refrigerasi akan mengalami kenaikan menjadi semakin baik performansi sistem, karena kerja kompresor menjadi ringan. Nilai COP bervariasi secara konstan dari 1.066 ke 0.612, hal ini berkorelasi karena temperatur kondensor *high stage* naik, menjadikan kerja kompresor



Gambar 7 grafik COP vs Tc HS

naik, sehingga *value* COP menurun.

Ismu Cakra^[7], melakukan analisis performansi pada sistem refrigerasi *cascade* dengan refrigeran R-404A dan R-22. Dimana dari hasil analisisnya pada gambar 7 memperlihatkan *Coefficient of Performance* (COP) secara sistem mengalami penurunan ketika temperature kondensor pada sirkuit temperatur tinggi (*high stage*) mengalami kenaikan secara konstan.

Pada grafik diatas terlihat bahwa grafik memiliki tren yang relatif turun, meskipun pada titik paling kanan pada temperature kondensor mengalami kenaikan, secara actual itu tidak merupakan sebuah kenaikan tren grafik pada unjuk kerjanya, akan tetapi terdapat *range* yang agak jauh temperaturnya pada variasi kecepatan fan yang paling rendah, disebabkan kalor yang dilepaskan oleh kondensor sedikit. Nilai COP turun seiring dengan naiknya temperatur pada kondensor *high stage*. Koefisien prestasi adalah bentuk penilaian dari suatu mesin refrigeransi. Harga koefisien prestasi yang semakin turun menunjukkan bahwa kerja mesin tersebut tergantung dari besarnya temperature kondensor HS. Besarnya COP *cascade system* dipengaruhi oleh kapasitas refrigerasi LS dan kerja kompresi total sistem. Kenaikan kecepatan udara pada kondensor HS menyebabkan efek refrigeransi meningkat, sedangkan kerja kompresi mengalami penurunan sehingga COP akan menjadi semakin naik.

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.

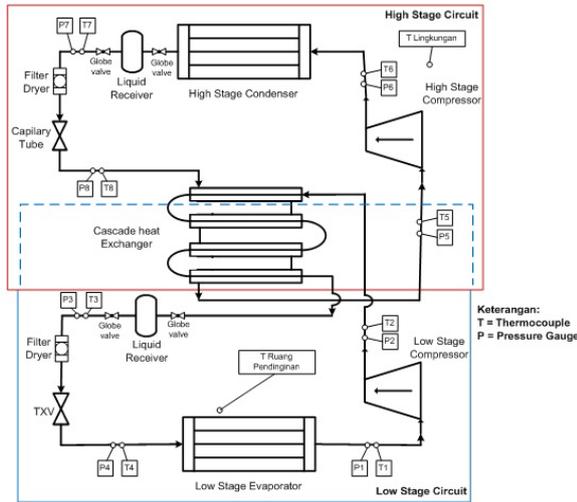
B. Alat Ukur

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



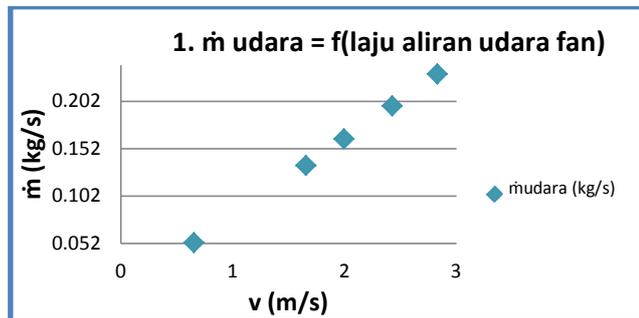
Gambar 9 Skema peralatan sistem pendingin cascade

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.

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

A. Analisa Grafik Laju Alir Massa Udara Terhadap Kecepatan Fan Kondensor HS.

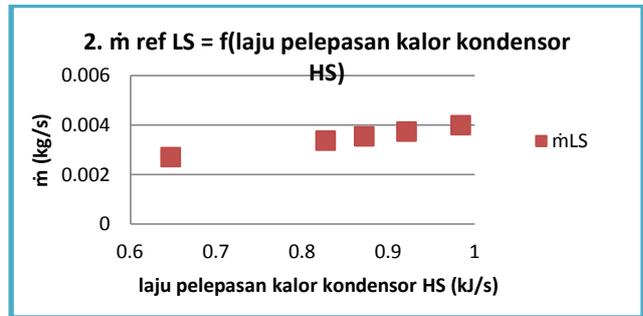


Gambar 10 grafik m_{udara} terhadap kecepatan fan kondensor HS

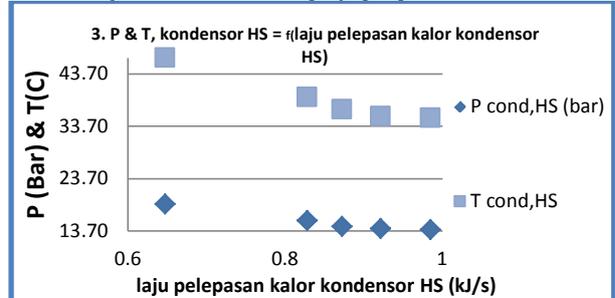
Grafik pada gambar 10 menunjukkan bahwa grafik tersebut memiliki tren yang relatif naik secara linear, nilai m udara naik seiring dengan kecepatan fan pada kondensor high stage. Ketika kecepatan fan kondensor high stage semakin naik dengan nilai luasan yang konstan dan masa jenis udara yang relatif tidak berubah secara signifikan maka akan menyebabkan m_{udara} meningkat karena berbanding lurus dengan kecepatan fan kondensor high stage.

B. Analisa Grafik Laju Alir Massa Kondensor LS Terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondensor HS.

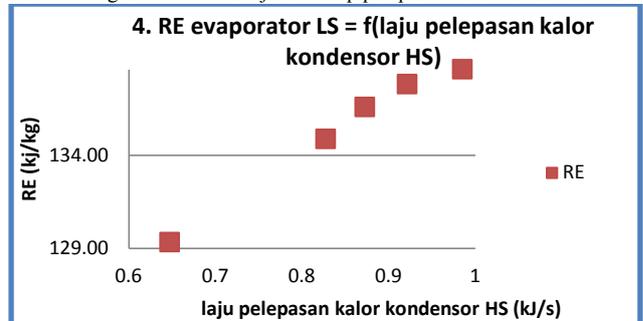
Grafik pada gambar 11 menunjukkan bahwa grafik tersebut memiliki tren yang relatif naik, nilai m refrigerasi LS naik seiring dengan Q_{kondHS}.



Gambar 11 grafik m ref LS terhadap laju pelepasan kalor kondensor HS



Gambar 12 grafik m ref LS laju terhadap pelepasan kalor kondensor HS



Gambar 13 grafik RE evaporator LS terhadap laju pelepasan kalor kondensor HS

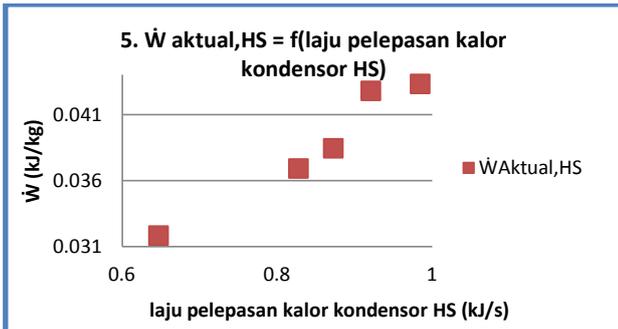
C. Analisa Grafik Massa Alir Refrigerasi HS Terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondensor HS.

Pada grafik pada gambar 12 menunjukkan bahwa grafik tekanan dan temperatur memiliki tren yang cenderung turun, nilai tekanan dan temperatur kondensor refrigeran HS semakin kecil seiring dengan kenaikan laju pelepasan kalor pada kondensor high stage. Ketika nilai laju pelepasan 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.

D. Analisa Grafik Refrigerasi Effect Evaporator LS Terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondensor HS.

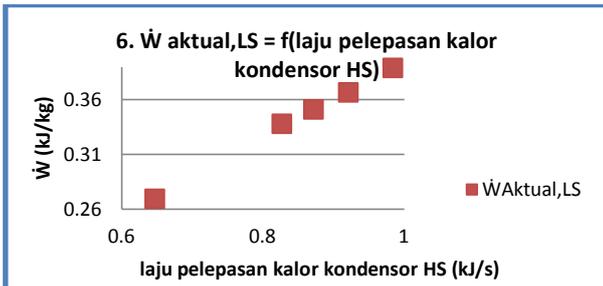
Pada grafik pada gambar 13 menunjukkan bahwa grafik memiliki tren yang cenderung naik, nilai efek refrigerasi (RE) naik seiring dengan naiknya nilai laju pengeluaran kalor pada kondensor high stage.

E. Analisa Grafik Daya Aktual Kompresor HS Terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondenser HS



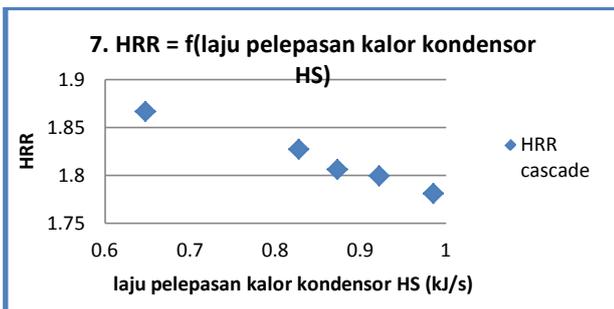
Gambar 14 grafik \dot{W} aktual HS terhadap laju pelepasan kalor kondenser HS

F. Analisa Grafik Daya Aktual Kompresor LS Terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondenser HS.



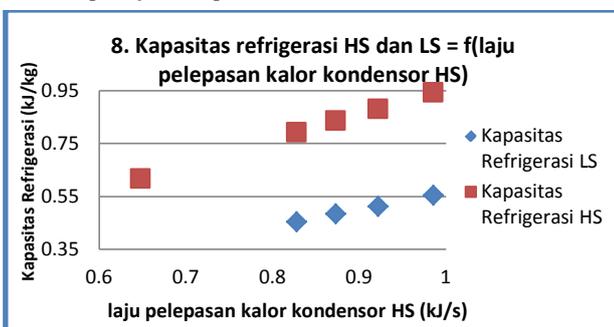
Gambar 5 Grafik \dot{W} komp LS terhadap laju pelepasan kalor kondenser HS

G. Analisa Grafik HRR Terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondenser HS



Gambar 4.9 Grafik pengaruh HRR terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondenser HS

H. Analisa Grafik Kapasitas Refrigerasi LS Dan HS Terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondenser HS.

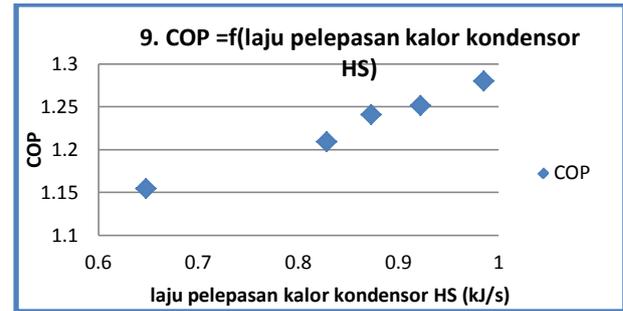


Gambar 15 Grafik kapasitas refrigerasi HS dan LS terhadap laju pelepasan kalor kondenser HS

Pada grafik pada gambar 14 menunjukkan bahwa grafik memiliki tren yang naik, nilai daya kompresor naik seiring dengan naiknya laju pelepasan kalor pada kondensor *high stage*.

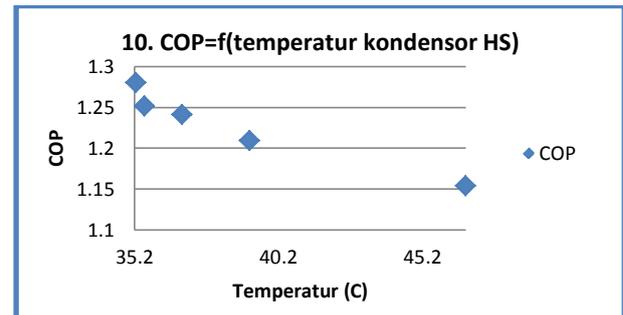
Pada grafik pada gambar 15 menunjukkan bahwa grafik memiliki tren yang naik, nilai daya kompresor LS naik seiring dengan naiknya laju pelepasan kalor pada

I. Analisa Grafik COP Terhadap Laju Pelepasan Kalor Kondenser HS.



Gambar 16 Grafik COP terhadap Laju pelepasan kalor kondenser HS

J. Analisa Grafik COP terhadap Temperatur kondenser HS.



Gambar 17 Grafik COP terhadap Temperatur kondenser HS

kondensor *high stage*. Ketika laju pelepasan kalor pada kondensor *high stage* semakin naik, maka menyebabkan suhu kondensor yang turun.

Pada grafik pada gambar 4.9 menunjukkan tren yang cenderung semakin turun, nilai *heat rejection ratio* (HRR) semakin kecil seiring dengan naiknya laju pelepasan kalor kondensor *high stage*.

Pada grafik pada gambar 15 menunjukkan bahwa grafik memiliki tren yang naik, nilai $\dot{Q}_{\text{evap HS}}$ naik seiring dengan naiknya laju pelepasan kalor pada kondensor *high stage*.

Pada grafik pada gambar 16 menunjukkan tren yang cenderung semakin naik, nilai COP sistem *cascade* semakin besar seiring dengan naiknya laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage*. Koefisien prestasi adalah bentuk penilaian dari suatu mesin refrigerasi. Semakin besar koefisien prestasi, maka semakin baik kerja suatu mesin pendingin. Nilai koefisien prestasi yang semakin besar menunjukkan bahwa kerja mesin tersebut semakin baik.

Pada grafik pada gambar 17 menunjukkan 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.

V. KESIMPULAN

Dari eksperimen yang telah dilakukan, serta analisa dan pembahasan terhadap data yang didapatkan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan meningkatnya laju alir massa refrigeran pada *high stage*, laju pelepasan kalor pada kondensor *high stage* juga semakin meningkat.

2. Dengan meningkatnya laju pelepasan kalor kondensor *high stage*, maka temperatur dan tekanan pada kondensor *high stage* semakin menurun, sedangkan kapasitas refrigerasi dan Koefisien performansi pada *cascade system* mengalami peningkatan.
3. Pada saat variasi kecepatan *fan* tertinggi 2,8 m/s, COP sistem sebesar 1,28, kapasitas refrigerasi sebesar 0,55 kW, HRR sistem sebesar 1,78, temperatur evaporator LS sebesar $-36,95^{\circ}\text{C}$, dan temperatur kabin terendah sebesar $-37,3^{\circ}\text{C}$.
4. Nilai *effectiveness* dari alat penukar kalor tipe *concentric* semakin turun seiring dengan bertambahnya laju pengeluaran kalor kondensor HS. Nilai *effectiveness* terkecil adalah 90,42% pada saat kecepatan fan tertinggi 2,8 m/s.

NOMENKLATUR

- W_c = Daya kompresor (watt)
 \dot{m} = Laju aliran massa refrigeran (kg/s)
 h_1 = Entalpi refrigeran masuk kompresor *low stage* (kJ/kg)
 h_2 = Entalpi refrigeran keluar kompresor *low stage* (kJ/kg)
 Q_{cond} = Laju pengeluaran kalor kondensor (kW)
 \dot{m}_{HS} = Laju aliran massa refrigeran *high stage* (kg/s)
 \dot{m}_{LS} = Laju aliran massa refrigeran *high stage* (kg/s)
 h_7 = Entalpi refrigeran keluar kondensor *high stage* (kJ/kg)
 h_6 = Entalpi refrigeran masuk kondensor *high stage* (kJ/kg)
 Q_{evap} = Kapasitas pendinginan (kW)
 \dot{m}_{ref} = Laju aliran massa refrigeran (kg/s)
 h_4 = Entalpi refrigeran masuk evaporator (kJ/kg)
 h_1 = 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)
 \dot{m}_{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 ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ic} = Temperatur udara masuk kondensor ($^{\circ}\text{C}$)
 T_s = Temperatur permukaan ducting ($^{\circ}\text{C}$)
 v_{udara} = kecepatan udara melewati kondensor *high stage* (m/s)
 A_{duct} = Luas penampang ducting kondensor *high stage* (m^2)
 ρ_{udara} = Massa jenis udara (kg/m^3)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] [1] Darwin. (2011). Pengujian Eksperimental Kinerja Campuran CO_2 dan Etana sebagai Refrigeran Ramah Lingkungan pada Sistem Refrigerasi Cascade. Disertasi Universitas Indonesia. Jakarta. Indonesia.
- [2] [2] Stoecker, Wilbert F., and Jones, Jerold W. (1982). Refrigerasi dan Pengkondisian Udara. Erlangga. Jakarta. Indonesia.
- [3] [3] Lavine, Incropera DeWitt Bergmann. (2005). Fundamental of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- [4] [4] Moran, M.J and Howard N. Shapiro. (2000). Fundamental of Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons Inc. Chicester.
- [5] [5] Lee, Tzong-Shing. (2006). Thermodynamics Analysis of Optimal Condensing Temperature of Cascade-Condenser in CO_2/NH_3 Cascade Refrigeration Systems. Department of Air-Conditioning and

- Refrigeration Engineering. National Taipei University of Technology. Taiwan.
- [6] [6] Pyasi, Devanshu. (2001). Performance Analysis of 404A/508B Cascade Refrigeration Cycle for Low Temperature. Mechanical Engineering Department. Jabalpur Engineering College. Jabalpur. India.
 - [7] [7] Gumilar, Ismu Cakra. (2012). Studi eksperimen Variasi laju pelepasan kalor Pada kondensor high stage Terhadap unjuk kerja Sistem refrigerasi cascade. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.