

Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan Ejektor Dua Fase terhadap Unjuk Kerja Siklus Refrigerasi Pada Mesin Ac

Sunanto^{1,2}, Suhanan¹, Fauzun¹

¹Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Jurusan Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Indramayu

¹Email: sunanto09@yahoo.co.id

Abstrak

penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan ejektor yang ditempatkan sebagai piranti ekspansi dalam peningkatan efisiensi sistem refrigerasi. Pemanfaatan ejektor ini diharapkan dapat mengurangi beban kerja kompresor, meningkatkan efek pendinginan pada unit evaporator dan meningkatkan efek kondensasi pada unit kondensor sehingga secara langsung akan meningkatkan efisiensi sistem. Pengujian akan dilakukan dengan membandingkan secara langsung antara sistem refrigerasi modifikasi yang memanfaatkan ejektor dua-fase terhadap sistem refrigerasi konvensional pada sebuah eksperimen rig dengan menghitung COP ideal masing-masing sistem dan saving energi yang dihasilkan. Hasil dari penelitian ini didapat adanya peningkatan rata-rata COP sebesar 1,4, kerja kompresor sendiri mengalami penurunan sebesar 7kJ/kg, penghematan energi setiap bulannya sebesar 0,189 kW, serta rata-rata efisiensi 0,67% dari sistem yang menggunakan piranti ejektor sebagai pengganti ekspansi. Jadi secara keseluruhan dengan penggunaan piranti ejektor sebagai pengganti ekspansi sangat menguntungkan.

Kata kunci: ejektor, refrigerasi, AC, COP

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi bidang refrigerasi saat ini semakin pesat. Ketergantungan manusia terhadap sistem refrigerasi dari tahun ke tahun terus meningkat, mulai dari skala kecil (misal refrigerator) untuk menyimpan bahan makanan hingga skala besar seperti pada industri. Bahkan pada sarana transportasi juga telah sejak lama menggunakan sistem refrigerasi untuk menjaga kualitas bahan yang didistribusikan. Tidak hanya untuk alasan menjaga kualitas bahan makanan, efek kenyamanan yang ditimbulkan dari sistem refrigerasi AC juga sudah menjadi suatu kebutuhan yang sangat penting bagi manusia. Dari kebutuhan tersebut muncul beberapa tuntutan yang menjadi pendorong utama yang menyebabkan perkembangan teknologi sistem refrigerasi terus mengalami peningkatan. Salah satu tuntutan yang muncul adalah untuk menemukan sistem refrigerasi

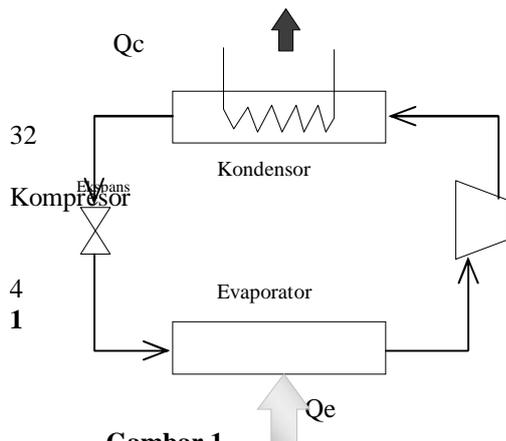
yang memiliki efisiensi siklus yang tinggi tetapi sederhana dalam instalasinya atau dengan kata lain sistem refrigerasi yang memiliki efek pendinginan yang baik tetapi tidak memerlukan input daya yang besar serta performa yang lebih baik. Dalam hal ini ejektor dapat dimanfaatkan sebagai piranti ekspansi yang bertujuan untuk meningkatkan performansi dari siklus refrigerasi serta untuk meningkatkan efisiensi dari kinerja mesin refrigerasi serta penghematan energi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

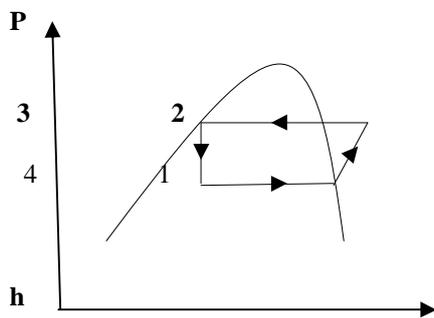
2.1. Landasan Teori

Pada alat pendingin, kalor diserap di bagian evaporator dan dibuang di bagian kondensor. Uap refrigeran yang berasal dari evaporator yang bertekanan dan bertemperatur rendah masuk ke kompresor melalui saluran hisap (*suction*). Di kompresor, uap refrigeran tersebut dimampatkan, sehingga ketika ke luar dari kompresor, uap refrigeran akan bertekanan dan

bertemperatur tinggi, jauh lebih tinggi dibanding temperatur udara sekitar. Kemudian uap refrigeran tersebut dialirkan ke kondensor melalui saluran tekan (*discharge*). Di kondensor, uap tersebut akan melepaskan kalor, sehingga akan berubah fasa dari uap menjadi cair (terkondensasi). Cairan refrigeran yang bertekanan tinggi mengalir ke katup ekspansi. Keluar dari katup ekspansi tekanan menjadi rendah dan akibatnya fluida refrigeran menjadi bertemperatur rendah. Pada saat itulah fluida tersebut menyerap kalor dari sekitar sehingga berubah fase menjadi uap. Kemudian uap refrigeran akan dihisap oleh kompresor dan demikian seterusnya dimana proses-proses tersebut berulang kembali. Siklus refrigerasi yang dipaparkan di atas adalah siklus kompresi uap konvensional seperti gambar 1 dan 2.



Gambar 1.



Gambar 2.

Pada gambar di atas menjelaskan siklus yang terjadi pada sistem refrigerasi kompresi uap dimana pada titik 1 ke 2 adalah proses kompresi yang terjadi di kompresor dimana refrigeran mengalami peningkatan tekanan dan temperatur sehingga mengalami perubahan fasa dari cair menjadi gas.

$$q_w = (h_2 - h_1) \quad (2.1)$$

$$q_w = \text{daya kompresi (kW)}$$

$$= \text{laju aliran massa (kg/s)}$$

$$h_1 = \text{entalphi masuk kompresor (kJ/kg)}$$

$$h_2 = \text{entalphi keluar kompresor (kJ/kg)}$$

garis 2 dan 3 merupakan proses kondensasi dimana proses terjadi pembuangan kalor ke lingkungan.

$$q_k = (h_2 - h_3) \quad (2.2)$$

Pada titik 3 dan 4 terjadi proses ekspansi yaitu terjadinya proses penurunan tekanan yang drastis atau terjadinya *pressur drop*.

$$h_3 = h_4 \quad (2.3)$$

$$x = (3 -) / (-) \quad (2.4)$$

$$h_g = \text{cairan jenuh refrigeran}$$

$$h_f = \text{uap jenuh refrigeran}$$

garis 4 dan 1 merupakan proses evaporasi yaitu terjadinya perubahan fasa dari gas ke cair dan terjadinya proses penyerapan kalor dari lingkungan ke sistem.

$$P(\text{kPa})$$

$$q_c = (h_1 - h_4) \quad (2.5)$$

Performansi sistem refrigerasi η

Effek refrigerasi, (kJ/kg)

$$q_e = (h_1 - h_4) \quad (2.6)$$

Kerja kompresor, (kJ/kg)

$$q_w = (h_2 - h_1) \quad h \text{ (kg/kj)} \quad (2.7)$$

Kondensasi, (kJ/kg)

$$q_s = (h_2 - h_3) \quad (2.8)$$

COP aktual = efek refrigerasi / kerja kompresor

$$\text{COP carnot} = \left(\frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \right) \quad (2.9)$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{COP aktual}}{\text{COP carnot}} \times 100\% \quad (2.10)$$

2.2. Kajian Pustaka

Ejektor Sebagai Piranti Ekspansi Aliran Dua-fase.

A.A.Kornhauser (1990) menyelidiki performa termodinamika dari siklus refrigerasi yang menggunakan ekspansi ejektor dengan R-12 sebagai refrigeran pada kondisi operasional standar, yaitu 15 °C untuk temperatur evaporator dan 30 °C untuk temperatur kondensor. Sebuah peningkatan *COP* teoritis sebesar 21% dihasilkan dibanding siklus standart. Hasil ini didasarkan pada siklus ideal dan tekanan pencampuran yang konstan dalam ejektor.

G.S. Harrell et al. (1995) menggunakan ejektor dua fase dengan R-134a dan sebuah test rig (*anjungan uji*) untuk menentukan COP dari siklus refrigerasi. Dari hasil pengujian tersebut ditemukan peningkatan COP sebesar 3,9 % hingga 7,6 % dibanding siklus refrigerasi kompres

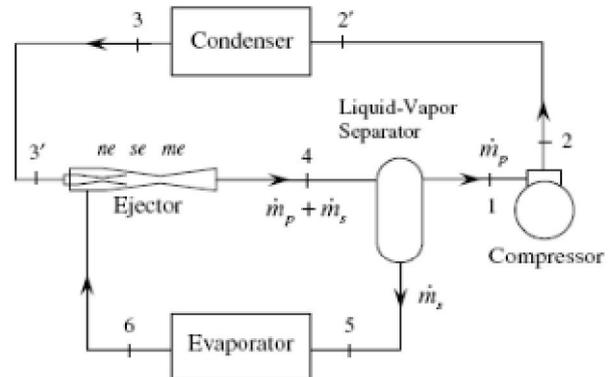
P.Menegay A.A, et al. (1996) membuat suatu tabung dengan aliran gelembung untuk mengurangi ketak-seimbangan termodinamik di dalam *motive nosel* dengan R-12 sebagai refrigeran. Piranti ini diinstalasikan pada bagian hulu dari *motive nosel*. COP dari sistem yang menggunakan tabung aliran gelembung dapat diperbaiki hingga 3,8% dibanding dengan siklus refrigerasi konvensional pada kondisi standar.

S. Disawas dan S. Wongwises (2000) dan **Wongwises dan Disawas (2005)**, dalam peralatan percobaan mereka, evaporator dibanjiri dengan refrigeran dan menjadi suatu sistem peredaran ulang cair refrigeran di mana sebagai suatu piranti ekspansi, ejektor juga bertindak sebagai sebuah pompa refrigeran pada sisi tekanan rendah dari sistem.

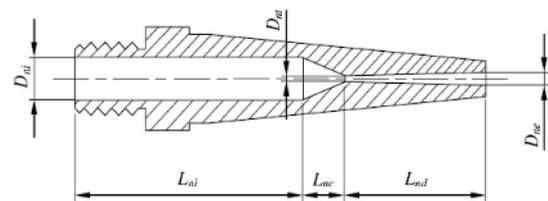
P. Chaiwongsa dan S. Wongwises, (2007), melakukan pengujian lanjutan terhadap ejektor yang difungsikan sebagai sebuah piranti ekspansi. Penelitian ini mereka nyatakan sebagai penelitian ketiga terhadap performa ejektor yang berhasil dipublikasikan. Mereka memfokuskan penelitian pada parameter-parameter geometri ejektor untuk menghasilkan performa sistem refrigerasi yang lebih baik. **Gambar 4**, menunjukkan skema diagram dari percobaan yang dilakukan oleh Praitoon Chaiwongsa dan Somchai Wongwises. R-134a digunakan sebagai fluida kerja. *Refrigeran loop* terdiri dari siklus kompresi uap dengan komponen-komponen: kompresor, kondensor, katup ekspansi dan alat penguapan, dan bagian aksesori lain – pemisah minyak (*oil separator*), penampung refrigeran cair (*liquid receiver*), filter/drier, gelas/kaca penduga (*sight glass*) dan penghimpun (*accumulator*). Kondisi operasi peralatan tersebut dikondisikan sama seperti pada penerapan dari tipe pengkondisian udara (*air-conditioning*). Secara prinsip modifikasi-modifikasi dari sistem refrigerasi yang standar adalah dengan penambahan suatu ejektor dua fase dan sebuah alat pemisah liquid-vapor.

Di dalam studinya, **P. Chaiwongsa dan S. Wongwises** menggunakan tiga unit *motive nosel*

dengan diameter saluran yang berbeda (D_{ne}) dari 2,0, 2,5 dan 3,0 mm diselidiki. Diameter lubang masuk (D_{ni}), panjang lubang masuk (L_{ni}), panjang bagian konvergen (L_{nc}), diameter leher/daerah pengecilan (D_{nt}) dan panjang bagian divergen (L_{nd}) dari ketiga *motive nosel* tersebut adalah 6, 32, 6, 0,9, 20 mm, secara berturut-turut seperti ditunjukkan pada **gambar 4**.



Gambar 3. Skema diagram siklus refrigerasi menggunakan ejektor sebagai piranti ekspansi



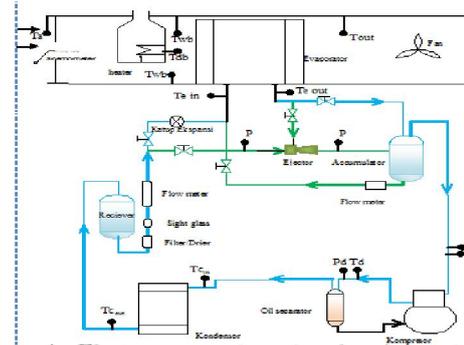
Gambar 4. Dimensi

Biasanya, perbandingan performa siklus dapat dibuat dengan dua pendekatan. *Pendekatan pertama* didasarkan pada parameter internal yaitu temperatur evaporator dan temperatur kondensor. Metoda ini memerlukan modus yang berbeda untuk dibandingkan pada temperatur evaporasi dan kondensasi yang sama. *Pendekatan kedua* didasarkan pada parameter eksternal seperti temperatur inlet dan laju aliran perpindahan panas fluida.

Gambar 7, menunjukkan sebuah diagram p-h (diagram tekanan-entalpi) dari siklus refrigerasi ejektor dua-fase, untuk $D_{ne} = 2,5$ mm, pada $T_{source} = 8$ °C dan $T_{sink} = 26,50$ °C. Siklus tersebut dipisahkan dalam dua loop; refrigeran loop utama dan refrigeran loop sekunder. Di dalam refrigeran loop yang utama, uap dari alat pemisah cair-uap tertarik masuk ke silinder kompresor pada langkah isap nya dan dimampatkan ke tekanan P_2 dan temperatur T_2 pada langkah kompresi dan ke luar kompresor

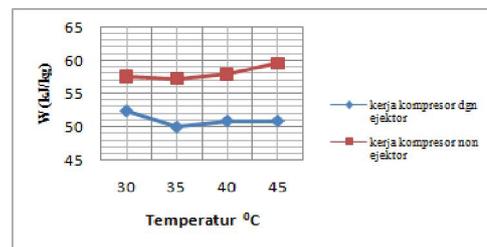
pada kondisi 2 melewati kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin bertemperatur 20 °C. Uap refrigeran pertama di dinginkan ketemperatur saturasinya pada tekanan P_2 dan selanjutnya melepaskan panas. Kondensasi pada temperatur tinggi menghasilkan cairan refrigeran dalam kondisi sub-cooled pada titik 3. Refrigeran cair bertekanan tinggi selanjutnya diekspansikan melalui motive nosel pada titik 3. Refrigeran utama akan bercampur dengan refrigeran sekunder pada ruang campur. Campuran itu akan dimampatkan melalui difuser dan mengalir menuju titik 4 dan ke alat pemisah cair-uap. Di dalam refrigeran loop sekunder, ketika refrigeran utama bertekanan tinggi dialirkan ke saluran masuk nosel dan berekspansi di dalam ruang campur, uap refrigeran dari evaporator pada titik 6, akan secara beriringan masuk dengan pancaran refrigeran kecepatan tinggi dan termampatkan melalui ruang campur ke dalam difuser pada titik 4. Uap refrigeran dari alat pemisah cair-uap dihisap oleh kompresor kemudian cairan sub-cooled refrigeran mengalir ke saluran masuk evaporator pada titik 5 dan menyerap panas dari air panas yang dilewatkan ke evaporator (saluran keluar dari evaporator pada titik 6). Siklus akan terus berlanjut secara berulang.

refrigerasi yang selanjutnya digunakan untuk menentukan COP sistem. Gambar 5, menunjukkan kerangka dasar prosedur penelitian.



Gambar 5. Intalasi sistem

3.2 Hasil dan Pembahasan



Gambar 7. Perbandingan kerja kompresor

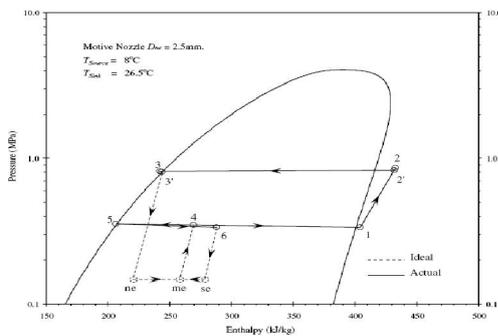


Fig. 4. Pressure-enthalpy diagram of the two-phase ejector refrigeration cycle in the present study.

Gambar 6. Diagram p – h dari siklus refrigerasi ejektor dua-fase

3. METODE PENELITIAN

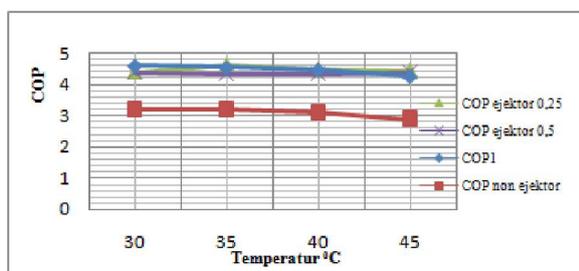
3.1. Alur Penelitian.

Penelitian ini dilakukan dengan metode perbandingan secara langsung terhadap COP dari sebuah sistem refrigerasi konvensional *standard* dengan sistem refrigerasi baru yang memanfaatkan ejektor sebagai piranti ekspansi. Perbandingan dilakukan dengan mengukur variable-variabel tekanan dan temperatur sistem

Dari gambar 7. Di atas yang menggambarkan perbandingan antara kerja kompresor dengan temperatur terlihat bahwa semakin tinggi temperatur maka kerja kompresor juga mengalami peningkatan. Peningkatan kerja kompresor terjadi pada kedua sistem baik itu pada sistem yang tanpa menggunakan ejektor maupun sistem yang menggunakan ejektor tetapi peningkatan kerja kompresor pada sistem tanpa menggunakan ejektor lebih tinggi di bandingkan peningkatan kerja kompresor pada sistem yang menggunakan ejektor. Dengan beban yang sama ternyata temperatur pada sistem yang tanpa menggunakan ejektor lebih tinggi bila di bandingkan pada sistem yang menggunakan ejektor oleh karena itu peningkatan temperatur akan berpengaruh pada kerja kompresornya. Besarnya nilai kerja kompresor terjadi pada temperatur beban puncak yaitu temperatur heater 450C. Dengan nilai kerja kompresor sebesar 50 kJ/kg untuk sistem yang menggunakan ejektor sedangkan sistem yang tidak menggunakan ejektor sebesar 59,6 kJ/kg.

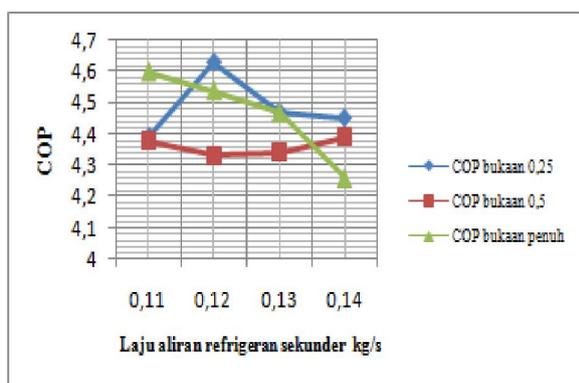
Tabel 1. Kinerja mesin AC dengan dan tanpa ejektor

Performansi Mesin AC	Ejektor				Non Ejektor			
	30 ⁰ C	35 ⁰ C	40 ⁰ C	45 ⁰ C	30 ⁰ C	35 ⁰ C	40 ⁰ C	45 ⁰ C
Setting beban temperatur	30 ⁰ C	35 ⁰ C	40 ⁰ C	45 ⁰ C	30 ⁰ C	35 ⁰ C	40 ⁰ C	45 ⁰ C
COP	4,39	4,63	4,47	4,45	3,19	3,19	3,08	2,88
Kerja Kompresor (kJ/kg)	52,4	50	50,9	50,9	57,5	57,2	57,9	59,6
Efisiensi %	0,72	0,7	0,67	0,79	0,68	0,66	0,63	0,64
Saving Energi (kJ/kg)	5,1	7,2	7	8,7				



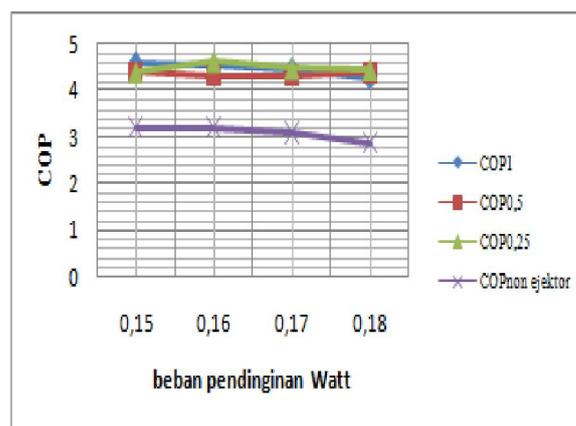
Gambar 8. Perbandingan COP

Gambar 8. di atas menunjukkan perbandingan antara besarnya nilai COP dari kedua sistem terhadap temperatur, dari besarnya nilai COP mesin AC dengan menggunakan ejektor lebih besar di bandingkan dengan sistem yang tidak memakai ejektor, disebabkan karena pada mesin AC yang menggunakan ejektor sebagian refrigeran uap yang keluar dari evaporator yang mengalami peningkatan temperatur akan diumpungkan balik sehingga refrigeran yang bercampur mengalami pemanasan awal sehingga mengakibatkan refrigeran yang masuk suction line menjadi lebih ringan. Secara keseluruhan rerata kenaikan COP yang dihasilkan pada mesin AC dengan menggunakan ejektor sebesar 1,4.



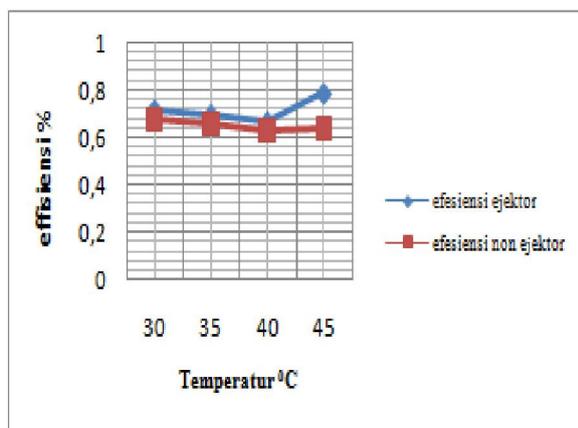
Gambar 9. Perbandingan COP terhadap Laju refrigeran sekunder

Gambar 9. di atas menunjukkan perbandingan antara laju aliran refrigeran sekunder dengan besarnya nilai COP pada sistem yang menggunakan ejektor yaitu aliran refrigeran yang keluar dari evaporator dimana sebagian besar mengalir ke suction line dan sebagian kecil mengalir masuk ke ejektor sebagai aliran sekunder. Dari hasil pengolahan data maka di dapatkan nilai COP sistem yang menggunakan ejektor yang terbesar pada seting beban temperatur 30⁰C dengan nilai sebesar 4,6 pada bukaan katup penuh yang terjadi pada laju alir refrigeran sekunder sebesar 0,11 L/menit dan akan terus mengalami penurunan nilai COP sejalan dengan bertambahnya pembebanan.



Gambar 10. Beban pendinginan

Gambar 10 di atas menunjukkan perbandingan antara besarnya beban pendinginan terhadap temperatur dimana beban puncak yang terjadi pada seting temperatur heater sebesar 300C dengan nilai beban pendinginan sebesar 0,17 kW. Selanjutnya akan mengalami penurunan beban pendinginan di karenakan adanya peningkatan beban udara yang masuk ke evaporator. Sehingga akan menambah berat kerja kompresor.



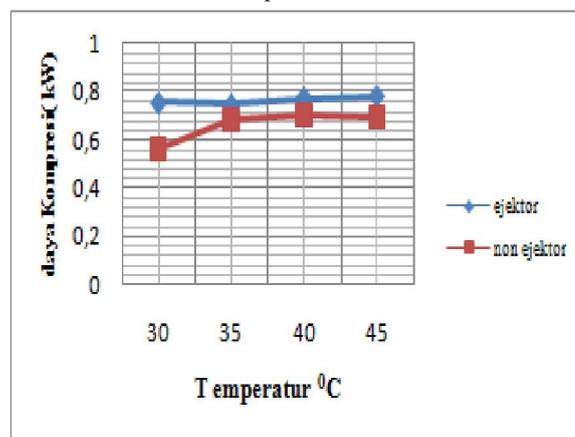
Gambar 11. Perbandingan efisiensi

Pada gambar 11. menunjukkan perbandingan efisiensi dari kedua sistem dimana efisiensi pada sistem yang menggunakan ejektor lebih besar di bandingkan efisiensi pada sistem tanpa ejektor ini disebabkan pengaruh adanya pemanasan awal pada evaporator melalui aliran sekunder. Refrigeran yang berphase cair yang bertekanan dan temperatur lebih tinggi masuk ke *nozzel* menjadikan tekanan rendah namun memiliki kecepatan *sonic* sehingga akan menarik refrigeran uap dari saluran sekunder dan akan bercampur di dalam *mixing chamber*. Selanjutnya refrigeran campuran itu akan masuk kembali ke evaporator untuk menyerapa kalor berikutnya. Besarnya efisiensi mesin AC yang menggunakan ejektor rerata kenaikan secara keseluruhan sebesar 6,75 %.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan maka dengan adanya penambahan ejektor pada sistem mesin AC dapat memberikan performansi yang lebih baik di bandingkan dengan sistem konvensional. Dari hasil eksperimen didapat sebagai berikut:

Peningkatan rata-rata nilai COP sebesar 1,4. Kerja kompresor jadi lebih ringan rata-rata sebesar 7 kJ/kg. Penghematan energi setiap bulannya sebesar 0,189 kW atau setara dengan Rp. 20582,- . Rata-rata efisiensi sebesar 6,75%



Gambar 12. Penghematan Energi Listrik

Berdasarkan pada eksperimen yang telah dilakukan dengan adanya penambahan piranti ejektor sebagai pengganti kapiler maka mesin AC memiliki penghematan energi listrik yang berbeda berdasarkan pada variasi pembebanan pendinginannya, pembebanan pendinginan dengan cara mengatur temperatur udara masuk pada evaporator, dimana temperatur yang di atur adalah pada 30°C, perhitungan yang dilakukan bedasarkan pada tarif dasar listrik nasional yaitu sebesar Rp.605,- per kWh dan pemakaian selama 6 jam per hari. Penghematan yang diperoleh pada sistem yang menggunakan ejektor sebesar 0,189 kW sehingga bila di rupiahkan sebesar Rp. 20582 per bulan. Begitu juga pada pembebanan berikutnya mendapatkan penghematan sebesar 0,061 kW dan bila di rupiahkan sebesar Rp. 6642,- dan pada pembebanan yang lebih besar akan mendapatkan penghematan sebesar 0,072 kW dan bila di rupiahkan setara dengan Rp.7840,- dan pada pembebanan puncak yaitu pada temperatur 45°C mendapatkan penghematan sebesar 0,089 kW dengan nilai rupiah sebesar Rp. 9692,- dan jika direrata maka akan mendapatkan penghematan sebesar 0,103 kW dan bila di rupiahkan setara dengan Rp. 11189,5,-

5. DAFTAR PUSTAKA

1. A.A. Kornhauser, The use of an ejektor as a refrigerant expander, in: Proceedings of the 1990 USNC/IIR-Purdue Refrigeration Conference, (1990).
2. G.S. Harrell, A.A. Kornhauser, Performance tests of a two-phase ejektor, in: roceedings of the 30th Intersociety Energi Conversion Engineering Conference, Orlando, FL, (1995).
3. P. Menegay A.A. Kornhauser, Improvements to the ejektor expansion refrigeration cycle, in: Proceedings of the 31th Intersociety Energi Conversion Engineering Conference, Washington DC, (1996)
4. Praitoon Chaiwongsa, Somchai Wongwises, Experimental study on R-134a refrigeration sistem using a two-phase ejektor as an expansion device, International Journal of Refrigeration (2007).
5. S. Disawas, S. Wongwises, Experimental investigation on the performance of the refrigeration cycle using a two-phase ejektor as an expansion device, International Journal of refrigeration (2004).
6. S. Wongwises, Somjin Disawas, Performance of the two-phase ejektor expansion refrigeration cycle, International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005).
7. Venkatarathnam, G. The Coefficient of Performance of an ideal air-conditioner, International Journal of Refrigeration (2009)