

Pengaruh Penggunaan Katup Ekspansi Termostatik dan Pipa Kapiler terhadap Efisiensi Mesin Pendingin Siklus Kompresi Uap

Azridjal Aziz^{1,a*} dan Bobby Hary Hartanto^{2,b}

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau,
Jl Subrantas km 12,5 Pekanbaru 28293, Indonesia
^aazridjal@yahoo.com, ^bbobby_haryhartanto@yahoo.com

Abstrak

Salah satu komponen dasar Mesin Pendingin adalah alat ekspansi. Fungsi alat ekspansi adalah mengalirkan serta menurunkan tekanan dan temperatur refrigeran agar kalor dapat diserap di evaporator sehingga diperoleh efek dingin yang diinginkan. Alat ekspansi akan mengatur aliran refrigeran yang masuk ke evaporator baik dalam jumlah yang tetap dengan pipa kapiler atau jumlah sesuai beban pendinginan dengan katup ekspansi termostatik (KET). Untuk kebutuhan pendinginan yang optimal, sangat penting untuk mengetahui performansi dari mesin pendingin. Pengujian menggunakan KET lebih efisien dibandingkan dengan pipa kapiler, hal ini disebabkan penggunaan KET akan memberikan tekanan dan temperatur kerja lebih rendah dibandingkan pipa kapiler, sehingga dalam prosesnya akan menyebabkan penyerapan panas yang lebih besar di evaporator dan kerja kompresor akan lebih ringan sehingga penggunaan listrik akan lebih hemat. Konsumsi listrik menggunakan KET lebih hemat 31,92% dibandingkan menggunakan pipa kapiler 1,25 m, lebih hemat 24,77% dibandingkan menggunakan pipa kapiler 1,5 m, dan lebih hemat 5,92% dibandingkan menggunakan pipa kapiler 2,7 m.

Kata kunci : mesin pendingin, alat ekspansi, pipa kapiler, katup ekspansi termostatik, efisien

Latar belakang

Teknologi mesin pendingin saat ini sangat mempengaruhi kehidupan dunia modern, tidak hanya terbatas untuk peningkatan kualitas dan kenyamanan hidup, namun juga sudah menyentuh hal-hal esensial penunjang kehidupan manusia [1].

Mesin pendingin adalah suatu alat yang digunakan untuk memindahkan panas dari dalam ruangan ke luar ruangan. Mesin pendingin yang paling banyak digunakan saat ini adalah mesin pendingin yang beroperasi dengan siklus kompresi uap (SKU). Mesin pendingin SKU memiliki empat komponen utama yaitu kompresor, kondensor, evaporator dan alat ekspansi.

Proses penyerapan kalor terjadi di evaporator, cairan refrigeran (zat/fluida pendingin) di dalam evaporator yang berada pada temperatur dan tekanan rendah akan mengambil atau menyerap kalor dari ruangan, sehingga refrigeran yang berubah fasa menjadi uap menurunkan temperatur ruangan. Uap refrigeran pada temperatur dan tekanan rendah kemudian dihisap oleh kompresor sehingga temperatur dan tekanannya naik, kalor dari uap refrigeran yang tekanan dan temperturnya naik, kemudian

dibuang ke luar ruangan/lingkungan di kondensor, sehingga uap refrigeran akan mengembun (kondensasi) menjadi cairan. Agar proses pendinginan dapat berlangsung, maka cairan refrigeran yang bertemperatur dan tekanan tinggi di kondensor perlu diturunkan temperatur dan tekanannya agar penyerapan kalor dapat berlangsung kembali. Sebuah alat ekspansi yang dipasang setelah kondensor akan menyebabkan temperatur dan tekanan cairan refrigeran turun sehingga panas ruangan akan diserap atau diambil kembali oleh cairan refrigeran di evaporator.

Alat ekspansi berfungsi mengekspansikan secara adiabatik cairan refrigeran bertekanan dan bertemperatur tinggi dari kondensor sampai tekanan dan temperturnya rendah serta mengatur pemasukan refrigeran sesuai dengan beban pendinginan yang dapat dilayani oleh evaporator. Alat ekspansi akan mengatur aliran refrigeran baik secara manual maupun otomatis.

Suryono, Ahmad Fauzan dan Hoten, Hendri Van, 2009, menyatakan bahwa kinerja mesin dengan katup ekspansi lebih baik dibanding pipa kapiler [2]. Penggunaan KET akan memberikan tekanan dan temperatur kerja yang lebih rendah dibanding pipa kapiler. Artinya penggunaan KET

akan memberikan pendinginan yang lebih baik dibanding penggunaan pipa kapiler [3]. Jackson B. Marcinichen, dan Claudio Melo, 2006 telah membandingkan antara pipa kapiler dan katup ekspansi elektronik pada kulkas, dimana terdapat penghematan listrik pada penggunaan katup ekspansi elektronik pada beban pendinginan berbeda [4].

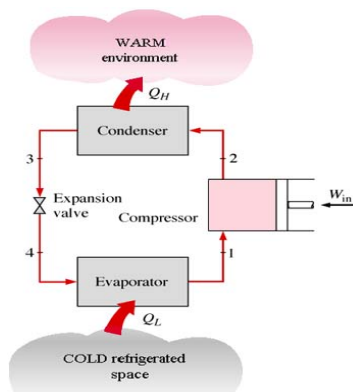
Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh alat ekspansi, yaitu jenis pipa kapiler dan jenis katup ekspansi termostatik (KET) pada mesin pendingin siklus kompresi uap terhadap perubahan temperatur dan tekanan yang mungkin terjadi pada sistem pendingin sehingga juga ikut mempengaruhi efisiensi energi dan performansi dari mesin pendingin siklus kompresi uap tersebut.

Tinjauan Pustaka

Skema sistem refrigerasi SKU dapat dilihat pada Gambar 1.

Pada siklus kompresi uap standar, di evaporator refrigeran akan menyerap kalor dari dalam ruangan sehingga kalor tersebut akan menguapkan refrigeran.

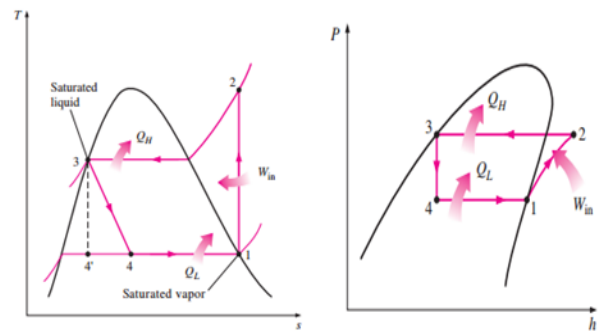
Kemudian uap refrigeran akan dikompres oleh kompresor hingga temperatur dan tekanannya naik, lalu uap refrigeran didorong masuk ke kondensor, di dalam kondensor uap refrigeran dikondensasikan dengan cara membuang kalor dari uap refrigeran ke lingkungannya. Di dalam kondensor, energi kalor yang dibawa oleh uap refrigeran dilepaskan dan diterima oleh medium pendinginnya (udara). Refrigeran cair dari kondensor selanjutnya akan diterima oleh katup ekspansi dan dialirkan lagi masuk ke evaporator. Pada katup ekspansi ini tekanan refrigeran yang masuk ke evaporator diturunkan.



Gambar 1. Mesin Refrigerasi Siklus Kompresi Uap [5]

Penurunan tekanan ini disesuaikan dengan kondisi yang diinginkan, sehingga refrigeran tersebut dapat menyerap cukup banyak kalor dari evaporator. Dalam diagram T-s dan P-h siklus

kompresi uap ideal dapat dilihat dalam Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Diagram 1-s dan P-h Siklus Kompresi Uap [5]

Proses-proses yang terjadi pada siklus kompresi uap seperti pada Gambar 2, adalah sebagai berikut:

a. Proses kompresi (1-2)

Proses ini dilakukan oleh kompresor dan berlangsung secara isentropik. Kondisi awal refrigeran pada saat masuk ke dalam kompresor adalah uap jenuh bertekanan rendah, setelah mengalami kompresi refrigeran akan menjadi uap bertekanan tinggi. Karena proses ini berlangsung secara isentropik, maka temperatur ke luar kompresor pun meningkat.

b. Proses kondensasi (2-3)

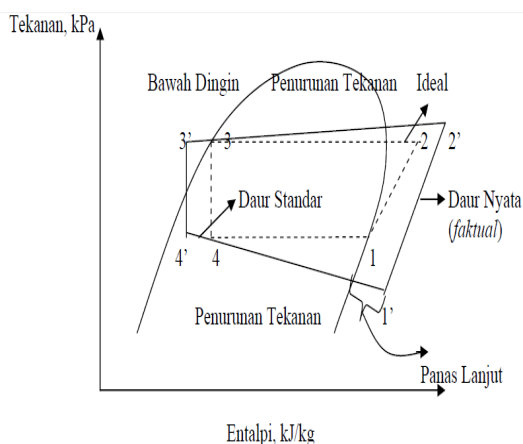
Proses ini berlangsung di dalam kondensor. Refrigeran yang bertekanan tinggi dan bertemperatur tinggi yang berasal dari kompresor akan membuang kalor sehingga fasanya berubah menjadi cair. Hal ini berarti bahwa di dalam kondensor terjadi pertukaran kalor antara refrigeran dengan lingkungannya (udara), sehingga panas berpindah dari refrigeran ke udara pendingin yang menyebabkan uap refrigeran mengembun menjadi cair.

c. Proses ekspansi (3-4)

Proses ekspansi ini berlangsung secara isoentalpi. Hal ini berarti tidak terjadi perubahan entalpi tetapi terjadi drop tekanan dan penurunan temperatur

d. Proses evaporasi (4-1)

Proses ini berlangsung secara *isobar isothermal* (tekanan konstan, temperatur konstan) di dalam evaporator. Kalor dari dalam ruangan akan diserap oleh cairan refrigeran yang bertekanan rendah sehingga refrigeran berubah fasa menjadi uap bertekanan rendah.



Gambar 3. Daur Kompresi Uap Nyata dan Daur Standar [6]

Perbedaan yang penting antara daur nyata (aktual) dan standar terletak pada penurunan tekanan di dalam kondensator dan evaporator, prosesnya dapat dilihat seperti Gambar 3.

Salah satu elemen dasar dalam siklus refrigerasi uap adalah alat ekspansi. Alat ekspansi ini mempunyai dua fungsi yaitu menurunkan tekanan refrigeran dan mengatur aliran refrigeran ke evaporator. Secara umum ada dua jenis alat ekspansi yang biasa digunakan yaitu pipa kapiler dan katup ekspansi (*expansion valve*).

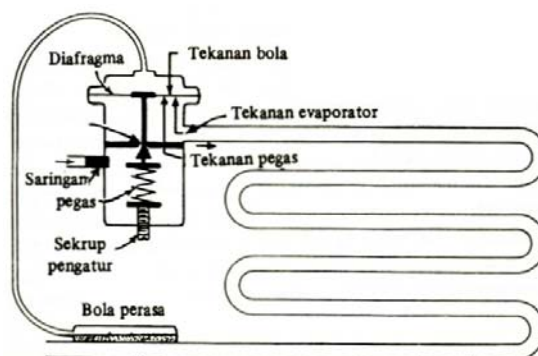
Alat ekspansi yang umum digunakan untuk sistem refrigerasi rumah tangga adalah pipa kapiler. Pipa kapiler adalah pipa tembaga dengan diameter lubang kecil dan panjang tertentu. Besarnya tekanan pipa kapiler bergantung pada ukuran diameter lubang dan panjang pipa kapiler. Pipa kapiler terletak diantara kondensator dan evaporator. Refrigeran yang melalui pipa kapiler akan mulai menguap. Selanjutnya berlangsung proses penguapan yang sesungguhnya di evaporator. Jika refrigeran mengandung uap air, maka uap air akan membeku dan menyumbat pipa kapiler. Agar kotoran tidak menyumbat pipa kapiler, maka pada saluran masuk pipa kapiler dipasang saringan yang disebut strainer.

Ukuran diameter dan panjang pipa kapiler dibuat sedemikian rupa, sehingga refrigeran cair harus menguap pada akhir evaporator. Jumlah refrigeran yang berada dalam sistem juga menentukan sejauh mana refrigeran di dalam evaporator berhenti menguap, sehingga pengisian refrigeran harus cukup agar dapat menguap sampai ujung evaporator. Pipa kapiler dapat dilihat seperti Gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Pipa Kapiler. [7]

Katup Ekspansi Termostatik / KET (*Thermostatic Expansion Valve*) merupakan alat pengatur refrigeran yang paling banyak dipakai untuk mesin pendingin. Katup ekspansi tersebut dapat mengatur jumlah refrigeran yang mengalir dalam evaporator sesuai dengan beban evaporator yang maksimum pada setiap keadaan beban evaporator yang berubah-ubah. KET dapat mempertahankan uap panas lanjut yang konstan. Katup ekspansi ini tidak hanya mengatur tekanan dan temperatur dalam evaporator, tetapi mengontrol jumlah refrigeran yang mengalir masuk ke dalamnya. Refrigeran yang mengalir melalui KET diteruskan ke evaporator, selain dikontrol oleh tekanan rendah dalam evaporator, juga oleh temperatur dan tekanan pada akhir evaporator, seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Bagian-Bagian Katup Ekspansi Termostatik.[6]

Untuk menyatakan performansi dari suatu SKU yang diperhatikan adalah [8,9] dampak refrigerasi, laju pelepasan kalor, kerja kompresi, *Coefficient Of Peformance* (COP).

a. Kerja Kompresi

Kerja Kompresi adalah kerja yang diterima oleh refrigeran untuk tiap satuan massa refrigeran.

$$w_k = \frac{W_k}{m} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

w_k = besarnya kerja kompresi yang dilakukan oleh kompresor (kJ/kg)

h_1 = entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

h_2 = entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

b. Efek Kondensasi

Efek kondensasi adalah besarnya panas refrigeran yang dilepas dikondensor.

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (2)$$

- q_c = panas refrigeran yang dilepas di kondensor (kJ/kg)
- h_2 = entalpi refrigeran saat masuk kondensor (kJ/kg)
- h_3 = entalpi refrigeran saat keluar kondensor (kJ/kg)

c. Efek Refrigerasi

Efek Refrigerasi adalah besarnya panas yang dapat diserap oleh refrigeran persatuan massa. Besarnya dihitung dengan selisih entalpi refrigeran masuk dan keluar kondensor.

$$q_e = \frac{Q_e}{m} = h_1 - h_4 \quad (3)$$

- q_e = besarnya kalor yang diserap evaporator (kJ/kg)
- h_1 = entalpi refrigeran luar evaporator (kJ/kg)
- h_4 = entalpi refrigeran masuk evaporator (kJ/kg)

d. Koefisien Peformansi

Coefficient Of Peformance (COP) adalah perbandingan dampak refrigerasi dengan kerja kompresor.

$$COP = \frac{q_e}{w_k} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (4)$$

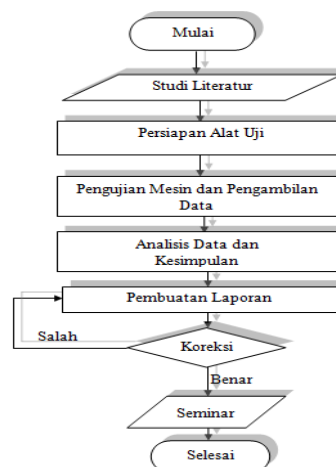
- q_e = besarnya kalor yang diserap evaporator (kJ/kg)
- w_k = besarnya kerja kompresi yang dilakukan oleh kompresor (kJ/kg)

Metodologi

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini merupakan metode eksperimental untuk menguji sebuah mesin pendingin yang menggunakan alat ekspansi termostatik dan pipa kapiler.

Untuk pengujian pipa kapiler (*Capillary Valve*) maka katup aliran refrigeran ke katup ekspansi termostatik (*Thermostatic Expansion Valve*) ditutup, sebaliknya jika pengujian menggunakan katup ekspansi termostatik (*Thermostatic Expansion Valve*) maka katup aliran refrigeran ke pipa kapiler (*Capillary valve*) ditutup. Pengambilan data dilakukan setiap 10 menit sekali selama 120 menit. Alat uji ini memiliki fungsi sebagai refrigerator, dengan fluida kerja atau refrigeran yang digunakan R-12.

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap yang dapat dilihat pada Gambar 6.

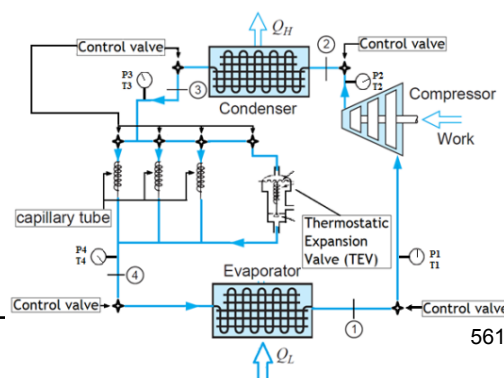


Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

Data temperatur hasil pengujian diambil menggunakan modul data akuisisi Omega TC-08 dengan ketelitian sampai 0,2 persen $\pm 0,5$ °C dan dengan resolusi 0,1 °C, menggunakan termokopel tipe K. Tekanan diukur menggunakan *pressure gauge* mekanik tipe tabung Bourdon, yang memiliki ketelitian $\pm 3\%$ pada skala 1/4 dan ketelitian $\pm 2\%$ pada skala 1/2 (dikategorikan sebagai ketelitian ASME Grade B). Tegangan listrik dan arus listrik diukur menggunakan multimeter dengan ketelitian $\pm 1,2\%$ dengan resolusi 0,1 V dan $\pm 2\%$ dengan resolusi 0,1.

Panjang pipa kapiler hasil perhitungan disain termal dengan metode analitis penurunan tekanan di pipa kapiler [6] dengan diameter dalam 1,07 mm diperoleh panjang pipa kapiler kumulatif adalah 1,5034 m. Untuk mengetahui kinerja mesin pada pipa kapiler berbeda, maka digunakan tiga variasi panjang pipa kapiler yaitu 1,25 m, 1,5 m dan 2,7 m (lebih pendek atau lebih panjang dari hasil perhitungan). Dengan laju aliran refrigeran hasil perhitungan disain analitis adalah 0,0084kg/s.

Pengujian dilakukan untuk masing-masing alat ekspansi dengan kondisi *cold box* evaporator dalam keadaan tertutup. Diagram skematik fasilitas pengujian mesin pendingin yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 7.

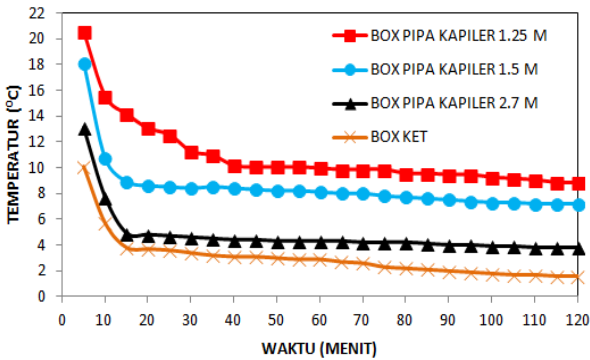


Gambar 7. Diagram Skematik Fasilitas Pengujian Mesin Pendingin diadaptasi dari [9]

Hasil dan Pembahasan

a. Perbandingan Temperatur Box

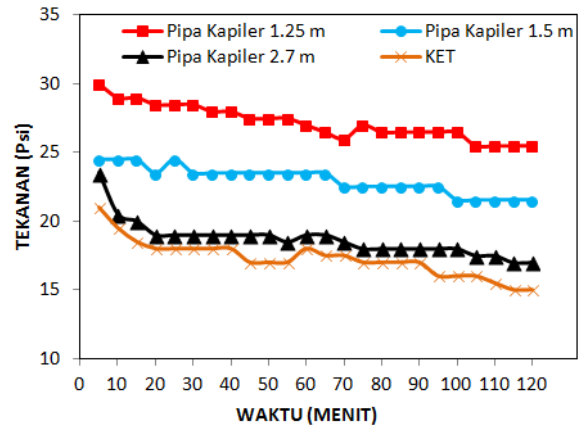
Gambar 8 menunjukkan bahwa temperatur *box* pengujian menggunakan katup ekspansi termostatik lebih rendah dibandingkan temperatur *box* pengujian menggunakan pipa kapiler. Hal ini terjadi karena temperatur refrigeran masuk evaporator pada KET lebih rendah dibandingkan dengan pipa kapiler, sehingga penyerapan kalor yang terjadi pada *box* menjadi lebih besar dan mengakibatkan temperatur di dalam *box* menjadi rendah.



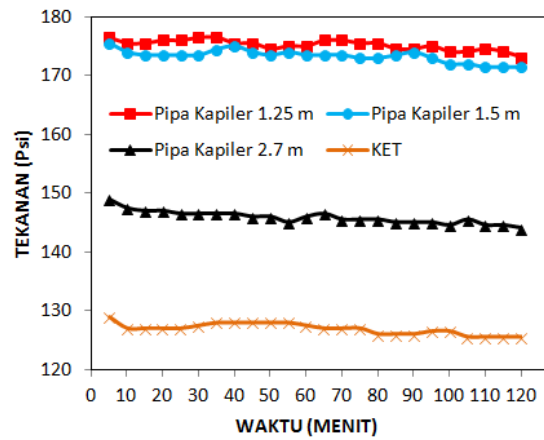
Gambar 8. Perbandingan Temperatur Box

b. Perbandingan Tekanan

Dari Gambar 9 dan Gambar 10 dapat dilihat bahwa hasil pengujian tekanan ini identik dengan hasil pengujian temperatur untuk masing masing alat ekspansi, karena besarnya nilai tekanan sebanding dengan besarnya nilai temperatur hasil pengujian. Hasil pengujian pada tekanan evaporator menggunakan KET lebih rendah dibandingkan hasil pengujian tekanan menggunakan pipa kapiler, ini juga terjadi pada hasil pengujian tekanan pada kondensor. Hal ini terjadi karena tekanan yang dihasilkan pada KET bisa disesuaikan dengan kondisi uap super panas yang berada di ujung pipa evaporator, sedangkan tekanan yang dihasilkan menggunakan pipa kapiler dipengaruhi oleh panjang pipa kapiler.



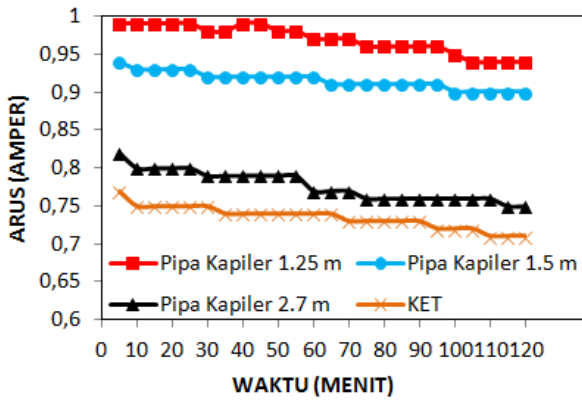
Gambar 9. Perbandingan Tekanan pada Evaporator



Gambar 10. Perbandingan Tekanan pada Kondensor

Jatuh tekanan rata-rata pada KET adalah 110 psi, sedangkan jatuh tekanan rata-rata pada pipa kapiler 1,25 m, 1,5 dan 2,7 m (berurutan) adalah 146,25 psi, 147,54 psi dan 125,38 psi (dari Gambar 9 dan 10). Jatuh tekanan cenderung makin rendah dengan semakin panjangnya pipa kapiler, dan hal sebanding dengan makin berkurangnya kerja kompresor (Gambar 13). Kerja kompresor cenderung turun dengan dengan semakin turunnya jatuh tekanan, sehingga kerja kompresor paling rendah adalah pada KET dengan jatuh tekanan yang juga paling rendah.

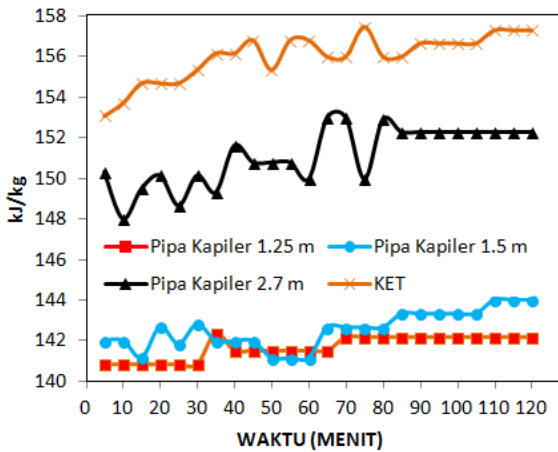
c. Perbandingan Arus Listrik



Gambar 11. Perbandingan Arus Listrik

Hasil pengujian penggunaan arus listrik menggunakan KET lebih kecil dibandingkan hasil pengujian menggunakan pipa kapiler, hal ini disebabkan karena tekanan yang dihasilkan pada saat pengujian menggunakan KET lebih rendah dibandingkan tekanan yang dihasilkan pada saat pengujian menggunakan pipa kapiler. Semakin rendah tekanan yang dihasilkan akan mengakibatkan kerja kompresor akan semakin kecil sehingga besarnya arus listrik yang digunakan akan semakin kecil.

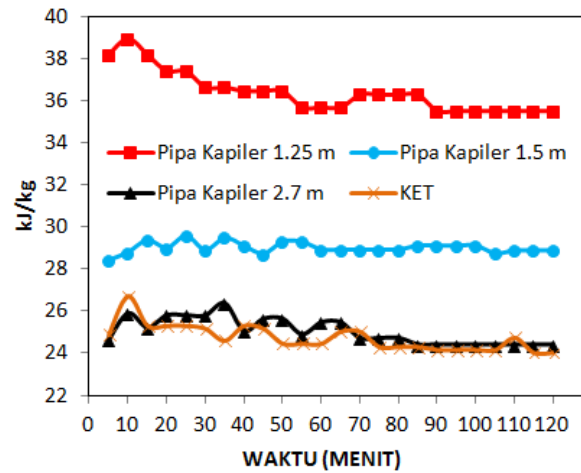
d. Perbandingan Efek Refrigerasi



Gambar 12 Perbandingan Efek Refrigerasi

Dari Gambar 12 dapat dilihat bahwa hasil pengujian efek refrigerasi atau besarnya kalor yang diserap di evaporator menggunakan KET lebih besar dibandingkan dengan pipa kapiler. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya temperatur dan tekanan yang dihasilkan pada KET lebih rendah dibandingkan dengan pipa kapiler. Dari Gambar 12 juga dapat diamati bahwa semakin lama waktu maka nilai efek refrigerasi akan semakin meningkat, tetapi peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan, karena kondisi stedi cenderung dicapai setelah menit ke 90.

e. Perbandingan Kerja Kompresor

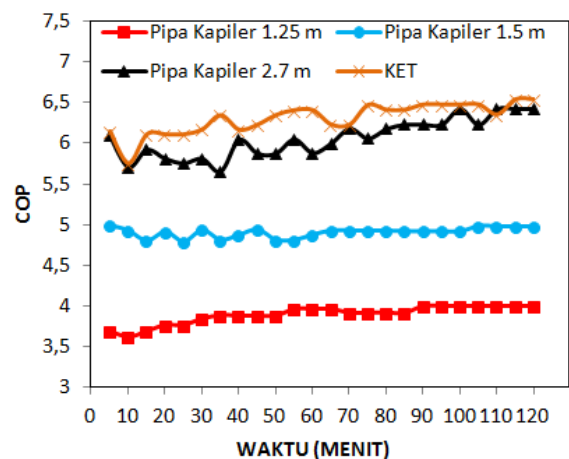


Gambar 13. Perbandingan Kerja Kompresor

Dari Gambar 13 dapat dilihat grafik perbandingan kerja kompresor untuk masing-masing alat ekspansi, hasil pengujian didapatkan bahwa kerja kompresor menggunakan KET lebih kecil dibandingkan dengan pengujian menggunakan pipa kapiler. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya temperatur dan tekanan keluaran evaporator, karena semakin rendah temperatur dan tekanan keluaran evaporator maka kerja kompresor akan semakin kecil.

f. Perbandingan COP

Dari Gambar 14 dapat dilihat grafik COP hasil pengujian untuk masing masing alat ekspansi. Nilai COP dari pengujian menggunakan KET lebih besar dibandingkan dengan nilai COP pipa kapiler. Dimana pada grafik tersebut terlihat jika semakin lama waktu pengujian maka nilai COP akan semakin meningkat tetapi tidak terlalu signifikan.



Gambar 14 Perbandingan COP

Hal ini terjadi karena semakin lama waktu maka akan mengakibatkan efek refrigerasi (q_e) semakin besar dan akan menyebabkan perubahan temperatur pada evaporator menjadi semakin rendah juga, sehingga beban pendinginan di dalam evaporator semakin kecil dan akan mengakibatkan kerja kompresor (w_k) akan menjadi lebih kecil.

Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain :

1. Tekanan dan temperatur yang dihasilkan pada saat menggunakan KET selalu lebih rendah dibandingkan dengan kenaikan tekanan dan temperatur menggunakan pipa kapiler, sehingga akan menyebabkan kerja kompresor menjadi lebih kecil dan pemakaian arus listrik menjadi lebih kecil. Hal ini disebabkan karena KET bisa menyesuaikan aliran refrigeran dengan beban pendinginan pada evaporator sehingga tekanan yang dihasilkan tidak terlalu tinggi dibanding pipa kapiler.
2. Temperatur dan tekanan menggunakan pipa kapiler 2,7 m selalu lebih rendah dibandingkan dengan pipa kapiler 1,25 m dan 1,5 m. Hal ini terjadi karena semakin panjang pipa kapiler maka akan terjadi rugi-rugi aliran refrigeran akibat gesekan dengan dinding-dinding pipa kapiler sehingga temperatur dan tekanannya menurun.
3. Pengujian dengan menggunakan KET lebih efisien dibandingkan dengan pipa kapiler, hal ini karena penggunaan KET akan memberikan tekanan dan temperatur kerja yang lebih rendah dibandingkan dengan pipa kapiler.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Herdiyanto dan Dede Nasrun yang telah meluangkan waktu dan tenaganya dalam memodifikasi alat uji dan membantu dalam pengambilan data pada penelitian ini.

Referensi

- [1] Arora, C. P, Refrigeration and Air Conditioning. Mc. Graw-Hill International Edition, 2001.
- [2] Suryono., Ahmad Fauzan., Hoten, Hendri Van, Kaji Eksperimental Perbandingan Performansi Mesin Pendingin Kompresi Uap dengan Menggunakan Pipa Kapiler dan

Katup Ekspansi. Jurnal Teknosia. 11(6) (2009) 34-39.

- [3] Aziz, Azridjal, Komparasi Katup Ekspansi Termostatik dan Pipa Kapiler terhadap Temperatur dan Tekanan Mesin Pendingin, Seminar Nasional Teknik Kimia Teknologi Oleo dan Petrokimia (SNTK TOPI 2013), Pekanbaru, 2013.
- [4] Jackson B. Marcinichen, dan Claudio Melo, Comparative Analysis Between a Capillary Tube and an Electronic Expansion Valve in a Household Refrigerator, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue University, 2006.
- [5] Cengel, A. Yunus., Boles, A. Michael, Thermodynamics an Engineering Approach, fourth ed., McGraw-Hill, New York, 2002.
- [6] Stocker, Wilbert F., Jerold W, Jones. Refrigerasi dan Pengkondisian Udara, Edisi Kedua, Erlangga, 1987.
- [7] http://1.bp.blogspot.com/pipa_kapiler.jpg (diakses pada tanggal 4 januari 2014)
- [8] Moran, M.J., Saphiro, H.N, Fundamental of Engineering Thermodynamics, John Wiley & Sons, New york, 1995.
- [9] Sonntag, Richard E., Borgnakke, Claus, Fundamentals of Thermodynamics, John Wiley & Sons, Inc, 2009.