

Kaji Eksperimental Pengaruh Variasi Diameter Pipa Kapiler Terhadap Performansi *Coolbox* Menggunakan R-134a

Mufty Luay Salsabilla Alfa^{1,*}, Triaji Pangripto Pramudantoro², Arda Rahardja Lukitobudi³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559
E-mail : ^{1,*}mufty.luay.tptu419@polban.ac.id; ²trijapangripto@polban.ac.id; ³ardarl@yahoo.com

ABSTRAK

Pipa kapiler merupakan salah satu jenis alat ekspansi yang sering digunakan pada sistem refrigerasi kompresi uap terutama pada kapasitas kecil. Pipa kapiler memiliki berbagai macam ukuran, ukuran pipa kapiler berpengaruh terhadap performansi sistem refrigerasi. Oleh karenanya, dibutuhkan ukuran pipa kapiler yang sesuai agar mesin dapat bekerja dengan optimal. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan membandingkan beberapa variasi diameter pipa kapiler antara diameter 0,028 inci, 0,031 inci, dan 0,036 inci dengan panjang 1,81 meter. Berdasarkan hasil penelitian yang telah didapatkan dari perhitungan COP_{aktual} , COP_{Carnot} , dan efisiensi sistem, pipa kapiler diameter 0,031 *inch* dengan panjang 1,81 meter menghasilkan nilai efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan variasi lainnya dengan nilai COP_{aktual} 2,66, COP_{Carnot} 3,18, dan efisiensi sistem 83,64%.

Kata Kunci

Pipa Kapiler, Variasi Diameter, Performansi Coolbox

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan manusia terhadap mesin pendingin semakin hari semakin meningkat, baik digunakan untuk kenyamanan ruangan maupun sebagai tempat penyimpanan produk untuk menjaga kualitasnya. Pengaplikasian mesin pendingin sangatlah beragam, salah satunya adalah sistem refrigerasi kompresi uap. Sistem kompresi uap adalah sistem refrigerasi yang paling umum digunakan.[1] [2]

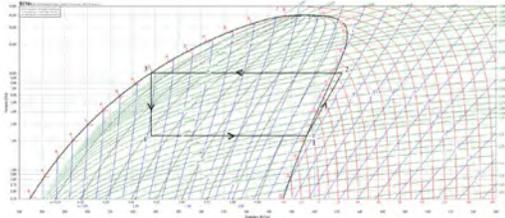
Pada sistem refrigerasi kompresi uap dengan kapasitas yang kecil, alat ekspansi yang sering digunakan adalah pipa kapiler. Pipa kapiler memiliki tahanan terhadap gesekan pada ukuran tertentu, sehingga dapat menurunkan tekanan kondensasi yang tinggi menjadi tekanan evaporasi yang rendah[3]. Pipa kapiler juga mengatur refrigeran cair yang masuk ke evaporator sehingga menjaga beda tekanan antara tekanan kondensasi dan tekanan evaporasi tetap konstan. Untuk mencapai efisiensi sistem yang tinggi, ukuran pipa papiler harus disesuaikan dengan kapasitas kompresor, karena jika ukuran pipa kapiler tidak sesuai maka hambatan gesek pada pipa kapiler tidak sesuai yang mengakibatkan efisiensi dari sistem berkurang.[4]

Tujuannya dilakukan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh ukuran diameter pipa kapiler terhadap performansi sistem.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Sistem refrigerasi kompresi uap merupakan sistem refrigerasi yang umum digunakan dan paling sederhana. Sistem ini memiliki empat komponen utama yaitu kompresor, kondenser, alat ekspansi dan evaporator[5]. Komponen pada sistem ini saling berkaitan satu dengan yang lainnya dan membentuk sistem refrigerasi, berawal dari refrigeran ditekan oleh kompresor kemudian mengalir menuju kondenser untuk dibuang kalornya ke lingkungan, lalu menuju alat ekspansi untuk diturunkan tekanannya sehingga berubah fasa menjadi campuran uap dan cair. Setelah itu refrigeran menuju evaporator untuk menyerap kalor pada ruangan yang akan dikondisikan, kemudian refrigeran kembali menuju kompresor. Ketika sistem dinyalakan maka siklus akan terus berulang[6][7]. Proses yang terjadi pada sistem refrigerasi kompresi uap dapat digambarkan pada diagram *pressure-enthalpy* (diagram P-h).



Gambar 1 Diagram *Pressure – Enthalpy*

2.1.1 Proses Kompresi (1-2)

Proses ini terjadi di kompresor secara isentropik, pada kondisi ini refrigeran berfasa uap jenuh bertekanan rendah (kondisi ideal). Menurut [8] besarnya kerja kompresi dihitung menggunakan Persamaan (II.1):

$$q_w = h_2 - h_1 \quad (\text{II.1})$$

Keterangan:

q_w = Besar kerja kompresi (kJ/Kg)
 h_1 = *Enthalpy* masuk kompresor (kJ/kg)
 h_2 = *Enthalpy* keluar kompresor (kJ/Kg)

1. Proses Kondensasi (2-3)

Proses ini berlangsung di kondenser secara isobar (tekanan konstan). Refrigeran yang bertekanan tinggi keluar dari kompresor akan membuang kalor ke lingkungan, sehingga berubah fasa menjadi cair. Hal ini terjadi dikarenakan terjadinya pertukaran kalor antara refrigeran dengan udara lingkungan. Besarnya kalor per satuan massa refrigeran di kondenser menurun dapat dinyatakan dengan Persamaan (II.2):

$$q_c = h_3 - h_2 \quad (\text{II.2})$$

Keterangan:

q_c = Besar kalor dilepas kondenser (kJ/Kg)
 h_2 = *Enthalpy* masuk kondenser (kJ/Kg)
 h_3 = *Enthalpy* keluar kondenser (kJ/Kg)

2.1.2 Proses Ekspansi (3-4)

Proses ini berlangsung secara *isoenthalpy* dengan diasumsikan tidak terjadi proses pelepasan atau penyerapan kalor antara refrigeran dengan udara lingkungan. Sehingga $h_3 = h_4$.

2.1.3 Proses Evaporasi (4-1)

Proses ini berlangsung secara isobar (tekanan konstan) dan *isothermal* (temperatur konstan). Refrigeran yang wujudnya mayoritas cair bertekanan rendah akan menyerap kalor dari ruangan yang dikondisikan, sehingga terjadi perubahan fasa pada refrigeran menjadi uap bertekanan rendah. Perubahan fasa terjadi dikarenakan adanya penguapan. Pada proses ini

terjadi kenaikan nilai *enthalpy*. [9] Besarnya kalor yang diserap dapat dilihat berdasarkan Persamaan (II.3):

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (\text{II.3})$$

Keterangan:

q_e = kalor diserap evaporator (kJ/Kg)
 h_1 = *Enthalpy* keluaran evaporator (kJ/Kg)
 h_4 = *Enthalpy* masukan evaporator (kJ/Kg)

2.2 Kinerja Sistem Refrigerasi

2.2.1 Efek Refrigerasi

Efek refrigerasi merupakan jumlah kalor yang diserap oleh refrigeran pada evaporator per satuan massa refrigeran. Menurut [8] efek refrigerasi dapat dihitung menggunakan Persamaan (II.4):

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (\text{II.4})$$

Keterangan:

q_e = kalor diserap evaporator (kJ/Kg)
 h_1 = *Enthalpy* keluaran evaporator (kJ/Kg)
 h_4 = *Enthalpy* masukan evaporator (kJ/Kg)

2.2.2 Coefficient of Performance Actual (COP_{actual})

COP_{actual} merupakan perbandingan antara efek refrigerasi terhadap kerja kompresi. COP_{actual} merupakan nilai suatu prestasi aktual yang dimiliki mesin refrigerasi. Nilai COP_{actual} dapat dihitung menggunakan Persamaan (II.5):

$$COP_{actual} = \frac{q_e}{q_w} \quad (\text{II.5})$$

Keterangan:

COP_{actual} = *Coefficient of Performance Actual*
 q_e = Kalor diserap evaporator (kJ/Kg)
 q_w = Kerja kerja kompresi (kJ/Kg)

2.2.3 Coefficient of Performance Carnot (COP_{carnot})

COP_{Carnot} atau COP ideal merupakan perbandingan antara temperatur evaporasi terhadap selisih temperatur kondensasi dan evaporasi. Nilai COP_{Carnot} dapat dihitung menggunakan Persamaan (II.6):

$$COP_{actual} = \frac{T_e}{T_k - T_e} \text{ K} \quad (\text{II.6})$$

Keterangan:

COP_{Carnot} = *Coefficient of Performance Carnot*
 T_e = Temperatur evaporator (K)

T_k = Temperatur kondenser (K)

2.2.4 Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem refrigerasi merupakan hasil pembagian antara COP_{actual} dan COP_{Carnot} . Pada umumnya efisiensi sistem refrigerasi tidak pernah mencapai 100%. Efisiensi sistem refrigerasi dapat dihitung menggunakan Persamaan (II.7):

$$\eta = \frac{COP_{actual}}{COP_{Carnot}} \times 100\% \quad (II.7)$$

Keterangan:

η = Efisiensi sistem refrigerasi

COP_{actual} = Coefficient of Performance Actual

COP_{Carnot} = Coefficient of Performance Carnot

2.2.5 Daya Listrik

Daya listrik merupakan ukuran kekuatan tenaga listrik yang dialirkan oleh sebuah peralatan elektronik per satuan waktu. Daya listrik dinyatakan dengan besaran kWh yang artinya besarnya daya yang dipakai dalam satuan kilowatt per jam. Menurut [10] daya listrik dapat dihitung menggunakan persamaan (II.8):

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (II.8)$$

Dimana:

P = Daya listrik (Watt)

V = Tegangan listrik (Volt)

I = Arus listrik (Ampere)

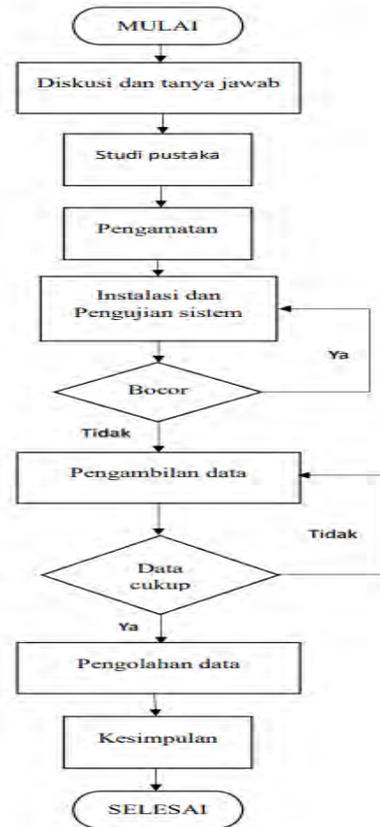
$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.3 Komponen Utama

Pada sistem refrigerasi kompresi uap terdapat empat komponen utama yang saling berkaitan yaitu kompresor, kondenser, alat ekspansi, dan evaporator.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, metodologi penelitian yang dilakukan dengan melakukan studi pustaka, melakukan pemilihan pipa ukuran pipa kapiler, instalasi, cek kebocoran, pengujian sistem, pengambilan data, pengolahan data, dan membuat kesimpulan. Dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Flow Chart

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan data pada variasi diameter pipa kapiler 0,028 inch dilakukan pada tanggal dengan temperatur kabin yang dikondisikan sebesar 2°C. Data yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

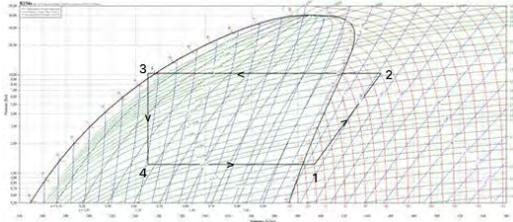
Tabel 2 Parameter Data Diameter Pipa Kapiler 0,028 Inch

Parameter	Nilai	Satuan
Tekanan <i>Suction</i>	0,23	bar <i>gauge</i>
Tekanan <i>Discharge</i>	9,37	bar <i>gauge</i>
Temperatur <i>Suction</i>	-6,64	°C
Temperatur <i>Discharge</i>	66,94	°C
Temperatur Keluar Kondenser	36,42	°C
Temperatur Lingkungan	24,8	°C
Arus Listrik	0,97	A

Setelah data didapatkan, konversikan satuan tekanan *suction* dan tekanan *discharge* dari satuan bar_{gauge} menjadi bar_{absolute}.

$$\begin{aligned} \text{Tekanan Suction} &= 0,23 \text{ bar}_{\text{gauge}} + 1 \text{ atm} = 1,23 \text{ bar}_{\text{absolut}} \\ \text{Tekanan Discharge} &= 9,37 \text{ bar}_{\text{gauge}} + 1 \text{ atm} = 10,37 \text{ bar}_{\text{absolut}} \\ \text{Temperatur Suction} &= -6,64 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Temperatur Discharge} &= 66,94 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Temperatur Keluar Kondenser} &= 36,42 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan data yang sesuai selanjutnya plot pada P-h diagram menggunakan aplikasi *coolpack*. Hasil plot dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram P-h Diameter Pipa Kapiler 0,028 inch

Pengamatan data pada variasi diameter pipa kapiler 0,031 inch dengan temperatur kabin yang dikondisikan sebesar 2°C. Data yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.

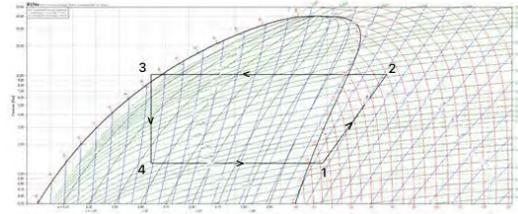
Tabel 3 Parameter Data Diameter Pipa Kapiler 0,031 Inch

Parameter	Nilai	Satuan
Tekanan <i>Suction</i>	0,29	bar <i>gauge</i>
Tekanan <i>Discharge</i>	9,31	bar <i>gauge</i>
Temperatur <i>Suction</i>	-4,42	°C
Temperatur <i>Discharge</i>	66,68	°C
Temperatur Keluar Kondenser	34,26	°C
Temperatur Lingkungan	24,4	°C
Arus Listrik	0,89	A

Setelah data didapatkan, konversikan satuan tekanan *suction* dan tekanan *discharge* dari satuan bar_{gauge} menjadi bar_{absolut}.

$$\begin{aligned} \text{Tekanan Suction} &= 0,29 \text{ bar}_{\text{gauge}} + 1 \text{ atm} = 1,29 \text{ bar}_{\text{absolut}} \\ \text{Tekanan Discharge} &= 9,31 \text{ bar}_{\text{gauge}} + 1 \text{ atm} = 10,31 \text{ bar}_{\text{absolut}} \\ \text{Temperatur Suction} &= -4,42 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Temperatur Discharge} &= 66,68 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Temperatur Keluar Kondenser} &= 34,26 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan data yang sesuai selanjutnya plot pada p-h diagram menggunakan aplikasi *coolpack*. Hasil plot dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram P-h Untuk Diameter Pipa 0,031 inch

Pengamatan data pada variasi diameter pipa kapiler 0,036 inch dengan temperatur kabin yang dikondisikan sebesar 2°C. Data yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4

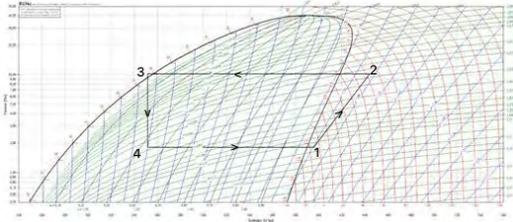
Tabel 4 Parameter Data Diameter Pipa Kapiler 0,036 Inch

Parameter	Nilai	Satuan
Tekanan <i>Suction</i>	0,81	bar <i>gauge</i>
Tekanan <i>Discharge</i>	9,21	bar <i>gauge</i>
Temperatur <i>Suction</i>	-2,96	°C
Temperatur <i>Discharge</i>	59,84	°C
Temperatur Keluar Kondenser	37	°C
Temperatur Lingkungan	24	°C
Arus Listrik	0,93	A

Setelah data didapatkan, konversikan satuan tekanan *suction* dan tekanan *discharge* dari satuan Bar_{gauge} menjadi Bar_{absolut}.

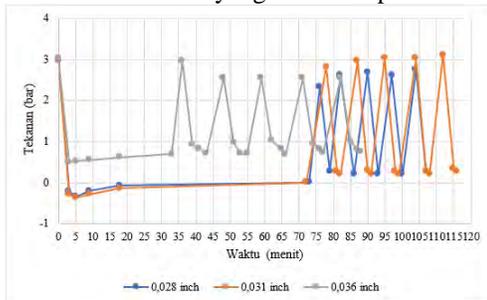
$$\begin{aligned} \text{Tekanan Suction} &= 0,81 \text{ bar}_{\text{gauge}} + 1 \text{ atm} = 1,81 \text{ bar}_{\text{absolut}} \\ \text{Tekanan Discharge} &= 9,21 \text{ bar}_{\text{gauge}} + 1 \text{ atm} = 10,21 \text{ bar}_{\text{absolut}} \\ \text{Temperatur Suction} &= -2,96 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Temperatur Discharge} &= 59,84 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Temperatur Keluar Kondenser} &= 37 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan data yang sesuai selanjutnya plot pada P-h diagram menggunakan aplikasi *coolpack*. Hasil plot dapat dilihat pada Gambar 5.

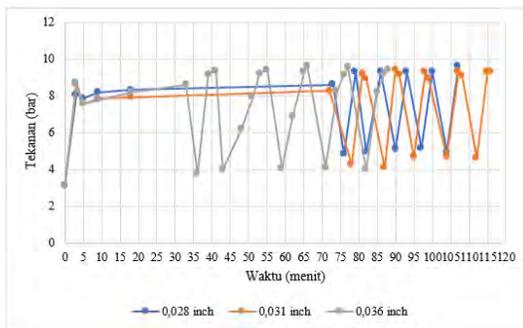


Gambar 5 Diagram P-h Diameter Pipa Kapiler 0,036 inch

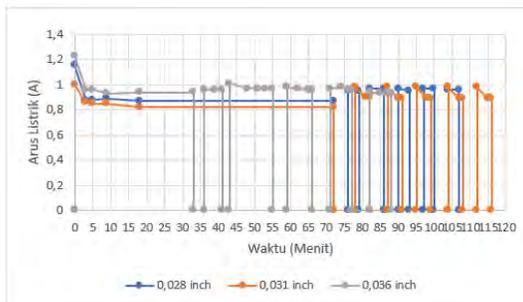
Setelah melakukan pengambilan dan pengolahan data pada tiga variasi diameter pipa kapiler, dilakukan analisis data yang telah didapat.



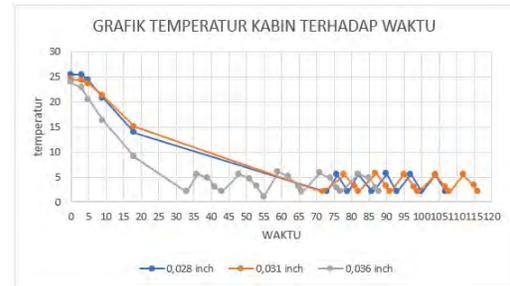
Gambar 6. Grafik Tekanan *Suction* Terhadap Waktu



Gambar 7. Grafik Tekanan *Discharge* Terhadap Waktu



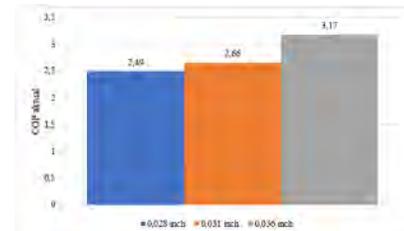
Gambar 9. Grafik Arus Listrik Terhadap Waktu



Gambar 9. Grafik *Chiling Time*

COP Aktual

Pada Gambar 10 terlihat diagram COP_{aktual} antara diameter pipa kapiler 0,028 inch, 0,031 inch, dan 0,036 inch.

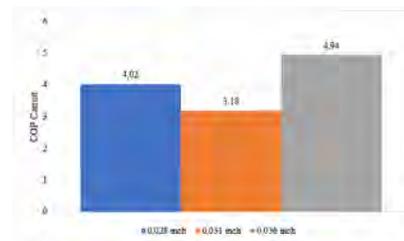


Gambar 10. Perbandingan COP Aktual

COP_{aktual} pada diameter pipa kapiler 0,036 inch memiliki nilai terbesar, hal ini dikarenakan diameter pipa kapiler 0,036 inch memiliki efek refrigerasi (q_e) yang lebih besar dan kerja kompresi (q_w) yang lebih kecil.

COP Carnot

Pada Gambar 11 dapat dilihat diagram COP_{Carnot} antara diameter pipa kapiler 0,028 inch, 0,031 inch, dan 0,036 inch.

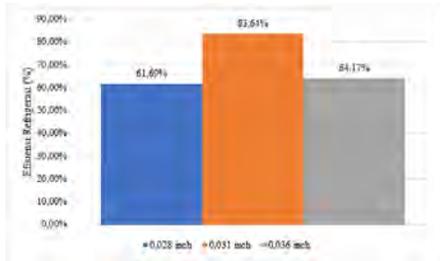


Gambar 11. Perbandingan COP Carnot

COP_{Carnot} pipa kapiler dengan ukuran 0,036 inch memiliki nilai rata-rata yang paling besar, hal ini dikarenakan memiliki tekanan *suction* yang lebih besar yang mengakibatkan memiliki temperatur evaporasi yang lebih besar dan memiliki tekanan *discharge* yang lebih rendah yang berakibat temperatur kondensasi yang lebih rendah.

Grafik Efisiensi Refrigerasi

Pada Gambar 12 dapat dilihat diagram efisiensi refrigerasi untuk diameter pipa kapiler 0,028 *inch*, 0,031 *inch*, dan 0,036 *inch*.



Gambar 12 Efisiensi Refrigerasi

Pipa kapiler dengan ukuran 0,031 *inch* memiliki nilai efisiensi paling besar dikarenakan memiliki perbandingan nilai COP_{aktual} dan COP_{Carnot} yang paling kecil sedangkan pipa kapiler dengan ukuran 0,028 *inch* memiliki nilai efisiensi yang kecil dikarenakan memiliki perbandingan COP_{aktual} dan COP_{Carnot} yang lebih besar.

Perbandingan antara variasi diameter pipa kapiler dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Perhitungan

No	Parameter	Diameter Pipa Kapiler			satu an
		0,028 inch	0,031 inch	0,036 inch	
1	Tekanan Suction	3,40	4,24	11,82	bar
2	Tekanan Discharge	136	135,2	133,8	bar
3	Temperatur Suction	-4,84	-1,42	-0,98	°C
4	Temperatur Discharge	66,94	61,68	59,84	°C
5	Temperatur Kabin	2	2	2	°C
6	COP Aktual	2,49	2,66	3,17	-
7	COP Carnot	4,02	3,18	4,94	-
8	Efisiensi	61,96	83,64	64,17	%
9	Arus Listrik	0,97	0,89	0,93	A
10	Chilling Time	73	72	33	Menit
11	Energi Listrik	0,16	0,15	0,12	kWh

5. KESIMPULAN

Setelah melakukan pengambilan data, pada diameter pipa kapiler 0,028 *inch* didapatkan nilai COP_{aktual} 2,49, COP_{Carnot} 4,02, dan efisiensi 61,96%, pada diameter pipa kapiler 0,031 *inch* didapatkan hasil COP_{aktual} 2,66, COP_{Carnot} 3,18, dan efisiensi 83,64%, pada diameter pipa kapiler 0,036 *inch* didapatkan hasil COP_{aktual} 3,17,

COP_{Carnot} 4,94, dan efisiensi 64,17%. Berdasarkan hasil yang telah didapatkan, pipa kapiler diameter 0,031 *inch* dengan panjang 1,81 meter menghasilkan nilai efisiensi yang lebih besar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Bandung yang memberikan bantuan dana selama melakukan penelitian dan fasilitas untuk paper yang akan dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Rosyadi, W. Prizkiabi, and A. Triono, "Analysis the Length of Capillary Pipe with Separation Condenser on the Performance of Refrigerator using Double Evaporator," *Proteksion*, vol. 4, no. 1, pp. 22–27, 2019.
- [2] R. Irama and Pramoda Agung Sumadijhono, "Analisa Unjuk Kerja Modifikasi Dispenser Menjadi Air Conditioning (AC) Portabel Yang Menggunakan Freon R-134A Berdasarkan Pada Variasi Putaran Kipas Pada Evaporator Terhadap Suhu Pendinginan Ruangan," *J. Tek. Mesin*, vol. 1, no. 2018, pp. 1–11, 2018.
- [3] U. Budiarto, W. Amiruddin, D. T. Perkapalan, F. Teknik, U. Diponegoro, and K. K. Refrigerasi, "Analisa Unjuk Kerja Desain Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Pada Kapal Ikan Ukuran 5 Gt Di Wilayah Rembang," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 4, no. 4, pp. 768–778, 2017.
- [4] A. S. Darmawan and A. B. K. Putra, "Studi Eksperimen Pengaruh Dimensi Pipa Kapiler Pada Sistem Air Conditioning Dengan Pre-Cooling," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, 2017, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.20263.
- [5] A. Fakhruddin, S. Supriyadi, and A. Burhanudin, "Sistem Kerja Mesin Pendingin Sebagai Media Pembelajaran Praktikum Teknik Refrigerasi," *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 21, no. 1, pp. 28–33, 2021.
- [6] C. Adam, "Uji Performansi Sistem Refrigerasi Kompresi Uap pada Seed Storage," pp. 4–15, 2012, [Online]. Available: <http://digilib.polban.ac.id/files/disk1/96/jbptppolban-gdl-caesaradam-4788-3-bab2--8.pdf>

- [7] K. Wang, M. Eisele, Y. Hwang, and R. Radermacher, "Review of secondary loop refrigeration systems," *Int. J. Refrig.*, vol. 33, no. 2, pp. 212–234, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.09.018.
- [8] R. J. Dossat, A. Professor of Refrigeration, and N. York, "Wiley International Edition PRINCIPLES OF REFRIGERATION," 1961.
- [9] ASHRAE, *REFRIGERATION SI Edition*. 2014.
- [10] Suseno Dan Dkk, "Faktor Daya Listrik," *Erlangga*, pp. 5–21, 2019.