

PENGUKURAN KOEFISIEN PERPINDAHAN KALOR EVAPORASI REFRIGERAN R-134a PADA SALURAN HALUS VERTIKAL KUALITAS UAP

Anis Kurniawan¹, Tito Hadji Agung Santosa², Thoharuddin³

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183
aniskurniawan04@gmail.com

Abstract

Refrigerant R-134a as one of the alternative used for working fluids that have some good properties, relative stable, non-toxic, and non-flammable. R-134a is a class of HFC (Hydro Fluoro Carbon) type refrigerants that contains no Chlor or compounds that can damage the ozone layer. This research investigates evaporation's heat transfer coefficient of refrigerant R-134a in a smooth vertical pipe with steam quality variation. The value of the evaporation heat transfer coefficient is one of the important properties in the design of evaporator.

The method used in this research is the experiment using the test equipment in the form of a series of components of modified vapor compression system. Test section is made of copper pipe. Copper pipe diameter 16,60 mm deep, outer diameter 18,60 mm with length 1,25 m. Pralon pipe for outer length 80 cm, nominal diameter 2 inch and isolated using foam, aluminium foil and plastered rubber vapor quality varied from steam quality 0,19 to 0,74 set with electric heater. The refrigerant is also varied by adjusting the frequency of the inverter (14, 16, 18, 20, and 22 Hz).

The research results that with the increase of steam quality, the evaporation heat transfer coefficient is increasing. The evaporation heat transfer coefficient also increases as the refrigerant mass flow rate increases. The highest evaporation heat transfer coefficient of 2484,53 W/m².K at steam quality 0,74 and at 22 Hz inverter frequency yielded 0,0107089 kg/s refrigerant mass flow rate.

Keywords : refrigerant R-134a, evaporation, coefficient of heat transfer, smooth vertical pipe, steam quality

1. Pendahuluan

Pada perancangan sistem pendingin kompresi uap sederhana perlu memperhatikan mengenai sifat-sifat fisis dan termis fluida kerjanya (refrigeran). Sifat-sifat fisis dan termis dari refrigeran yang beredar di pasaran ada beberapa jenis-jenis berdasarkan unsur pembentukannya, yaitu: refrigeran dengan jenis CFC (Chloro Fluoro Carbon), HCFC (Hydro Chloro Fluoro Carbon), HFC (Hydro Fluoro Carbon), dan HC (Hydrocarbon). Refrigeran yang mengandung unsur Chlor menurut penelitian sebelumnya merupakan zat yang merusak lapisan ozon hingga menimbulkan pemanasan global. Dari situ dilanjutkan pengembangan jenis HFC (Hydro Fluoro Carbon) yang tidak mengandung unsur (Cl) Chlor sehingga tidak merusak lapisan ozon akan tetapi masih berpotensi pemanasan global karena dapat bertahan lama di atmosfer sekitar 16 tahun sebelum terurai (Febriansyah, 2012).

R-134a merupakan salah satu refrigeran yang termasuk jenis HFC dan sebagai jenis refrigeran alternatif yang ramah lingkungan. Refrigeran R-134a sebagai salah satu alternatif yang memiliki beberapa properti yang baik, relatif stabil, tidak beracun, dan tidak mudah terbakar. R-134a termasuk golongan refrigeran jenis HFC (Hydro Fluoro Carbon) yang tidak mengandung Chlor atau senyawa yang dapat merusak lapisan ozon dengan nilai ODP (Ozone Depletion Potential) yang rendah namun GWP (Global Warming Potential) masih tinggi (Febriansyah, 2012). Dengan ini perlu mengetahui sifat-sifat fisis dan termis dari refrigeran R-134a yang akan bermanfaat dalam perancangan suatu sistem pendingin. Dalam sistem pendingin siklus kompresi uap, perubahan fasa terjadi pada refrigeran dari fasa uap menjadi cair di bagian kondensor dan dari fasa cair menjadi uap pada bagian evaporator.

Pengukuran ataupun perhitungan koefisien perpindahan kalor evaporasi refrigeran merupakan aspek yang penting untuk menentukan berapa kalor

yang ditransfer dalam proses penguapan pada aliran refrigeran. Nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi adalah salah satu sifat yang penting dalam desain evaporator. Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh Dalkilic (2016) yang menentukan koefisien perpindahan kalor konveksi R-134a dengan kolerasi empiris pada evaporator yang memiliki saluran halus horisontal dan vertikal aliran ke bawah. Penelitian dilakukan dengan variasi fluks massa dan kualitas uap. Dari variasi tersebut menunjukkan koefisien perpindahan kalor meningkat pada variasi saluran halus vertikal aliran ke bawah untuk pengaruh fluks massa seiring dengan meningkatnya kualitas uap rata-rata.

Dengan latar belakang di atas, penulis melakukan penelitian salah satu sifat yang penting dalam desain evaporator, yaitu koefisien perpindahan kalor evaporasi refrigeran dalam saluran halus vertikal aliran ke bawah dengan variasi kualitas uap. Refrigeran yang digunakan dalam penelitian yaitu R-134a.

2. Tinjauan Pustaka

Yan (1997) melakukan penelitian mengenai perpindahan kalor evaporasi dan penurunan tekanan pada refrigeran R-134a dalam plat penukar kalor aliran keatas. Efek dari fluks kalor, fluks massa, kualitas dan tekanan R-134a pada perpindahan kalor evaporasi dan penurunan tekanan dieksplorasi. Koefisien perpindahan kalor evaporasi untuk R-134a pada kualitas uap tinggi, fluks massa menunjukkan efek signifikan pada koefisien perpindahan kalor. Bertentangan dengan efek fluks massa, fluks kalor tidak memiliki efek signifikan pada perpindahan kalor pada kualitas tinggi namun menunjukkan beberapa pengaruh pada kualitas rendah.

Santosa (2003) juga melakukan penelitian yaitu mengenai koefisien perpindahan kalor evaporasi Petrozon Rossy 12 di dalam saluran halus mendatar. Pada penelitian dilakukan variasi parameter

seperti laju aliran massa refrigeran, tekanan evaporasi, dan kualitas uap. Dari variasi tersebut menunjukkan hasil bahwa koefisien evaporasi menurun dengan naiknya kualitas dan variasi tekanan evaporasi menyebabkan perubahan fluks kalor.

Penelitian serupa dilakukan oleh Anwar (2013) yang meneliti perpindahan kalor evaporasi dengan R-134a dalam saluran kecil vertikal. Pengaruh berbagai variasi parameter dalam penelitian diperhatikan seperti, fluks kalor, fluks massa, dan kualitas uap. Hasil penelitian mendapatkan pengaruh fluks kalor yang menunjukkan variasi koefisien perpindahan kalor lokal dengan kualitas uap, pada fluks massa 500 kg/m²s dan temperatur jenuh 27°C-32°C. Pengaruh tersebut menghasilkan meningkatnya koefisien perpindahan kalor dengan meningkatnya fluks kalor dan fluks massa.

Dalkilic (2016) juga meneliti mengenai koefisien perpindahan kalor konveksi R-134a dengan kolerasi empiris pada evaporator yang memiliki saluran halus horisontal dan vertikal. Hasil penelitian menunjukkan koefisien perpindahan kalor meningkat pada variasi saluran halus vertikal untuk pengaruh fluks massa antara 200 dan 300 kg/m²s dengan meningkatnya kualitas uap rata-rata. Pada variasi saluran halus horisontal untuk fluks massa antara 300 dan 400 kg/m²s meningkatnya kualitas uap rata-rata mengakibatkan koefisien perpindahan kalor meningkat.

3. Metode Penelitian

3.1 Bahan Penelitian

Bahan atau fluida yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

- Refrigeran R-134a produk KLEA dengan jumlah ±4 kaleng (390 gram/kaleng) yang dimasukkan dalam alat uji untuk pengujian evaporasi.
- Oli AC juga dimasukkan untuk pelumasan kompresor pada alat uji ini sebanyak 100 ml.

Refrigeran R-134a merupakan refrigeran HFC (*Hydro Fluoro Carbon*). Refrigeran ini buatan PT Polarin Xinindo dengan merek KLEA dengan memiliki beberapa sifat-sifat ditunjukkan pada tabel 1 (PT. Polarin Xinindo, 2017).

Tabel 1. Sifat-sifat dari refrigeran R-134a

Freon KLEA	Spesifikasi
R-134a	<ul style="list-style-type: none"> - Komposisi: HFC134a(100%) - Berat molekul: 102 - Titik didih pada tekanan 1 atm: -26,2°C - Tekanan uap (MPa(gauge))@25 °C): 0,565 - Berat jenis uap (kg/m³@nBpt): 5,23 - ODP (Ozone Depleting Potential): 0 - GWP (Global Warming Potentisl): 1430

Sumber: PT. Polarin Xinindo, 2017
"Produk Freon merk KLEA"

3.2 Pengisian Refrigeran

Setelah sudah pasti alat tidak bocor, maka alat uji divakumkan dengan menggunakan pompa vakum hingga 0 psi (absolut) untuk menghilangkan udara

dalam saluran refrigeran. Katup manometer ditutup penuh untuk mencegah air raksa dalam manometer terhisap keluar dan masuk ke saluran sistem refrigeran. Selanjutnya air di dalam tangki utama dialirkan menuju ke kondensor dan evaporator menggunakan pompa air. Debit air menuju evaporator ditetapkan 1,4 LPM, sedangkan debit kondensor menyesuaikan dengan posisi katup menuju kondensor terbuka penuh. Blower dinyalakan penuh untuk mengaliri udara pada seksi uji, katup menuju seksi uji dan kipas blower dibuka penuh.

Setelah air bersirkulasi dengan baik, nyalakan motor listrik sehingga kompresor mulai bekerja. Refrigeran dimasukkan ke kompresor pada sisi *suction* sambil mengamati perubahan tekanan pada *pressure gauge* sisi tekan kompresor, sesekali mengamati *sight glass*. Pengisian refrigeran bisa dikatakan sudah penuh apabila pada *sight glass* sudah penuh terisi cairan refrigeran dan tidak terdapat gelembung udara yang menandakan bahwa fasa uap telah seluruhnya menjadi fasa cair setelah keluar kondensor. Refrigeran sebelum masuk *orifice* harus berfasa cair untuk pengukuran laju aliran massanya. Buka katup manometer pelan-pelan sehingga terlihat beda ketinggian raksa pada manometer. Biarkan sistem beroperasi sampai kondisi *steady*.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Tahap Pengujian

Tahapan yang dilakukan saat memulai pengujian pengambilan data Pengukuran koefisien evaporasi dengan parameter-parameter yang variasi sebagai berikut:

- Memastikan variable yang akan digunakan dalam pengujian, dan menyiapkan tabel pengamatan
- Heater* dalam posisi dihidupkan sesuai voltase dan arus dengan variasi kualitas uap yang ditentukan 0,14 sampai 0,69. Blower juga dijalankan untuk memberi tekanan udara pada kecepatan konstan, katup ekspansi pada posisi konstan
- Variabel yang digunakan adalah debit pendinginan evaporator yaitu konstan pada 1.4 LPM. Frekuensi inverter yang digunakan adalah 14, 16, 18, 20, dan 22 Hz
- Menyalakan inverter dan pompa air lalu menyatelnya pada setiap variable, lalu biarkan selama ±10 menit agar kondisi mendekati *steady*
- Menaikkan kualitas uap dengan mengatur voltase dan arus pada heater hingga variabel kualitas uap habis
- Menaikkan frekuensi inverter lalu mengulangi poin lima dan seterusnya hingga kedua variabel habis.

3.3.2 Persamaan yang digunakan

Perhitungan x , Q_{evap} , dan h_{evap} dijelaskan dalam poin-poin berikut:

- Kualitas uap (x)
Persamaan untuk mengetahui nilai kualitas uap sebagai berikut:

$$h_4 = h_f + x_4 \cdot h_{fg} \dots\dots\dots (1)$$

$$x_4 = \frac{h_x - h_f}{h_{fg}} \dots \dots \dots (2)$$

Dengan:

- x_4 = kualitas uap (x_0)
- h_4 = enthalpy fluida jenuh terkompresi (kJ/kg)
- h_f = enthalpy pada sturasi liquid (kJ/kg)
- h_g = enthalpy pada saturasi uap (kJ/kg)

b. Q_{evap} (perpindahan kalor yang diberikan udara, seksi uji)

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai perpindahan kalor yang diberikan udara ($Q_{evap,SU}$) dan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) yaitu:

$$\dot{Q}_{evap,SU} = \dot{m}_{udara} \cdot C_{pudara} \cdot \Delta T \dots \dots \dots (3)$$

Dengan:

- Q_{evap} = perpindahan kalor yang diberikan udara, seksi uji (Watt)
- \dot{m}_{udara} = Laju aliran massa udara yang masuk seksi uji (kg/s)
- C_{pudara} = Kalor jenis udara (1,005 kJ/kg.K)
- ΔT = Selisih temperatur udara masuk dan keluar seksi uji ($^{\circ}C$)

c. h_{evap} (perpindahan kalor yang diberikan udara, seksi uji)

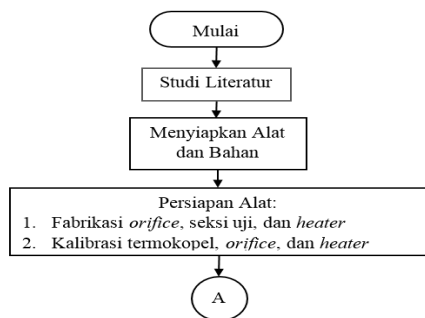
Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) yaitu:

$$h_{evap} = \frac{Q_{evap,SU}}{A_i \cdot (T_{wi} - T_{sat})} \dots \dots \dots (4)$$

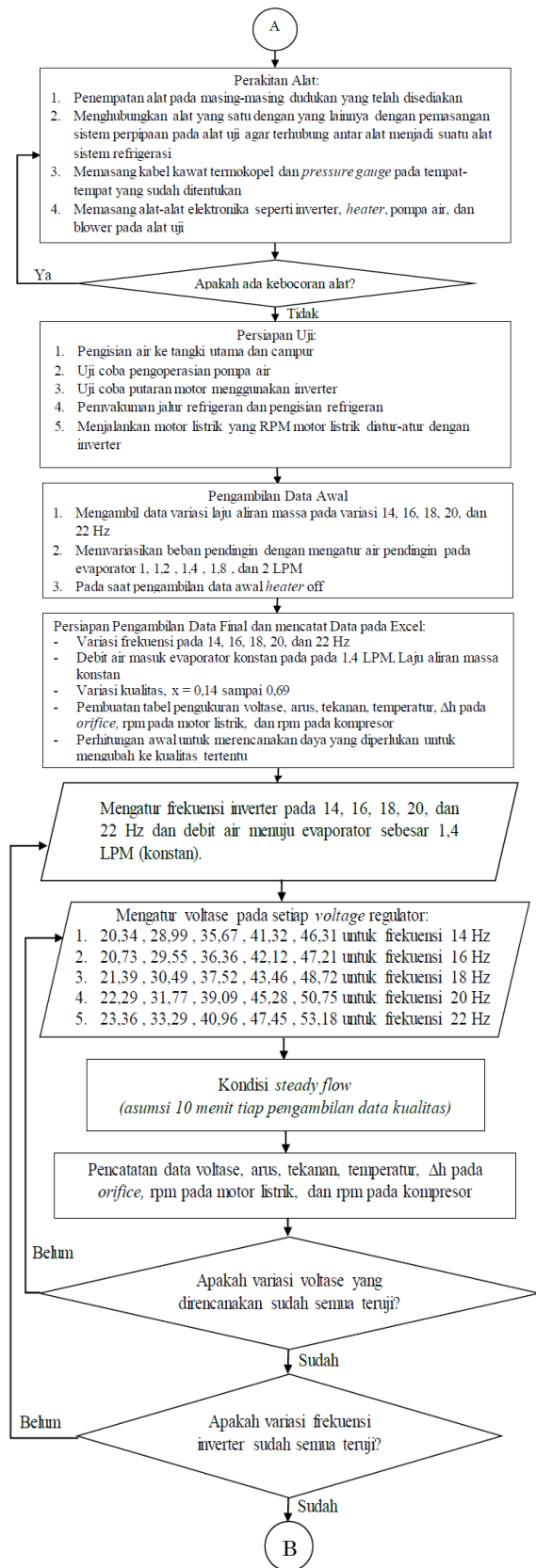
Dengan,

- $\Delta T = T_{wi} - T_{sat} \rightarrow$ jika $T_{wi} > T_{sat}$
- $\Delta T = T_{sat} - T_{wi} \rightarrow$ jika $T_{wi} < T_{sat}$
- h_{evap} = koefisien perpindahan kalor evaporasi ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)
- \dot{Q}_{evap} = perpindahan kalor yang diberikan udara, seksi uji (Watt)
- A_i = luas penampang medium (m^2)
- T_{wi} = temperatur dinding dalam saluran ($^{\circ}C$)
- T_{sat} = temperatur jenuh fluida di saluran ($^{\circ}C$)

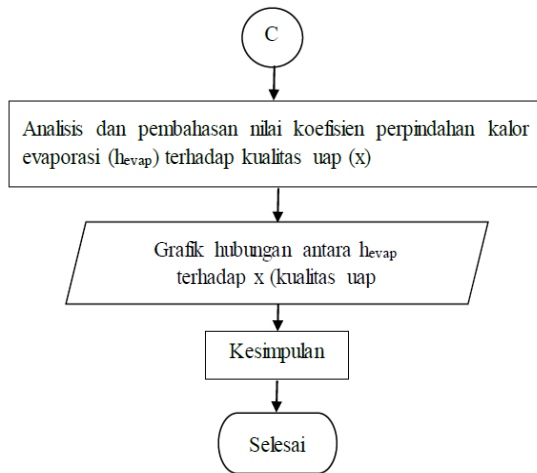
3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram alir penelitian



Gambar 1. Diagram alir penelitian (lanjutan)

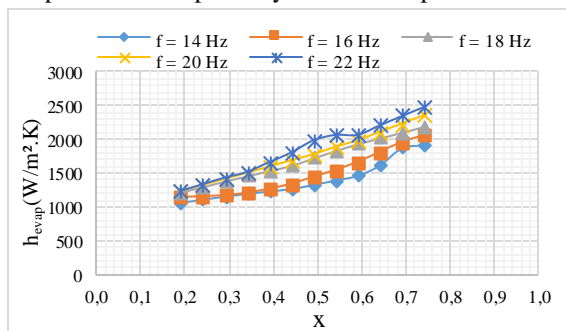


Gambar 1. Diagram alir penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

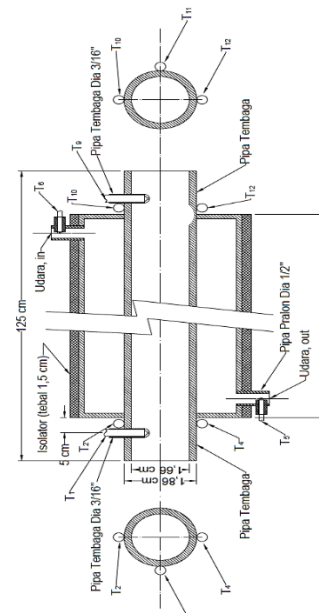
Dari hasil penelitian yang dilakukan dan pengolahan data koefisien perpindahan kalor evaporasi disajikan dalam bentuk grafik, ditunjukkan pada Gambar 3. Variasi kualitas uap 0,19-0,74 untuk beberapa frekuensi inverter yaitu 14, 16, 18, 20, dan 22 Hz dengan diatur laju aliran massa refrigeran dan juga debit air pendingin evaporator konstan.

Pada grafik yang ditunjukkan dalam gambar 3 yaitu hasil pengujian hubungan antara koefisien perpindahan kalor evaporasi dengan kualitas uap, seiring meningkatnya kualitas uapnya maka nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) juga semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan hasil analisa penelitian Dalkilic (2016), yang menunjukkan peningkatan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi terhadap naiknya kualitas uap.



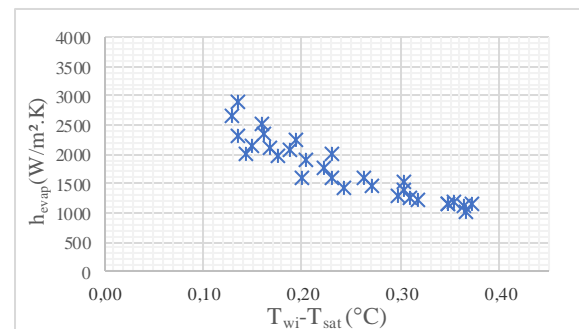
Gambar 3. Grafik hubungan antara koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) dengan kualitas uap (x) pada berbagai frekuensi dan laju aliran massa konstan

Dari data grafik yang diperoleh didapatkan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) yang terjadi pada frekuensi inverter 22 Hz dengan laju aliran massa 0,0107089 kg/s memiliki nilai yang tinggi 2484,53 W/m².K dengan kualitas uap 0,74.



Gambar 2. Skema seksi uji

Selain itu pada Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin besar fluks massa antara 40,23 – 48,80 kg/m².s yang terjadi maka koefisien perpindahan kalor evaporasi juga mengalami peningkatan yang signifikan. Hasil ini sesuai dengan penelitian Yen (1997) bahwa koefisien perpindahan kalor evaporasi untuk R-134 pada kualitas uap tinggi, fluks massa menunjukkan efek signifikan pada koefisien perpindahan kalor. Bertentangan dengan efek fluks massa, fluks kalor tidak memiliki efek signifikan pada perpindahan kalor pada kualitas tinggi namun menunjukkan beberapa pengaruh pada kualitas rendah.



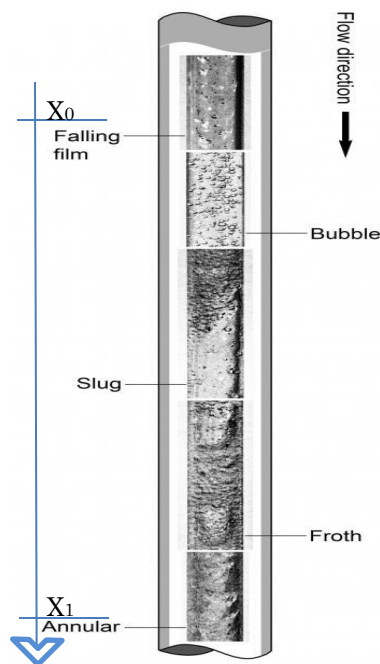
Gambar 4. Hubungan koefisien perpindahan kalor evaporasi terhadap beda temperatur jenuh

Nilai-nilai yang diperoleh tersebut juga dipengaruhi pada parameter temperatur yang terdapat pada sistem seperti temperatur dalam seksi uji saluran masuk dan keluar, temperatur udara sebelum dan sesudah seksi uji dan temperatur dinding dalam saluran seksi uji. Beda temperatur jenuh evaporasi yang ditunjukkan dalam Gambar 4.

Beda temperatur jenuh evaporasi ($T_{wi}-T_{sat}$) mempengaruhi kenaikan pada nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi dengan temperatur jenuh yang nilainya kecil, sebaliknya nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi yang rendah apabila nilai dari temperatur jenuh tinggi. Pada aliran fluida

kerja dalam saluran perangkat pemanas listrik (*heater*) semakin besar kualitas uapnya maka cenderung lebih ke fasa gas yang mana kecepatan fluida tersebut semakin cepat dan sirkulasi fluida juga lebih cepat. Hal ini mengakibatkan penyerapan kalor yang dilepas oleh *heater* akan lebih cepat, sehingga koefisien perpindahan kalor evaporasi akan mengalami peningkatan yang tinggi. Sebaliknya pada kualitas uap yang rendah maka kecepatan fluida juga ikut rendah, sehingga nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi tidak begitu tinggi seperti pada kualitas yang tinggi.

Perpindahan kalor pada saluran vertikal dengan aliran ke bawah (Gambar 5), naiknya kualitas dengan tingkat turbulensi naik menimbulkan perpindahan kalor meningkat. Pemanasan yang terus dinaikkan akan terjadi penguapan dan menimbulkan butir-butir uap menyatu (*slug*). Laju aliran massa refrigeran yang semakin besar juga menimbulkan turbulensi meningkat sehingga perpindahan kalor tinggi. Perpindahan kalor yang terus meningkat juga di ikuti meningkatnya koefisien perpindahan kalor evaporasi.



Gambar 5. Daerah perpindahan kalor pada tabung vertikal aliran ke bawah (Bhagwat, 2011)

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dari pengujian nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi dengan variasi kualitas uap dalam saluran halus vertikal, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi akan meningkat seiring dengan peningkatan laju aliran massa pada kualitas uap yang sama.
- Nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi (h_{evap}) yang paling tinggi terjadi pada frekuensi 22 Hz dengan laju aliran massa 0,0107089 kg/s yaitu

2484,53 W/m².K dengan kualitas uap 0,74. Semakin besar fluks massa antara 40,23 – 48,80 kg/m².s yang terjadi maka koefisien perpindahan kalor evaporasi juga mengalami peningkatan yang signifikan.

Daftar Pustaka

- Anwar, Zahid. 2013. “*Evaporative Heat Transfer with R-134a in a Vertical Minichannel*”
- Bhagwat, Swanand Madhav. 2011. “*Study Of Flow Patterns And Void Fraction In Vertical Downward Two Phase Flow*”
- Cengel, Y. A. 2003. “*Heat Transfer: A Practical Approach (2nd ed)*”.United States of America : McGraw-Hill
- Cengel, Y. A. 2005. “*Heat Transfer: A Practical Approach (2nd ed) - Property Tables And Charts (SI Units)*”.United States of America : McGraw-Hill
- Dalkilic. 2016. “*Empirical Correlations for The Determination of R-134a’s Convective Heat Transfer Coefficient In Horizontal and Vertical Evaporators Having Smooth and Corrugated Tubes*”
- Fitriandi, Agus. 2017. “Karakteristik Bahan dan Aspek Lingkungan Refrigeran Hidrokarbon”
- Febriansyah. 2012. “Artikel Jurnal Penggunaan Freon dan Dampaknya Terhadap Penipisan Lapisan Ozon Perbandingan Tipe Freon di Indonesia”
- Hestroni. 1982. “*Handbook of Multiphase System*”, 1st edition, McGraw-Hill Int. Book Co., New York.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. 2011. “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, 7th Ed, John Wiley & Sons, United States of America”
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. 2002. “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, 6th Ed, John Wiley & Sons, United States of America”
- Kharagpur. 2008. “*Refrigeration and Air Conditioning*”, Version I ME, India
- Prasetya, Sambas. 2011. “Analisis Koefisien Perpindahan Kalor Eksperimen Untuk Aliran Evaporation Dua Fasa Pada Kanal Mini Horizontal Dengan Refrigeran R-22”
- PT. Polarin Xinindo. 2017. “Freon KLEA R-134a”.Melalui, <<http://www.polarin.co.id/klea>> [10/07/17]
- Santosa, Tito Hadji Agung. 2003. Tesis. "Pengukuran Koefisien Perpindahan Kalor Evaporasi

Refrigeran Protozon Rossy 12 Di Dalam Saluran Halus Horisontal"

Stoecker, W.F. dan Jerold, W.J. 1996. "Refrigerasi dan Penyegaran Udara". Terjemahan Supratman Hara. Penerbit Erlangga. Jakarta

Stoecker W.F., Jerold W. Jones dan Hara S. 1996. "Refrigerasi dan Pengkondisian Udara", edisi

2. Penerbit Erlangga. Jakarta

Thome, John. R. 1994. "*Fundamentals of Boiling on Tubes and Tube Bundles - Chapter 9 (in Databook III)*"

Yan, Yi-Yie. 1997. "*Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerant R-134a in a Plate Heat Exchanger*"