

## PENGUKURAN KOEFISIEN PERPINDAHAN KALOR EVAPORASI REFRIGERAN R-134a DI DALAM SALURAN HALUS HORIZONTAL DENGAN VARIASI KUALITAS UAP

Warsito Kabul Suyono<sup>1</sup>, Tito Hadji Agung Santosa<sup>2</sup>, Thoharuddin<sup>3</sup>  
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183  
[warsitokabul@gmail.com](mailto:warsitokabul@gmail.com)

---

### INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui koefisien perpindahan kalor evaporasi refrigeran R-134a di dalam saluran halus horizontal dengan variasi kualitas uap. Nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi adalah salah satu variabel penting untuk desain termal evaporator AC. Refrigeran R-134a adalah salah satu refrigeran yang ramah lingkungan karena tidak mengandung unsur *Chlor*. Alat uji ini berupa rangkaian komponen sistem kompresi uap sederhana yang dimodifikasi. Perangkat *orifice*-manometer, pemanas listrik, dan seksi uji ditambahkan dalam alat uji. Perangkat *orifice*-manometer digunakan untuk mengukur laju aliran massa refrigeran, pemanas listrik digunakan untuk memvariasikan kualitas uap, dan seksi uji digunakan untuk mengukur koefisien perpindahan kalor evaporasi. Seksi uji berperan sebagai alat penukar kalor berupa pipa ganda dengan aliran berlawanan arah dengan fluida udara sebagai pemanas.

Parameter yang divariasikan meliputi laju aliran massa, dan kualitas uap dengan beban pendinginan konstan. Laju aliran massa divariasikan dengan menggunakan *inverter* yang dikopel dengan motor listrik sebagai penggerak kompresor. Dengan mengatur frekuensi *inverter* pada frekuensi 14, 16, 18, 20, dan 22 Hz. Voltase divariasikan untuk mengubah kualitas satu ke kualitas yang lain. Dengan mengatur *voltase* pada setiap *voltage regulator*. Range yang digunakan antara 20 sampai 52 volt, untuk lima kali variasi *voltase* pada setiap memvariasikan frekuensi. Beban pendinginan pada evaporator konstan dengan debit air yang melewatinya 1,4 LPM.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan memvariasikan kualitas uap, nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi naik seiring naiknya kualitas uap pada laju aliran massa yang konstan. Semakin besar nilai kualitas uap maka semakin besar pula prosentase fasa campuran yang berubah menjadi fasa uap (evaporasi). Dari hasil penelitian didapatkan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi dengan nilai tertinggi yaitu 2396,73 (W/m<sup>2</sup>.°C) saat kualitas 0,72 dengan variasi frekuensi *inverter* 16 Hz.

Kata kunci: Evaporasi, kualitas uap, Refrigeran R-134a, koefisien perpindahan kalor, saluran halus horizontal

---

### PENDAHULUAN

Dewasa ini penggunaan alat atau sistem pengkondisian udara sudah tidak asing lagi di Indonesia yang beriklim tropis. Pada umumnya memiliki temperatur udara berkisar 28°C - 35°C dengan kelembaban 70% - 90%, sedangkan kondisi nyaman udara pada suatu bangunan temperatur 22°C - 25°C dengan kelembaban relatif 40% hingga 60% maka dari itu untuk memenuhi kebutuhan kenyamanan digunakannya alat pengkondisian udara. Hampir semua pengkondisian udara di Indonesia dilakukan dengan penurunan temperatur dan kelembaban (Wahyuadi, 2012). Sistem refrigrasi yang paling sederhana memiliki komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator (Arismunandar, 2002).

Siklus refrigrasi yang banyak digunakan adalah siklus uap sederhana, dimana refrigeran diuapkan, dan dikondensasikan dengan cara mengkompresi uap tersebut. Pada perancangan

sistem pendingin kompresi uap sederhana perlu memperhatikan mengenai sifat-sifat fisis dan termis fluida kerja (refrigeran) yang akan digunakan. Refrigeran yang beredar di pasaran ada beberapa jenis berdasar unsur pembentuknya, yaitu: CFC (*Chloro Fluoro Carbon*), HCFC (*Hydro Chloro Fluoro Carbon*), HFC (*Hydro Fluoro Carbon*), dan *Hydrocarbon*. Refrigeran jenis CFC dan HCFC menurut penelitian merupakan zat yang dapat merusak lapisan ozon dan menyebabkan pemanasan global, selanjutnya dikembangkan jenis refrigeran HFC yang tidak mengandung unsur *Chlor* yang dapat merusak lapisan ozon (Santosa, 2003). Maka dari itu dalam hal penelitian ini penulis menggunakan refrigeran R-134a sebagai fluida kerjanya. Refrigeran R-134a atau CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub> (*tetrafluoroetana*) termasuk golongan refrigeran HFC yang tidak beracun, tidak mudah terbakar, tidak memiliki potensi merusak ozon, dan lebih ramah

lingkungan.

Dalam sistem pendingin siklus kompresi uap, refrigeran mengalami proses perubahan fasa dari cair menjadi fasa uap di bagian evaporator dan perubahan fasa uap menjadi cair di bagian kondensor. Pengukuran koefisien perpindahan kalor evaporasi refrigeran dilakukan untuk desain termal evaporator AC. Untuk desain termal alat penukar kalor nilai koefisien perpindahan kalor mutlak diperlukan.

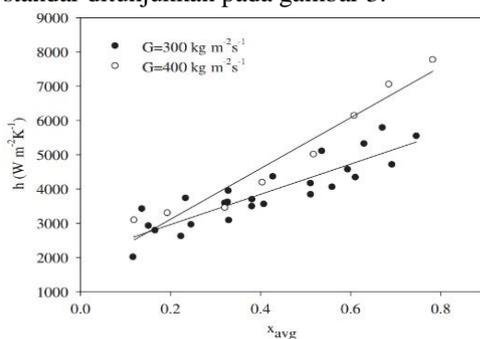
Dengan latar belakang di atas, penulis melakukan penelitian salah satu sifat yang penting untuk desain termal evaporator AC, yaitu koefisien perpindahan kalor evaporasi di dalam saluran halus horisontal dengan variasi kualitas uap refrigeran. Refrigeran yang digunakan adalah R-134a. Untuk menentukan koefisien perpindahan kalor evaporasi di dalam saluran halus horisontal dengan metode analitik sangat sulit karena sifat fluida baik fisik maupun sifat termodinamik, selain itu juga adanya perubahan fasa, pola aliran yang tidak seragam, dan adanya pengaruh gaya gravitasi. Sehingga untuk menentukan koefisien perpindahan kalor evaporasi di dalam pipa halus horisontal dilakukan dengan metode eksperimental.

## TINJAUAN PUSTAKA

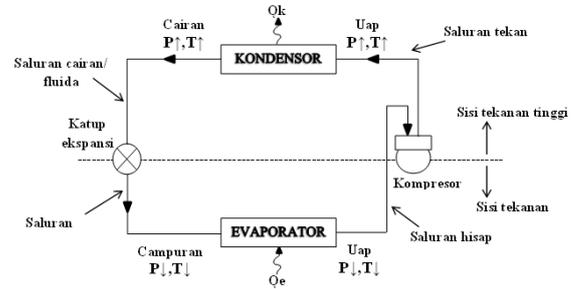
Berkaitan dengan topik yang dikaji tentang pengukuran koefisien perpindahan kalor evaporasi refrigeran R-134a di dalam saluran halus dengan variasi kualitas uap, yang pernah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, diantaranya Dalkilic (2016) dengan hasil yang ditunjukkan seperti gambar 2.

## PRINSIP KERJA REFRIGERASI UAP

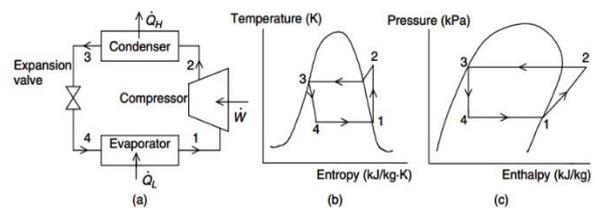
Untuk mendinginkan suatu ruangan, ruangan tersebut harus dikenakan pada suatu fluida yang lebih dingin dari temperatur ruangan yang ingin didinginkan. Sehingga kalor dapat dipindahkan dari ruangan yang bertemperatur lebih tinggi ke fluida yang lebih dingin tersebut. Agar fluida tidak terbuang, fluida harus didaurkan melalui sebuah sistem sedemikian rupa sehingga kalor yang diambil dari ruang yang didinginkan dapat dibuang. Tentu selama proses ini fluida harus lebih panas dari lingkungan agar perpindahan kalor dapat berlangsung. Berikut sistem refrigerasi kompresi uap standar ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 2. Hubungan antara koefisien perpindahan kalor konveksi dengan variasi kualitas uap rata-rata untuk fluks massa 300 dan 400  $kg/m^2s$  pada saluran halus horisontal (Dalkilic, 2016)



Gambar 3. Sistem refrigerasi siklus kompresi uap standar (Stoecker, 1996)



Gambar 4 (a) Skematik sistem refrigerasi kompresi uap standar, (b) Diagram T-s, (c) Diagram P-h (Dincer & Kanoğlu, 2010)

Di dalam proses refrigerasi memiliki beberapa komponen utama selain refrigeran sebagai fluida kerja diantaranya: kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Sistem refrigerasi kompresi uap terdiri dari empat proses termal yaitu: evaporasi, kompresi, kondensasi, dan ekspansi.

Berikut adalah penjelasan proses termal yang terjadi di dalam siklus refrigerasi berdasarkan gambar 2.7 diantaranya:

- 1 – 2 : Kompresi adiabatik *reversible*. Ketika keluar dari evaporator refrigeran fasa gas dan memiliki tekanan uap yang rendah, akibat adanya kerja kompresor tekanan uap dan temperatur refrigeran menjadi lebih tinggi dan bergerak menuju kondensor.
- 2 – 3 : Pelepasan kalor pada tekanan konstan. Pada bagian kondensor, refrigeran memiliki tekanan uap dan temperatur yang tinggi sehingga dapat melepaskan kalor keluar. Akibat pelepasan kalor tersebut refrigeran terkondensasi.
- 3 – 4 : Ekspansi *irreversible* pada entalpi konstan (isentalpik). Refrigeran yang berfasa cair setelah keluar dari kondensor memasuki bagian katup ekspansi sehingga temperatur dan tekanannya tereduksi dari tekanan kondensasi (titik 3) menjadi tekanan evaporasi (titik 4).

- 4 – 1 : penerimaan panas *reversible* pada tekanan konstan. Setelah melewati katup ekspansi, refrigeran yang berfasa cair melewati refrigeran sehingga menghasilkan efek pendinginan yang menyebabkan lingkungan sekitar menjadi lebih dingin serta mengubah fasa refrigeran menjadi gas sebelum memasuki kompresor lagi.

bagian evaporator. Pada bagian evaporator terjadi proses penerimaan kalor oleh

fluida kerja di dalam sistem refrigras. Air berfungsi sebagai media yang didinginkan untuk evaporator dan juga sebagai media pendingin untuk kondensor, sedangkan udara berfungsi sebagai pemanas refrigeran di dalam seksi uji sebelum menuju ke evaporator (lihat gambar 3.1). Oli refrigeran juga dimasukkan ke dalam alat uji (kompresor) yang berfungsi sebagai pelumas kompresor, dalam penelitian ini *oli* refrigeran yang digunakan adalah oli dengan merek PAOIL dimana *oil* ini jenis *syntetic oil* yang *compatible* untuk semua refrigeran dengan *range* temperatur operasi dari -68 °C sampai 315 °C.

## METODE PENELITIAN

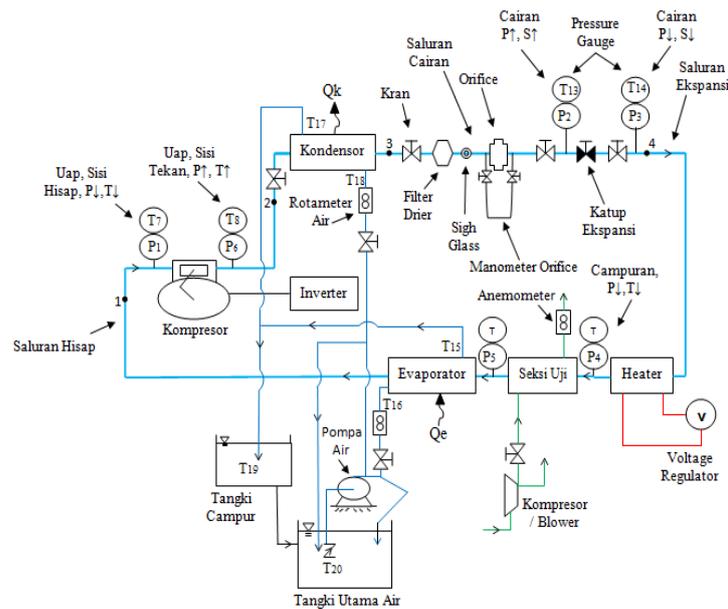
### Bahan dan Alat

Bahan dan fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah refrigeran, air, dan udara. Dalam penelitian ini refrigeran yang digunakan adalah R-134a yang memiliki unsur senyawa  $CH_2FCF_3$  (*Tetrafloroetana*), merek KLEA sebagai

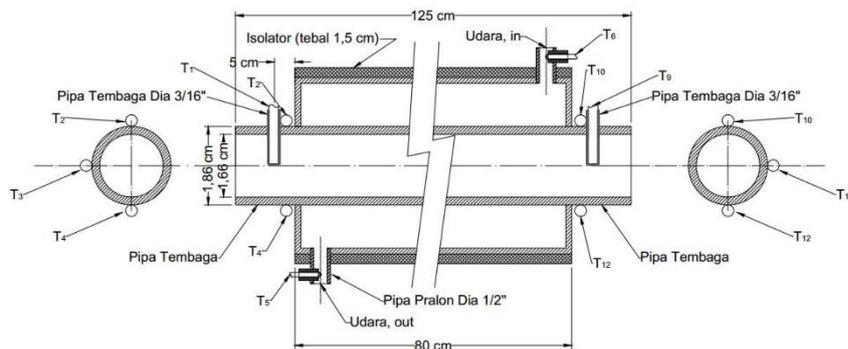
### Alat Penelitian

- |                          |                      |                              |
|--------------------------|----------------------|------------------------------|
| a. <i>Thermoreader</i>   | e. <i>Anemometer</i> | i. <i>Voltage regulator</i>  |
| b. <i>Pressure gauge</i> | f. <i>Inverter</i>   | j. <i>Multimeter digital</i> |
| c. Manometer air raksa   | g. Motor listrik     | k. Tang ampere               |
| d. <i>Orifice</i> meter  | h. Rotameter         |                              |

### Skema Alat Uji



Gambar 5. Skema alat uji



Gambar 6. Seksi uji

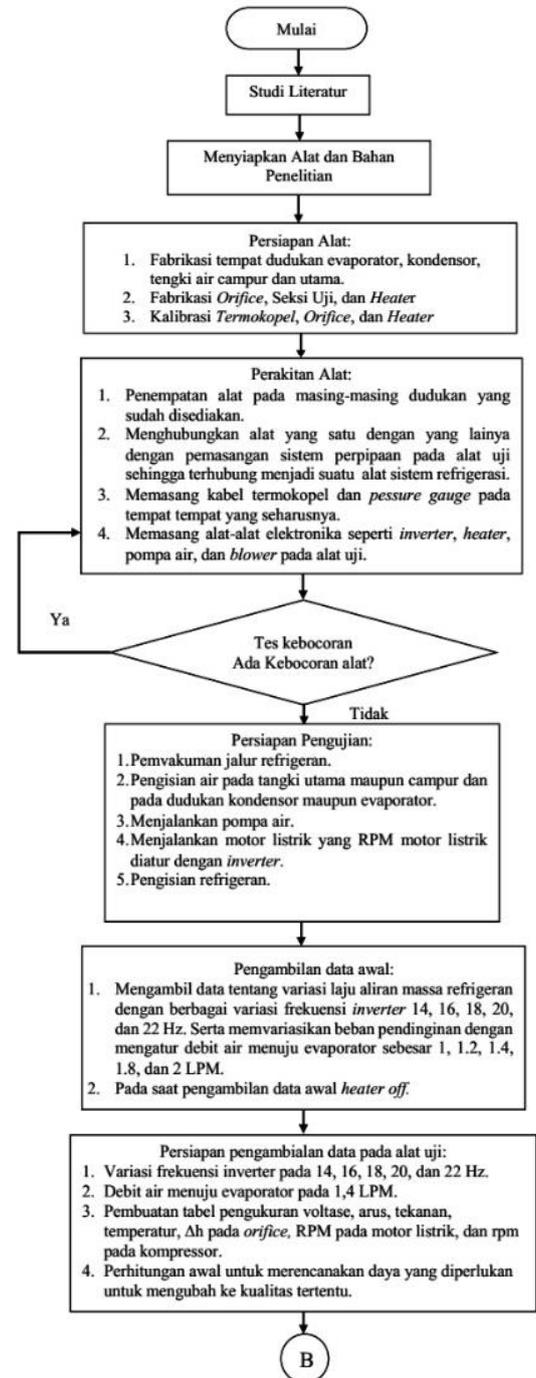
## Prosedur Penelitian

### Tahap Pengambilan Data

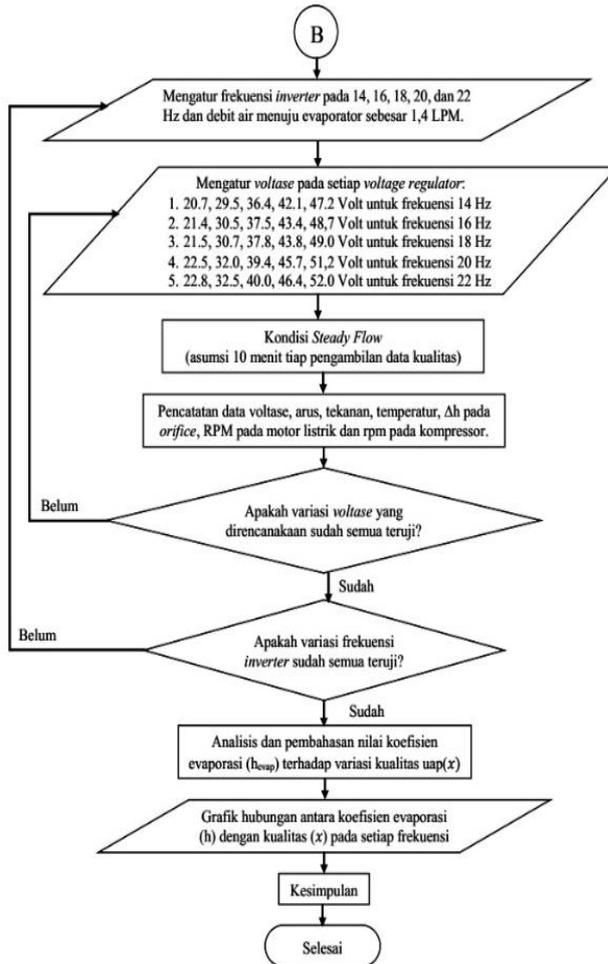
Pada tahapan pengambilan data khususnya pengambilna data dengan variasi kualitas sebelumnya harus punya data awal yang dilakukan sebelumnya untuk memprediksi voltase yang akan diatur untuk merubah dari kualitas satu ke kualitas yang lain. Tahapan dalam pengambilan data meliputi:

- 1) Mengoperasikan pompa air dan *blower*. Dengan mengatur debit air menuju evaporator sebesar 1,4 LPM.
- 2) Menghidupkan *inverter* dengan mengatur frekuensinya sebesar 14 Hz.
- 3) Mengatur *voltase* pada *voltage regulator* sesuai dengan perhitungan yang dilakukan sebelumnya untuk mengubah dari kualitas satu ke kualitas yang lain ( $x_0 - x_1, x_0 - x_2, x_0 - x_3, x_0 - x_4, x_0 - x_5$ , setiap perubahan frekuensi dilakukan 5 variasi kualitas uap ( $x$ ). Jadi pengaturan *voltase* pada *voltage regulator* dilakukan 5 kali untuk setiap variasi frekuensi *inverter*.
- 4) Untuk mengubah dari kualitas satu ke kualitas yang lain diperlukan waktu 10 menit. Dengan asumsi pada menit ke-10 pemanasan yang dilakukan *heater* terhadap refrigeran sudah *steady*. Pada menit 10 itulah saatnya dilakukan pengambilan data temperatur, tekanan, perbedaan ketinggian pada manometer U, *Voltase* dan Arus *real* pada *voltage regulator* saat penelitian, frekuensi pada *inverter*, *voltase* dan arus pada motor listrik, RPM motor listrik dan kompresor, dan mencatat laju aliran udara pada *blower*.
- 5) Sehingga setiap frekuensi *inverter* di variasikan 5 kualitas ( $x$ ).
- 6) Untuk pengambilan data selanjutnya dengan frekuensi *inverter* 16, 18, 20, dan 22 Hz yang masing-masing divariasikan 5 variasi kualitas setiap frekuensi *inverter*.
- 7) Setelah dilakukan pengambialan data variasi frekuensi *inverter* satu ke frekuensi *inverter* yang lain diperlukan jeda pengambilan data  $\pm 3$  jam sebelum lanjut ke variasi frekuensi *inverter* selanjutnya. Jeda ini bertujuan untuk mendinginkan perangkat *heater*.
- 8) Lakukan pengambilan data pada variasi frekuensi 16, 18, 20, dan 22 Hz langkahnya sama seperti langkah diatas (1-4).

### Diagram Alir Penelitian



Gambar 6. Diagram alir



Gambar 6. Diagram alir (lanjutan)

### Persamaan Yang Digunakan

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

#### 1. Kualitas uap ( $x$ )

Persamaan untuk mengetahui nilai kualitas uap sebagai berikut:

$$h_{4'} = \frac{\dot{Q}_{refrigeran}}{\dot{m}_{refrigeran}} + h_3 \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{Q}_{refrigeran} = \dot{Q}_{heater} - \dot{Q}_{loss} \dots\dots\dots (2)$$

$$x = \frac{h_{4'} - h_f}{h_{fg}} \dots\dots\dots (3)$$

Dengan:

- $x$  = kualitas uap ( $x$ )
- $h_{4'}$  = enthalpy pada kualitas tertentu (kJ/kg)
- $h_f$  = enthalpy pada fasa cair (kJ/kg)
- $h_g$  = enthalpy pada fasa uap (kJ/kg)
- $h_{fg}$  = enthalpy pada fasa campuran (kJ/kg)
- $\dot{Q}_{refrigeran}$  = Laju perpindahan kalor yang diserap refrigeran (W)
- $\dot{Q}_{heater}$  = Laju perpindahan kalor yang disuplai heater (W)
- $\dot{Q}_{loss}$  = Laju perpindahan kalor yang hilang (W)

#### 2. Laju perpindahan kalor evaporasi ( $\dot{Q}_{evap}$ )

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai perpindahan kalor yang diberikan udara ( $\dot{Q}_{evap}$ ) dan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi ( $h_{evap}$ ) yaitu:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{udara} \cdot C_{p_{udara}} \cdot \Delta T \dots\dots\dots (4)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \rho_{udara} \cdot \dot{V}_{udara} \cdot C_{p_{udara}} \cdot (T_{udara,in} - T_{udara,out}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \rho_{udara} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{i,an}^2 \cdot \bar{v}_{udara} \cdot C_{p_{udara}} \cdot (T_{udara,in} - T_{udara,out}) \dots\dots\dots (6)$$

Dengan:

- $\dot{Q}_{evap}$  = Laju perpindahan kalor yang diberikan udara, di seksi uji (W)
- $\dot{m}_{udara}$  = Laju aliran massa udara yang masuk, di seksi uji (kg/s)
- $\rho_{udara}$  = Massa jenis udara (1,2 kg/m<sup>3</sup>)
- $C_{p_{udara}}$  = Kalor jenis udara (1,005 kJ/kg.K)
- $D_{i,an}^2$  = Diameter anemometer udara (0,0275 m)
- $\bar{v}_{udara}$  = Kecepatan udara (m/s)
- $T_{udara,in}$  = Temperatur udara masuk seksi uji (°C)
- $T_{udara,out}$  = Temperatur udara keluar seksi uji (°C)

#### 3. Perpindahan kalor evaporasi ( $h_{evap}$ )

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

$$h_{evap} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{A_i \cdot (\bar{T}_{wi} - \bar{T}_{sat})} \dots\dots\dots (7)$$

Dengan:

$$\bar{T}_{w,i} = T_{w,o} - \frac{Q_{konduksi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \dots\dots\dots (8)$$

Dan,

$$\dot{Q}_{konduksi} = \dot{Q}_{suplai\ udara} = \dot{Q}_{evaporasi} \dots\dots\dots (9)$$

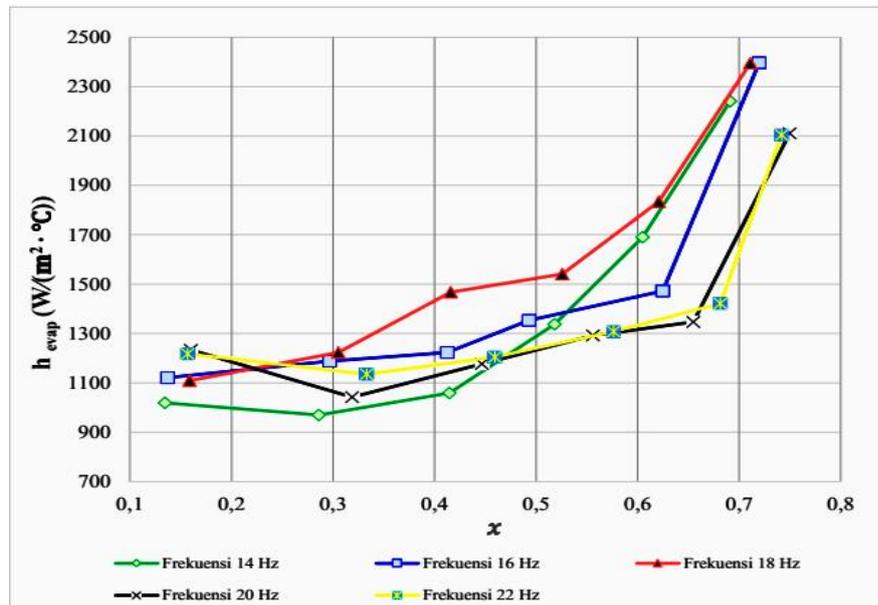
$$\bar{T}_{w,i} = \frac{1}{2} \cdot (T_{w,i,in} + T_{w,i,out}) \dots\dots\dots (10)$$

Dengan:

- $h_{evap}$  = koefisien perpindahan kalor evaporasi (W/m<sup>2</sup>.°C)
- $\dot{Q}_{evap}$  = Laju perpindahan kalor evaporasi (W)
- $A_i$  = Luas perpindahan kalor konveksi (m<sup>2</sup>)
- $\bar{T}_{wi}$  = Temperatur rata-rata dinding dalam saluran (°C)
- $\bar{T}_{sat}$  = Temperatur saturasi rata-rata fluida di saluran (°C)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil data penelitian yang sudah diolah dengan menggunakan Ms. Excel, sehingga didapatkan grafik hubungan kualitas uap refrigeran ( $x$ ) terhadap nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi yang ditunjukkan pada gambar 7. Dari hasil penelitian tentang pengukuran koefisien perpindahan kalor evaporasi terhadap variasi kualitas uap di dalam saluran halus horizontal.



Gambar 7. Grafik hubungan antara kualitas uap refrigeran ( $x$ ) terhadap koefisien perpindahan kalor evaporasi ( $h_{evap}$ ) di dalam saluran halus horisontal

Bahwa nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi ( $h_{evap}$ ) dengan nilai kualitas uap ( $x$ ) sebanding artinya jika variasi kualitas uap refrigeran dinaikkan maka nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi juga akan mengalami kenaikan pula, hal ini menunjukkan ada kesesuaian hasil penelitian yang dilakukan sebelumnya dalkilic (2016). Dari hasil penelitian didapatkan nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi dengan nilai tertinggi yaitu 2396,73 (Watt/m<sup>2</sup>·°C) pada kualitas 0,72 dengan variasi frekuensi *inverter* 16 Hz.

Semakin besar kualitas uap maka kalor yang diterima oleh refrigeran juga akan semakin besar sehingga terjadi proses didih alir di dalam saluran. Semakin besar kualitas uap berarti semakin besar pula prosentase fasa campuran yang dapat diubah menjadi fasa uap (evaporasi). Dengan adanya perubahan fasa yang terjadi maka akan timbul pola aliran yang tidak seragam di dalam saluran. Dengan terbentuknya pola aliran yang tidak seragam menyebabkan tingkat turbulensi aliran meningkat dan nilai laju perpindahan kalornya juga meningkat. Secara tidak langsung dengan laju perpindahan kalor bertambah besar maka nilai koefisien perpindahan kalor juga meningkat.

## KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian tentang pengukuran koefisien perpindahan kalor evaporasi refrigeran R-134a dengan variasi kualitas uap di dalam saluran halus horisontal dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi refrigeran R-134a terhadap nilai kualitas uap adalah sebanding, artinya semakin besar variasi kualitas uap refrigeran maka semakin besar pula nilai koefisien perpindahan kalor evaporasi.
2. Pada penelitian ini nilai koefisien perpindahan kalor tertinggi dicapai pada saat variasi kualitas 0,72 dengan nilai 2396,74 W/m<sup>2</sup>·°C pada frekuensi *inverter* 16 Hz

## DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, W, dan Saito, H., 2002. Penyegaran Udara. Cetakan ke-6. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Cengel, Yunus A. 1998. *Heat Transfer*. 2nd ed. University of Nevada: McGraw-Hill.
- Coiler, J. G. 1981. *Convective Boiling and Condensation*. 3rd ed. New York. McGraw-Hill Int. Book CO.
- Dalkilic. 2016. *Empirical Corelation for The Determination of R-134a's Convective Heat Transfer Coeficient In Horizontal and Vertical Evaporators Having Smooth and Corrugated Tube*. Jurnal Heat and Mass Transfer.

- Hara, Suratman, W.F. Stoecker, J.W. Jones. 1996. *Refrigrasi dan Pengkondisian Udara*. Edisi Kedua. Jakarta: Erlangga
- Harahap, Filino dan Pantur Silaban. 1996. *Termodinamika Teknik*. Jakarta: Erlangga.
- Incropera, Frank P. et al. 2002. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. United States of America: John Wiley & Son.
- Kanoğlu, mehmet dan Ibrahim, Dinçer. 2010 *Refrigeration Systems and Aplication*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Son.
- Kurniawan, Bayu B. 2007. Analisis Termal Unjuk Kerja *Heat Exchanger* 11-E-7 Di Kilang *Fuel Oil Complex* 1 PT PERTAMINA UP IV CILACAP. Skripsi. Program Studi Teknik Mesin. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Rhee, B. W., dan Young, E. H. 1974. *Heat Transfer to Boiling Refrigerants Flowing Inside A Plan Copper Tube*. AIChE Symposium Series, No.138 Vol 70. New York.
- Sugadiyanto. 2006. “Studi Eksperimental Performa Mesin Pengkondisian Udara (AC) MC QUAY Dengn Refrigeran R-22 pada Laboratorium Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang”. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Mesin. Universitas Negeri Semarang.
- Santosa, Tito H.A. 2003. “Pengukuran Koefisien Perpindahan Kalor Evaporasi Refrigeran Petrozon Rossy 12 di Dalam Saluran Halus Horisontal”. Tesis. Program Pasca Sarjana. Universitas Gajah Mada.
- Wahyuadi, Tri. 2012. “Pengaruh Tekanan Refrigeran Pada *Heat Pipe* R134a dan R22 Terhadap pengkondisian udara”. Skripsi. Program Studi Teknik Mesin. Universitas Indonesia.