

# PENGEMBANGAN PERSAMAAN KORELASI PENDIDIHAN KOLAM UNTUK REFRIGERAN HIDROKARBON

Ari Darmawan Pasek<sup>(1)</sup>, Willy Adriansyah<sup>(1)</sup>, Hery<sup>(2)</sup> dan Hengky Leo<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Kelompok Keahlian Konversi Energi, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung

<sup>(2)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung

## Ringkasan

*Hidrokarbon (HC) merupakan salah satu refrigeran alternatif pengganti CFC dan HCFC. Dalam penelitian ini dilakukan serangkaian pengujian untuk mengetahui koefisien perpindahan panas pendidihan refrigeran ini. Pengujian dilakukan terhadap R-12 (CFC) dan R-22 (HCFC) serta refrigeran hidrokarbon yang menggantikan masing-masing, yaitu HC-12 dan HC-22. Refrigeran uji dipertahankan pada suatu kondisi temperatur jenuh dan permukaan pendidihan dengan pemanas listrik ditempatkan di dalam kolam cairan refrigeran. Koefisien perpindahan panas pendidihan ditentukan sebagai perbandingan antara fluks panas dengan kenaikan temperatur permukaan pendidihan. Karakteristik pendidihan hasil pengujian dibandingkan antara R-12 dan R-22 dengan penggantinya. Hasil pengujian kemudian dibandingkan terhadap persamaan korelasi yang telah diajukan oleh beberapa orang peneliti. Berdasarkan analisis, persamaan-persamaan tersebut dimodifikasi agar berlaku juga bagi pengujian ini. Hasilnya, didapatkan konstanta-konstanta baru untuk persamaan korelasi tersebut.*

## Abstract

*Hydrocarbons (HC) are considered as the alternative substitutes of CFC and HCFC refrigerants. Using it as new refrigerants needs a complete knowledge of its characteristics. One of them is the boiling heat transfer coefficient. Series of experiments were carried out to investigate this characteristic. Experiments had been carried out with R-12 (CFC) dan R-22 (HCFC) and their substitutes, HC-12 and HC-22. Tested refrigerant was conditioned at a saturated state and an electric heater immersed in the refrigerant pool of liquid was used as the boiling surface. Boiling heat transfer coefficient is determined as the ratio between the heat flux and the excess temperature on the boiling surface. The experimental results compared between R-12 and R-22 with their substitutes. The experimental results were compared with the correlation equations proposed by researchers. Based on the analysis results, modified correlation equations are proposed for the tested refrigerants.*

**Keywords:** hydrocarbon, refrigerants, boiling heat transfer coefficient, correlation equations

## 1 PENDAHULUAN

Saat ini mesin pendingin telah menjadi salah satu kebutuhan yang tidak dapat diabaikan perannya dalam kehidupan modern. Refrigeran, berperan sebagai fluida kerja, bersirkulasi di dalam sistem pendingin, berfungsi untuk menyerap serta mengeluarkan energi panas dari produk yang didinginkan ke lingkungan di sekitarnya. Refrigeran yang umum digunakan adalah zat-zat kelompok senyawa halokarbon khususnya CFC (*Chloro-Fluoro-Carbon*) seperti R-11 dan R-12, kelompok senyawa HCFC (*Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon*) seperti R-22, dan kelompok senyawa HFC (*Hydro-Fluoro-Carbon*), seperti R-134a.

Pada tahun 1974 Rowland dan Molina mengemukakan hipotesis yang menyebutkan bahwa unsur klorin pada refrigeran CFC dan HCFC dapat merusak lapisan ozon apabila terlepas ke atmosfer [1]. Gas ozon (O<sub>3</sub>) yang banyak berada di stratosfer berfungsi sebagai lapisan

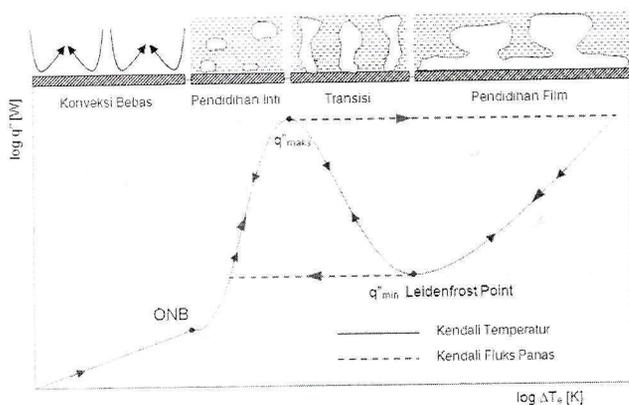
pelindung kehidupan di bumi ini dari radiasi berbahaya sinar ultraviolet (UV) matahari. Pengikisan lapisan ozon menyebabkan peningkatan penerimaan radiasi gelombang UV oleh permukaan bumi. Lebih lanjut lagi, radiasi UV yang berlebihan dapat membahayakan keseimbangan ekosistem, yaitu menyebabkan kematian fitoplankton di laut, penurunan produktivitas tanaman pangan, pelemahan sistem imunitas manusia, bahkan meningkatkan resiko penyakit kanker kulit dan penyakit mata seperti katarak. Selain memiliki potensi perusakan lapisan ozon (ODP = *Ozone Depletion Potential*) yang tinggi, senyawa CFC dan HCFC juga memiliki potensi pemanasan global (GWP = *Global Warning Potential*) yang cukup tinggi [2]. Untuk mengatasi masalah di atas perlu tindakan nyata penghapusan produksi maupun konsumsi refrigeran berbasis senyawa CFC serta HCFC. Usaha penghapusan CFC dan HCFC pun telah diwujudkan melalui berbagai kesepakatan internasional yang juga telah diratifikasi oleh banyak negara.

Berbagai penelitian dan pengembangan telah dilakukan untuk menemukan refrigeran alternatif sebagai pengganti refrigeran halokarbon. Salah satu refrigeran alternatif yang sangat menjanjikan adalah zat-zat dari kelompok senyawa hidrokarbon. HC kini mulai banyak digunakan sebagai pengganti R-12 dan R-22. HC bersifat ramah lingkungan dengan nilai ODP dan GWP yang relatif sangat rendah. Selain itu, HC juga dapat menggantikan langsung refrigeran CFC atau HCFC tanpa harus mengganti komponen-komponen mesin refrigerasi dan dapat menurunkan konsumsi pemakaian energi sampai dengan 30%[3]. Namun, umumnya refrigeran HC dapat menyala/terbakar (*flammable*) dengan *Lower Flammability Limit* (LFL) dan *Upper Flammability Limit* (UFL) masing-masing sebesar sekitar 2.1% dan 9.6% volume di udara[4]. Berkaitan dengan itu, diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk menurunkan sifat mampu nyala refrigeran R-290 (propana). Salah satu cara yang dapat ditempuh untuk mengatasi masalah tersebut misalnya dengan mencampurkan R-290 dengan refrigeran lain yang memiliki flambilitas yang lebih rendah [5].

Prestasi dan sifat-sifat refrigeran hidrokarbon campuran tak mudah terbakar ini telah dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya [6]. Sasaran dari penelitian ini adalah mengetahui salah satu sifat termodinamika refrigeran hidrokarbon yang lainnya, yaitu koefisien perpindahan panas pendidihan kolom inti (*nucleate pool boiling*). Penelitian ini mencakup pembuatan peralatan uji dan melakukan pengujian. Dengan melakukan pengujian pada beberapa jenis refrigeran diharapkan dapat ditentukan persamaan korelasi pendidihan kolom inti untuk refrigeran HC.

## 2 PROSEDUR PENELITIAN

Daerah-daerah pada pendidihan kolom diidentifikasi pertama kali oleh Nukiyama [7]. Hasil pengujiannya dapat digambarkan sebagai kurva pendidihan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.

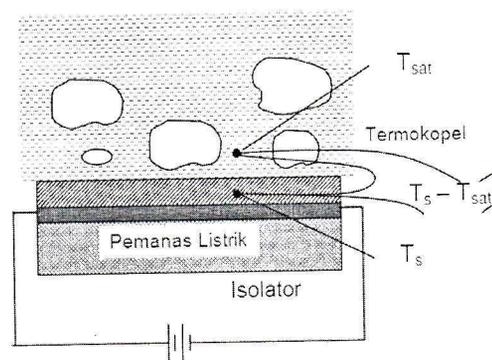


Gambar 1 Kurva pendidihan

Kurva pendidihan digambarkan pada kurva  $\log q''$  terhadap  $\log \Delta T_e$ , yang menggambarkan korelasi fluks panas permukaan pendidihan terhadap kenaikan temperatur permukaan terhadap temperatur jenuh kolom cairan pada tekanan. Kurva dimulai dengan garis

konveksi dan pendidihan inti terjadi mulai dari titik ONB sampai  $q''_{maks}$ . Inilah yang menjadi daerah pengujian pada penelitian ini.

Dalam penelitian ini, refrigeran yang akan diuji adalah R-12, HC-12 (60% massa propana, 23% butana, 17% isobutana), R-22 (50-50%  $m/m$ ), dan HC-22 (>99,5% massa propana). Pengujian ini dilakukan dengan prosedur pengujian kendali fluks panas, yang secara skematis dapat digambarkan seperti pada Gambar (2). Skema rangkaian seluruh peralatan pengujian ditunjukkan pada Gambar (3).



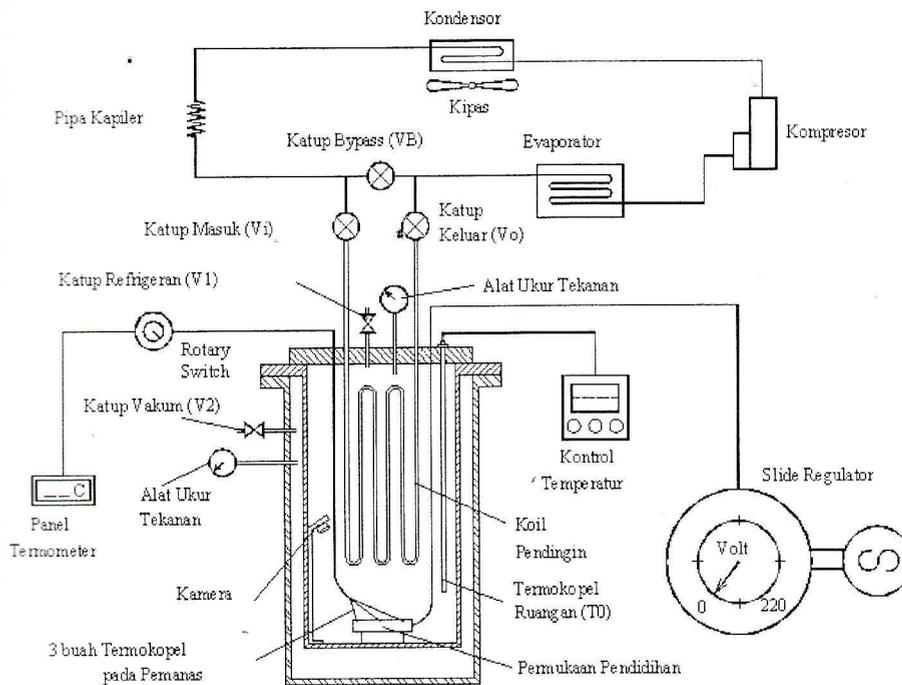
Gambar 2 Skema pengujian pendidihan kendali fluks panas

Dengan menggunakan sisi evaporator dari mesin pendingin, refrigeran uji "ditahan" pada suatu temperatur jenuh  $T_0$  (-10°C, -5°C, 0°C, 5°C, atau 10°C) di dalam tabung uji sehingga terbentuk kolam cairannya. Temperatur jenuh ini diukur dengan sebuah termokopel tipe K.

Sebuah silinder pemanas listrik diletakkan di dalam kolam tersebut. Silinder pemanas dengan panjang 0,10 m dan diameter 0,0254m dengan permukaan halus bahan tembaga digunakan sebagai permukaan pendidihannya. Fluks panas diatur dengan cara mengatur tegangan yang bekerja pada pemanas listrik, yaitu tegangan keluar dari *slide regulator* (menaik kemudian menurun dari 0V-220V-0V, dengan interval 20V). Dengan mempertahankan temperatur refrigeran uji, kenaikan temperatur permukaan pemanas ( $\Delta T_e$ ) diukur pada pada setiap tegangan listrik masukan pemanas dengan termokopel tipe K yang dipasang pada permukaannya (3 buah Termokopel pada Pemanas). Fluks panas ( $q''$ ) dapat dihitung, yaitu besarnya kuadrat dari tegangan masukan pemanas ( $V$ ) dibagi dengan hambatan pemanas listrik yang diasumsikan selalu konstan ( $R$ ) dan nilai  $\cos \phi = 1$  untuk pemanas listrik, kemudian dibagi dengan luas permukaan efektif pemanas tersebut.

Koefisien perpindahan panas dihitung dengan hukum Pendinginan Newton [8], yaitu

$$h = \frac{q''}{\Delta T_e} \quad (1)$$



Gambar 3 Skema rangkaian peralatan uji

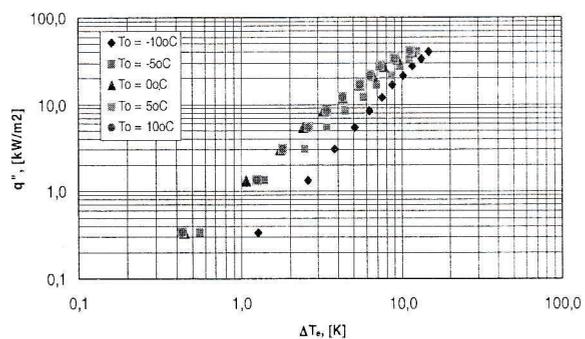
Koefisien perpindahan panas hasil pengujian ini dihitung untuk masing-masing refrigeran uji pada tiap tingkat keadaan uji dan tegangan listrik masukan pemanas. Hasilnya kemudian dibandingkan antar refrigeran konvensional dengan refrigeran penggantinya.

Pada saat pengujian, teramati bahwa hampir semua refrigeran uji telah tunak mendidih pada tegangan masukan pemanas 80V. Di bawah 80V, kolom cairan refrigeran yang teramati melalui kamera yang dipasangkan di dalam tabung uji kadang telah mendidih kadang belum untuk tiap jenis refrigeran. Oleh karena itu, data yang diambil untuk analisis pada pengujian ini adalah pada fluks panas dengan tegangan masukan pemanas 80-220V.

Data pengujian menunjukkan kenaikan temperatur permukaan pemanas di sisi-sisi ujungnya relatif sangat kecil daripada di bagian tengah. Oleh karena itu, untuk analisis, digunakan data-data yang didapatkan dari pembacaan termokopel yang dipasangkan pada bagian tengah permukaan dinding pemanas.

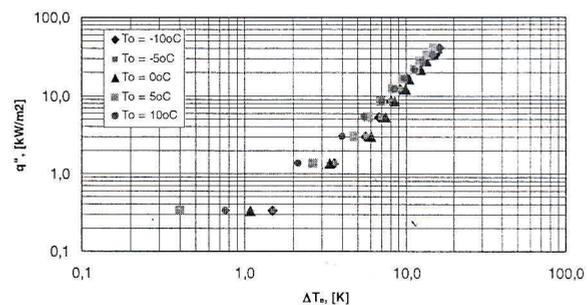
### 3 DATA PENGUJIAN DAN ANALISIS

Data pengujian berupa kurva pendidihan untuk setiap refrigeran uji dapat dilihat pada Gambar (4) sampai (7), masing-masing untuk refrigeran R-12, hidrokarbon pengganti R-12 (HC-12), R-22 dan hidrokarbon pengganti R-22 (HC-22)

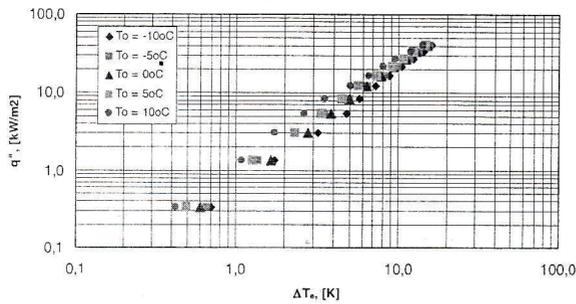


Gambar 4 Kurva pendidihan R-12 untuk berbagai temperatur jenuh,  $T_o$

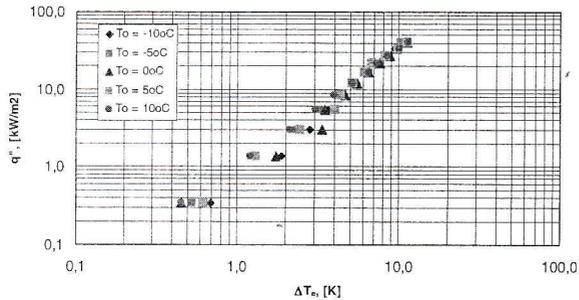
Dari kurva-kurva tersebut dapat dilihat bahwa beda temperatur (derajat superpanas) meningkat dengan kenaikan fluks panas. Apabila keduanya diplot pada skala logaritmik akan diperoleh garis lurus.



Gambar 5 Kurva pendidihan HC-12 untuk berbagai temperatur jenuh,  $T_o$



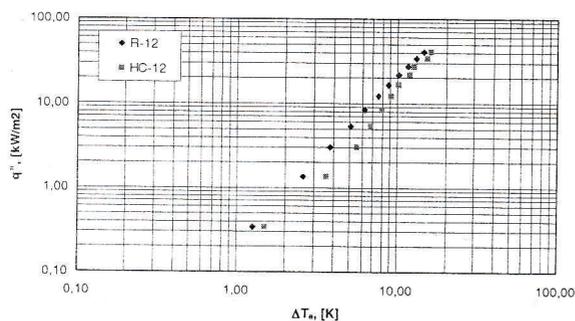
Gambar 6 Kurva pendidihan R-22 untuk berbagai temperatur jenuh,  $T_o$



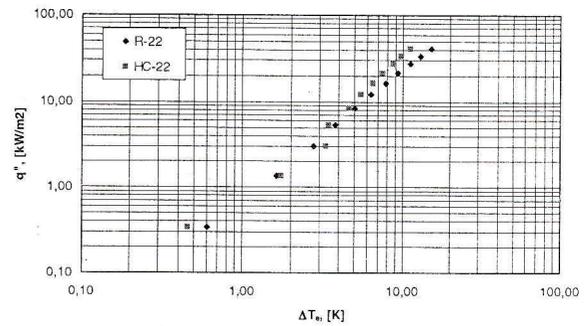
Gambar 7 Kurva pendidihan HC-22 untuk berbagai temperatur jenuh,  $T_o$

### 3.1 Perbandingan Karakteristik Pendidihan Refrigeran Uji

Salah satu tujuan utama penelitian ini adalah membandingkan karakteristik pendidihan refrigeran CFC dan HCFC dengan refrigeran HC penggantinya. Karakteristik pendidihan ini pertama-tama dapat dibandingkan melalui kurva pendidihan dari masing-masing refrigeran pada suatu tingkat keadaan. Hal ini ditunjukkan Gambar (8) dan (9). Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa kurva pendidihan dalam skala log untuk masing-masing sumbu berupa garis lurus. Kurva pendidihan R-12 berada di sebelah kiri dari HC-12, sedangkan kurva pendidihan R-22 hampir berimpit dengan kurva pendidihan HC-22.

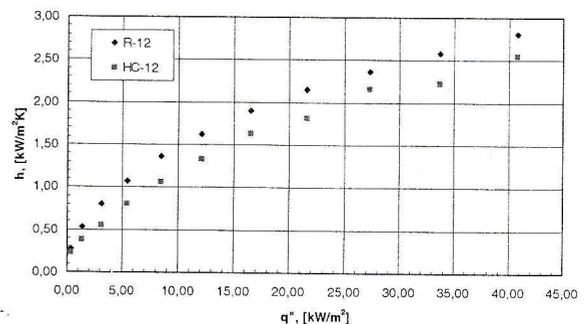


Gambar 8 Kurva pendidihan R-12 vs HC-12 pada temperatur jenuh,  $T_o = -10^\circ\text{C}$

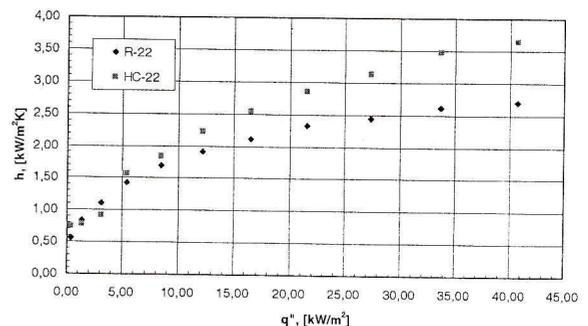


Gambar 9 Kurva pendidihan R-22 vs HC-22 pada temperatur jenuh  $T_o = 0^\circ\text{C}$

Karakteristik pendidihan juga dapat dibandingkan dari koefisien perpindahan panas pendidihan kolam inti,  $h$  [ $\text{kW/m}^2\text{K}$ ], pada suatu tingkat keadaan. Gambar (10) dan 11 menunjukkan hal ini. Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa koefisien perpindahan panas pendidihan R-12 lebih baik dibandingkan HC-12, dan HC-22 lebih baik dibandingkan R-22, sehingga dapat disimpulkan bahwa karakteristik pendidihan refrigeran CFC sedikit lebih baik dibandingkan dengan refrigeran HC penggantinya R-290 + R-600/R-600a, tetapi untuk HCFC koefisien perpindahan panas pendidihannya lebih buruk dibandingkan dengan HC penggantinya R-290.



Gambar 10 Koefisien  $h$  pendidihan R-12 vs HC-12 pada temperatur jenuh,  $T_o = -10^\circ\text{C}$



Gambar 11 Koefisien  $h$  pendidihan R-22 vs HC-22 pada temperatur jenuh,  $T_o = 0^\circ\text{C}$

### 3.2 Perbandingan Data Hasil Pengujian dengan Persamaan Korelasi

Persamaan korelasi pendidihan digunakan untuk memprediksi proses pendidihan yang terjadi. Persamaan korelasi yang digunakan pada penelitian ini adalah persamaan yang diajukan oleh Rohsenow [9], yaitu

$$\frac{Re_s Pr}{Nu} = C_{s,f} Re^m Pr^n \quad (2)$$

apabila diuraikan akan menjadi

$$q_s = \mu_1 h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left( \frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr^n} \right)^3 \quad (3)$$

dengan  $C_{s,f} = 0,013$  dan  $n = 1,7$ .  
dan Persamaan Vishnev[10], yaitu

$$Nu = 2,2 M^{-0,25} Pr^{0,35} Re^{0,7} T_r^7 \quad (4)$$

dan

$$Nu = 2,2 M^{-0,1} Pr^{0,35} Re^{0,7} T_r^{10} \quad (5)$$

dengan

$M$  = berat molekul [kg/mol],

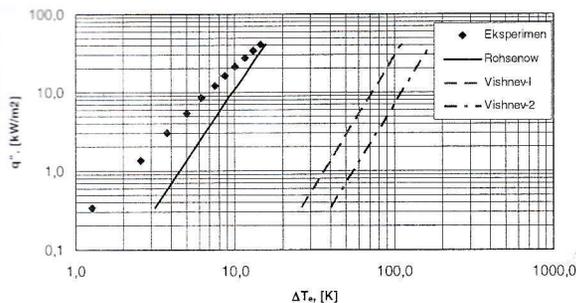
$$Nu = \frac{h}{k_f} \left( \frac{\sigma}{\Delta \rho g} \right)^{0,5}$$

$$Pr = \frac{c_{p,l} \mu_1}{k_f}, \text{ dan}$$

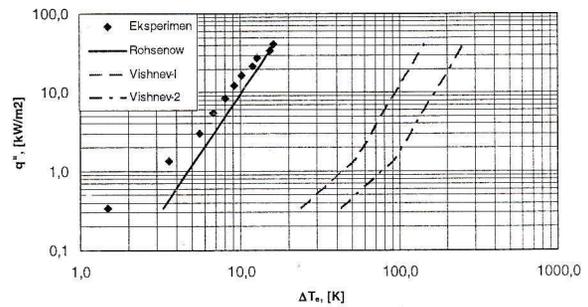
$$Re = \frac{q (l/d)}{h_{fg} \rho_v} \left( \frac{\sigma}{\Delta \rho g} \right)^{0,5}$$

Dari persamaan-persamaan di atas, didapatkan korelasi antara fluks panas ( $q''$ ) dengan kenaikan temperatur permukaan pendidihan ( $\Delta T_e$ ).

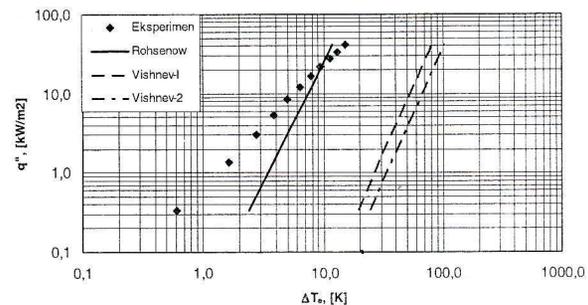
Data pengujian dan hasil pengolahannya kemudian dibandingkan dengan persamaan korelasi Rohsenow dan Vishnev. Tujuannya adalah memeriksa persamaan-persamaan manakah yang berlaku atau paling mendekati hasil pengujian refrigeran-refrigeran uji pada pengujian ini. Pada Gambar (12) sampai (15) ditunjukkan gambaran perbandingan titik-titik data pengujian dengan persamaan korelasi. Data pengujian untuk semua refrigeran uji berada dekat dengan garis Rohsenow dan relatif sangat jauh dengan garis Vishnev I maupun Vishnev II. Oleh karena itu, persamaan Vishnev tidak digunakan dalam analisis selanjutnya.



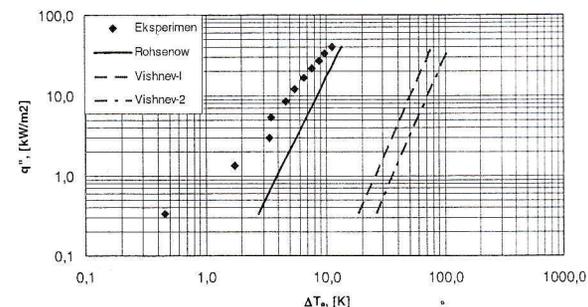
**Gambar 12** Kurva perbandingan data pengujian R-12 dengan persamaan korelasi pada temperatur jenuh,  $T_0 = -10^\circ\text{C}$



**Gambar 13** Kurva perbandingan data pengujian HC-12 dengan persamaan korelasi pada temperatur jenuh,  $T_0 = -10^\circ\text{C}$



**Gambar 14** Kurva perbandingan data pengujian R-22 dengan persamaan korelasi pada temperatur jenuh,  $T_0 = 0^\circ\text{C}$



**Gambar 15** Kurva perbandingan data pengujian HC-22 dengan persamaan korelasi pada temperatur jenuh,  $T_0 = 0^\circ\text{C}$

### 3.3 Pengembangan Persamaan Korelasi Pendidihan Rohsenow untuk Refrigeran Uji

Sesuai dengan yang dikemukakan oleh Rohsenow, nilai  $n$ ,  $m$ , dan  $C_{s,f}$  dapat bervariasi bergantung pada kombinasi permukaan pemanas dengan cairan yang dididihkan. Tujuan pengembangan persamaan korelasi pendidihan pada penelitian ini dilakukan dengan menentukan nilai  $m$  dan  $C_{s,f}$  baru yang sesuai dengan refrigeran uji dengan  $n$  tetap 1,7[11]. Persamaan korelasi ini dikembangkan dengan cara mengubah Persamaan (3) menjadi

$$\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{h_{fg}} = C_{s,f} \left[ \frac{q''}{\mu_1 h_{fg}} \left( \frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v) g} \right) \right]^m \left( \frac{c_{p,l} \mu_1}{k_f} \right)^n \quad (6)$$

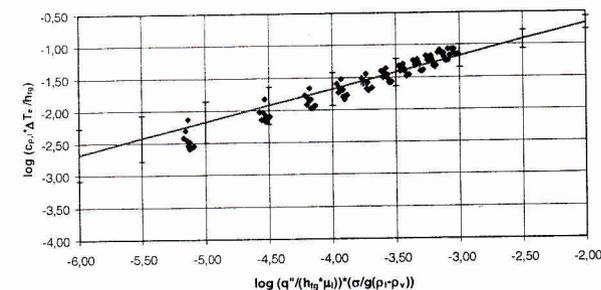
Persamaan di atas merupakan bentuk persamaan garis lurus (linear), yaitu  $Y = m \cdot X + C$ , dengan

$$Y = \log \left( \frac{c_{p,l} \Delta T_e}{h_{fg}} \right) \quad (7)$$

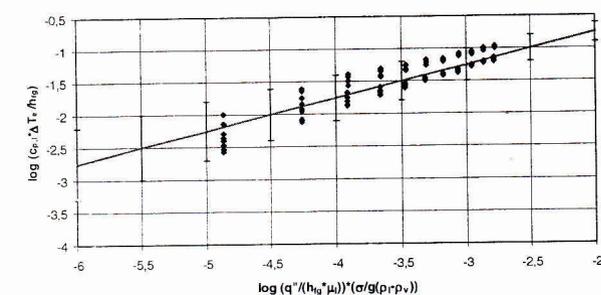
$$X = \log \left[ \frac{q''}{\mu_1 h_{fg}} \left( \frac{\sigma}{(\rho_1 - \rho_w) g} \right) \right] \quad (8)$$

$$C = \log C_{s,f} + n \log (\text{Pr}) \quad (9)$$

Dari persamaan tersebut, dengan tetap mengambil nilai  $n = 1,7$ , nilai  $C_{s,f}$  dan  $m$  yang baru dapat dicari untuk masing-masing refrigeran uji. Gambar (16) sampai (19) menunjukkan perbandingan data pengujian dengan persamaan Rohsenow yang telah dimodifikasi.



**Gambar 16** Perbandingan persamaan Rohsenow yang telah dimodifikasi dengan data pengujian R-12 dan R-22



**Gambar 17** Perbandingan persamaan Rohsenow yang telah dimodifikasi dengan data pengujian HC-12 dan HC-22

Dengan melihat pada gambar-gambar tersebut dapat ditentukan konstanta  $C$  dan  $m$ . Tabel 1 menunjukkan nilai  $m$  dan  $C_{s,f}$  yang baru untuk setiap refrigeran uji. Dengan menggunakan konstanta ini terjadi penyimpangan maksimum sebesar  $\pm 30\%$  terhadap sebaran data pengujian

**Tabel 1** Nilai  $m$  dan  $C_{s,f}$  untuk refrigeran uji

Refrigeran uji	$m$	$C_{s,f}$
R-12 dan R-22	0,50	0,35
HC-12 dan HC-22	0,50	0,25

#### 4 KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil pengujian menunjukkan nilai koefisien perpindahan panas pendidihan R-12 lebih tinggi daripada HC-12, namun koefisien perpindahan panas HC-22 lebih tinggi daripada R-22.

Nilai  $C_{s,f}$  dan  $m$  persamaan korelasi Rohsenow, dengan nilai  $n$  tetap 1,7, yang didapatkan untuk pengujian ini adalah

1. untuk R-12 dan R-22:  $C_{s,f} = 0,35$ ,  $m = 0,5$  (error  $\pm 15\%$ )
2. untuk HC-12 dan HC-22:  $C_{s,f} = 0,25$ ,  $m = 0,5$  (error  $\pm 20\%$ )

Hasil penerapan dilapangan menunjukkan bahwa performansi refrigeran hidrokarbon lebih baik dibandingkan dengan refrigeran halokarbon [3]. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa keunggulan performansi refrigeran hidrokarbon khususnya HC-22 disebabkan oleh karakteristik perpindahan panasnya.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. The Ozone Depletion Phenomenon (<http://www.beyonddiscovery.org/content/view/article.asp?a=73>, diakses 6 Maret 2007)
2. Ozone Depletion Glossary (<http://www.epa.gov/Ozone/defns.html>, diakses 7 Maret 2007)
3. A.D. Pasek, N.P. Tandian, dan A. Suwono, Less Flammable Hydrocarbon Refrigerant as an Alternative Refrigerant for Energy Conservation in Building, *Proceeding of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2003*, **077-1-077-9**, Sanur Bali, Indonesia, December 7-11, 2003.
4. A.D. Pasek dan Efendi, Performance Evaluation of Hydrocarbon-Halocarbon Refrigerant Mixture, *Proceeding of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2003*, **079-1-079-9**, Sanur Bali, Indonesia, 7-11 December, 2003.
5. A.D. Pasek, et.al, Flammability and Performance Test of R-290/R-134a Mixture for HCFC-22 Replacement, *7<sup>th</sup> IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids*, Trondheim, Norway, 2006.
6. A.D. Pasek dan Djuanda, *Experimental Study on Viscosity and Solubility of Hydrocarbon Refrigerant Mixture*, FTEC 2006, Jakarta, 10-14 Desember 2006.
7. S. Nukiyama, The Maximum and Minimum Values of Heat Transmitted from Metal to Boiling Water Under Atmospheric Pressure, *J. Japan Soc. Mech. Eng.*, **37**, 367, 1934 (Translation: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **9**, 1419, 1966).
8. Frank P Incropera dan David P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, Edisi 4, John Wiley & Sons, New York, 2002.
9. W.M. Rohsenow, A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids, *Trans. ASME J. Heat Transfer*, **74**: 969-975, 1952.
10. I.P. Vishnev, Molecular and Thermodynamic Method of Heat Transfer Generalization and Classification of Boiling Substances, *Cryogenics*, **28**: 770-778, Nov. 1988.
11. W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, dan E.N. Ganic, *Handbook of Heat Transfer – Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985.