

Pressure Drop and Void Fraction of Two-phase Evaporative Propane in 7.6mm Horizontal Circular Tube

Agus S. Pamitran^{1,*}, Sentot Novianto², Raldi A. Koestoer¹, Nasruddin¹, dan M. Idrus Alhamid¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok

²Prodi Doktor, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok

*Corresponding author: pamitran@eng.ui.ac.id

Abstract. This study observed a two-phase flow boiling pressure drop in a horizontal circular tube. Propane natural refrigerant was used because it is environmentally friendly. The experiment was conducted in a 7.6-mm inner diameter horizontal tube that was 1070 mm in length. The experimental conditions were set at 9 to 20 kW/m² heat flux, 300 to 420 kg/m²s mass flux, and 5 to 15°C saturation temperature. The effects of heat flux, mass flux, and void fraction on pressure drop are shown in this study. The Premoli dkk. (1971) study accurately predicted the void fraction for the accelerational pressure drop. Recent pressure drop results were compared with existing pressure drop prediction methods. Among the selected existing pressure drop correlations, the Tran dkk. (2000) study best predicted the present experimental pressure drop data.

Abstrak. Pengamatan pressure drop pada aliran didih dua fase di pipa sirkular horizontal dilakukan pada penelitian ini. Propane sebagai refrigeran natural digunakan dalam penelitian ini dikarenakan sifatnya yang ramah lingkungan. Pipa berdiameter dalam 7.6mm dengan orientasi horizontal dan panjang 1070 mm digunakan dalam eksperimen ini. Kondisi eksperimen dilakukan pada fluk kalor 9 hingga 20 kW/m², fluk massa 300 to 420 kg/m²s, dan temperature saturasi 5 hingga 15°C. Pengaruh fluk kalor, fluk massa, dan void fraction terhadap pressure drop ditunjukkan pada penelitian ini. Premoli dkk. (1971) memprediksi dengan baik void fraction untuk pressure drop akselerasional pada penelitian ini. Pressure drop penelitian ini dibandingkan dengan beberapa persamaan pressure drop yang ada. Tran dkk. (2000) dapat memprediksi pressure drop hasil penelitian ini dengan baik.

Kata kunci: Pressure drop, void fraction, propane, aliran dua fase, refrigeran

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Kebutuhan untuk mengganti refrigerant CFC dan HFC dilatarbelakangi oleh kandungan chlorine yang dapat menyebabkan penipisan lapisan ozon. Propane adalah refrigerant natural dengan ODP 0.05 dan GWP 1700. Untuk memprediksi pressure drop dan koefisien perpindahan kalor digunakan void fraction yang sesuai [1]. Prediksi void fraction menjadi penting karena adanya kompleksitas dalam pemahaman dasar void fraction; analisis yang ada banyak menggunakan persamaan empirik. Void fraction diperlukan dalam berbagai implementasi, antara lain sistem HVAC&R, jaringan pipa minyak dan gas, nuklir, dan industry pemrosesan [2]. Void fraction adalah bilangan tak berdimensi yang merupakan rasio luas penampang pipa yang diisi oleh uap dengan total luas penampang pipa, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (1)$$

Hingga saat ini prediksi void fraction dapat diklasifikasikan menjadi empat metode, yaitu korelasi slip rasio, korelasi Kah, korelasi fluk drift, dan korelasi lainnya [3]. Slip rasio adalah korelasi dengan rasio kecepatan fase uap terhadap kecepatan fase cair, $S = u_g/u_l$. Persamaan ini didapat dari model aliran separated yang mengasumsikan kecepatan fase uap berbeda dengan kecepatan fase cair, sehingga void fraction dapat diturunkan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$\alpha = \left[\frac{A}{A_g} \right]^{-1} = \left[\frac{A_g + A_f}{A_g} \right]^{-1} = \left[1 + \frac{A_f}{A_g} \right]^{-1} = \left[1 + \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \left(\frac{u_g}{u_f} \right) \right]^{-1} = \left[1 + \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right) S \right]^{-1} \quad (2)$$

Nilai S dalam Persamaan 2 bernilai satu bila aliran diasumsikan homogeneous, yaitu kecepatan fase uap sama dengan kecepatan fase cair. Butterworth [4] mengajukan bentuk persamaan umum untuk

memprediksi void fraction dengan fungsi dari kualitas massa uap, densitas, dan viskositas.

Pada kajian ini slip ratio yang dikembangkan oleh Premoli dkk. [5], Chisholm [6], dan Fang dkk. [3] digunakan untuk perbandingan. Korelasi-korelasi tersebut dibuat dengan model homogenous. Bankoff [7] menggunakan konstanta K dalam persamaannya, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 3. K adalah fungsi dari tekanan, bilangan Froude, viskositas, bilangan Reynolds, dan parameter lainnya. Merujuk pada Fang dkk. [3], salah satu persamaan yang terbaik dalam memprediksi void fraction adalah Massena [8].

$$\alpha = K\alpha_h \tag{3}$$

Zuber-Findlay [9] mengajukan persamaan void fraction dengan mempertimbangkan ketidakseragaman aliran yang diwakilkan oleh kecepatan drift dan kecepatan aliran dua fase. Kecepatan gas superficial didefinisikan sebagai $u_{sg} = x/\rho_g$. Steiner [10] mengembangkan persamaan void fraction yang tergolong dalam kategori ini.

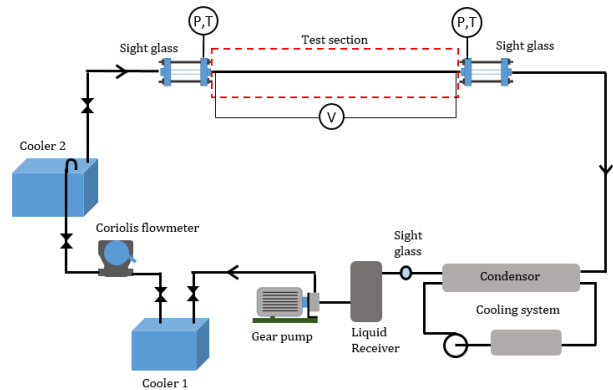
Banyak persamaan pressure drop dikembangkan berbasis parameter Lockhart-Martinelli X, yang merupakan akar kuadrat rasio beda pressure pada fase cair terhadap beda tekanan pada fase uap. Penelitian ini menggunakan korelasi dengan metode ini dalam komparasi dengan persamaan void fraction. Persamaan-persamaan dalam bentuk ini juga digunakan dalam beberapa studi, antara lain Huq dan Loth [11] dan Yashar dkk. [12].

Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan beberapa persamaan void fraction terhadap korelasi homogeneous. Void fraction dari data penelitian digunakan untuk memprediksi pressure drop akselerasional.

Metode Penelitian

Gambar 1 menunjukkan diagram skematik alat pengujian. Propane mengalir bersirkulasi di dalam sebuah sistem yang terdiri dari pompa gear, dua buah pendingin, sebuah condenser, sebuah penampung cairan, sight glass, dan pipa uji horizontal bermaterial stainless steel. Pipa uji dipanaskan secara merata sepanjang pipa dengan voltase listrik untuk nilai fluk kalor yang diberikan. Pengukuran temperature menggunakan termokopel pada sembilan posisi pengukuran di sepanjang pipa uji. Dua termokopel yang dimasukkan dalam pipa dipasang pada bagian masuk dan keluar pada pipa uji. Tekanan diukur pada bagian masuk dan keluar pipa uji dengan transmitter tekanan. Aliran massa refrigerant diukur dengan meter aliran Coriolis. Pendingin digunakan untuk menjaga temperature fluida kerja. Untuk mencegah kalor terbuang maka

semua pipa diinsulasi dengan baik. Tabel 1 menunjukkan kondisi pengujian pada penelitian ini.



Gambar 1. Diagram skematik alat pengujian

Tabel 1. Kondisi pengujian

Refrigeran	Propane
Pipa uji	Pipa SS316 Horizontal
Diameter dalam (mm)	7.6
Panjang pipa (mm)	1070
Fluk massa (kg/m ² s)	300 hingga 420
Fluk kalor (kW/m ²)	9, 15, 20
Tsat Inlet (°C)	5.0 to 15.0

Void fraction dibutuhkan untuk memprediksi pressure drop akselerasional dengan pendekatan aliran separated. Oleh karena itu pressure drop akselerasional dapat dihitung dengan Persamaan 4.

$$\left(\frac{dp}{dz} a\right) = G^2 \left[\frac{x^2 v_g}{\alpha} + \frac{(1-x)^2 v_f}{(1-\alpha)} - v_f \right] \tag{4}$$

Pressure drop friksional adalah komponen lain dalam pressure drop. Persamaan pressure drop friksional dengan pendekatan aliran homogenous ditunjukkan pada Persamaan 5 [13].

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right) = \left(\frac{dp}{dz} F\right)_{fo} \phi_{fo}^2 = \frac{2f_{fo} G^2 v_f}{D} \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right) \right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_g}\right) \right]^{-0.25} \tag{5}$$

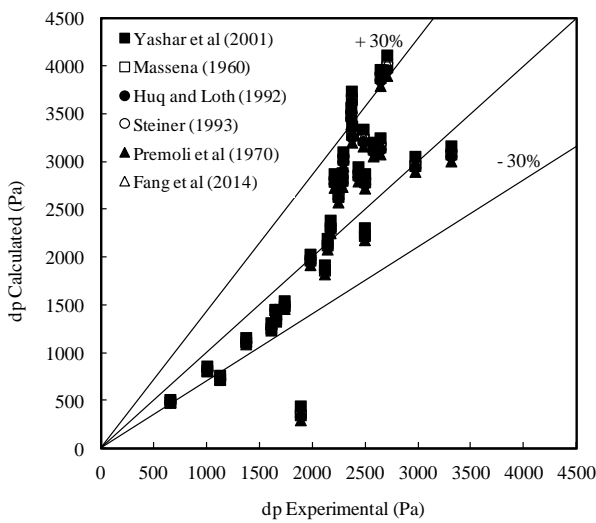
Pressure drop friksional dengan pendekatan aliran separated ditunjukkan pada Persamaan 6.

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right) = \left(\frac{dp}{dz} F\right)_f \phi_f^2 = \frac{2f_f G^2 v_f}{D} \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right) \right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_g}\right) \right]^{-0.25} \left[\frac{1}{(1-x)^2} \right] \tag{6}$$

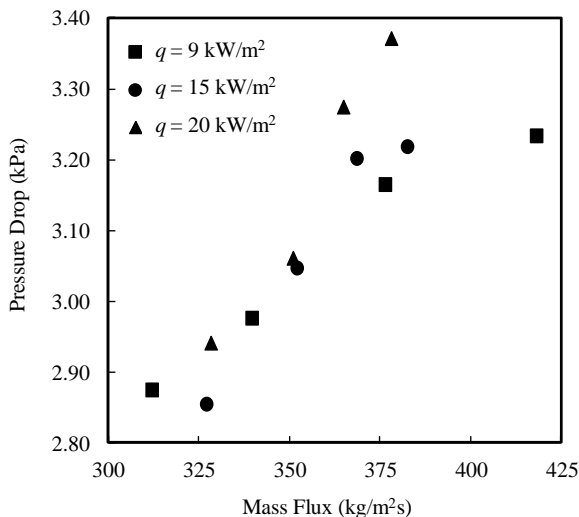
Hasil dan Pembahasan

Penghitungan void fraction dengan beberapa metode yang dibuat oleh Premoli dkk [5], Chisholm [6], Huq dan Loth [11], Massena [8], Steiner [10], Fang dkk. [2], dan Yashar dkk. [12] digunakan untuk

penghitungan pressure drop akselerasional dengan model aliran separated. Komparasi beberapa nilai prediksi pressure drop dengan pressure drop hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 3. Deviasi absolut untuk void fraction dengan persamaan Premoli dkk. [5], Huq dan Loth [11], Massena [8], Steiner [10], Fang dkk. [3] dan Yashar dkk. [12] adalah 24.80%, 25.33%, 25.67%, 26.23%, 26.14% dan 26.57%. Prediksi dengan Premoli dkk. [5] menunjukkan deviasi terendah. Selanjutnya pressure drop total dibandingkan dengan nilai prediksi pressure drop dengan beberapa persamaan void fraction dan metode aliran separated, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



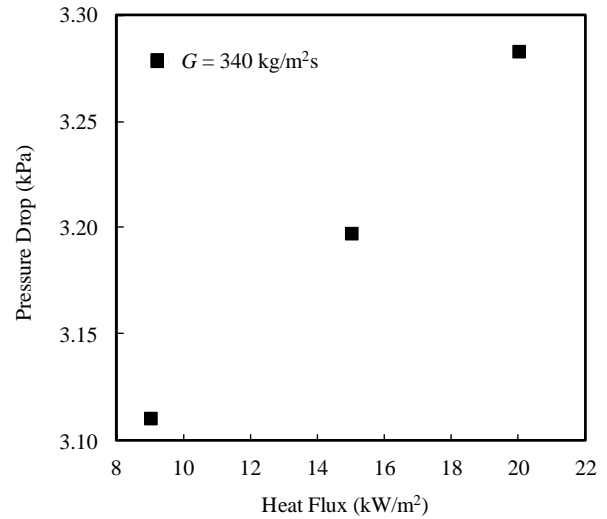
Gambar 2. Perbandingan pressure drop total dengan beberapa prediksi void fraction



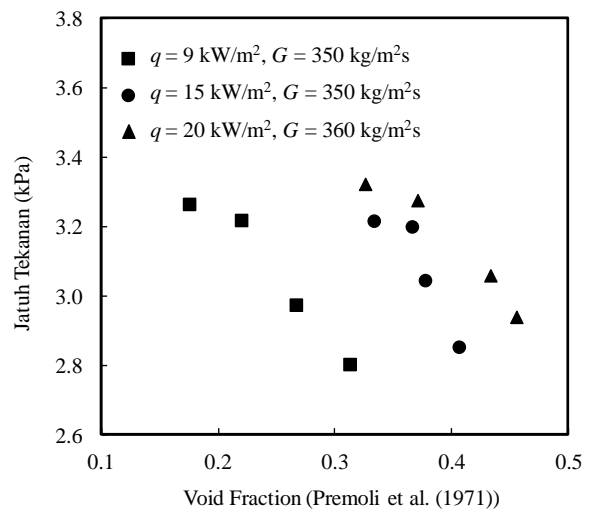
Gambar 3. Pengaruh fluk massa terhadap pressure drop

Gambar 3 menunjukkan bahwa kenaikan fluk massa menyebabkan kenaikan pressure drop. Hasil tersebut juga ditunjukkan pada studi-studi sebelumnya, antara lain Zhao dkk. [14], Yoon dkk.

[15], Park dan Hrnjak [16], Oh dkk. [17], Cho dan Kim [18], dan Choi dkk. [19]. Kenaikan pressure drop disebabkan oleh kenaikan kecepatan aliran yang dapat menyebabkan aliran menjadi turbulen.



Gambar 4. Pengaruh fluk kalor terhadap pressure drop

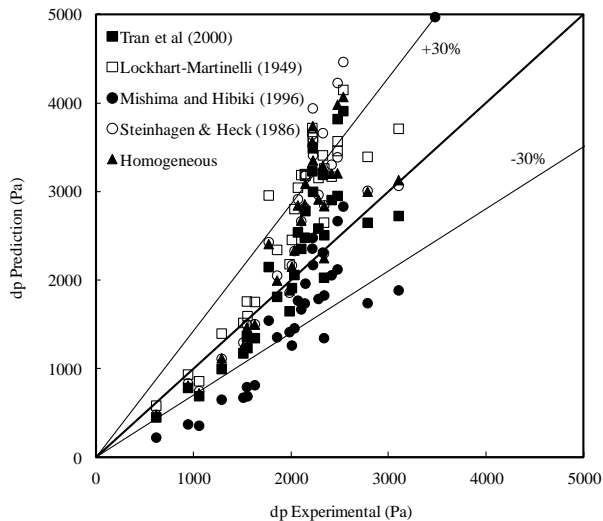


Gambar 5. Pengaruh void fraction terhadap pressure drop

Gambar 4 menunjukkan pengaruh fluk kalor terhadap pressure drop. Peningkatan fluk kalor menyebabkan kenaikan pressure drop. Peningkatan fluk kalor menyebabkan temperature fluida kerja meningkat dan perubahan densitas dan viskositas fluida kerja. Peningkatan fluk kalor menyebabkan penguapan lebih tinggi, sehingga menyebabkan kenaikan kualitas massa uap dan kecepatan aliran. Hasil serupa ditunjukkan oleh Zhao dkk. [14].

Pengaruh void fraction terhadap pressure drop ditunjukkan pada Gambar 5. Peningkatan void fraction menyebabkan penurunan pressure drop. Kenaikan void fraction diikuti dengan penurunan volume cairan sehingga gesekan menurun.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 6, pressure drop hasil pengujian dibandingkan dengan lima persamaan pressure drop, yaitu Tran dkk. [21], Mishima dan Hibiki [22], Homogeneous (McAdams), Steinhagen dan Heck [23], dan Lockhart-Martinelli [24], masing-masing menunjukkan deviasi absolut 24.59%, 28.61%, 29.13%, 32.06% dan 36.84%. Tran dkk. [21] memberikan prediksi terbaik dibandingkan persamaan pressure drop lain.



Gambar 6. Komparasi pressure drop

Kesimpulan

Studi eksperimen tentang pressure drop dan void fraction pada aliran didih dua fase dengan propane telah dilakukan. Pipa stainless steel dengan orientasi aliran horizontal digunakan sebagai pipa uji. Premoli dkk. [5] menunjukkan hasil terbaik untuk memprediksi pressure drop. Pressure drop meningkat dengan naiknya fluk massa dan fluk kalor. Akan tetapi pressure drop turun dengan naiknya void fraction. Hasil penghitungan dengan beberapa persamaan pressure drop menunjukkan Tran dkk. [21] bisa memprediksi pressure drop dengan baik.

Penghargaan

Penelitian ini didanai oleh Hibah PDUPT Ristekdikti 2018 dengan nomor kontrak 392/UN2.R3.1/HKP05.00/2018

Referensi

[1] A.S. Pamitran, K.I. Choi, J.T. Oh and Nasruddin, *Evaporation heat transfer coefficient in single circular small tubes for flow natural refrigerants of C₃H₈, NH₃, and CO₂*, International Journal of Multiphase Flow 37 (2011) 794–801.

- [2] M.A. Woldesemayat and A.J. Ghajar, *Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes*. International Journal of Multiphase Flow 33 (2007) 347–370.
- [3] Y.Xu and X.Fang, *Correlations of void fraction for two-phase refrigerant flow in pipes*. Applied Thermal Engineering 64 (2014) 242–251.
- [4] D. Butterworth, *A comparison of some void-fraction relationships for cocurrent gas-liquid flow*, Int. J. Multiphase Flow 1 (1975) 845–850.
- [5] A. Premoli, D. Francesco, A. Prina, *A dimensionless correlation for determining the density of two-phase mixtures*, La Termotecnica 25 (1971) 17–26.
- [6] D. Chisholm, *Two Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers*, Longman, New York, 1983
- [7] S.G. Bankoff, *A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow*, Trans. ASME 82 (1960) 265–272.
- [8] W.A. Massena, *Steam-Water Pressure Drop and Critical Discharge Flow - a Digital Computer Program*, 1960. HW-65706.
- [9] N. Zuber, J.A. Findlay, *Average volumetric concentration in two-phase flow systems*, J. Heat Transfer 87 (1965) 453–468.
- [10] D. Steiner, *Heat Transfer to Boiling Saturated Liquids*, VDI-Wär meatlas (VDI Heat Atlas), Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GCV), Düsseldorf, 1993.
- [11] R.H. Huq, J.L. Loth, *Analytical two-phase flow void fraction prediction method*, J. Thermophys 6 (1992) 139–144.
- [12] D.A. Yashar, D.M. Graham, M.J. Wilson, J.C. Chato, H.R. Kopke, T.A. Newell, *Investigation of refrigerant void fraction in horizontal, microfin tubes*, HVAC&R Res. 7 (2001) 67–82.
- [13] J.G. Collier and J.R. Thome, *Convective boiling and condensation*. Oxford Science publications (1994) 41–51.
- [14] Zhao, Y., Molki, M., Ohadi, M. M., Dessiatoun, S.V., 2000. Flow boiling of CO₂ in microchannel. ASHRAE Trans, 437–445. DA-00-2-1.
- [15] Yoon, S.H., Cho, E.S., Hwang, Y.W., Kim, M.S., Min, K., Kim, Y., 2004. Characteristics of evaporative heat transfer and pressure drop of carbon dioxide and correlation development. Int. J. Refrigeration 27, 111–119.

- [16] Park, C.Y., Hrnjak, P.S., 2007. CO₂ and R410A flow boiling heat transfer, pressure drop, and flow pattern at low temperatures in a horizontal smooth tube. *Int. J. Refrigeration* 30, 166–178.
- [17] Oh, H.K., Ku, H.G., Roh, G.S., Son, C.H., Park, S.J., 2008. Flow boiling heat transfer characteristics of carbon dioxide in a horizontal tube. *Appl. Therm. Eng.* 28, 1022–1030.
- [18] Cho, J.M., Kim, M.S., 2007. Experimental studies on the evaporative heat transfer and pressure drop of CO₂ in smooth and micro-fin tubes of the diameters of 5 and 9.52 mm. *Int. J. Refrigeration* 30, 986–994.
- [19] Choi, K., Pamitran, A. S., Oh J., Saito, K., 2009. Pressure drop and heat transfer during two-phase flow vaporization of propane in horizontal smooth minichannels, *International Journal of Refrigeration* 32, 837-845.
- [20] Jong-Taek Oh, Hoo-Kyu Oh and Kwang-II Choi (2011). Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer for Evaporative Refrigerants in Various Circular Minichannels, *Heat Transfer-Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems*, Prof. Aziz Belmiloudi (Ed.), ISBN: 978-953-307-226-5, InTech, DOI: 10.5772/14904.
- [21] Tran, T.N., Chyu, M.C., Wambsgans, M. W., France, D. M., 2000, “Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: An experimental investigation and correlation development”, *Int. J. Multiphase Flow* 26;1739-1754.
- [22] Mishima, K. and Hibiki, T., 1996, “J-tube evaporation of HCFC-22 in a 9.52 mm micro-fin/smooth tube”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 39; 2559-2569.
- [23] Muller-Steinhagen, H., Heck K., 1986. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.* 20, 297-308.
- [24] Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C., 1949, “Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes”, *Chem. Eng. Prog.* 45;39-48.