

Korelasi Empiris Perpindahan Kalor Dua Fase (Air Udara) Aliran Kantung Gas dalam Pipa Horisontal Sirkular

Matheus M. Dwinanto

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang
Email: m2_dwinanto@yahoo.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan korelasi perpindahan kalor dua fase aliran kantung gas di dalam pipa horisontal sirkular polos yang mengalami proses pemanasan (tanpa pendidihan). Pengujian dilakukan pada pipa tembaga tunggal dengan ID 24 mm, panjang 1 m, dan fluks kalor divariasi antara 5968,17 W/m² sampai dengan 10503,97 W/m². Dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa koefisien perpindahan kalor dua fase dengan aliran kantung gas meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan superficial gas dan kecepatan superficial cairan. Penyimpangan perbandingan antara korelasi perpindahan kalor dengan dua fase hasil eksperimental dengan korelasi perpindahan kalor dengan dua fase yang diusulkan sekitar 34%, tetapi penyimpangan ini masih berada pada batasan nilai yang wajar untuk penelitian yang dilakukan secara eksperimental.

Kata kunci: Aliran kantung gas, dua fase, korelasi.

ABSTRACT

This research aimed at determining the heat transfer correlation of a heated non-boiling two phase flow consisting of air and water in a horizontal round pipe. The test section was a 24 mm ID cooper pipe with a length 1 m, and the heat transfer data a uniform wall heat flux boundary condition ranging from about 5968,17 to 10503,97 W/m². From this research, it can be concluded that heat transfer coefficient of two-phase flow of bubble flow is increase as increase of gas superficial velocity and liquid superficial velocity. The comparison deviation standart between heat transfer coefficient of two-phase flow experimental and heat transfer coefficient of two-phase flow correlation that proposed is 34%, but this deviation is still in limited value for experimental research.

Keywords: Plug flow, two-phase, correlation.

PENDAHULUAN

Dalam industri sering dijumpai aliran dua fase yang merupakan bagian dari aliran multi fase. Aliran dari fase yang berbeda-beda telah banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam proses-proses industri. Dalam kehidupan sehari-hari hal tersebut dapat dilihat pada aliran di saluran pembuangan, aliran darah, aliran semen dan pasir di pipa dan lain-lain [1]. Perpindahan kalor dengan dua fase aliran cair-gas banyak dijumpai dalam komponen-komponen sistem konversi energi, seperti di dalam ketel uap (*boiler*), kondensor, dan evaporator. Komponen-komponen ini merupakan komponen-komponen yang lazim digunakan pada proses industri dan instalasi pembangkit daya. Perpindahan kalor dengan dua fase yang terjadi sangat ditentukan oleh koefisien perpindahan kalor, yang dalam hal ini dipengaruhi

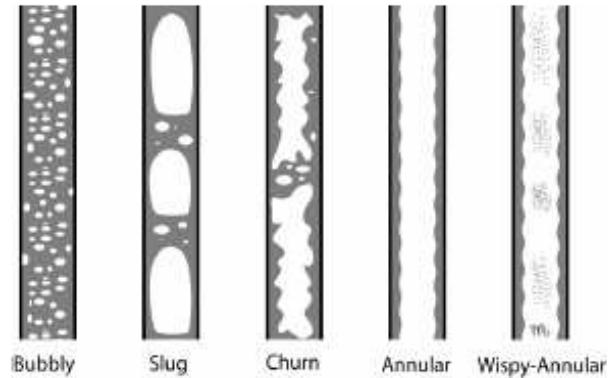
oleh hubungan kompleks antara *properties* fluida, dimensi, dan permukaan pipa serta pola aliran (*flow pattern*) dua fase. Aliran kantung gas di dalam pipa horisontal memiliki karakteristik yang berbeda dengan aliran kantung gas di dalam pipa vertikal, dimana pada pipa horisontal kantung gas cenderung untuk mengalir pada bagian atas pipa, sedangkan pada pipa vertikal kantung gas ini dapat berbentuk gelembung homogen dan gelembung non homogen, yang pada saat mengalir bersama cairan cenderung untuk bergerak lebih cepat atau bergerak lebih lambat daripada cairan (Gambar 1 dan 2). Fenomena ini mengakibatkan koefisien perpindahan kalor dengan dua fase aliran kantung gas pada pipa horisontal yang dipanaskan akan berbeda dengan koefisien perpindahan kalor dengan dua fase pada pipa vertikal, dan koefisien perpindahan kalor fase tunggal [2]. Sampai saat ini penelitian mengenai perpindahan kalor dalam aliran dua fase masih

terus dikembangkan, dengan harapan diperoleh sebuah petunjuk teknis dan desain praktis dalam merencanakan komponen-komponen sistem konversi energi [3]. Berbagai upaya untuk memprediksi koefisien perpindahan kalor dengan dua fase tanpa pendidihan dengan berbagai bentuk pola aliran telah banyak dilakukan secara analitis maupun eksperimental, namun pada aliran dua fase dengan pola aliran kantung gas belum begitu banyak literatur yang membahas. Fenomena penambahan kantung gas yang mengalir bersama-sama dengan aliran air pada kondisi dibawah temperatur didih air menarik untuk diteliti.

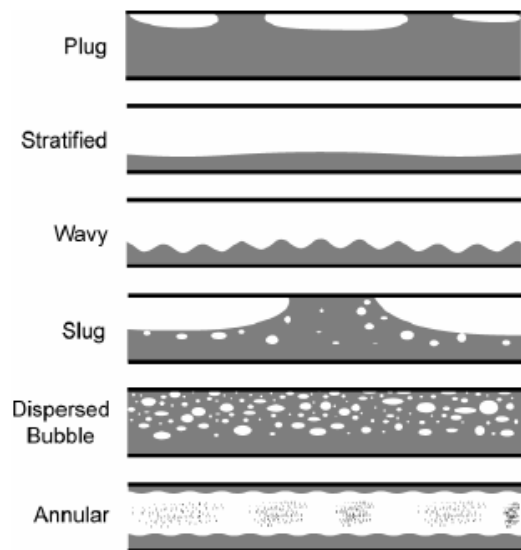
Dari penelitian sebelumnya banyak parameter dan hubungan antar parameter terkait proses perpindahan kalor dua fase. Penelitian koefisien perpindahan kalor lokal pada pipa horisontal dan pipa dengan posisi kemiringan rendah (2° , 5° , dan 7°) di bawah kondisi batas fluks kalor dinding seragam, hasilnya menunjukkan bahwa perpindahan kalor meningkat secara proporsional seiring dengan meningkatnya Re_L . Akan tetapi, secara lebih terperinci, pengamatan perpindahan kalor ini menunjukkan kecenderungan perbedaan yang bergantung pada pola aliran (*flow pattern*) dan Re_G . Pengaruh kemiringan sangat berarti terhadap perpindahan kalor dalam aliran dua fase dan perbedaan karakteristik yang bergantung pada pola aliran. Data-data menunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor meningkat hingga sekitar 90% untuk aliran sumbat likuid (*slug flow*) pada posisi kemiringan 5° dan pada jangkauan Re_L rendah. Tetapi, pengaruh kemiringan ini berkurang dengan cepat bersamaan dengan penurunan Re_L .

Berbeda dengan aliran cincin (*annular flow*) yang menunjukkan pengaruh yang kecil pada perpindahan kalor terhadap kemiringan pada sudut kemiringan rendah dan Re_L . Pada aliran cincin laju perpindahan kalor meningkat dengan peningkatan sudut kemiringan dan Re_L , bila dibandingkan dengan aliran horisontal [4]. Ghajar, meneliti koefisien perpindahan kalor dua fase tanpa pendidihan (*non-boiling*) di dalam pipa horisontal polos dengan berbagai pola aliran. Pipa yang digunakan adalah *stainless steel* dengan diameter 27,9 mm dan perbandingan $L/D = 100$. Perpindahan kalor yang diukur pada kondisi batas fluks kalor dinding seragam antara 3000 W/m^2 sampai 10600 W/m^2 , bilangan Reynolds air antara 820 sampai dengan 26000, dan bilangan Reynolds udara antara 560 sampai dengan 48000. Dari hasil penelitiannya menunjukkan adanya peningkatan koefisien perpindahan kalor yang signifikan pada awal penambahan udara, selanjutnya terjadi sedikit penurunan, dan cenderung meningkat pada angka Reynolds udara yang lebih tinggi pada berbagai bentuk pola aliran. Pada aliran *slug* koefisien perpindahan kalor rata-rata meningkat dengan

kenaikan Re_L (Re_G konstan) dan koefisien perpindahan kalor berkurang dengan kenaikan Re_G (Re_L konstan) [5]. Kemudian Kim dan Ghajar mengembangkan koefisien perpindahan kalor aliran dengan dua fase yang didasarkan pada faktor pola aliran (*flow pattern factor*), yang didasarkan pada efektifitas *wetted-perimeter relation* [6].



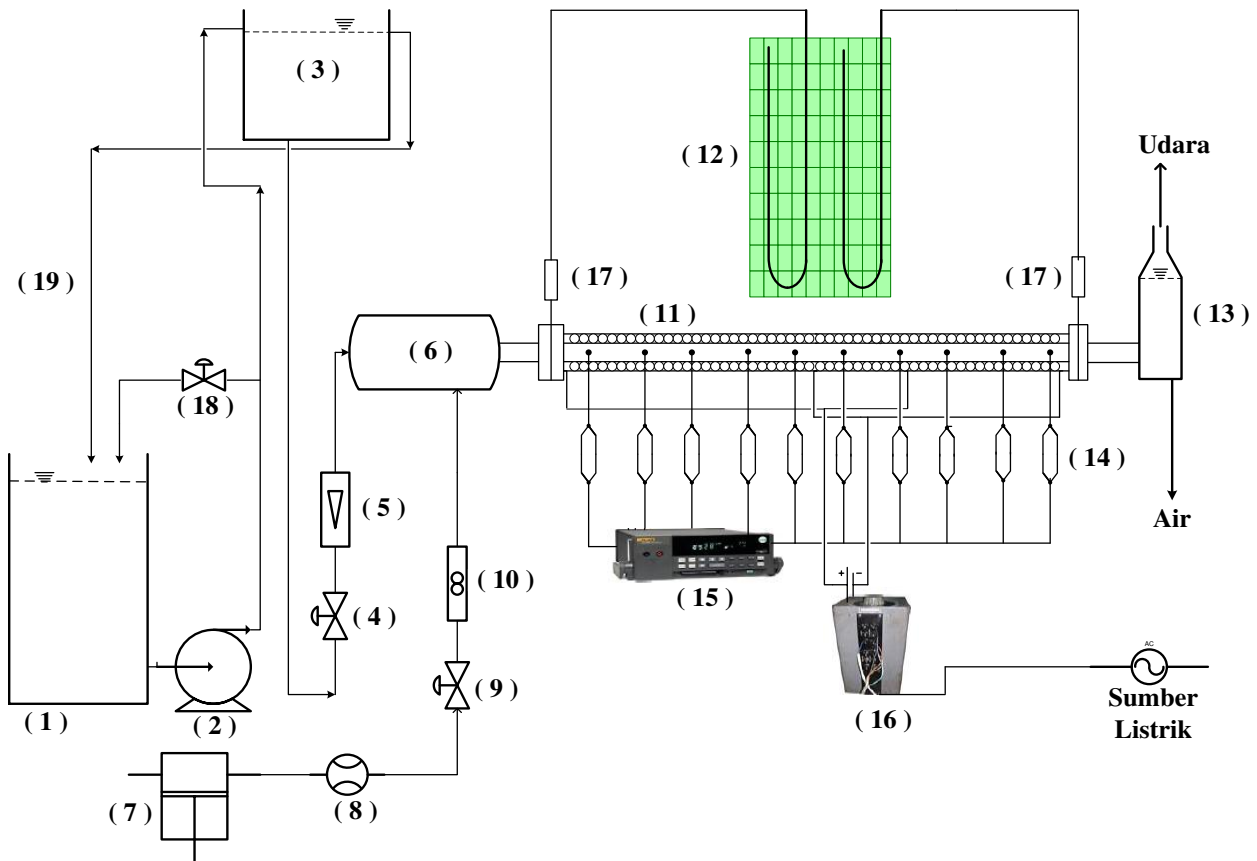
Gambar 1. Pola Aliran di Dalam Pipa Vertikal



Gambar 2. Pola Aliran di Dalam Pipa Horisontal

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental pada pipa tembaga tunggal horisontal sirkular polos berdiameter dalam 24 mm dan panjang 1 m. Diagram skematik instalasi penelitian terlihat pada Gambar 3, dan penampang longitudinal pipa uji terlihat pada Gambar 4. Parameter yang divariasikan adalah laju aliran air dan laju aliran udara sehingga membentuk aliran kantung gas. Kantung gas pada eksperimen ini sepenuhnya dihasilkan oleh pembangkit kantung gas aerator yang dipasang pada pencampur aliran (*mixer*). Untuk mengamati bentuk dan distribusi kantung gas dalam aliran pada



Gambar 3. Diagram Skematik Instalasi Penelitian

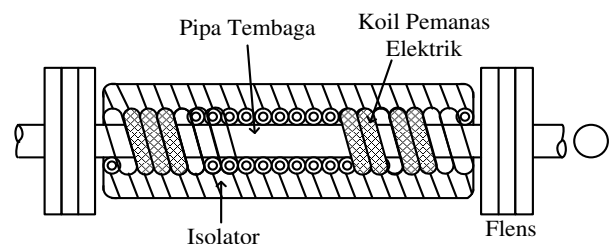
Keterangan gambar:

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 1. Tangki air bawah | 11. Pipa uji |
| 2. Pompa sentrifugal | 12. Manometer-U |
| 3. Tangki air atas | 13. Separator |
| 4. Katup pengatur aliran air | 14. Termokopel |
| 5. <i>Flowmeter</i> air | 15. <i>Digicator</i> |
| 6. Pencampur air-udara | 16. <i>Slide regulator</i> |
| 7. Kompresor | 17. Penjebak tekanan |
| 8. <i>Regulator</i> tekanan udara | 18. Katup <i>by pass</i> |
| 9. Katup pengatur aliran udara | 19. Pipa pelimpah |
| 10. <i>Flowmeter</i> udara | |

instalasi penelitian dipasang pipa transparan *acrylic* pada sisi masuk pipa uji dan pada sisi keluar pipa uji. Pipa tembaga yang digunakan sebagai seksi uji dipanaskan hanya sampai temperatur jenuh fluida, agar tidak terjadi *nucleate boiling* yang akan mengganggu aliran kantung gas yang sedang diteliti.

Laju aliran air diatur dengan menggunakan katup pengatur aliran air, sedangkan laju aliran udara dan tekanannya diatur dengan menggunakan regulator tekanan udara dan katup aliran udara. Tekanan udara yang diinjeksikan ke dalam aliran air dijaga tetap konstan sebesar 1 kg/cm^2 . Fluks kalor yang diberikan oleh pemanas listrik ke pipa uji divariasikan antara $5968,17 \text{ W/m}^2$ sampai dengan $10503,97 \text{ W/m}^2$. Pada pipa uji dipasang lima termokopel untuk mengukur temperatur dinding

pipa dan lima termokopel untuk mengukur temperatur fluida pada lima titik. Pemanas listrik yang digunakan berkekuatan maksimum 6 KW. Temperatur aliran diukur dengan dua termokopel dipasang pada sisi masuk dan sisi keluar pipa uji.



Gambar 4. Penampang Longitudinal Pipa Uji Horizontal Sirkular Polos

Untuk memeriksa bahwa peralatan beroperasi dengan benar, terlebih dahulu dilakukan percobaan aliran satu fase dengan menggunakan air untuk memeriksa kebocoran. Percobaan dilakukan dengan pertama-tama mengalirkan air ke dalam pipa percobaan dengan menggunakan pompa kemudian udara dari kompresor dialirkan ke pipa uji melalui pembangkit kantung gas. Kedua aliran tersebut diatur menggunakan katup pengatur aliran dan regulator sampai terjadi aliran kantung yang steady dalam pipa uji yang dapat dilihat pada pipa transparan pada sisi keluar, setelah itu pemanas listrik diaktifkan. Bila telah tercapai kondisi *steady state* secara keseluruhan, selanjutnya mulai dilakukan pencatatan data-data kapasitas aliran air dan udara, temperatur udara dan air masuk dan keluar pipa uji, temperatur fluida sepanjang pipa uji serta temperatur permukaan pipa uji. Temperatur dinding dijaga jangan sampai melewati batas temperatur saturasi fluida. Temperatur udara dan air masuk pipa uji dibuat tetap dan sama dengan temperatur kondisi lingkungan. Kapasitas aliran udara dan air divariasi untuk menghasilkan berbagai harga kualitas campuran air dan udara yang berbeda.

Secara eksperimental, koefisien perpindahan kalor dengan dua fase dapat ditentukan dari persamaan (1), yaitu:

$$h_{TP} = \frac{q''}{T_w - \Delta T_{ln}} \quad (1)$$

Beda temperatur logaritma fluida adalah:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_w - T_{in}) - (T_w - T_{out})}{\ln \frac{(T_w - T_{in})}{(T_w - T_{out})}} \quad (2)$$

Besarnya kalor yang dapat diserap oleh fluida diperoleh dari persamaan berikut:

$$Q = \dot{m} c_{p,TP} (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

Pembentukan Korelasi Perpindahan Kalor Dua Fase

Korelasi empiris perpindahan kalor dengan dua fase merupakan hubungan antara bilangan Nusselt dengan bilangan Reynolds, dan bilangan Prandtl. Model korelasi yang dipilih dipengaruhi oleh *properties* fluida yang digunakan, yaitu konduktifitas termal (k); viskositas dinamik (μ); kalor spesifik (c_p); massa jenis fluida (ρ); dimensi saluran (D); laju aliran massa (m). Sehingga koefisien perpindahan kalor dapat dihitung berdasarkan fungsi dari beberapa *property* fluida tersebut:

$$h = f(k, \mu, c_p, \rho, D, m) \quad (4)$$

Persamaan non dimensi yang dihasilkan melalui analisis Phi-Buckingham dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3) \quad \text{atau} \quad Nu_{TP} = f(Re_{TP}, Pr_{TP}) \quad (5)$$

Untuk menentukan korelasi koefisien perpindahan kalor dua fase (air-udara), diasumsikan sebagai perpindahan kalor konveksi paksa dalam bentuk bilangan Nusselt dua fase, yang merupakan penjumlahan dari bilangan Nusselt air dengan bilangan Nusselt udara, yang mana masing-masing bilangan Nusselt dikalikan dengan faktor pengali dua fase.

$$\begin{aligned} Nu_{TP} &= \alpha Nu_G + (1 - \alpha) Nu_L \\ &= \alpha Nu_G \left[1 + \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) \left(\frac{Nu_L}{Nu_G} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Jika persamaan (5) disubstitusikan pada persamaan (6) akan menjadi:

$$Nu_{TP} = \alpha Nu_G \left[1 + \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) \left(\frac{Re_L}{Re_G} \frac{Pr_L}{Pr_G} \right) \right] \quad (7)$$

atau dalam bentuk fungsi

$$\frac{Nu_{TP}}{\alpha Nu_G} - 1 = f \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \frac{Re_L}{Re_G} \frac{Pr_L}{Pr_G} \right) \quad (8)$$

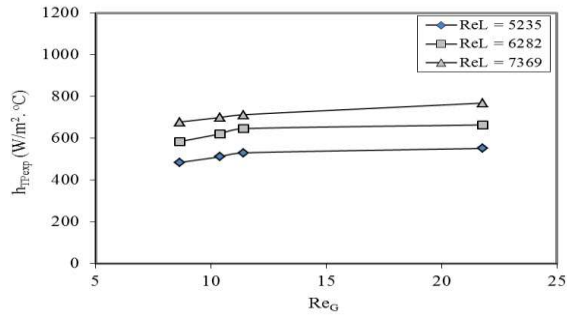
Persamaan (8) dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan eksponensial, yaitu:

$$\frac{Nu_{TP}}{\alpha Nu_G} - 1 = a \frac{1 - \alpha}{\alpha} \frac{Re_L}{Re_G} \frac{Pr_L}{Pr_G} \quad (9)$$

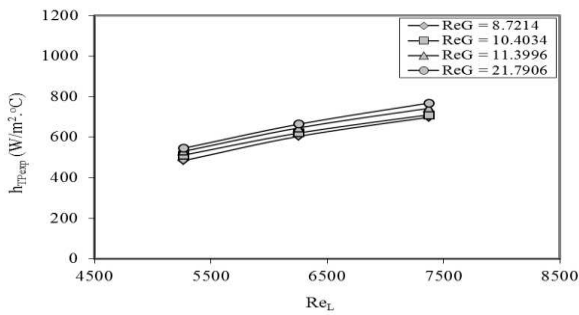
HASIL DAN ANALISA

Pada penelitian ini fluks kalor divariasi antara 5968,17 W/m² sampai dengan 10503,97 W/m². Selanjutnya hasil penelitian untuk setiap variasi fluks kalor disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara koefisien perpindahan kalor dua fase hasil eksperimen dengan bilangan Reynolds udara dan bilangan Reynolds air. Pada gambar 5 sampai dengan Gambar 8, terlihat bahwa terjadi peningkatan koefisien perpindahan kalor dua fase dengan meningkatnya bilangan Reynolds udara dan bilangan Reynolds fase air. Secara umum peningkatan koefisien perpindahan kalor dua fase aliran kantung gas terjadi secara linier, hanya pada beberapa kasus koefisien perpindahan kalor dua fase aliran kantung gas meningkat secara eksponensial pada penambahan laju aliran udara dan laju aliran air. Pada kondisi aliran kantung, kantung gas yang terbentuk berukuran kecil dan bergerak pada bagian atas pipa uji secara acak pada arah melintang penampang pipa. Gerakkan secara acak ini dapat merusak efek laminarisasi pada daerah dekat dinding pipa sehingga menyebabkan koefisien perpindahan kalor dua fase aliran kantung gas meningkat. Untuk penambahan kapasitas aliran udara yang lebih besar, gerakan kantung gas semakin cepat sehingga turbulensi semakin besar di daerah dinding pipa pada bagian atas pipa uji, dan efek laminarisasi pada daerah dekat dinding pipa uji bagian bawah tetap terbentuk, sehingga peningkatan koefisien perpindahan kalor dua fase aliran

kantung gas berkurang. Dengan meningkatnya kapasitas aliran air, gerakan kantung gas akan cenderung terseret aliran air dari pada arah melintang penampang pipa.

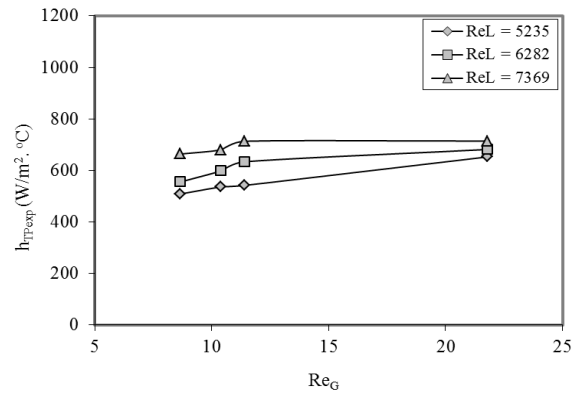


(a) $h_{TP \text{ exp}}$ vs Re_G

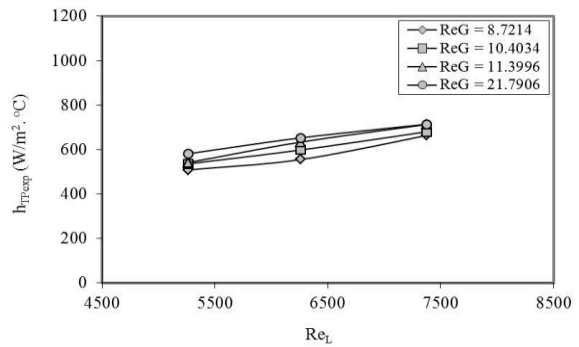


(b) $h_{TP \text{ exp}}$ vs Re_L

Gambar 5. Variasi $h_{TP \text{ exp}}$ Untuk Fluks Kalor 5968,17 W/m² pada Aliran Kantung Gas

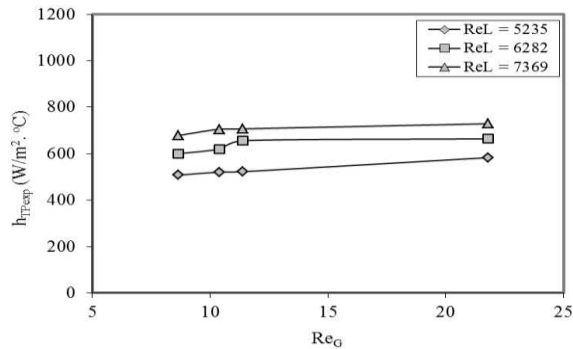


(a) $h_{TP \text{ exp}}$ vs Re_G

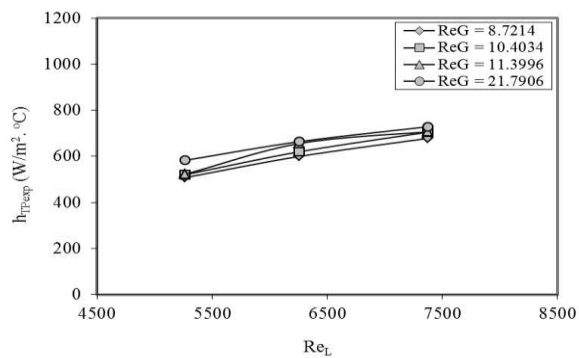


(b) $h_{TP \text{ exp}}$ vs Re_L

Gambar 7. Variasi $h_{TP \text{ exp}}$ Untuk Fluks Kalor 9045,09 W/m² pada Aliran Kantung Gas

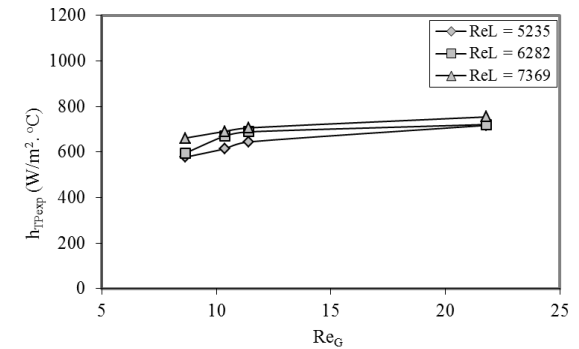


(a) $h_{TP \text{ exp}}$ vs Re_G

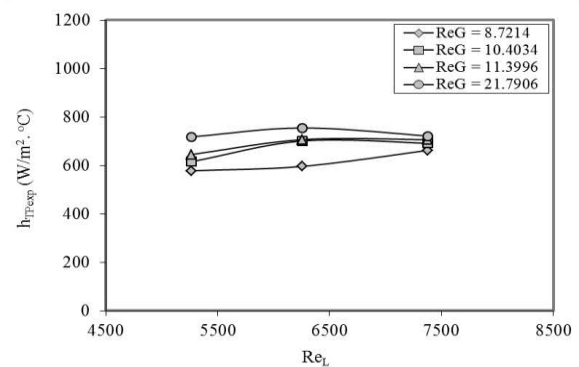


(b) $h_{TP \text{ exp}}$ vs Re_L

Gambar 6. Variasi $h_{TP \text{ exp}}$ Untuk Fluks Kalor 7294,43 W/m² pada Aliran Kantung Gas



(a) $h_{TP \text{ exp}}$ vs Re_G



(b) $h_{TP \text{ exp}}$ vs Re_L

Gambar 8. Variasi $h_{TP \text{ exp}}$ Untuk Fluks Kalor 10503,97 W/m² pada Aliran Kantung Gas

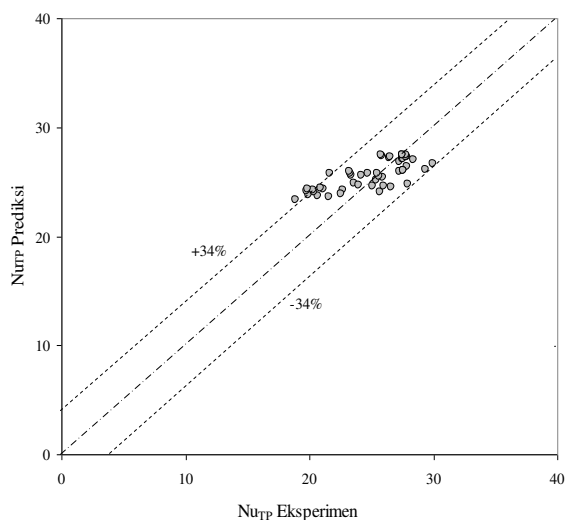
Korelasi Koefisien Perpindahan Kalor Dua Fase

Gabungan koefisien perpindahan kalor dua fase h_{TP} , diameter hidrolis D_h , dan konduktivitas kalor dua fase k_{TP} merupakan bilangan Nusselt dua fase, dan setelah melalui analisis pembentukan korelasi dimana bilangan Nusselt dua fase dinyatakan dalam hubungannya dengan bilangan Reynolds dua fase dan bilangan Prandtl dua fase, maka diperoleh korelasi untuk koefisien perpindahan kalor dua fase (air-udara) aliran kantung gas di dalam pipa horisontal sirkular polos yang dipanaskan tanpa pendidihan (*non-boiling*), sebagai berikut:

$$Nu_{TP} = \alpha Nu_G \left[1 + 5,83E + 0,5 \left\{ \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{4,36} \left(\frac{Re_L}{Re_G} \right)^{-2,86} \left(\frac{Pr_L}{Pr_G} \right)^{-0,85} \right\} \right] \quad (10)$$

Korelasi ini berlaku pada kondisi : $0,026 < \alpha < 0,068$; $1280 < Re_L < 3490$; $3,25 < Re_G < 4,77$; $3,70 < Pr_L < 5,36$; $0,64 < Pr_G < 0,73$.

Perbandingan bilangan Nusselt dua fase prediksi, yaitu korelasi yang diusulkan (persamaan 10) dengan bilangan Nusselt dua fase eksperimen terlihat memiliki standar deviasi sekitar $\pm 34\%$ dan ini ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan Nu_{TP} Eksperimen dengan Nu_{TP} Prediksi

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa koefisien perpindahan kalor konveksi paksa dengan dua fase aliran kantung gas meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran gas dan kecepatan aliran cairan. Penyimpangan perbandingan antara korelasi perpindahan kalor dua fase eksperimental dengan korelasi perpindahan kalor dua fase korelasi

yang diusulkan sekitar 34%, tetapi penyimpangan ini masih berada pada batasan nilai yang wajar untuk penelitian yang dilakukan secara eksperimental. Hal ini disebabkan karena pada kondisi aliran kantung, kantung gas yang terbentuk berukuran kecil dan bergerak pada bagian atas pipa uji pada arah melintang penampang pipa. Gerakan kantung gas ini dapat merusak efek laminarisasi pada daerah dekat dinding pipa sehingga menyebabkan koefisien perpindahan kalor dua fase meningkat.

NOMENKLATUR

ID	Diameter dalam pipa uji, mm
h_{TP}	Koefisien perpindahan kalor dua fase, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
q''	Fluks kalor, W/m^2
T_w	Temperatur dinding pipa uji, $^\circ C$
ΔT_{ln}	Beda temperatur logaritma fluida, $^\circ C$
T_{in}	Temperatur masuk pipa uji, $^\circ C$
T_{out}	Temperatur keluar pipa uji, $^\circ C$
\dot{m}	Total laju aliran massa fluida, kg/s
cp_{TP}	Kalor jenis dua fase, $kJ/kg \cdot ^\circ C$
Q	Besar kalor yang diserap oleh fluida, W
Re_L	Bilangan Reynolds air, tanpa dimensi
Re_G	Bilangan Reynolds udara, tanpa dimensi
Nu_{TP}	Bilangan Nusselt dua fase, tanpa dimensi
Nu_G	Bilangan Nusselt udara, tanpa dimensi
Nu_L	Bilangan Nusselt air, tanpa dimensi
α	Fraksi hampa, $A_g/(A_g + A_l)$, tanpa dimensi
μ	Viskositas dinamik, $kg/s \cdot m$
ρ	Massa jenis fluida, kg/m^3

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh DIPA Universitas Nusa Cendana melalui Hibah Bersaing dengan surat perjanjian No. 3083/H15/PL/2009, tanggal 27 Maret 2009. Untuk itu diucapkan terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

1. Biksono, D., *Karakteristik dan Visualisasi Aliran Dua Fasa pada Pipa Spiral*, Jurnal Teknik Mesin, Vol. 8, No. 2, ISSN 1410-9867, Oktober hal. 69–74, 2006.
2. Hestroni, G., *Handbook of Multiphase System*, McGraw-Hill Book Com, New York, 1982.
3. Koestoer, R.A., *Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis*, Cetakan Pertama, Pradnya Paramita, Jakarta, 1994.
4. Ghajar, A.J., et al., "Systematic Heat Transfer Measurement for Air-Water Two-Phase Flow in a Horizontal and Slightly Upward Inclined Pipe", *Proceeding of the 10th Brazilian Congress of*

- Thermal Sciences and Engineering–ENCIT 2004*, Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering–ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Paper CIT04 – 0471, Nov. 29– Dec. 03.
5. Ghajar, A.J., *Non-Boiling Heat Transfer in Gas–Liquid Flow in Pipes–a Tutorial*”, Presented at *ENCIT 2004-10th*, Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Vol. XXVII, No. 1, January – March 2005, page 46– 3.
 6. Kim, Jae-yong., and Ghajar, A.J., *A General Heat Transfer Correlation for Non-Boiling Gas–Liquid Flow with Different Flow Patterns in Horizontal Pipes*, International Journal of Multiphase Flow, 32, page 447– 465, 2006.