

# PENGEMBANGAN KORELASI PERPINDAHAN KALOR ALIRAN GELEMBUNG AIR-UDARA BERLAWANAN ARAH DALAM PIPA YANG DIPANASKAN

Sartono Putro

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani Kotak Pos 1 Pabelan Surakarta

[sartono\\_putro@ums.ac.id](mailto:sartono_putro@ums.ac.id)

## ABSTRAKSI

*Koefisien perpindahan kalor dua fase gas-cair merupakan penjumlahan koefisien perpindahan kalor fase gas dan fase cair berdasarkan volume masing-masing fase. Tujuan penelitian ini untuk mendapatkan korelasi empiris koefisien perpindahan kalor hasil penelitian. Penelitian dilakukan dengan mengalirkan air dari atas dan udara dari bawah dalam bentuk aliran gelembung. Seksi uji terdiri atas pipa tembaga dengan  $D_i$  24 mm panjang 800 mm dililit dengan elemen pemanas listrik sepanjang pipa. Ujung atas dan bawah pipa tembaga disambung dengan pipa transparan untuk mengetahui pola aliran yang terjadi. Untuk mengukur temperatur dinding dipasang termokopel di dinding luar pada lima titik sepanjang pipa tembaga, sedangkan temperatur fluida diukur dengan memasang termokopel pada sumbu pipa di tujuh titik sepanjang pipa tembaga. Korelasi empiris yang dibentuk pada penelitian ini adalah:*

$$Nu_{tp} = (1 - \alpha)Nu_l \left[ 1 + (4,40 \times 10^{-5}) \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)^{1,4063} \left( \frac{Re_g}{Re_l} \right)^{-4,4502} \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right)^{-0,9620} \right] \quad \text{yang}$$

*berlaku pada kondisi: kualitas gas ( $x$ ) 0,000058 sampai 0,000116, dan fraksi hampa ( $\alpha$ ) 0,0462 sampai 0,1021, serta fluks kalor listrik ( $q''$ ) 1627,189 W/m<sup>2</sup> sampai 11398,62 W/m<sup>2</sup>.*

**Kata kunci :** Perpindahan kalor, Koefisien, Dua fasa, Aliran gelembung, Berlawanan arah.

## PENDAHULUAN

Perpindahan kalor dalam media aliran gas-cair banyak dijumpai dalam komponen-komponen sistem konversi energi. Penelitian-penelitian yang berhubungan dengan koefisien perpindahan kalor dua fasa gas-cair terus dilakukan, hal ini sebagai upaya untuk memperbaiki prediksi tentang koefisien perpindahan kalor konveksi dua fasa

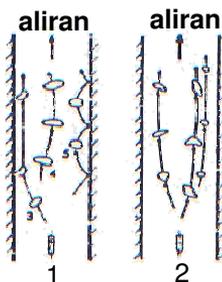
sebagai informasi penting dalam perancangan alat penukar kalor.

Informasi mengenai perpindahan kalor dua fasa, dua komponen gas-cair tanpa pendidihan juga sangat diperlukan, fenomena ini banyak diaplikasi dalam banyak industri seperti pada pengaliran minyak dan gas alam. Penelitian perpindahan kalor aliran dua fasa dengan pendidihan lebih banyak dilakukan dari pada yang tanpa pendidihan.

Guna menambah informasi tentang perpindahan kalor dua fasa dua komponen gas-cair tanpa pendidihan, fenomena penambahan gelembung yang mengalir berlawanan arah dengan air pada kondisi di bawah temperatur saturasi air menarik untuk diteliti. Adapun perumusan masalah dalam penelitian ini adalah: Bagaimanakah korelasi empiris koefisien perpindahan kalor aliran gelembung air-udara berlawanan arah?

**TINJAUAN PUSTAKA**

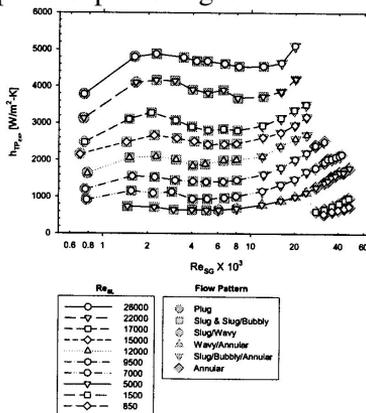
Sekoguchi *et al.* (1981), dalam penelitiannya mengenai karakteristik aliran gelembung vertikal menyatakan bahwa, terdapat dua bentuk pergerakan gelembung yaitu, *sliding bubble* dan *coring bubble*. Pada Gambar 1. ditunjukkan, gelembung yang berukuran kurang dari 5 mm akan bergerak menuju dinding kemudian *sliding* (#3), sedangkan gelembung yang ukurannya lebih besar mengalir di tengah aliran dengan gerakan spiral (#4). Bila kecepatan aliran air dikurangi, maka *sliding bubbles* akan berubah secara perlahan menjadi *hopping bubbles* (#5), perilaku ini terjadi pada daerah kecepatan air di antara -0,3 s.d. 0,3 m/s. Apabila kecepatan aliran air lebih dari 2 m/s, maka tidak ada gelembung yang *sliding* di dinding, melainkan bergerak pada jarak tertentu dari dinding (Gambar 1).



Gambar 1. Gerakan Gelembung Tunggal pada Aliran Air (Sekoguchi, 1981)

Kamal (2002), melakukan penelitian tentang koefisien perpindahan kalor aliran dua fasa dalam pipa vertikal yang dipanaskan tanpa pendidihan dengan fluida uji air-udara dalam bentuk aliran kantong. Peralatan utama untuk melakukan percobaan adalah sebuah pipa *stainless steel* diameter 12,7 mm dan panjang 1500 mm, ujung atas dan bawah pipa dipasang pipa transparan untuk mengetahui pola aliran fluida uji. Sepanjang pipa uji diberi elemen pemanas listrik yang mampu menghasilkan fluks kalor 400 kW/m<sup>2</sup>. Untuk mengukur temperatur dinding dipasang 10 termokopel sepanjang pipa uji, temperatur aliran masuk dan keluar diukur menggunakan termokopel yang dipasang masuk sampai sumbu pipa.

Ghajar (2004), melakukan penelitian perpindahan kalor aliran dua fasa gas-cair dalam pipa tanpa pendidihan, hubungan koefisien perpindahan kalor dua fasa berbagai pola aliran terhadap bilangan Reynold superfisial gas menunjukkan adanya peningkatan harga koefisien perpindahan kalor pada awal penambahan udara yang kemudian menurun dan meningkat lagi sesuai pertambahan kecepatan superfisial gas.



Gambar 2. Hubungan antara Koefisien Perpindahan Kalor Dua Fasa Berbagai Pola Aliran terhadap Bilangan Reynold Superfisial Gas (Ghajar, 2004)

## Landasan Teori

Koefisien perpindahan kalor eksperimen dihitung dari koefisien perpindahan kalor lokal masing-masing segmen. Kalor yang diserap oleh fluida dua fasa adalah,

$$q = \dot{m}_{tp} \times Cp_{tp} \times (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

dengan ( $Cp_{tp}$ ) kalor jenis gabungan yang dirumuskan Burmeister (1983), yaitu:

$$Cp_{tp} = \omega_g \times Cp_g + \omega_l \times Cp_l \quad (2)$$

dengan fraksi udara,

$$\omega_g = \frac{\rho_g}{\rho_g + \rho_l} \quad (3)$$

dan fraksi air,

$$\omega_l = \frac{\rho_l}{\rho_g + \rho_l} \quad (4)$$

Koefisien perpindahan kalor lokal dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$h_{tp} = \frac{q''}{T_w - T_b} \quad (5)$$

$T_b$  dan  $T_w$  adalah temperatur *bulk* dan *wall* fluida pada masing-masing segmen. Koefisien perpindahan kalor seluruh pipa uji merupakan hasil rata-rata dari koefisien perpindahan kalor masing-masing segmen.

Ghajar (2004), melakukan pengembangan korelasi perpindahan kalor dua fasa aliran gas-cair dalam pipa tanpa pendidihan. Koefisien perpindahan kalor dua fasa merupakan penjumlahan perpindahan kalor tiap fasa:

$$\begin{aligned} h_{tp} &= (1 - \alpha)h_l + \alpha h_g \\ &= (1 - \alpha)h_l \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \left( \frac{h_g}{h_l} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Sedangkan korelasi umum perpindahan kalor dua fasa tanpa pendidihan untuk aliran vertikal dengan Bilangan Reynold

superfisial cairan 4000 sampai 126000 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} h_{tp} &= (1 - \alpha)h_l \left[ 1 + 0,27 \left( \frac{x}{1 - x} \right)^{-0,04} \right. \\ &\quad \left. \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)^{1,21} \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right)^{0,66} \right. \\ &\quad \left. \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{-0,72} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$h_l$  diperoleh dari korelasi Sieder-Tate,

$$\begin{aligned} Nu_l &= 1,86 \left( Re_l \times Pr_l \times \frac{D}{Z} \right)^{1/3} \\ &\quad \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \end{aligned} \quad (8)$$

Fraksi hampa ( $\alpha$ ) dihitung menggunakan persamaan Chisholm, yaitu:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left( \frac{\rho_l}{\rho_m} \right)^{0,5} \left( \frac{1 - x}{x} \right) \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)} \quad (9)$$

$$\rho_m = \frac{1}{\left( \frac{1 - x}{\rho_l} \right) + \left( \frac{x}{\rho_g} \right)} \quad (10)$$

Adapun Bilangan Reynold dihitung berdasarkan kecepatan aktual fluida sebagai berikut.

$$Re_l = \frac{\rho_l \times V_l \times D}{\mu_l} \quad (11)$$

$$Re_g = \frac{\rho_g \times V_g \times D}{\mu_g} \quad (12)$$

$$V_l = \frac{\dot{m}(1 - x)}{\rho_l(1 - \alpha)A} \quad (13)$$

$$V_g = \frac{\dot{m} \times x}{\rho_g \times \alpha \times A} \quad (14)$$

Koefisien perpindahan kalor konveksi paksa sangat dipengaruhi oleh hubungan kompleks antara properties fluida dan dimensi serta permukaan pipa. Faktor-faktor yang berpengaruh tersebut adalah:

- a. konduktivitas termal ( $k$ ),
- b. viskositas dinamis ( $\mu$ ),
- c. kalor spesifik ( $Cp$ )
- d. massa jenis fluida ( $\rho$ )
- e. dimensi saluran ( $D$ ) dan
- f. laju aliran massa ( $\dot{m}$ ).

Sehingga koefisien perpindahan kalor dihitung berdasarkan fungsi dari faktor-faktor yang berpengaruh:

$$h = f(k, \mu, Cp, \rho, D, \dot{m}) \quad (15)$$

Menggunakan teori Phi-Buckingham, persamaan 19 ini dapat diungkapkan dalam bentuk persamaan non dimensial sebagai berikut.

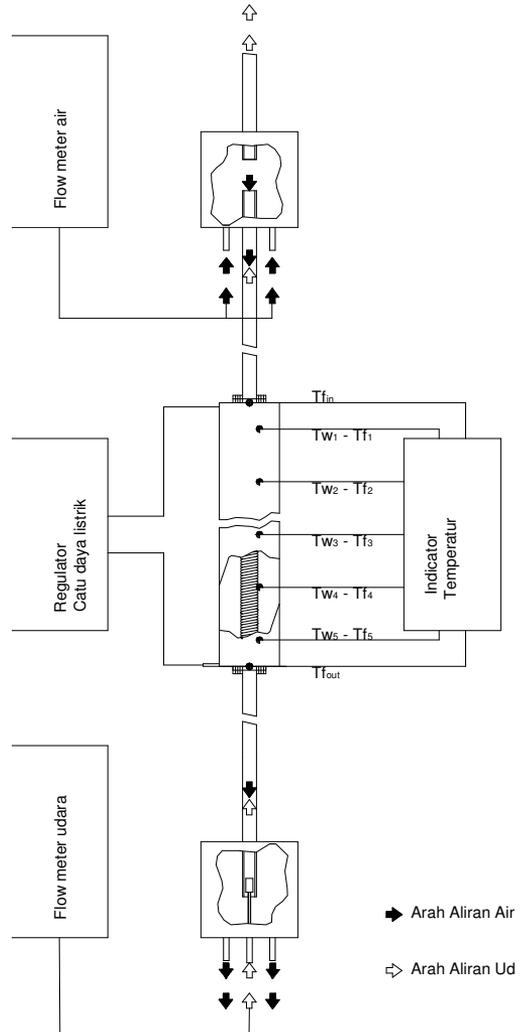
$$Nu = f(Re, Pr) \quad (16)$$

### METODE PENELITIAN

Bahan yang dipergunakan untuk penelitian ini adalah air dari bak penampung dan udara yang dihasilkan dari kompresor. Adapun peralatan yang dipergunakan terdiri atas sebagai berikut.

1. *Flow meter* udara N102-5 dengan bola shapir.
2. *Air regulator* SMC tipe AR 210.
3. *Flow meter* air OMEGA tipe FL-1504A.
4. Pompa air *sentrifugal* PANASONIC.
5. Kompresor udara WIPRO MM.ECM.JCK
6. *Termometer digital* OMEGA HH82.
7. *Multipoint selektor* OMEGA 405A.

8. *Voltage Regulator* MATSUNAGA MFG.CO.LTD. 25 A.
9. *Ampere meter* SANWA DCM-2L
10. *Volt meter* SANWA CD-700C



**Gambar 3. Skema Instalasi Eksperimen**

Prosedur pengambilan data ditempuh dengan cara sebagai berikut.

1. Pastikan isi tangki air penuh.
2. Hidupkan pompa air dan kompresor.
3. Atur aliran air menggunakan katup masuk dan katup keluar sesuai variabel

debit aliran dengan mengamati skala *flow meter* air.

4. Atur aliran udara dengan mengatur katup masuk dan mengamati pola aliran sampai terjadi pola aliran gelembung yang konstan.
5. Hidupkan pemanas listrik dan atur tegangan yang digunakan dengan mengatur *potensiometer voltage regulator*.
6. Tunggu sampai pada kondisi konstan, yaitu pola aliran gelembung pada pipa transparan bawah dan atas seragam, dan temperatur yang ditunjukkan oleh kontrol temperatur menunjukkan harga yang konstan.
7. Ukur debit air dan debit udara pada skala *flow meter*, catat temperatur air masuk dan keluar, serta catat temperatur dinding dan temperatur fluida dengan mengubah *switch multipoint selektor* masing-masing temperatur.
8. Pengolahan data diawali dengan menghitung kalor yang diserap fluida dua fasa menggunakan persamaan (1), dan menghitung koefisien perpindahan kalor dua fasa menggunakan persamaan (5). Selanjutnya pengolahan data dilakukan dalam bentuk persamaan (16) untuk mendapatkan korelasi hasil penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Koefisien perpindahan kalor dua fasa diamati pada pemanasan dengan fluks kalor 1627,189 W/m<sup>2</sup> sampai 11398,62 W/m<sup>2</sup>. Pembatasan fluks kalor berdasarkan temperatur dinding dan jenis pola aliran gelembung yang dihasilkan. Temperatur dinding pada penelitian ini hanya sampai 60 °C, hal ini dilakukan karena pada temperatur dinding lebih dari 60 °C sudah terjadi pola aliran transisi, aliran

gelembung menjadi berkelompok dan akan membentuk aliran kantung. .

Koefisien perpindahan kalor total dua fasa dua komponen air-udara diasumsikan sebagai penjumlahan koefisien perpindahan kalor satu fasa air dan satu fasa udara berdasarkan volume masing-masing fasa. Dalam bentuk Bilangan Nuselt, persamaan 6 dapat dikembangkan menjadi:

$$Nu_{tp} = (1 - \alpha)Nu_l + \alpha Nu_g$$

$$= (1 - \alpha)Nu_l \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \left( \frac{Nu_g}{Nu_l} \right) \right] \quad (17)$$

$$Nu_{tp} = \frac{h_p \times D}{k_p} \quad (18)$$

Konduktifitas termal dua fasa ( $k_p$ ), dirumuskan Burmiester (1983) sebagai berikut.

$$k_p = k_g \times y_g + k_l \times y_l - 0,72 \times |k_l - k_g| \times y_g \times y_l \quad (19)$$

fraksi berat udara,

$$y_g = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_l} \quad (20)$$

fraksi berat air,

$$y_l = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g + \dot{m}_l} \quad (21)$$

Persamaan non dimensional pada persamaan 16, bila disubstitusikan ke dalam persamaan 17 menjadi:

$$Nu_{tp} = (1 - \alpha)Nu_l \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \left( \frac{(Re_g, Pr_g)}{(Re_l, Re_l)} \right) \right] \quad (22)$$

dalam bentuk fungsi menjadi:

$$\frac{Nu_{tp}}{(1-\alpha)Nu_l} - 1 = f \left[ \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \left( \frac{Re_g}{Re_l} \right) \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right) \right] \quad (23)$$

dibentuk ke dalam persamaan eksponensial:

$$\frac{Nu_{tp}}{(1-\alpha)Nu_l} - 1 = a \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^b \left( \frac{Re_g}{Re_l} \right)^c \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right)^d \quad (24)$$

Selanjutnya dibentuk dalam persamaan logaritma:

$$\log \left( \frac{Nu_{tp}}{(1-\alpha)Nu_l} - 1 \right) = \log a + b \log \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right) + c \log \left( \frac{Re_g}{Re_l} \right) + d \log \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right) \quad (25)$$

Persamaan 29 merupakan persamaan linier yang sama dengan persamaan:

$$Y = b_0 + b_1 s_1 + b_2 s_2 + b_3 s_3 \quad (26)$$

dengan,

$$Y = \log \left( \frac{Nu_{tp}}{(1-\alpha)Nu_l} - 1 \right)$$

$$b_0 = \log a$$

$$b_1 = b$$

$$s_1 = \log \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right)$$

$$b_2 = c$$

$$s_2 = \log \left( \frac{Re_g}{Re_l} \right)$$

$$b_3 = d$$

$$s_2 = \log \left( \frac{Re_g}{Re_l} \right)$$

$$b_3 = d$$

$$s_3 = \log \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right)$$

Menggunakan regresi linier jamak dapat dibentuk menjadi:

$$\begin{vmatrix} n & \sum s_1 & \sum s_2 & \sum s_3 \\ \sum s_1 & \sum s_1 s_1 & \sum s_2 s_1 & \sum s_3 s_1 \\ \sum s_2 & \sum s_1 s_2 & \sum s_2 s_2 & \sum s_3 s_2 \\ \sum s_3 & \sum s_1 s_3 & \sum s_2 s_3 & \sum s_3 s_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum Y \\ \sum Y s_1 \\ \sum Y s_2 \\ \sum Y s_3 \end{vmatrix} \quad (27)$$

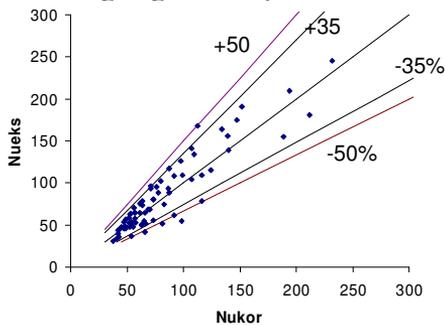
Persamaan 27 diselesaikan menggunakan metode eliminasi Gaus untuk mendapatkan nilai  $b_0, b_1, b_2, b_3$  yang ekuivalen dengan koefisien  $a, b, c,$  dan  $d$ . Adapun hasil korelasi empiris yang didapatkan adalah:

$$Nu_{tp} = (1-\alpha)Nu_l \left[ 1 + (4,40 \times 10^{-5}) \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^{1,4063} \left( \frac{Re_g}{Re_l} \right)^{-4,4502} \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right)^{-0,9620} \right] \quad (28)$$

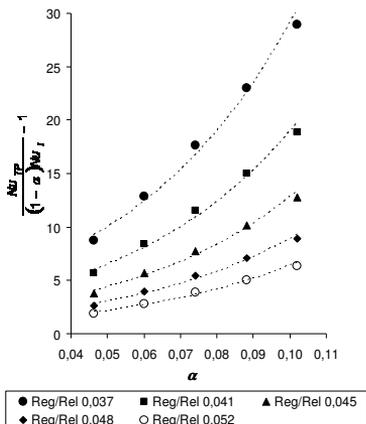
Korelasi empiris yang dibentuk memberikan prediksi harga koefisien perpindahan kalor dua fasa aliran vertikal air-udara berlawanan arah dengan deviasi  $\pm 35 \%$  sebanyak 90,3 % dari data eksperimen, yaitu 65 titik data dari seluruh titik data 72 buah. Hubungan koefisien perpindahan kalor dua fasa hasil eksperimen dan hasil perhitungan

menggunakan korelasi empiris yang dibentuk diberikan pada Gambar 4.

Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai perbandingan koefisien perpindahan kalor dalam bentuk Bilangan Nusselt dua fasa terhadap satu fasa cair meningkat dengan meningkatnya fraksi hampa ( $\alpha$ ). Adapun nilai koefisien perpindahan kalor terbesar didapatkan pada perbandingan  $Re_g/Re_l$  terendah. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa berdasarkan penelitian Sekoguchi (1981), gerakan gelembung yang berukuran kurang dari 5 mm akan bergerak menuju dinding kemudian *sliding*, sedangkan gelembung yang ukurannya lebih besar mengalir di tengah aliran dengan gerakan spiral.



Gambar 4. Hubungan antara Koef. Perpindahan Kalor Dua Fasa Eksperimen dengan Hasil Korelasi Empiris yang Dibentuk



Gambar 5. Implementasi Korelasi yang didapatkan

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Korelasi empiris yang dihasilkan pada penelitian ini adalah:

$$Nu_{tp} = (1 - \alpha)Nu_l \left[ 1 + (4,40 \times 10^{-5}) \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)^{1,4063} \left( \frac{Re_g}{Re_l} \right)^{-4,4502} \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right)^{-0,9620} \right]$$

yang berlaku pada

kondisi: kualitas uap ( $x$ ) 0,000058 sampai 0,000116, dan fraksi hampa ( $\alpha$ ) 0,0462 sampai 0,1021, serta fluks kalor listrik ( $q''$ ) 1627,189 W/m<sup>2</sup> sampai 11398,62 W/m<sup>2</sup>.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian, pembahasan dan kesimpulan yang diperoleh, ada beberapa hal yang dapat disarankan untuk penelitian serupa di masa datang sebagai berikut.

1. Ketelitian pembacaan alat ukur agar lebih ditingkatkan utamanya dalam pengukuran temperatur. Perangkat pengukuran dengan metode akuisisi data sangat diperlukan karena mampu mengukur beberapa titik dalam waktu yang bersamaan. Dengan metode akuisisi dimungkinkan untuk melakukan pengukuran pada titik yang lebih banyak dengan ketelitian yang lebih baik, pengukuran temperatur dinding untuk tiap segmen akan lebih akurat bila dilakukan pada beberapa titik secara keliling.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai fenomena lapis batas temperatur fluida yang menempel pada dinding. mengingat air yang temperaturnya lebih tinggi akan cenderung mengalir ke atas sementara

ada gelembung udara yang memiliki arah aliran yang sama. Hal ini dasarankan mengingat temperatur

dinding yang dihasilkan tidak meningkat searah aliran air yang ke bawah.

### DAFTAR PUSTAKA

- Burmeister, L.C., 1983, *Convective Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- Ghajar, A.J., 2004, Systematic Heat Transfer Measurements For Air-Water Two-Phase Flow In A Horizontal And Slightly Upward Inclined Pipe, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering-ENCIT 2004 Braz. Soc. Of Mechanical Sciences and Engineering-ABCM*, Rio de Janeiro Nov. 29-Dec. 03, 2004.
- Ghajar, A.J., 2004, *Two-Phase Heat Transfer In Gas-Liquid Non-Boiling Pipe Flows, HEFA 2004 3<sup>rd</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 21-24 June 2004*, Cape Town.
- Kamal, S. 2000, Studi Eksperimental Koefisien Perpindahan Kalor Aliran Dua Fasa pada Pipa Vertikal dalam Bentuk Aliran Kantung (Slug Flow) Menggunakan Aliran Udara-Air, *Teknosains*, 16B(1), 97-109. UGM, Yogyakarta.
- Sekoguchi, K., Fukui, H., and Sato, Y., 1981, *Flow Characteristics And Heat Transfer In Vertical Bubble Flow*, ed. Bergles, A.E., and Ishigai, S., *Two-Phase Flow Dynamics*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.