

Heat Transfer Characteristics in Vertical Countercurrent Annular Two Phase Flow

Mahmuddin¹⁾, Samsul Kamal²⁾, Indarto³⁾, Purnomo⁴⁾

¹⁾ Mahasiswa Sekolah Pascasarjana Prodi Teknik Mesin dan Industri UGM
Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UMI Makassar
^{2,3,4)} Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik UGM
Jl. Grafika No.2 Yogyakarta 55281. Fax. (0274) 902180, 521673

Abstract

Heat transfer coefficient two phase in annular countercurrent flow in vertical pipe. Film flow obtained at conducting water through porous media and air flow through nozzle at bottom pipe. Heat flux at surface pipe conducted by girding heater element (Nikelin) at test pipe. Measure thickness film with conductimetric method. Two electrodes made from platinum material with 1 mm diameter were stacked to non-conductor pipe installed at a distance of 10 mm approximately. Results of measurement indicate at air velocity 2.627-3.3.2502 m/s film flow look to stabilize and convection heat transfer coefficient (h) trends constant. With increasing air flow velocity from 2.835-3.112m/s, surface of film flow will be waves, film thickness can increasing and turbulent effect at surface film of effected heat transfer. Interaction between water and air are effects of height air velocity will instability of film resulting to flooding. When transition countercurrent flow to co-current flow, difference temperature wall with water (ΔT) decrease 4.41°C, and heat transfer coefficient increasing 3190.63 W/m².°C and film thickness 0.97mm. But, when co-current water flow with gas flow (flooding) film thickness 0.10mm and difference temperature (ΔT) increase until 8.41°C and mean heat transfer coefficients (h_{-r}) suddenly decrease 1370.86 W/m².°C.

Keywords : Heat transfer coefficient, Void fraction, Countercurrent flow.

Pendahuluan

Perpindahan panas dua fase banyak dijumpai dalam industri seperti instalasi tenaga nuklir, penukar kalor, evaporator, dan siklus pendingin. Penggunaan *compact heat exchangers* terus dikembangkan terutama untuk aplikasi kondensor reflux pipa vertikal. Pada kondensor ini uap dan air kondensat mengalir berlawanan arah (*counter-current flow*), uap ke atas dan air kebawah. Pada proses industri dengan menggunakan kondensor *refluks* pipa vertikal, uap dan cairan kondensat mengalir berlawanan arah, Laju aliran uap tidak diizinkan melampaui laju aliran kritis yang menyebabkan terjadinya *flooding*, yaitu sebagian air kondensat akan terbawa ke atas.

Dalam dunia industri fenomena *flooding* merupakan bata aliran berlawanan arah. Kondisi ini dapat dijadikan faktor yang membatasi operasi suatu kondensor reflux pipa vertikal. Selain itu *flooding* dapat mengakibatkan kerusakan dan menurunkan kinerja sistem. Oleh karena itu prinsip-prinsip keselamatan pada PWR PLTN perlu dipelajari mencegah kecelakaan yang lebih membahayakan. *Loss of Coolant Accident (LOCA)*, salah satu jenis kecelakaan pada PLTN yang disebabkan karena gagalnya pendinginan atau kehilangan pendinginan pada inti reaktor. Bila hal ini tidak bisa dihindari, maka terjadi pemanasan lebih pada inti reaktor yang mengakibatkan temperatur tidak terkendali, sehingga mengakibatkan ledakan atau pelelehan material. Pemanasan lebih pada permukaan, dapat terjadi bila sebagian cairan mengalir ke atas searah dengan aliran gas yang mengakibatkan menipisnya tebal film, yang mengakibatkan naiknya temperatur permukaan dinding. Fenomena ini dinamakan *flooding* Dalam penelitian ini ditampilkan distribusi temperatur, dan koefisien perpindahan kalor dalam bentuk grafik. Sebagai studi awal, dalam kajian ini perubahan laju aliran air dan gas akan ditinjau pada batas *flooding*. Dengan demikian perpindahan kalor dan aliran dua fase perlu dikaji lebih mendalam khususnya karakteristik aliran cairan pendingin dan laju aliran gas yang menyebabkan gagalnya pendinginan. Salah satu komponen reaktor tersebut adalah teras reaktor, dimana panas dihasilkan dari reaksi fisi. Panas tersebut diambil oleh pendingin utama, untuk mendidihkan air dalam rangka menghasilkan uap yang akan memutar turbin. Pemanfaatan energi

nuklir tidak dapat dipisahkan dari sistem pencegahan dan keselamatan operasional. Diantaranya dengan mengetahui karakteristik cairan pendingin, temperatur air pendingin dan permukaan dinding didalam inti reaktor nuklir maupun pada pipa *hot leg* yang bisa menyebabkan terjadi kecelakaan akibat gagalnya pendinginan.

Tujuan

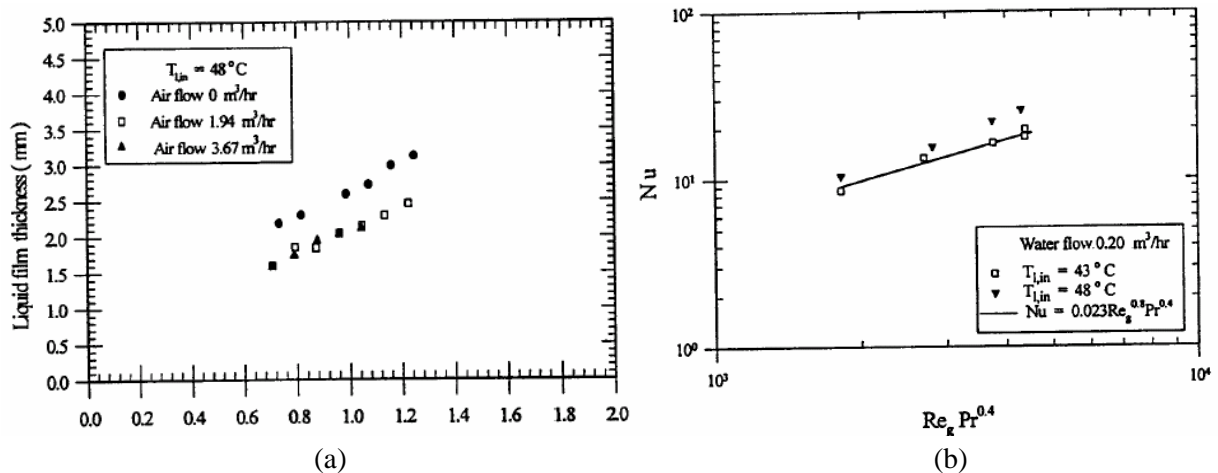
Mengetahui karakteristik perpindahan kalor aliran dua fase berlawanan arah, yang meliputi temperatur permukaan dinding (T_S) dan film cairan (T_F), koefisien perpindahan kalor (h).

Manfaat

Hasil penelitian ini dapat memberikan informasi kepada dunia industri tentang laju aliran gas dan cairan yang dapat menyebabkan terjadinya *flooding*, sehingga dapat terdeteksi lebih awal akan terjadinya kecelakaan.

Tinjauan pustaka

Seorang pelukis Perancis, Leonardo da Vinci pertama membuat meriam l'architonnerre dengan memanfaatkan energi uap, bersama dengan Heron Alexander dinobatkan sebagai penemu aliran dua fase, dan kemudian dikembangkan oleh para peneliti dibidang ini. Somchai Wongwises dan Paisan Naphon (2000) telah melakukan penelitian tentang perpindahan panas dan karakteristik aliran di dalam pipa vertikal menunjukkan bahwa dengan laju peningkatan film cairan akan meningkatkan tebal film (Gbr.1a). Pada laju udara $0 \text{ m}^3/\text{jam}$ dengan peningkatan laju aliran film, tebal film lebih besar bila dibandingkan dengan laju udara yang lebih besar ($m=1.94\text{--}3.67\text{m}^3/\text{jam}$). Sedangkan pada laju aliran $1.94\text{m}^3/\text{jam}$ dan $3.67\text{m}^3/\text{jam}$ tebal film cenderung sama atau berimpit dengan peningkatan laju aliran film.



Gambar 1. Tebal film dan laju aliran massa dengan berbagai aliran udara

Gambar 1b menampilkan korelasi antara angka Nusselt (Nu) dengan bilangan Reynolds (Re) dan Prandelt (Pr) dengan laju aliran air $0.20 \text{ m}^3/\text{jam}$. Menunjukkan bahwa angka Nu semakin besar dengan kenaikan angka Reynolds gas dan Pe ($Re_g.Pr^{0.4}$).

Landasar teori

Perpindahan panas dari dinding pada ke fluida dalam aliran turbulen, dapat menggambar profil suhu secara sederehana. Di dekat dinding, panas hanya dapat mengalir dengan cara konduksi karena partikel-partikel fluida tidak bergerak terhadap batas. Karena adanya penurunan suhu yang besar dalam lapisan cairan, maka fluida jauh di dinding, gerakan fluida membantu dalam angkutan energi itu dan gradien suhu akan turun drastis, dan akhirnya cenderung konstan. Bila fluks kalor ke film cairan diperoleh bila besarnya kalor yang diserap oleh cairan diketahui dengan persamaan (1).

$$q = m.c.p.(T_{out} - T_{in}) \tag{1}$$

Pada bidang antara pada $y=0$ panas mengalir hanya dengan cara konduksi, maka laju aliran panas konduksi sebagai berikut.

$$q \text{ permukaan ke fluida} = q = -k_f A \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \tag{2}$$

Persamaan (2) dengan gradien suhu pada dinding dengan mempersamakan laju aliran panas konveksi dengan beda temperatur ($T_S - T_F$) maka diperoleh persamaan berikut.

$$q_{\text{-permukaan- fluida}} = -k A \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h_{con} A (T_S - T_F) \tag{3}$$

Besarnya gradien suhu dalam fluida akan sama berapun suhu acuannya, maka dapat dituliskan bahwa $\partial T = (T_S - T)$. Dengan memasukkan suatu dimensi panjang sistem L untuk menunjukkan geometri benda dari mana panas mengalir, maka persamaan (4) dalam bentuk tak berdimensi seperti berikut.

$$\frac{h L}{k} = \frac{-\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{(T_S - T_F)} = \frac{\partial \left(\frac{T_S - T}{T_S - T_F} \right)}{\partial \left[\frac{y}{L} \right]} \Bigg|_{y=0} \tag{4}$$

Koefisien perpindahan kalor rata-rata secara umum dapat dihitung dengan persamaan (5)

$$h_r = \frac{1}{N} \sum_i \left[\frac{\frac{1}{M} \sum_i q_{i,j}''}{\frac{1}{M} \sum_i (T_S)_{i,j} - (T_F)_{i,j}} \right] \tag{5}$$

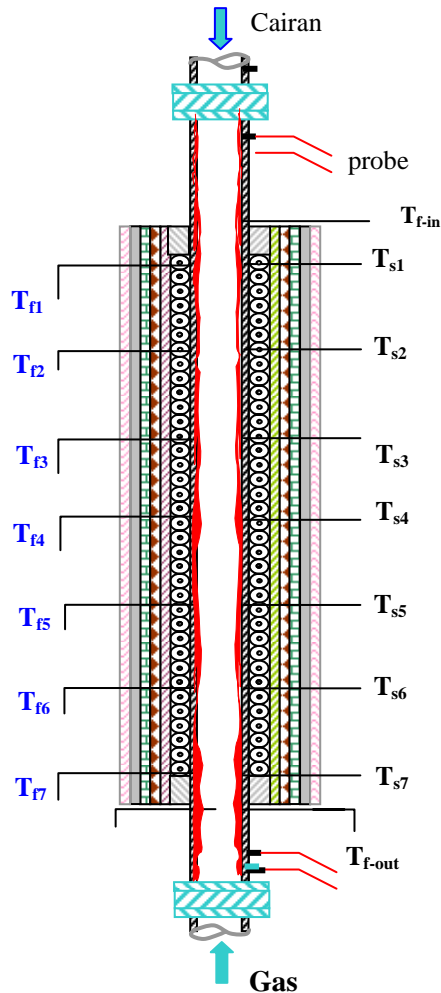
Methodologi penelitian

Pipa uji seperti Gambar 2 yaitu pipa tembaga dengan diameter 32mm, dilengkapi dengan termokopel yang dipasang sepanjang pipa ini. Masing-masing termokopel (tipe K, cromel-alumel) dihubungkan dengan termometer digital, sehingga temperatur dinding dan cairan dapat diketahui. Untuk mendapatkan aliran berlawanan arah, maka cairan diinjeksikan melewati media berpori dan mengalir ke bawah dalam bentuk lapisan film menempel pada permukaan dalam pipa uji. Sedangkan gas diinjeksikan ke atas secara aksial.

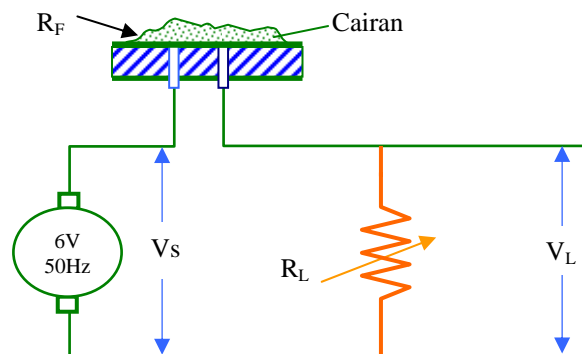
Pengukuran debit gas dan cairan dengan menggunakan *flowmeter*. Fluks kalor diperoleh dengan melilitkan elemen pemanas (kawat nikelin) pada pipa uji dan diisolasi untuk mengurangi panas keluar ke lingkungan. Debit gas dinaikkan sedikit demi sedikit sampai *flooding* terjadi. *Flooding* dapat dideteksi bila cairan yang terdorong melewati injektor dan mengalir melalui pipa pembuangan pada separator.

Pengukuran tebal film dengan metode konduktimetri. Probe dipasang bagian atas dan bawah pipa uji yang dihubungkan multipoint selektor tegangan. Tegangan yang terukur merupakan fungsi tebal film. Tegangan keluaran V_L dapat diperoleh dari persamaan untuk V_S dan R_L tetap konstan dan jika R_{FL}/R_L dibuat cukup besar untuk mendeteksi perubahan tegangan terhadap perubahan tahanan film cairan. Syarat keluaran V_L adalah berbanding lurus dengan ketebalan film cairan, sehingga tahanan R_L yang dipilih dapat memberikan hubungan linear terhadap ketebalan film dengan tegangan keluaran. Metode konduktansi ini cukup sederhana, tidak mengganggu aliran film dan juga dapat memperoleh informasi tentang variasi ketebalan film dalam selang waktu sangat singkat (Kamal. S, 1992). R_{FL} adalah tahanan film cairan yang berada dekat probe. Tahanan R_{FL} ini bervariasi dengan ketebalan film cairan. R_L adalah variabel tahanan eksternal yang ditempatkan secara seri dengan R_{FL} , sehingga arus yang melewati tahanan R_L sama dengan R_{FL} . V_S adalah tegangan arus bolak balik sebesar 6 volt dengan frekwensi 50Hz. Tegangan V_S arus bolak balik digunakan untuk menghindari efek polarisasi. V_L , suatu tegangan yang terukur antara titik A-B dengan tahanan R_L itu.

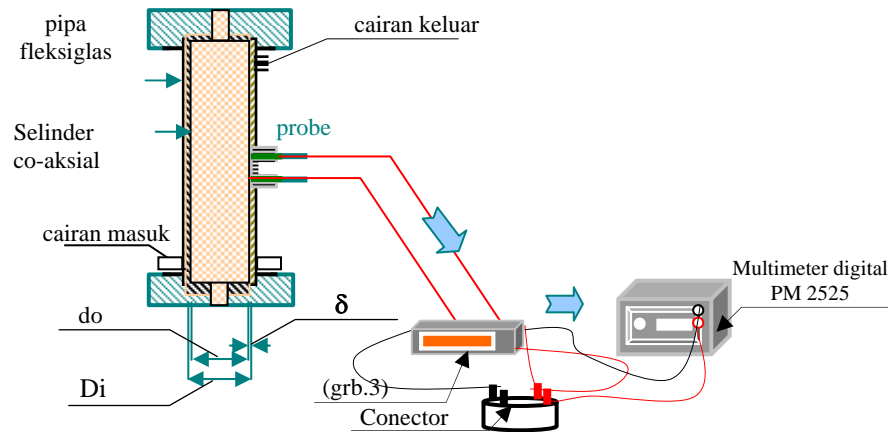
Alat ukur tebal film dikalibrasi terhadap tebal cairan film yang terdapat diantara dua silinder *co-axial* dan variasi ketebalan film diperoleh dengan mengganti diameter silinder dalam dengan diameter berbeda (Indarto, 1992). Gambar 4 menunjukkan susunan silinder dan probe konduktimetri untuk kalibrasi. Perubahan tebal film dapat diketahui dengan menggunakan $\delta=(D_i-d_o)/2$.



Gambar 2. Skema pipa uji



Gambar 3. Rangkaian listrik pengukuran tebal film

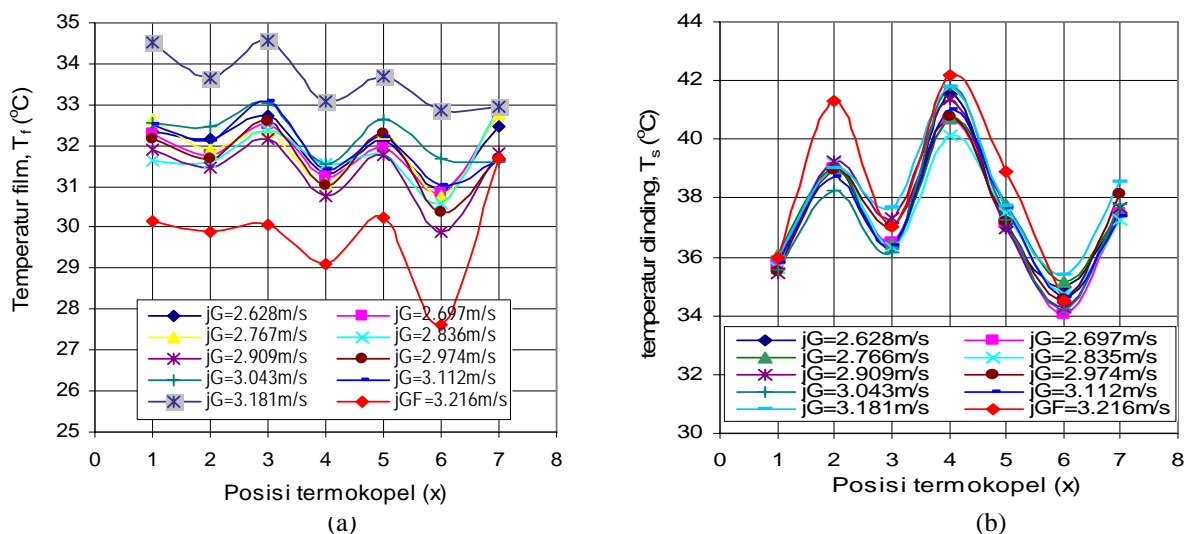


Gambar 4. Skema kalibrasi alat ukur tebal film (Mahmuddin, 2006)

Metode ini telah dipelajari oleh Hewitt (1978), bahwa ada suatu ketebalan film tertentu dengan tahanan film cairan R_{FL} yang dapat memberi isyarat tegangan keluaran V_L tidak berubah. Gejala ini adalah kemampuan alat untuk membedakan perubahan tahanan R_{FL} dengan peningkatan ketebalan film. Faktor geometri pengukuran L/d_p , jika L sebagai jarak antara dua probe dan d_p adalah diameter probe.

Hasil dan pembahasan

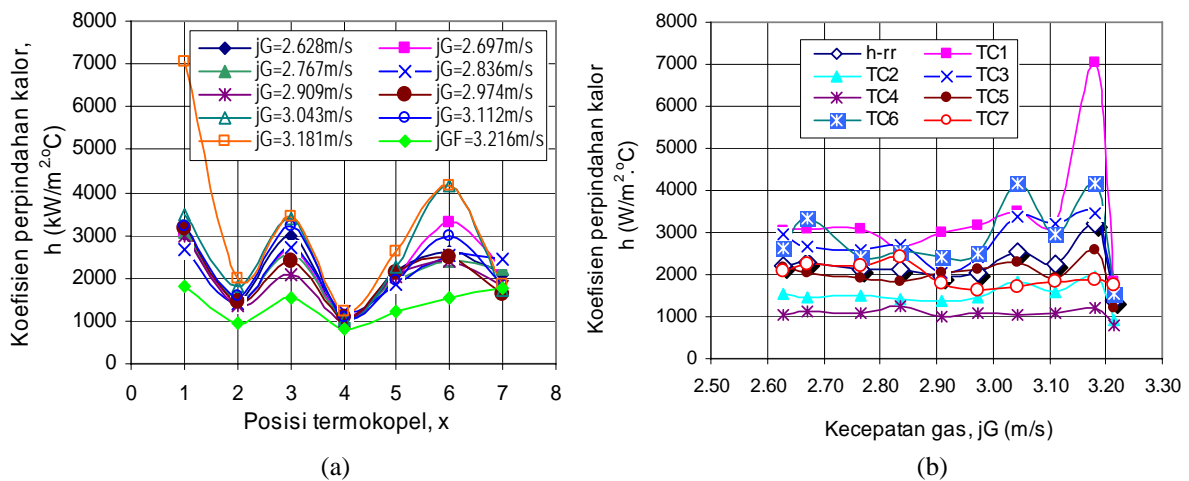
Hasil pengukuran temperatur permukaan dinding dan film cairan dituangkan dalam Gambar 5. Temperatur film cairan berfluktuasi pada setiap titik pengukuran dengan peningkatan kecepatan gas (Gbr.5a). Pada kecepatan gas 2.628m/s temperatur permukaan cairan film (T_F) rata-rata lebih tinggi dibandingkan dengan T_F pada kecepatan gas dari 2.767m/s - 2.836m/s . Pada kecepatan gas dari 2.947m/s - 3.112m/s temperatur cairan film meningkat namun tidak signifikan. Hal ini disebabkan karena permukaan cairan mulai bergelombang dan ketebalan film akan meningkat. Bila peningkatan kecepatan gas sampai 3.181m/s , temperatur cairan naik secara drastis sampai 33.61°C , kenaikan temperatur ini karena tebal film mendekati kritis. Saat sebagian cairan bergerak ke atas searah dengan aliran gas terjadi pada kecepatan gas 3.216m/s . Pada kondisi ini, temperatur cairan turun secara drastis sampai 29.82°C , fenomena ini dinamakan *flooding*. Sedangkan pada Gambar 5b, menunjukkan bahwa temperatur rata-rata permukaan dinding 37.37°C terhadap peningkatan kecepatan gas, tetapi berfluktuasi pada sepanjang pipa. Pada kecepatan gas saat *flooding*, temperatur rata-rata permukaan sepanjang pipa naik menjadi 38.23°C , kenaikan ini terjadi karena tebal film menipis dan mengakibatkan perpindahan kalor tidak efektif.



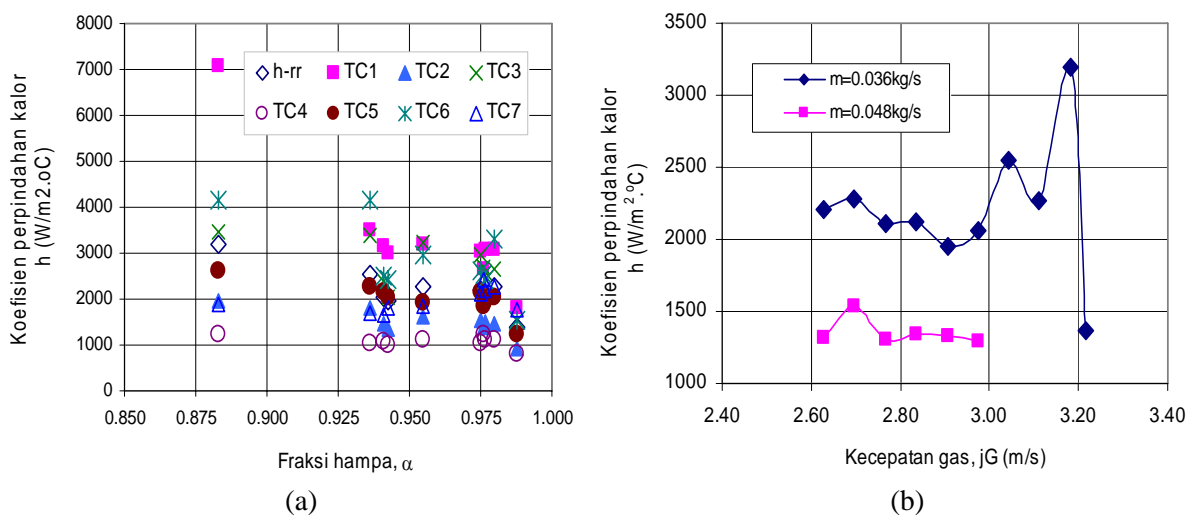
Gambar 5. Temperatur pada setiap termokopel (a) permukaan dinding dan (b) film cairan

Dalam Gambar 6 menunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor pada titik pengukuran sepanjang pipa berfluktuasi pada kecepatan gas sama. Pada kecepatan gas rendah antara 2.628m/s-3.112m/s, koefisien perpindahan kalor tidak terjadi perubahan yang berarti dan cenderung konstan. Karena interaksi antara kecepatan gas dan cairan rendah, sehingga belum mampu membentuk gelombang pada permukaan film. Tetapi mendekati aliran transisi terjadi pada kecepatan gas 3.181m/s permukaan film bergelombang dan tebal film meningkat ($\delta=0.97\text{mm}$) dan selisih temperatur permukaan dinding dan temperatur cairan (ΔT) akan turun. Penurunan ΔT ini akan mengakibatkan koefisien perpindahan kalor konveksi ke cairan terjadi kenaikan secara drastis sebesar $3190.63\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. Tetapi bila kecepatan gas dinaikkan menjadi 3.216m/s Saat aliran menjadi aliran searah ke atas, yaitu sebagian cairan bergerak searah aliran gas ke atas, ketebalan film semakin menipis ($\delta=0.10\text{mm}$). Kondisi ini ΔT akan meningkat, sehingga koefisien perpindahan kalor turun drastis menjadi $1370.86\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, fenomena ini dinamakan *flooding*.

Penurunan temperatur ini mengindikasikan transfer kalor ke cairan lebih baik. Efek olakan yang berbentuk gelombang tersebut bergerak naik kemudian turun, bentuk gerakan ini akan mempengaruhi proses perpindahan kalor konveksi. Selain itu interaksi antara gas dan cairan memungkinkan pencampuran antara cairan yang lebih panas dan cairan lebih dingin lebih cepat. Mekanisme perpindahan kalor konduksi akan berkurang, bila kecepatan aliran film semakin besar dan transfer panas konveksi lebih berperan. Untuk memindahkan panas dengan cara konveksi melalui kecepatan fluida pada laju tertentu, diperlukan gradien suhu yang lebih besar di daerah pada kecepatan rendah.



Gambar 6. Koefisien perpindahan kalor terhadap posisi termokopel dan Kecepatan gas



Gambar 7. (a). Koefisien perpindahan kalor terhadap fraksi hampa dan (b). Terhadap laju aliran cairan dengan peningkatan kecepatan gas.

Pengaruh fraksi hampa dalam aliran dapat mempengaruhi koefisien perpindahan kalor konveksi pada film cairan dituangkan dalam Gambar 7a. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dengan peningkatan fraksi hampa dan laju aliran gas meningkat, koefisien perpindahan kalor semakin kecil. Sedangkan Gambar 7b, menampilkan perbandingan pengaruh laju aliran cairan (m) terhadap koefisien perpindahan kalor, menunjukkan bahwa pada $m=0.0356\text{kg/s}$ h_{-rr} lebih besar dibandingkan dengan h_{-r} pada $m=0.048\text{kg/s}$. Pada laju aliran cairan lebih tinggi, pembalikan arah aliran ke atas akan terjadi lebih awal, yang mengakibatkan selisih temperatur permukaan dinding dan cairan (ΔT_{-rr}) lebih besar dan h_{-rr} cenderung lebih kecil. Tetapi pada m yang lebih kecil, saat aliran menjadi searah ke atas mengakibatkan kenaikan ΔT secara drastis dan h_{-rr} akan turun.

Kesimpulan

1. Koefisien perpindahan kalor konveksi lokal (h) selama aliran berlawanan arah, berfluktuasi dengan peningkatan kecepatan gas dan cenderung merata. Tetapi mendekati aliran transisi, permukaan cairan bergelombang dan tebal film meningkat, mengakibatkan temperatur permukaan dinding turun, sedangkan temperatur cairan naik dan koefisien perpindahan kalor meningkat.
2. Saat trasisi aliran berlawanan arah ke aliran searah, tebal film menipis dan mengakibatkan kenaikan temperatur permukaan dinding (T_s), dan koefisien perpindahan kalor (h_{-rr}) akan turun.

Notasi

A	luas permukaan perpindahan kalor (m^2)
h	koefisien konveksi kalor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
j	kecepatan fluida (m/s)
k	konduktivitas cairan ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)
T	temperatur ($^\circ\text{C}$)
q	laju aliran kalor (W)
δ	tebal lapisan film (mm)

Subskrip

f	fase cair
g	fase gas
s	permukaan dinding
Δ	delta /selisih

Ucapan terima kasih

Terima kasih kepada Kepala Lab. HMT PAU UGM yang memberikan izin penggunaan fasilitas laboratorium, juga kepada staf Lab. HMT atas bantuan dan kepercayaan yang diberikan.

Daftar pustaka

- Adrian B., 1984., *Convection Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- Indarto dan Samiadji H., 1992., *Metode Konduktimetri Pada Aliran Dua Fase Berlawanan Arah.*, Media Teknik No.2. Tahun ke XIV.
- Gargollo.M., Schulenberg. T., Mayer. L., Laurien. E., 2004., *Conter current flow Limitations During Hit Leg Injection in Pressurized Water Reactors.*, J. Nuclear Engineering and design, Germany
- Mahmuddin. Samsul K., Indarto, Purnomo., 2006., *Karakteristik Lapisan Film dan Kecepatan Flooding dalam Aliran Berlawanan Arah Vertikal.*, BKSTM dan SNTTM UI Jakarta.
- Prijono, *Prinsip-prinsip perpindahan panas*, 1985, Edisi ketiga, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Somchai W., Paisan N., 2000., *Heat Transfer and flow characteristics in Vertical Annular Two-Phase Two-Component Flow*, *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, Vol.5, No.1.Bangkok, Thailand.
- , 2006., *Pemanfaatan Energi Nuklir sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir.*, *Seminar Nasional Fakultas Teknik UGM*
- Kamal. S, 1992., *The Effect Of Drainage In The From Of A Sheet On Heat Transfer On Horizontal Tube.*, *Seminar Analisis dan Aplikasi Perpindahan Panas dan massa Menuju Era Industrialisasi.*, PAU UGM Yogyakarta.