

Karakterisasi Aliran Uap-Kondensat pada Saluran Mendatar Berdasarkan Pengukuran Temperatur

(Steam-Condensate Flow Characterization in a Horizontal Pipe Using Temperature Measurement)

SUKAMTA, INDARTO, PURNOMO, TRI AGUNG ROHMAT

ABSTRACT

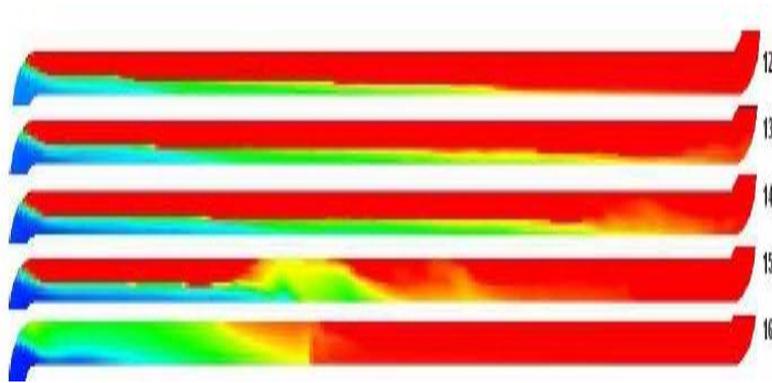
The objective of the current investigation is to find out temperature distribution regimes in a horizontal pipe when condensation process is happened. The research was conducted at Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada. The experiment apparatus consists of an inner annulus pipe made from copper ($d_{in} = 17.2$ mm, $d_o = 19$ mm) with the length of 1.8 m. The outer annulus pipe is a galvanized iron pipe ($d_{in} = 108.3$ mm, $d_o = 114.3$ mm) with the length of 1.6 m. Thermocouples type K 36 TT OMEGA with chromel (+) and alumel (-) materials were used as temperature sensors, to detect the spread of temperature in radial or axial direction along the pipe. The measurement ranged from -50 to 260 °C, with an accuracy of 0.01 °C. A data logger of RX 40 serial (OMRON, 20 Channels) was used to read and record temperature data with the sampling rate of 5 Hz. In the experiment, the water (H_2O) was heated using a boiler to generate steam which was then flowed and condensed inside the annulus pipe to form a steam-condensate two-phase flow in horizontal pipe. On the other hand, the water was used as a coolant in the outer of annulus pipe. The results indicated that the temperature distribution regimes are influenced by axial position. The farther distances from the inlet the lower the temperatures being recorded which indicate the increase of film condensate thickness. Such phenomena can affect slugging in the location.

Keywords : slugging, condensation, steam-condensate, temperature, horizontal pipe.

PENDAHULUAN

Banyak faktor mempengaruhi koefisien perpindahan kalor selama proses kondensasi, misalnya sifat fisis dan kimia uap, sifat embunan, dan geometri alat. Aliran *liquid condensate* melibatkan fenomena seperti aliran laminar, gelombang (*wavy*), transisi laminar-turbulen, dan butiran jatuh pada permukaan lapisan cairan (Ghiaasiaan, 2008). Strubelj dan Tiselj (2008) telah membuat model numerik untuk pola aliran pada *direct contact condensation* dengan fluida air-uap air. Dari penelitian tersebut dapat dihasilkan tahap perubahan aliran dari *stratified* ke *slug*. Suhu lokal sangat dipengaruhi oleh pembentukan *slug*, kondensasi gelembung uap yang terjebak oleh slug, dan pencampuran cairan. Karena

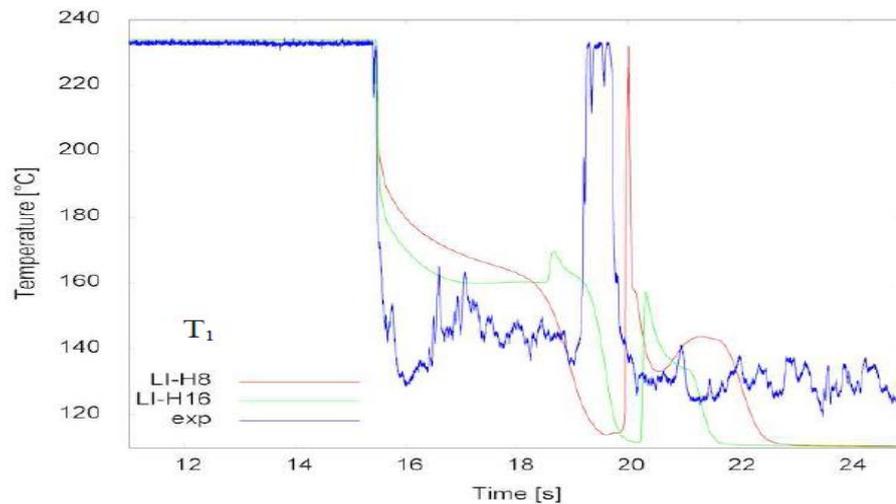
terjadi kontak dengan uap saturasi maka distribusi suhu cairan pada gelombang meningkat dibanding suhu pada cairan inlet (grafik 1.). Martin (2009) meneliti tentang pola aliran slug yang terjadi pada *direct contact condensation* dengan fluida amonia. Slug yang terjadi diketahui dapat menimbulkan tekanan yang tinggi yang dapat memicu terjadinya *waterhammer*. Coleman dan Garimella (2003) juga telah berhasil membuat peta pola aliran dalam peristiwa kondensasi pada R-134a. Mereka merumuskan empat pola aliran utama yaitu *bubbly*, *intermittent (slug/plug)*, *wavy*, dan *annular*. Dari penelitian ini juga didapatkan informasi bahwa transisi pola aliran dipengaruhi oleh diameter hidraulik saluran, sementara bentuk penampang hanya sedikit berpengaruh.



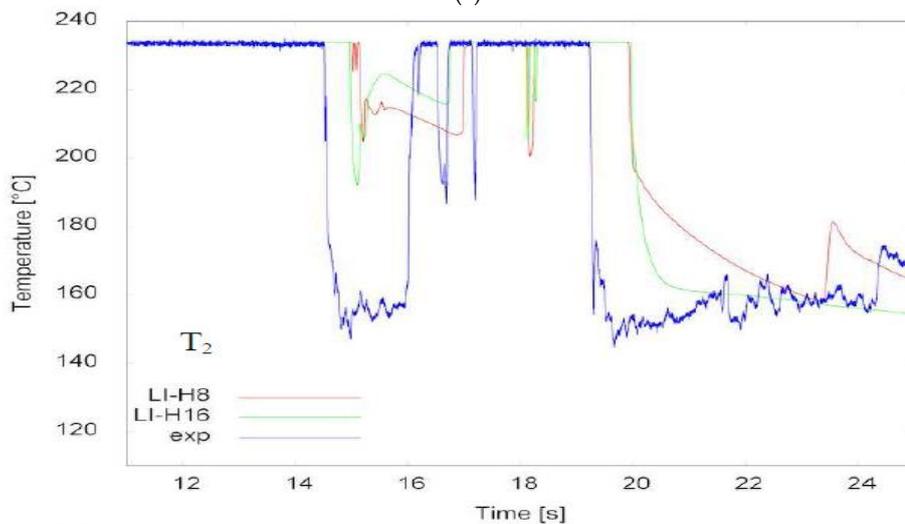
GAMBAR 1. Distribusi suhu pada proses kondensasi (biru-air, merah-uap), Strubelj, dkk. (2008)

Distribusi suhu lokal yang terjadi selama proses kondensasi ditampilkan pada Grafik2. Dari grafik terlihat suhu lokal mengalami fluktuasi, hal ini karena terjadi karena pergerakan uap air maupun air dingin. Jika suhu mengalami

penurunan berarti pada saat itu titik pengukuran dipenuhi oleh air dingin. Sedangkan pada puncak grafik ini berarti pada titik pengukuran sedang dipenuhi dengan uap air.



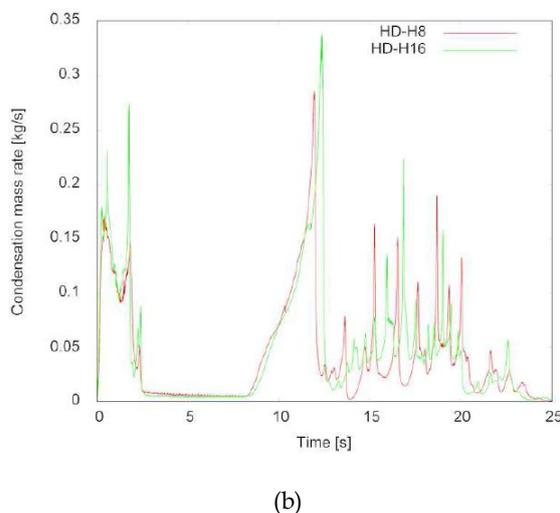
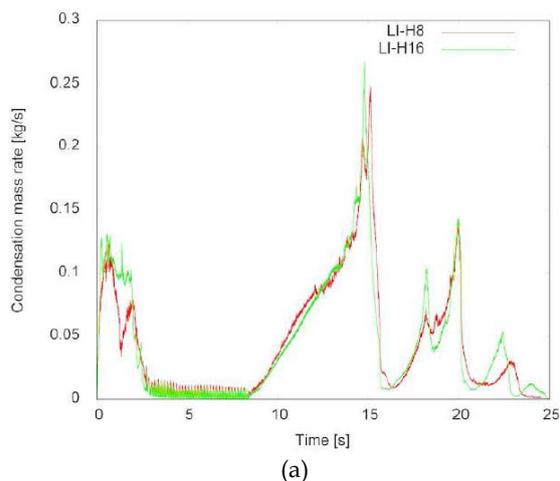
(a)



(b)

GAMBAR 2. Distribusi suhu sepanjang pipa kondensasi, Strubelj, dkk. (2008)

Dalam penelitian ini juga disajikan grafik laju kondensasi (Grafik3). Pada grafik tersebut terlihat bahwa laju kondensasi mengalami fluktuasi. Permulaan puncak laju masa kondensasi maka merupakan pembentukan *slug*. Puncak laju kondensasi menunjukkan saat kondensasi gelembung uap yang terjebak oleh *slug*. Puncak ini terjadi akibat peningkatan koefisien perpindahan kalor dan campuran air, dimana hal ini menyebabkan penurunan suhu cairan pada *interface*. Penelitian tentang pengaruh fluk massa terhadap pola aliran telah dilakukan oleh Dobson, dkk. (1993). Penelitian ini meneliti koefisien perpindahan kalor R-134a dan R-12 pada proses kondensasi di dalam pipa. Pada sisi *inlet* dan *outlet* pipa dipasang pipa transparan untuk mengetahui pola aliran yang terjadi. Pola aliran yang dikondisikan dalam penelitian ini pertama aliran *wavy* kemudian meningkat menjadi *wavy-annular*, *annular*, dan *mist annular*.



GAMBAR 3. Laju massa kondensasi, Strubelj, dkk. (2008)

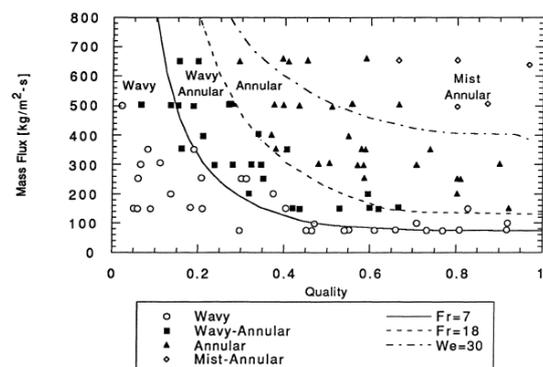
Kondisi yang digunakan dalam percobaan ini disajikan dalam Tabel 1. Kondisi yang digunakan ini memungkinkan terjadinya pola aliran dalam rentang yang luas. Pada fluks massa yang paling kecil ($G=75 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ atau $55,000 \text{ lbm/ft}^2\cdot\text{hr}$) ditunjukkan pada grafik 4, aliran *wavy* terjadi pada semua kualitas uap, dimana gaya gravitasi mendominasi gaya geser atau gaya inersia. Ketika fluks massa ditingkatkan pola aliran *wavy-annular* terjadi dimana gaya gravitasi dan gaya inersia memiliki nilai yang sama. Saat fluks atau kualitas ditingkatkan, gaya inersia mendominasi gaya gravitasi dan aliran *annular* terbentuk. Pada fluks massa dan kualitas tertinggi, terjadi aliran *annular-mist*. Pola aliran ini sulit dideteksi secara visual, karena sulit untuk melihat titik air di dalam uap melewati lapisan cairan. Karena ketebalan lapisan cairan bervariasi selama proses berlangsung maka ada saat dimana titik air di dalam uap bisa terlihat. Terbentuknya pola aliran *annular-mist* bertepatan dengan penurunan *slope* secara mendadak.

Tabel 1. Parameter percobaan dalam kondensasi,

Parameter	R-134a	R-12
Mass Flux ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$)	75, 150, 300, 500, 650	75, 150, 300, 500
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	35, 60	35, 60
Average Quality (%)	10-90	10-90
Heat Flux (kW/m^2)	4-15	4-15

Dobson, dkk. (1993)

Fenomena ini sebelumnya sudah dihubungkan dengan transisi pola aliran *mist-annular* (Chien dan Ibele, 1964).



GAMBAR 4. Peta pola aliran pada R-134a pada $T_{\text{sat}} = 35^{\circ}\text{C}$, Chien dan Ibele (1964).

Berdasarkan uraian di atas, pengkajian terhadap pola aliran dua fasa masih sangat luas cakupannya. Banyak ilmu yang masih bisa digali untuk menjelaskan fenomena pola aliran dua fasa yang beragam, baik dari sisi geometri, orientasi atau posisi pipa, maupun proses yang

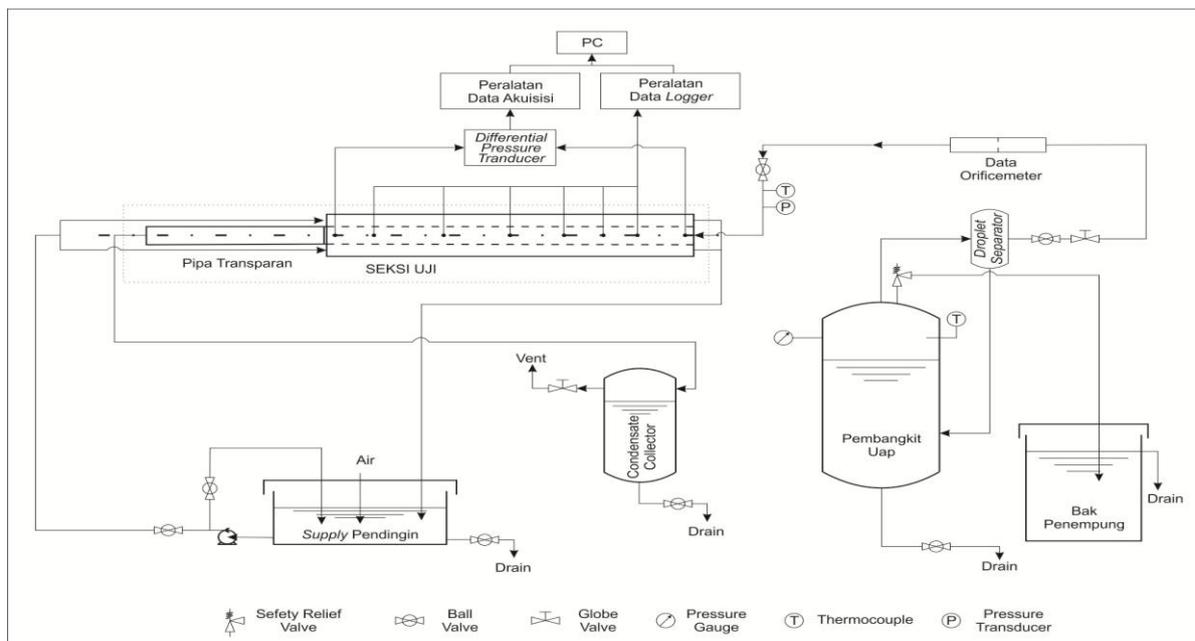
terjadi di dalam pipa (*boiling*, kondensasi, campuran cair-gas, dan sebagainya).

Untuk itulah penelitian tentang karakterisasi aliran kondensat pada saluran mendatar pengukuran temperatur antara titik *inlet* dan *outlet* pipa kondensat pada pipa horizontal ini dilakukan, dengan harapan dapat memberikan informasi baru tentang pola aliran uap-kondensat dan distribusi temperatur sepanjang pipa horizontal pada saat terjadinya proses kondensasi.

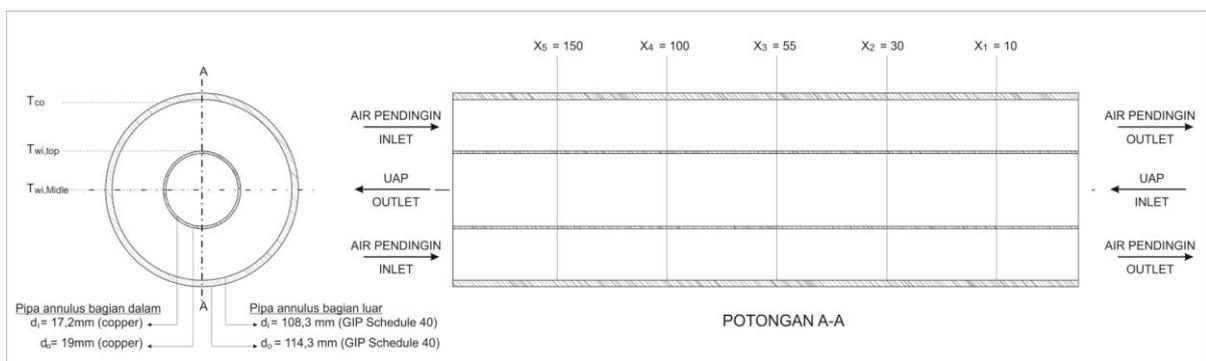
METODE PENELITIAN

Data dalam karya ilmiah ini diambil dari percobaan yang dilakukan di Laboratorium *Heat and Mass Transfer* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada. Bahan yang digunakan dalam hal ini adalah air murni (H_2O), yang kemudian dipanaskan dengan

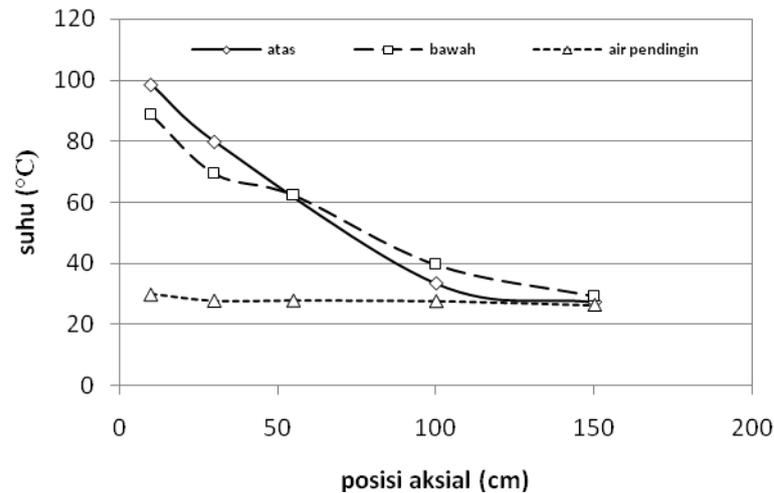
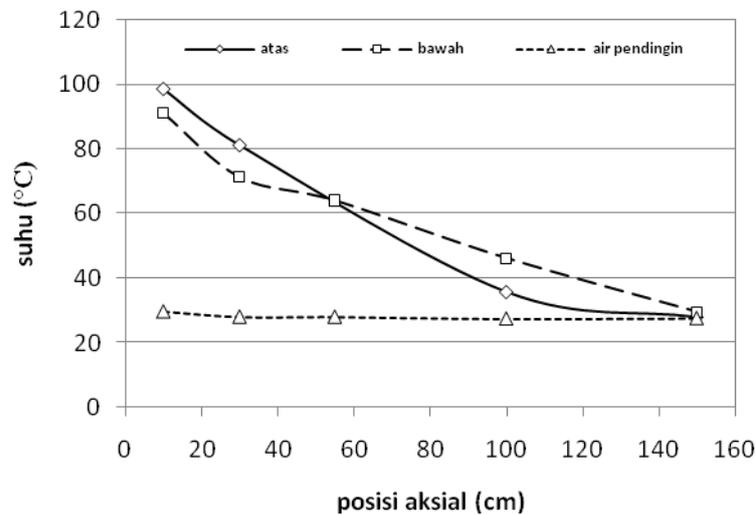
menggunakan boiler untuk menghasilkan uap air yang kemudian dikondensasikan untuk membentuk aliran uap-kondensat pada pipa horizontal, dan air yang digunakan sebagai pendingin pada pipa annulus bagian luar. Alat pengambilan data seperti ditunjukkan pada gambar 5. dan 6., terdiri atas pipa annulus bagian dalam dengan bahan tembaga ($d_{in} = 17.2$ mm, $d_o = 19$ mm) dengan panjang 1,8 m, sedangkan pipa annulus bagian luar adalah *Galvanized Iron Pipe* ($d_{in} = 108.3$ mm, $d_o = 114.3$ mm) dengan panjang 1,6 m. Termokopel tipe 36 TT OMEGA dengan material *chromel* (+) dan *alumel* (-) digunakan untuk mendeteksi penyebaran temperatur yang terjadi di sepanjang pipa ($L=1,6$ m). Peralatan akuisisi data seri RX 40 (OMRON, 20 Channels) digunakan untuk merekam data temperatur dengan *sampling rate* 5Hz.



GAMBAR 5. Skema alat uji



GAMBAR 6. Skema penempatan sensor temperatur arah radial dan aksial

GAMBAR 7. Debit 0,002 m³/s.GAMBAR 8. Debit 0,003 m³/s.

HASIL DAN PEMBAHASAN

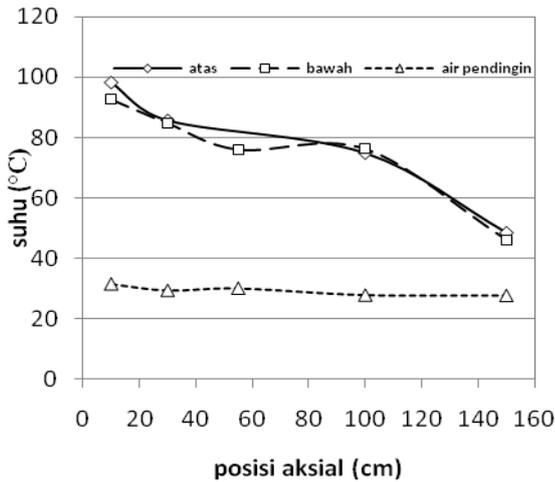
Hasil pengukuran temperatur di sepanjang pipa horisontal aliran dua fasa uap-kondensat yang dihasilkan dari proses kondensasi disajikan dalam beberapa variasi debit uap seperti ditunjukkan Gambar 7 sampai 13.

Pada Gambar 7 dan 8 dapat dikemukakan bahwa terjadi kecenderungan penurunan suhu yang cukup mencolok mulai dari titik awal masuk sampai dengan titik keluar pipa. Hal ini menunjukkan adanya transfer kalor yang cukup signifikan. Pada variasi debit uap 0,002 m³/s dan 0,003 m³/s ini hampir seluruh uap sudah terkondensasi sebelum mencapai titik keluar pipa. Hal ini bisa dilihat dari penurunan suhu dalam pipa bagian atas sehingga sama dengan suhu di dalam pipa bagian bawah. Pada saat uap mulai masuk ke pipa uap tersebut mulai

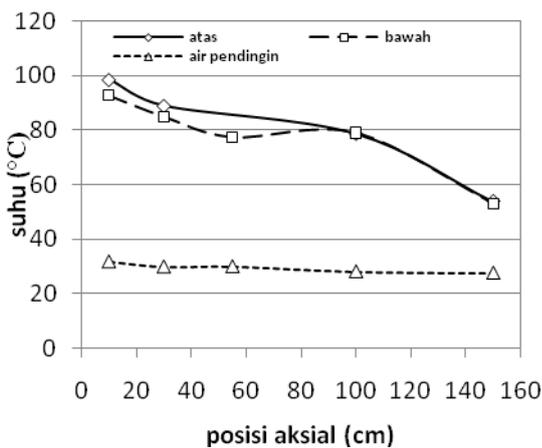
mengalami kondensasi tapi baru sebagian, sehingga suhu dalam pipa bagian atas masih tinggi menandakan pada daerah tersebut masih terdapat uap, dan suhu di dalam pipa bagian bawah yang lebih rendah yang merupakan suhu kondensat. Kemudian semakin mendekati titik keluar pipa uap yang terkondensasi semakin besar, sehingga suhu di dalam pipa bagian atas terus menurun karena uap yang tersisa sangat sedikit. Pembentukan kondensat yang cepat ini terjadi karena debit uap yang kecil sementara debit air pendingin yang besar. Dari analisis tersebut dapat diprediksi bahwa pola aliran yang terjadi adalah *stratified-wavy*.

Pada grafik di atas terdapat hal yang menarik yaitu bentuk penurunan suhu di dalam pipa bagian atas hingga mencapai titik yang lebih rendah dari suhu di dalam pipa bagian bawah. Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa pipa kondensator terhubung dengan bak penampung

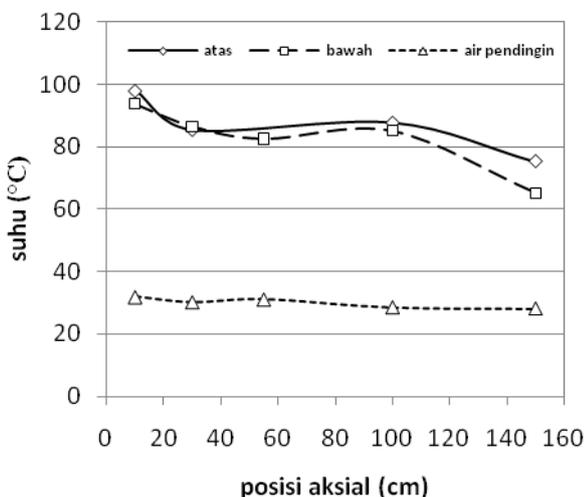
kondensat dimana dimungkinkan udara luar untuk masuk ke pipa kondenser sebelum rangkaian proses kondensasi dimulai. Sehingga pada variasi debit ini terdapat campuran antara udara dan uap. Pada bagian dimana suhu di dalam pipa bagian atas lebih rendah dari suhu di dalam pipa bagian bawah di daerah tersebut terdapat udara.



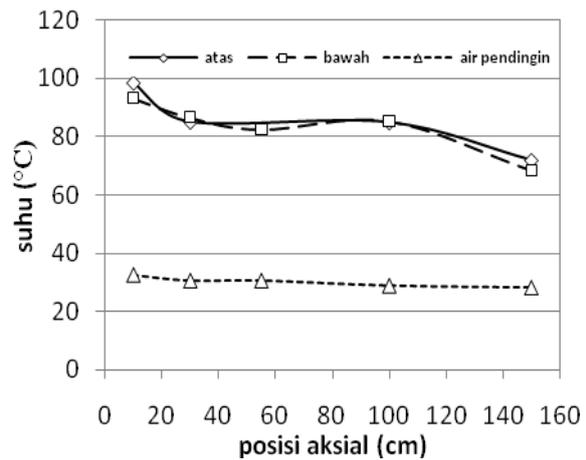
GAMBAR 9. Debit 0,0055 m³/s



GAMBAR 10. Debit 0,0065 m³/s



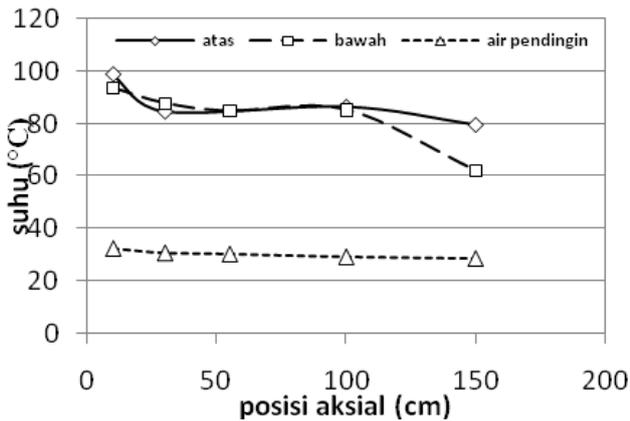
GAMBAR 11. Debit 0,007 m³/s



GAMBAR 12. Debit 0,0073 m³/s

Terjadi kecenderungan penurunan suhu yang cukup namun tidak mencolok mulai dari titik awal masuk sampai dengan titik keluar pipa. Hal ini menunjukkan adanya transfer kalor yang lebih kecil dibandingkan variasi sebelumnya. Pada variasi debit 0,0055 m³/s, 0,0065 m³/s, 0,007 m³/s, dan 0,0073 m³/s (Gambar 9 sampai dengan 12), uap masuk pipa annulus bagian dalam (pipa kondenser), dan tidak seluruh uap terkondensasi secara serentak sehingga suhu di dalam pipa bagian atas yang merupakan suhu uap lebih tinggi dari suhu di dalam pipa bagian bawah yang merupakan suhu kondensat. Makin mendekati titik keluar pipa lapisan kondensat makin tebal. Dengan semakin tebalnya lapisan kondensat dan debit uap yang besar maka mendorong terjadinya slug. Dari analisis tersebut dapat diprediksi bahwa pola aliran yang terjadi adalah slug dengan jumlah yang lebih dari satu.

Di dalam pipa bagian bawah terdapat perbedaan suhu di sepanjang saluran yang bisa dilihat dari grafik di atas. Perbedaan suhu ini disebabkan perbedaan tebal lapisan kondensat di sepanjang pipa. Pada saat terjadi proses kondensasi ini terbentuklah aliran slug yang menyebabkan terjadinya kantung-kantung uap di sepanjang pipa. Pada daerah kantung-kantung uap ini tebal lapisan kondensatnya berbeda-beda. Pada bagian dengan lapisan kondensat yang lebih tebal memiliki suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan bagian dengan lapisan kondensat yang lebih tipis.

GAMBAR 13. Debit 0,0075 m³/s.

Pada variasi debit 0,0075 m³/s (Gambar 13.) di titik keluar pipa terjadi perbedaan yang mencolok antara suhu di dalam pipa bagian atas dan suhu di dalam pipa bagian bawah. Pada variasi debit ini debit uap semakin besar sementara debit air pendingin tetap sehingga laju pendinginan menurun, hal ini menunjukkan adanya transfer kalor yang juga cenderung menurun. Pada saat uap memasuki pipa, uap tersebut terkondensasi tetapi dengan laju yang pendinginan yang kecil yang menyebabkan kondensat terbentuk dengan lambat sehingga lapisan kondensat yang terbentuk tipis. Semakin mendekati titik keluar pipa uap yang terkondensasi semakin bertambah sehingga lapisan kondensat semakin tebal. Pada titik keluar ini masih terdapat uap yang belum terkondensasi mengalir di dalam pipa bagian atas dan kondensat yang terbentuk mengalir di dalam pipa bagian bawah. Hal ini menyebabkan pada titik keluar pipa terjadi perbedaan suhu yang mencolok yaitu antara suhu uap dan suhu kondensat. Dari analisis tersebut dapat diprediksi bahwa pola aliran yang terjadi adalah *stratified-wavy* dan *slug*.

Selain dari perbedaan fenomena yang terjadi pada proses kondensasi untuk tiap variasi debit di atas sehingga menghasilkan bentuk grafik suhu yang berbeda, ada satu hal yang perlu diperhatikan dari seluruh variasi debit yaitu semakin besar debit maka perbedaan antara suhu pada pipa dalam di titik keluar dengan suhu air pendingin pada pipa luar di titik masuk semakin besar. Hal ini terjadi karena debit air pendingin yang digunakan pada proses kondensasi untuk semua variasi debit uap adalah konstan. Pada pada proses perpindahan panas yang melibatkan fluida panas dan fluida dingin, maka kalor yang dilepaskan oleh fluida panas sama dengan kalor yang diterima oleh fluida dingin. Untuk debit fluida dingin yang

tetap maka kalor yang mampu diserap oleh fluida dingin dari fluida panas juga tetap. Hal ini bisa dibuktikan dari grafik untuk semua variasi debit, dari grafik terlihat suhu air pendingin berada pada kisaran nilai yang sama. Jika debit fluida panas terus bertambah, dengan kondisi awal fluida panas selalu sama, sementara debit fluida dingin tetap, fluida dingin juga dengan kondisi awal yang selalu sama, maka kemampuan pendinginan dari sistem menurun. Penurunan kemampuan pendinginan ini bisa dilihat dari selisih antara suhu di titik masuk dan di titik keluar pada pipa dalam yang semakin kecil karena suhu di titik keluar semakin meningkat. Peningkatan suhu di titik keluar pipa dalam ini berarti jumlah uap yang tidak berhasil didinginkan dan kemudian mengalir keluar semakin bertambah.

KESIMPULAN

Diperoleh hasil bahwa pola sebaran atau distribusi temperatur pada peristiwa kondensasi pada pipa horisontal dipengaruhi oleh posisi aksial sepanjang pipa kondensasi, makin mendekati titik keluar pipa temperatur cenderung semakin kecil yang berarti bahwa lapisan kondensat makin tebal. Dengan semakin tebalnya lapisan kondensat ini maka dapat memicu terjadinya *slugging*. Oleh karena itu *slugging* terbanyak terjadi di daerah mendekati ujung pipa keluar. Disamping itu pada variasi debit uap masuk ternyata mempunyai pengaruh terhadap terbentuk variasi pola aliran yang terjadi. Pada penelitian ini dihasilkan pola aliran *stratified*, *wavy*, *stratified-wavy* dan *slug*.

DAFTAR PUSTAKA

- Chien, S., and W. Ibele, 1964, "Pressure drop and liquid film thickness of two-phase annular and annular-mist flows", *Journal of Heat Transfer, Trans. ASME*, vol. 86, pp. 89-96.
- Dobson MK, Chato JC, Hinde DK, Wang SP., 1994, Experimental evaluation of internal condensation of refrigerants R-12 and R-134a. *ASHRAE Transactions*, pp 94-5-3: 744-54.
- Ghiaasiaan, S.M., *Two-phase flow, Boiling, and Condensation in Conventional and Miniature Systems*, Cambridge University Press, New York, 2008, pp. 112 - 492..

John W. Coleman, Srinivas Garimella (2003), *Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a*, International Journal of Refrigeration 26 (2003) 117–128, Elsevier Science Ltd and IIR, pp 117-128.

Martin. 2009, *Condensation-Induced Waterhammer in a Horizontal Pipe*, third IAHR International Meeting of The Workgroup on Cavitation and Dynamic Problem in Hydraulic Machinery and System, October 14-16, 2009, Brno, Czech Republic

Strubelj, L. Dan Tiselj, I., 2008, *Numerical Modelling Of Direct Contact Condensation In Transition From Stratified To Slug Flow*, Jožef Stefan Institute Reactor Engineering Division Jamova 39, Si-1000, Ljubljana, Slovenia

PENULIS :

Sukamta✉

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan
Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul
55183, Yogyakarta

✉Email : msukamta@gmail.com