

PROFIL TEMPERATUR PADA PERISTIWA KONDENSASI ALIRAN UAP DENGAN PENDINGINAN LUAR SEARAH PADA PIPA HORISONTAL BERBASIS MULTI LOKASI

CATUR WAHYU SUHARTOYO

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Email: caturwahyusuhartoyo@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pola sebaran temperatur di sepanjang saluran horisontal pada saat proses kondensasi. Bahan penelitian ini adalah air yang dipanaskan dengan menggunakan *boiler* dan kemudian dikondensasikan untuk membentuk aliran uap-kondensat pada pipa horisontal, sementara air dingin dialirkan dalam pipa anulus bagian luar.

Alat penelitian terdiri atas pipa anulus bagian dalam dari bahan tembaga berdiameter 17 mm dengan panjang 1,8 m, sedangkan pipa anulus bagian luar adalah pipa besi berdiameter 102 mm dengan panjang 1,6 m. Termokopel tipe K digunakan untuk mendeteksi penyebaran temperatur yang terjadi di sepanjang pipa ($L=1,6$ m). Peralatan akuisisi data (*data logger*) digunakan untuk merekam data yang terbaca oleh temperatur dengan *sampling rate* 5 data/detik.

Diperoleh hasil bahwa pola sebaran 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 ketidakstabilan aliran. Ketidakstabilan aliran ini disebabkan karena efek Bernouli, yang kemudian berpengaruh pada pola aliran yang terjadi yaitu *stratified*, *stratified-wavy*, *wavy* dan *wavy to slug*.

Kata kunci : kondensasi, uap, lapisan kondensat, temperatur, distribusi temperatur

PENDAHULUAN

Aliran dua fase merupakan bagian dari aliran multi fase. Aliran yang terdiri dari dua fase dan masing-masing fase berbeda ini banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam proses-proses industri. Dalam kehidupan sehari-hari dapat dilihat pada aliran saluran pembuangan, pembangkit daya uap, aliran semen pasir di pipa dan lain-lain. Menurut Ren bin, dkk (2014) koefisien perpindahan panas menurun sepanjang kondensor tabung karena penurunan dari campuran gas Reynolds jumlah dan peningkatan ketebalan kondensat film dan fraksi udara. Untuk

rezim aliran *annular*, karena untuk distribusi simetris suhu, koefisien transfer panas di bagian atas yang hampir sama dengan yang di bagian bawah. Tapi untuk aliran *stratified*, koefisien transfer panas di bagian atas lebih tinggi daripada di bagian bawah. Dan kesenjangan secara bertahap menutup sepanjang tabung, terutama pada fraksi gas noncondensable inlet yang lebih tinggi.

Interaksi antar fase fluida yang memiliki subtansi kimia berbeda itulah yang menyebabkan terbentuknya pola aliran. Efek yang muncul dari terbentuknya pola aliran adalah adanya fluktuasi aliran karena bercampurnya fase gas dan fase cair yang tidak homogen

sehingga densitas aliran pun tidak homogen yang dapat menimbulkan fluktuasi gaya (Riverin dkk, 2006). Wang (2002) menyatakan fluktuasi gaya yang terjadi akan menghasilkan beban impak secara acak akan menghasilkan getaran (*flow-induced vibration*) pada pipa. Ugural (1999) menyatakan akibat pembebanan impak secara acak yang berlangsung terus menerus bisa menyebabkan kerusakan pada pipa

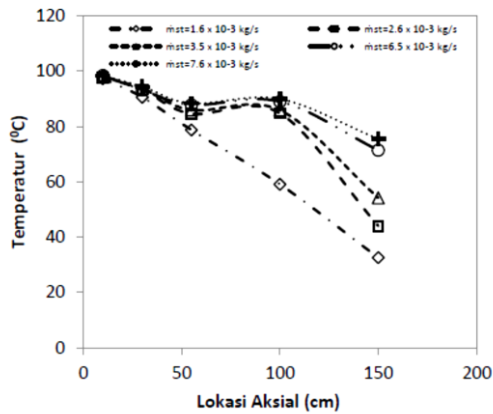
Aliran dua fase mempunyai fenomena yang sangat kompleks dibanding dengan aliran satu fase, diantaranya adalah interaksi antar fase, pengaruh deformasi permukaan dan pergerakan antar fluida, pengaruh ketidakseimbangan fase, perubahan pola aliran dan lain sebagainya. Fase-fase yang ada mempunyai pengaruh yang signifikan sehingga akan terdapat banyak pola aliran yang terbentuk dalam saluran tersebut akibat interaksi antar fase fluida tersebut. Aliran yang mengalami perubahan pola aliran dapat menyebabkan pressure drop yang berubah-ubah pula atau berfluktuasi. Maka dari itu perlu diketahui dan diidentifikasi pola aliran yang terjadi pada peristiwa kondensasi aliran uap bertemperatur tinggi di dalam pipa horisontal pada kondisi *multi location*.

TINJAUAN PUSTAKA

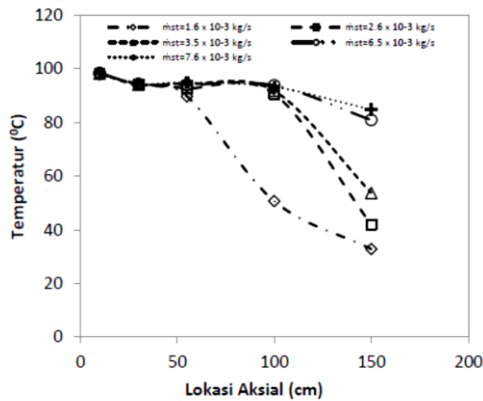
Sukamta (2010) melakukan sebuah eksperimen pola aliran dua fase uap-kondensat berdasarkan diferensial pengukuran tekanan di dalam tabung horisontal dilakukan dengan memvariasikan laju alir uap. Percobaan digunakan pipa anulus dengan pipa uji bagian dalam adalah terbuat dari tembaga dan bagian luar terbuat dari pipa galvanis besi (GIP) dibungkus dengan tebal isolasi 10 mm. Panjang pipa adalah 1,6 meter, dan 4 inch diameter luar dan 17 mm diameter dalam. Rezim aliran dua fase diselidiki berdasarkan tekanan gradien antara inlet dan outlet-nya. Untuk mendukung hasilnya, visualisasi dilakukan

dengan menggunakan pipa diameter $\frac{3}{4}$ inchi dan panjang 1,3 m pipa transparan terhubung dengan bagian uji pipa. Lima variasi laju aliran uap mulai dari 0.0021 m³/s untuk 0,0070 m³/s dipilih. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk laju aliran uap rendah, pola aliran diidentifikasi adalah stratified sedangkan untuk variasi nya, berlapis, bergelombang, plug and pola aliran slug diamati. Pola aliran bergelombang terjadi pada transisi bertingkat untuk slug atau plug. Pola aliran annular tidak diamati dalam percobaan. Secara umum, sebuah peningkatan laju aliran uap menghasilkan sinyal gradien tekanan lebih signifikan. Penelitian tentang peralihan pola aliran dari *stratified* ke *slug* dalam proses kondensasi dilakukan oleh Strubelj, dkk. (2008). Dalam penelitian ini jenis kondensasi yang digunakan adalah *direct contact condensation*, dimana uap air dan air pendingin dialirkan secara berlawanan arah dalam satu pipa. Selama proses kondensasi terjadi fluktuasi aliran dimana aliran dalam pipa yang tadinya lambat kemudian menjadi kacau karena timbulnya *slug*, dimana gelembung uap air terjebak oleh *slug*. Suhu dan tekanan fluida di dalam pipa selama proses kondensasi kemudian diamati. Sukamta (2011) melakukan pengukuran lokasi perpindahan panas dari uap-kondensat yang mengalir berlawanan arah di dalam pipa kondenser horisontal dengan keliling distribusi temperatur sepanjang dinding tabung kondenser diukur untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas sekitar pipa kondenser. Pipa anulus dengan bagian dalam pipa bagian uji terbuat dari bahan tembaga (din = 17,2 mm, do = 19 mm) dengan panjang 1,8 m dan pipa uji bagian luar terbuat dari pipa besi galvanis (din = 108,3 mm, do = 114,3 mm) dengan panjang 1,6 m tertutup oleh isolasi dengan tebal 10 mm digunakan dalam percobaan ini. Suhu diukur dengan lima variasi laju aliran massa uap panas mulai dari $1,6 \times 10^{-3}$ $7,6 \times 10^{-3}$ kg/s. Koefisien perpindahan panas lokal dipengaruhi oleh

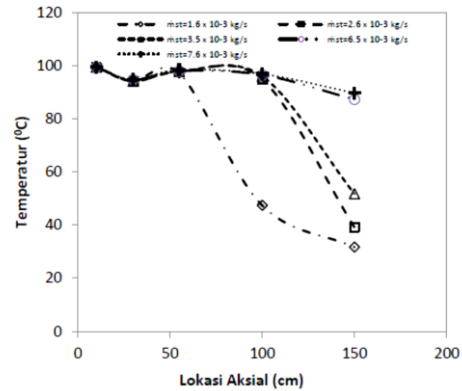
radial dan aksial posisi inlet dan diikuti juga pada sisi atas dan bagian bawah.



Gambar 1. Profil temperatur aksial bagian bawah ddalam pipa kondenser horisontal untuk variasi laju aliran uap masuk. (Sukamta, 2011)



Gambar 2. Profil temperatur aksial bagian samping dalam pipa kondenser horisontal untuk variasi laju aliran uap masuk (Sukamta, 2011)



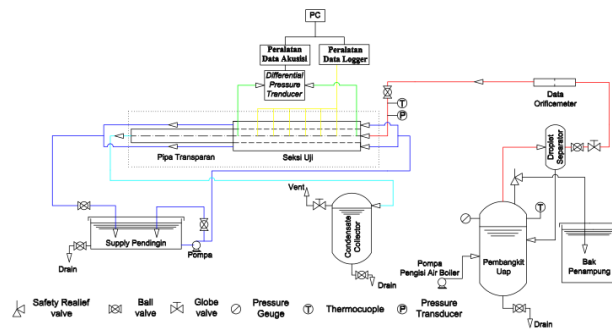
Gambar 3. Profil temperatur aksial bagian atas dalam pipa kondenser horisontal untuk variasi laju aliran uap masuk (Sukamta, 2011)

Profil temperatur aksial pada pipa kondenser horisontal untuk variasi laju aliran massa uap diperlihatkan pada Gambar 1 sampai dengan 3, sumbu vertikal merupakan hasil pengukuran temperatur dan sumbu horisontal menggambarkan posisi aksial terukur dari sisi masuk pada pipa kondenser horisontal.

METODOLOGI PENELITIAN

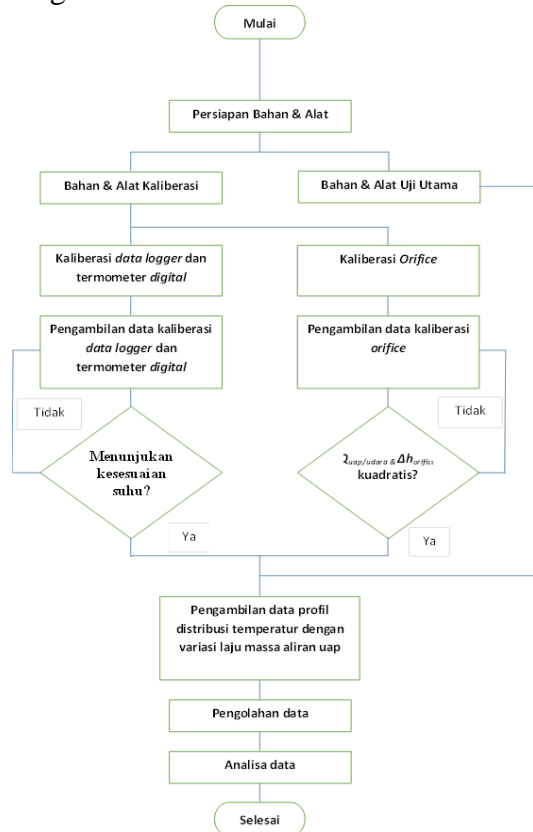
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium *Heat and Mass Transfer* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada (PSIT UGM) Yogyakarta. Bahan penelitian ini adalah aquades, digunakan sebagai bahan penghasil uap air yang akan dikondensasikan untuk membentuk aliran dua fasa pada pipa horisontal yang dipanaskan dengan menggunakan *boiler*, dan air yang digunakan sebagai pendingin pada pipa anulus bagian luar. Alat penelitian terdiri atas pipa anulus bagian dalam dari bahan tembaga berdiameter 17 mm dengan panjang 1,6 m, sedangkan pipa anulus bagian luar adalah pipa besi berdiameter 4 inchi dengan panjang 1,6 m. Pipa kaca dengan diameter 17 mm dan panjang 1,2 m digunakan untuk mengetahui visualisasi pola aliran dua fasa yang terjadi. Peralatan akuisisi data (*data logger*) digunakan untuk merekam data yang terbaca oleh

temperatur dengan *sampling rate* 5 data/detik.



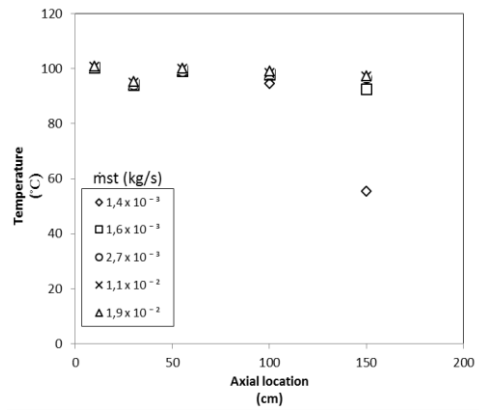
Gambar 4. Skema alat uji

Diagram Alir Penelitian

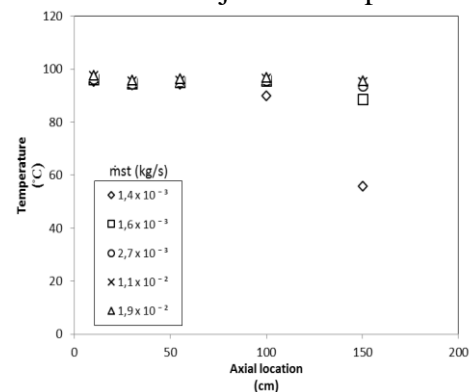


HASIL DAN PEMBAHASAN

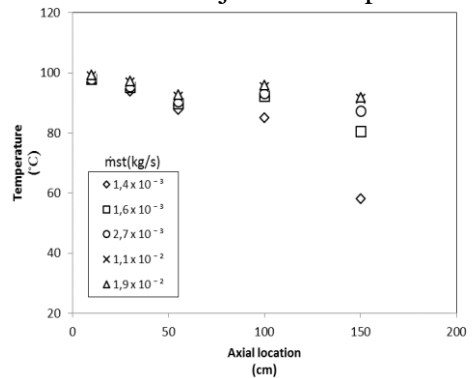
Hasil pengukuran temperatur di sepanjang pipa horisontal aliran searah dua fasa uap-kondensat yang dihasilkan dari proses kondensasi disajikan dalam beberapa variasi laju aliran massa uap sebagai berikut ini.



Gambar 4. Profil temperatur aksial bagian bawah dalam pipa kondenser horisontal untuk variasi laju aliran uap masuk



Gambar 5. Profil temperatur aksial bagian samping dalam pipa kondenser horisontal untuk variasi laju aliran uap masuk



Gambar 6. Profil temperatur aksial bagian atas dalam pipa kondenser horisontal untuk variasi laju aliran uap masuk

Profil temperatur aksial pada pipa kondenser horisontal untuk variasi laju aliran massa uap diperlihatkan pada Gambar 4. sampai dengan 6, sumbu vertikal merupakan hasil pengukuran temperatur dan sumbu horisontal

menggambarkan posisi aksial terukur dari sisi masuk pada pipa kondenser horisontal.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 4, profil temperatur aksial bagian bawah dalam pipa kondenser horisontal, untuk beberapa variasi laju aliran massa uap masuk dan laju aliran massa air pendingin yang konstan sebesar $4,23 \times 10^{-1}$ kg/s, profil temperatur tertinggi terjadi pada laju aliran uap masuk terbesar pula ($8,9 \times 10^{-3}$ kg/s), dan semakin menurun seiring menurunnya laju aliran massa uap masuk ke dalam pipa kondenser horisontal, dan profil temperatur terendah terjadi pada laju aliran uap ($1,4 \times 10^{-3}$ kg/s). Jika diamati lebih jauh lagi dari Gambar tersebut pada posisi 10 cm sampai dengan 30 cm dari sisi masuk, diperoleh data profil temperatur yang mendekati sama dan berada pada temperatur saturasi untuk laju aliran uap masuk $1,6 \times 10^{-3}$ kg/s sampai dengan $8,9 \times 10^{-3}$ kg/s. Hal ini mengindikasikan pada posisi tersebut sedang terjadi proses kondensasi. Sementara, pada posisi 30 cm sampai dengan 100 cm dari sisi inlet, profil temperatur memperlihatkan kecenderungan perilaku yang juga sama yaitu sedikit turun dan kemudian mendekati horisontal dengan posisi berurutan dari atas ke bawah untuk laju aliran uap yang semakin kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa pada posisi ini uap telah terkondensasi dan membentuk lapisan kondensat dengan ketebalan yang terdapat pada bagian bawah juga relatif sama. Sementara itu, pada titik pengukuran 100 cm dan 150 cm dari sisi masuk memperlihatkan profil temperatur yang cenderung menurun secara cepat dengan perbedaan yang cukup signifikan. Ini berarti bahwa tebal kondensat yang terjadi tidak stabil dari waktu ke waktu dan atau posisi yang satu ke posisi berikutnya.

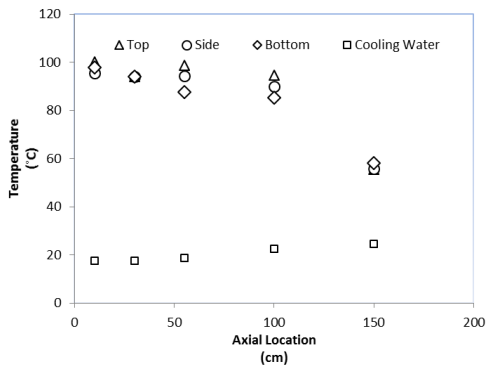
Dari analisis tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa pada variasi laju aliran uap masuk mulai $1,6 \times 10^{-3}$ kg/s sampai dengan $8,9 \times 10^{-3}$ kg/s terjadi aliran kondensat dengan ketebalan yang relatif tidak konstan. Hal ini mengindikasikan

telah terjadinya pola aliran *wavy* (gelombang) atau *wavy to slug*. Kondisi ini berbeda untuk laju aliran uap masuk $1,4 \times 10^{-3}$ kg/s. Pada laju aliran uap masuk ini profil temperatur terlihat cenderung membentuk garis lurus dengan kemiringan yang cukup terjal ke bawah, yang mengindikasikan bahwa penurunan temperatur terjadi secara linear dan tajam yang berarti laju kondensasi terjadi secara teratur sehingga tebal kondensat yang terbentuk pun lebih teratur dan relatif konstan.

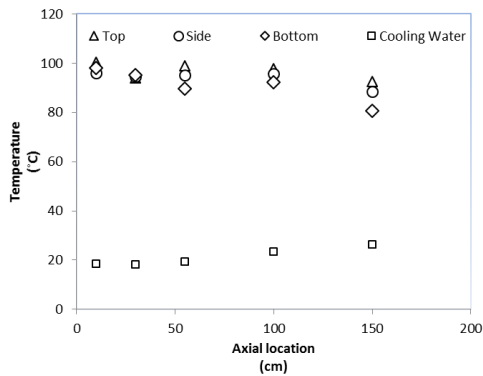
Jika Gambar 4 dibandingkan dengan Gambar 4.2. terdapat perbedaan yang cukup berarti. Gambar 5, pada variasi laju aliran uap $1,6 \times 10^{-3}$ kg/s dan $8,9 \times 10^{-3}$ kg/s, memperlihatkan hasil pengukuran temperatur dan kecenderungan yang hampir sama pada titik 10 cm sampai dengan 100 cm dari sisi masuk. Hal ini berarti kondisi di titik tengah bagian samping pipa kondenser tersebut relatif sama untuk beberapa variasi laju aliran uap masuk, dan baru berubah setelah menuju ke titik 150 cm dari sisi masuk, di mana semakin kecil laju aliran uap masuk, maka semakin rendah penurunan temperatur lokal pada titik tersebut. Untuk laju aliran uap masuk yaitu $1,4 \times 10^{-3}$ kg/s s temperatur sudah mulai turun secara tajam sejak pada titik 55 cm sampai dengan 150 cm dari sisi masuk. Hal ini mengindikasikan lapisan kondensat mulai melebihi garis tengah pipa, sehingga termokopel lebih banyak terbasahi kondensat.

Apabila Gambar 4 dan 5. dibandingkan dengan Gambar 6 maka juga terdapat perbedaan yang sangat signifikan. Gambar 6 mendeskripsikan profil temperatur pada titik-titik bagian atas sebelah dalam pipa kondenser horisontal. Dari gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa untuk variasi laju aliran uap masuk $1,1 \times 10^{-3}$ kg/s sampai dengan $8,9 \times 10^{-3}$ kg/s mengalami kondisi yang sama, dan baru berbeda setelah melewati titik 100 cm dari sisi masuk kecuali pada laju aliran uap $1,4 \times 10^{-3}$. Jika diperhatikan lebih jauh,

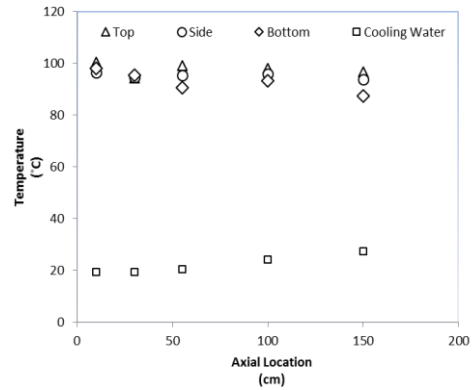
profil temperatur pada titik 10 cm sampai dengan 100 cm dari sisi masuk tersebut relatif konstan dan masih berada pada titik saturasi, hal ini berarti bahwa sedang terjadi peristiwa kondensasi di sepanjang titik tersebut, kecuali untuk laju aliran uap masuk ($1,4 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$) yang telah mulai turun setelah titik 55 cm dari sisi masuk, artinya pada laju aliran uap masuk ini peristiwa kondensasi terjadi lebih cepat dan lebih dekat dengan titik sisi masuk.



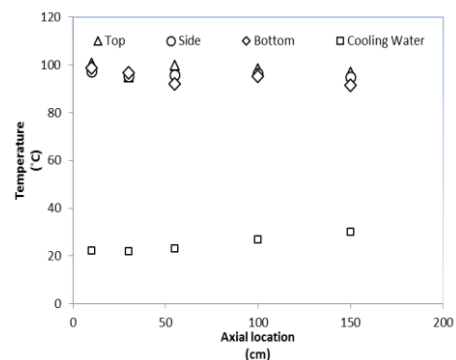
Grafik 1. Profil Temperatur pada sisi melintang pipa uji ($\dot{m}_{st} = 1,4 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$, $\dot{m}_{co} = 4,23 \times 10^{-1} \text{ kg/s}$)



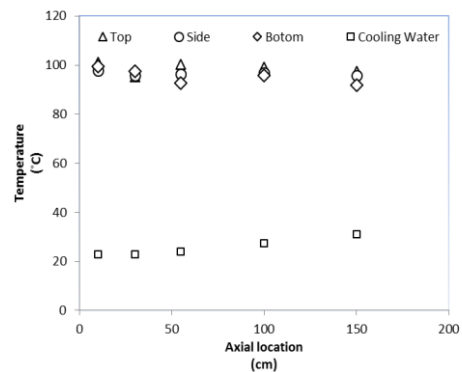
Grafik 2. Profil Temperatur pada sisi melintang pipa uji ($\dot{m}_{st} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$, $\dot{m}_{co} = 4,23 \times 10^{-1} \text{ kg/s}$)



Grafik 3. Profil Temperatur pada sisi melintang pipa uji ($\dot{m}_{st} = 2,7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$, $\dot{m}_{co} = 4,23 \times 10^{-1} \text{ kg/s}$)



Grafik 4. Profil Temperatur pada sisi melintang pipa uji ($\dot{m}_{st} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$, $\dot{m}_{co} = 4,23 \times 10^{-1} \text{ kg/s}$)



Grafik 5. Profil Temperatur pada sisi melintang pipa uji ($\dot{m}_{st} = 1,9 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$, $\dot{m}_{co} = 4,23 \times 10^{-1} \text{ kg/s}$)

Grafik 1 sampai dengan Grafik 5 menggambarkan pola sebaran temperatur pada sisi melintang pipa uji di beberapa lokasi aksial pipa kondenser horisontal. Grafik 1. terdapat hasil pengukuran temperatur yang hampir konstan untuk titik berjarak 10 cm sampai dengan 30 cm dari inlet dan masih berada pada temperatur saturasi, hal ini

mengindikasikan bahwa di lokasi tersebut sedang terjadi proses kondensasi. Sedangkan pada titik samping dan bawah berturut-turut juga relatif konstan dengan besaran titik samping lebih rendah, tetapi sudah berada pada kondisi di bawah suhu saturasi, hal ini menunjukkan bahwa pada lokasi ini telah terbentuk kondensat yang cukup sehingga membasahi dinding. Kemudian pada titik 100 sampai dengan 150 cm dari inlet kondisi di tiga lokasi tersebut mempunyai kecenderungan yang sama yaitu menurun ke bawah secara tajam, ini berarti bahwa telah terjadi penambahan jumlah kondensat yang cukup signifikan di dalam pipa. Diperkirakan pada variasi laju aliran massa uap $1,4 \times 10^{-3}$ kg/s ini telah terjadi pola aliran *wavy to slug*.

Selanjutnya pada Grafik 2. dan 3. juga terdapat hasil pengukuran temperatur yang hampir konstan untuk titik berjarak 10 cm sampai dengan 30 cm dari inlet dan masih berada pada temperatur saturasi, hal ini mengindikasikan bahwa di lokasi tersebut sedang terjadi proses kondensasi sama seperti ditunjukkan pada Grafik 1. Sedangkan pada titik samping dan atas berturut-turut juga relatif konstan dengan besaran titik samping lebih rendah dan sudah berada pada kondisi di bawah suhu saturasi. Kemudian pada titik 150 cm dari inlet kondisi di tiga lokasi tersebut mempunyai kecenderungan yang berbeda terutama pada lokasi titik bagian bawah menunjukkan suhu yang lebih rendah yaitu 80° C dibandingkan dengan titik bagian samping dan bagian atas, hal ini menunjukkan bahwa telah terbentuk lapisan kondensat pada titik bagian bawah.

Berdasarkan Grafik 4 dan Grafik 5 dapat dijelaskan bahwa temperatur di titik 100 cm dan 150 cm dari sisi masuk untuk ketiga posisi (bawah, samping dan atas) masih cukup tinggi yaitu berturut-turut 95° C, $96,5^{\circ}$ C, $98,7^{\circ}$ C. Hal ini menunjukkan bahwa uap mendominasi laju aliran yang terjadi di dalam pipa kondenser, akibatnya kestabilan aliran uap kondensat terganggu karena efek Bernoulli, sehingga

menyebabkan terjadinya aliran kondensat yang bergelombang. Dengan bertambahnya laju aliran uap maka akan menambah efek ketidakstabilan atau meningginya gelombang yang terjadi sehingga dapat membentuk aliran *wavy* (bergelombang). Pada percobaan aliran searah ini tidak ditemukan pola aliran *slug* yang merupakan awal dari terjadinya *water hammer*.

KESIMPULAN

Pola aliran yang teridentifikasi pada aliran dua fasa air-uap air (kondensat) dari hasil kondensasi uap pada pipa horisontal dengan aliran searah ini meliputi pola aliran *stratified*, *stratified-wavy*, *wavy*, *wavy to slug*. Pola sebaran temperatur pada peristiwa kondensasi pada pipa horisontal dengan aliran searah dipengaruhi oleh posisi aksial sepanjang pipa kondensasi, semakin 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 laju aliran massa uap masuk ternyata mempunyai pengaruh terhadap terbentuknya variasi pola aliran yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ren Bin, dkk, 2014, Experimental study on condensation of steam/air mixture in a horizontal tube, East China University of Science and Technology, Shanghai.
- Riverin, J.L., dkk. 2006. *Fluctuating forces caused by internal two-phase flow on bends and tees*. Journal of Sound and Vibration 298 (2006) 1088-1098.

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

Sukamta, 2010, Identifikasi Pola Aliran Dua Fasa Uap - Kondensat Berdasarkan Pengukuran Beda Tekanan pada Pipa Horisontal, Semesta Teknik, Yogyakarta

Sukamta, 2011, *Local Heat Transfer Measurements of Steam-Condensate Flow in a Horizontal Condenser Pipe*, *Proceeding of the 12th International Conference on QiR*, Bali – Indonesia.

Ugural, A. 1999. *Stresses in plates and shells 2nd edition*. McGraw-Hill Int. Edition. Singapore.

Wang, S.F., Ozama, M., & Shoji, M. 2002. *Fluctuating of Gas-Liquid Two Phase Flow Through an Impacting Junction*. *J. of Multiphase Flow* Vol.2 2007-2016.