

Profil Temperatur Terhadap Posisi *Circumferential* Pipa pada Proses Kondensasi Uap di dalam Pipa Horisontal

Sukamta¹, Indarto², Purnomo², Tri Agung Rohmat²

¹Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia, kode pos 55183, Tel/HP: 08157998996

²Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Gadjah Mada University
Jl. Grafika no. 2 Yogyakarta, kodepos 55581, Indonesia
Email : msukamta@gmail.com, sukamta@umy.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menjelaskan secara kuantitatif terjadinya pola aliran *slug* yang didefinisikan sebagai inisiasi *waterhammer*. Analisa dilakukan berdasarkan data profil temperatur pada *circumferential* pipa. Data tersebut diperoleh melalui eksperimen kondensasi uap di dalam pipa horisontal dengan pendinginan dari luar pipa, di mana uap mengalir pada pipa kondensor (pipa bagian dalam dari pipa *annulus*) kemudian didinginkan dengan air pendingin yang mengalir pada pipa *annulus* bagian luar. Dipilihnya cara ini agar penelitian ini semakin mendekati pada kasus nyata yang dapat terjadi di *hotleg pipe* dari sebuah *Pressurized Water Reactor* (PWR), dan mengingat kondensasi merupakan proses fisis yang begitu lengkap yang melibatkan fenomena perpindahan kalor dan perpindahan massa secara simultan sehingga banyak faktor mempengaruhinya, misalnya sifat fisis dan kimia uap, sifat embun, dan geometri alat. Untuk memudahkan permasalahan secara teknis maka pendinginan dilakukan dari luar pipa kondensor.

Alat pengambilan data terdiri atas pipa anulus bagian dalam dengan bahan tembaga ($d_{in} = 17.2$ mm, $d_o = 19$ mm) dengan panjang 1,8 m, sedangkan pipa anulus 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* (+) and *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* 5 Hz.

Dari hasil penelitian diperoleh bahwa temperatur tertinggi berada pada posisi 0° (atas), kemudian disusul posisi 90° (samping) dan 180° (bawah), hal ini menunjukkan bahwa uap lebih banyak bersentuhan dengan dinding pipa bagian atas yang kemudian terkondensasi dan jatuh atau mengalir melalui dinding bagian samping sebelum akhirnya jatuh ke bagian bawah. Dengan demikian temperatur terendah berada pada bagian bawah yang sekaligus menunjukkan terjadinya penumpukan kondensat, sehingga tebal atau tipisnya lapisan kondensat ditunjukkan oleh tinggi rendahnya temperatur kondensat bagian bawah. Tebal atau tipisnya kondensat inilah yang berpengaruh terjadinya pola aliran *slug* yang mampu menginisiasi terjadinya *water hammer*

Keywords: profil temperatur, slug, waterhammer, kondensasi uap, *circumferent*

Pendahuluan

Kondensasi merupakan proses fisis yang cukup menarik untuk dikaji, karena masalahnya yang begitu kompleks dan aplikasinya yang luas. Proses ini melibatkan perpindahan kalor dan massa secara simultan. Banyak faktor mempengaruhi koefisien perpindahan kalor selama proses kondensasi, seperti sifat fisis dan kimia uap, sifat embun, dan geometri saluran. Permukaan pengkondensi mungkin terbasahi seluruhnya oleh *condensate* (embun), ketika terjadi kondensasi lapisan (*film condensation*) atau tidak terbasahi sempurna manakala hanya terjadi kondensasi

butiran cairan (*dropwise condensation*). Embun dan uap dapat mengalir secara laminar atau turbulen. Uap mungkin terdiri dari lebih dari satu senyawa dan mungkin tidak semuanya dapat mengembun. Kondensasi homogen (*homogenous*) dapat terjadi ketika uap didinginkan sampai di bawah temperatur jenuhnya sampai menghasilkan *droplet nucleation*, disebabkan oleh campuran cucuran dua macam uap pada temperatur yang berbeda, pendinginan campuran *vapour-noncondensable* (*fog formation in the atmosphere*) atau penurunan tekanan tiba-tiba pada uap (*sudden depressurization of vapour*). Kebanyakan proses kondensasi adalah kondensasi heterogen, di mana *droplets* terbentuk dan tumbuh pada permukaan benda

padat. Pendinginan yang cukup diperlukan untuk kondensasi ini ketika permukaannya halus dan kering. Laju pertumbuhan *droplet* di dalam kondensasi heterogen dapat dimodelkan dengan menggunakan teori energi kinetik. Pada kenyataannya, sebagian besar proses kondensasi adalah *heterogenous*, dimana *droplet* terbentuk dan muncul pada permukaan benda padat. Pendinginan uap yang cukup dibutuhkan untuk memulai kondensasi ketika permukaannya halus dan kering. Kondensasi heterogen dapat memicu terbentuknya *dropwise* atau *film condensation*.

Kondensasi butiran (*dropwise condensation*) terjadi bila cairan kondensat jatuh membasahi permukaan dan membentuk lapisan (*film*). *Dropwise condensation* adalah cara perpindahan kalor yang paling efisien, di mana laju perpindahan kalor kondensasinya lebih besar daripada *filmwise condensation* (Ghiaasiaan, 2008). Selanjutnya, akumulasi *droplet* pada permukaan ini dapat menginisiasi terbentuknya *liquid film*. Kondensasi lapisan (*film condensation*) adalah cara kondensasi yang umum di dalam kebanyakan sistem. Kondensat dalam bentuk *droplet* membasahi permukaan, kemudian jatuh bergabung dan membentuk sebuah lapisan cairan. Lapisan cairan mengalir karena pengaruh gravitasi, gesekan uap dan sebagainya. Kondensasi lapisan ini banyak aplikasinya di dunia keteknikan (*engineering*). Pada aliran *liquid condensate* melibatkan fenomena seperti aliran laminar, gelombang (*wavy*), transisi laminar-turbulen, dan butiran jatuh pada permukaan lapisan cairan (*droplet entrainment at film surface*). Proses kondensasi *dropwise* dan *film*, keduanya melibatkan permukaan yang dingin dan padat. Pada kondenser, seperti pada *heat exchanger*, aliran fluida kondensasi dipisahkan dari aliran fluida pendingin dengan dinding pipa. Pada aplikasi yang sama, tetapi aliran kedua fluida kontak langsung adalah kondensasi pada percikan cair dingin lanjut (*subcooled liquid sprays*). Contoh lain adalah kondenser siklus Rankine terbuka (*open Rankine cycles*) seperti kondenser kontak langsung (*direct-contact condensers*) pada *ocean thermal energy conversion concept* (Ghiaasiaan dkk., 1991).

Berdasarkan uraian tersebut di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa koefisien perpindahan kalor kondensasi dipengaruhi oleh jenis kondensasi yang terjadi. Koefisien perpindahan kalor tertinggi terjadi pada peristiwa *dropwise condensation*, kemudian diikuti *droplet condensation* dan *film condensation*.

Ketika gas mengalir diatas permukaan cair dengan kecepatan yang relatif cukup besar pada pipa atau saluran horisontal, bidang pemisah gas dan zat cair menjadi berombak, yang kemudian meningkatkan kecepatan gas atau zat cair tersebut, dan akhirnya ombak menjadi tidak stabil dan membesar untuk mengisi semua bagian saluran / pipa. Hasilnya, transisi dari arus *stratified* bergelombang ke pola aliran sumbat likuid terjadi. Selama lebih dari 30 tahun, sejumlah penelitian baik eksperimental maupun teoritis telah dilakukan terkait dengan transisi ke pola aliran kantung. Sejumlah penelitian yang sama terkait dengan fenomena aliran arus berlawanan terbatas, yang umumnya dikenal dengan *flooding*, juga telah dilaksanakan selama periode yang sama. Kecuali penelitian yang paling baru dipublikasikan setelah tahun 1990, hampir sebagian besar teori tentang transisi aliran sumbat cairan telah secara teliti dilakukan oleh Kordyban (1990). Kordyban dan Ranov (1970) menyatakan bahwa pola aliran sumbat cairan mengikuti ketidakstabilan gelombang *Kelvin-Helmholtz*. Mereka mengakui kestabilan gelombang amplitudo tetap di lapisan film tipis. Wallis dan Dobson (1973) juga melakukan eksperimen dan analisis tentang transisi aliran sumbat likuid pada saluran segiempat horisontal dengan udara dan air pada tekanan atmosfer. Untuk menganalisa stabilitas gelombang, Taitel dan Dukler (1976) mempertimbangkan ketidakstabilan *Kelvin – Helmholtz* terjadi ketika tekanan rendah (*low pressure*) mengatasi efek stabilisasi pada puncak gelombang. Gardner (1979) juga mengembangkan teori inisiasi aliran sumbat cairan berdasarkan perubahan energi. Mishima dan Ishi (1980) di pihak lain, memperluas analisis Kordyban dan Ranov (1970) dan memperkenalkan konsep gelombang yang paling berbahaya (*most dangerous wave*), untuk memprediksi kriteria ketidakstabilan. Istilah fraksi hampa dari model Mishima dan Ishi identik dengan milik Wallis dan Dobson, hanya berbeda pada koefisien numerik dari model mereka. Perlu dicatat bahwa koefisien numerik dari model Chun (1996) adalah 0,47, yang menghasilkan derivasi teoritis, dimana koefisien numerik diperoleh Wallis dan Dobson (1973), Mishima dan Ishi (1980) secara berurutan adalah 0,5 dan 0,478.

Salah satu aplikasi yang paling penting dari kriteria transisi aliran sumbat cairan pada sistem reaktor nuklir adalah bahwa kriteria ini digunakan sebagai pengenalan kriteria *condensation-induced water-hammer* (CIWH), yang dikenal sebagai bentuk *water hammer* yang paling merusak dalam reaktor air tekan (PWR). Kriteria terbentuknya aliran kantung (*slug*) secara langsung digunakan sebagai kriteria mulai terjadinya CIWH (Chun dan Nam, 1992).

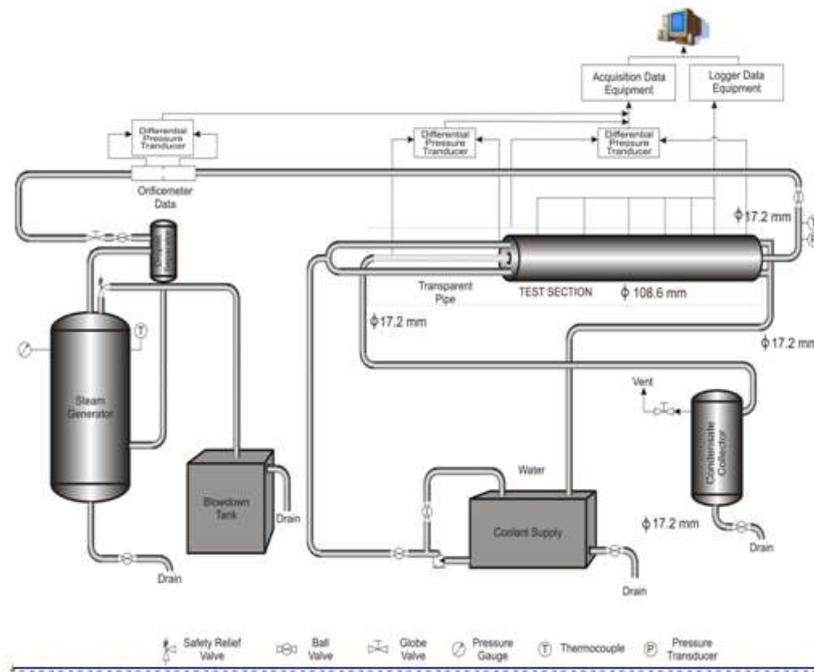
Berdasarkan uraian tersebut di atas maka dilakukan penelitian ini, dengan tujuan untuk menjelaskan secara kuantitatif terjadinya pola aliran *slug* yang didefinisikan

sebagai inisiasi *waterhammer* berbasis analisa data profil temperatur pada posisi *circumferential* pipa.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

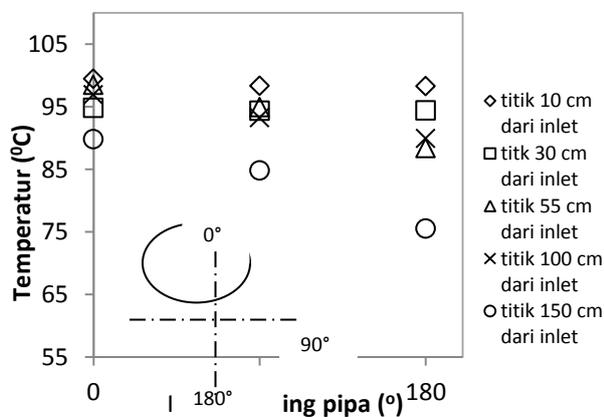
Bahan yang digunakan dalam hal ini adalah air murni (H₂O), yang kemudian dipanaskan dengan menggunakan *boiler* untuk menghasilkan uap air yang kemudian dikondensasikan untuk membentuk aliran uap-kondensat pada pipa horisontal, dan air yang digunakan sebagai pendingin pada pipa anulus bagian luar. Alat pengambilan data seperti ditunjukkan pada

gambar 1, terdiri atas pipa anulus bagian dalam dengan bahan tembaga ($d_{in} = 17.2 \text{ mm}$, $d_o = 19 \text{ mm}$) dengan panjang 1,8 m, sedangkan pipa anulus bagian luar adalah *Galvanized Iron Pipe* ($d_{in} = 108.3 \text{ mm}$, $d_o = 114.3 \text{ mm}$) dengan panjang 1,6 m. Penelitian ini dilakukan pada tekanan statis dan temperatur sebelum memasuki pipa uji ialah $P_s=108,825 \text{ kPa}$ $T=119,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Termokopel tipe 36 TT OMEGA dengan material *chromel* (+) and *alumel* (-) digunakan untuk mendeteksi penyebaran temperatur yang terjadi di sepanjang pipa ($L=1,6 \text{ m}$). Peralatan akuisisi data seri RX 40 (OMRON, 20 Channels) digunakan untuk merekam data temperatur dengan *sampling rate* 5 Hz.



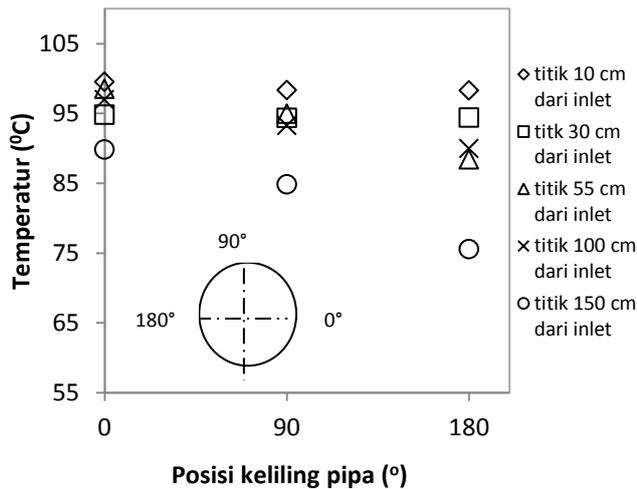
Gambar 1. Skema instalasi alat uji

Hasil dan Pembahasan



Gambar 2. Tipikal profil temperatur terhadap posisi keliling pipa ($\dot{m}_{st} = 6,5 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$, $\dot{m}_{co} = 4,23 \times 10^{-1} \text{ kg/s}$).

Profil temperatur terhadap posisi keliling pipa secara tipikal dapat dilihat pada gambar 2 dan 3. Dari gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa temperatur tertinggi berada pada posisi 0° (atas), kemudian disusul posisi 90° (samping) dan 180° (bawah), hal ini mengindikasikan bahwa uap lebih banyak bersentuhan dengan dinding pipa bagian atas yang kemudian terkondensasi dan jatuh atau mengalir melalui dinding bagian samping sebelum akhirnya jatuh ke bagian bawah. Dengan demikian temperatur terendah berada pada bagian bawah yang sekaligus menunjukkan terjadinya penumpukan kondensat, sehingga tebal atau tipisnya lapisan kondensat ditunjukkan oleh tinggi rendahnya temperatur kondensat bagian bawah.



Gambar 3. Tipikal profil temperatur terhadap posisi keliling pipa ($\dot{m}_{st} = 7,6 \times 10^{-3}$ kg/s, $\dot{m}_{co} = 4,23 \times 10^{-1}$ kg/s).

Tebal atau tipisnya kondensat inilah yang berpengaruh terjadinya pola aliran *slug* yang mampu menginisiasi terjadinya *water hammer*.

Debit air pendingin mulai variasi laju aliran uap masuk terkecil ($\dot{m}_{st} = 1,6 \times 10^{-3}$ kg/s) sampai dengan terbesar ($\dot{m}_{st} = 7,6 \times 10^{-3}$ kg/s) dijaga konstan yaitu $4,23 \times 10^{-1}$ kg/s, demikian juga sebaran temperaturnya mempunyai pola kecenderungan yang sama, di mana semakin jauh dari inlet temperaturnya semakin menurun dengan membentuk garis linear, temperatur tertinggi 31,67°C (pada titik 10 cm dari sisi masuk) dan terendah 27,02°C (pada titik 150 cm dari sisi masuk) serta rerata 28,96°C.

Kesimpulan

Dari uraian tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa profil temperatur terhadap posisi keliling pipa (*circumferential*) tertinggi berada pada posisi 0° (atas), kemudian disusul posisi 90° (samping) dan 180° (bawah). Dengan demikian temperatur terendah berada pada bagian bawah yang sekaligus menunjukkan terjadinya penumpukan kondensat. Tebal atau tipisnya kondensat inilah yang berpengaruh terjadinya pola aliran *slug* yang mampu menginisiasi terjadinya *water hammer*.

Ucapan Terima kasih

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Republik Indonesia

yang telah memberikan kesempatan dan pendanaan pada penelitian ini.

Nomenklatur

- \dot{m} Massa aliran (kg/s)
- P Tekanan (Nm⁻²)
- d Diameter (m)
- C Celcius

Greek letters

- ϕ Diameter (m)

Subscripts

- in input
- o output
- s Statis
- st Steam
- co Coolant

Referensi

- Ghiaasiaan, M.S., 2008, *Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation in Conventional and Miniature System*, Cambridge University Press, New York, pp 112 – 492
- Ghiaasiaan, M.S., Wassel, A.T., dan Lin, C.S., 1991, *Direct Contact Condensation in the presence of noncondensables in OC-O TEC Condensers*, J. Solar Energy Eng.-113, 228-235
- Gardner, G.C.: "Onset of Slugging in Horizontal Ducts" Int. J. Multiphase Flow 5 (1979) 201-209
- Kordyban, E. S. & Ranov, T., 1970, *Mechanism of Slug Formation in Horizontal Two-Phase Flow*. J. Basic Engng 92, pp 857-864.
- Kordyban, E. S., 1990, *Horizontal slug Flow : A Comparison of Existing Theories*, ASME J. Fluids Eng., Vol. 112, pp 74-83
- Wallis, G. B. & Dobson, J. E. 1973. *The onset of slugging in horizontal stratified air-water flow*. Int. J. Multiphase Flow 1, 173-193.
- Taitel, Y., and A.E. Dukler, 1976. *A Theoretical Approach to the Lockhart-Martinelli Correlation for Stratified Flow*, Int. J. Multiphase Flow, 2, pp 591

- Mishima, K. & Ishii, M. 1980 Theoretical prediction of onset of horizontal slug flow. *ASME J. Fluids Eng., ASME Trans.* **102**, 441-445.
- Chun, M.H., Lee, B.R., Nam, H.Y., 1996. *Theoretical and experimental investigation of onset slugging in horizontal stratified air-water countercurrent flow.* Int. Commun. Heat Transfer 23, pp 11-22.
- Chun, M.H., Nam, H.Y., 1992. *Analysis of water hammer Induced by Steam-water counterflow in a long horizontal pipe.* Int. Commun. Heat Transfer 19, 507-518.