

PERKIRAAN FLUKS PANAS KRITIS PADA PIPA UJI SISTEM ENGINEERING LOOP NILO I

R. Suryawinata

Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PERKIRAAN FLUKS PANAS KRITIS PADA PIPA UJI SISTEM ENGINEERING NILO I. Proses perpindahan panas dari kelongsong elemen bakar ke medium pendingin dalam suatu PLTN dapat disimulasikan pada NILO I. Kanal air diantara elemen bakar di dalam teras reaktor diwakili oleh suatu pipa uji terbuat dari bahan SS 316 yang dipanasi energi listrik arus searah. Salah satu fenomena yang bisa terjadi pada fluida yang mengalir di dalam pipa uji yang dipanaskan adalah tercapainya kondisi fluks panas kritis, yang diawali dengan berkurangnya koefisien perpindahan panas lokal secara tajam, karena terbentuknya selimut uap pada permukaan dalam pipa uji, mengakibatkan temperatur pipa uji naik tajam. Kondisi ini perlu diperhitungkan karena akan mengakibatkan kerusakan/melelehnya permukaan pemanas. Mengingat kelongsong bahan bakar merupakan pertahanan lapis pertama yang harus bisa mencegah keluarnya produk fisi yang membahayakan, maka perlu dilakukan penelitian yang mendalam mengenai fenomena ini. Dalam makalah ini akan dilakukan komputasi prakiraan fluks panas kritis pada pipa uji vertikal NILO I untuk parameter operasi bervariasi dengan menggunakan korelasi Biasi et al. Proses pemanasan akan mengakibatkan berubahnya sifat-sifat termodinamik air yang biasanya dapat dilihat dari tabel air dan uap. Dengan mengetahui temperatur dan tekanan, besaran-besaran fisis tersebut di atas dihitung, sehingga dalam perhitungan fluks panas kritis tidak diperlukan tabel lagi. Sistematisa perhitungan terdiri dari tiga bagian, pertama memanggil program untuk menghitung besaran-besaran fisis air dan uap untuk temperatur dan tekanan masukan yang dikehendaki, kedua memasukkan variasi daya pipa uji dan laju aliran massa fluida, dan yang ketiga melakukan perhitungan fluks panas kritis dengan data yang diperoleh di atas. Dari hasil perhitungan diperoleh hubungan/kurva-kurva antara fluks panas kritis terhadap *inlet sub-cooling*, kualitas massa keluaran, panjang pendidihan dan tekanan, yang menggambarkan karakteristik fluks panas kritis pada pipa uji vertikal NILO I. Program ini bermanfaat untuk memperkirakan fluks panas kritis pada NILO I sehingga membantu kelancaran operasi NILO I.

ABSTRACT

CRITICAL HEAT FLUX PREDICTION ON TEST SECTION OF ENGINEERING LOOP NILO I SYSTEM. The heat transfer process from fuel elements cladding to the cooling medium in a nuclear power plant can be simulated in NILO I. A test section representative one of the water among fuel elements. It is made from SS316 material and heated by direct current. One's of fenomena on fluid flow in heated test section is critical heat flux reached which it's indicated by decrease of the local heat transfer coefficient sharply due to steam cover on the inner test section surface. Consequently temperature of the test section increases sharply. This condition must be calculated because of damage or melt of the heating surface. Considering fuel elements cladding represent the first barrier which must able to prevent dangerous fission product leakage, so it's needed to investigate this fenomena. In this paper will be carry out computation prediction of critical heat flux on the vertical test section NILO I for varied operation parameters by using Biasi et. al. correlation. Heating process will result in thermodynamics properties changed of the water that usely can be read in the tables of water and steam. By knowing temperature and pressure, above physics properties can be calculated, so not need the table in calculating of the critical heat flux. Systematically calculation consist of 3 parts, the first call a program to calculate physics properties of water and steam for known temperature and pressure, the second to introduce for varried power test section and flow rates and the third calculate critical heat flux with above data. From the calculations are got the relationship/curve of graph among critical heat flux and inlet subcooling, mass quality, boiling length and pressure that represent characteristic of the critical heat flux in the vertical test section of NILO I. This program was usefull for prediction of the critical heat flux in NILO I so it will contribute carry on the operation of NILO I.

PENDAHULUAN

Energi yang dihasilkan oleh suatu reaksi pembelahan inti dalam teras reaktor nuklir adalah berupa energi panas. Energi tersebut dipindahkan ke dalam medium pendingin dengan perantara kelongsong bahan bakar. Kelongsong bahan bakar merupakan pertahanan lapis pertama yang harus bisa mencegah keluarnya produk fisi yang membahayakan sehingga perlu dijaga integritasnya. Salah satu penyebab kerusakan kelongsong bahan bakar adalah akibat temperatur permukaan kelongsong naik tajam melampaui batas kekuatan bahan. Hal ini bisa terjadi karena tercapainya kondisi fluks panas kritis, yang diawali dengan berkurangnya koefisien perpindahan panas lokal secara tajam akibat terbentuknya selimut uap pada permukaan kelongsong. Untuk mempelajari terjadinya fluks panas kritis pada teras suatu PLTN dapat dilakukan dengan pengukuran dalam teras reaktor atau dengan menggunakan simulasi teras reaktor daya. NILO I adalah merupakan simulasi teras reaktor daya. Proses perpindahan panas dari elemen bakar ke medium pendingin dalam teras reaktor diwakili oleh suatu pipa uji yang merupakan satu kanal air diantara elemen bakar. Pipa uji terbuat dari bahan SS-316 yang dipanasi arus listrik searah.

Untuk bisa memperkirakan kondisi operasi dimana tercapai kondisi fluks panas kritis perlu analisis dan perhitungan. Beberapa korelasi tersedia untuk memperkirakan fluks panas kritis. Dalam makalah ini akan dihitung fluks panas kritis pada pipa uji vertikal NILO I dengan menggunakan korelasi Biasi et al. Korelasi ini dipilih karena memiliki keuntungan sebagai fungsi kontinu terhadap variasi tekanan dan memenuhi syarat untuk data teknis pipa uji NILO I beserta parameter operasinya. Program ini membantu memperkirakan fluks panas kritis pada pipa uji NILO I sehingga memudahkan tercapainya sasaran yang diinginkan dalam eksperimen NILO I. Makalah ini dibagi dalam PENDAHULUAN, TEORI DASAR PERHITUNGAN FLUKS PANAS KRITIS, HASIL DAN PEMBAHASAN dan ditutup dengan KESIMPULAN.

TEORI DASAR PERHITUNGAN FLUKS PANAS KRITIS

NILO I adalah sarana penelitian yang berhubungan dengan hidrolika panas yang merupakan simulasi teras reaktor daya.

Air bertekanan dipompakan ke dalam penukar panas kemudian dipanaskan dalam pemanas awal untuk selanjutnya dialirkan ke dalam pipa uji yang mendapat pemanasan secara seragam sepanjang pipa uji. Pada kondisi bertekanan, kecepatan aliran dan temperatur masukan air tetap, pipa uji dipanaskan secara perlahan-lahan sampai terjadi proses pendidihan yaitu terjadinya perubahan fasa cair ke uap. Proses ini berlangsung dalam keadaan yang masih tetap sama sampai daya tertentu, karena bila panas masuk masih tetap ditingkatkan akan terjadi perubahan proses pendidihan. Daerah sebelum terjadi perubahan tersebut merupakan daerah yang paling baik dalam hal perpindahan panas, karena kecenderungan pemecahan lapisan laminar pada permukaan metal menjadi turbulen. Dalam daerah ini penguapan ataupun pembentukan gelembung uap belum tumbuh besar dan kontak fluida dengan dinding metal masih terjadi. Setelah panas masuk ditingkatkan lagi, gelembung uap akan bertambah besar sehingga tidak terjadi kontak antara fluida dengan metal secara baik, yang mengakibatkan perpindahan panas yang tidak baik, demikian pula koefisien perpindahan panasnya.

Fluks panas akan tetap naik selama masih ada kontak antara fluida dengan metal, dan akhirnya sampai pada harga fluks panas yang mengakibatkan terjadinya perubahan proses pendidihan dengan bertambah besarnya gelembung uap dan menutup permukaan perpindahan panas. Perubahan proses pendidihan akan tampak setelah daerah *nucleate boiling* dilewati, sehingga terjadi kenaikan temperatur permukaan metal dengan cepat dan ini akan dapat merusakkan elemen pemindah panas sampai dicapai harga fluks panas tertinggi. Selanjutnya fluks panas akan menurun walaupun panas masih tetap dinaikkan. Kondisi pada fluks panas tertinggi tersebut adalah merupakan kondisi kritis karena akan mulai terjadi kerusakan elemen pemindah panas, sehingga panas tidak bisa dipindahkan dengan konveksi paksa karena terhalang oleh gelembung uap. Fluks panas pada harga tertinggi tersebut inilah yang disebut sebagai fluks panas kritis.

Untuk menghitung besarnya fluks panas kritis pada suatu kondisi aliran tertentu dapat digunakan beberapa korelasi pendekatan. Korelasi pendekatan yang digunakan dalam perhitungan fluks panas kritis ini adalah korelasi

pendekatan Biasi et al. Korelasi ini dipilih karena memiliki keuntungan, yaitu merupakan fungsi kontinyu dari variasi tekanan dan berlaku untuk spesifikasi teknis pipa uji NILO I serta *range* parameter operasi NILO I.

Hukum yang digunakan.

Dalam menganalisis fluks panas kritis digunakan hukum-hukum:

- kekekalan massa
- kekekalan energi
- persamaan kesetimbangan panas

Asumsi yang digunakan

Beberapa asumsi yang diambil dalam perhitungan fluks panas kritis adalah:

- pipa uji dalam posisi vertikal
- pemanasan konstan dan seragam sepanjang pipa uji
- penampang pipa konstan
- aliran stasioner
- aliran stabil dan tidak terjadi osilasi
- tekanan sistem konstan
- fluida kerja masuk dalam keadaan subdingin
- fluks panas kritis mula-mula terjadi pada ujung keluar dari pipa uji

Faktor yang mempengaruhi fluks panas kritis

Fluks panas kritis dipengaruhi oleh beberapa faktor yakni:

- sifat fluida
- kecepatan aliran (G), enthalpi masukan subdingin ($\Delta_i \text{Sub}$)_i
- distribusi fasa-fasa
 - a. geometri, panjang pipa (z) diameter pipa (D)
 - b. posisi pipa (vertikal, horizontal dan miring)
- distribusi fluks panas
- kondisi permukaan
- kestabilan hidrolis

Secara umum dipostulasikan bahwa fluks panas kritis untuk air yang mengalir dalam pipa yang dipanaskan seragam adalah merupakan fungsi dari lima variabel bebas yaitu

$$\phi_{\text{Crit}} = f(G, (\Delta T \text{ sub})_i, p, D, z) \quad (2.1)$$

Oleh karena panas lebih dari permukaan pipa pada kondisi kritis bervariasi dimulai pada seksi keluaran pipa maka korelasi dikaitkan dengan kondisi keluaran. Keadaan termodinamik pada seksi keluaran bisa dalam keadaan subdingin atau jenuh. Kondisi keluaran dikarakterisasikan dalam enthalpi fluida $i(z)$ atau kualitas massa $x(z)$. Masing-masing bergantung pada variabel yang dikaitkan dengan masukan

subdingin melalui persamaan kesetimbangan panas sebagai berikut:

$$i(z) = i_f + 4 \phi z / DG - (\Delta T \text{ Sub})_i \text{ Cpf} \quad (2.2)$$

$$x(z) = 1/i_{fg} [4 \phi z / DG - (\Delta T \text{ Sub})_i \text{ Cpf}] \quad (2.3)$$

Persamaan (2.1) dapat juga dinyatakan dengan persamaan:

$$\phi_{\text{Crit}} = f(G, i(z), p, D, z) \quad (2.4)$$

atau

$$\phi_{\text{Crit}} = f(G, x(z), p, D, z) \quad (2.5)$$

dengan pernyataan

- ϕ = fluks panas seragam
= daya pipa uji/luas permukaan pipa uji
- $(\Delta T \text{ Sub})_i$ = temperatur jenuh - temperatur masukan
- Cpf = panas spesifik fluida

Fluks panas kritis tidak akan terjadi apabila temperatur permukaan pemanas di bawah temperatur jenuh. Maka kemungkinan terjadinya fluks panas kritis minimum diberikan oleh persamaan:

$$(\phi_{\text{Crit}})_{\text{min}} = (\Delta T \text{ Sub})_i / 4z / (G \text{ Cpf} D) + 1 / h_{fo} \quad (2.6)$$

Kondisi fluks panas kritis harus terjadi pada atau sebelum semua cairan yang melewati pipa diuapkan ($x(z) = 1$). Harga fluks panas kritis maksimum diberikan oleh persamaan:

$$(\phi_{\text{Crit}})_{\text{mak}} = GD i_{fg} / 4z [1 + \text{Cpf} (\Delta T \text{ Sub})_i / i_{fg}] \quad (2.7)$$

Dengan demikian daerah yang memungkinkan kondisi fluks panas kritis terletak diantara kedua *slope* persamaan (2.6) dan persamaan (2.7).

Pengamatan bahwa fluks panas kritis untuk kualitas uap keluaran yang diberikan tidak bergantung pada panjang pipa mempunyai implikasi yang menarik. Pipa dapat dibagi menjadi dua bagian; bagian pertama (Z_{sc}) dinaikkan sampai kondisi jenuh ($x(Z_{sc})=0$) dan bagian kedua (Z_{sat}) kualitas uap naik dari nol sampai $x(z)$, kualitas uap keluaran yang berhubungan dengan kondisi kritis. Maka diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$z = Z_{sc} + Z_{sat} \quad (2.7)$$

$$Z_{sc} = DG (\Delta_i \text{Sub})_i / 4\phi_{\text{Crit}} \quad (2.8)$$

$$Z_{sat} = x(z)DG i_{fg} / 4\phi_{crit} \quad (2.9)$$

Korelasi Biasi et al

Korelasi yang bersifat empiris dibuat tanpa asumsi apapun mengenai mekanisme yang terlibat dalam kondisi fluks panas kritis tetapi semata-mata hanya dengan cara coba-coba hubungan antara fluks panas kritis dengan variabel bebas seperti diusulkan oleh Biasi et al.

Dengan menggunakan korelasi Biasi et al fluks panas kritis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\phi_{crit} = 1,883 \times 10^3 / D^n G^{1/6} [f(p)/G^{1/6} - x(z)] \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) berlaku untuk daerah kualitas uap rendah, sedangkan untuk daerah kualitas uap tinggi menggunakan persamaan:

$$\phi_{crit} = 3,78 \times 10^3 h(p)/D^{0,6} G^{0,6} [1-x(z)] \quad (2.11)$$

Dengan $n = 0,6$ untuk $D < 1$ cm

$$f(p) = 0,7249 + 0,099 p \exp(0,032 p)$$

$$h(p) =$$

$$- 1,159 + 0,149 p \exp(-0,019p + 8,99p / (10+p^2)) \quad (2.12)$$

Persamaan 2(11) berlaku untuk :

$$\begin{aligned} 0,3 \text{ cm} &< D < 3,75 \text{ cm} \\ 20 \text{ cm} &< z < 600 \text{ cm} \\ 2,7 \text{ bar} &< p < 140 \text{ bar} \\ 10 \text{ g/cm}^2\text{s} &< G < 600 \text{ g/cm}^2\text{s} \\ 1/(1+\rho_f/\rho_g) &< x(z) < 1 \end{aligned}$$

Dari kedua persamaan di atas diambil harga fluks panas kritis yang lebih besar.

Perhitungan dan hasil

Dalam makalah ini akan dilakukan perhitungan fluks panas kritis pada pipa uji vertikal dengan menggunakan korelasi Biasi et al. Data yang dibutuhkan untuk analisis fluks panas kritis adalah :

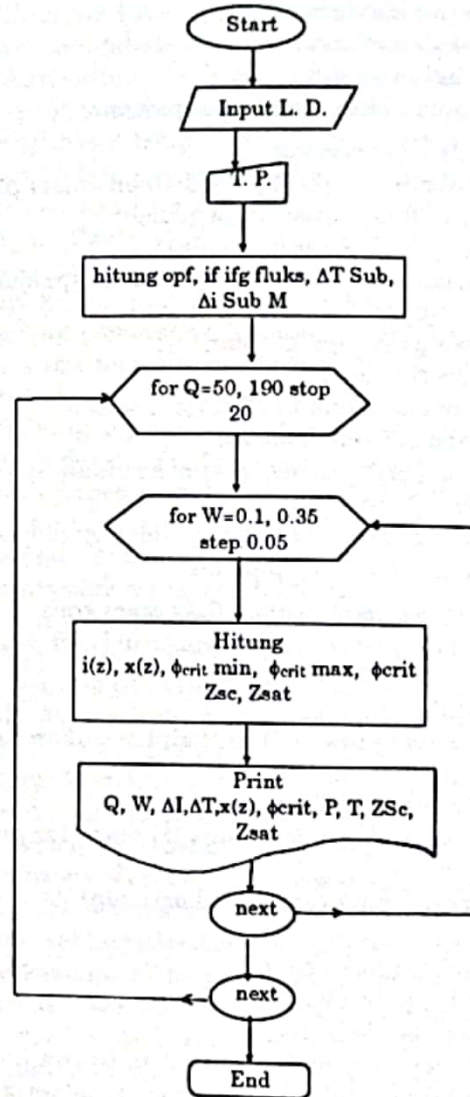
Geometri pipa uji	:	tubular
Material pipa uji	:	SS-316
Panjang pipa uji	:	600 cm
Diameter luar ppa	∴	10 mm
Diameter dalam pipa	:	8 mm
Range tekanan operasi	:	50-100 bar
Range daya pipa uji	:	50-200 kW
Range kecepatan massa fluida	:	0,10-0,35 kg/s

Permasalahan yang akan dibahas adalah memperkirakan fluks panas kritis pada fluida

yang dipanaskan dan mengalir pada pipa uji. Kondisi awal fluida diketahui yakni temperatur, kecepatan massa, tekanan dan daya pipa uji.

Diagram alir

Untuk mempermudah perhitungan maka dibuat diagram alir sebagai berikut:



Prosedur

Prosedur yang dilakukan dalam melakukan perhitungan adalah:

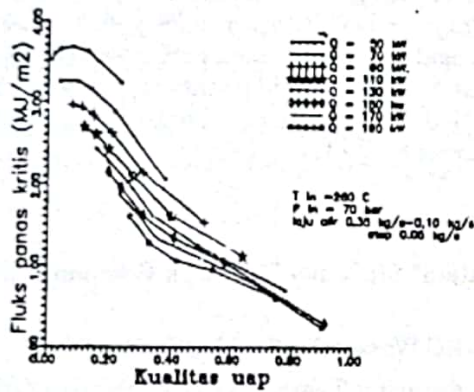
- Mendaftarkan data yang tersedia yaitu:
 - Kisaran panas masuk (Q)
 - Kisaran kecepatan massa (M)
 - Kisaran tekanan masuk (P)
 - Temperatur fluida masukan (T)
- Memanggil program untuk menghitung sifat termodinamika air dan uap pada temperatur masukan (T_m) dan tekanan (P), untuk

memperoleh enthalpi jenuh, panas laten penguapan, panas spesifik, dan temperatur jenuh.

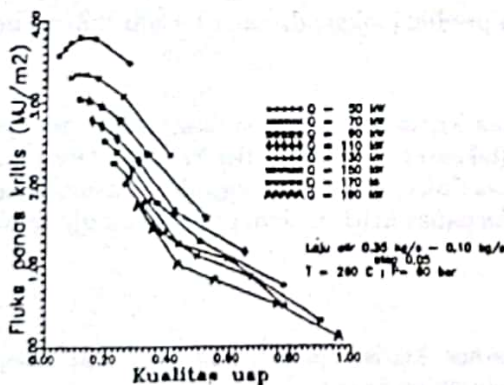
- Memasukkan harga-harga tersebut di atas untuk masukan pada komputer. Selanjutnya komputer akan melakukan pengolahan secara numerik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan fluks panas kritis dapat dilihat hubungan antara ϕ_{Crit} dengan kualitas uap untuk daya pipa uji dan laju aliran massa fluida bervariasi serta tekanan yang berbeda pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2, sedangkan hubungan antara ϕ_{Crit} terhadap enthalpi masukan *subcooling* dapat dilihat pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4.

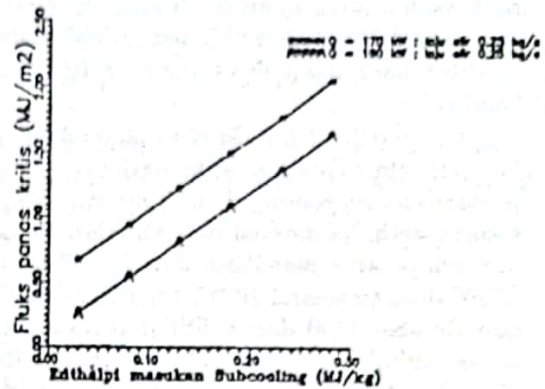


Gambar 2.1. Fluks panas kritis vs kualitas uap

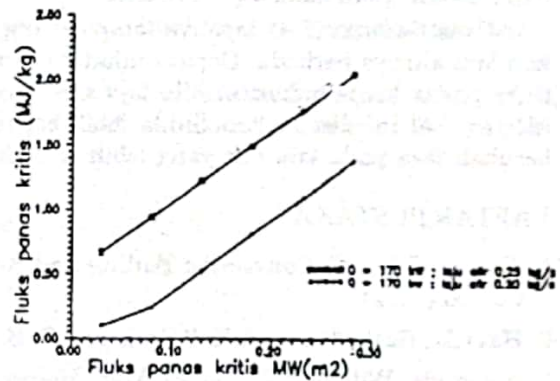


Gambar 2.2. Fluks panas kritis vs kualitas uap

Dari Gambar (2.1) dan Gambar (2.2) dapat dilihat bahwa makin besar daya pipa uji maka fluks panas kritis makin kecil, dan kualitas uap



Gambar 2.3. Fluks panas kritis vs enthalpi masukan *subcooling*



Gambar 2.4. Fluks panas kritis vs enthalpi masukan *subcooling*

yang dihasilkan bertambah besar. Pada daya pipa uji tinggi, turunnya fluks panas kritis pada kualitas uap yang tinggi tidak tajam tapi melandai. Tiap kurva tersebut adalah untuk daya yang tetap dan laju alir yang menurun, bervariasi dari laju alir 0,35 kg/s sampai 0,10 kg/s dengan selang 0,05 kg/s. Dengan laju alir yang kecil maka fluida akan lebih mudah untuk berubah fasa, sehingga terbentuknya selimut uap tidak memerlukan fluks panas yang tinggi bila dibandingkan dengan laju alir yang lebih besar.

Perbedaan Gambar (2.1) dan Gambar (2.2) adalah tekanan operasinya. Gambar (2.1) tekanan operasi 70 bar sedangkan Gambar (2.2) tekanannya 60 bar. Dari kedua gambar dapat dilihat bahwa harga fluks panas kritis pada Gambar (2.2) lebih rendah dibandingkan dengan Gambar (2.1). Dengan turunnya tekanan

maka fluida akan lebih cepat berubah fasa karena titik didihnya akan lebih rendah, kualitas uap yang dihasilkan makin besar. Makin besar kualitas uap maka fluks panas kritis makin rendah.

Gambar (2.3) dan Gambar (2.4) adalah hubungan antara fluks panas kritis dengan enthalpi masukan *subcooling*. Untuk menaikkan perbedaan enthalpi didapat dengan jalan menaikkan temperatur masukan, dari 230°C sampai 270°C dengan selang 10 °C. Dari Gambar (2.3) dan Gambar (2.4) dapat dilihat bahwa makin besar enthalpi masukan (Δi_{Sub}) maka fluks panas kritis makin besar. Makin besar daya pipa uji maka fluks panas kritis makin rendah. Gambar (2.3) laju alirnya sama tetapi dayanya berbeda. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada daya 190 kW fluks panas kritis lebih rendah dibandingkan pada daya 170 kW.

Pada Gambar (2.4) dayanya tetap sedangkan laju alirnya berbeda. Dapat dilihat bahwa fluks panas kritis menurun bila laju alir berkurang, hal ini disebabkan fluida lebih cepat berubah fasa pada laju alir yang lebih rendah

sehingga kualitas uap yang dihasilkan lebih besar. Dari Gambar (2.1) dan Gambar (2.2) menunjukkan bahwa makin besar kualitas uap maka fluks panas kritis makin kecil.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dan perhitungan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada kondisi temperatur dan tekanan masukan tetap maka makin tinggi daya pipa uji maka makin rendah fluks panas kritis dan makin tinggi kualitas uap.
2. Untuk daya, tekanan dan temperatur masukan tetap maka fluks panas kritis makin kecil dengan menurunnya laju alir fluida.
3. Penurunan tekanan akan menyebabkan fluks panas kritis naik.
4. Makin tinggi enthalpi masukan *subcooling* makin tinggi fluks panas kritis.
5. Program perhitungan fluks panas kritis ini sangat membantu memperkirakan fluks panas kritis untuk mengantarkan eksperimen NILO I, sehingga membantu kelancaran operasi NILO I.

DAFTAR PUSTAKA

1. Collier, John, G., "Convective Boiling and Kondensation" McGraw- Hill Book Company LTD., Oxford (1972).
2. Haar, L., Gallagher, J. S., Kell Springer, G. S., NBS/NRC Wasserdamftafeln, Verlag (1988).
3. Reynolds, William, C. and Perkins, Henry, C., Engineering Thermodynamik, McGraw-Hill-Kogakusha, Ltd., International Student Edition, Tokyo (1977).

DISKUSI

Antariksawan:

Dengan program yang Bapak buat apakah bisa kita prediksi lokasi dimana terjadi critical heat fluks (z)?

R. Suryawinata:

Dari program ini bisa diplot hubungan fluks panas kritis terhadap panjang jenuh maupun kualitas uap kritis terhadap panjang jenuh. Letak (lokasi) terjadinya fluks kritis terletak pada panjang jenuh. Dalam perhitungan ini diasumsi bahwa fluks panas kritis terjadi mula-mula pada ujung keluaran pipa uji, jadi secara umum lokasi fluks panas kritis terjadi pada/dekat ujung pipa keluaran.

Aliq:

Korelasi yang dipakai untuk perhitungan fluks panas kritis, apakah sudah sesuai dengan dimensi dan geometri kanal uji yang terdapat di *engineering loop* ?

R. Suryawinata:

Korelasi Biasi dipilih memang karena sesuai benar dengan dimensi dan geometri kanal uji NILO I. Dari korelasi Biasi:

0,3 cm	$< D < 3,75$ cm	NILO I D = 8 mm
20 cm	$< Z < 600$ cm	NILO I Z = 600 cm
2,7 bar	$< p < 140$ bar	NILO I dari 30 s/d 110 bar

$10 \text{ g/cm}^2\text{s} < G < 600 \text{ g/cm}^2\text{s}$ NILO I G maksimum $550 \text{ g/cm}^2\text{s}$

Kurnia Putranta:

Apakah sudah dicoba menghitung dengan korelasi-korelasi yang lain, selain Biasi ?

R. Suryawinata:

Belum pernah dicoba dengan korelasi yang lain. Korelasi Biasi dipilih karena cocok dengan data teknis pipa uji NILO I beserta parameter operasinya. Berdasarkan acuan dari ribuan data yang diuji sebagian besar (85,5 %) terletak/terkorelasi dengan kesalahan $\pm 10\%$.

Ija Darmana:

Standar batasan-batasan uap yang rendah dan tinggi serta contohnya.

R. Suryawinata:

Dalam acuan tidak disebutkan batasannya, tapi saya rasa karena fluks panas kritis bisa juga terjadi pada daerah *subcooling* jadi jelas disini kualitas uapnya tergolong rendah, sedangkan yang tinggi pada daerah *saturated*. Pada perhitungan dari dua persamaan dipilih fluks panas kritis tertinggi.

M. Yusn Naim:

Parameter apa yang digunakan untuk menentukan batasan kualitas uap tinggi dan rendah?

R. Suryawinata:

Tidak ada disebutkan batasannya dalam acuan, tapi disebutkan bahwa fluks panas kritis bisa terjadi pada daerah *subcooled* dan *saturated*. Pada daerah *subcooled* kualitas rendah (DNB), sedangkan pada *saturated*, kualitas tinggi (dry out).