

PREDIKSI KESELAMATAN TERMALHIDROULIK TERAS REAKTOR KARTINI

Edi Trijono Budisantoso

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan
Jl. Babarsari PO.Box: 6101 YKBB. Jogjakarta, 55281
E.mail: edi-t@batan.go.id

ABSTRAK

PREDIKSI KESELAMATAN TERMALHIDROULIK TERAS REAKTOR KARTINI. Reaktor Kartini adalah reaktor riset tipe kolam dengan pendinginan teras berdasar pada proses konveksi alam. Sirkulasi air oleh pompa pendingin berfungsi memelihara suhu air kolam reaktor stabil pada suhu lingkungan dan suhu bahan bakar terpelihara oleh sirkulasi konveksi alam di dalam teras reaktor. Kecepatan aliran konveksi alam dipengaruhi oleh perbedaan suhu air pada saat awal menerima panas dengan suhu air hasil pemanasan di teras dan nilai koefisien konveksi air. Dalam analisis keselamatan diberlakukan batasan bahwa air sirkulasi konveksi alam selalu dalam fase cair (tidak mendidih). Berdasar pada pengukuran suhu pendingin pada saat masuk teras dan suhu poros bahan bakar pada operasi 100 kW dapat ditentukan kecepatan aliran konveksi alam yang terjadi pada kanal bahan bakar-air. Kecepatan aliran konveksi alam yang terjadi pada kanal bahan bakar-air yang terpanas (hot channel) digunakan sebagai dasar prediksi distribusi suhu dari air pendingin sampai poros bahan bakar dan distribusi suhu bulk air pendingin sepanjang penerimaan panas dari bahan bakar beserta distribusi suhu pada sepanjang poros bahan bakar. Dari hasil pengukuran suhu air pada saat masuk kanal bahan bakar-air dan pengukuran suhu pada poros bahan bakar pada operasi 100 kW, kecepatan aliran pendingin konveksi alam terhitung sebagai 14.5 cc/det. Dari perhitungan menghasilkan kesimpulan bahwa dengan menggunakan kondisi pendinginan yang terpasang dapat menghasilkan suhu pertengahan poros bahan bakar mencapai 250 °C dan suhu air pendingin keluar dari hot channel teras reaktor mencapai 102 °C bilamana reaktor dioperasikan sampai pada daya 190 kW steady state. Suhu air tersebut menjadi batas pendidihan air pada tekanan hidrostatik ~ 1.5 atm, sedangkan batas suhu metalurgi bahan bakar reaktor Kartini adalah(3) 750 °C. sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan bahan bakar pada suhu 250 °C masih dalam batas keselamatan metalurginya. Akan tetapi reaktor Kartini mempunyai daya nominal yang diizinkan adalah 100 kW sehingga pengoperasian reaktor pada daya tersebut diperhitungkan akan memenuhi kriteria keselamatan termohidroulik karena menghasilkan suhu poros bahan bakar 148 °C dengan suhu fluida pendingin mencapai 71 °C ketika keluar dari teras reaktor.

Kata kunci :termahidroulika, konveksi alam, keselamatan, teras reaktor nuklir, batang bahan bakar

ABSTRACT

TERMALHIDROULIC SAFETY PREDICTION OF KARTINI REACTOR CORE. Kartini reactor is a pool type research reactor with core cooling based on natural convection process. Water circulation by coolant pump used to maintain pool water reactor temperature stable at ambient temperature and fuel temperature maintained by in-core natural convection circulation. The flow velocity is influenced by water gradient temperature between at the start until the end of the heat receiving by the water during natural convection and influenced by convection coefficient of water. In this safety analysis imposed restrictions that natural convection circulation of water is always in the liquid phase and boiling does not occur. Based on the measurements of the cooling water temperature at the time of entrance and the fuel center temperature measurements during normal operation of 100kW, the cooling water flow rate can be predicted and then be used to predict fluid temperature distribution along the water-fuel channels, the temperature distribution of fuel to the cooling water and temperature distribution along the axis of the fuel. According to the temperature measurement of the inlet of water-fuel channel in the reactor core and at the fuel center at operation 100 kW, the water flow velocity on the natural convection on water-fuel channel determined as 14.5 cc / sec. This natural convection velocity is used to predict the maximum limit temperature in the center of fuel channel pivot. This calculation give conclusion of the fuel temperature pivot up to 250 °C and the temperature of the cooling fluid that comes out of the hot channel reaches 102 °C when the Kartini reactor with a such cooling system is operated at a power of 190 kW steady state. That water temperature is reach limit to the boiling at ~ 1.5 atm hydrostatic pressure, while the metallurgical temperature limit Kartini reactor fuel is(3) 750 °C. The use of fuel temperature at 250 °C is still in the safety limits. The 100 kW nominal power of Kartini reactor operation build core fuel temperatur to 148 °C with cooling fluid suhue at 71 °C when out of the reactor core is still meet the reactor operation temperature safety criteria.

Keywords: thermalhydraulic, natural convection, safety, nuclear reactor core, fuel rod

PENDAHULUAN

Teras reaktor riset Kartini mempunyai geometri silinder yang dibatasi oleh dinding grafit sebagai reflektor dan sepasang grid plate atas dan bawah sebagai tumpuan batang bahan bakar. Di teras terdapat sejumlah bahan bakar dan batang kendali untuk mendukung operasi reaktor 100 kW. Keselamatan termal hidroulik teras reaktor ditentukan oleh distribusi suhu bahan bakar di teras reaktor. Keselamatan metalurgi bahan bakar dalam operasi *steady state* dibatasi oleh suhu yang tidak lebih dari 720 °C. Suhu bahan bakar yang dicapai dalam operasi reaktor merupakan hasil kesetimbangan antara laju pembangkitan panas dan laju pemindahan panas dari sistem pendinginan dalam teras reaktor. Pada reaktor Kartini sistem pendinginan teras reaktor berdasarkan pada sirkulasi konveksi alam dengan suhu awal pendinginan adalah suhu lingkungan air tangki reaktor. Sistem pendinginan konveksi alam satu fasa fluida, mempunyai keterbatasan laju pendinginan teras yang dihasilkannya. Untuk memelihara pengoperasian reaktor dalam batas kemampuan pendinginan dan batas keselamatan termal hidroulik, dilaksanakan dengan cara membatasi laju pembangkitan panas dalam teras yang diperoleh dari penentuan tingkat daya reaktor. Pada pembangkitan panas yang makin tinggi menghasilkan suhu pendingin keluar teras makin tinggi dan laju aliran konveksi alam makin tinggi sehingga pada suatu saat suhu air mendekati suhu didih yang mengakibatkan terjadi pendidihan inti yang ditandai dengan terjadinya gelembung uap air pada permukaan bahan bakar. Hal ini akan menyebabkan gelembung uap air membawa partikel teraktivasi ke permukaan air yang menyebabkan paparan radiasi di permukaan air tangki meninggi. Untuk menghindari kejadian ini diatur dengan membatasi suhu air pendingin yang keluar teras reaktor tidak melebihi batas suhu didih. Pada tekanan hidrostatis teras reaktor Kartini 1.5 atm mempunyai batas suhu didih 102 °C. apabila suhu air pendingin yang keluar dari teras reaktor dapat terpelihara tidak melebihi 102 °C maka reaktor masih dapat beroperasi dalam batas keselamatannya. Pada penelitian ini dicoba untuk memperhitungkan batas daya reaktor yang menghasilkan suhu air pendingin teras mencapai batas 102 °C guna menentukan batas ekstrim kondisi operasi reaktor yang masih memenuhi keselamatan. Sebagai dasar perhitungan adalah pengukuran suhu awal pendingin masuk teras dan suhu pusat bahan bakar pada operasi *steady state* pada daya nominal. Pada kesetimbangan perpindahan panas dari bahan bakar ke air, menghasilkan distribusi suhu bahan bakar dan air yang konstan. Pada keadaan ini, kecepatan aliran konveksi alam fluida pendingin dapat ditentukan dan

digunakan untuk menghitung distribusi suhu dalam pendingin dan bahan bakar.

TATAKERJA

Dalam teras reaktor, proses pembangkitan daya termal, suhu bahan bakar dan kualitas pendinginan berkaitan erat, masing-masing saling mempengaruhi satu terhadap lainnya. Pembangkitan daya termal terdistribusi sesuai dengan rapat pembelahan inti yang terjadi di dalam teras. Pada umumnya rapat pembelahan inti paling tinggi terjadi ditengah teras sedangkan rapat pembelahan inti terendah terjadi di pinggir teras sebagai akibat terjadinya kebocoran neutron di dalam teras reaktor, meskipun pada reaktor telah dipasang reflektor neutron yang mengelilingi teras. Dengan menyelesaikan teori difusi neutron satu kelompok energi, dapat diperoleh distribusi rapat pembelahan inti/rapat pembangkitan panas di dalam teras reaktor nuklir.

Dalam proses perpindahan panas, teras reaktor dapat dipandang sebagai gabungan beberapa kanal pertukaran panas yang membentuk teras reaktor. Masing-masing kanal terdiri dari batang bahan bakar dan fluida pendingin yang mengelilinginya. Berdasar perhitungan distribusi pembangkitan panas dalam batang bahan bakar dan proses perpindahan panas dari bahan bakar ke fluida pendingin, dapat ditetapkan kanal pertukaran panas yang menghasilkan suhu tertinggi di dalam teras reaktor dan disebut sebagai *hot channel*.

Hot-channel adalah kanal dalam teras yang merupakan komposisi batang bahan bakar dikelilingi pendingin yang menghasilkan rapat pembangkitan panas tertinggi diantara kanal perpindahan panas yang ada di dalam teras.

Perhitungan neutronik

Berdasar teori difusi neutron, faktor *hot-channel* didefinisikan sebagai perbandingan rapat pembangkitan panas maksimum dengan pembangkitan panas merata teras. Daya termal yang dibangkitkan dalam teras reaktor silinder dapat dituliskan sebagai^(1,4)

$$P = A \int_V w(r, z) dV$$

$$P = A \int_0^R J_0 \left(\frac{2.405 r}{R} \right) 2f r dr \int_{-H/2}^{H/2} \cos \left(\frac{fz}{H} \right) dz \quad (1)$$

Daya zone teras dapat diperoleh dari penyelesaian integrasi pembangkitan daya reaktor pada batas zone yang dikehendaki. Diperoleh penyelesaian integrasi volume sebagai berikut⁽¹⁾:

$$P = 2fA \times \left\{ \left[\left(\frac{R'}{2.405} \right)^2 \left[\left(\frac{2.405r}{R'} \right) J_1 \left(\frac{2.405r}{R'} \right) \right]_0^R \right] \times \left[\left(\frac{H'}{f} \right) \text{Sin} \left(\frac{fz}{H'} \right) \right]_{-H/2}^{H/2} \right\} \quad (2)$$

dengan ketentuan

$P =$ daya reaktor

$A =$ tetapan rapat daya teras

$R =$ ruji-ruji teras (22 cm)

$R' =$ ruji-ruji teras terextrapolasi (30 cm)

$H =$ tinggi teras (38 cm)

$H' =$ tinggi teras terextrapolasi (52 cm)

Analisis di dalam kertas kerja ini menggunakan data reaktor Kartini dengan bahan bakar jumlah 69 batang pada pembangkitan daya 100 kW. Hasil penyelesaian persamaan daya teras reaktor dengan menggunakan persamaan 1 menghasilkan nilai tetapan rapat daya teras $A = 0.0033$ kW/cc. Akan tetapi distribusi bahan bakar berada pada zone ring B, C, D, E dan F menyebabkan rapat pembangkitan daya hanya terjadi pada zone bahan bakar. Normalisasi distribusi pembangkitan daya teras untuk tetap menghasilkan daya 100 kW pada zone bahan bakar menghasilkan koreksi terhadap tetapan A sebesar 1.0127, sehingga untuk menghasilkan daya teras sebesar 100 kW dari zone bahan bakar diperlukan tetapan rapat daya teras sebesar $A = 0.0033 \times 1.0127$ kW/cc = 0.003342 kW/cc.

Power peaking factor didefinisikan sebagai perbandingan rapat pembangkitan daya pada suatu elemen volume terhadap rapat pembangkitan daya rerata teras. Apabila digunakan penyelesaian persamaan daya teras diatas maka diperoleh perhitungan *power peaking factor*^(1,4) sbb:

$$ppf = \frac{\text{daya zone}}{\frac{\text{volume zone}}{\text{daya teras reaktor}}} = \frac{\text{volume zone}}{\text{volume teras reaktor}}$$

atau

$$ppf = \frac{\left[\left(\frac{2.405 r}{R'} \right) J_1 \left(\frac{2.405 r}{R'} \right) \right]_{r_1}^{r_2} \times \left[\left(\frac{H'}{f} \right) \text{Sin} \left(\frac{fz}{H'} \right) \right]_{-Z_1/2}^{Z_2/2}}{\frac{f r_2^2 H \left|_{Z_1/2}^{Z_2/2} - f r_1^2 H \left|_{Z_1/2}^{Z_2/2} \right.}{\left[\left(\frac{2.405 r}{R'} \right) J_1 \left(\frac{2.405 r}{R'} \right) \right]_2^R \times \left[\left(\frac{H'}{f} \right) \text{Sin} \left(\frac{fz}{H'} \right) \right]_{-H/2}^{H/2}}} \quad (3)$$

dengan ketentuan

$r_1 =$ ruji-ruji zone batas dalam

$r_2 =$ ruji-ruji zone batas luar

$Z_1 =$ tinggi zone batas dalam

$Z_2 =$ tinggi zone batas luar

Apabila definisi ini digunakan untuk menentukan *power peaking factor* (*ppf*) pada seluruh zone teras dapat dilakukan dengan cara melakukan perhitungan pembangkitan daya pada zone teras yang ditetapkan dengan menggunakan penyelesaian persamaan integrasi daya diatas.

Hasil perhitungan *power peaking factor* pada zone bahan bakar yang ditabelkan pada Tabel 1:

Tabel 1a. Nilai power peaking faktor pada bahan bakar teras zona tengah.

		Pembagian zone aksial terukur dari pusat batang bahan bakar (cm)				
		2	4	6	8	10
Pembagian Zone radial (cm)	B (2-6)	1.9	1.8	1.8	1.7	1.6
	C (6-10)	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5
	D (10-14)	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3
	E (14-18)	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0
	F (18-22)	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7

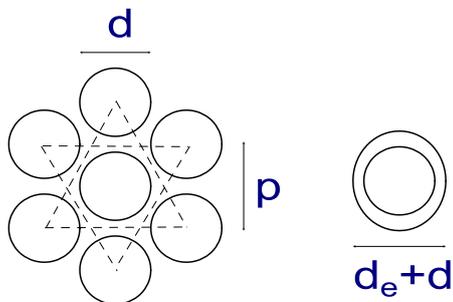
Tabel 1b. Nilai *power peaking factor* pada bahan bakar teras zona pinggir.

		Pembagian zone aksial terukur dari pusat batang bahan bakar (cm)				
		12	14	16	18	19
Pembagian Zone radial (cm)	B (2-6)	1.5	1.3	1.1	1.0	0.8
	C (6-10)	1.4	1.2	1.1	0.9	0.8
	D (10-14)	1.2	1.1	0.9	0.8	0.7
	E (14-18)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
	F (18-22)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4

Dari hasil perhitungan distribusi *ppf* pada seluruh zone teras secara analitis berdasar teori difusi neutron tersebut dapat diketahui bahwa *ppf* tertinggi terjadi pada zone terdalam teras reaktor dengan batas ruji-ruji zone antara 2-6 cm dan berada 2 cm dari pertengahan teras. Zone tersebut terjadi pada zone bahan bakar di ring B reaktor. *Ppf* tertinggi adalah 1.9 yang menyatakan perlipatan pembangkitan daya zone terhadap nilai rerata terasnya. Dalam sistem termalhidroulik teras, zone bahan-bakar air tersebut dapat dipandang sebagai kanal panas (*hot-channel*)

Perhitungan Termal hidroulik

Dalam tinjauan termalhidroulik sebagai pembangkit panas dalam teras reaktor adalah batang bahan bakar yang tersusun di teras membentuk kelompok kanal terbuka bahan bakar-air. Ukuran masing masing kanal bahanbakar-air dapat didekati dengan formulasi⁽²⁾ sbb:



$$d_e = \left[\frac{2\sqrt{3}}{f} \left(\frac{p}{d} \right)^2 - 1 \right] d \tag{4}$$

dengan ketentuan:

d_e adalah tebal ekivalen lapisan pendingin pada

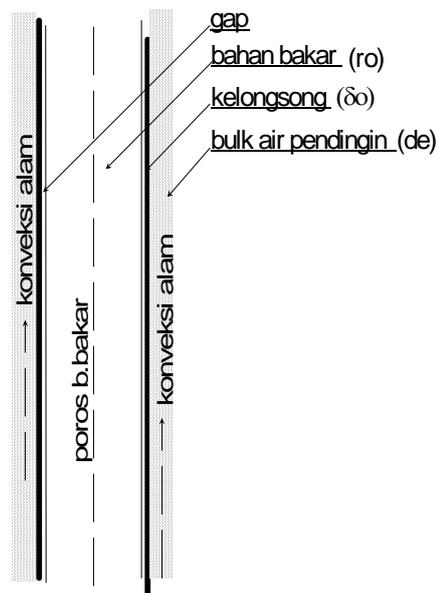
bahan bakar-air

d adalah diameter bahan bakar

p adalah jarak rerata antar pusat bahan bakar

$d_e + d$ adalah diameter ekivalen kanal bahan bakar-air

pendekatan bentuk kanal bahan bakar-air dapat dinyatakan dengan Gambar 1. sbb:



Gambar 1. Komposisi material dalam kanal bahanbakar-air digunakan sebagai metode perhitungan perpindahan panas

Dengan pendekatan bahwa pembangkitan panas terjadi pada bahan bakar saja dan volume pembangkitan panas dalam reaktor adalah jumlah volume bahan bakar sedangkan rerata pembangkitan panas adalah rerata dalam volume bahan bakar sehingga apabila reaktor beroperasi pada daya 100 kW akan dapat dengan mudah diperoleh rapat pembangkitan daya termal rerata dalam satuan daya termal per volume bahan bakar. Sedangkan rapat pembangkitan daya tertinggi pada *hot channel* diperhitungkan sebagai hasil perkalian antara *ppf* dengan rapat daya rerata.

Berdasar analisis termal hidroulik dan teori difusi neutron di dalam teras diperoleh hubungan antara suhu pendingin dalam kanal terhadap posisi aksialnya yang dituliskan⁽¹⁾ sbb:

$$T_{air}(z) - T_{in} = \frac{q_0' H'}{f C_p w} \times \left\{ \sin\left(\frac{fz}{H}\right) + \sin\left(\frac{fH}{2H}\right) \right\} \quad (5)$$

dengan ketentuan

$T_{air}(z)$ = temperatur pendingin pada posisi aksial z

T_{in} = temperatur awal pendingin masuk kanal

q_0' = rapat energi linear maksimum pada sepanjang batang bahan bakar

C_p = kapasitas panas fluida pendingin

$$(4.16 \text{ watt/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$$

w = debit fluida pendingin pd hot channel

$$(14.5 \text{ cc/detik})$$

H' = tinggi teras reaktor terekstrapolasi (52 cm)

H = tinggi teras reaktor sebenarnya (38 cm)

Persamaan tersebut berlaku untuk aliran konveksi alam fluida pendingin satu fasa yang mengalir dalam kanal terbuka bahanbakar-air di teras reaktor. Beda suhu fluida pendingin antara awal pertama masuk teras dengan suhu fluida setelah menerima panas dari permukaan bahan bakar pada kanal bahanbakar-air membentuk kontur integral yang sebanding dengan penerimaan energi panas dari bahan bakar dalam satu kanal. Rapat pembangkitan panas dalam bahan bakar diperhitungkan pada pembangkitan panas tertinggi pada kanal tersebut yang terjadi pada pertengahan tinggi teras reaktor. Distribusi suhu bahanbakar sampai dengan bulk pendingin pada pertengahan *hot-channel* dapat dituliskan⁽²⁾ sbb:

$$T_r(z) - T_b(z) = q_s''(z) \left[\frac{r_0}{2k_f} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} + \frac{1}{h_g} + \frac{r_0}{k_c} \ln \left(\frac{r_0 + u_c}{r_0} \right) + \frac{1}{h_f} \left(\frac{r_0}{r_0 + u_c} \right) \right] \quad (6)$$

$$\text{untuk } 0 \leq r \leq r_0$$

dengan ketentuan

$T_r(z)$ = temperatur bahan bakar pada ruji-ruji r dan posisi aksial z

$T_b(z)$ = temperatur bulk fluida pendingin pada posisi aksial z

$q_s''(z)$ = fluks panas sumber pada posisi aksial z

r_0 = ruji-ruji daging bahan bakar

k_f = koefisien konduksi panas bahan bakar

h_g = koefisien kontak perpindahan panas gap

k_c = koefisien konduksi panas kelongsong

u_c = tebal kelongsong

h_f = koefisien konveksi panas fluida pendingin

Persamaan tersebut dijabarkan dari perhitungan terjadinya arus panas dari bahan bakar menuju bulk pendingin dengan melalui gap bahan

bakar dan kelongsong. Arah arus panas diperhitungkan merambat dalam satu dimensi kearah radial, karena bahan bakar dalam bentuk batang dan diperhitungkan tidak terjadi perambatan panas arah aksial. Sehingga pada sepanjang batang bahan bakar apabila diketahui rapat panas dan suhu diporos bahan bakar maka dapat ditentukan suhu bulk pendingin disekitarnya. Perhitungan ini dapat berlaku sepanjang fluida pendingin dalam satu fasa cair.

Dalam analisis ini mekanisme perpindahan panas dari poros bahan bakar ke bulk pendingin dan mekanisme distribusi suhu bulk pendingin sepanjang kanal bahanbakar-air digunakan untuk menentukan kecepatan aliran fluida pendingin pada kanal bahanbakar-air tersebut. Dengan menggunakan persamaan (5) dapat dihitung kecepatan aliran fluida pada kanal bahanbakar-air apabila diketahui suhu fluida pendingin yang masuk teras dan suhu fluida pada pertengahan kanal bahanbakar-air. Sedangkan dari persamaan (6) dapat ditentukan suhu fluida pendingin apabila dapat diketahui rapat pembangkitan panas dan suhu pada poros bahan bakar. Persamaan (5) dan (6) dapat diberlakukan pada sistem perpindahan panas konveksi alam dan fluida pendingin dalam satu fasa.

Dengan menggunakan bahan bakar berinstrumentasi (IFE) dapat diukur suhu poros pertengahan bahan bakar dan dengan mengetahui tingkat daya reaktor dan jumlah bahan bakar dapat ditentukan rapat pembangkitan panas rerata dalam bahan bakar. *Power peaking factor* (ppf) dapat diketahui dari hasil perhitungan yang ditampilkan pada Tabel 1a&b. Suhu air disekitar teras ditetapkan sama dengan suhu yang terukur pada air tangki reaktor pada sirkulasi konstan. Berdasarkan pada data eksperimen ini dapat diprediksikan kecepatan aliran konveksi alam fluida pendingin di dalam teras reaktor.

HASIL

Hasil perhitungan geometri hot-channel

- Jarak antara pusat bahan bakar (p): 4,5 cm
- Diameter batang bahan-bakar (d): 3,7 cm
- Tinggi teras/panjang kanal = 38 cm

Dengan menggunakan persamaan (1) diperoleh hasil perhitungan tebal efektif lapisan pendingin di sekeliling bahan bakar adalah 1,17 cm sedangkan ruji-ruji ekivalen kanal bahan bakar-air terhitung 4.86 cm

Parameter perhitungan kecepatan aliran fluida pendingin di dalam teras.

- Ruji-ruji kanal bahanbakar-air: 4.86 cm
- Diameter batang bahanbakar: 3.7cm

- Koefisien konveksi fluida pendingin dalam aliran konveksi alam dalam fasa tunggal dan tidak mengalami pendidihan⁽¹⁾ (h): $0.02 \cdot 10^{-4} \text{ kW } ^\circ\text{C} < h < 3 \cdot 10^{-4} \text{ kW } ^\circ\text{C}$
- Koefisien konduksi kelongsong ss-304⁽³⁾
- $k = 16.3 \text{ W/m } ^\circ\text{C} - 21.4 \text{ W/m } ^\circ\text{C} (100 \text{ } ^\circ\text{C} - 500 \text{ } ^\circ\text{C})$
- Koefisien konduksi bahan bakar $k = 0.000175 \text{ kW/cm } ^\circ\text{C}$
- Koefisien konduksi gap kelongsong-bahan bakar⁽¹⁾
- $0.5 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C} < h_g < 1.1 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- suhu pusat bahan bakar di ring B terukur dengan IFE: $43 \text{ } ^\circ\text{C}$
- suhu air pendingin masuk teras terukur: $35 \text{ } ^\circ\text{C}$
- rapat pembangkitan panas linear maksimum dlm bahan bakar: $q' = 71,396 \text{ w/cm}$

Dengan menggunakan parameter termalhidroulik tersebut diatas dapat digunakan untuk menentukan distribusi suhu antara bahan bakar sampai dengan bulk fluida pendingin. Hasil pengukuran suhu pusat bahan bakar adalah $145 \text{ } ^\circ\text{C}$ maka berdasarkan perhitungan persamaan (6) menghasilkan suhu bulk pendingin sekeliling pusat bahan bakar terhitung $52 \text{ } ^\circ\text{C}$. Suhu fluida pendingin pada hot channel yang mengalir dengan suhu masuk $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ dan mencapai pertengahan hot channel dengan suhu $69 \text{ } ^\circ\text{C}$ dihitung dengan menggunakan persamaan 5 menghasilkan data kecepatan aliran sebesar 14.5 cc/det . Perhitungan ini dapat diberlakukan sebagai pendekatan terhadap kenyataan aliran konveksi alam di teras reaktor bilamana fluida pendingin teras dalam satu fasa dan tidak melampaui batas pendidihannya.

Hasil perhitungan distribusi suhu *hot channel*

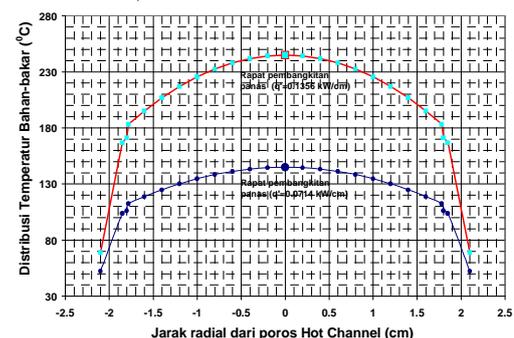
Perhitungan kecepatan aliran pendinginan konveksi alam didalam hot channel teras adalah merupakan pendekatan terhadap perkiraan kecepatan aliran konveksi alam di dalam teras reaktor. Untuk memprediksikan batas keselamatan termalhidroulik teras reaktor dilakukan pendekatan bahwa dalam sistem pendinginan konveksi alam, kecepatan aliran fluida tidak sensitif terhadap perbedaan rapat pembangkitan panas maksimum di dalam teras. Sehingga dalam analisis prediksi keselamatan termohidroulik teras reaktor dianggap bahwa peningkatan daya reaktor mengakibatkan distribusi suhu teras reaktor meningkat dan kecepatan aliran konveksi alam dianggap konstan sehingga dari hasil perhitungan distribusi suhu di dalam hot channel dapat diprediksikan batas suhu di dalam teras reaktor tidak mengakibatkan terjadi pendidihan.

Dari hasil perhitungan distribusi suhu kearah radial pada pertengahan bahan bakar diperoleh kontur yang dinyatakan pada Gambar 2. Suhu fluida pendingin selama melintasi *hot channel* terhitung

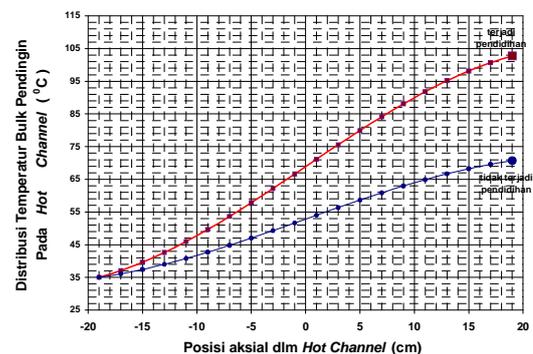
menghasilkan distribusi suhu yang dinyatakan pada Gambar 3. Pada keadaan distribusi suhu fluida pendingin dinyatakan pada Gambar 2 dan Gambar 3 tersebut terhitung distribusi suhu pada poros bahan bakar dinyatakan pada Gambar 4.

Dari gambar grafik tersebut dapat diprediksikan apabila dengan menggunakan sistem pendinginan yang terpasang dan reaktor beroperasi pada daya 100 kW terukur suhu pertengahan poros bahan bakar $145 \text{ } ^\circ\text{C}$ dan suhu fluida pendingin masuk teras $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ maka fluida pendingin akan keluar teras dengan suhu $70 \text{ } ^\circ\text{C}$ hal ini sesuai dengan kenyataan bahwa tidak terjadi pendidihan di teras reaktor. Akan tetapi apabila dengan sistem pendinginan yang terpasang pada teras dengan bahan bakar 69 batang dan beroperasi pada daya diprediksikan akan menghasilkan suhu pertengahan poros bahan bakar $245 \text{ } ^\circ\text{C}$ dan suhu fluida pendingin keluar teras mencapai $102 \text{ } ^\circ\text{C}$. Ini adalah batas terjadi pendidihan air pada tekanan $1,5 \text{ atm}$. Sehingga dapat diperkirakan bahwa sistem pendinginan teras reaktor dapat mendukung operasi reaktor sampai pada pengoperasian dengan daya 190 kW .

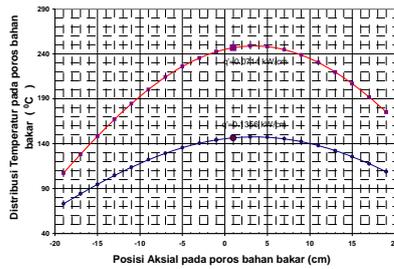
Hasil perhitungan prediksi distribusi suhu pada *hot channel* diperoleh hasil distribusi suhu yang dipresentasikan dalam bentuk grafik yang dinyatakan pada Gambar 2,3 dan 4.



Gambar 2. Hasil perhitungan distribusi radial suhu pada pertengahan batang bahan bakar



Gambar 3. Hasil perhitungan distribusi aksial suhu fluida pendingin hot channel



Gambar 4. Hasil perhitungan distribusi aksial suhu poros bahan bakar

PEMBAHASAN

Prediksi distribusi suhu ini diperoleh berdasarkan pada perhitungan analitis proses perpindahan panas dalam bahan bakar dengan menggunakan asumsi penyederhanaan yaitu bahwa

- Kecepatan aliran konveksi alam di dalam teras dianggap tidak sensitif terhadap perubahan pembangkitan panas.
- Distribusi rapat pembangkitan panas sepanjang batang bahan bakar dalam *hot channel* dihitung berdasar penyelesaian teori difusi neutronik reaktor silinder.
- Koefisien perpindahan panas fluida pendingin di dalam teras selama proses konveksi alam satu fasa dianggap konstan.
- Fluida pendingin tidak mengalami pendidihan

Hasil penyederhanaan proses konveksi alam dapat digunakan untuk menentukan perhitungan analitis distribusi suhu dalam hot channel, yang meliputi distribusi suhu pada poros bahan bakar, distribusi suhu pada pertengahan batang bahan bakar sampai dengan bulk pendingin dan distribusi suhu pada sepanjang fluida pendingin selama proses konveksi alam yang ditampilkan pada Gambar 2,3 dan 4.

KESIMPULAN

Sistem pendingin teras reaktor Kartini mempunyai proses perpindahan panas yang sederhana yaitu konveksi alam, sehingga distribusi suhu antara batang bahan bakar dengan pendingin di dalam teras dapat diprediksi secara analitis dengan menggunakan dua konsep perpindahan panas batang bahan bakar ke fluida pendingin dan konsep perpindahan panas secara konveksi alam oleh fluida pendingin yang menghasilkan perkiraan kecepatan aliran konveksi alam fluida pendingin di teras reaktor. Hasil perhitungan distribusi suhu dalam hot-channel telah ditampilkan dalam Gambar 2,3 dan 4. masing-masing gambar mendeskripsikan distribusi suhu teras dalam operasi steady state daya nominal 100 kW dan operasi *steady state* pada daya yang diprediksikan mencapai batas keselamatan termalhidrouliknya. Berdasar hasil perhitungan yang dipresentasikan pada Gambar 2,3 dan 4, dapat

disimpulkan bahwa reaktor Kartini dengan sistem pendinginan yang ada, dapat dioperasikan sampai dengan tingkat daya 190 kW tanpa menghasilkan efek pendidihan dalam teras reaktor karena pada tingkat daya tersebut suhu poros bahan bakar mencapai ~ 250 °C dan fluida pendingin yang keluar dari *hot channel* mencapai suhu 102 °C yang merupakan batas pendidihan air pada tekanan hidrostatik ~ 1.5 atm. Batas suhu metalurgi bahan bakar Triga tipe 104 adalah⁽³⁾ 750 °C sehingga penggunaan bahan bakar pada suhu 250 °C masih dalam batas keselamatan metalurginya. Dalam operasi reaktor daya nominal 100 kW *steady state*, suhu poros bahan bakar tertinggi mencapai 145 °C dengan suhu fluida pendingin keluar teras mencapai 71 °C. Pada kondisi ini sistem pendinginan teras reaktor Kartini memenuhi kriteria keselamatan termohidroulik.

DAFTAR PUSTAKA

1. JAMES J. DUDERSTADT ET.AL.; Nuclear Reaktor Analysis, JOHN WILEY & SONS, Inc.
2. S. Sengupta, ET.AL.; Nuclear Heat Transport in Research Reaktor Core, Lecture Notes on IAEA-RCA Training Course on Experimental Research Reaktor Physics, p 245-267. Mumbai, India, 2004.
3. M.T. Simnad, THE U-ZrHx ALLOY: ITS PROPERTIES AND USE IN TRIGA FUEL, General Atomic, 1980
4. John R. Lamarsh., Introduction to Nuclear Reaktor Theory, Newyork University, Addison-Wesley Publishing Company.

TANYA JAWAB

Dady S

- Metode apa yang digunakan?

Edy Triono

- Metode analisis perpindahan panas dari batang bahan bakar teras reaktor ke air pendingin dalam kanal panas (*hot channel*) bahan bakar air dalam proses pendinginan konveksi dalam satu fasa cair.

Azizul Khakim

- Korelasi apa lingkungan untuk koefisien perpindahan panas dari BB ke pendingin (hf)?
- Apa bentuk kanal yang dihitung?

Edy Triono

- Dalam perhitungan ini koefisien konveksi air (hf) dianggap sebagai tetapan yang nilainya tertentu dan memenuhi kriteria koefisien konveksi air konveksi alam satu fasa (temperatur < titik didihnya)
- Kanal diperhitungkan dalam bentuk jajaran genjang.