

# ANALISIS TERJADINYA FRAKSI VOID PADA SISTEM PENDINGIN REAKTOR TRIGA-2000

Tjipta Suhaemi, Djen Djen Djainal, Ijeu Karliana, M. Hadi Kusuma, Syafarudin, Johnny S., Hendro Tj.

## ABSTRAK

**ANALISIS TERJADINYA FRAKSI VOID PADA SISTEM PENDINGIN REAKTOR TRIGA-2000.** Telah dilakukan analisis terhadap terjadinya fraksi void pada sistem pendingin reaktor Triga-2000 Bandung. Analisis dilakukan dengan melakukan kajian teoritis fenomena void dan pengamatan langsung ke lapangan. Reaktor Triga-2000 telah ditingkatkan dayanya dari 1000 kW menjadi 2000 kW. Dengan peningkatan daya reaktor itu memungkinkan bertambahnya paparan radiasi di daerah reaktor maupun di sekitar reaktor. Kenaikan paparan radiasi ini tentunya disebabkan oleh fenomena yang terjadi dalam sistem pendingin. Pada penelitian ini diperoleh fenomena bila reaktor Triga-2000 dioperasikan pada daya 1000 kW mulai terlihat adanya gelembung-gelembung, dan gelembung ini semakin banyak pada daya yang lebih besar. Ada beberapa kemungkinan penyebab terjadinya gelembung-gelembung, antara lain pendidihan (boiling), radiolisis air, kebocoran pada pompa, dan kavitasi. Dari analisis diperoleh kemungkinan penyebab terjadinya void adalah dari radiolisis, dan kebocoran pada inlet pompa.

## ABSTRACT

**VOID FRACTION ANALYSIS ON THE COOLING SYSTEM OF TRIGA-2000.** Void fraction analysis on the cooling system of Triga-2000 has been done by study of void phenomenon and observing the reactor system. Reactor Triga-2000 is a reactor Triga Mark II which has been increased the power design from 1000 kW to 2000 kW. The increasing of power would affected the rise of radiation exposure in the reactor and surrounding. The high radiation is caused by phenomenon existed in the cooling system. It is observed the presence of void appeared when the reactor is operated at 1000 kW and becoming more and more by increasing the power. The probability of void presence is caused by boiling process, water radiolysis, leakage of pump, and cavitation. It is concluded that from the analysis that the existing of void is caused by water radiolysis and leakage of pump inlet.

## PENDAHULUAN

Di dalam suatu reaktor daya maupun reaktor penelitian terdapat salah satu sistem yang penting yang disebut sistem pendingin. Sistem pendingin berfungsi untuk memindahkan panas yang dihasilkan dalam teras reaktor. Sistem pendingin mempunyai dua loop yaitu sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder.

Reaktor Triga Mark II Bandung telah ditingkatkan dayanya dari 1000 kW menjadi 2000 kW. Peningkatan daya ini tentunya masih menyimpan beberapa problema keselamatan yang harus diselesaikan. Oleh karena itu sistem pendingin baik primer maupun sekunder perlu dievaluasi kembali

layak tidaknya dalam menunjang dioperasikannya reaktor secara aman dan selamat. Irisan vertikal reaktor Triga-2000 Bandung dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan diagram alir sistem pendingin primer pada Gambar 2.

Keselamatan reaktor Triga-2000 perlu dianalisis dan ditelaah aspek keselamatannya. Analisis keselamatan harus diikuti terus menerus, agar mampu dan dapat digunakan untuk menilai dan mengevaluasi keselamatan desain reaktor dan memverifikasi reaktor yang telah dioperasikan.

Dengan ditingkatkannya daya reaktor memungkinkan bertambahnya paparan

radiasi baik di daerah reaktor maupun di sekitar reaktor. Kenaikan paparan radiasi yang lebih tinggi dari yang seharusnya sebagai akibat dari pengoperasian reaktor ini tentunya disebabkan oleh fenomena yang terjadi dalam sistem pendingin. Berdasarkan atas keseimbangan energi, energi dalam teras akan dipakai oleh pendingin untuk menaikkan temperatur di daerah *subcooling* atau untuk mengubah fase cair menjadi fase uap di daerah pendidihan.

Dalam penelitian ini dilakukan telaah kemungkinan terjadinya fenomena void di dalam sistem pendingin. Hal ini dilatarbelakangi adanya temuan dari pengamatan pada bulan Juni 2002 tentang terjadinya gelembung-gelembung pada permukaan kolam reaktor saat reaktor beroperasi pada daya 1800 kW. Dari kasus tersebut diperkirakan telah terjadi pendidihan air pendingin sehingga menimbulkan gelembung-gelembung.

## TEORI

Dalam reaktor, panas dibangkitkan dalam bahan bakar dan harus dihantarkan ke dalam pendingin. Fluks panas yang sangat tinggi bisa menyebabkan perubahan fase pendingin. Perubahan fase pendingin dapat bersifat sebagai penguapan biasa dimana bahan pendingin dalam keadaan cair berubah menjadi uap. Perubahan fase dapat pula bersifat sebagai proses pendidihan dimana uap terbentuk dari fase cair yang kontinu.

Timbulnya gelembung-gelembung dalam teras reaktor salah satunya mungkin

disebabkan oleh proses pendidihan (*boiling*). Mekanisme pendidihan terdiri dari didih nukleat (*nucleat boiling*), didih konveksi (*convection boiling*) dan didih film (*film boiling*). Ada dua geometris pendidihan yaitu didih kolam (*pool boiling*) dan didih alir (*flow boiling*). Didih kolam adalah didih yang terjadi pada permukaan pemanasan di dalam kolam cairan. Didih alir terjadi bila zat cair mengalir melalui saluran atau di atas permukaan yang berada pada temperatur yang lebih tinggi dari temperatur jenuh zat cair. Aliran tersebut merupakan campuran dua fase daripada zat cair dan uapnya<sup>[1,2]</sup>.

Aliran dua fasa dapat mempunyai beberapa bentuk. Bentuk pertama yaitu aliran gelembung dimana terdapat gelembung-gelembung uap yang bergerak bebas ke atas saluran. Bentuk kedua yaitu aliran sumbat dimana gelembung-gelembung uap bergabung membentuk semacam sumbat yang mengisi sebagian dari luas penampang saluran dan bergerak ke atas. Bentuk ketiga yaitu aliran annular dimana uap merupakan fase kontinu yang memuat butir-butir cairan halus yang bergerak ke atas dan meninggalkan lapisan cairan lewat jenuh annular pada dinding saluran. Bentuk keempat yaitu aliran kabut dimana uap merupakan fase kontinu dan cairannya terdispersi dalam butiran-butiran halus.

Parameter kualitas uap (*steam quality*), fraksi void (*void fraction*) dan slip ratio merupakan hal yang sangat penting karena berhubungan langsung dengan uap yang dihasilkan. Fraksi void didefinisikan sebagai

fraksi dari volume yang ditempati oleh fase gas atau fraksi dari luas penampang saluran yang ditempati oleh fase gas. Kualitas uap menunjukkan besarnya massa dari uap sedangkan fraksi uap ( $\alpha$ ) menunjukkan volume uap pada sistem 2 fase [3,4].

Persamaan untuk menghitung kualitas uap ( $x$ ) adalah :

$$x = m_u / (m_u + m_a) \quad (1)$$

dengan :

$m_u$  = massa fraksi uap (kg)

$m_a$  = massa fraksi cair (kg)

$$x = \alpha \rho_u V_u m_u / [(\alpha \rho_u V_u m_u + (1-\alpha) \rho_a V_a)] \quad (2)$$

dengan :

$V_u$  = volume yang ditempati fase gas ( $m^3$ )

$V_a$  = volume yang ditempati fase cair ( $m^3$ )

Persamaan umum untuk menghitung fraksi uap ( $\alpha$ ) adalah :

$$\alpha = \{1 + ((1-x)/x)(\rho_u/\rho_a)\}^{-n} \quad (3)$$

dengan :

$\alpha$  = fraksi uap

$\rho_u$  = rapat uap jenuh ( $kg/cm^3$ )

$\rho_a$  = rapat air jenuh ( $kg/cm^3$ )

$n = 1 + f_p f_g$

$f_p$  = pengaruh faktor tekanan  
 $= 2,15 (\log p_0 / p_c + 0,86 \log p_0 / p_c)$

$f_g$  = pengaruh faktor fluks massa  
 $= 1,123 - 2,221 (G/3000) + 1,502 (G/3000)^2 - 0,351 (G/3000)^3$

$G$  = fluks massa ( $kg/m^2det$ )

$p_0$  = tekanan fluida awal ( $kg/cm^2$ )

$p_c$  = tekanan kritis air ( $kg/cm^2$ )

## METODA DAN TATA KERJA

1. Menelaah kinerja sistem pendingin dan sistem terkait pada reaktor Triga-2000.
2. Menelaah laju alir pendingin primer yang diperlukan untuk mendapatkan panas yang terbentuk di dalam teras akibat terjadinya proses fisi.

3. Mengobservasi temperatur bahan bakar menggunakan IFE, dan temperatur pendingin.

4. Melakukan kajian terjadinya fraksi void dalam reaktor.

## PEMBAHASAN

Peningkatan daya reaktor memungkinkan bertambahnya paparan radiasi di daerah reaktor maupun di sekitar reaktor. Kenaikan paparan radiasi yang lebih tinggi dari yang seharusnya sebagai akibat dari pengoperasian reaktor ini tentunya disebabkan oleh fenomena yang terjadi dalam sistem pendingin.

Dari pengamatan diperoleh fenomena bila reaktor dioperasikan pada daya 1000 kW mulai terlihat adanya gelembung-gelembung, dan gelembung ini semakin banyak pada daya yang lebih besar. Dalam reaktor, panas dibangkitkan dalam bahan bakar dan harus dihantarkan ke dalam pendingin. Data perhitungan termohidraulik reaktor Triga-2000 dapat dilihat pada Tabel 1. Tabel 2 menampilkan spesifikasi teknik untuk batas operasi, peringatan dini dan batas scram. Peringatan dini merupakan petunjuk kepada para operator pada keadaan dimana batas sistem keselamatan hampir tercapai. Pada saat tanda peringatan muncul, para operator segera bersiaga dan segera melakukan tindakan yang diperlukan untuk mencegah terjadinya keadaan yang lebih buruk. Sedangkan hasil pengamatan temperatur bahan bakar dan temperatur pendingin yang dilaksanakan pada tanggal 24 Maret 2003 dapat dilihat pada Tabel 3.

Timbulnya gelembung-gelembung pada perkiraan awal mungkin disebabkan oleh timbulnya proses pendidihan (*boiling*). Namun dari hasil pengamatan menggunakan *Instrumented Fuel Element* (IFE) terlihat bahwa temperatur bahan bakar maksimum pada daya 2000 kW sebesar 575 dan 583 °C tidak berbeda jauh dengan temperatur bahan bakar maksimum yang terdapat dalam LAK yaitu 569,7°C, dan masih jauh dibawah batas operasi 650°C dan batas scram 750°C untuk temperatur bahan bakar maksimum. Begitu pula temperatur pendingin masih jauh di bawah batas operasi temperatur pendingin sebesar 49°C yang merupakan batas bagi temperatur air pendingin di permukaan kolam reaktor ataupun temperatur masukan air pendingin ke perangkat penukar panas. Dari LAK diketahui tekanan mutlak teras reaktor sebesar 22 psia dan temperatur jenuh pada 22 psia adalah 112,4°C, sehingga dengan kondisi pendingin yang ada tidak memungkinkan terjadinya proses penguapan. Dengan demikian penyebab terjadinya gelembung bukanlah disebabkan oleh pendidihan seperti hipotesa semula.

Kemungkinan lain terjadinya gelembung-gelembung adalah disebabkan radiolisis air pendingin. Air sebagai zat pendingin mengalami perubahan temperatur dan tekanan. Dalam teras reaktor zat pendingin terkena radiasi pengion bertenaga tinggi hingga terjadi ionisasi dan pemutusan ikatan kimia dalam molekul pendingin serta akibat yang menyertainya. Radiolisis air menghasilkan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, radikal bebas H, OH.dsb. Atom oksigen dari air pendingin

dapat berinteraksi dengan neutron cepat dan menghasilkan partikel-partikel radioaktif, hal inilah yang menyebabkan naiknya paparan radiasi di permukaan air kolam.

Selain itu dalam pengoperasian sistem pendingin digunakan pompa. Kebocoran *seal* pompa dapat juga menyebabkan masuknya udara sehingga mengakibatkan adanya gelembung-gelembung.

Kemungkinan lain adalah gejala kavitasi yaitu menguapnya zat cair yang sedang mengalir, karena tekanannya berkurang di bawah tekanan uap jenuhnya. Hal ini dapat terjadi pada zat cair yang sedang mengalir di dalam pompa maupun di dalam pipa. Tempat-tempat yang bertekanan rendah dan/atau yang berkecepatan tinggi di dalam aliran, sangat rawan terhadap terjadinya kavitasi.

Jadi untuk menghindari kavitasi, harus diusahakan agar tidak ada satu bagianpun dari aliran di dalam pompa yang mempunyai tekanan statis lebih rendah dari tekanan uap jenuh aliran pada temperatur yang bersangkutan. Dalam hal ini perlu diperhatikan dua macam tekanan yang memegang peranan. Pertama, tekanan yang ditentukan oleh kondisi lingkungan dimana pompa dipasang, dan kedua, tekanan yang ditentukan oleh keadaan aliran di dalam pompa. Dalam hal ini dipakai definisi NPSH (*Netto Positive Suction Head*). Agar pompa dapat berjalan dengan aman, harus dipenuhi persyaratan dimana NPSH yang tersedia > NPSH yang diperlukan. NPSH yang tersedia adalah *head* yang dimiliki oleh cairan pada sisi isap pompa (ekivalen dengan tekanan

mutlak pada sisi isap pompa), dikurangi dengan tekanan jenuh cairan di tempat tersebut. NPSH yang diperlukan merupakan salah satu cara, yang dapat diusahakan oleh pihak pabrik pompa. Di pihak lain, menaikkan NPSH yang tersedia harus diusahakan oleh pemakai pompa.

Untuk menghindari kavitasi, diperhitungkan hal-hal berikut :

- Ketinggian letak pompa terhadap permukaan zat cair yang diisap harus dibuat serendah mungkin agar *head* isap statis menjadi rendah pula.
- Pipa isap harus dibuat sependek mungkin. Jika terpaksa dipakai pipa isap yang panjang, sebaiknya diambil pipa yang berdiameter lebih besar.
- Tidak dibenarkan untuk memperkecil laju aliran dengan menghambat aliran di sisi isap.
- Jika pompa mempunyai *head* total yang berlebihan, maka pompa akan akan bekerja dengan kapasitas aliran yang berlebihan pula, sehingga kemungkinan akan terjadi kavitasi menjadi lebih besar.
- Bila *head* total pompa sangat berfluktuasi, maka pada keadaan *head* terendah harus diadakan pengamanan penuh terhadap terjadinya kavitasi.

Untuk mengukur besarnya fraksi void menggunakan rumus empiris tidak mungkin dilakukan, karena rumus empiris berlaku untuk pendidihan. Secara eksperimen untuk mengetahui besarnya fraksi void secara teoritis mungkin bisa menggunakan teknik absorpsi sinar X dan gamma. Sorotan sinar

gamma atau sinar X yang melewati suatu bahan akan berkurang intensitasnya, disebabkan adanya kombinasi efek fotoelektrik, produksi pasangan dan efek Compton. Absorpsi suatu sorotan kolimasi dengan intensitas mula-mula  $I_0$  dijelaskan oleh hukum eksponensial sebagai  $I = I_0 \exp(-\mu z)$  dengan  $\mu$  adalah koefisien absorpsi linier dan  $z$  adalah jarak perjalanan melewati medium absorpsi homogen. Penerapan teknik ini pada pengukuran fraksi hampa, melewati campuran dua fase dan menembus dinding saluran di hadapannya sebelum melalui suatu detektor. Intensitas  $I_g$  dan  $I_l$  yang diterima saluran penuh gas dan cairan diukur pertama kali. Fraksi hampa kemudian dihubungkan dengan intensitas  $I$  yang diukur selama aliran dua fase dalam saluran dan dengan  $I_g$  dan  $I_l$  adalah :

$$\alpha = (\ln I - \ln I_g) / (\ln I_g - \ln I_l)$$

Namun teknik ini perlu dilakukan kajian lebih mendalam apakah secara teknis mungkin untuk dilakukan.

## KESIMPULAN

Telah dilakukan kajian teoritis tentang fenomena terjadinya fraksi void dan juga pengamatan langsung ke reaktor Triga-2000. Terlihat bahwa bila reaktor dioperasikan pada daya 1000 KW mulai terlihat adanya gelembung-gelembung (void), dan gelembung ini semakin banyak pada daya yang lebih besar. Semula diperkirakan gelembung ini disebabkan oleh pendidihan, namun dari analisis kemungkinan gelembung itu disebabkan oleh radiolisis ataupun masuknya udara ke dalam

pendingin melalui inlet pompa yang dimungkinkan jika sampai terjadi tekanan negatif (kurang dari 1 atm) pada sisi tersebut akibat drop tekanan yang berlebihan pada sistem perpipaan. Untuk pengembangan lebih jauh; kajian mendalam perlu dilakukan untuk menganalisis terjadinya gelembung dalam pendingin di tangki reaktor triga-2000.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. WINTERTON, *Thermal Design of Nuclear Reactors*, Pergamon Press, Oxford.
2. KOESTOER, RA, PROBORINI, S, *Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis*, PT Pradnya Paramita, Jakarta, 1994.
3. PRAYOTO, et al, *Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, BATAN, Jakarta, 1978.
4. ELWAKIL, M.M, *Nuclear Energy Conversion*, Intext Educational Publishers 666 Fifth Avenue, New York.
5. Laporan Analisis Keselamatan Akhir Reaktor Triga-2000 Bandung, Puslitbang Teknik Nuklir, Bandung, 2001.
6. SULARSO, TAHARA, H., *Pompa dan Kompresor*, PT Pradnya Paramita, Jakarta, 1994.

Tabel 1. Data Perhitungan Termohidraulik Reaktor Triga-2000<sup>[5]</sup>

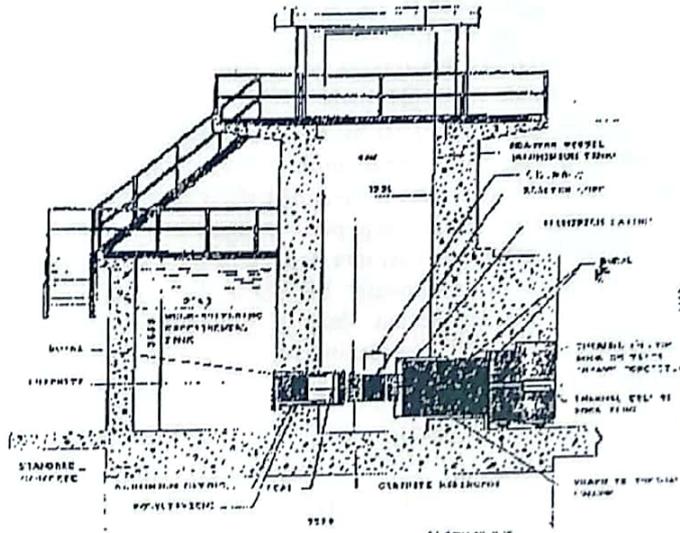
Parameter	TerasAwal	Teras Seimbang
Daya reaktor maksimum	2000	2000
Jumlah bahan bakar	100	116
Luas aliran teras (cm <sup>2</sup> )	539	625
Temperatur maksimum masukan pendingin primer (°C)	32,2	32,2
Daya per elemen bahan bakar		
- maksimum (kW)	34	33
- rata-rata (kW)	20	17,2
Tekanan mutlak teras reaktor (psia)	22	22
Temperatur jenuh pada 22 psia (°C)	112,4	112,4
Laju rata-rata masa pendingin (kg/s)	9,6	10,9
Kecepatan aliran rata-rata (cm/s)	18,2	18,0
Temperatur bahan bakar rata-rata (°C)	270,3	251,0
Temperatur kelongsong maksimum (°C)	134,7	134,5
Temperatur maksimum bahan bakar (°C)	569,7	558,6
Fluks panas rata-rata (W/cm <sup>2</sup> )	44,61	38,45
Fluks panas maksimum (W/cm <sup>2</sup> )	95,55	92,29
Angka banding DNB minimum	1,34	1,38

Tabel 2. Spesifikasi Teknis Operasi Reaktor Triga-2000<sup>[5]</sup>

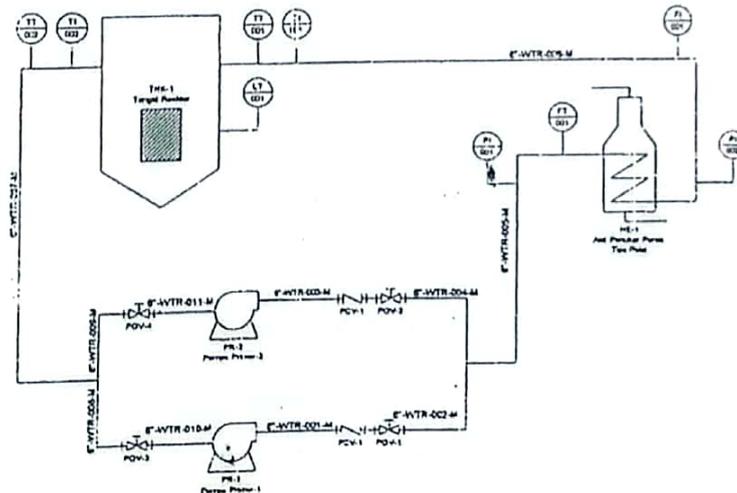
No.	Parameter Operasi	Satuan	Batas Operasi	Peringatan Dini	Batas Scram
1.	Daya Tertinggi	kW	2000	2100	2200
2.	Periode minimum	detik	7	7	3
3.	Persen daya	%	100	105	110
4.	Temperatur bahan bakar maksimum	°C	650	Tidak ada	750
5.	Pendingin primer :				
	a. Level air tangki (di bawah permukaan normal)	cm	5	20	50
	b. Laju alir	gpm	≥ 600	600	Tidak ada
	c. Temperatur masuk tangki reaktor	°C	≤ 40	Tidak ada	Tidak ada
	d. Temperatur keluar tangki reaktor	°C	≤ 49	Tidak ada	49
	e. Temperatur ATR	°C	≤ 49	49	Tidak ada

Tabel 3. Hasil Pengamatan Temperatur Bahan Bakar Menggunakan IFE

No.	DAYA (kW)	Temperatur pendingin masuk ke penukar panas (°C)	Temperatur pendingin keluar dari penukar panas (°C)	Temperatur Bahan Bakar (°C)
1.	1000	35	27	360
		34	28	365
2.	1500	36	30	520
		36,5	29	510
3.	2000	37,2	33	575
		39	28,5	583



Gambar 1. Irisan Vertikal Reaktor Triga 2000 Bandung [5]



Gambar 2. Sistem Pendingin Primer [5]