

## ANALISIS KEGAGALAN BAHAN BAKAR UJI PADA FASILITAS IRADIASI PRTF

Suwarto

PRSG-BATAN

### ABSTRAK

**"ANALISIS KEGAGALAN BAHAN BAKAR UJI PADA FASILITAS IRADIASI PRTF"**. *Power Ramp Test Facility (PRTF)* adalah sebuah fasilitas eksperimen yang digunakan untuk pengujian bahan bakar reaktor daya. PRTF dilengkapi dengan sebuah kapsul sebagai wadah bahan bakar uji yang dialiri air primer bertekanan 160 bar dan sistem pendingin sekunder yang memiliki laju alir 1200 s.d 1500 ℓ/jam untuk mendinginkan kapsul. Analisis kegagalan bahan bakar uji dimaksudkan sebagai masukan dalam penyusunan Laporan Analisis Keselamatan PRTF. Analisis ini dilakukan dengan cara perhitungan perpindahan panas yang diawali oleh pendidihan air primer. Dari pembahasan hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa pendidihan air primer terjadi pada laju alir pendingin sekunder 624 ℓ/jam. Pendidihan tersebut hendak dihindari sebab laju alir kurang dari 1200 ℓ/jam akan memicu penarikan kapsul ke luar teras reaktor secara otomatis sebagai penyelamatan dini oleh sistem kendali PRTF.

Kata kunci : Pendidihan air primer PRTF

### ABSTRACT

**"FAILURE ANALYSIS OF TEST FUEL IN PRTF IRRADIATION FACILITY"**. *PRTF is a facility of which purposed for fuel testing of power reactor. PRTF is equipped with a capsule as a container of the tested fuel which is flowed by pressurized primary water of 160 bars and a secondary system having flow rate 1200-1500 ℓ per hour for cooling the capsule. Failure analysis of the fuel test is aimed as an input to write down Safety Analysis Report of PRTF. This analysis is conducted by calculating the heat transfer initiated by primary water boiling. The calculation result suggests that the primary water boiling may occur in the secondary coolant at 624 ℓ per hour. This condition will be anticipated by the automatic withdrawn of the capsule out of the reactor core, which will be consequentially occurred in the condition of flow rate less than 1200 ℓ per hour, as the early safety of the PRTF instrumentation and control system.*

Key words : PRTF primary water boiling

### PENDAHULUAN

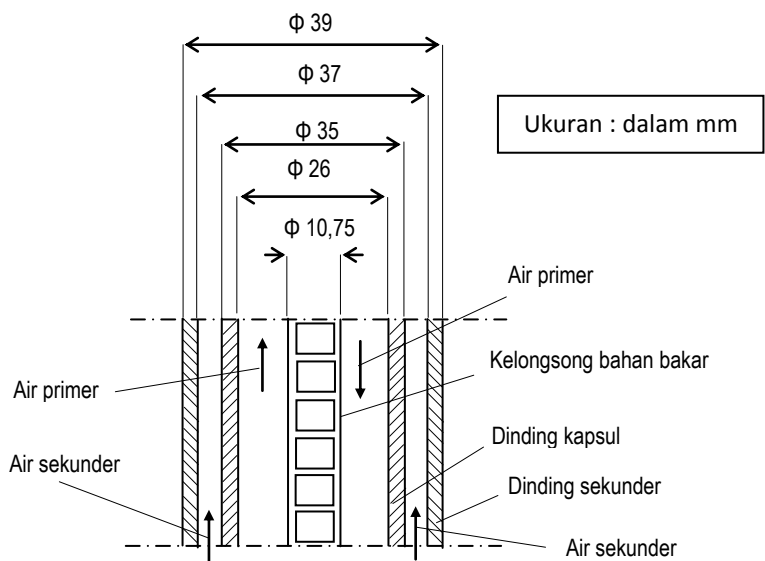
*Power Ramp Test Facility (PRTF)* adalah sebuah fasilitas eksperimen yang digunakan untuk pengujian bahan bakar reaktor daya jenis *Pressurized Water Reaktor (PWR)*. PRTF dilengkapi dengan sebuah kapsul sebagai wadah bahan bakar yang akan diuji dan sebuah tabung sekunder<sup>[1]</sup>. Kapsul selain berisi bahan bakar juga berisi air bertekanan 160 bar yang disirkulasikan menggunakan rangkaian tertutup yang dilengkapi sebuah pompa primer, sehingga kapsul juga berfungsi sebagai tabung primer. Air dalam kapsul (air primer) digunakan untuk memindahkan panas dari kelongsong bahan bakar ke dinding kapsul bagian dalam. Tabung sekunder dihubungkan dengan rangkaian pipa yang dilengkapi dengan 2 buah pompa sekunder. Sistem ini merupakan rangkaian terbuka dimana air pendingin dihisap dari kolam kemudian memasuki tabung sekunder akhirnya dikeluarkan dan masuk ke kolam kembali.

Sistem sekunder berfungsi sebagai pengambil panas dinding kapsul bagian luar. Pendingin sekunder merupakan parameter utama yang berkaitan dengan pejagaan integritas bahan bakar yang diuji oleh karena itu perlu ditetapkan nilai batas laju alirnya. Laju alir nominal pendingin sekunder adalah 1200 s.d 1500 ℓ/jam. Analisis kegagalan bahan bakar dimaksudkan untuk mengetahui nilai laju alir minimum yang dapat merusak bahan bakar uji, sebagai bahan masukan dalam penyusunan Laporan Analisis Keselamatan PRTF. Analisis ini dilakukan dengan cara perhitungan perpindahan panas secara berurut mulai dari kelongsong bahan bakar uji, air primer, dinding kapsul dan suhu air sekunder. Perhitungan tersebut dilakukan dengan asumsi bahwa air primer telah mendidih dimana titik didih air primer pada tekanan 160 bar digunakan sebagai langkah awal perhitungan.

**TEORI**

Bahan bakar uji terkungkung di dalam kelongsong yang terbuat dari bahan stainless steel, berada di dalam kapsul yang berisi air primer bertekanan 160 bar. Air primer disirkulasikan oleh pompa primer di dalam rangkaian tertutup. Dinding luar kapsul didinginkan oleh aliran air yang disirkulasikan oleh sistem pendingin sekunder melalui rangkaian terbuka. Panas yang dibangkitkan oleh bahan bakar uji ditetapkan sebesar 700 W/cm dengan panjang aktif 32,1 cm atau 22,5 kW untuk seluruh panjang aktif. Sumbangan panas radiasi gamma yang datang

dari teras reaktor sebesar 4,5 Kw, nilai ini diambil dari kesebandingan hasil pengukuran panas gamma di reaktor HFR Petten Jerman yang berdaya 45 MW menggunakan kapsul kosong. Jadi jumlah panas yang harus dipindahkan adalah 22,5 kW + 4,5 kW = 27 kW. Perhitungan perpindahan panas dimulai dari kondisi kritis dimana air primer mengalami pendidihan pada tekanan 160 bar. Panas air primer dipindahkan ke dinding kapsul bagian dalam secara konveksi dan dari dinding dalam ke dinding luar secara konduksi dan akhirnya panas dipindahkan ke air sekunder secara konveksi<sup>[2]</sup>. Skema pendinginan ditunjukkan pada Gambar berikut ini.



Skema aliran pendingin bahan bakar uji<sup>[1]</sup>

Perpindahan panas dari air primer ke dinding dalam kapsul digunakan persamaan berikut :

$$T_s - T_{wi} = \frac{q_{max}}{\pi d_i \alpha_{max}} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

- q<sub>max</sub> = Daya batang uji maksimum per satuan panjang, W/m
  - T<sub>s</sub> = Suhu didih air primer pada tekanan 160 bar, K
  - T<sub>wi</sub> = Suhu dinding dalam kapsul, K
  - α<sub>max</sub> = Koefisien perpindahan panas konveksi maksimum air primer, W/m<sup>2</sup> K
  - d<sub>i</sub> = diameter dinding dalam kapsul, m
- Perbedaan suhu antara dinding dalam dan dinding luar kapsul adalah :

$$T_{wi} - T_{wa} = \frac{\ln(\frac{d_o}{d_i})}{2\pi \lambda w} q_{max} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

- T<sub>wa</sub> = Suhu dinding luar kapsul, K
- d<sub>a</sub> = Diameter dinding luar kapsul, m
- λ<sub>w</sub> = Koefisien konduktivitas dinding kapsul, W/m K

Perpindahan panas dari dinding luar kapsul ke air pendingin sekunder adalah :

$$T_{wa} - T_{sekA} = \frac{q'_{max}}{\pi d_o \alpha} q_{max} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

- α = Koefisien perpindahan panas konveksi air pendingin sekunder, W/m<sup>2</sup> K
  - T<sub>sekA</sub> = Suhu air keluar saluran sekunder, K
- Nilai α ditentukan menggunakan persamaan (4)

$$Nu = \frac{\alpha 2s}{\lambda} = 0,012 \times 0,86 \left(\frac{D}{d_a}\right)^{0,16} \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{2s}{L}\right)^{2/3}\right) (Re^{0,87} - 280) Pr^{0,4}$$

.....(4)

Keterangan :

- $N_u$  = Bilangan Nusselt
- $2s$  = Celah saluran pendingin sekunder ( $D-d_a$ ), m
- $D$  = Diameter dinding dalam tabung sekunder, m
- $\alpha$  = Koefisien perpindahan panas air pendingin sekunder,  $W/m^2 K$
- $L$  = Panjang aktif batang uji (321 mm)
- $Re$  = Bilangan Reynold
- $P_r$  = Bilangan Prandtl, untuk suhu air sekunder
- $\lambda$  = Konduktivitas air sekunder pada suhu,  $W/m K$

### TATA KERJA

Analisis dilakukan melalui perhitungan perpindahan panas dalam bejana tekan yang diawali pendidihan air dalam bejana tersebut<sup>[2]</sup>.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis memberikan hasil bahwa pendidihan air primer terjadi pada laju alir pendingin sekunder sebesar 624 l/jam.

Air primer berada di dalam kapsul bertekanan 160 bar memiliki suhu didih  $T_s = 620 K$  atau  $347 ^\circ C$ <sup>[3]</sup>. Pada kondisi ini air primer memiliki koefisien konveksi maksimum  $\alpha_{max} = 7000 W/m^2 K$  pada lebar celah/gap 10 mm<sup>[2]</sup>. Jumlah panas yang harus dipindahkan 27 kW, untuk panjang aktif batang bahan bakar 321mm maka nilai  $q_{max} = 27000/0,321 = 84112 W/m$ . Sedangkan diameter dalam kapsul  $d_i = 26 mm = 0,026 m$ . Dengan demikian persamaan (1) menghasilkan nilai suhu dinding dalam kapsul  $T_{wi} = 473 K = 200 ^\circ C$ .

Perpindahan panas dari dinding dalam ke dinding luar kapsul berlangsung secara konduksi. Data dari sertifikat uji bahan kapsul AlMg3 yang diterbitkan oleh TÜV-Frankfurt, bahan tersebut memiliki koefisien konduksi  $\lambda_w = 1,47 W/cm.^{\circ}C$ . Nilai  $q_{max} = 841,12 W/cm$  maka persamaan (2) menghasilkan nilai suhu dinding luar kapsul  $T_{wa} = 173 ^\circ C = 446 K$ . Persamaan (3) tidak bisa langsung digunakan untuk mencari suhu air keluar saluran sekunder  $T_{Sek A}$  karena harus menentukan koefisien konveksi air sekunder  $\alpha$ . Nilai  $\alpha$  dicari melalui persamaan (4) dengan cara iterasi. Air sekunder pada suhu  $40 ^\circ C$  memiliki nilai  $\lambda = 0,634 W/mK$  dan  $P_r = 4,16$ <sup>[3]</sup>. Dari Gambar 1. Diperoleh nilai  $D = 37 mm$ ,  $d_a = 35 mm$  dan  $2s = 2 mm$ . Dengan demikian persamaan (4) dapat disederhanakan menjadi  $\alpha = 5,988(R_e^{0,87} - 280)$ . Dari persamaan ini diperoleh persamaan-persamaan :

$$Re = \left( \frac{\alpha}{5,988} + 280 \right)^{1,15} \dots\dots\dots(5)$$

$R_e$  juga merupakan fungsi dari kecepatan aliran :  $R_e = (\rho.u.D_h)/\mu$  dimana  $\rho$  adalah densitas air sekunder pada suhu  $40 ^\circ C = 1000 kg/m^3$ ,  $u$  adalah kecepatan aliran (m/detik),  $\mu$  adalah viskositas air sekunder pada suhu  $40 ^\circ C = 631.10^{-6} kg/det.m$  dan  $D_h$  adalah diameter ekivalen  $= D-d_a = 0,037 - 0,035 = 0,002 m$ . Jika nilai-nilai tersebut dimasukkan ke persamaan di atas maka diperoleh persamaan (6)

$$Re = \frac{1000.u.0,002}{651.10^{-6}} = 3169.u$$

Sehingga

$$u = \frac{Re}{3169} \dots\dots\dots(6)$$

Kecepatan aliran  $u$  dipengaruhi oleh luasan saluran :  $u = V/A$  dimana  $V$  adalah laju alir ( $m^3/detik$ ) dan  $A$  adalah luas saluran pendingin sekunder.  $A = 0,785(D^2 - d_a^2) = 0,785(0,037^2 - 0,035^2) = 1,1.10^{-4} m^2$  sehingga :

$$V = u.A = 1,1.10^{-4}.u \dots\dots\dots(7)$$

Dari persamaan (3) :  $T_{Sek A} = T_{wa} - (q_{max}/\pi d_a \alpha) = 446 - (84112/\pi.0,035.\alpha) = 446 - (84112/0,111\alpha)$

Dengan menentukan suhu air masuk saluran sekunder  $T_{Sek E} = 40 ^\circ C = 313 K$  maka beda suhu air keluar dan masuk saluran  $\Delta T_{Sek} = T_{Sek A} - T_{Sek E}$

$$\Delta T_{Sek} = \left[ 446 - \frac{84112}{0,111\alpha} \right] - 313 \dots\dots\dots(8)$$

Nilai panas spesifik air sekunder pada suhu  $40 ^\circ C = 4,179 kJ/kg.K$ <sup>[3]</sup> maka panas total terbangkitkan<sup>[2]</sup> adalah

$$q.L = V.\rho.C \Delta T = V.1000.4179.\Delta T = 4,179.10^6 . V . \Delta T \dots\dots\dots(9)$$

Persamaan (5) s.d (9) mengandung 5 variabel terhadap perubahan nilai  $\alpha$  dan digunakan dalam iterasi (hasil iterasi tercantum pada Tabel terlampir). Dari Tabel tersebut diperoleh nilai  $\alpha$  air sekunder  $8172 W/m^2 K$  dengan hasil akhir panas total  $q.L$  sebesar 27 kW sesuai dengan panas yang dibangkitkan oleh bahan bakar uji dalam kapsul, dengan laju alir  $V$  sebesar  $1,734.10^{-4} m^3/detik$  atau 624 l/jam dimana titik didih air primer dicapai. Pada kondisi ini melalui persamaan  $T_k - T_s = q_{max} / (\pi.d_s.\alpha_{max})$  dimana  $T_k$  adalah suhu kelongsong,  $T_s$  adalah suhu air primer (620 K),  $d_s$  adalah diameter kelongsong (10,75 mm) dan  $\alpha_{max} = 7000 W/m^2K$ ,

maka diperoleh suhu kelongsong  $T_k$  sebesar 839 K (566 °C).

Pembahasan di atas memberikan hasil bahwa laju alir pendingin sekunder 624 ℓ/jam akan menyebabkan pendidihan air primer. Kelongsong bahan bakar uji yang terbuat dari bahan SS mempunyai suhu leleh 1670 K<sup>[3]</sup> jadi pada kondisi air primer mendidih, suhu kelongsong bahan bakar uji masih jauh dibawah titik lelehnya. Namun demikian, jika kondisi tersebut dibiarkan dan laju alir pendingin sekunder mengalami gangguan sehingga  $\Delta T_{Sek}$  naik maka suhu air primer bisa melewati titik kritis (*critical heat flux*) yang menyebabkan koefisien konveksinya turun secara drastis dan selanjutnya suhu kelongsong akan melampaui titik lelehnya<sup>[3]</sup>. PRTF dilengkapi dengan 2 buah pompa sekunder yang dipasang secara parallel menggunakan catu daya tak putus (tidak bergantung pada pasokan PLN) sehingga kemungkinan kegagalan pompa adalah kecil. Seandainya kegagalan pompa sekunder terjadipun pendidihan air primer masih dapat dihindari karena pada laju alir air sekunder dibawah 1200 ℓ/jam PRTF akan bergerak secara otomatis menjauhi teras reaktor yang dikenal sebagai REEX (*reexperiment*) atau *shut down* untuk PRTF. Dari Tabel iterasi diketahui bahwa laju alir  $V$  sebesar  $1,734 \cdot 10^{-4}$

$m^3/detik$  atau 624 ℓ/jam menghasilkan beda suhu air sekunder masuk dan keluar kapsul  $\Delta T_{Sek}$  sebesar 37,27 K namun REEX akan terjadi jauh lebih dini yaitu pada nilai  $\Delta T_{Sek}$  sebesar 23 K<sup>[1]</sup>.

**KESIMPULAN**

Laju alir pendingin sekunder sebesar 624 ℓ/jam dapat menyebabkan pendidihan air primer dalam kapsul dan hal ini diantisipasi secara dini oleh sistem kendali PRTF.

**DAFTAR PUSTAKA**

1. INTERATOM, “MPR30 Description of the Power Ramp Test Facility”, OS-Nr. 1952.
2. W. HEBEL and P. DIRVEN, “Critical Heat Flux Through a Stagnan Water Annulus”, Kerntechnik, S. 546-549, 1975.
3. FRANK P. INCROPERA, DAVID P. DEWITT, T HEODORE L. BERGMAN and ANDRIENNE S. LAVINE, “Introduction to Heat Transfer”, Fifth Edition, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Copyright 2007.

**LAMPIRAN**

Table hasil iterasi koefisien perpindahan panas konveksi  $\alpha$

$\alpha$ (W/m <sup>2</sup> K)	$R_{eDh} = \left[ \frac{\alpha}{5,988} + 280 \right]^{1,15}$	$u$ (m/det) = $\frac{R_{eDh}}{3169}$	$V$ (m <sup>3</sup> /det) = $1,1 \cdot 10^{-4} \cdot u$	$\Delta T_{Sek}$ (K) = $\left[ 443 - \frac{84112}{0,111\alpha} \right] - 313$	$q' \cdot L$ (W) = $4,179 \cdot 10^6 \cdot V \cdot \Delta T_{Sek}$
9000	5457	1,722	$1,894 \cdot 10^{-4}$	45	$35,6 \cdot 10^3$
8000	4894	1,544	$1,698 \cdot 10^{-4}$	35	$24,8 \cdot 10^3$
8500	5186	1,637	$1,800 \cdot 10^{-4}$	40,85	$30,7 \cdot 10^3$
8200	5011	1,581	$1,739 \cdot 10^{-4}$	37,59	$27,32 \cdot 10^3$
8100	4953	1,563	$1,719 \cdot 10^{-4}$	36,45	$26,18 \cdot 10^3$
8150	4982	1,572	$1,729 \cdot 10^{-4}$	37,02	$26,75 \cdot 10^3$
8175	4996	1,577	$1,734 \cdot 10^{-4}$	37,31	$27,04 \cdot 10^3$
8170	4993	1,576	$1,733 \cdot 10^{-4}$	37,25	$26,98 \cdot 10^3$
8172	4995	1,576	$1,734 \cdot 10^{-4}$	37,27	$27,00 \cdot 10^3$

