

## ANALISIS DESAIN GEOMETRI ROD BAHAN BAKAR PWR-1000 TIPIKAL BUATAN MITSUBISHI DAN WESTINGHOUSE

Muh. Darwis Isnaini

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310  
Email : [darwis@batan.go.id](mailto:darwis@batan.go.id)

### ABSTRAK

**ANALISIS DESAIN GEOMETRI ROD BAHAN BAKAR PWR-1000 TIPIKAL BUATAN MITSUBISHI DAN WESTINGHOUSE.** Telah dilakukan verifikasi desain geometri rod bahan bakar PLTN jenis PWR-1000 Tipikal buatan Mitsubishi dan Westinghouse. Pada saat yang akan datang, pemerintah RI berencana membangun pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan energi nasional, sehingga pertumbuhan ekonomi di dalam negeri dapat dipertahankan. BATAN sebagai organisasi penunjang teknis (Technical Support Organization – TSO) mempunyai tugas dan fungsi memberikan pertimbangan teknis dalam memilih desain PLTN. Dari desain PLTN jenis PWR yang ada di dunia, salah satunya adalah PWR-1000 Tipikal. Desain PLTN jenis PWR-1000 Tipikal dikembangkan oleh dua perusahaan yang berbeda yaitu Mitsubishi Jepang dan Westinghouse Amerika Serikat. Sebagai latar belakang penelitian ini adalah kedua PLTN jenis PWR ini adalah mempunyai daya termal reaktor yang sama 3411 MWt, jumlah perangkat bahan bakar sama 193 buah, tekanan operasi 15,4 MPa, tetapi mempunyai ukuran diameter rod yang berbeda yakni 0,950 dan 0,914 cm. Dalam analisis ini dilakukan perhitungan untuk reaktor tersebut, dengan mengacu pada data yang ada dengan perbedaan ukuran diameter rod bahan bakar. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik termohidrolika sub kanal akibat perbedaan ukuran geometri rod. Dari hasil perhitungan pada rod bahan bakar yang memiliki faktor kanal panas bervariasi dari 1,013 sampai 1,144, dan pada kondisi terburuk dengan faktor kanal panas 2,50 menunjukkan bahwa code COBRA-EN telah tervalidasi dengan baik terhadap data desain PWR Tipikal Mitsubishi dan Westinghouse, selain itu menunjukkan bahwa PWR Tipikal Westinghouse memiliki kelebihan suhu meat dan kelongsong yang lebih rendah, sebaliknya PWR Tipikal Mitsubishi memiliki kelebihan margin keselamatan terhadap DNBR yang lebih tinggi. Perhitungan margin keselamatan terhadap DNBR dengan korelasi W-3 memberikan hasil yang lebih konservatif. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa rod bahan bakar dengan diameter 0,95 dan 0,914 cm memenuhi standar dan dapat digunakan untuk PWR dengan daya tinggi dan distribusi daya yang tidak merata.

Kata kunci : Analisis desain, diameter rod, PWR-1000 Tipikal.

### ABSTRACT

**DESIGN ANALYSIS OF MITSUBISHI AND WESTINGHOUSE'S TYPICAL PWR-1000 FUEL ROD GEOMETRY.** The desain verification of Mitsubishi and Westinghouse Typical PWR-1000 fuel rod geometry was carried out. In the future, the Indonesian government has planned to build the nuclear power plants (NPP) to assure the sufficiency of national energy demand, in such that the economic growth should be maintained. BATAN as the Technical Support Organization has task and function to give technical review in choosing NPP design. Among the PWR design, there is a Typical PWR-1000 design, that developed by two different corporations, i.e., Mitsubishi from Japan and Westinghouse from US. The background of this research, the two design of Typical PWR-100 have same thermal power of 3411 MWt, the number of fuel assemblies of 193, operation pressure 15.4 Mpa, however the rod diameter geometry are different, 0.950 and 0.914 cm, respectively. The objectives of this analysis is finding out the influence of rod diameter size against sub channel thermal-hydraulics. The calculations were performed using COBRA-EN. The calculation result several rods using variation engineering hot channel factor of 1.013 to 1.144, and the worst condition of hot channel factor of 2.5, show that the COBRA-EN code has been well validated against design data of Mitsubishi and Westinghouse's Typical PWR, in addition show that the Westinghouse's PWR has lower cladding and meat temperatures than the Mitsubishi's ones, whereas the Mitsubishi's PWR has greater safety margin against DNBR than the Westinghouse's ones. The safety margin calculation using W-3 correlation gave result more conservative. From this result, it can be concluded that the fuel rods of 0.95 and 0.914 cm diameter had up to standard and could be used for PWR plant with high power and unflatted power distribution.

Keywords: Design analysis, fuel rod diameter, Typical PWR-1000.

## PENDAHULUAN

Berdasarkan Hasil Studi Energi Jangka Panjang 2000 – 2025, diperkirakan kebutuhan jumlah energi di Indonesia pada tahun 2025 sekitar 100 GW [1] agar pertumbuhan ekonomi dapat dipertahankan 5 – 6% pertahun. Dari jumlah energi tersebut, maka diperlukan pembangkitan dari berbagai sumber yang ada di Indonesia, seperti PLTA, PLTU, PLTD dan sebagainya. Pada saat yang akan datang, pemerintah Republik Indonesia berencana membangun pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan energi nasional, sehingga pertumbuhan ekonomi di dalam negeri dapat dipertahankan. BATAN sebagai organisasi penunjang teknis (*Technical Support Organization – TSO*) mempunyai tugas dan fungsi memberikan pertimbangan teknis dalam memilih desain PLTN. Sebagai bahan dalam mengambil keputusan dalam memilih jenis PLTN, perlu dilakukan review terhadap data teknis tersebut. Adapun review yang harus dilakukan adalah berkaitan dengan desain dan keselamatan, baik secara global ataupun secara rinci.

Dari desain PLTN jenis PWR yang ada di dunia, salah satunya adalah PWR-1000 Tipikal. Desain PLTN jenis PWR-1000 Tipikal dikembangkan oleh dua perusahaan yang berbeda yaitu Mitsubishi Jepang dan Westinghouse Amerika Serikat. Data teknis dari jenis PLTN tersebut telah banyak terpublikasi secara luas, seperti disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perubahan desain PWR [2, 3, 4,5]

Desainer PWR-1000	Mitsubishi	Westinghouse
Jumlah Loop	4	4
Daya Termal (MW)	3411	3411
Diameter Teras (m)	3,37	3,37
Tinggi Teras (m)	3,66	3,66
Desain Perangkat B. Bakar		
Jumlah perangkat	193	193
Tipe	17 x 17	17 x 17
Ukuran perangkat (cm x cm)	21,40 x 21,40	21,40 x 21,40
Jumlah rod / perangkat	264	264
Jarak antar pusat rod (cm)	1,26	1,26
Diameter rod (cm)	0,950	0,914
Diameter pelet (cm)	0,819	0,784
Daya linier rerata (kW/m)	18,3	17,9
Rapat Daya (kW/l)	105	108

Dari tabel di atas, terlihat bahwa kedua reaktor tersebut mempunyai data teknis yang sama antara lain daya termal reaktor yang sama 3411 MWt, jumlah perangkat bahan bakar sama 193 buah, tekanan operasi 15,4 MPa,

tinggi teras aktif 3,66 m, tetapi mempunyai ukuran diameter rod yang berbeda yakni 0,950 dan 0,914 cm. Perbedaan diameter rod akan berpengaruh pada perbedaan ukuran diameter pelet bahan bakar, volume bahan bakar dan panas pembangkitan per volume. Jika panas yang dibangkitkan dan luas sub kanal aliran untuk pengambilan panas berbeda, maka akan berpengaruh pada distribusi suhu pendingin, kelongsong dan *meat* bahan bakar yang berbeda demikian juga dengan margin keselamatan terhadap DNBR. Dengan latar belakang tersebut, maka perlu dilakukan suatu analisis dengan cara melakukan perhitungan terhadap kedua reaktor tersebut dengan mengacu pada data yang ada dengan perbedaan ukuran diameter rod bahan bakar tersebut.

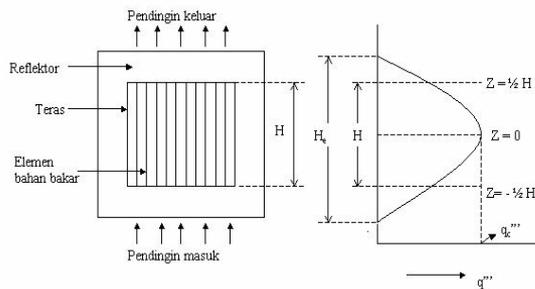
Beberapa penelitian sebelumnya [6,7] perhitungan dilakukan untuk model sub kanal rod bahan bakar dengan diameter 0,914 cm, dan penelitian lainnya [8] perhitungan dilakukan untuk verifikasi teras, memberikan hasil antara lain suhu kelongsong bahan bakar berkisar 333,6 – 349,3 °C, suhu maksimum permukaan *meat* bahan bakar berkisar 478,7 – 699,7 °C, suhu maksimum *meat* bahan bakar berkisar 1030,2 – 2103,3 °C (di bawah batas desain suhu bahan bakar 2594 °C) dan DNBR minimum berkisar 4,29 sampai 1,83.

Di dalam makalah ini akan disajikan hasil penelitian yang berkaitan dengan desain termohidrolika pada PWR-1000 Mitsubishi [2] dan Westinghouse [4] yang terdiri atas 193 perangkat elemen bakar dengan daya termal sebesar 3.411 MWt, dengan cara melakukan perhitungan termohidrolika sub kanal dan rod bahan bakar, melakukan verifikasi dengan data desain, dan membandingkan antara kedua desain tersebut. Analisis dilakukan dengan menggunakan program COBRA-EN yang dijalankan dengan komputer PC. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui karakteristik termohidrolika sub kanal akibat perbedaan ukuran geometri rod.

## TEORI

### Pembangkitan panas dalam bahan bakar

Gambaran suatu teras reaktor yang tersusun atas perangkat elemen bahan bakar setinggi H, didinginkan dengan aliran fluida pendingin yang masuk dari bawah dan keluar ke atas, diperlihatkan pada Gambar 1 [5]. Besarnya daya panas volumetrik  $q'''$  sebanding dengan besarnya fluks neutron  $\phi$ , yang mempunyai nilai maksimum di tengah teras ( $z = 0$ ) dan akan menjadi sama dengan nol pada jarak ekstrapolasinya yaitu  $z = \pm \frac{1}{2} H_c$ .



Gambar 1. Distribusi aksial daya panas volumetrik dalam elemen bahan bakar

Untuk elemen bahan bakar yang susunannya seragam, daya panas volumetrik akan sebanding dengan fluks neutron, sehingga :

$$q'''(z) = q_c''' \cos \frac{\pi \cdot z}{H_e} \quad \dots\dots(1)$$

di mana  $q'''$  dan  $q_c'''$  adalah daya panas volumetrik di titik  $z$  dan di tengah-tengah elemen bahan bakar.

Jika ditinjau suatu unsur  $dz$  saluran bahan bakar dan pendingin, maka kenaikan panas dalam fluida pendingin sama dengan panas yang dibangkitkan dalam unsur  $dz$  bahan bakar, sehingga :

$$m c_p dt_f = q''' A_c dz \quad \dots\dots(2)$$

Dimana :

- $m$  : kecepatan aliran massa fluida pendingin, kg/detik
- $c_p$  : panas jenis fluida pendingin, kJ/kg.°C
- $dt_f$  : kenaikan suhu fluida pendingin antara  $z$  dan  $z + dz$ , °C.
- $A_c$  : luas penampang elemen bahan bakar,  $m^2$

**Hantaran panas konveksi**

Bahan pendingin dalam pendingin primer harus mampu memindahkan panas yang dibangkitkan di dalam bahan bakar, perisai panas dan bejana reaktor. Banyaknya panas,  $q$  MWt, yang dihantarkan ke fluida pendingin dinyatakan oleh hukum pendinginan Newton :

$$q = h A (t_w - t_f) \quad \dots\dots(3)$$

di mana

- $h$  : koefisien hantaran panas dengan konveksi ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- $A$  : luas perpindahan panas ( $m^2$ )
- $t_w - t_f$  : selisih suhu dinding (kelongsong) dan fluida pendingin ( $^\circ C$ )

Hantaran panas dari dinding yang solid ke fluida, di mana terjadi proses pencampuran panas dan fluida dingin yang tidak disertai pendidihan atau kondensasi, disebut hantaran panas secara konveksi. Pada hantaran panas secara konveksi, bagian kecil dari fluida menerima panas dari dinding dan memindahkannya pada sisi lainnya. Efisiensi hantaran panas secara konveksi meningkat banyak dibanding hantaran panas secara konduksi. Dalam reaktor daya, bahan pendingin dialirkan menggunakan pompa, sehingga harus dipakai koefisien hantaran panas dengan konveksi paksa. Koefisien hantaran panas,  $h$ , dapat dihitung dari bilangan Nusselt ( $Nu$ ), yang dirumuskan dengan :

$$Nu = \frac{h De}{k} \quad \dots\dots(4)$$

di mana

$k$  : konduktivitas termal dari fluida ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

$De$  : diameter hidraulik (m).

Bilangan Nusselt diinterpretasikan sebagai perbandingan hantaran panas oleh konveksi dengan hantaran panas oleh konduksi.

Koefisien hantaran panas konveksi merupakan fungsi dari beberapa parameter yang dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi yakni bilangan Nusselt ( $Nu$ ), bilangan Reynolds ( $Re$ ) dan bilangan Prandtl ( $Pr$ ), yang dinyatakan dengan persamaan Navier-Stokes :

$$Nu = f(Re, Pr) \quad \dots\dots(5)$$

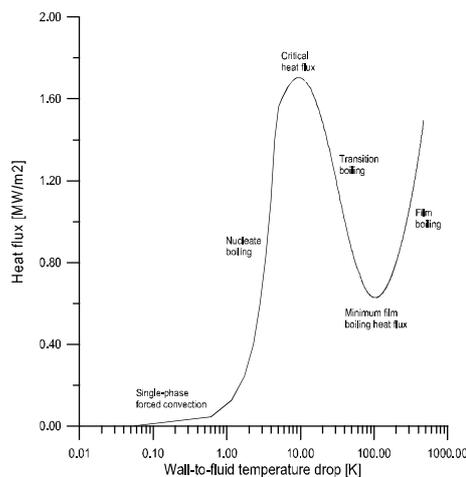
**Code COBRA-EN**

Code COBRA-EN dikembangkan dari COBRA-3C yaitu code untuk analisis sub kanal. Selain dikembangkan menjadi COBRA-EN, code COBRA-3C juga dikembangkan menjadi COBRA-3C/MIT (modul termohidrolika dari code kinetika teras MEKIN), COBRA-IV-I (untuk analisis sub kanal), NORMA (untuk simulator reaktivitas) dan QUARK (untuk analisis dinamika teras), semua code di atas digunakan untuk perhitungan pada reaktor daya air ringan (jenis BWR dan PWR).

Beberapa fitur di dalam code COBRA-EN dirangkum sebagai berikut :

- a. Selain model homogen dua fase, digunakan campuran persamaan konservasi massa, energi dan vektor momentum dalam arah aksial dan menyamping (*lateral*), yakni pada tiga persamaan keseimbangan.
- b. Punya 2 skema solusi dapat digunakan untuk model homogen 3 persamaan, yakni satu algoritma implisit (iteratif) yang disebut solusi "gradien tekanan" yang mirip dengan solusi aliran silang (*crossflow*) dari COBRA-3C dan COBRA-IV-I, dan satu solusi implisit

- berdasar iterasi *Newton-Raphson* untuk sistem non linier.
- Ditambahkan korelasi EPRI untuk pengali friksi dua fase, kualitas *subcooled boiling*, dan fraksi void *bulk*.
  - Fungsi untuk menghitung sifat-sifat air kondisi *subcooled* dan uap panas lanjut (*superheated*).
  - Berisi 5 rejim perpindahan panas, yakni konveksi paksa satu fase, *subcooled nucleate boiling*, *saturated nucleate boiling*, pendidihan transisi dan film (atau pendidihan pasca fluks panas kritis-CHF), seperti terlihat pada Gambar 2.
  - Tersedia sifat fisik kelongsong dan bahan bakar sebagai fungsi suhu.
  - Daftar korelasi perpindahan panas dan korelasi fluks panas kritis (*critical heat flux-CHF*).
  - Tersedia pilihan sistem satuan yakni sistem unit Internasional (SI) dan *American Engineering (AE)* pada saat membuat file masukan (*input file*) maupun hasil keluaran hitungan (*output file*).



Gambar 2. Contoh kurva pendidihan untuk koefisien perpindahan panas (skala semilogaritma) [9]

Sebagaimana lazimnya dalam seri code COBRA, analisis termohidrolika dikerjakan dalam susunan kanal paralel yang dibatasi dengan rod bahan bakar silinder dan celah terbuka. Arah aksial (sumbu z) diasumsikan paralel dengan kanal dan berorientasi dari aliran masuk ke keluar, yang secara umum vertikal dan mengalir ke atas di dalam teras reaktor daya air ringan (LWR).

Beberapa persamaan yang digunakan di dalam code COBRA-EN, antara lain:

**a. Konveksi paksa Satu Fase**

Untuk kondisi aliran turbulen (konveksi paksa satu fase) digunakan korelasi Dittus-Boelter:

$$h_T = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \left( \frac{k}{D_h} \right) \dots\dots (6)$$

Sedangkan untuk aliran laminier:

$$h_L = 8,0 \frac{k}{D_h} \dots\dots\dots (7)$$

Dengan bilangan Nusselt diasumsikan sebesar 8,0. Koefisien perpindahan panas konveksi paksa satu fase merupakan nilai maksimum dari korelasi laminier dan turbulen:

$$H_{SPFC} = \max(h_T, h_L) \dots\dots(8)$$

- k = konduktivitas termal pendingin (W/m.°C),
- D<sub>h</sub> = diameter hidraulik ekuivalen (m),
- Re = bilangan Reynolds (=GD<sub>h</sub>/μ),
- Pr = bilangan Prandtl (=C<sub>p</sub>μ/k),
- G = fluks massa pendingin (kg/m<sup>2</sup>.s),
- μ = viscositas dinamis (kg/m.s),
- C<sub>p</sub> = panas jenis (kJ/kg.°C).

Semua sifat dievaluasi untuk kondisi air atau uap pada suhu pendingin *bulk*.

**b. Pendidihan inti *subcooled* dan saturasi**

Korelasi Thom dituliskan sebagai:

$$q''_{Thom} = 0,05358 \cdot e^{P/630} \cdot (T_w - T_{sat})^2 \dots\dots(9)$$

- P = Tekanan sistem (KPa),
- T<sub>w</sub> = suhu permukaan rod bahan bakar (°C),
- T<sub>sat</sub> = suhu saturasi pendingin (°C),
- T<sub>b</sub> = suhu bulk pendingin (°C),
- q'' = fluks panas pendingin (W/m<sup>2</sup>).

Opsi *default* dalam COBRA-EN untuk koefisien perpindahan panas pendidihan inti adalah jumlahan korelasi perpindahan panas konveksi paksa fase cair dan korelasi Thom:

$$H_{NB} = H_{SPFC} + q''_{Thom} / (T_w - T_b) \dots\dots(10)$$

Yang dalam bentuk fluks panas dituliskan sebagai:

$$q'' = H_{SPFC} (T_w - T_b) + 0,05358e^{p^{630}} \Delta(T_w - T_{sat})^2$$

atau

$$0,05358e^{p^{630}} \Delta T_w^2 + H_{SPFC} \Delta T_w + H_{SPFC} (T_{sat} - T_b) - q'' = 0$$

..... (11)

Dengan  $\Delta T_w = T_w - T_{sat}$

**c. Pendidihan transisi**

Digunakan korelasi Condie-Bengtson yang dimodifikasi, sebagai berikut:

$$q''_{TB} = C_1 e^{\frac{1}{2} \sqrt{T_w - T_{sat}}} (T_w - T_{sat}) \quad \dots (12)$$

dimana:

$$C_1 = \frac{q''_{CHF} - q''_{FB}}{T_{CHF} - T_{sat}} e^{\frac{1}{2} \sqrt{T_{CHF} - T_{sat}}} \quad \dots (13)$$

$q''_{CHF}$  = fluks panas kritis ( $W/m^2$ ),

$q''_{FB}$  =  $h_{FB}(T_{CHF} - T_{sat})$  = fluks panas pendidihan pada suhu fluks panas kritis ( $W/m^2$ ),

$q''_{TB}$  = fluks panas pendidihan transisi ( $W/m^2$ ).

Adapun untuk  $T_w = T_{CHF}$ , maka

$$q''_{TB} = q''_{CHF} - q''_{FB} \quad \dots (14)$$

**d. Korelasi Fluks Panas Kritis (CHF)**

Terdapat 7 korelasi fluks panas kritis yang dapat digunakan di dalam COBRA-EN, yaitu korelasi BA&W-2, W-3, EPRI, Macbeth (12 koefisien), Macbeth (6 koefisien), Biasi dan Barnett dimodifikasi. Adapun korelasi CHF yang digunakan di dalam desain PWR-1000 Tipikal adalah korelasi WRB-2, meskipun juga disebut korelasi W-3 sebagai pembanding.

**TATA KERJA**

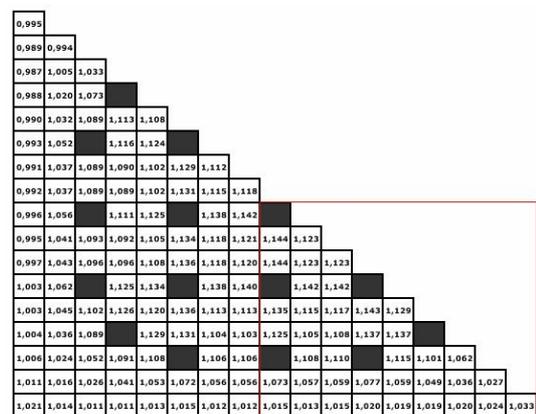
Sebagai model dalam verifikasi desain geometri rod dengan menggunakan code COBRA-EN, digunakan data teras PLTN jenis PWR dengan daya listrik terbangkit sekitar 1000 MWe (PWR kelas 1000), yaitu PWR Tipikal buatan Mitsubishi [2] dan Westinghouse [4] yang mempunyai daya

termal yang sama 3.411 MWt, teras terdiri atas 193 perangkat elemen bakar, dimana tiap perangkat tersusun atas matriks 17 x 17 yang terdiri dari 264 batang bahan bakar, 24 tabung pengarah (*guide thimble*) untuk batang kendali, dan 1 tabung pengarah instrumentasi. Data spesifikasi teknis PWR Tipikal tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Data teknis PWR-Tipikal [2,3,4].

<b>Reaktor</b>	
Tipe	PWR Tipikal
Daya termal reaktor (MWt)	3411
Laju alir pendingin (Ton/hr)	60.000
Suhu pendingin masukan ( $^{\circ}C$ )	292,6
Tekanan masukan teras (atm)	149,7
Juml. perangkat elemen bakar	193
Panjang aktif (m)	3,66
Diameter ekuivalen teras (m)	3,37

Dari data teknis tersebut, diambil satu perangkat bahan bakar yang memiliki faktor kanal panas fluks panas rekayasa  $F_Q$  yang tinggi di posisi F-8, lalu diambil  $\frac{1}{2}$  bagian perangkat elemen bakar, seperti tertera pada Gambar 3.

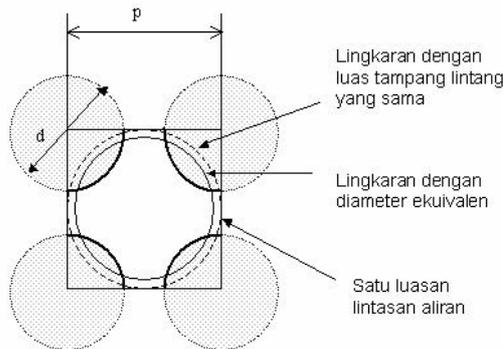


Gambar 3. Susunan rod bahan bakar di dalam perangkat bahan bakar.

Sebagai bahan perhitungan, diambil 1/8 bagian perangkat bahan bakar yang merupakan rod bahan bakar dengan nilai faktor kanal panas bervariasi antara 1,013 sampai 1,144. Distribusi daya teras (distribusi faktor kanal panas) ini sebagian besar nilainya tetap pada awal hidup (*beginning of life - BOL*) tidak terpengaruh pengkayaan bahan bakar, pola pemuatan bahan bakar dan tingkat daya teras, tetapi merupakan fungsi beberapa variabel antara lain: posisi dan

keseimbangan (penaikan) batang kendali, dan deplesi bahan bakar. Jika terjadi penarikan batang kendali di salah satu posisi yang tidak diimbangi dengan penarikan batang kendali di posisi lain, dapat menyebabkan faktor kanal panas meningkat sampai 2,50. Namun hal itu biasanya di dalam desain sudah dilengkapi pengaman otomatis (perhitungan faktor kanal panas *real time*), yakni begitu terjadi penarikan batang kendali yang tidak seimbang sebagai batasan desain, maka secara otomatis batang kendali tersebut akan turun atau reaktor langsung padam (*scram*). Meskipun demikian, desain untuk kondisi terburuk tersebut tetap akan dilakukan analisis.

Dari kedua desain PLTN tersebut, masing-masing diambil 1 model untuk perhitungan sub kanal dengan ukuran diameter rod bahan bakar yang berbeda seperti tertera pada Tabel 3, dengan bentuk sub kanal yang terjadi antara rod bahan bakar seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Bentuk sub kanal yang terjadi antara rod bahan bakar [2].

Tabel 3. Model perhitungan sub kanal.

<b>Data Rod bahan bakar</b>	<b>PWR Mits.</b>	<b>PWR West.</b>
Jarak antar pusat rod, (cm)	1,260	1,260
Diameter rod b.bakar (cm)	0,950	0,914
Diameter pelet (cm)	0,819	0,784
Tebal kelongsong (cm)	0,057	0,057
Tebal gap (cm)	0,017	0,017
<b>Tampang lintang aliran</b>		
Luas sub kanal (cm <sup>2</sup> )	0,879	0,931
Keliling basah (cm)	2,985	2,871
Diameter hidraulik (cm)	1,178	1,298

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan code COBRA-EN untuk kondisi *steady state*. Dalam melakukan analisis desain termohidrolika teras PWR, digunakan batasan keselamatan sebagaimana spesifikasi teknis umum dari PWR, antara lain :

- Marjin keselamatan terhadap pelepasan pendidihan inti (DNBR) minimum harus lebih besar dari 2,58 (korelasi WRB-2).
- Suhu maksimum pusat *meat* bahan bakar sekitar 1800°C, sehingga memberikan marjin yang cukup terhadap suhu pelelehan bahan bakar 2594 °C.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan untuk analisis desain termohidrolika untuk PWR Mitsubishi dan Westinghouse dengan menggunakan code COBRA-EN disajikan pada Tabel 4.

Jika dibandingkan hasil perhitungan dengan data desain, diperoleh bahwa :

- Dibandingkan dengan data desain suhu keluaran pendingin dari teras sebesar 325°C, maka suhu pendingin keluaran sub kanal untuk PWR Mitsubishi dengan dengan faktor panas 1,013 dan 1,144 masing-masing terdapat perbedaan -0,84% dan -0,63%, sedangkan untuk PWR Westinghouse terdapat perbedaan -1,32% dan -1,16%.
- Untuk kecepatan massa pendingin rerata desain sebesar 3262,22 kg/m<sup>2</sup>.s, maka kecepatan massa untuk PWR Mitsubishi dari masing-masing sub kanal terdapat perbedaan -0,063% dan -0,106%, sedangkan untuk PWR Westinghouse terdapat perbedaan -0,032% dan -0,071%.
- Jika dibandingkan dengan fluks panas rerata desain PWR Westinghouse sebesar 62,108 W/cm<sup>2</sup> [4], maka hasil perhitungan fluks panas pada  $F_Q = 1,013$  untuk PWR Westinghouse terdapat perbedaan 1,15%, sedangkan untuk PWR Mitsubishi terdapat perbedaan -2,63%.
- Jika dibandingkan fluks panas PWR Mitsubishi dan PWR Westinghouse untuk faktor kanal panas 1,013 dan 1,144, maka fluks panas PWR Westinghouse masing-masing keduanya lebih besar 3,89%, hal ini disebabkan oleh luas permukaan rod bahan bakar PWR Westinghouse yang lebih kecil (92,56%) dibanding rod PWR Mitsubishi.

Tabel 4. Hasil perhitungan termohidrolika untuk PWR Mitsubishi dan Westinghouse, untuk rod dengan faktor kanal panas terendah dan tertinggi, dengan suhu masukan pendingin 289,0°C.

	Mitsubishi		Westinghouse		
	F <sub>0</sub>	1,013	1,144	1,013	1,144
Suhu T (°C)					
T <i>meat</i> maks	863,35	946,25	880,05	953,85	
T <i>meat</i> outer	475,65	496,65	482,15	504,45	
T <i>clad</i> inner	353,65	358,85	354,45	360,05	
T <i>clad</i> outer	331,65	333,85	331,35	333,45	
T out pend.	322,26	322,95	320,72	321,22	
Kecep. Massa (kg/m <sup>2</sup> .s)	3260,17	3258,77	3261,17	3259,89	
Fluks panas q'' (W/cm <sup>2</sup> )	60,471	68,291	62,824	70,948	
Koef.hantaran panas h (W/m <sup>2</sup> .K)	34837,2	34846,5	34087,2	34096,0	
DNBR min	6,018	5,328	5,461	4,835	

Dari perbandingan data desain dengan hasil perhitungan dengan code COBRA-EN, diperoleh perbedaan dalam rentang kurang dari 5%. Hal ini menunjukkan, bahwa perhitungan menggunakan COBRA-EN terhadap kedua model sudah valid.

Jika dibandingkan antara hasil perhitungan untuk PWR Mitsubishi dan PWR Westinghouse, diperoleh bahwa:

- Untuk F<sub>0</sub> yang sama, maka nilai suhu *meat* bahan bakar dan kelongsong untuk PWR Mitsubishi diperoleh lebih rendah dibanding PWR Westinghouse. Hal ini disebabkan karena kedua reaktor memiliki daya yang sama 3411 MWt, jumlah rod yang sama 50.952, tinggi teras aktif 3,66 m, tetapi diameter pelet dari masing-masing reaktor berbeda 0,819 dan 0,784 cm, dan dengan asumsi densitas dan tingkat pengkayaan bahan bakar yang sama, maka akan diperoleh panas pembangkitan q''' masing-masing reaktor sebesar 347,07 dan 378,55 W/cm<sup>3</sup>. Dengan panas pembangkitan yang lebih rendah 8,32% pada PWR Mitsubishi, maka akan diperoleh suhu *meat* dan kelongsong pada PWR Mitsubishi lebih rendah dibanding PWR Westinghouse.
- Sebaliknya suhu pendingin PWR Mitsubishi lebih tinggi dibanding PWR Westinghouse. Hal ini disebabkan karena ukuran jarak antar pusat rod (*pitch*) besarnya sama 1,26 cm, tetapi diameter rod PWR Mitsubishi (0,950 cm) lebih besar dibanding PWR Westinghouse (0,914 cm), hal ini berakibat luas aliran

perpindahan panas untuk PWR Mitsubishi (0,879 cm<sup>2</sup>) lebih rendah 5,59% dibanding PWR Westinghouse (0,931 cm<sup>2</sup>). Meskipun koefisien hantaran panas h dari PWR Mitsubishi lebih tinggi 2,20% dibanding PWR Westinghouse, tetapi perhitungan berdasarkan persamaan (3) menunjukkan bahwa perbedaan suhu kelongsong dan pendingin atau (t<sub>w</sub> - t<sub>r</sub>) dari PWR Mitsubishi lebih kecil dibanding PWR Westinghouse, hal ini akan berakibat suhu pendingin PWR Mitsubishi diperoleh lebih tinggi dibanding PWR Westinghouse.

Tabel 5. Hasil perhitungan termohidrolika untuk PWR Mitsubishi dan Westinghouse, untuk kondisi rod dengan faktor kanal panas F<sub>q</sub> = 2,50.

	PWR Mitsubishi		PWR West.	
	F <sub>0</sub>	2,50	2,50	
Suhu T (°C)				
T <i>meat</i> maks		1698,4		1710,5
T <i>meat</i> outer		715,05		726,75
T <i>clad</i> inner		410,55		408,25
T <i>clad</i> outer		351,55		346,35
T out pend.		325,58		323,79
Kecep. Massa (kg/m <sup>2</sup> .s)		3258,41		3260,53
Fluks panas q'' (W/cm <sup>2</sup> )		149,24		155,05
Koef.hantaran panas h (W/m <sup>2</sup> .K)		35025,824		34263,043
DNBR min		2,432		2,207

Hasil perhitungan untuk kondisi desain ekstrim yakni kondisi yang diakibatkan ketidakseimbangan posisi batang kendali, sehingga rod mencapai faktor kanal panas F<sub>0</sub> sebesar 2,50, disajikan pada Tabel 5.

Jika dibandingkan hasil perhitungan untuk PWR Mitsubishi dan Westinghouse dengan data desain, diperoleh bahwa :

- Dibandingkan dengan data desain suhu keluaran pendingin dari teras sebesar 325°C, maka dari masing-masing sub kanal terdapat perbedaan 0,17% dan -0,37%.
- Untuk kecepatan massa pendingin rerata desain sebesar 3262,22 kg/m<sup>2</sup>.s, maka kecepatan massa dari masing-masing sub kanal terdapat perbedaan -0,12% dan -0,05%.
- Fluks panas maksimum desain untuk PWR Westinghouse sebesar 155,27 W/cm<sup>2</sup> [4], maka fluks panas PWR Mitsubishi dan Westinghouse hasil perhitungan terdapat perbedaan -3,88% dan -0,14%. Akibat dari fluks panas lokal PWR Mitsubishi lebih rendah dibanding PWR Westinghouse, maka PWR Mitsubishi memiliki margin keselamatan terhadap DNBR yang lebih tinggi.

- Adapun perbedaan terhadap DNBR minimum desain 2,58 dengan hasil perhitungan untuk PWR Mitsubishi dan Westinghouse masing-masing sebesar 2,432 dan 2,207, tidak dapat dibandingkan, disebabkan karena korelasi yang berbeda, yakni korelasi WRB-2 untuk desain, sedangkan dalam perhitungan ini digunakan korelasi W-3. Hal ini hanya menunjukkan bahwa perhitungan DNBR dengan korelasi W-3 memberikan nilai yang lebih konservatif.

Dari hasil perbandingan data desain dengan hasil perhitungan dengan code COBRA-EN untuk rod dengan faktor kanal panas 2,50 (kondisi desain ekstrim), diperoleh perbedaan antara dalam rentang kurang dari 5%. Hal ini menunjukkan, bahwa perhitungan terhadap kedua model adalah valid.

## KESIMPULAN

Dari hasil analisis perubahan geometri rod terhadap karakteristik termohidrolika dapat disimpulkan bahwa data desain PWR-1000 Tipikal Mitsubishi dan Westinghouse sudah tervalidasi dengan baik menggunakan code COBRA-EN, di mana PWR Tipikal Westinghouse memiliki kelebihan suhu *meat* dan kelongsong yang lebih rendah dibanding PWR Tipikal Mitsubishi, karena pembangkitan panas per satuan volumenya lebih kecil, sebagai akibat dari ukuran diameter rod yang lebih kecil, sedangkan PWR Tipikal Mitsubishi memiliki kelebihan margin keselamatan terhadap DNBR yang lebih besar dibanding PWR Westinghouse, dikarenakan fluks panas lokalnya lebih rendah. Margin keselamatan terhadap DNBR dengan korelasi W-3 memberikan hasil yang lebih konservatif dibanding data desain yang menggunakan korelasi WRB-2. Dari analisis ini menunjukkan bahwa rod bahan bakar dengan diameter 0,95 dan 0,914 cm memenuhi standar dan dapat digunakan untuk PWR dengan daya tinggi dan distribusi daya yang tidak merata.

## DAFTAR PUSTAKA

1. PPEN – BATAN, “Energi Nuklir, Energi Alternatif Ramah Lingkungan dan Ekonomis di Masa Depan”, Presentasi Kebijakan Energi PIE-DESDM, Jakarta, September 2003.
2. UHCIDA MASA AKI, Thermal-Hydraulics of Nuclear Reactors, Tokai Training Center, Nuclear Technology and

- Education Center, JAERI, Japan, 2001, p189-190.
3. SUMIO FUJII, Nuclear Fuel and Reactor Core, Information Exchange Meeting, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. ,2009.
4. Anonim, “AP600 Standar Safety Analysis Report”, Westinghouse Electric Company, San Fransisco, 1992, p.4.1.5.
5. RIDWAN, M., DKK, “Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir”, BATAN, Jakarta (1986).
6. ISNAINI, M.D., Analisis desain termohidrolika sub kanal elemen bakar PWR-1000 Tipikal Dalam Matriks 4 x 4, (Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Iptek Nuklir, Yogyakarta, 15 Juli 2008), Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Yogyakarta (2008).
7. ISNAINI, M.D., Analisis desain termohidrolika sub kanal pada 24 batang bahan bakar PWR-1000 (Prosiding Seminar Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir ke- 14, Bandung, 5 Nopember 2008), Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jakarta (2008).
8. ISNAINI, M.D., dan Pudjijanto, “Verifikasi desain termohidrolika teras PWR kelas 1000 MWe”, Prosiding Seminar Nasional TKPFN ke-15, PTRKN-BATAN dan UNS, Surakarta, 2009.
9. Basile, D., et al., “COBRA-EN: an Upgraded version of the COBRA-3C/MIT Code for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of LWR Fuel Assemblies and Cores”.
10. El Wakil, “Nuclear Heat Transport”, International Textbook Company, New York (1971).

## TANYA JAWAB

### Pertanyaan :

Dalam perbandingan ini, parameter apa saja yang dipertahankan sama dan bagaimana dengan parameter drap apa juga dibandingkan?

(Hendro Tjahjono, PTRKN-BATAN)

### Jawaban :

Parameter yang sama a.l. Daya reaktor, laju alir total, tinggi teras, jumlah perangkat bahan bakar, tekanan operasi, dan jarak antar pusat rod. Yang berbeda a.l. Diameter rod, dan pellet, serta luas sub kanal aliran pendingin.

Tekanan operasi sama, tetapi pressure drop-nya berbeda karena perbedaan luas sub kanal pendingin dan kecepatan aliran.