

---

## VERIFIKASI DESAIN TERMOHIDROLIKA TERAS PWR KELAS 1000 MWe

Muh. Darwis Isnaini dan Pudjjanto MS

Email : darwis@batan.go.id dan pudji\_ms@batan.go.id  
PTRKN – BATAN, Kawasan Puspiptek Gd.80 Serpong, Tangerang, 15310.

### ABSTRAK

**VERIFIKASI DESAIN TERMOHIDROLIKA TERAS PWR KELAS 1000 MWe.** Telah dilakukan verifikasi desain termohidrolika teras PLTN jenis PWR kelas 1000 MWe (daya listrik terbangkit berkisar antara 900 sampai 1.100 MWe). Latar belakang penelitian ini adalah belum adanya suatu keputusan tentang jenis PLTN apa yang akan dipilih, salah satunya adalah karena kurangnya data teknis yang dimiliki tentang karakteristik PLTN yang terpublikasi secara luas. Oleh sebab itu dilakukan suatu verifikasi dengan batasan dipilih PLTN jenis PWR, dengan tujuan membandingkan karakteristik termohidrolika PWR, agar hasilnya dapat dipakai sebagai bahan masukan dalam memutuskan jenis PLTN yang akan dipilih. Verifikasi dilakukan untuk teras PWR generasi II (PWR G2) buatan Mitsubishi yang terdiri atas 157 perangkat elemen bakar dengan daya 2.660 MWt dan teras PWR Tipikal buatan Westinghouse yang terdiri atas 193 perangkat elemen bakar dengan daya 3.411 MWt. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program THAL (Thermal Hydraulics Assigned for LWR) yaitu program yang dipakai untuk perhitungan termohidrolika teras pada reaktor daya jenis air ringan, baik BWR maupun PWR. Program ini dapat dipakai untuk perhitungan satu batang bahan bakar atau satu perangkat bahan bakar atau satu teras sekaligus. Hasil verifikasi desain PWR G2 Mitsubishi untuk daya 2.660 MWt dengan laju alir 45.400 ton/jam dan suhu pendingin masukan 288°C menunjukkan suhu keluaran 340°C (perbedaan 4,62%), suhu maksimum pelat dan tengah meat masing-masing sebesar 360,71°C dan 1.943,83°C, serta margin keselamatan DNBR minimum 2,15. Adapun verifikasi desain PWR Tipikal Westinghouse untuk daya 3.411 MWt dengan laju alir 60.000 ton/jam dan suhu pendingin masukan 292,6°C menunjukkan suhu keluaran 344,7°C (perbedaan 4,78%), suhu maksimum pelat dan tengah meat masing-masing sebesar 372,17°C dan 2.037,06°C, serta margin keselamatan DNBR minimum 1,45. Dibandingkan dengan batas suhu maksimum meat agar tidak terjadi pelelehan yang nilainya 2.594°C dan margin keselamatan DNBR minimum sebesar 1,24, maka kedua PLTN jenis PWR tersebut dapat dioperasikan dengan selamat. Meskipun hasil perhitungan masih cukup kasar, program ini dapat memberikan gambaran tentang distribusi aksial suhu pendingin, kelongsong dan meat bahan bakar, serta margin keselamatan DNBR.

Kata kunci : Verifikasi desain termohidrolika, PWR G2, PWR Tipikal.

### ABSTRACT

**VERIFICATION OF THERMAL-HYDRAULIC DESIGN OF PWR CORE 1000 MWe CLASS.** Verification of thermal-hydraulics design of PWR core 1000 MWe class (reactor power of 900 – 1,100 MWe) was carried out. The reasoning of this research is, the decision of nuclear power plant (NPP) type has not been selected yet, because there were not enough technical data about any kinds of NPP's characteristics owned. Therefore, a verification was carried out, constraint for PWR type only, by the objective, comparing the PWR's thermal-hydraulic characteristics, in order that the result be usable as opinion input in deciding what NPP's type will be selected. Verifications were carried out for two types of PWR, i.e., PWR 2<sup>nd</sup> Generation (PWR G2) made by Mitsubishi that contains of 157 fuel element assemblies for 2,660 MWt and Typical PWR that made by Westinghouse that contains of 193 fuel element assemblies for 3,411 MWt. The calculations were performed using THAL program (Thermal- Hydraulics Assigned for LWR) in which the program is useful for thermal-hydraulics calculation in light water typed reactor of BWR or PWR. The program is capable of calculation of one fuel rod or one fuel assembly or one core in time. For reactor power of 2,660 MWt with flow rate of 45,400 ton/h and inlet temperature of 288°C, the verification result of

*Mitsubishi PWR G2 design shows that outlet temperature is 340 °C (different is 4.62%), maximum cladding temperature and meat temperature are 360.71 °C and 1,943.83 °C, and the safety margin for DNBR is 2.15. Whereas the verification result for Westinghouse Typical PWR design for reactor power of 3,411 MWt with flowrate 60,000 ton/h and inlet temperature 292.6 °C shows that the outlet temperature is 344.7 °C, the maximum cladding and meat temperature are 372.17 °C and 2,036.06 °C, and safety margin for DNBR is 1.45. Referring to the maximum meat temperature limit is 2,594 °C to avoid fuel melting and safety margin for DNBR is 1.24, both PWR typed nuclear power plant can be operated safely. Even the calculation used global inputs of one fuel assembly, the program results axial temperature distribution for coolant, cladding, and fuel meat including safety margin of DNBR as well.*

*Keywords: Verification of thermal-hydraulics design, PWR 2<sup>nd</sup> Generation, PWR Typical.*

## 1. PENDAHULUAN

Dalam memilih suatu jenis pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), perlu dipertimbangkan karakteristik dari PLTN yang akan dipilih. Data teknis dari beberapa jenis PLTN telah banyak terpublikasi secara luas. Sebagai bahan dalam mengambil keputusan dalam memilih jenis PLTN, perlu dilakukan verifikasi terhadap data teknis tersebut. Dalam melakukan verifikasi data, dapat dilakukan secara global ataupun secara rinci. Verifikasi secara global, memiliki kelebihan yakni hanya perlu model dan input data yang sederhana, namun memiliki kekurangan yakni hasil luaran yang masih kasar, sedangkan verifikasi secara detail, memiliki kekurangan yakni pembuatan model dan input data yang rumit, namun memiliki kelebihan hasil luaran yang lebih lengkap.

Penelitian tentang “Verifikasi Desain Termohidrolika Teras PWR Kelas 1.000 MWe” ini merupakan penelitian yang bersifat global yang berbeda dengan beberapa penelitian sebelumnya tentang desain termohidrolika sub kanal. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan dua model penelitian yang berbeda, yang satu bersifat global dan yang lain bersifat rinci, tentang karakteristik termohidrolika suatu PLTN jenis reaktor air bertekanan (PWR), dan meningkatkan kemampuan sumber daya manusia (SDM) BATAN untuk menguasai teknologi PLTN. Penelitian ini difokuskan pada PWR dengan daya listrik terbangkit sekitar 1.000 MWe (PWR kelas 1000), yaitu PWR generasi II (PWR G2) buatan Mitsubishi [1] dan PWR Tipikal buatan Westinghouse [2].

Penelitian sebelumnya tentang “Analisis desain termohidrolika sub kanal elemen bakar PWR-1000 Tipikal dalam matriks 4 x 4” [3] merupakan perhitungan termohidrolika pada 14 batang bahan bakar yang disusun dalam matriks 4 x 4 dan dikelilingi oleh 26 sub kanal aliran. Dari hasil perhitungan pada PLTN jenis PWR-1000 Tipikal standar Westinghouse dengan daya 3.411 MWt ditunjukkan bahwa pada ke-14 batang bahan bakar tersebut suhu kelongsong bahan bakar

berkisar 344,3 – 349,3 °C, suhu maksimum permukaan *meat* 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 (lebih besar dari batas keselamatan minimum desain 1,24).

Penelitian lainnya tentang “Analisis desain termohidrolika sub kanal pada 24 batang bakar PWR-1000” [4] merupakan perhitungan termohidrolika pada 24 batang bahan bakar yang disusun dalam matriks 6 x 6 dan dikelilingi oleh 46 sub kanal aliran. Dari hasil perhitungan pada PLTN jenis PWR-1000 Tipikal standar Westinghouse dengan daya 3.411 MWt ditunjukkan bahwa pada ke-24 batang bahan bakar tersebut suhu pendingin keluaran teras 319,3 °C, suhu kelongsong maksimum berkisar 333,6 – 348,3 °C, suhu maksimum permukaan *meat* berkisar 488,6 – 699,7 °C, suhu maksimum *meat* bahan bakar berkisar 1110,7 – 2103,4 °C (di bawah batas desain suhu bahan bakar 2594 °C) dan DNBR minimum berkisar 4,37 sampai 1,86 (lebih besar dari batas keselamatan minimum desain 1,24).

Di dalam makalah ini akan disajikan hasil verifikasi desain termohidrolika teras PWR dengan daya listrik terbangkit sekitar 1.000 MWe (PWR kelas 1000), yaitu PWR generasi II (PWR G2) buatan Mitsubishi [1] yang terdiri atas 157 perangkat elemen bakar dengan daya 2.660 MWt dan teras PWR Tipikal buatan Westinghouse [2] yang terdiri atas 193 perangkat elemen bakar dengan daya 3.411 MWt. Masing-masing teras dibuat dengan model yang dikompakkan berupa satu batang bahan bakar (*rod*) yang sangat besar dan homogen. Verifikasi dilakukan dengan menggunakan program THAL [5] yang dijalankan dengan komputer PC. Hasil dari penelitian adalah diperolehnya karakteristik distribusi aksial suhu bahan bakar PWR kelas 1000 MWe melalui analisis teras.

## 2. TEORI

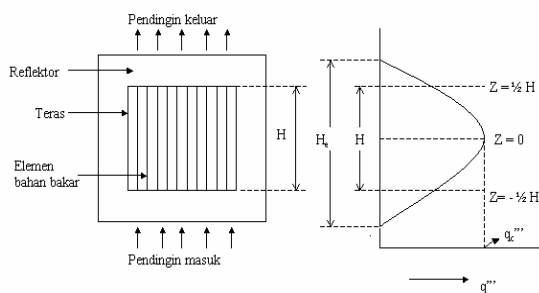
### 2.1. PROGRAM THAL

Program THAL [5] adalah suatu program perhitungan untuk menganalisis termohidrolika teras reaktor daya untuk PLTN tipe reaktor air ringan (PWR dan BWR) dengan perangkat bahan bakar berbentuk silinder. Program ini ditulis dalam bahasa Fortran-77 dan dijalankan dengan komputer personal dengan sistem operasi Windows.

Gambaran suatu teras reaktor yang disusun dari elemen-elemen bahan bakar setinggi  $H$ , didinginkan dengan aliran fluida pendingin yang masuk dari bawah dan keluar ke atas, diperlihatkan pada Gambar 1 [2, 6]. Besarnya daya panas volumetrik  $q'''$  sebanding dengan besarnya fluks neutron  $\phi$ , yang mempunyai nilai maksimum kira-kira di tengah teras ( $z = 0$ ) dan akan menjadi sama dengan nol pada jarak ekstrapolasinya yaitu  $z = \pm \frac{1}{2} H_e$ .

Dalam kasus ini untuk menyederhanakan perhitungan, digunakan asumsi sebagai berikut :

- Variasi  $q'''$  merupakan fungsi kosinus murni, dan mencapai harga maksimum  $q_c'''$  tepat di tengah teras (pada  $z = 0$ ),
- Dalam perhitungan digunakan harga rerata koefisien hantaran panas konveksi  $h$  antara bahan bakar dan fluida pendingin,
- Dipakai satu harga daya hantar konveksi (koefisien konduktivitas termal) dan sifat-sifat fisika lainnya untuk bahan bakar dan kelongsong dan dianggap tetap dan tidak tergantung pada ketinggian  $z$ .



**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 :

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

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 :

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

$m$  : kecepatan aliran massa fluida pendingin,  $lb_m/jam$

$c_p$  : panas jenis fluida pendingin,  $Btu/lb_m \text{ } ^\circ F$

$dt_f$  : kenaikan suhu fluida pendingin antara  $z$  dan  $z + dz$ ,  $^\circ F$

$A_c$  : luas penampang elemen bahan bakar,  $ft^2$

Substitusi persamaan (1) ke persamaan (2), dan diintegrasikan antara  $z = -\frac{1}{2} H$  sampai  $z$  maka :

$$m c_p \int_{t_{f1}}^{t_f} dt_f = q_c''' A_c \int_{-\frac{1}{2} H}^z \cos \frac{\pi z}{H_e} dz$$

di mana  $t_{f1}$  dan  $t_f$  adalah suhu fluida pendingin pada  $z = -\frac{1}{2} H$  dan  $z$ .

Hasil integrasi persamaan tersebut diperoleh :

$$t_f = t_{f1} + \frac{q_c''' A_c H_e}{\pi p m} \left( \sin \frac{\pi z}{H_e} + \sin \frac{\pi H}{H_e} \right) \quad (3)$$

Sedangkan untuk menetapkan variasi aksial suhu kelongsong  $t_c$ , diambil pengertian bahwa banyaknya panas yang dihantarkan dari kelongsong ke fluida pendingin yaitu  $h(t_c - t_f)$ , di mana koefisien hantaran panas  $h$  dianggap tetap sepanjang suhu elemen bakar. Karena  $h$  tetap, maka perbedaan suhu ( $t_c - t_f$ ) berbanding langsung dengan daya panas volumetrik di tempat yang sama, sehingga :

$$(t_c - t_f) = (t_c - t_f)_c \cos \frac{\pi z}{H_e} \quad (4)$$

Karena

$$q_c''' A_c dz = h C dz (t_c - t_f)_c \quad (5)$$

maka penggabungan persamaan (3), (4) dan (5) akan menghasilkan :

$$t_c = t_{f1} + q_c''' A_c \left[ \frac{H_e}{\pi c_p m} \left( \sin \frac{\pi z}{H_e} + \sin \frac{\pi H}{H_e} \right) + \frac{1}{hC} \cos \frac{\pi z}{H_e} \right] \quad (6)$$

di mana C adalah keliling dari kelongsong dalam ft.

Adapun suhu *meat*  $t_m$  dapat dicari dari persamaan berikut :

$$t_m = t_f + \frac{q''' R^2}{4k_f} + \frac{q''' R^2}{2} \left[ \frac{1}{k_c} \ln \frac{R+c}{R} + \frac{1}{h(R+c)} \right] \quad (7)$$

### 3. TATA KERJA

Sebagai model dalam verifikasi dengan program THAL, digunakan data teras PLTN jenis PWR dengan daya listrik terbangkit sekitar 1000 MWe (PWR kelas 1000), yaitu PWR generasi II (PWR G2) buatan Mitsubishi [1] yang terdiri atas 157 perangkat elemen bakar dengan daya 2660 MWt dan teras PWR Tipikal buatan Westinghouse [2] yang terdiri atas 193 perangkat elemen bakar dengan daya 3.411 MWt. Dari kedua jenis PWR tersebut, setiap 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. Dari kedua jenis PWR tersebut, luas total penampang bahan bakar dari masing-masing jenis PWR tersebut dapat dicari dengan persamaan :

$$L = n_{FA} \cdot 264 \cdot \pi r^2 \quad (8)$$

di mana :

$n_{FA}$  : jumlah perangkat elemen bakar

$r$  : jari-jari satu batang (*rod*) bahan bakar

Adapun jari-jari teras dari elemen bakar yang dihomogenisasi adalah :

$$R = \sqrt{\frac{L}{\pi}} \quad (9)$$

Data spesifikasi teknis dan pemodelan PWR G2 and PWR Tipikal tertera pada Tabel 1.

**Tabel 1. Data teknis dan pemodelan PWR G2 dan PWR-Tipikal [1, 2, 7]**

<b>REAKTOR</b>		
Type	PWR G2	PWR Tipikal
Daya termal reaktor (MWt)	2660	3411
Laju alir pendingin (Ton/hr)	45.400	60.000
Suhu pendingin masukan (°C)	288	292,6
Suhu rerata keluaran (°C)	325	328,3
Kenaikan suhu pendingin (°C)	37	35,7
Tekanan masukan teras (atm)	152,1	149,7
<b>TERAS REAKTOR</b>		
Juml. perangkat elemen bakar	157	193
Panjang aktif (m)	3,66	3,66
Diameter ekuivalen teras (m)	3,04	3,37
<b>DATA ELEMEN BAKAR</b>		
Diameter batang b.bakar (cm)	0,950	0,914
Diameter pelet (cm)	0,819	0,784
Tebal kelongsong (cm)	0,057	0,0572
Tebal <i>gap</i> (cm)	0,0085	0,00785
Model perhitungan teras yang dihomogenisasi :		
Diameter batang b.bakar (cm)	193,41	186,08
Diameter pelet (cm)	166,74	159,61
Tebal kelongsong (cm)	11,60	11,65
Tebal <i>gap</i> (cm)	1,73	1,60

#### 3.1. BATAS KESELAMATAN

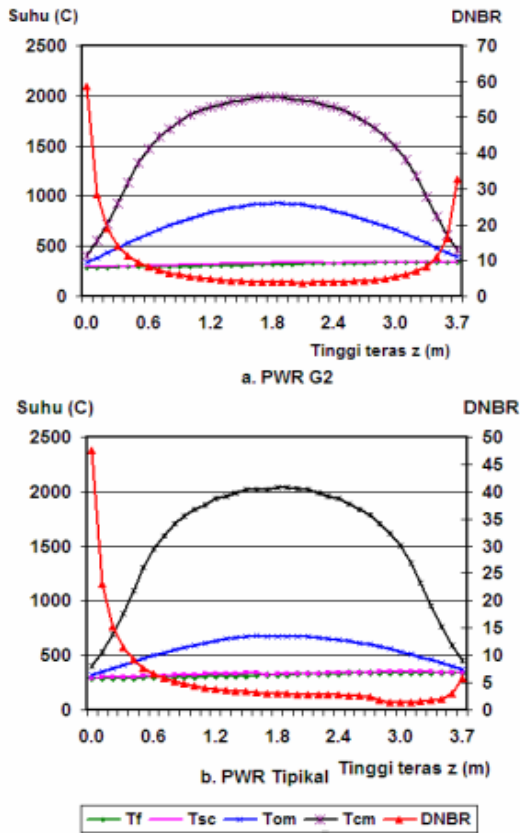
Dalam melakukan verifikasi termohidrolika teras PWR, digunakan batasan keselamatan sebagaimana spesifikasi teknis umum dari PWR, antara lain :

- Batas minimum terhadap pelepasan pendidihan inti (DNBR) sebesar 1,24.
- Batasan suhu maksimum pusat *meat* bahan bakar untuk menjaga agar *meat* tidak meleleh adalah 2594 °C.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan distribusi aksial suhu pendingin, suhu kelongsong, suhu *meat* dan margin keselamatan terhadap DNBR menggunakan program THAL secara ringkas disajikan pada Gambar 2, adapun nilai maksimum/minimumnya tertera pada Tabel 2. Dari hasil tersebut, dapat dikatakan Program THAL bisa digunakan untuk verifikasi perhitungan termohidrolika teras reaktor PLTN jenis PWR.

**Tabel 2. Hasil perhitungan termohidrolika teras PWR G2 dan PWR Tipikal.**



**Gambar 2. Grafik distribusi aksial suhu pendingin, kelongsong, permukaan *meat* dan tengah *meat*, dan margin keselamatan terhadap DNBR : (a). PWR Generasi ke-2 dan (b). PWR Tipikal**

Jika dibandingkan hasil perhitungan antara PWR G2 dan PWR Tipikal dengan menggunakan program THAL, diperoleh bahwa :

- Daya termal yang dibangkitkan oleh PWR Tipikal sebesar 17,67 MW/perangkat elemen bakar atau 4,3% lebih tinggi dibanding daya termal yang dibangkitkan oleh PWR G2 (16,94 MW/perangkat). Karena panas yang dibangkitkan di dalam *meat* elemen bakar akan dipindahkan ke pendingin melalui kelongsong, maka hal ini akan berakibat pada suhu pendingin, kelongsong dan *meat* bahan bakar dari PWR Tipikal juga menjadi lebih tinggi dibanding PWR G2.

	Desain	Perhitungan dengan THAL		Cobra [3, 4]
		PWR G2	PWR Tipikal	
Faktor radial Daya (MW)/PEB		16,94	17,67	2,50
Suhu pendingin Masuk teras (°C)		288,0	292,6	292,6
Keluaran (°C)		339,98	344,70	320,3
Kenaikan suhu		51,98	52,10	27,70
Suhu maks. (°C)				
Kelongsong luar		340,55	346,64	348,3
Kelongsong dlm		360,71	372,17	
Permukaan <i>meat</i>		632,43	679,19	699,7
Tengah <i>meat</i>	2594	1943,83	2037,06	2103,4
DNBR minimum	1,24	2,15	1,45	1,86

Catatan : PEB : Perangkat elemen bakar

- Dari Tabel 2 terlihat bahwa suhu maksimum tengah *meat* PWR Tipikal lebih tinggi 4,78%, suhu maksimum permukaan *meat* lebih tinggi 7,39%, suhu maksimum permukaan kelongsong bagian dalam dan luar masing-masing lebih tinggi 3,17% dan 1,79%, serta kenaikan suhu pendingin lebih tinggi 0,23% dibanding suhu dari PWR G2. Dari hasil tersebut terlihat bahwa perbedaan tertinggi terjadi pada suhu maksimum permukaan *meat*, hal ini disebabkan antara lain oleh perbedaan pembangkitan panas per perangkat dari PWR Tipikal yang lebih besar 4,3% dan jari-jari (jarak antara tengah ke permukaan *meat*) dari PWR Tipikal yang lebih kecil 4,28%. Sedangkan perbedaan terkecil terjadi pada kenaikan suhu pendingin yakni 0,23%, hal ini disebabkan oleh perbedaan besarnya laju alir pendingin primer dari PWR Tipikal yang lebih besar 30% dibanding laju alir pendingin primer dari PWR G2. Dari persamaan empiris yang digunakan yakni bilangan Reynolds ( $Re^{0,8}$ ) yang merupakan fungsi dari kecepatan pendingin, maka diperoleh perbedaan 0,23%.
- Dari kedua jenis PWR tersebut (PWR G2 dan PWR Tipikal) diperoleh suhu maksimum tengah *meat* bahan bakar 1.943,83°C dan 2.037,06°C masih berada di bawah batas suhu *meat* desain, hal ini menunjukkan bahwa, kedua jenis PWR tersebut dapat dioperasikan dalam batas selamat dan jangkauan keselamatan PWR G2 lebih baik dibanding PWR Tipikal.

- Adapun margin keselamatan terhadap DNBR minimum dari kedua jenis PWR tersebut masing-masing 2,15 dan 1,45 masih berada di atas margin keselamatan minimum desain, hal ini menunjukkan bahwa kedua jenis PWR tersebut dapat dioperasikan dengan selamat, dan PWR G2 memiliki jangkauan margin keselamatan DNBR yang lebih baik dibanding PWR Tipikal. Dari hasil perhitungan, hal ini ditunjukkan karena suhu pendingin dari PWR Tipikal yang lebih besar dibanding suhu pendingin PWR G2, sehingga selisih antara suhu kelongsong dan suhu pendingin menjadi lebih kecil, hal ini berakibat pada margin keselamatan menjadi lebih kecil. Pada kondisi ini, diindikasikan pendingin pada PWR Tipikal pada kondisi *sub cooled boiling*, bahkan sebagian sudah menuju pada *bulk boiling*, sedangkan pendingin PWR G2 masih seluruhnya pada kondisi *sub cooled boiling*.
- Antara program THAL dan COBRA IV-I mempunyai beberapa luaran yang sama antara lain distribusi suhu pendingin, kelongsong, dan *meat*, serta DNBR. Kelebihan dari program THAL adalah memiliki data masukan (*input*) yang sederhana, tetapi hasil luarannya terlalu global karena hanya menghasilkan data satu *rod* saja. Sedangkan program COBRA IV-I memiliki data masukan yang rumit, tetapi memiliki hasil luaran yang luas, dalam kasus perhitungan ini dapat menampilkan distribusi aksial dari 24 *rod* dengan factor radial yang berbeda. Adapun jika hasil perhitungan dengan program THAL dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan program COBRA IV-I yang diambil untuk kanal terpanas, menunjukkan bahwa selain kenaikan suhu pendingin yang lebih besar 88%, maka nilai yang lain seperti suhu maksimum kelongsong, *meat* dan margin keselamatan DNBR mempunyai harga yang lebih kecil, dengan perbedaan berkisar antara 0,49% (perbedaan suhu kelongsong) sampai 28% (perbedaan DNBR minimum).

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil verifikasi terhadap PLTN jenis PWR G2 dan PWR Tipikal, dapat disimpulkan bahwa kedua jenis PWR tersebut dapat dioperasikan dengan selamat, dan PWR G2 memiliki jangkauan margin keselamatan yang lebih baik (besar) dibanding PWR Tipikal. Dibandingkan perhitungan dengan program COBRA IV-I, maka program THAL memiliki kelebihan berupa data masukan yang lebih

sederhana, tetapi hasil luarannya tidak selengkap hasil luaran program COBRA IV-I.

## 6. DAFTAR ACUAN

1. Sumio Fujii, **Nuclear Fuel and Reactor Core**, Information Exchange Meeting, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (2009).
2. Djokolelono, M., dkk, "Sistem pembangkit uap nuklir" Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, BATAN, Jakarta (1986).
3. 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).
4. 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).
5. Ijaz Hussain, alih bahasa Pudjijanto, THAL, Program Perancangan Termohidrolika Reaktor Daya untuk PLTN tipe air ringan, Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN, Jakarta (2008).
6. El Wakil, "Nuclear Heat Transport", International Textbook Company, New York (1971).
7. UHCIDA Masaaki, **Thermal-Hydraulics of Nuclear Reactors**, Tokai Training Center, Nuclear Technology and Education Center, JAERI, Japan, (2001).

**TANYA JAWAB**