

## VERIFIKASI PERHITUNGAN NEUTRONIK TERAS SBWR DAN AP-600<sup>1</sup>

As Natio Lasman, Zuhair

### ABSTRAK

**VERIFIKASI PERHITUNGAN NEUTRONIK TERAS SBWR DAN AP-600.** Pada penelitian ini telah dilakukan verifikasi perhitungan neutronik teras PLTN jenis AP-600. Untuk PLTN jenis SBWR verifikasi tak dapat diselesaikan karena beberapa besaran fisika teras yang tidak diketahui disamping proyek SBWR itu sendiri telah dihentikan secara resmi di USA pada awal tahun 1996. Paket program yang digunakan adalah WIMS-D4 untuk perhitungan besaran-besaran fisika dari berbagai material yang digunakan di dalam teras, dan untuk program difusinya menggunakan CITATION. Verifikasi dilaksanakan untuk keadaan teras awai. Untuk itu telah diperoleh  $k_{\infty}$  untuk perangkat elemen bakar sebesar 1,403, 1,347 dan 1,282 untuk masing-masing pengkayaan elemen-bakar sebesar 3, 2,5 dan 2 %. adapun  $k_{eff}$  teras adalah sebesar 1,248. Besaran fluks neutron untuk AP-600 tak dapat dibandingkan, karena besaran dimaksud hingga laporan ini ditulis belum diperoleh dari calon pemasok PLTN tersebut. Dibandingkan dengan hasil dari calon pemasok terdapat perbedaan  $k_{\infty}$  sebesar 0,46 % untuk pengkayaan 3% dan perbedaan  $k_{eff}$  teras sebesar 2,99%.

### ABSTRACT

**THE VERIFICATION OF NEUTRONIC CALCULATION FOR SBWR AND AP-600.** The verification of neutronic calculation was done for SBWR and AP-600. Unfortunately that the neutronic verification for SBWR could not be finished because some of reactor physical values were not denoted and the SBWR project is stopped since the beginning of 1996. WIMS-D4 code was used for reactor physics values calculation and CITATION code was used for the whole reactor calculation. The verification was dan for the BOC. The  $k_{\infty}$  of fuel assembly are 1,403, 1,347 and 1,282 for 3, 2,5 and 2 % enrichment; and the  $k_{eff}$  is 1,248. The AP-600 neutron flux could not be compared because there is no information about it. The comparison showed that the  $k_{\infty}$  differentiation is 0,46% for 3% enrichment and the  $k_{eff}$  diferention is 2,99%.

## PENDAHULUAN

Sesuai dengan skenario pemenuhan kebutuhan energi listrik di pulau Jawa - Bali, maka pada era tahun 2000-an diperlukan pembangkitan energi listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Untuk itu telah dilakukan beberapa kali studi tapak dan studi kelayakan PLTN. Berbagai PLTN jenis reaktor termal telah dijajagi kelayakannya, baik untuk jenis air ringan maupun air berat. Untuk jenis air ringan telah ditawarkan reaktor-reaktor air tekan (Pressurized Water Reactor, PWR) oleh calon pemasok dari NPI (Nuclear Power International) dan Westinghouse, kemudian untuk air didih (Boiling Water Reactor, BWR) oleh calon pemasok dari General Electric. Untuk reaktor jenis air berat telah ditawarkan oleh calon pemasok dari Canada. Daya reaktor yang ditawarkan berkisar antara 600 hingga 1000 MWe.

Khusus untuk reaktor air didih, pada awalnya ditawarkan SBWR (Simplified Boiling Water Reactor) yang berdaya sekitar 600 MWe. Reaktor tersebut masih dalam tahap disain. Namun pada awal tahun 1996 kegiatan disain SBWR yang dilakukan di USA dihentikan. Sehubungan dengan hal tersebut, maka penelitian inipun mengalami perubahan, yakni verifikasi kemudian hanya dilakukan untuk PLTN AP-600 saja.

Perhitungan verifikasi dilakukan dengan memanfaatkan paket program WIMS-D4 dan CITATION yang digunakan secara luas di dunia dalam perhitungan reaktor. Mengingat bahwa informasi dari AP-600 hanya meliputi teras awal saja, maka perhitungan ini dilakukan untuk hal yang sama pula. Beberapa perhitungan tampang lintang makroskopis untuk perangkat elemen bakar yang mengandung boron juga dihitung, namun karena moda operasi dan besaran-besaran perhitungan disain AP-600 tidak diperoleh, maka sebagaimana yang disampaikan di atas, besaran-besaran tersebut hanya dikemukakan tanpa melakukan perhitungan untuk seluruh teras.

## REAKTOR AP-600<sup>(1)</sup>

Daya reaktor yang dibangkitkan adalah 1933 MW. Banyaknya perangkat elemen bakar yang digunakan adalah 145 buah, masing-masing dibagi dalam 3 kelas pengkayaan, yakni 2, 2,5 dan 3 %. Perangkat elemen bakar tersebut terdiri atas elemen-elemen bakar berbentuk tabung (*rod*) yang diatur dalam matriks 17 x 17. Setiap perangkat elemen bakar terdiri atas 264 buah elemen bakar tabung. Air pendingin yang sekaligus berfungsi sebagai moderator mengalir dari arah bawah ke atas di antara elemen bakar yang satu dan yang lainnya dengan tekanan 155 bar. Di posisi tengah perangkat elemen bakar terdapat pengarah yang dipersiapkan untuk instrumentasi di dalam teras.

Setiap elemen bakar terdiri dari pelet silindris  $UO_2$  yang dikelongsongi dengan Zircalloy-4. Model lain dari elemen bakar adalah adanya pelapisan tipis boron pada pelet  $UO_2$ . Di dalam elemen bakar, pada bagian atas dan bawah terdapat ruang gas yang dimanfaatkan untuk menampung gas-gas produk fisi. Khusus untuk teras pertama digunakan **wet annular burnable absorbers (WABA)**, yang dimaksudkan untuk pengendalian populasi neutron.

Setiap 24 buah perangkat elemen bakar dikontrol oleh sebuah perangkat kendali. Perangkat kendali tersebut mempunyai 24 buah batang (*rod*) kendali (*RCCAs, rod cluster control assemblies*), artinya bahwa sebuah perangkat elemen bakar dapat disisipi oleh sebuah elemen kendali. Material utama dari batang kendali tersebut adalah Ag-In-Cd yang dikelongsongi oleh SS. Perangkat elemen kendali ini dimaksudkan untuk mengendalikan perubahan cepat dari reaktivitas dan mengontrol distribusi daya aksial. Selain RCCA terdapat pula perangkat elemen kendali GRCA (*gray rod cluster assemblies*) yang digunakan sebagai pengatur reaktivitas teras sesuai dengan perubahan beban. GRCA ini terdiri dari 24 buah elemen kendali yakni sebagaimana yang digunakan di dalam RCCA kecuali 20 buah elemen kendalinya yang menggunakan SS.

Di dalam air ringan yang berfungsi sebagai pendingin dan moderator dapat dicampur dengan boron cair yang berfungsi sebagai penyerap neutron. Konsentrasi dari boron cair tersebut

divariasi besarnya untuk mengendalikan perubahan reaktivitas yang berubah dengan perlahan sesuai dengan perubahan fraksi bakar yang ada di dalam teras reaktor.

Beberapa macam besaran teras AP-600 disajikan dalam tabel 1.

Tabel 1. Diskripsi teras AP-600

<p>Teras aktif:                      Diameter ekivalen, cm                      Tinggi teras, cm                      Perbandingan molekul H<sub>2</sub>O/U, cell, dingin</p> <p>Tebal reflektor dan material:                      Bagian atas, air + steel                      Bagian bawah, air + steel                      Bagian samping, air + steel</p> <p>Perangkat elemen bakar:                      Jumlah                      Matriks                      Jumlah elemen bakar (rod) per perangkat elemen bakar                      Dimensi perangkat elemen bakar, cm x cm                      Berat Uranium, kg                      Berat Zircalloy, kg</p> <p>Elemen bakar:                      Jumlah untuk seluruh teras                      Diameter luar, cm                      Diameter gap, cm                      Tebal cladding, cm                      Material cladding</p>	
<p>Bahan bakar (pellet):                      Material                      Densitas (teoritis, %)                      Pengkayaan, % berat                      Daerah 1                      Daerah 2                      Daerah 3                      Diameter, cm                      Panjang, cm</p>	<p>UO<sub>2</sub>                      95                        2,0                      2,5                      3,0                      0,819                      0,983</p>
<p>RCCA, rod cluster control assemblies:                      Penyerap neutron                      Diameter, cm                      Kerapatan, g/cm<sup>3</sup>                      Material cladding                      Tebal cladding, cm                      Banyaknya perangkat dalam teras                      Banyaknya elemen (rod) penyerap setiap perangkat</p>	<p>Ag-In-Cd                      0,866                      10,159                      SS-304                      0,047                      45                      24</p>

GRCA, gray rod cluster assemblies:	
Penyerap neutron	Ag-In-Cd, SS-304
Diameter, cm	0,866
Kerapatan, g/cm <sup>3</sup>	Ag-In-Cd
Material cladding	10,159;
Tebal cladding, cm	SS-304
Banyaknya perangkat dalam teras	7,889
Banyaknya elemen (rod) penycrap setiap perangkat	SS-304
Racun dapat bakar.	0,047
Jumlah	16
Type	4 Ag-In-Cd,
Material	20 SS-304
Diameter luar, cm	
Diameter dalam, cm	
Material cladding	
Boron-10 (mg/cm)	1424
k <sub>eff</sub> (maksimum untuk perangkat elemen bakar, cold, clean, tanpa Boron)	WABA
(boc, cold, clean, tanpa boron)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B <sub>4</sub> C
	0,968
	0,678
	Zircaloy
	6,03
	1,394
	1,203

**KOMPONEN PENGENDALIAN REAKTOR**

Sebagaimana dikemukakan dalam bab di atas, maka pengendalian reaktivitas dilakukan dengan memanfaatkan penyerap neutron RCCA, GRCA dan asam boron (cair). Konsentrasi asam boron divariasi untuk mengontrol perubahan reaktivitas yang secara perlahan terjadi karena:

- deplesi dari elemen bakar dan penambahan jumlah nuklida sebagai hasil dari reaksi fisi
- perubahan reaktivitas pada daya rendah, kondisi dingin ke panas
- perubahan reaktivitas sehubungan dengan bertambahnya Xenon dan Samarium sebagai nuklida-nuklida hasil belah
- deplesi dari penyerap dapat bakar.



Adapun RCCA dimaksudkan untuk mengendalikan reaktivitas untuk:

- *shutdown*
- perubahan reaktivitas ketika terjadi perubahan suhu pendingin pada saat operasi daya
- perubahan reaktivitas yang diakibatkan oleh koefisien reaktivitas
- perubahan reaktivitas karena adanya pembentukan gelembung-gelembung udara.

Bagian atas dari RCCA ini terbuat dari SS, demikian pula yang digunakan pada ujung bagian atas masing-masing elemen kendali. Adapun ukuran dan komposisi material perangkat kendali tersebut disajikan pada gambar 1. Selanjutnya pada gambar 2 disajikan gambar dari GRCA.

#### PERANGKAT ELEMEN BAKAR

Tiga macam pengkayaan digunakan dalam elemen bakar ini, yakni 2, 2,5 dan 3 %. Bahan-bakarnya berupa pelet  $UO_2$ . Sebagai cladding digunakan Zircaloy-4. Perangkat elemen-bakar yang digunakan oleh AP-600 ini adalah merupakan pengembangan dari perangkat elemen bakar model Vantage 5 yang dikembangkan oleh Westinghouse juga. Perbedaan utama dari keduanya adalah tertera pada tabel 2.

Tabel 2. Beda utama perangkat elemen bakar Vantage 5 dan AP-600

Bahasan	Vantage 5	AP-600
Rod elemen bakar:		
Diameter luar, cm	0,91440	0,94996
Pelet bahan-bakar:		
Diameter, cm	0,78435	0,81915
Panjang, cm	0,93980	0,98298
Pengkayaan, %	2,1 ; 2,6 ; 3,1	2 ; 2,5 ; 3

Perangkat elemen bakar disusun atas matriks 17 x 17, berisi 264 buah elemen bakar. Posisi-posisi yang masih kosong di dalam perangkat tersebut dimaksudkan sebagai tempat

masuknya elemen-elemen kendali dan juga fasilitas bagi instrumentasi di dalam teras. Ukuran dari perangkat elemen bakar tertera pada gambar 4 dan pada gambar 5 disajikan detil dari elemen bakarnya.

**PERHITUNGAN dan PEMBAHASAN**

Untuk perhitungan tampang lintang makroskopis digunakan paket program WIMS-D4<sup>[2]</sup> Cell diperhitungkan untuk ¼ perangkat elemen bakar dengan model *cluster* (gambar 4), yang kemudian di dalam perhitungan memanfaatkan bentuk anuli sebanyak 12 buah. Masing-masing anuli mempunyai diameter 0,56, 0,60, 0,63, 1,88, 3,14, 4,40, 5,65, 6,91, 8,17, 9,42, 10,68 dan 10,75 cm dimana termasuk *extra regionnya*.

Untuk perhitungan seluruh teras digunakan program CITATION<sup>[3]</sup>. Perhitungan dilakukan untuk kondisi BOC (teras awal), tanpa Boron dan seluruh elemen kendali berada di luar teras aktif. Hal ini mengacu pada perhitungan yang ada pada acuan [1]. Teras AP-600 dibentuk sesuai dengan 3 daerah pengkayaan dari perangkat elemen bakar, yakni 2, 2,5 dan 3%. Konfigurasi teras disajikan pada gambar 6.

Dari perhitungan diperoleh harga *k<sub>∞</sub>* untuk masing-masing pengkayaan sebagaimana disajikan di dalam tabel 3.

Tabel 3. Faktor multiplikasi tak terhingga

Pengkayaan elemen bakar, %	<i>k<sub>∞</sub></i> perhitungan	<i>k<sub>∞</sub></i> acuan [1]
2,0	1,282	-
2,5	1,347	-
3,0	1,403	1,394

Dari ketiga macam perhitungan tersebut hanya diketahui dari acuan [1] harga *k<sub>∞</sub>* untuk perangkat elemen bakar dengan pengkayaan 3%. Hasil verifikasi menunjukkan lebih besar 9 mNile.

Perbedaan ini dimungkinkan terjadinya karena penguat rod-rod elemen bakar tidak diperhitungkan, karena tidak diketahui luas dan ketebalannya.

Perhitungan seluruh teras AP-600 dilakukan pada kondisi awal teras, dingin, bebas xenon, tanpa racun dapat bakar (Boron) dan seluruh batang kendali berada di luar teras. Acuan perhitungan pada kondisi lain, misal pada kondisi panas tanpa xenon, panas dan xenon setimbang tidak terdapat pada [1]. Begitu juga dengan lama siklus, kemampuan total atau sebagian dari perangkat elemen kendali termasuk kurva S-nya tidak transparan dijelaskan. Beberapa kurva disajikan dalam bentuk perbandingan, dengan demikian apabila salah satu harga tidak terdapat pada [1] maka harga yang lainnya tak dapat diperhitungkan. Kurva semacam hanya membantu untuk mengetahui kecenderungan nilai dari perhitungan yang dilakukan. Hal-hal lain yang juga tidak disinggung secara transparan pada [1] adalah pola operasi pemanfaatan boron cair untuk pengendalian reaktivitas dan juga pemanfaatan WABA.

Faktor multiplikasi efektif hasil perhitungan adalah 1,248. Adapun hasil acuan adalah 1,203. Disini terdapat perbedaan 45 mNile atau sekitar 2,99 % dk/k. Perbedaan ini cukup besar, karena dapat saja hal ini akan mempengaruhi faktor keselamatan teras apabila kemampuan perangkat elemen kendali menjadi kurang karenanya. Akumulasi perbedaan antara perhitungan dan acuan dapat terjadi karena:

1. perbedaan hasil generasi material sebagaimana disebutkan di atas.
2. komposisi antara SS dan air di atas dan di bawah bagian teras aktif.
3. komposisi antara SS dan air di sekeliling teras aktif.

Jumlah perangkat elemen bakar pada masing-masing daerah I, II dan III adalah 49, 48 dan 48 buah. Apabila siklus operasi reaktor dilaksanakan hingga fraksi bakar daerah III menjadi klas fraksi bakar untuk daerah II, demikian pula untuk daerah II nantinya mempunyai fraksi bakar dalam klas yang sama dengan daerah I, maka komposisi jumlah perangkat elemen bakar tersebut sedikit mengalami kesulitan untuk memenuhi jumlah 49 buah perangkat elemen bakar daerah I, karena dari siklus sebelumnya diperoleh dari daerah II sebanyak 48 buah perangkat elemen bakar. Kekurangan satu buah perangkat elemen bakar untuk daerah I tersebut tentu harus disuplai



bersama-sama dengan suplai perangkat elemen bakar untuk daerah III. Kondisi ini tentu bukan merupakan kerugian, karena penyediaan perangkat elemen bakar untuk daerah I tentunya dapat dilaksanakan dengan mudah sebagaimana penyediaan elemen bakar untuk daerah III.

## PENUTUP

Verifikasi sebenarnya dapat dengan baik dilaksanakan apabila:

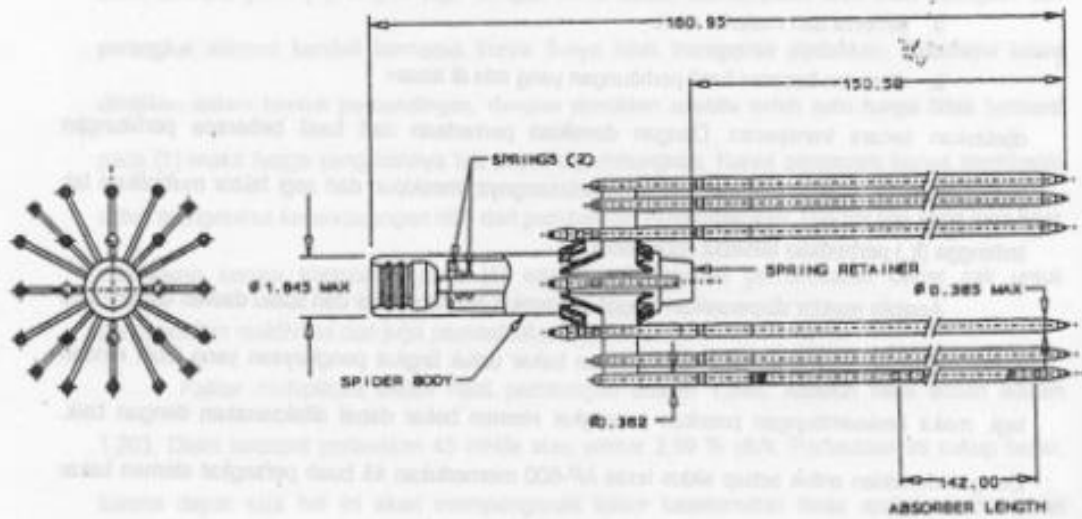
- a. dimensi dan material serta
- b. besaran-besaran hasil perhitungan yang ada di acuan

dijelaskan secara transparan. Dengan demikian perbedaan dari hasil beberapa perhitungan terhadap harga acuan dapat dipahami latarbelakangnya, meskipun dari segi faktor multiplikasi tak terhingga (k<sub>∞</sub>) perbedaan tersebut relatif kecil.

Apabila reaktor dioperasikan hingga perangkat elemen bakar dari suatu daerah dalam teras dapat dikategorikan dalam perangkat elemen bakar untuk tingkat pengkayaan yang lebih rendah lagi, maka kesinambungan pasokan perangkat elemen bakar dapat dilaksanakan dengan baik. Dengan demikian untuk setiap siklus teras AP-600 memerlukan 48 buah perangkat elemen bakar daerah III dan sebuah perangkat elemen bakar untuk daerah I.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Westinghouse, AP-600, Rev. 0, 1992
2. Askew, J.R., Fayers, F.J., Kemshell, P.B., *A General Description of the Lattice Code WIMS*, Reprinted from the October issue of the journal of the British Nuclear Energy Society, Diktat Regional Training Course on Calculation and Measurement of Neutron Flux Spectrum for Research Reactor 27 September - 15 October 1993, PRSG-BATAN, Serpong (1993)
3. Fowler, T.B., Vondy, D.R., Cunninghams, G.W., *Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION*, ORNL-TM-2496, Rev.2 (1971)



DIMENSIONS ARE IN INCHES (NOMINAL)  
UNLESS NOTED OTHERWISE

80% SILVER  
15% INDIUM  
5% CADMIUM

Gambar 1. Perangkat elemen kendali, RCCA