

---

---

## EVALUASI DATA NEUTRONIK TERAS PLTN TIPE PWR

Tukiran. S

Pusat Pengembangan Teknologi Reaktor Riset - BATAN

### ABSTRAK

**EVALUASI DATA NEUTRONIK TERAS PLTN TIPE PWR** . Perhitungan benchmark perangkat bahan bakar reaktor PWR terdilaku dengan perhitungan komputer. Perhitungan dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisika bahan bakar reaktor PWR dengan mendapatkan parameter sel pustaka tampang lintang seperti  $k$ -inf, koefisien difusi, tampang lintang serapan dan fisi sebagai fungsi pengkayaan. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program perhitungan sel WIMS/D4. Generasi sel dari berbagai jenis material pembentuk teras dilakukan dengan 4 group energi neutron pada program transport satu dimensi (WIMS/D4). Sel satuan diperhitungkan pada perangkat elemen bakar dengan model *cluster* dengan susunan *square pitch*, kemudian dihitung dimensi satuan selnya. Satu satuan sel terdiri dari satu satuan bahan bakar dan moderator. Dari satu satuan sel ekivalen tersebut diperoleh data dimensi sel sebagai data masukan program WIMS/D4 yang dikenal dengan *annulus*. Dari hasil perhitungan dapat dinyatakan bahwa model yang digunakan cukup baik dan hasil evaluasi diperoleh bahwa kisi bahan bakar PWR bersifat undermoderated dengan nilai factor multiplikasi tak terhingga 1,34. Dari hasil perhitungan ini dapat disimpulkan bahwa rancangan bahan bakar PWR memenuhi aspek keselamatan operasi.

### ABSTRACT

**AVALUATION OF NEUTRONICS DATA OF THE PWR REACTOR CORE**. Evaluation of neutronics data of the PWR reactor core has been done using computer calculation. The aim of calculation is to know the characteristic of fuel lattice to get relationship between the value of multiplication factor and moderator atom on fuel. The calculation has been performed using the WIMS/D4 code. Cell generation from various kinds of core materials was done with 4 neutron energy group in 1-D transport code (WIMS/D4). The cell is considered on fuel assembly in cluster model with square pitch arrange and then, the dimension of its unit cell is calculated. The unit cell consist of a fuel and moderator unit. The unit cell dimension as input data of WIMS/D4 code, called it *annulus*, is obtained from the equivalent unit cell. From the calculation result can be said that the model that used in this calculation is good enough and evaluation result showed that the square pitch of PWR fuel is under-moderated with value of infinite multiplication factor is 1,34. It can be concluded that PWR fuel design agree with the operation safety aspect

---

### PENDAHULUAN

Batan saat ini terus mengkaji Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang layak digunakan di Indonesia. Kajian dilakukan baik dari sisi ekonomi, budaya dan keselamatan terhadap PLTN yang telah beroperasi di dunia. Namun kajian tersebut dilakukan secara bertahap dan kontinu karena kajian satu tipe PLTN meliputi banyak hal, mulai dari unjuk kerja bahan bakar hingga unjuk kerja reaktor keseluruhannya.

Untuk mendukung kajian tersebut maka penelitian dan kajian dari sisi teknik perancangan (design) untuk tipe PLTN tertentu perlu dilakukan. Biasanya perancangan

---

suatu reaktor nuklir pada umumnya dimulai dari perancangan bahan bakarnya. Tahap pertama dalam perancangan bahan bakar reaktor terdiri dari kajian terhadap hubungan antara unjuk kerja teras reaktor dan parameter kisi bahan bakar yang memenuhi persyaratan tertentu. Berdasarkan konsep tersebut pada makalah ini dibahas analisis unjuk kerja kisi bahan bakar teras PWR.

Perhitungan dilakukan pada awal teras dan semua batang kendali ditarik keatas. Generasi sel dari berbagai material pembentuk teras dilakukan dengan program transport neutron satu dimensi dalam 4 kelompok energi neutron (WIMS/D4). Sel diperhitungkan untuk  $\frac{1}{4}$  perangkat elemen bakar dengan model *cluster* dengan susunan *square pitch*. Konstanta tampang lintang sebagai keluaran program WIMS/D4 digunakan sebagai evaluasi data neutronik teras PWR yang telah beroperasi saat ini

## TEORI

Bahan bakar didalam teras reaktor nuklir disusun dalam barisan geometris yang teratur. Untuk reaktor air ringan tertekanan (PWR) barisan ini terdiri dari batang bahan bakar selindris dengan kelongsong Zirkaloy yang diletakkan dalam air dan diatur dalam barisan persegi. Barisan ini biasanya disebut dengan kisi (*lattice*) reaktor dan diameter batang bahan bakar, jarak antara pusat batang bahan bakar (*pitch*), bahan dan ketebalan kelongsong serta volum air diantara batang bahan bakar dinyatakan sebagai parameter-parameter kisi.

### Nisbah Antara Moderator dan Bahan Bakar

Air diantara batang bahan bakar berfungsi sebagai zat alir (fluida) kerja dalam sistem pembawa panas dan sebagai bahan moderator untuk pelambatan neutron. Dari segi sebagai bahan bakar moderator, perlu diketahui harga nisbah atom hidrogen terhadap harga nisbah atom bahan bahan (atom  $U_{235}$  dan  $U_{238}$ ) yang merupakan fungsi kerapatan air, kerapatan bahan bakar dan geometri kisi.

Nisbah atomik moderator terhadap bahan bakar mempengaruhi faktor perlipatan neutron dalam sistem. Persamaan faktor perlipatan neutron untuk sistem tak terhingga adalah sebagai berikut,

$$^2) \quad k_{\infty} = \eta \cdot f \dots\dots\dots (1)$$

dengan,

$$\eta = \frac{\nu \sum_f^F}{\sum_a^F} \dots\dots\dots(2)$$

$$f = \frac{\sum_a^F}{\sum_a^M} = \frac{N^F}{N^M} \frac{\sigma_a^F}{\sigma_a^M} \dots\dots\dots(3)$$

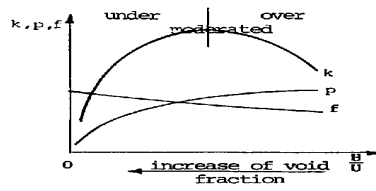
sehingga

$$k_\infty = \frac{N^F}{N^M} \frac{\nu \sigma_f^F}{\sigma_a^M} \dots\dots\dots(4)$$

Apabila  $N^M/N^F$  meningkat maka neutron akan lebih banyak termoderasi sehingga fraksi neutron yang mencapai energi termal bertambah. Dengan neutron termal meningkat maka lebih banyak fisi yang terjadi dalam bahan bakar sehingga  $k_\infty$  menjadi lebih besar. Meskipun demikian harga  $N^M/N^F$  yang besar menyebabkan fraksi neutron termal yang diserap oleh moderator juga bertambah. Sehingga dengan  $N^M/N^F$  bertambah besar maka  $k_\infty$  meningkat hingga ke suatu harga  $N^M/N^F$  dimana neutron termal cenderung menjadi jenuh dan  $k_\infty$  kemudian berkurang karena bertambahnya serapan neutron termal dalam moderator.

Perubahan harga  $k_\infty$  terhadap perubahan harga nisbah moderator/bahan bakar dapat dilihat pada pada Gambar1. Grafik pada Gambar1 merupakan grafik yang digunakan untuk meninjau unjuk kerja parameter kisi bahan bakar. Kisi bahan bakar untuk nisbah moderator/bahan bakar yang terletak di bagian kiri puncak grafik dinyatakan sebagai *undermoderated* dan di kanan puncak grafik dinyatakan sebagai *overmoderated*.

Seluruh reaktor dengan moderator air adalah bersifat *undermoderated* pada kondisi operasi daya. Karena, didasarkan pada aspek keselamatan reaktor, reaktor *undermoderated* akan mempunyai koefisien reaktivitas suhu negatif. Dengan daya reaktor naik, suhu air meningkat yang mengakibatkan kerapatan air berkurang lebih cepat daripada kerapatan bahan bakar atau struktur sehingga lebih aman



Gambar 1. Hubungan nilai k dengan nisbah atom H/U

---

---

## **DISKRIPSI TERAS REAKTOR DAYA PWR**

Reaktor daya PWR adalah reaktor daya jenis air tekan (*Pressurized Water Reactor*) yang didesain oleh Westinghouse. Reaktor PWR memiliki konfigurasi teras seperti yang dilampirkan pada Gambar 1. Teras PWR pada awal siklus (BOC) disusun atas 3 jenis pengkayaan yaitu 2,0 %, 2,5 % dan 3,0 % masing-masing sebanyak 49 buah, 48 buah, 48 buah. Jumlah perangkat bahan bakar yang menyusun teras reaktor PWR adalah 145 buah. Dimensi teras aktif PWR, perangkat bahan bakar dan reflektor dinyatakan dalam Tabel 1.

Reaktor PWR mempunyai bahan bakar jenis pelet selinderis dengan bahan bakar  $UO_2$  dan kelongsongnya Zircalloy-4. Di dalam kelongsong bahan bakar baik dibagian atas maupun bagian bawah terdapat ruang yang dimanfaatkan untuk menampung gas-gas hasil produk fisi.

Setiap perangkat bahan bakar berisi 269 (17 x 17) rod elemen yang terdiri dari 264 buah elemen bakar dan 24 buah elemen *guide thimble* dan satu *instrumentation tube*. Bahan bakar juga dilengkapi perangkat kendali yang jumlahnya 24 buah pada satu perangkat bahan bakar yang sering disebut RCCA (*rod cluster control assemblies*). Material utama dari pembentuk elemen kendali adalah Ag-In-Cd, sedangkan kelongsongnya adalah material *stainless steel* (SS). Perangkat elemen kendali RCCA digunakan untuk mengontrol perubahan reaktivitas dan distribusi daya aksial. Selain RCCA ada juga perangkat elemen kendali GRCA (*gray rod cluster assemblies*) pada teras reaktor PWR yang digunakan untuk mengatur reaktivitas teras sesuai dengan perubahan beban.

Air ringan digunakan sebagai pendingin dan moderator yang dicampur dengan boron cair yang berfungsi sebagai penyerap neutron. Konsentrasi boron cair bervariasi jumlahnya sesuai dengan perubahan reaktivitas yang berubah karena perubahan fraksi bakar di dalam teras.

## **LANGKAH PERHITUNGAN**

Perhitungan konstanta peluruhan neutron serempak teras PWR dilakukan pada kondisi awal teras sehingga semua bahan bakar masih baru, daya nol, tanpa boron, keadaan teras dingin dan bersih. Perhitungan dilakukan dalam beberapa tahap, seperti terlihat pada diagram alir pada Gambar 2.

### **Perhitungan Sel dengan Paket program WIMS/D4**

Program WIMS/D4 hanya mampu melakukan perhitungan transport neutron satu

---

dimensi, sehingga perlu dilakukan pemodelan terhadap sel teras. Pemodelan sel digunakan untuk perhitungan pembangkitan konstanta kelompok dalam 4 kelompok energi. Perhitungan sel dengan paket program WIMS/D4 dari satuan sel reaktor PWR yang terdiri dari cluster bahan bakar dengan susunan *square pitch* seperti pada Gambar 3. Kemudian dihitung dimensi satuan selnya seperti terlihat pada Gambar 4. Satu satuan sel akan terdiri dari satuan bahan bakar dan moderator.

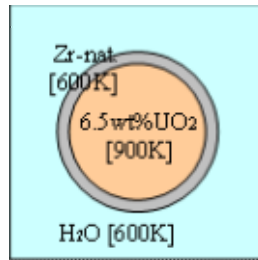
Pembangkitan konstanta kelompok dimaksudkan untuk mendapatkan harga rerata konstanta kelompok dalam suatu sel dengan cara menghomogenkan sel tersebut. Untuk memperoleh harga-harga konstanta kelompok yang bersesuaian dengan kondisi teras maka dicari nilai buckling aksial teras ( $B_z^2$ ). Nilai buckling aksial ini ditentukan dengan memasukkan harga  $K_{\text{eff}}$  teras dari data-data pemasok. Perhitungan konstanta kelompok dilakukan untuk material-material penyusun teras pada kondisi seperti di atas.  $K_{\text{inf}}$  teras juga dihitung dengan menggunakan pengkayaan bahan bakar 2 %, 2,5 % dan 3 % pada kondisi seperti di atas dengan menggunakan paket program WIMS/D4.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan program WIMS/D4 diperoleh harga konstanta kelompok material teras PWR yang dapat dilihat pada Tabel 2 dan harga  $K_{\text{inf}}$  teras PWR dapat dilihat pada Tabel 3. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi pengkayaan  $U^{235}$  semakin besar harga  $K_{\text{inf}}$ . Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan semakin banyak material fisil semakin besar harga  $K_{\text{inf}}$ . Pada reflektor  $K_{\text{inf}}$  dapat dianggap sama dengan nol. Harga  $K_{\text{inf}}$  pada pengkayaan 3 % tanpa boron sangat sesuai dengan data reaktor daya PWR yaitu 1,34 yang diberikan oleh pemasok PWR Westinghouse, sedangkan dengan bahan bakar pengkayaan lain tidak ditemukan data pembandingnya dari pemasok. Untuk tampang lintang makroskopik absorpsi dan  $\nu$ -fisi mempunyai harga terbesar pada daerah termal sedangkan kisi bahan bakar dengan data-data neutronik yang tersedia dari pemasok adalah bersifat undermoderated.

**Tabel 1. Data Desain Teras PWR**

- Daya teras reaktor (MWt)	1993
- Teras aktif	
Diameter ekuivalen (cm)	292,1
Tinggi aktif bahan bakar (cm)	365,8
Perbandingan molekul H <sub>2</sub> O/U	2,40
- Perangkat bahan bakar, dimensi (cm)	21,402 x 21,402
Jumlah	145
Matriks	17 x 17
Jumlah rod per perangkat elemen bakar	264
Berat Uranium, Kg	75.914,5
Berat Zirkaloy, Kg	16.127,7
- Tebal reflektor	
bagian atas: air dan baja (cm)	25,4
bagian bawah: air dan baja (cm)	25,4
bagian samping: air dan baja (cm)	38,1
- Elemen bakar	
Jumlah untuk seluruh teras	38.280
Diameter luar, cm	0,95
Diameter gap, cm	0,016
Tebal kelongsong, cm	0,057
Material kelongsong	Zirkaloy-4
- Bahan bakar (pellet)	
Material	U <sub>2</sub> O
Densitas, %	95
Diameter, cm	0,819
Panjang, cm	0,983
- RCCA	
Penyerap neutron	Ag-In-Cd
Diameter, cm	0,866
Kerapatan, cm	10,159
Material kelongsong	SS-304
Tebal kelongsong	0,047
Jumlah perangkat dalam teras	45
- GRCA	
Penyerap neutron	Ag-In-Cd,SS-304
Diameter, cm	0,866
Kerapatan, gr/cm <sup>3</sup>	10,159
Tebal kelongsong, cm	0,047
- Reaktivitas lebih	
k <sub>eff</sub> maksimum teras (dingin, daya nol, awal siklus dan tanpa boron)	1,203
- Fraksi neutron kasip	0,0075



Gambar 1. sel satuan bahan bakar PWR

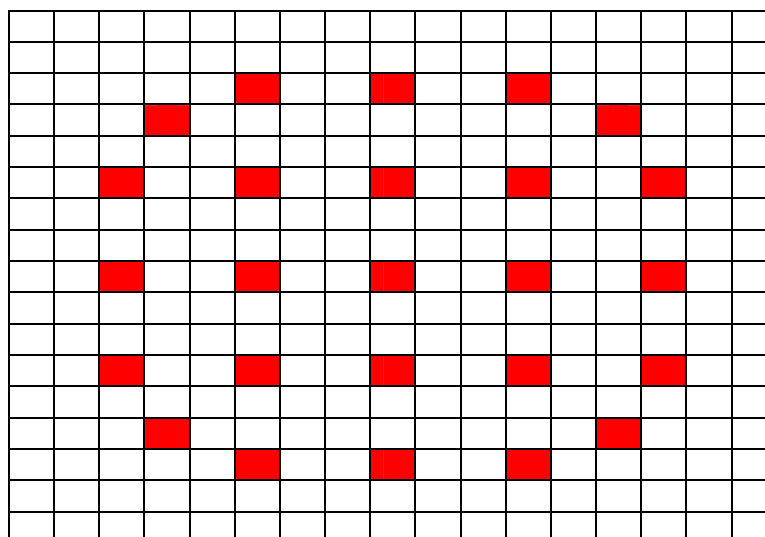
	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	
A													
1				3	3	3	3	3	3				
2			3	1	3	1	1	1	3	1	3		
3		3	3	2	1	2	1	2	1	2	3	3	
4	3	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	3
5	3	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	3
6	3	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	3
7	3	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	3
8	3	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	3
9	3	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	3	3
10	3	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	3
11		3	3	2	1	2	1	2	1	2	3	3	
12			3	1	3	1	1	1	3	1	3		
13				3	3	3	3	3	3				

Daerah	pengayaan
1	2,0 w/o
2	2,5 w/o
3	3,0 w/o

Gambar 2. Susunan muatan bahan bakar teras PWR

**Tabel 2. Distribusi Isotop**

Nuklida	UO <sub>2</sub>	Moderator	Kel. Zr	Kel. Al
U <sup>235</sup>	8.650E-04			
U <sup>238</sup>	2.225E-02			
O	4.622E-02			
H <sub>2</sub> O		3.350E-02		
B. Nat		2.780E-05		
Zr. Nat			4.30E-02	
Al <sup>27</sup>				6.00E-02



■ Tabung pengarah

Sel UO<sub>2</sub>

**Gambar 3. Perangkat bahan bakar teras PWR**



**Tabel 3. Konstanta Kelompok Material Teras PWR**

	Group	Region 1	Region 2	Region 3
1. Cluster		2 %	2,5 %	3 %
Makro X-sec. Absorbpsi	1	3,8753E-03	3,9084E-03	3,9415E-03
	2	2,3575E-03	2,4299E-03	2,5023E-03
	3	2,0511E-02	2,1695E-02	2,2862E-02
	4	8,3396E-02	9,4647E-02	1,0514E-01
Makro X-sec. nu-fissi	1	8,6743E-03	8,7637E-03	8,8529E-03
	2	6,4431E-03	8,0528E-04	9,6600E-04
	3	8,4701E-03	1,0472E-02	1,2448E-02
	4	1,2523E-01	1,4990E-01	1,7281E-01
Makro X-sec. Removal	1	8,0629E-02	8,0608E-02	8,0587E-02
	2	8,4547E-02	8,4525E-02	8,4502E-02
	3	7,8427E-02	7,7877E-02	7,7334E-02
	4	4,0800E-04	4,6134E-04	5,1045E-04
Konstanta Difusi	1	2,1526E+00	2,1528E+00	2,1529E+00
	2	8,4754E-01	8,4754E-01	8,4754E-01
	3	5,8591E-01	5,8464E-01	5,8340E-01
	4	2,5129E-01	2,5247E-01	2,5327E-01
Faktor perlipatan tak-hingga		1,281871	1,346786	1,393856
2. Reflektor H <sub>2</sub> O		-	-	-
Makro X-sec. Absorpsi	1			5,2417E-04
	2			2,2354E-07
	3			1,0044E-03
	4			1,8744E-02
Makro X-sec. nu-fissi	1			2,3990E-27
	2			2,3612E-27
	3			3,5999E-26
	4			8,0646E-25
Makro X-sec. Removal	1			1,0437E-01
	2			1,5799E-01
	3			1,5111E-01
	4			1,0198E-04
Konstanta Difusi	1			2,3373E+00
	2			7,7589E-01
	3			5,6185E-01
	4			1,5522E-01
Faktor perlipatan tak-hingga				4,2848E-23

**Tabel 3. Besarnya harga  $K_{inf}$  pada pengkayaan yang berbeda**

	Bahan bakar			Reflektor	
	Tanpa Boron Daya nol Perhitungan	pengkayaan	2 %	2,5 %	3 %
	$K_{inf}$	1,2819	1,3468	1,3939	4,2849E-23
Besaran pemasok	$K_{inf}$ untuk pengkayaan 3 % = 1,34 untuk pengayaan lainnya tidak ada pada manual				

### KESIMPULAN

Hasil perhitungan program WIMS/D4 menunjukkan bahwa  $K_{inf}$  teras PWR pada kondisi daya nol, tanpa boron adalah 1,34 dengan kisi bahan bakar bersifat undermoderated.

### DAFTAR PUSTAKA

1. ...." IAEA Bulletin". Vol 31, No. 2, Vienna, Austria, 1997.
2. DUDERSTADT, J.J and HAMILTON, L.J, " Nuclear Reactor Analysis " , John Wilay & Sons, New York, 1976.
3. LIEM PENG HONG, " Analisis Numerik, Komputasi dan Pemrograman Komputer pada Disain Neutronik Reaktor Nuklir, Diktat Kuliah, Jakarta , 1994.
3. TAUBMAN, C.L " The WIMS 69-group Library tape 166259" UK Atomic Energy Authority, England 1975.
4. ...." Simplified Passive Advanced Light Water Reactor Plant Program, PWR Standard Safety Analysis Report, 4th Volume, DE-AC03-90SF18495, Westinghouse Electric Corporation, 1992.