

PERHITUNGAN SEL TERAS PLTN TIPE PWR BERBAHAN BAKAR MOX

Tukiran S
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

ABSTRAK

PERHITUNGAN SEL TERAS PWR BERBAHAN BAKAR MOX. Perhitungan sel bahan bakar teras reaktor PWR telah dilakukan dengan perhitungan program komputer WIMS-ANL. 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. Generasi sel dari berbagai jenis material pembentuk teras dilakukan dengan 7 group energi neutron pada program transport satu dimensi (WIMS-ANL). 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 ekuivalen tersebut diperoleh data dimensi sel sebagai data masukan program WIMS-ANL yang dikenal dengan annulus. Bahan bakar yang digunakan adalah MOX dan bentuk geometrinya pin cell bahan bakar. Faktor multiplikasi tak terhingga sel teras PWR dihitung dengan menggunakan pengkayaan bahan bakar 4,3 %, 7,0 % dan 8,7 % dengan menggunakan paket program WIMS-ANL diperoleh nilainya yang bersesuaian adalah 1,39732; 1,42686; 1,44073. Dari hasil perhitungan dapat dinyatakan bahwa nilai factor multiplikasi tak terhingga, konstanta difusi, tampang lintang serapan dan nu-fisi sangat dipengaruhi oleh bentuk model yang digunakan.

ABSTRACT

CELL CALCULATION OF PWR CORE USING MOX FUEL. Cell calculation of fuel of the PWR reactor core have been done using WIMS-ANL code. 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-ANL code. Cell generation from various kinds of core materials was done with 7 neutron energy group in 1-D transport code (WIMS-ANL). 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-ANL code, called it annulus, is obtained from the equivalent unit cell. MOX fuel is modeled using pin cell geometry. The values of cell infinite multiplication factor of the PWR core using 4.3 %, 7.0 % and 8.7 % fuel enrichments are 1.39732; 1.42686 and 1.44073, respectively. From the calculation result can be said that the values of infinite multiplication factor, diffusion coefficient, absorption and nu-fission cross sections are influenced of models that used.

PENDAHULUAN

Untuk mendukung RENSTRA-BATAN maka penelitian dan kajian dari sisi teknik perancangan (design) untuk tipe PLTN perlu dilakukan. Biasanya perancangan suatu reaktor nuklir pada umumnya dimulai dari perhitungan sel material teras. Pada saat ini PLTN tipe PWR yang paling banyak beroperasi dan teknologinya sudah terbukti handal serpa pemerintah (BATAN) juga sudah memutuskan untuk mengkaji secara ilmiah PLTN jenis PWR. Berdasarkan konsep tersebut pada penelitian ini dilakukan evaluasi parameter sel teras PWR daya 1000 MW berbahan bakar MOX,. Perhitungan parameter sel teras PWR dilakukan dengan menggunakan program transport neutron satu dimensi dalam 7 kelompok energi

neutron (WIMS-ANL). Paket program WIMS-ANL dapat menghitung parameter sel teras reaktor PWR dengan satu bahan bakar (*pin cell*) maupun dengan seperangkat bahan bakar. Sel diperhitungkan untuk $\frac{1}{4}$ perangkat elemen bakar dengan model *cluster* dengan susunan *square pitch*. Parameter sel atau 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_{eff} teras dari data-data pemasok. Perhitungan konstanta kelompok dilakukan untuk material-material penyusun teras pada kondisi seperti di atas. Parameter sel atau konstanta tampang lintang sebagai keluaran program WIMS-ANL selanjutnya dapat digunakan sebagai masukan pada program difusi neutron untuk perhitungan teras seperti perhitungan kritikalitas dan parameter neutronik dan kinetik. Parameter sel merupakan masukan yang sangat menentukan keakuratan analisis pada perhitungan teras sehingga perhitungan parameter sel harus dihitung dengan teliti dan akurat.. Mengingat pentingnya perhitungan sel teras PWR berbahan bakar MOX untuk mendukung program pemerintah maka dirasa perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan WIMS-ANL dimana jika dilakukan dengan WIMSD/4 kurang memadai.

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-4 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.¹⁾

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 perancangan bahan bakar, 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⁾

$$k_{\infty} = \eta \varepsilon p f \dots\dots\dots(1)$$

dengan,

$$\eta = \frac{\nu \Sigma_f^F}{\Sigma_a^F} \dots\dots\dots(2)$$

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

sehingga

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

Faktor multiplikasi efektif teras reaktor (k_{eff}) didefinisikan

$$k_{eff} = k_{\infty} \cdot P_{nl} \dots\dots\dots(5)$$

dengan,

P_{nl} = probabilitas ketidkebocoran neutron yang dapat dituliskan ,

$$P_{nl} = \frac{\exp(-B^2 \tau)}{1 + L^2 B^2} \dots\dots\dots(6)$$

dengan,

L = panjang difusi neutron termal

B = Buckling material

τ = Umur Fermi

$P_f = \exp(-B^2 \tau)$ adalah faktor ketidkebocoran neutron cepat

$P_{th} = (1 + L^2 B^2)^{-1}$ adalah faktor ketidkebocoran neutron termal.

$P_{nl} = P_f \cdot P_{th}$

k_{∞} = Faktor multiplikasi takterhingga

η = Jumlah rerata neutron yang dihasilkan per penyerapan neutron pada bahan bakar

f = utilisasi termal

p = probabilitas kebocoran resonan

ε = factor fisi neutron cepat

ν = jumlah neutron yang dihasilkan tiap fisi

Σ_f = tampang lintang makroskopik fisi

Σ_a = tampang lintang makroskopik absorpsi

σ_a = tampang lintang mikroskopik absorpsi

σ_f =ampang lintang mikroskopik fisi

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 2,5 %, 3 % dan 3,7 % 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)⁴⁾. 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

Tabel 1. Data Desain Teras PWR³⁾

- Daya teras reaktor (MWt)	3565
- Teras aktif	
Diameter ekivalen (cm)	292,1
Tinggi aktif bahan bakar (cm)	365,8
Perbandingan molekul H_2O/U	2,40
- Perangkat bahan bakar, dimensi (cm)	21,402 x 21,402
Jumlah perangkat bahan bakar	193
Matriks	17 x 17
Jumlah rod per perangkat elemen bakar	264

Berat Uranium, Kg	75.914,5
Berat Zirkaloy, Kg	16.127,7
Bersambung	

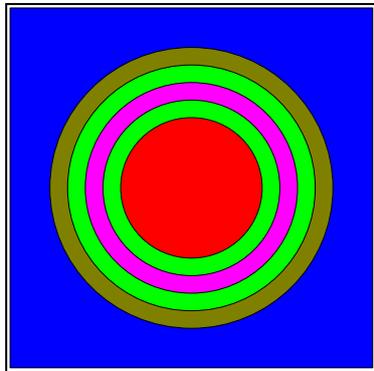
Tabel 1. Lanjutan

- 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	MOX
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 ³	10,159
Tebal kelongsong, cm	0,047
- Reaktivitas lebih	
k_{eff} maksimum teras (dingin, daya nol, awal siklus dan tanpa boron)	1,203
- Fraksi neutron kasip	0,0075

SPESIFIKASI PIN SEL BAHAN BAKAR MOX.

Pin sel bahan bakar MOX adalah sama untuk tipe PWR dengan perangkat bahan bakar 17 x 17. Pengkayaan yang berbeda 4,3 %, 7 % dan 8,7 % terhadap U-235 pada bahan bakar dibuat agar dapat menghasilkan fraksi baker 40 GWd/t. dalam satu siklusnya (2 tahun operasi daya penuh = *full power day*). Konfigurasi geometri pin sel. dengan ukuran jari-jari bahan bakar $r_1 = 0,4095$ cm, $r_2 = 0,475$ cm dan $r_3 = 0,54$ cm dimana jari-jari terluar adalah sama dengan sebuah bujur sangkar dengan $L/2 = 0,6$ cm⁵). Konfigurasi geometri pin sel bahan bakar

dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 1 menunjukkan model pin sel yang digunakan serta distribusi material bahan bakar di Tabel 3 di bawah ini



Gambar 1. sel satuan bahan bakar PWR

Tabel 2. Geometri sel

Media	Radius (cm)
Bahan bakar	0,4095
Void	0,4180
Kelongsong (Zr)	0,4750
Void	0,4850
Kelongsong Al	0,5400
Moderator	Square lattice pitch = 1,26
Sel Tabung Pengarah	
Moderator	0,3400
Kelongsong Al	0,5400
Moderator	Square lattice pitch = 1,26

Tabel 3. Distribusi material bahan bakar

Nuklida	Konsentrasi atom (10^{24} atom.cm ³)						
	MOX 4,3 %	MOX 7 %	MOX 8,7 %	UO ₂	Moderator	Kelongsong	Kelongsong
235-U	5,00E-5	5,00E-5	5,00E-5	8,650E-4			
238-U	2,21E-2	2,21E-2	2,21E-2	2,225E-2			
238-Pu	1,50E-5	2,40E-5	3,00E-5				
239-Pu	5,80E-4	9,30E-4	1,16E-3				
240-Pu	2,40E-4	3,90E-4	4,90E-4				
241-Pu	9,80E-5	1,52E-4	1,90E-4				
242-Pu	5,40E-5	8,40E-5	1,05E-4				
241-Am	1,30E-5	2,00E-5	2,50E-5				
O	4,633E-2	4,63E-2	4,63E-2	4,622E-2			
H ₂ O					3,35E-2		
B. alam					2,78E-5		
Zr alam						4,30E-2	
27-Al							6,00E-2

LANGKAH PERHITUNGAN

Program WIMS-ANL hanya mampu melakukan perhitungan transport neutron satu dimensi, sehingga perlu dilakukan pemodelan terhadap sel teras. Pemodelan sel digunakan untuk perhitungan pembangkitan konstanta kelompok dalam 7 kelompok energi. Perhitungan sel dengan paket program WIMS-ANL dari satuan sel reaktor PWR yang terdiri dari cluster bahan bakar dengan susunan *square pitch* seperti pada Gambar 1. Kemudian dihitung dimensi satuan selnya, satu satuan sel akan terdiri dari satu bahan baker dan moderator. Luasan moderator yang mengelilingi bahan baker adalah :

$L = (1,26)^2 - 3,14 \times (0,475)^2 = 0,879 \text{ cm}^2$ maka radius dari moderator yang mengelilingi elemen bakar adalah akar dari luasan di atas di bagi 3,14 dan hasilnya 0,53 cm. Dari satuan sel ekuivalen tersebut diperoleh data dimensi sel sebagai data masukan program WIMS-ANL yang dikenal sebagai annulus seperti Gambar 1. Densitas atom pembentuk pin bahan bakar dapat dilihat pada tabel 3.

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 nilai buckling teras (B_z^2) = 0. Perhitungan konstanta kelompok dilakukan untuk material-material penyusun teras pada kondisi seperti di atas. K_{inf} teras dan laju reaksi dihitung dengan pengkayaan bahan bakar 4,3 %; 7,0 % dan 8,7 % dalam geometri pin sel, kondisi temperatur pada suhu 300 K. Kemudian hasilnya dibandingkan dengan nilai perhitungan lain (benchmarking menggunakan program HELIOS).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3 menunjukkan nilai densitas material bahan bakar dan kelongsong yang merupakan data masukan program WIMS-ANL. Dari hasil perhitungan program WIMS-ANL dapat dilihat pada Tabel 4. bahwa diperoleh nilai k_{inf} pin sel bahan bakar PWR 1,397 pada suhu isothermal 300 K. Nilai ini turun dengan kenaikan temperatur isothermal teras dan juga jika temperature bahan bahan bakar dinaikkan. Nilai k_{inf} juga turun jika densitas moderator berkurang. Hal ini disebabkan oleh karena pada suhu yang lebih tinggi densitas moderator bertambah kecil, moderasi neutron berkurang dan neutron termal berkurang sehingga reaksi fisi berkurang yang menyebabkan nilai k_{inf} berkurang.

Tabel 4. Nilai k_{∞} pin-sel PWR dengan geometri silinder densitas 4,3 %

	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
	Isothermal (300 K)	Pengurangan Kerapatan H ₂ O	Bahan bakar (900 K)	Isothermal (550 K)
WIMS-ANL/Sn	1,39734	1,37576	1,36798	1,38378
BENCHMARKIN G	1.38974	1,37452	1,35309	1.36492

Perhitungan WIMS-ANL menunjukkan bahwa model pinsel berbentuk bujur sangkar dan

selinder tidak mempengaruhi nilai k_{inf} . Secara signifikan. Tabel 4 menunjukkan bahwa perbedaan nilai yang terbesar terdapat pada kasus 1 dan 3 sehingga perubahan nilai k_{inf} sangat efektif terhadap perubahan temperatur operasi bahan bakar PWR. Nilai laju reaksi beberapa atom pembentuk teras (H_2 , U-235, U-238, Zr) pada 3 kelompok energi neutron dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai laju reaksi dengan geometri pin sel selinder dan bujur sangkar untuk program WIMS-ANL nilainya sama sedangkan untuk program benchmarking terdapat perbedaan namun tidak signifikan.

Tabel 5. Perbedaan laju reaksi 3 kelompok neutron untuk kasus 1

Selinder	Selinder	Bujur sangkar
WIMS-ANL	BENCHMARKIN	WIMS-ANL

$H_2O + O_2$ absorption

Kelompok 1 (> 9,1 keV)	452	456	457
Kelompok 2 (9,1- 4 eV)	286	287	289
Kelompok 3 (< 4 eV)	5.446	5.446	5.445
Total	6.184	6.189	6.188

Zr absorption

Kelompok 1 (>9,1keV)	68	67	69
Kelompok 2 (9,1- 4 eV)	369	258	276
Kelompok 3 (<4 eV)	302	302	302
Total	739	627	647

^{235}U fission

Kelompok 1 (>9,1 keV)	697	687	685
Kelompok 2 (9,1-4 eV)	4.143	4.148	4.149
Kelompok 3 (< 4 eV)	48.698	48.888	48.898
Total	53.538	53.723	53.732

^{235}U absorption

Kelompok 1 (> 9,1 eV)	876	-	875
Kelompok 2 (9 - 4 eV)	6.579	-	6.586
Kelompok 3 (< 4 eV)	57.482	-	57.475
Total	64.937	64.876	64.936

Bersambung

Tabel 5. Lanjutan

	Selinder	Selinder	Bujur sangkar
	WIMS-ANL	BENCHMARKIN	WIMS-ANL
Total ²³⁵ U capture	11.384	11.202	11.394
²³⁸ U fission			
Kelompok 1 (>9,1eV)	2.958	2.979	2.797
Kelompok 2 (9,1-4 eV)	0	1	1
Kelompok 3 (<4 eV)	0	0	0
Total	2.958	2.980	2.798
²³⁸ U absorption			
Kelompok 1 (>9,1keV)	5.374	-	5.394
Kelompok 2 (9,1- 4 eV)	14.829	-	14.765
Kelompok 3 (<4 eV)	8.639	-	8.645
Total	28.842	28.724	28.804
<hr/>			
Total ²³⁸ U capture	25.398	25.744	25.325
<hr/>			
²³⁸ U neutron production			
Kelompok 1 (9,1 keV)	8.302	7.753	7.718
Kelompok 2 (9,1-4 eV)	0	3	3
Kelompok 3 (< 4 eV)	0	0	0
Total	8.302	7.756	7.721
²³⁵ U neutron production			
Kelompok 1 (>9,1 keV)	1.937	1.752	1.745
Kelompok 2 (9,1 – 4 eV)	10.040	10.068	10.072
Kelompok 3 (<4 eV)	118.105	119.195	119.200
Total	130.083	131.015	131.017
<hr/>			
Total absorption	99.979	99.999	99.998

Tabel 5 menunjukkan laju reaksi antara program WIMS-ANL dan benchmarking untuk model pin sel selinder. Khusus nilai U-235 laju reaksi fission pada group 1 (neutron fast group) antara WIMS-ANL dengan benchmarking terdapat perbedaan 62 (10.3 %) lebih tinggi WIMS-

ANL sedangkan dengan benchmarking lebih rendah. Pendekatan yang berbeda digunakan pada spectrum fisi misalnya spectrum fisi U-235 untuk energi 1 MeV pada pustaka WIMS-ANL digunakan untuk semua isotop. Pada program benchmarking, rerata spectrum reactor dari matrik spectrum fisi digunakan dalam pustaka benchmarking. Komponen spectrum fisi neutron kasiip diikuti sertakan dalam benchmarking sehingga menghasilkan overestimate untuk laju reaksi U-235 >7 % pada group 1. Pada group 2 perbedaan relatif lebih kecil hanya 0,36 % dan group 3 yaitu group neutron termal yang paling penting perbedaannya 0,6 %. Rasio U-235 capture dengan U-235 fisi untuk WIMS-ANL adalah 0,21 sedangkan untuk benchmarking. Pada umumnya spectrum fisi yang digunakan pada deterministic code lebih besar dibanding benchmarking sebagai probabilistic code. Kemungkinan lain vector spectrum fisi yang digunakan pada setiap program dalam library berbeda sehingga dapat menyebabkan hasil yang berbeda. Nilai factor multiplikasi tak-terhingga (k_{∞}) pada berbagai pengkayaan bahan bakar teras PWR dapat dilihat pada Tabel 6. Semakin tinggi pengkayaan maka nilai k_{inf} semakin besar sesuai dengan teori (pers. 4) yang menyatakan semakin banyak material fisil semakin besar harga k_{inf} . Pada reflektor k_{inf} dapat dianggap sama dengan nol. Harga K_{inf} pada pengkayaan 4,3 % tanpa boron sangat sesuai dengan perhitungan program lain yaitu 1,39 yang diberikan oleh pemasok PWR Westinghouse, sedangkan dengan bahan bakar pengkayaan lain tidak ditemukan data pembandingnya dari pemasok. Untuk tampang lintang makroskopik absorpsi dan ν -fisi mempunyai harga terbesar pada daerah termal sedangkan kisi bahan bakar dengan data-data neutronik yang tersedia dari pemasok adalah bersifat undermoderated. Tabel 6 menunjukkan perbedaan nilai konstanta makroskopik sel teras PWR dengan pengkayaan yang berbeda. Untuk konstanta makroskopik absorpsi dan nu-fisi, semakin besar pengkayaan maka semakin besar nilai konstanta makroskopiknya sedangkan untuk konstanta difusi berlaku sebaliknya hal ini disebabkan oleh karena pada konstanta makroskopik absorpsi dan nu-fisi bertambah besar dengan bertambahnya jumlah uranium yang dapat belah sedangkan dengan bertambahnya uranium dapat belah maka neutron untuk berdifusi semakin kecil. Nilai konstanta makroskopik absorpsi dan nu-fisi pada energi kelompok ke 3 yang paling besar sedangkan untuk konstanta difusi pada kelompok energi neutron ke 3 yang paling kecil

Tabel 6. Konstanta Kelompok Material Teras PWR

1. Pin sel	Group	4,3 %	7 %	8,7 %
Makro X-sec. Absorbpsi	1	4.36327E-03	4.64023E-03	4.91008E-03
	2	8.97462E-02	3.04180E-02	3.57135E-02
	3	2.57173E-01	3.11733E-01	3.90317E-01
Makro X-sec. nu-fissi	1	1.29579E-03	1.72248E-03	2.48876E-03
	2	1.84850E-02	2.05276E-02	3.28236E-02
	3	4.33950E-01	5.27080E-01	6.91480E-01
Konstanta Difusi	1	1.86607E+00	1.85610E+00	1.84709E+00
	2	6.73356E-01	6.67840E-01	6.58492E-01
	3	3.07741E-01	2.94645E-01	2.82956E-01
Faktor perlipatan tak-hingga		1,39732	1,42686	1,44073

KESIMPULAN

Hasil perhitungan pin sel dari program WIMS-ANL menunjukkan bahwa nilai konstanta kelompok k_{inf} dan laju reaksi atom material teras PWR pada kondisi daya nol, tanpa boron tidak jauh berbeda jika dibandingkan dengan perhitungan benchmarking dengan nilai k_{inf} 1,397 sehingga dapat dikatakan bahwa model yang digunakan sudah cukup baik. Nilai konstanta kelompok yang dihasilkan dapat digunakan untuk perhitungan teras selanjutnya. Konstanta kelompok seperti k_{inf} , koefisien difusi, tampang lintang makroskopik absorpsi dan fisi sangat tergantung pada pengkayaan bahan bakar dan model yang digunakan.

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.
4. TAUBMAN, C.L " The WIMS 69-group Library tape 166259" UK Atomic Energy Authority, England 1975.
5." Simplified Passive Advanced Light Water Reactor Plant Program, PWR Standard Safety Analysis Report, 4th Volume, DE-AC03-90SF18495, Westinghouse Electric Corporation, 1992.