
**PREDIKSI KOMPOSISI ISOTOP BAHAN BAKAR PWR
MENGUNAKAN PROGRAM WIMSD-5B**

**ISOTOPE COMPOSITION PREDICTION OF PWR FUEL
USING WIMSD-5B CODE**

Santo Paulus Rajagukguk¹⁾, Syaiful Bakhri²⁾ and Tukiran Surbakti²⁾

¹⁾Mahasiswa UNIMED FMIPA Jurusan Fisika Medan

E-mail: santopaulusrajagukguk98@gmail.com

²⁾Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir-BATAN
Kawasan Puspipstek Gd 80 Tangsel, Banten.

Diterima: 6 Agustus 2021, diperbaiki : 14 September 2021, disetujui : 27 Oktober 2021

ABSTRAK

PREDIKSI KOMPOSISI ISOTOP BAHAN BAKAR PWR MENGGUNAKAN PROGRAM WIMSD-5B. Perhitungan komposisi isotop bahan bakar PWR sangat dibutuhkan untuk keselamatan baik ketika bahan bakar ada di dalam teras maupun di dalam penyimpanan bahan bakar bekas. Dalam riset ini dilakukan perhitungan komposisi isotop bahan bakar PWR model pin cell dengan program WIMSD-5B. Prediksi komposisi isotop yang diuji sangat sesuai dengan hasil referensi yang menyatakan bahwa semakin tinggi fraksi bakar komposisi isotop juga semakin besar. Sedikit kecenderungan untuk menaksir terlalu tinggi pada laju penyerapan produk fisi, yang dapat dijelaskan oleh efek spektral yang dihasilkan dari kekasaran spektrum 69 energi grup neutron pada program WIMSD-5B. Prediksi komposisi isotop yang diuji berada dalam interval ketidakpastian dari hasil perhitungan, kecuali untuk Ag-109 pada pembakaran yang lebih rendah. Untuk Ag-109 penyebab perbedaan adalah penggunaan data hasil fisi yang lama dalam menghasilkan solusi. Perbedaannya adalah karena penampang tangkapan Eu-153 yang digunakan adalah yang lama. Hasil yang diperoleh menyimpulkan bahwa metode pemrosesan tidak menimbulkan kesalahan signifikan pada data nuklir dasar ENDFB VII.1

Kata kunci : Komposisi isotop, bahan bakar-PWR, WIMSD-5B, pin cell

ABSTRACT

ISOTOPE COMPOSITION PREDICTION OF PWR FUEL USING WIMSD-5B CODE. The calculation of the isotopic composition of the PWR fuel is very important for safety both when the fuel is in the core or in the spent nuclear fuel storage. In this research, the isotopic composition of the pin cell model of PWR fuel was calculated using the WIMSD-5B program. The predictions of the tested isotope compositions are in good agreement with the reference results. There is a slight tendency to overestimate the absorption rate of fission products, which can be explained by the resulting spectral effect of the 69 energy roughness of the WIMSD-5B group. The predicted isotopic compositions under test are within the uncertainty interval of the results, except for Ag-109. For Ag-109 the cause of the difference is the use of old fission data to produce a solution. The difference is due to the long catch cross section of Eu-153. The results obtained concluded that the processing method did not cause significant errors in the basic nuclear data ENDFB VII.1.

Keywords : Isotope composition, PWR-fuel, WIMSD-5B, pin cell.

PENDAHULUAN

Salah satu penelitian di Organisasi Riset Tenaga Nuklir dari Badan Riset dan Inovasi Nasional saat ini adalah terkait desain, keselamatan dan teknologi PLTN tipe Pressurized Water Reactor (PWR). Saat ini, PWR merupakan jenis PLTN yang paling banyak dioperasikan dan teknologinya sudah terbukti andal. Untuk mendukung program tentang kajian desain, teknologi dan keselamatan PLTN, maka dipandang perlu untuk melakukan penelitian tentang analisis komposisi isotop bahan bakar reactor PLTN tipe PWR.

Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan kajian tentang teknologi dan keselamatan reaktor PWR dari sisi teknik perancangan (*design*) untuk PLTN. Perancangan suatu teras reaktor nuklir pada umumnya dimulai dari perhitungan sel material bahan bakar [2]. Berdasarkan konsep tersebut pada penelitian ini dilakukan perhitungan komposisi isotop bahan bakar setelah diiradiasi di dalam teras PWR daya 1000 MW berbahan bakar UO_2 [3]. Perhitungan komposisi isotop bahan bakar teras PWR dilakukan dengan menggunakan program transport neutron satu dimensi dengan 69 kelompok energi neutron yaitu WIMSD-5B[5]. Paket program WIMSD-5B dapat menghitung komposisi isotop teras reaktor PWR dengan model satu bahan bakar (*pin cell*) maupun dengan seperangkat bahan bakar. Pin sel diperhitungkan untuk 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 konstanta kelompok yang bersesuaian dengan kondisi teras maka dicari nilai buckling aksial teras. Nilai *buckling* aksial ini ditentukan dengan memasukkan harga K_{eff} teras dari data pemasok.

Perhitungan konstanta kelompok dilakukan untuk material-material penyusun teras pada kondisi seperti di atas. Komposisi isotop dan konstanta tampang lintang makroskopik. Namun dalam penelitian ini dilakukan hanya menentukan komposisi isotop bahan bakar setelah diiradiasi satu siklus.

Densitas isotop merupakan masukan yang sangat menentukan keakuratan dalam analisis keselamatan pada perhitungan teras sehingga perhitungan parameter sel harus dihitung dengan teliti dan akurat. Mengingat pentingnya perhitungan sel teras PWR berbahan bakar UO_2 untuk mendukung program BATAN (pemerintah) maka dirasa perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan WIMSD-5B dengan menggunakan nuklir data file ENDFB-VII.1[6].

DISKRIPSI TERAS PWR

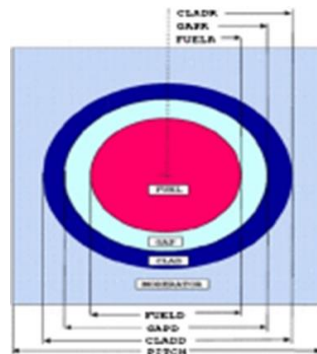
Reaktor daya PWR adalah reaktor daya jenis air tekan (*Pressurized Water Reactor*) yang didesain oleh Westinghouse[7]. Teras PWR pada awal siklus (BOC) disusun atas 3 jenis pengkayaan yaitu 2,5 %, 3,0 % dan 3,7 % masing-masing sebanyak 49 buah, 48 buah, 48 buah[8]. Jumlah perangkat bahan bakar yang menyusun teras reaktor PWR adalah 145 buah. Reaktor PWR mempunyai bahan bakar jenis pelet selinderis dengan bahan bakar UO_2 dan kelongsongnya Zircalloy-4[9]. Di dalam kelongsong bahan bakar baik dibagian atas maupun bagian bawah terdapat ruang yang dimanfaatkan untuk menampung gas hasil produk fisi. Setiap perangkat bahan bakar berisi 269 (17×17) *fuel rod* 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 Zirkaloy. 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[10]. Konsentrasi boron cair bervariasi jumlahnya sesuai dengan perubahan reaktivitas yang berubah karena perubahan fraksi bakar di dalam teras.

METODOLOGI

Paket program perhitungan sel (*cell* atau *lattice*) digunakan untuk menghitung distribusi fluks neutron dan faktor perlipatan media tak hingga dari sel bahan bakar. Diperlukan masukan tampang lintang neutron beberapa nuklida, deskripsi geometri sel dan menyelesaikan persamaan transpor neutron untuk seluruh daerah sel. Sel yang digunakan berupa unit sel dan paket perhitungan sel memasukkan persamaan transpor neutron untuk mendapatkan distribusi fluks neutron dan faktor perlipatan tak hingga (k_{inf}) dalam kelompok tenaga neutron dan fungsi ruang.

Dalam studi saat ini, unit sel yang ditangani oleh WIMSD secara mendasar terdiri dari 4 area yaitu bahan bakar (1), kelongsong (2), pendingin (3) dan gap (4) yang direpresentasikan dalam geometri silinder sering disebut dengan annulus. Gambar 1 mengilustrasikan pembagian daerah unit sel. Dimana H_2O dihomogenisasi dengan UO_2 dan kelongsong. Setiap kasus dipilih untuk mewakili set individu. Spesifikasi kasus dari parameter sel teras PWR dirangkum dalam Tabel 1. Data nuklir perangkat bahan bakar PWR ditunjukkan pada Tabel 2. Daya spesifik per siklus operasi ditampilkan pada Tabel 3. Reaksi isotop U-235 dan U-238 pada temperatur 841K dihitung dalam kisi benchmark menggunakan program WIMSD-5B. Parameter integral yang dihitung adalah faktor multiplikasi tak terhingga (k_{inf}), komposisi isotop dan tampang lintang makroskopik seperti koefisien difusi, tampang lintang absorpsi, tampang lintang removal, nu-fisi untuk kelompok energi 69 [15] yang dihitung dengan energi termal 0,625 eV. Komposisi dan radius yang mewakili sel didefinisikan dalam data material dan spektrum yang disesuaikan dengan ke-empat daerah tersebut dan hal ini sudah dilakukan oleh paket program WIMSD-5B. Jika tidak ingin materialnya dibobot oleh spektrum yang ada, maka diberi tanda negatif agar terjadi pengabaian. Hal ini terutama perlu dilakukan jika menghadapi sel berpenyerap kuat. Dengan menggunakan bentuk spektrum tersebut dilakukan perhitungan sel. Konsep ini mengindikasikan paket program WIMD

memakai trik untuk mendapatkan hasil yang akurat. Untuk memprediksi komposisi isotop dalam bahan bakar dan juga mempelajari perubahan reaktivitas karena fraksi bakar dan *cooling time* setelah diiradiasi.



Gambar 1. Pembagian daerah dalam unit sel [16]

Perubahan reaktivitas terjadi akibat fraksi bakar meningkat di dalam teras karena bahan bakar diiradiasi, faktor meningkatnya perubahan reaktivitas juga dipengaruhi oleh waktu pendinginnya. Pada riset ini dilakukan fraksi bakar 30 dan 40 MWd/tU dan *cooling time* divariasi 1 dan 5 tahun. Prediksi isotop dibagi atas 3 kelompok nuklida yaitu isotop aktinida utama, aktinida minor dan produksi fisi. Ke 3 kelompok isotop ini dapat menyumbang perubahan reaktivitas pada teras PWR. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program wimsd-5B dengan nuklir data file ENDFBVII.1. Hasil perhitungan akan dibandingkan dengan referensi [17].

Kerapatan atom untuk bahan bakar dicantumkan pada Tabel 4 dan kelongsong serta pendingin dalam Tabel 5. Kerapatan atom dan ID WIMS-nya diimplementasikan dalam kode sebagai argumen ke kartu MATERIAL. Temperatur untuk bahan bakar 814 K dan kelongsong diatur ke 620 K serta pendingin 558 K. Perhitungan densitas atom dihitung dengan menggunakan rumus $N_i = 0,6022\rho/A_i$ atom/cm³ barn [18].

Tabel 1. Kasus perhitungan

Kasus	Burn up (GWd/tU)	Cooling time (Tahun)	Mayor aktinida	Minor aktinida	Produk Fisi
1	0	1	ya	-	-
2	30	1	ya	-	ya
3	40	1	ya	-	ya
4	30	1	ya	ya	-
5	40	1	ya	ya	-
6	30	1	ya	ya	ya
7	40	1	ya	ya	ya
8	30	5	ya	ya	-
9	40	5	ya	ya	-
10	30	5	ya	-	-
11	40	5	ya	-	-

Tabel 2. Data nuklir bahan bakar PWR

Parameter	Nilai
Radius pin sel (cm)	0,879346
Moderator	H ₂ O
Densitas Moderator (g/cm ³)	0,7569
Temperatur Moderator (K)	558
Material dan pengkayaan bahan bakar	UO ₂ (3%)
Densitas bahan bakar (g/cm ³)	10,045
Temperatur bahan bakar (K)	841
Radius bahan bakar(cm)	0,47815
Material kelongsong	Zry-2
Densitas material kelongsong (g/cm ³)	6,55
Internal radius kelongsong (cm)	0,493
Ketebalan kelongsong (cm)	0,066
Temperatur kelongsong (K)	620
Koncentration boron (ppm)	331

Tabel 3. Daya spesifik persiklus operasi

Siklus operasi	Daya spesifik [Kw/kgU]		
	S- 1	S-2	S-3
1	17,24	24,72	31,12
2	19,43	26,76	32,51
3	17,04	22,84	26,20
4	14,57	18,87	22,12
Burn up [MWd/tU]	27,35	37,12	44,34

Tabel 4. Densitas atom untuk bahan bakar

Material	WIMS ID	Densitas atom	Temp. (K)
U-234	234.0	6,1516E-06	841
U-235	2235.0	6,8922E-04	
U-236	236.0	3,1626E-06	
U-238	8238.0	2,1710E-02	
O-16	6016	4,4818E-02	
C-12	12	9,1336E-06	
N-14	13	1,0407E-05	

Penentuan temperatur bahan bakar, kelongsong dan air digunakan seperti temperatur reaktor PWR beroperasi normal, sehingga ketiga material tersebut dibedakan temperaturnya. Pada kasus ini, di dalam air sebagai pendingin ditambahkan boron seperti Tabel 5. Kelongsong bahan bakar PWR adalah zirkaloy.

Tabel 5. Densitas atom untuk kelongsong dan moderator

Material	WIMS ID	Densitas atom	Temp. (K)
Zr-91	91	4,23425E-02	620
Fe-56	2056	3,56182E-04	
H-1	3001	5,06153E-02	558
O-16	6016	2,53076E-02	
B-10	1010	2,75612E-06	
B-11	1011	1,11890E-05	

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan perubahan reaktivitas akibat iradiasi bahan bakar di dalam teras PWR dapat dilihat pada Tabel 6. Dari hasil perhitungan untuk bahan bakar segar sebelum diiradiasi di teras (kasus 1) perbedaan nilai k-inf hanya pcm ($425 \times 10^{-5} \% \Delta k/k$).

Untuk perubahan reaktivitas pada seluruh kasus dapat dibagi 2 kelompok yaitu kelompok kasus 4, 5, 8, 9, 10 dan 11 dimana aktinida minor dan utama dihitung dan hasilnya tidak jauh berbeda ($< 5\%$) dengan referensi [18]. Untuk kelompok ke 2 yaitu kasus 2, 3, 6 dan 7 menghitung nilai k-inf dengan menghadirkan produk fisi yang mempengaruhi perubahan reaktivitas ternyata lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa produk fisi.

Hasil perhitungan WIMS dapat dilihat pada Tabel 7 yaitu koefisien difusi, sigma absorpsi, sigma removal dan nu-fisi. Pada tabel tersebut ditampilkan konstanta makroskopik yang 2 grup energi neutron. Grup 1 adalah energi cepat sedangkan grup 2 energi termal. Pada grup energi neutron cepat koefisien difusi sangat tinggi sedangkan pada grup termal sangat rendah. Hal ini menyatakan bahwa energi yang dikandung sangat mempengaruhi neutron berdifusi. Sigma removal berbanding terbalik dengan koefisien difusi. Sigma absorpsi dan nu-fisi pada energy tinggi nilai konstanta makroskopiknya kecil sedangkan pada energi termal tinggi karena jelas bahwa reaktor PWR adalah reaktor termal.

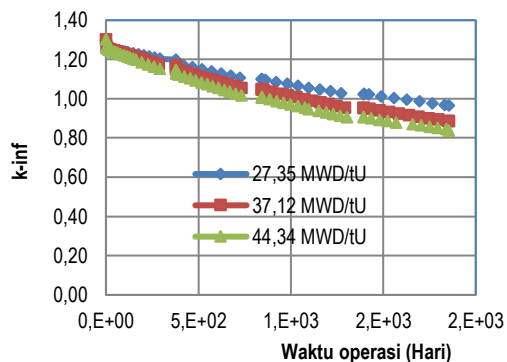
Tabel 6. Nilai k-inf hasil perhitungan WIMSD-5B

Kasus	K-inf WIMS	K-inf ref.	σ (pcm)	Δk -inf WIMS	Δk -inf ref.
1	1,44165	1,43740	425	0,00000	0,00000
2	1,14024	1,14020	4	-0,30141	-0,29720
3	1,06329	1,06380	51	-0,37837	-0,37360
4	1,24950	1,24560	390	-0,19215	-0,19180
5	1,19203	1,18850	353	-0,24962	-0,24890
6	1,11145	1,11230	85	-0,33021	-0,32510
7	1,02204	1,02400	196	-0,41962	-0,41340
8	1,23163	1,22840	323	-0,21002	-0,20900
9	1,16753	1,16570	183	-0,27412	-0,27170
10	1,26740	1,26350	390	-0,17425	-0,17390
11	1,26068	1,25660	408	-0,18097	-0,18080

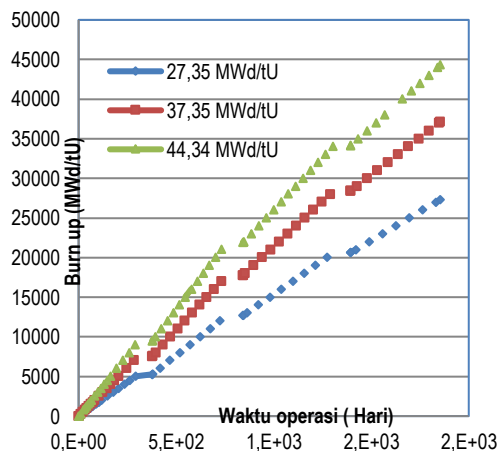
Tabel 7. Konstanta makroskopik bahan bakar PWR neutron

Sampel	Energi grup	Radial diffusion	Axial diffusion	Sigma absorption	Sigma removal	nu-fisi
27,35	1	1.447E+00	1.449E+00	1.006E-02	1.661E-02	4.512E-03
	2	3.631E-01	3.697E-01	8.667E-02	1.568E-03	1.113E-01
37,12	1	1.446E+00	1.448E+00	1.029E-02	1.638E-02	4.086E-03
	2	3.628E-01	3.699E-01	8.341E-02	1.505E-03	9.886E-02
44,34	1	1.445E+00	1.448E+00	1.047E-02	1.622E-02	3.932E-03
	2	3.625E-01	3.696E-01	8.306E-02	1.502E-03	9.466E-02

Nilai k-inf hasil perhitungan WIMS dapat dilihat pada Gambar 4. Nilai k-inf awal untuk 69 grup energi neutron adalah 1,30234 untuk ke 3 kasus namun akhir operasi nilai dari k-inf berbeda-beda karena jumlah energi yang dihasilkan (*burn up*) berbeda. Hal ini sudah sesuai kenyataannya karena faktor kebocoran neutron pada teras tidak ada. Nilai k-inf menurun dengan waktu operasi karena jumlah U-235 berkurang selama reaktor beroperasi. Terdapat 4 segmen nilai k-inf pada Gambar 4, hal ini karena daya spesifik pin bahan bakar digunakan berbeda seperti pada Tabel 3. Nilai fraksi bakar meningkat dengan lamanya waktu operasi PWR. Nilai fraksi bahan bakar yang sering disebut dengan *fuel utilization* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 menyatakan bahwa jumlah energi yang dihasilkan selama waktu operasi dari sumber energi bahan bakar nuklir. Semakin besar jumlah energi yang dibangkitkan semakin baik dan merupakan karakteristik dari reaktor PWR. Dalam hal ini ke 3 kasus dilakukan perhitungan hingga fraksi bakar yang berbeda dengan waktu operasi yang sama (1853 hari) namun dayanya berbeda beda setiap siklus operasi sesuai Tabel 3.



Gambar 4. Nilai k-inf fungsi waktu operasi PWR



Gambar 5. Fraksi bakar sebagai fungsi waktu operasi

Pada Tabel 8 diperoleh komposisi isotop pada bahan bakar PWR. Densitas U-235 menurun seiring dengan lamanya waktu operasi reaktor PWR atau besarnya energy yang dihasilkan. Jumlah U-235 menurun selama reaktor dapat dioperasikan secara kritis. Inti U-235 ditembak neutron termal akan berfisi menghasilkan produk fisi, energi panas dan neutron. Energi panas ini akan diubah menghasilkan energi listrik.

Pada Tabel 8 juga ditunjukkan jumlah U-234 menurun sesuai dengan energy yang dihasilkan selama reaktor dapat dioperasikan. Inti U-234 ditembak neutron termal akan diserap dan inti U-234 bertransmutasi berubah menjadi U-235 dan berfisi menghasilkan produk fisi dan energi panas serta neutron. Densitas U-238 juga menurun seiring dengan lamanya waktu operasi reaktor PWR. Pada Tabel 8 juga ditunjukkan jumlah U-238 berkurang selama reaktor dapat dioperasikan. Di dalam teras reaktor, sejumlah U-238 akan

menyerap neutron hasil reaksi fisi dan berubah bertransmutasi menjadi plutonium (Pu-239). Atom U-238 menyerap neutron cepat dan ada juga yang langsung berfisi. Setengah dari plutonium yang dihasilkan juga mengalami reaksi fisi dan menghasilkan sepertiga dari energi total reaktor. Untuk mempertahankan kinerja yang digunakan di dalam teras harus diganti dengan bahan bakar baru setelah 1883 hari. Pada Tabel 8 juga ditunjukkan densitas U-236 yang bertambah seiring dengan waktu beroperasi reaktor. U-236 diperoleh dari hasil reaksi U-235 ditembak neutron berubah intinya bertransmutasi menjadi U-236.

Pada Tabel 8 juga dapat dilihat bahwa jumlah densitas Pu di dalam pin bahan bakar PWR. Densitas Pu-240 jauh lebih besar dibanding Pu yang lain karena tampang lintang serapan U-238 jauh lebih besar dibanding Pu-239. Jauh lebih besar U-238 berubah bertansmutasi menjadi Pu-239 dibanding dengan yang lain.

Tabel 8. Komposisi isotop pada bahan bakar UO₂ PWR

Material	Isotop	ID WIMS	Gram /gram UO ₂		
			27,35 MWd/tu	37,12 MWd/tU	44,34 MWd/tU
Aktinida	⁹² U ²³⁴	234	1,16E-03	1,00E-03	8,26E-04
Aktinida	⁹² U ²³⁵	2235	5,98E-02	3,53E-02	2,29E-02
Aktinida	⁹² U ²³⁶	236	2,32E-02	2,63E-02	2,74E-02
Aktinida	⁹² U ²³⁸	8238	6,04E+00	5,99E+00	5,95E+00
Aktinida	⁹³ Np ²³⁷	937	1,98E-03	2,84E-03	3,34E-03
	⁹⁴ Pu ²³⁸	948	6,96E-04	1,36E-03	1,86E-03
	⁹⁴ Pu ²³⁹	6239	3,05E-02	3,08E-02	3,01E-02
Aktinida	⁹⁴ Pu ²⁴⁰	1240	1,21E-02	1,57E-02	1,76E-02
Aktinida	⁹⁴ Pu ²⁴¹	1241	4,77E-03	6,27E-03	8,94E-03
Aktinida	⁹⁴ Pu ²⁴²	1242	2,03E-03	4,14E-03	5,97E-03
	⁹⁵ Am ²⁴¹	951	1,68E-03	2,16E-03	3,89E-04
	⁹⁵ Am ^{242m}	952	5,66E-06	6,65E-06	6,70E-06
	⁹⁵ Am ²⁴³	953	2,63E-04	7,45E-04	1,29E-03
FP	⁴² Mo ⁹⁵	4095	4,05E-03	5,24E-03	6,05E-03
	⁴³ Tc ⁹⁹	4099	4,21E-03	5,48E-03	6,33E-03

Tabel 8. Lanjutan

Material	Isotop	ID WIMS	Gram /gram UO ₂		
			27,35 MWd/tu	37,12 MWd/tU	44,34 MWd/tU
FP	⁴⁴ Ru ¹⁰¹	4101	4,07E-03	5,49E-03	6,51E-03
	⁴⁷ Ag ¹⁰⁹	4109	2,58E-04	4,10E-04	5,31E-04
	⁴⁹ In ¹¹⁵	4115	9,32E-06	1,06E-05	1,12E-05
	⁵¹ Sb ¹²⁵	4125	8,76E-06	1,25E-05	5,57E-05
	⁵³ I ¹²⁷	4127	2,25E-04	3,15E-04	3,78E-04
	⁵⁴ Xe ¹³¹	4131	2,44E-03	2,99E-03	3,29E-03
FP	⁵⁵ Cs ¹³³	4133	5,36E-08	5,99E-08	5,65E-08
FP	⁵⁵ Cs ¹³⁴	4134	3,25E-08	3,50E-08	1,78E-07
FP	⁵⁵ Cs ¹³⁷	4137	9,24E-07	1,42E-06	1,99E-06
	⁵⁴ Xe ¹³⁴	5134	3,57E-04	4,77E-04	5,65E-04
FP	⁶⁰ Nd ¹⁴³	4143	9,28E-07	1,09E-06	1,12E-06
FP	⁶⁰ Nd ¹⁴⁵	4145	3,05E-07	5,06E-07	6,43E-07
FP	⁶² Sm ¹⁴⁹	4149	4,40E-12	1,95E-11	3,52E-11
FP	⁶² Sm ¹⁵⁰	4150	1,98E-11	1,46E-10	4,28E-10
FP	⁶² Sm ¹⁵¹	4151	6,17E-14	5,88E-13	2,17E-12
FP	⁶² Sm ¹⁵²	4152	4,89E-15	7,79E-14	3,67E-13
FP	⁶³ Eu ¹⁵³	4153	1,24E-18	4,31E-17	5,61E-17

KESIMPULAN

Prediksi komposisi isotop pada bahan bakar reaktor PWR berpendingin air ringan telah dilakukan. Sel bahan bakar Uranium oksida dengan 69 grup energi neutron tidak mempunyai perbedaan yang signifikan terhadap referensi [18]. Bahan bakar UO₂ dibakar dengan nilai *burn up* yang berbeda (27,12; 37,12 dan 44,35 MWd/tU) dan menghasilkan komposisi isotop yang berbeda sesuai dengan tingkat energi yang dihasilkan atau *burn up*. Perubahan reaktivitas sangat ditentukan oleh *burn up* karena produk fisi dan waktu pendinginnya sangat berpengaruh pada reaktivitas teras.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada kepala Pusat PTKRN yang telah

memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian tugas akhir di PTKRN.

DAFTAR PUSTAKA (IEEE style)

- [1]. T. Surbakti, S. Pinem, T. M. Sembiring, "Analisis Pengaruh Densitas Bahan Bakar Silisida Terhadap Parameter Kinetik Teras Reaktor RSG-GAS", Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya. 3(1): 19-30, 2013.
- [2]. T. M. Sembiring, T. Surbakti, S. Pinem, "Neutronic Design of Mixed Oxide-Silicide Cores for the Core Conversion of RSG-GAS Reactor", Atom Indonesia., Vol. 27, no. 2, pp. 85–1001, 2001.
- [3]. S. Pinem, P. H. Liem, T. M. Sembiring, T. Surbakti, "Fuel element burn-up measurements for the equilibrium LEU silicide RSG GAS (MPR-30) core under a

- new fuel management strategy”, *Ann. Nucl. Energy*, vol. 98, 2016.
- [4]. P. H. Liem, “Validation of BATAN'S Standard 3-D Diffusion Code, BATAN-3DIFF, on the First Core of RSG GAS”, *Atom Indonesia*, vol. 25, no. 1, pp. 47–53, 1999.
- [5]. P. H. Liem, T. Taryo, T. M. Sembiring, S. Hiroshi, and N. Yoshitaka, “Study on the control rod interaction effect in RSG gas multipurpose reactor (MPR-30)”, *Ann. Nucl. Energy*, vol. 29, no. 6, pp. 701–716, 2002.
- [6]. T. M. Sembiring, “Penggunaan Paket Program WIMSD/5B.12 dan BATAN-2DIFF untuk RSG-GAS,” *PRSG*, April, 2011.
- [7]. S. Pinem, T. Surbakti, “Analysis on neutronic parameters of the AP1000 Reactor Core”, *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*, 569-75, 2016.
- [8]. S. Pinem, T. M. Sembiring, T. Surbakti, “PWR Fuel Macroscopic Cross Section Analysis for Calculation Core Fuel Management Benchmark”, *Journal of Physics: Conference Series* 1198 (2), 022065, 2019
- [9]. T. Surbakti, S. Pinem, T. M. Sembiring, L. Suparlina, J. Susilo, “Desain Konseptual Teras Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Uranium-molibdenum dari Aspek Neutronik”, *Jurnal Tri Dasa Mega*. 3(14): 178-191. 2012.
- [10]. T. M. Sembiring, P. H. Liem, T. Surbakti, “Fuel management strategy for the compact core design of RSG GAS (MPR-30)”, *RRFM 2000: research reactor fuel management*, Colmar, 19-21, 158-162. 2000.
- [11]. P. H. Liem, T. Surbakti, D Hartanto, “Kinetics parameters evaluation on the first core of the RSG GAS (MPR-30) using continuous energy Monte Carlo method”, *Progress in Nuclear Energy* 109, 196-203, 2018.
- [12]. T. Surbakti, P. Purwadi, “Karakteristik reaktivitas teras kerja RSG-GAS selama 30 tahun beroperasi”, *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)* 7 (1), 13-26, 2017.
- [13]. T. Surbakti, M. Imron, “Fuel burn-up calculation for working core of the RSG-GAS research reactor at BATAN Serpong”, *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)* 7 (2), 89-101, 2017.
- [14]. T. Surbakti, S. Pinem, T. M. Sembiring, A. Hamzah, K. Nabeshima, “Calculation of Control Rods Reactivity Worth of RSG-GAS First Core Using Deterministic and Monte Carlo Methods”, *Atom Indonesia* 45 (2), 69-79. 2019.
- [15]. T. Surbakti, P. Purwadi, “Analysis of Neutronic Safety Parameters of the Multi-Purpose Reactor–Gerrit Augustinus Siwabessy (RSG-GAS) Research Reactor at Serpong”, *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)* 9 (1), 78-91, 2019.
- [16]. T. Surbakti, T. M. Sembiring, “Analisis Neutronik Teras RSG-GAS Berbahan Bakar Silisida”, *Indonesian Journal of Physics* 12 (3), 61-67, 2001.
- [17]. Daniel L. Aldama, Andrej Trrov “Analysis BUC Benchmark with an Updated WIMS-D Lybrary. *Annals of Nuclear Energy* 27 169-174 2000.
- [18]. A. Hamzah, “Analisis Distribusi Fluks dan Spektrum Neutron Reaktor PLTN PWR 1000 MWe Menggunakan Program MCNP”, *Prosiding Seminar Nasional ke-18 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*, Bandung 2012.