
ANALISIS KARAKTERISTIK PERANGKAT BAHAN BAKAR MAJU TERAS PWR

Tukiran S*), Iman Kuntoro**)

*)Pusat Teknologi Reaktor Dan Keselamatan Nuklir, BATAN

***) Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir-BATAN
Komplek Puspiptek Serpong, Tangerang , Banten

ABSTRAK

ANALISIS KARAKTERISTIK PERANGKAT BAHAN BAKAR MAJU TERAS PWR. Saat ini dibutuhkan perangkat bahan bakar maju teras PWR untuk meminimalkan peningkatan plutonium dalam bahan bakar dan meningkatkan derajat bakar atau masa hidup bahan bakar didalam teras. Studi karakteristik perangkat bahan bakar maju teras PWR sangat penting dilakukan untuk mengetahui kemampuan bahan bakar selama operasi. Geometri, kondisi dan konfigurasi pin bahan bakar pada teras sangat menentukan strategi pemuatan bahan bakar pada teras (*In-core fuel management*). Perhitungan *k-eff* merupakan salah satu tahapan dalam perhitungan karakteristik perangkat bakar maju teras PWR. Perhitungan dilakukan dengan paket program komputer dimulai dari pemodelan satu unit kisi sel bahan bakar, tabung pengarah, racun dapat bakar, hingga satu perangkat bahan bakar reaktor. Dalam penelitian ini, dilakukan berbagai pemodelan perangkat bahan bakar maju UO_2 pengkayaan 6,5 % yang merupakan perangkat bahan bakar maju tipe PWR 17×17 . Perhitungan *k-eff* pin dan perangkat bahan bakar dilakukan dengan fraksi volum, diameter pin, pengayaan bahan bakar divariasi. Perhitungan dilakukan dengan paket program KENOVI. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa harga *k-eff* untuk pemodelan secara homogen dan heterogen tidak memberikan perbedaan yang signifikan pada perhitungan pin sel dan perangkat bahan bakar 17×17 . Untuk fraksi volum bahan bakar 0,5; rod pitch 1,32 cm, pengkayaan 6,5 % dan diameter pin bahan bakar 9,6 mm mempunyai karakteristik fisika teras yang stabil dengan fraksi bakar 50 GWd/t dan jumlah plutonium dalam perangkat bahan bakar masih dibawah batasan yang ditetapkan. Perangkat bahan bakar maju dapat digunakan sebagai bahan bakar pada teras PWR dan dapat meningkatkan keandalan teras PWR selama operasi.

Kata kunci : PWR, faktor multiplikasi, perangkat bahan bakar, KENOVI

ABSTRACT

ANALYSIS OF ADVANCED FUEL ASSEMBLY CHARACTERISTIC OF THE PWR CORE. Study on reactor physics characteristic of the PWR core using UO_2 fuel it is necessary to be done to minimize plutonium proliferation and also to expand the long life fuel in the core. The aim of characteristic study of the advanced fuel assembly is to know the characteristic of geometry, condition and configuration of pin cell in the fuel assembly. The geometry, configuration and condition of the pin cell in fuel core determine the loading strategy of *in-core fuel management*. Calculation of *k-eff* is a part of the neutronic core parameter calculation to know the reactor physics characteristic. Generally, The calculation is done using computer code starts from modeling one unit fuel lattice cell, fuel assembly, burnable poison and until core reactor. In this research, the modeling of pin cell and advanced fuel assembly that UO_2 fuel material and 6.5 % enrichment is 17×17 fuel rod of the PWR core type. Calculation of the *k-eff* is done with variation of the fuel volume fraction, fuel pin diameter, fuel enrichment. The calculation is using KENOVI code. The result showed that the value of *k-eff* for pin cell and fuel assembly PWR 17×17 is not different significantly with homogenous and heterogeneous models. The results for fuel volume fraction of 0.5; rod pitch 1.32 cm; fuel enrichment of 6.5 % and fuel pin diameter of 9.6 mm is critical with burn up of 50.0 GWd/t and plutonium

proliferation is lower than safety margin. The advanced fuel assembly can be used in the PWR core to higher the utilization of the core as long as operation.

Keywords : PWR, multiplication factor, fuel assembly, KENOVI

1. PENDAHULUAN

Permasalahan reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir tipe PWR adalah bagaimana caranya untuk meningkatkan nilai fraksi bakar bahan bakar namun tidak menambah jumlah plutonium di dalam bahan bakar hasil iradiasi. Sehingga jumlah plutonium tidak meningkat dengan lamanya bahan bakar di dalam teras reaktor. Untuk meningkatkan utilisasi bahan bakar tetapi dengan mempertimbangkan faktor keamanan dan keselamatan yang paling utama.

Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan pin sel dan perangkat bahan bakar PLTN jenis PWR untuk menghitung harga faktor multiplikasi. Dilihat dari cara perhitungan tampang lintang makroskopik kisi sel bahan bakarnya, maka perangkat bahan bakar tersebut dimodelkan menjadi perangkat bahan bakar homogen. Perhitungan kisi sel bahan bakar sebagai persiapan data tampang lintang makroskopik dilakukan dengan paket program NITAWL, CENTRM dan KENOVI. Program ini merupakan beberapa modul yang ada di program besar SCALE5.1 [1]. Ketiga program perhitungan ini menggunakan metode yang berbeda dan model pin sel serta perangkat bahan bakarnya divariasi. Parameter yang dianalisis adalah harga k-eff pada setiap langkah pembakaran baik kisi sel maupun perangkat bahan bakar dan distribusi faktor daya saat awal siklus. Dari analisis hasil perhitungan diharapkan dapat diketahui karakteristik fisika teras yang terjadi akibat perbedaan pengkayaan dan variasi racun dapat bakar.

2. TEORI

Perhitungan faktor multiplikasi dapat dilakukan dengan persamaan (1) di bawah, bahwa k-inf merupakan perkalian antara 4 faktor atau yang sering disebut dengan *four formula factor* yaitu p : *resonance escape probability*, f : *thermal utilization*, ξ : *fast fission factor*, dan η : *average number of neutron emitted per thermal neutron absorbed in fuel*. Ke-empat faktor tersebut menggambarkan proses perjalanan

Untuk menjawab tantangan di atas maka di desain suatu perangkat bahan bakar maju (*advanced fuel assembly*) yaitu perangkat bahan bakar tipe PRW dengan geometri 17 x17. Perangkat bahan bakar mempunyai pengkayaan 6,5 %. Namun untuk menurunkan reaktivitas lebih teras digunakan racun dapat bakar erbium (Er-167). Pengkayaan bahan bakar divariasi dan jumlah racun dapat bakar juga divariasi di dalam perangkat bahan bakar. Kemudian dianalisis faktor keselamatan dari perangkat bahan bakar tersebut dengan menggunakan perhitungan komputer jumlah neutron sejak dilahirkan hingga terserap kembali oleh suatu material atau hilang.

$$k\text{-inf} = f p \eta \xi \quad (1)$$

Resonance escape probability p adalah probabilitas neutron cepat yang lolos dari serapan U-238 pada daerah energi resonansi saat proses moderasi menjadi neutron thermal. *Thermal utilization* f adalah perbandingan antara jumlah neutron thermal yang terserap bahan bakar atau material dapat belah dengan seluruh neutron thermal yang diserap oleh seluruh material. *Fast fission factor* ξ adalah jumlah neutron yang dihasilkan oleh reaksi fisi pada seluruh daerah energi dibagi dengan jumlah neutron yang dihasilkan melalui reaksi fisi oleh neutron thermal. Sedangkan η adalah perbandingan antara jumlah neutron yang dihasilkan dengan jumlah neutron yang diserap di dalam bahan bakar. Dalam penelitian ini k-eff digunakan sebagai parameter pembanding untuk mengetahui bagaimana pengaruh bentuk pemodelan perangkat bahan bakar PWR secara heterogen dan homogen.

Pada program komputer NITAWL dan CENTRM persamaan transport neutron banyak kelompok seperti di bawah ini diselesaikan untuk memperoleh harga nilai diri regularnya [2].

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot J(r, E, t) + \Sigma_a(r, E) \phi(r, E, t) = \int_0^{\infty} dE' \Sigma_f(E') \phi(r, E', t) + S(r, E, t)$$

2)

dimana:

S= sumber neutron

E= energi

T = waktu

r = posisi

Φ = fluks neutron pada group energi neutron ke g

J = arus neutron

Σ_{tr} = tampang lintang makroskopik transport group g

ν = jumlah neutron dalam fisi

3. METODE PERHITUNGAN

Perhitungan dengan menggunakan modul program NITAWL berdasarkan pada persamaan integral Nordheim. Program NITAWL menyelesaikan persamaan integral transport secara numerik dengan metode *collision probabilities* namun geometrinya sangat sederhana dan terbatas. Metode ini masih dapat digunakan dengan geometri kisi yang sederhana dengan memasukkan faktor Dancoff pada probabilitas kebocoran neutron. Metode integral Nordheim menghasilkan pustaka tampang lintang yang akurat [3].

Program CENTRM (*Continuous Transport Module*) adalah perhitungan satu dimensi dengan menggunakan persamaan transport Boltzmann. Metode perhitungan ini menitik beratkan pada perhitungan fluks neutron angular yang sangat akurat dengan penyederhanaan model yang digunakan yaitu satuan unit sel. Kemudian dengan penggunaan pembobotan spektrum diperoleh konstanta tampang lintang multi group merata. Pada umumnya data tampang lintang pustaka CENTRM pada beberapa kondisi temperatur diinterpolasi dengan metode *pointwise* untuk temperatur yang diinginkan. Sedangkan program KENO-VI adalah perhitungan dengan menggunakan metode Monte Carlo. Tampang lintang dari KENO-VI digunakan untuk perhitungan derajat bakar oleh ORIGEN-S.

4. BATASAN PARAMETER DESAIN NEUTRONIK

Batasan parameter desain neutronik yang dianalisis untuk perangkat bahan bakar teras PWR adalah:[4]

1. Nilai K efektif akhir siklus 1,00020
2. Nilai koefisien reaktivitas Doppler dan moderator negatif
3. Fraksi bakar buang rata-rata 55 GWD/tHM

Tabel 1. Spesifikasi perangkat bahan bakar^[5]

Parameter	Perhitungan (cm)
Tipe bahan bakar UO ₂ pengkayaan (6,5 %)	
Densitas bahan bakar 94% DT	
Material kelongsong stainless steel (HT-9)	
Diameter luar pelet bahan bakar	0,9844
Diameter luar kelongsong	1,1401
Diameter dalam kelongsong	0,9144
Tebal kelongsong	0,0572
Rod pitch	1,3200
Diameter dalam tabung pengarah	1,1227
Diameter luar tabung pengarah	1,2040
Tebal Timbal (Pb)	0,0406
Diameter dalam tabung instrumen	1,1227
Diameter luar tabung instrumen	1,2040
Tebal tabung instrument	0,0406
Panjang aktif bahan bakar	365,76
Susunan perangkat	17x17
Jumlah batang bahan bakar	264
Jumlah tabung pengarah/timbal	24
Jumlah tabung pengarah	1

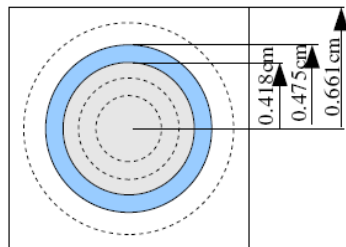
Untuk penelitian ini digunakan data perangkat bahan bakar maju seperti Tabel di atas yang dianalisis keandalannya dengan menggunakan erbium sebagai racun pengotor dapat bakar.

1. Kisi Sel Bahan Bakar & Tabung Pengarah

Gambar 1. menunjukkan satu unit kisi sel bahan bakar penyusun perangkat bahan bakar PWR 17x17. Material kisi sel bahan bakar tersusun dari bahan bakar UO₂, kelongsong Zr-4 dan moderator H₂O. Dalam pemodelannya maka kisi sel bahan bakar dibagi menjadi 8 daerah yang terdiri dari 3 daerah bahan bakar, 1 daerah *void* yang berisi udara, 1 daerah kelongsong dan bagian terluar 3 daerah moderator. Suhu masing-masing material bahan bakar, kelongsong dan moderator diasumsikan sebesar 900K, 600K dan 560K pada saat panas dan masing-masing suhunya 300K pada saat kondisi dingin. Gambar 2. menunjukkan kisi sel tabung pengarah yang terbuat dari Al, bagian dalam dan luar tabung berupa air ringan (H₂O). Ukuran geometri kisi sel bahan bakar dan tabung pengarah pada Tabel 2.

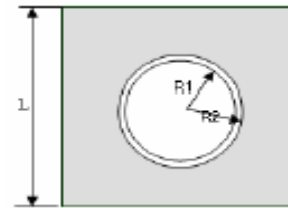
Tabel 2. Ukuran geometri kisi sel bahan bakar dan tabung pengarah ^[6]

Kisi sel bahan bakar		Tabung pengarah	
Bahan bakar	R1 = 0,4095 (cm)	Moderator	R1 = 0,3400 (cm)
Void	R2 = 0,4180 (cm)	Kelongsong	R2 = 0,5400 (cm)
Kelongsong	R3 = 0,4750 (cm)	Moderator	L = 1,3200 (cm)
Moderator	L = 1,3200 (cm)		



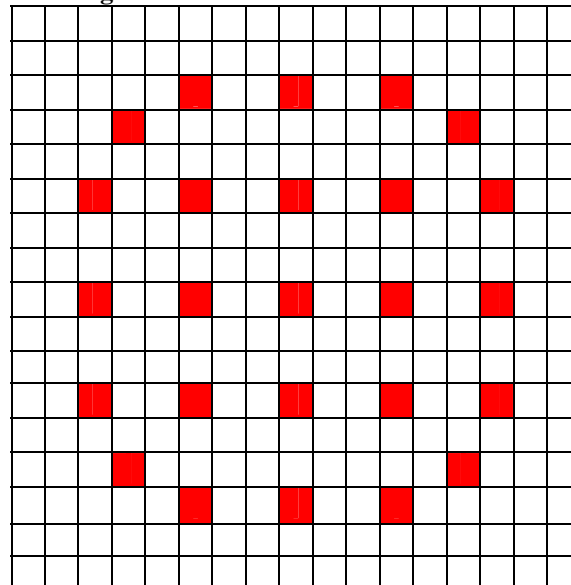
Gambar 1. Sel satuan bahan bakar PWR

Untuk mendapatkan tampang lintang makroskopik, maka perhitungan kisi sel bahan bakar dilakukan melalui dua cara. Pertama, satu unit kisi sel bahan bakar yang terbagi dalam 8 daerah dihomogenisasikan menjadi 4 kelompok tampang lintang yaitu bahan bakar, void, kelongsong dan moderator seperti yang terlihat pada Gambar 1 dan data yang fraksi volum dan rod pitch dapat dilihat Tabel 3 serta data variasi diameter pelet dapat dilihat pada Tabel 4. Beberapa densitas bahan bakar yang digunakan dalam pembuatan input dapat dilihat pada Tabel 5. Kedua, satu unit kisi sel bahan bakar dihomogenisasikan menjadi 1 kelompok tampang lintang. Masing-masing hasil perhitungan tampang lintang makroskopik kisi sel bahan bakar dengan cara diatas digunakan sebagai data inputan perhitungan perangkat bahan bakar yang dimodelkan secara homogen.



Gambar 2. Tabung pengarah terbuat dari Al

Perangkat Bahan Bakar UO₂ PWR 17×17



Gambar 3. Perangkat bahan bakar teras PWR

Gambar 3. menunjukkan perangkat bahan bakar UO₂ PWR 17×17 yang tersusun dari 264 kisi sel bahan bakar dan 25 tabung pengarah. Di dalam gambar tersebut tabung pengarah ditunjukkan dengan lingkaran yang diarsir berwarna abu-abu. Bentuk perangkat bahan bakar PWR berupa bujur sangkar simetris 90° dengan ukuran 21,42cm × 21,42cm. Posisi *pin rod* setiap ¼ perangkat bahan bakar membentuk sudut simetris 45°. Sehingga dalam pembuatan input data, maka penomoran material untuk *sub-region* (daerah) hanya setengah dari seluruh bagian yang ada. Dalam penelitian ini perangkat bahan bakar tersebut dimodelkan secara heterogen seperti pada Gambar 3. Cara pembuatan *sub region* sebagai inputan dalam perhitungan k-eff dengan KENOVI akan dijelaskan di bawah ini [6].

Pemodelan Secara Homogen

Pemodelan secara homogen dilakukan pembagian $\frac{1}{4}$ perangkat bahan bakar menjadi 18 baris ke arah x dan 18 baris ke arah y. Sedangkan satu unit kisi sel bahan bakar menjadi 1 daerah yang homogen. Sedangkan pemodelan tabung pengarah sama dengan di atas. Sehingga jumlah seluruh daerah untuk $\frac{1}{4}$ perangkat bahan bakar homogen adalah sebanyak 342. Penomoran untuk setiap daerah dilakukan seperti terlihat pada Gambar 7 yaitu homogenisasi kisi sel bahan bakar UO_2 no.1 ~ no.39, moderator (H_2O) no.40 ~ no.64, air di dalam tabung pengarah no.65 ~ no.71, dan kelongsong tabung pengarah no.72~77. Kalau dilihat dari jumlah dan cara penomoran masing-masing daerah perangkat bahan bakar, maka pemodelan secara homogen lebih mudah dan sederhana dibandingkan dengan pemodelan heterogen. Perhitungan kisi sel bahan bakar dilakukan dengan NITAWL dan CENTRM untuk mendapatkan data tampang lintang yang akan tersimpan dalam suatu file. Perhitungan tersebut menggunakan data tampang lintang ENDF-V, dan dari 107 group energi yang ada dipadatkan menjadi 3 kelompok energi. Selanjutnya data tampang lintang tersebut digunakan dalam perhitungan k-inf perangkat bahan bakar PWR 17×17 . Perhitungan perangkat bahan bakar menggunakan KENOVI merupakan perhitungan 2 dimensi dengan metode difusi, data yang akan diperoleh adalah berupa harga k-eff setiap langkah pembakaran, faktor puncak daya untuk setiap tempat kisi sel bahan bakar dan parameter lainnya.

Tabel 3. Pemodelan pin sel bahan bakar UO_2

Model	Fraksi volum UO_2	Tipe	Rod Pitch (cm)
1	0,6	Lingkaran	1,32
2	0,5	lingkaran	1,32
3	0,4	Lingkarang	1,32
4	0,5	persegi	1,32
5	0,4	persegi	1,32

Tabel 4. Variasi pemodelan bahan bakar UO_2

Variasi	Diameter pelet	Pengayaan U-235 (% wt)	Konsentrasi Boron (ppm)
A	0,96	6,50 (Maju)	1100
B	0,96	6,50 (Maju)	550
C	0,92	4,10	1100
D	0,92	4,10	5500
E	0,86	3,70 (kompensional)	1100
F	0,86	3,70 (kompensional)	550

Tabel 5. Densitas atom perangkat bakar maju tipe PWR

Data identifikasi bahan bakar	Densitas bahan bakar (atom/cm ³)
8016	4.63586E-02
92235	4.50785E-05
92238	2.22106E-02
Data identifikasi kelongsong	Densitas kelongsong Zr-4
26000	3.47236E-04
40000	4.16270E-02
50000	5.19451E-04
Data identifikasi Pendingin	Densitas pendingin Suhu 300 K 0 PPM
1001	6.68896E-02
8016	3.34448E-02
Data identifikasi pendingin	Suhu 300K (550 ppm)
1001	6.68528E-02
5010	6.09647E-06
5011	2.45405E-05
8016	3.34264E-02
Data identifikasi pendingin	Suhu (560K 1100 ppm)
1001	4.87423E-02
5010	8.89475E-06
5011	4.48046E-05
8016	3.58046E-05
Data identifikasi pendingin	Suhu (300K 1200 PPM)
1001	4.87374E-02
5010	1.33014E-05
5011	3.90596E-05
8016	3.34047E-02

5. HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan perubahan k-inf kisi sel bahan bakar terhadap fraksi bakar ditunjukkan pada Tabel 6. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa besarnya harga k-inf menunjukkan harga nilai k-inf berkurang dengan semakin tingginya fraksi bakar untuk satu unit kisi sel bahan bakar yang pengkayaannya 6,5 %. Karena proses dalam perhitungan tampang lintang makroskopik melalui homogenisasi menjadi 3 kelompok tampang lintang makroskopik maupun 7 kelompok tampang lintang makroskopik tidak mengalami perbedaan yang berarti, sehingga untuk perhitungan ke tingkat berikutnya yaitu perhitungan perangkat bahan bakar PWR diharapkan tidak akan mempengaruhi hasil perhitungan-nya. Dengan kata lain, bahwa jika terjadi perbedaan hasil perhitungan perangkat bahan bakar, maka perbedaan tersebut semata-mata hanya disebabkan oleh cara pemodelannya. Besarnya harga k-inf kisi sel bahan bakar saat awal siklus adalah 1,48670. Hal tersebut menunjukkan bahwa kisi sel bahan bakar PWR mempunyai sifat superkritis yang berarti bahwa jumlah neutron pada suatu generasi akan bertambah banyak jika dibandingkan dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui bahwa semakin tinggi fraksi bakar maka harga k-inf kisi akan semakin berkurang. Sehingga setelah melampaui pembakaran 60,0 GWd/t atau 60 % hilangnya ²³⁵U, maka harga k-inf mencapai angka dibawah 1 atau subkritis.

Tabel 6. Nilai k-inf hasil perhitungan sel CENTRM

Langkah	Derajat bakar (GWd/t)	K-inf	k-inf (Er ₂ O ₃ 4,2 %)
1	0.00	1.48670	1.12378
2	10.00	1.27888	1.11120
3	15.00	1.22273	1.10923
4	25.00	1.14699	1.10820
5	30.00	1.10539	1.10928
6	35.00	1.09974	1.09671
7	40.00	1.09704	1.09072
8	50.00	1.00549	1.08701
9	52.50	0.94865	1.07091
10	55.00	0.92907	1.06050
11	60.00	0.90457	1.00534
12	65.00	0.89064	1.00304

Dari Tabel 6 dapat juga dilihat bahwa nilai k-inf untuk bahan bakar yang diberi racun dapat bakar Er₂O₃ sebesar 4,2 %, maka nilai derajat bakarnya dapat ditingkatkan dan nilai k-inf relatif datar selama 12 kali step pembakaran. Hal ini juga menunjukkan bahwa nilai reaktivitas lebihnya pada awal teras sangat kecil dibandingkan bahan bakar yang tidak ada racun dapat bakarnya dan setiap step pembakaran relatif stabil.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa hasil perhitungan perubahan harga k-inf perangkat bahan bakar PWR 17×17 yang dimodelkan secara homogen terhadap fraksi bakar-nya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa besarnya harga k-inf saat awal siklus adalah 1,4870 untuk akhir siklus adalah 1,00549. Seperti yang terlihat pada Gambar 3. diatas bahwa perangkat bahan bakar 17×17 PWR tersusun dari 264 kisi sel bahan bakar dan 25 kisi sel tabung pengarah. Hal tersebut menunjukkan bahwa harga k-inf suatu medium tergantung dari perbandingan material-material penyusunnya. Sehingga penggantian 25 kisi sel bahan bakar dalam susunan perangkat bahan bakar dengan tabung pengarah yang berupa material penyerap (H₂O+Al) mengakibatkan harga k-inf yang sedikit lebih besar. Penyebabnya diperkirakan karena jumlah neutron cepat yang berubah menjadi neutron termal menjadi semakin banyak karena proses moderasi neutron yang semakin besar.

Dari Tabel 7 juga menunjukkan bahwa kisi sel bahan bakar PWR bersifat *under*

moderated yang berarti bahwa semakin besar perbandingan volume moderator dengan volume bahan bakar-nya (V_m/V_f), maka harga k -eff akan semakin besar. Kisi sel bahan bakar tersebut mempunyai harga V_m/V_f yang bervariasi case 1, $V_m/V_f = 0,6$ case 2, $V_m/V_f = 0,5$ dan case 3 V_m/V_f sebesar $0,5$. namun dalam analisis selanjutnya pada perangkat bahan bakar maju digunakan $V_m/V_f = 0,5$.

Tabel 7. Hasil perhitungan kisi sel

Case	KENOVI k-eff
1a	1,0059 ± 0,0011
1b	1,0964 ± 0,0012
1c	0,9852 ± 0,0012
1d	1,0673 ± 0,0012
1e	0,9798 ± 0,0011
1f	1,0573 ± 0,0012
2a	0,9986 ± 0,0012
2b	1,1297 ± 0,0012
2c	0,9763 ± 0,0012
2d	1,0972 ± 0,0012
2e	0,9684 ± 0,0012
2f	1,0892 ± 0,0012
3a	0,9421 ± 0,0011
3b	1,1270 ± 0,0011
3c	0,9184 ± 0,0011
3d	1,0940 ± 0,0012
3e	0,9147 ± 0,0011
3f	1,0798 ± 0,0012

Meskipun hasil perhitungan k -inf perangkat bahan bakar yang dimodelkan secara heterogen dan homogen tidak mengalami perbedaan yang signifikan, tetapi dalam pemodelannya perhitungan perangkat bahan bakar 17×17 PWR secara homogen lebih mudah dan sederhana dibandingkan pemodelan secara heterogen. Pemodelan secara heterogen memerlukan banyak nomor sub-region sehingga pengerjaannya diperlukan ketelitian dan kecermatan sehingga memakan waktu yang lebih lama dan kemungkinan terdapat kesalahan dalam penomoran akan lebih besar.

Tabel 8 Koefisien reaktivitas perangkat bahan bakar maju tipe PWR

Karakteristik	BOC (0 GWd/t)	EOC (50GWd/t)
Koeffisien suhu moderator (pcm/K)	-86,1	- 109,7
Koefisien Doppler (pcm/K)	- 11,2	- 28,7

Nilai koefisien reaktivitas perangkat bahan bakar, baik koefisien reaktivitas suhu moderator maupun Doppler dapat dilihat pada Tabel 8. Nilai koefisien reaktivitas diperoleh nilainya negatif sehingga umpan balik reaktivitas negatif dan merupakan faktor keselamatan yang paling penting pada operasi reaktor. Semakin besar derajat bakar perangkat bakar maka nilai koefisien reaktivitasnya semakin besar dalam negatifnya. Efek Doppler adalah peristiwa pelebaran puncak energi neutron resonansi, yaitu neutron dengan bentuk kurva tampang lintan serapan mikroskopik dari U-238. Pelebaran ini terjadi akibat meningkatnya suhu bahan bakar selama reaksi fisi terjadi. Seperti diketahui tampang lintang reaksi yang cukup tinggi U-238 sehingga pelebaran dari puncak neutron resonansi akan meningkat serapan neutron oleh U-238 akan mengakibatkan berkurangnya jumlah neutron termal yang diserap oleh U-235 sehingga nilai k -eff menjadi berkurang.

Adapun pengaruh peningkatan temperatur terhadap melebarnya puncak neutron resonansi adalah karena gerakan termal dari inti target yang meningkatkan probabilitas penyerapan neutron. Inti target beresilasi terhadap posisi normalnya akibat peningkatan temperatur, sehingga pelebaran puncak resonansi akan menyebabkan perubahan reaktivitas bahan bakar. Seperti diketahui bahwa proses inti menghasilkan neutron berenergi tinggi yang kemudian dimoderasi melalui tumbukan dengan partikel moderator dan neutron akan mengalami pengurangan energi secara bertahap. Pada saat neutron tersebut mencapai nilai interval energi resonansi maka probabilitas terserapnya neutron oleh inti U-238 akan sangat besar, sementara hal sebaliknya berlaku bagi inti U-235. Peristiwa ini mendorong terjadinya penurunan reaktivitas sehingga nilai koefisien reaktivitas turun.

Tabel 9. Hasil perhitungan perangkat bahan bakar konvensional

Siklus	Waktu (Hari)	Daya (MW)	Derajat Bakar (MWd)	Fluks Rerata (n/cm2s)	k-eff
1	100	22,72	2272	$4,16 \times 10^{13}$	1,18607
2	115	18,50	4399	$3,25 \times 10^{13}$	1,10196
3	115	18,50	6526	$3,19 \times 10^{13}$	1,01347
4	150	15,58	8862	$2,67 \times 10^{13}$	1,00543
5	150	15,58	11199	$2,67 \times 10^{13}$	0,97716

Tabel 10. Hasil perhitungan perangkat bahan bakar maju

Siklus	Waktu (Hari)	Daya (MW)	Derajat bakar (MWd)	Fluks rerata (n/cm2s)	k-eff
1	100	42,28	4228	$4,60 \times 10^{13}$	1,18756
2	115	56,08	10677	$5,03 \times 10^{13}$	1,10245
3	115	56,08	17126	$5,03 \times 10^{13}$	1,01457
4	150	62,43	26491	$5,91 \times 10^{13}$	1,00657
5	150	62,43	35856	$5,91 \times 10^{13}$	0,99984

Hasil perhitungan perangkat bahan bakar konvensional dapat dilihat pada Tabel 9. Perangkat bahan bakar ini dibakar dalam step waktu seperti dalam Tabel 9. selama 11.199 MWd/tU. Jika dibandingkan dengan Tabel 10 yang merupakan perangkat bakar maju maka dapat dihasilkan 3 kali peningkatan MWd-nya dengan step waktu yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa perangkat bahan bakar maju dapat digunakan jauh lebih baik dari perangkat bahan bakar konvensional.

Tabel 11. menunjukkan bahwa hasil perhitungan yang diperoleh adalah isotop Pu-238 hanya meningkat 8 %. Jika dibandingkan dengan persyaratan yang berlaku tidak boleh melebihi 60 % yang merupakan perjanjian (NPT=*nuclear non proliferation*) atau melanggar kriteria *weapon grade*. Hal ini sangat jauh dibawah standar plutonium yang diijinkan selama pembakaran dalam teras reator PWR. Dalam analisis ini hanya Pu-238 yang ditinjau karena Pu yang lain mempunyai umur paro yang singkat hanya sekitar 21 hari.

Tabel 11. Hasil perhitungan jumlah Pu dalam perangkat bahan bakar.

Derajat bakar EOC 33 GWd/tU			Derajat bakar EOC 50 GWd/tU	
Isotop	Kg/tU	%	Kg/tU	%
U-235	8,2	0,9	51,7	6,2
U-236	3,6	0,3	23,8	3,4
U-238	942,6	98,8	748,5	90,4
Total	954,4	100	828,5	100
Np-27	0,4	100	2,7	100
Pu-238	0,2	1,4	1,5	8,3
Pu-239	6,5	61,0	9,0	58,0
Pu-240	2,3	21,6	3,4	18,9
Pu-241	1,2	11,3	2,8	15,6
Pu-242	0,5	4,7	1,3	7,2
Total	10,7	100	18	100

6. KESIMPULAN

Nilai perhitungan dengan menggunakan program CENTRM menunjukkan hasil yang sangat baik untuk model yang sangat luas dan bervariasi jika dibandingkan dengan KENOVI, sedang program NITAWL juga menghasilkan nilai k-eff yang baik sepanjang batasnya tidak dilewati. Sehingga program ini dapat digunakan untuk menghitung karakteristik fisika teras reaktor PWR berbahan bakar UO_2 . Karakteristik perangkat bahan bakar maju bersifat *undermoderated* pada fraksi volum bahan bakar 0,5, diameter pin bahan bakar 9,6 mm dan pengkayaan 6,5 % dan rod pitchnya 1,32 cm. Pada kondisi ini nilai derajat bakar sel teras PWR yang dimodelkan dapat dibakar mencapai 50,0 GWD/t karena nilai k-infnya akhir siklus mencapai 1,00594. Jika derajat bakar ingin ditingkatkan lagi maka geometri, konfigurasi dan kondisi pin sel di dalam perangkat bakar diubah misalnya dengan meningkatkan pengkayaan U-235 pada bahan bakar UO_2 , dan dianalisis lagi faktor keselamatannya, namun hingga kini ijin pengkayaan bahan bakar masih dibatasi hingga 5%. Nilai k-eff perangkat bahan bakar meningkat dengan pengayaan bahan bakar dan cenderung turun dengan adanya boron dan pada kondisi hot nilai k-eff turun. Nilai k-eff cold tanpa boron adalah $1,20067 \pm 0,00132$ untuk pengkayaan 6,5 % cukup untuk dibakar hingga 50 GWD/t selama 21 bulan operasi.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. *SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations*, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols. I–III, Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-732, November 2006
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. WOOD, JAMES, *Computational Methods in Reactor Shielding*, Pergamon Press Ltd, New York, 1982.
5. LAMARSH, JOHN R. *Nuclear Reactor Theory*, Addison Wesley Publ. Co, Massachusetts, 1966
6. JAEGER, R.G, BLIZARD, E.P., *Engineering Compendium on Radiation Shielding*, Vol. 1, Springer-Verlag, New York, New York, 1975

TANYA JAWAB