

ANALISIS PARAMETER KINETIKA SEBAGAI FUNGSI FRAKSI BAKAR TERAS AP1000

Jati Susilo, Lily Suparlina
Staf Bidang Fisika Dan Teknologi Reaktor – PTRKN
shushilo@batan.go.id, lilyrsg@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS PARAMETER KINETIKA SEBAGAI FUNGSI FRAKSI BAKAR TERAS AP1000. Sampai saat ini, perkembangan desain reaktor jenis PWR telah mencapai Generasi III+, diantaranya AP1000. Teras AP1000 dapat menghasilkan daya listrik sekitar 1154 MWe dan panjang siklus sekitar 18 bulan. Dalam rangka evaluasi parameter keselamatan nuklir teras AP1000, maka dilakukan analisis parameter kinetika teras sebagai fungsi fraksi bakar kondisi daya penuh selama satu siklus operasi dari awal siklus (BOC) hingga akhir siklus (EOC). Nilai parameter kinetika diperoleh dari perhitungan teras siklus pertama AP1000 bentuk geometri 3 dimensi dengan paket program SRAC modul CITATION melalui pemodelan $\frac{1}{4}$ bagian. Data tampang lintang makroskopik bahan bakar diperoleh dari perhitungan menggunakan modul PIJ melalui kondensasi kelompok energi dari 107 menjadi 10. Data tampang lintang diambil dari pustaka data nuklir JENDL-3.3. Perbandingan hasil perhitungan umur neutron serempak (ℓ) dan fraksi neutron kasip (β_{eff}) teras menggunakan paket program SRAC modul CITATION dengan nilai referensi menunjukkan perbedaan masing-masing sebesar 5,25 % dan 5,01 %. Karena perbedaan hasil tidak signifikan maka perhitungan pada control document AP1000 dapat diterima. Nilai minimum β_{eff} yang dihasilkan oleh teras AP1000 sepanjang siklus operasi pertama adalah 0,00510482 atau masih diatas nilai batas keselamatan yang ditentukan 0,0044. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dari segi kinetika teras, siklus operasi pertama teras AP1000 dari BOC sampai dengan EOC dapat dioperasikan secara aman.

Kata Kunci: AP1000, Parameter Kinetika, SRAC-CITATION, Fraksi Bakar

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE AP1000 CORE KINETICS PARAMETER AS A FUNCTION BURN-UP FRACTION. Until now, the development progress of reactor design for pressurized water reactor (PWR) type has reached a Generation III+, including AP1000. The AP1000 core can produce for about 1154 MW of electrical power with 18 months cycle length. In order to evaluate the nuclear safety parameters of AP1000 core, then the analysis of the core kinetic parameter as a function of burn-up fraction at full power condition operation from the beginning of cycle (BOC) to the end of cycle (EOC) was carried out. The kinetic parameter values obtained from the first core of AP1000 calculation using CITATION module of the SRAC code with 3-dimensional geometry modeling of $\frac{1}{4}$ part section of the core. Macroscopic cross-sections data for fuel lattice cell and fuel assembly are calculated using PIJ module by condensing the neutron energy group data from 107 into 10 groups. JENDL.3.3 is used as data library cross-sections. The comparison of prompt neutron lifetime (ℓ) and delayed neutron fraction (β_{eff}) values calculated using static code SRAC-CITATION to the reference value shows that the differences are 5.25% and 5.01%, respectively. Because no significant differences in the results, then the calculation of the control document AP1000 is acceptable. The minimum value of β_{eff} generated along the first cycle operation of AP1000 is 0.00510482 which is above safety limits value 0.0044. It can be concluded that in terms of the core kinetics, the first cycle of AP1000 from BOC to EOC is safe.

Keywords: AP1000, Kinetic Parameter, SRAC-CITATION, Burn-Up

PENDAHULUAN

Sejak dimanfaatkannya energi nuklir sebagai pembangkit listrik, desain reaktor telah mengalami berbagai pengembangan. Sehingga sampai saat ini dari jenis *pressurized water reactor* (PWR) telah mencapai desain Generasi III+ yang salah satunya adalah reaktor AP1000[1]. Teras reaktor AP1000 didesain oleh Westinghouse berbasis pada performa PWR yang telah *proven*. Reaktor dengan daya listrik sebesar 1154 MWe tersebut mempunyai panjang siklus sekitar 18 bulan (540 hari) dan dapat dioperasikan hingga 60 tahun. Seperti halnya reaktor PWR pada umumnya, agar reaktor beroperasi

secara aman, maka desain teras AP1000 juga mempunyai batasan-batasan keselamatan yang telah ditentukan.

Dalam rangka evaluasi desain keselamatan teras AP1000, maka perlu dilakukan analisis berbagai parameter nuklir melalui perhitungan menggunakan paket program komputer yang telah tervalidasi. Salah satu parameter nuklir tersebut adalah nilai parameter kinetika teras. Parameter kinetika yang dimaksud antara lain: umur neutron serempak (*prompt neutron lifetime, ℓ*), waktu generasi neutron serempak (*prompt neutron generation time, Λ*), fraksi neutron kasip (*delayed neutron fraction, β_{eff}*), dan konstanta peluruhan neutron kasip (*delayed neutron decay constants, λ_i*). Batasan keselamatan nilai fraksi neutron kasip (β_{eff}) yang telah ditentukan dalam *design control document* siklus operasi pertama teras AP1000 adalah 0,0044[2].

Oleh peneliti sebelumnya perhitungan parameter kinetika teras AP1000 telah dilakukan terhadap beberapa kondisi teras yaitu: daya nol dingin (*cold zero power, CZP*) dan daya nol panas (*hot zero power, HZP*)[3]. Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan parameter kinetika teras AP1000 pada kondisi daya penuh (*full power, FP*) sebagai fungsi fraksi bakar. Perhitungan teras AP1000 tersebut dilakukan dengan menggunakan paket program SRAC[4] modul CITATION dalam bentuk geometri 3 dimensi. Paket program tersebut telah tervalidasi dengan baik untuk perhitungan parameter neutronik teras RSG-GAS[5] dan kekritisan teras AP1000[6]. Sebagai salah satu *input* perhitungan teras yang berupa tabel tampang lintang makroskopik bahan bakar sebagai fungsi fraksi bakar diperoleh dari perhitungan dengan modul PIJ melalui kondensasi 107 kelompok energi neutron menjadi 10. Data tampang lintang diambil dari pustaka data nuklir JENDL-3.3. Dari analisis hasil perhitungan diharapkan diketahui karakteristik parameter kinetika selama siklus operasi pertama teras AP1000 dari awal siklus hingga akhir siklus.

METODOLOGI

Parameter Kinetika Teras

Di dalam teras reaktor, reaksi fisi terjadi akibat penyerapan neutron oleh ^{235}U yang disertai dengan dihasilkannya neutron baru dan nuklida-nuklida hasil fisi (*fission product*). Neutron baru yang dihasilkan tersebut dibedakan menjadi dua yaitu neutron serempak dan neutron kasip. Neutron serempak adalah neutron yang dihasilkan secara langsung dari reaksi fisi. Sedangkan neutron kasip adalah neutron yang dihasilkan dalam waktu belakangan sesaat setelah terjadinya reaksi fisi yang berasal dari peluruhan nuklida hasil fisi. Neutron kasip sangat berperan dalam kendali perubahan daya teras reaktor akibat terjadinya perubahan reaktivitas teras. Berdasarkan waktu paruhnya, nuklida-nuklida hasil fisi penghasil neutron kasip dikelompokkan menjadi 6 *group*.

Karakteristik neutron hasil reaksi fisi ditunjukkan dalam beberapa parameter kinetika teras[7] seperti berikut ini.

Umur neutron serempak, ℓ adalah waktu sejak dihasilkannya neutron sampai dengan hilangnya neutron tersebut akibat reaksi serapan atau bocor. Besarnya neutron serempak ℓ setara dengan waktu rerata difusi (t_d) dan berbanding terbalik dengan kecepatan neutron (v_T), tampang lintang makroskopik bahan bakar (Σ_{aF}) dan moderator (Σ_{aM}) seperti ditunjukkan pada persamaan (1) berikut ini[8].

$$\ell \cong t_d = \frac{\sqrt{\pi}}{2v_T (\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM})} \quad (1)$$

- Waktu generasi neutron serempak, Λ adalah waktu yang diperlukan oleh neutron sejak dilahirkan dari suatu reaksi fisi sampai dengan terjadinya reaksi fisi berikutnya.
- Fraksi neutron kasip, β_{eff} . Dari seluruh populasi neutron di dalam teras sekitar 99% merupakan neutron serempak dan sisanya adalah neutron kasip.
- Konstanta peluruhan neutron kasip, λ_{eff} .

Perhitungan Parameter Kinetika Teras

Langkah perhitungan parameter kinetika pada siklus operasi pertama teras AP1000 dengan paket program SRAC modul CITATION adalah sebagai berikut;

1. Kisi sel bahan bakar

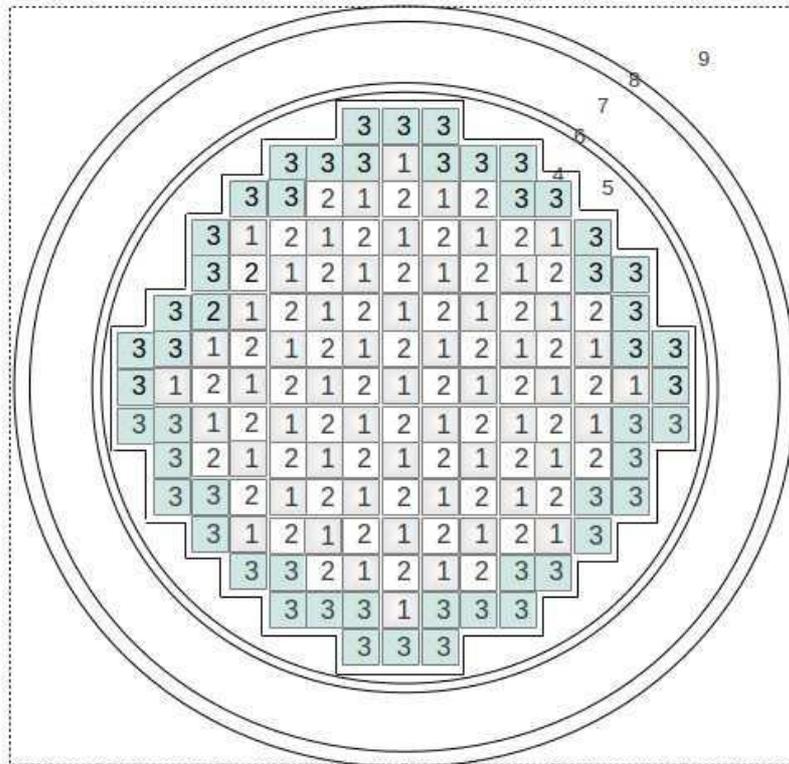
Perhitungan tampang lintang makroskopik kisi sel bahan bakar dilakukan dengan paket program SRAC modul PIJ. Sebagai *input* perhitungan adalah densitas atom material penyusun dan ukuran dimensi kisi sel bahan bakar. Kisi sel bahan bakar pada teras reaktor PWR AP1000 berbentuk bujur sangkar dengan ukuran 1,25984 cm x 1,25984 cm. Kisi sel bahan bakar dibedakan menjadi dua yaitu kisi sel standar dan kisi sel IFBA. Kisi sel standar tersusun dari pelet UO_2 (pengkayaan 2,35 %, 3,40 % dan 4,50 %) dengan jari-jari 0,409575 cm, celah (*gab*) 0,426085 cm, kelongsong ZIRLO 0,483235 cm dan bagian terluar adalah moderator H_2O . Sedangkan kisi sel IFBA, sama dengan kisi sel standar hanya saja pada pelet UO_2 terdapat lapisan ZrB_2 dengan kandungan B_{10} sebanyak 0,772 mg/cm. Komposisi kelongsong ZIRLO adalah Zr 97,85 %, Fe 0,15 %, Sn 1,0 %, dan Nb 1 %. Sebagai *output* hasil perhitungan adalah tabel tampang lintang makroskopik detail 107 kelompok energi yang tersimpan dalam direktori MACROWRK.

2. Perangkat Bahan Bakar

Perhitungan tampang lintang makroskopik perangkat bahan bakar juga dilakukan menggunakan modul PIJ dengan kondensasi kelompok energi dari 107 menjadi 10. Perhitungan dilakukan dengan cara pemodelan $\frac{1}{4}$ bagian karena bentuk geometri yang simetris. Input yang digunakan adalah tabel tampang lintang kisi sel bahan bakar hasil perhitungan sebelumnya dan ukuran dimensi serta densitas material penyusun lainnya. Perangkat bahan bakar AP1000 mempunyai ukuran 21,50364 cm \times 21,50364 cm yang tersusun dari 264 bahan bakar (bentuk 17 \times 17), 25 tabung pengarah, dan moderator air ringan H_2O . Berdasarkan jumlah batang bahan bakar IFBA-nya, maka perangkat bahan bakar dibedakan menjadi perangkat bahan bakar standar (tanpa IFBA), perangkat bahan bakar dengan 28 IFBA, 44 IFBA, 72 IFBA, 112 IFBA dan 88 IFBA. Sebagai *output* hasil perhitungan adalah tabel tampang lintang makroskopik 10 kelompok energi yang tersimpan dalam direktori MACRO.

3. Teras Reaktor

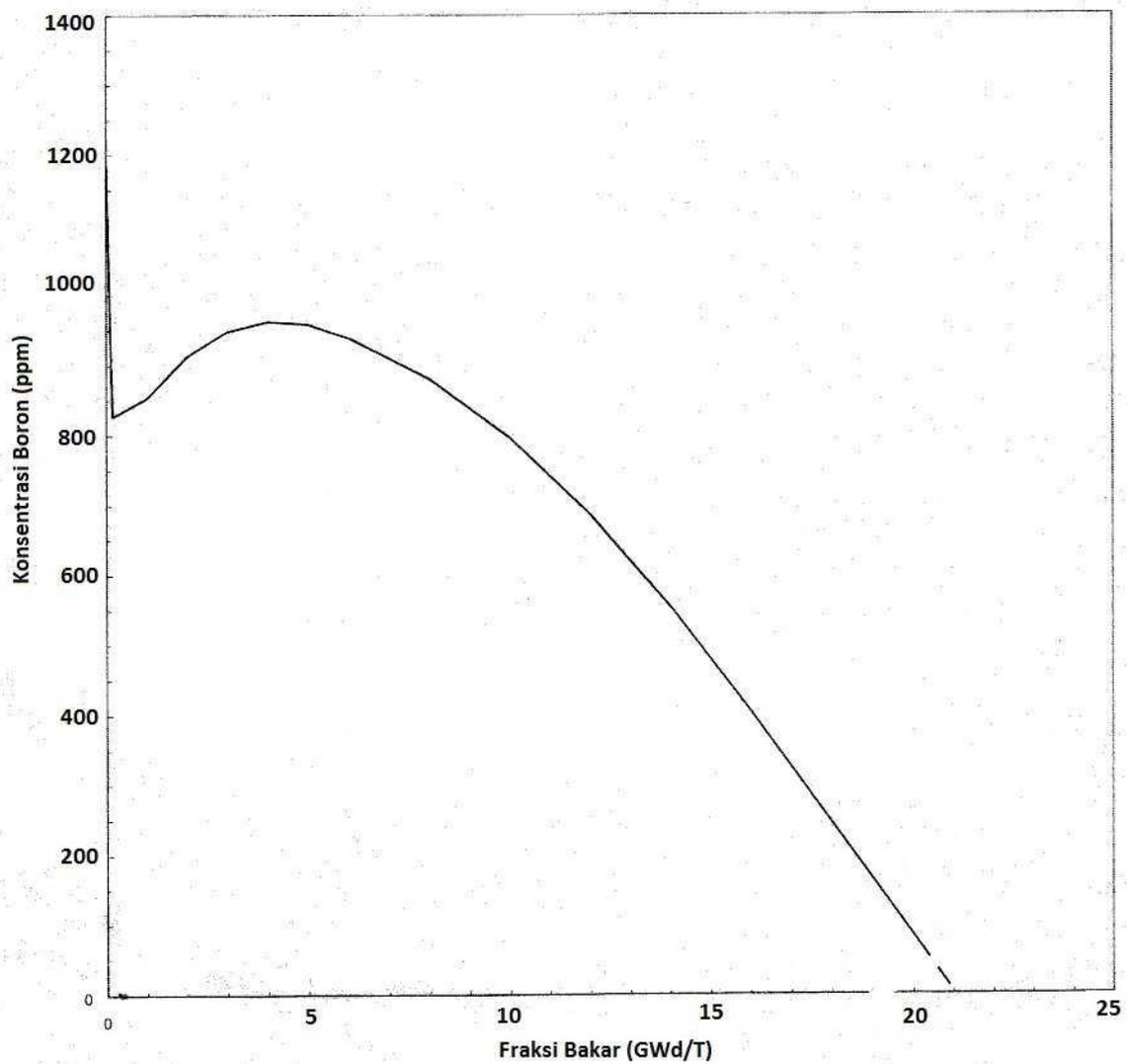
Gambar 1 menunjukkan penampang teras reaktor AP1000 bentuk geometri 2 dimensi yang dipandang dari atas. Teras AP1000 tersusun dari perangkat bahan bakar *region* 1, 2 dan 3. Kemudian nomor 4 adalah *baffle reactor*, nomor 5 dan 7 adalah pendingin yang berupa air ringan H_2O , nomor 6 *barrel reactor*, nomor 8 bejana reaktor, dan nomor 9 udara. Ukuran/dimensi dan material penyusun teras tersebut adalah *baffle* reaktor material SS304, *barrel* reaktor d_{in}/d_{out} 339,725 cm / 349,885 cm material S304 dan bejana reaktor d_{in}/d_{out} 398,8 cm / 420,1 cm material SS304.



Keterangan ; no.1,2 dan 3 = perangkat bahan bakar 1, 2 dan 3, no.4 = baffle,
no.5 = pendingin, no.6 = barrel, no.7 = pendingin, no.8 = bejana reaktor dan no.9 = udara.

Gambar 1. Teras AP1000 dalam bentuk geometri 2 dimensi dipandang dari atas

Perhitungan terhadap $\frac{1}{4}$ bagian teras bentuk geometri 3 dimensi dilakukan dengan menggunakan paket program SRAC modul CITATION. Perhitungan parameter kinetika teras tersebut dilakukan dalam kondisi teras daya penuh. Untuk melakukan perhitungan parameter kinetika teras AP1000 dari awal siklus (BOC) hingga akhir siklus (EOC), sebagai salah satu *input* yaitu besarnya konsentrasi boron dalam moderator disesuaikan dengan nilai referensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan gambar tersebut, maka dalam penelitian ini perhitungan teras dilakukan dalam 7 tingkat fraksi bakar dengan besarnya fraksi bakar dan konsentrasi boron seperti ditunjukkan pada Tabel 1. *Output* perhitungan teras yang diperoleh adalah nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), umur neutron serempak (ℓ), waktu generasi neutron serempak (Λ), faksi neutron kasip (β_{eff}) dan konstanta peluruhan neutron kasip (λ_{eff}), serta faksi neutron kasip tiap *group* ($\beta_{eff}(i)$) dan konstanta peluruhan neutron kasip tiap *group* ($\lambda_{eff}(i)$), untuk setiap fraksi bakar.



Gambar 2. Besarnya konsentrasi boron untuk tiap fraksi bakar teras AP1000[2]

Tabel 1. Besarnya konsentrasi boron (ppm) untuk tiap fraksi bakar teras AP1000

No.	Fraksi bakar (GWd/T)	Konsentrasi boron (ppm)
1.	0	1184
2.	0,001	827
3.	5,0	955
4.	10,0	800
5.	15,0	477
6.	20,0	100
7.	21,0	10

HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff})

Hasil perhitungan nilai k_{eff} setiap fraksi bakar teras AP1000 ditunjukkan pada Tabel 2. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa nilai k_{eff} sepanjang siklus operasi tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, karena nilai k_{eff} tersebut sepanjang siklus operasi dijaga agar sekitar 1,000000 atau teras reaktor dalam kondisi kritis dengan cara mengatur konsentrasi boron dalam moderator sesuai dengan nilai yang terdapat pada Tabel 1.

Tabel 2. Nilai k_{eff} teras AP1000 tiap fraksi bakar

No.	Fraksi bakar (GWd/T)	Faktor multiplikasi efektif (k-eff)
1.	0	1,014954
2.	0,001	1,009613
3.	5,0	0,9804442
4.	10,0	0,9808008
5.	15,0	0,9941173
6.	20,0	0,9923446
7.	21,0	0,9984286

Neutron Serempak

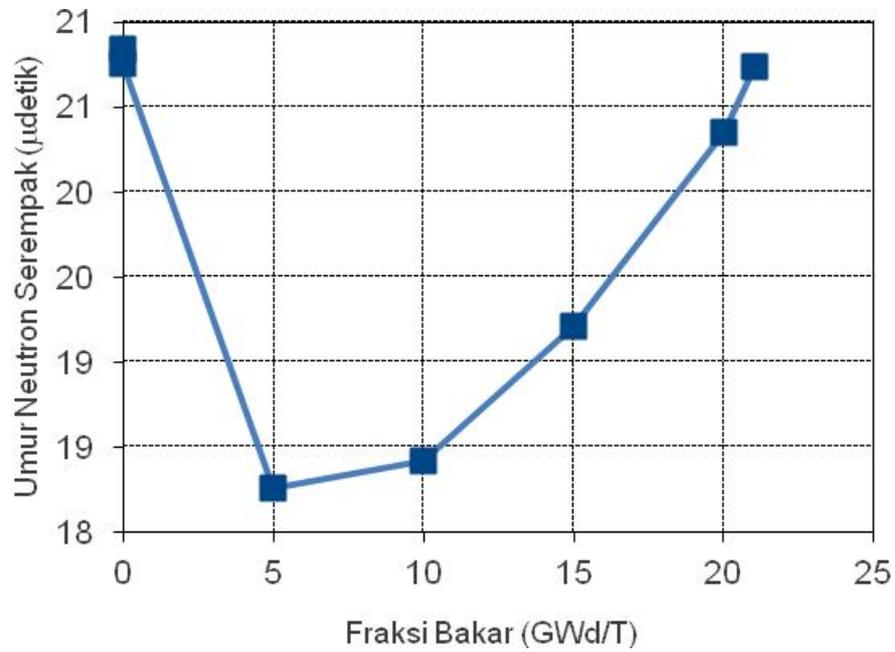
Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan umur neutron serempak antara nilai yang tercantum dalam referensi dan hasil perhitungan dengan SRAC modul CITATION. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa terjadi perbedaan nilai sebesar 5,25%. Sehingga dapat dikatakan bahwa perhitungan parameter kinetika teras menggunakan paket program SRAC-CITATION tersebut menunjukkan hasil yang cukup baik.

Tabel 3. Perbandingan hasil perhitungan umur neutron serempak (ℓ) dan waktu generasi neutron serempak (Λ) pada teras AP1000

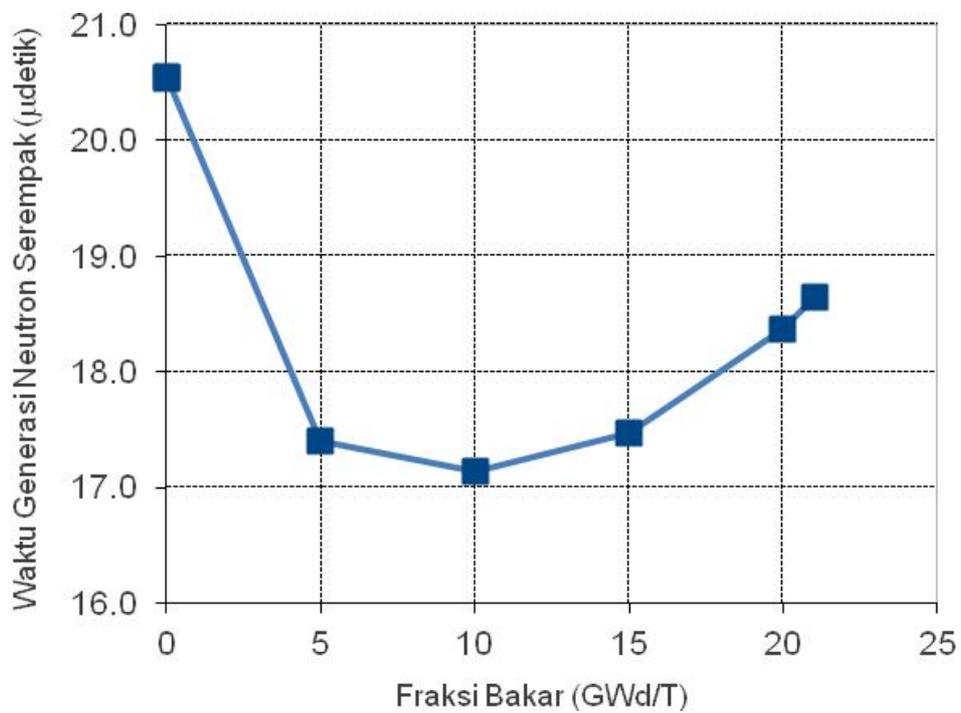
Umur neutron serempak, ℓ (μ detik)			Waktu generasi neutron serempak, Λ (μ detik)		
Referensi[2]	Perhitungan	Perbedaan	Referensi	Perhitungan	Perbedaan
19,8	20,8403	5,25%	-	20,5332	-

Gambar 3 dan 4 masing-masing menunjukkan perubahan nilai umur neutron serempak dan waktu generasi neutron serempak terhadap fungsi fraksi bakar. Dari kedua gambar tersebut dapat diketahui bahwa karakteristik umur neutron serempak dan waktu generasi neutron serempak terhadap fungsi fraksi bakar menunjukkan pola yang hampir sama. Yaitu pada sesaat awal siklus mengalami penurunan, tetapi kemudian pada tingkat fraksi bakar berikutnya sampai akhir siklus terjadi kenaikan. Seperti ditunjukkan pada persamaan (1) diatas bahwa nilai umur neutron serempak berbanding terbalik pada tampang lintang makroskopik serapan bahan bakar dan moderator. Penurunan nilai sesaat pada awal siklus disebabkan oleh peningkatan konsentrasi boron yang mencapai nilai puncak seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Sedangkan pada tingkat fraksi bakar berikutnya, naiknya umur neutron serempak dan waktu generasi neutron serempak karena disebabkan oleh berkurangnya nuklida uranium dan disertai dengan penurunan konsentrasi boron dalam moderator. Dari gambar tersebut juga dapat diketahui bahwa umur neutron serempak pada awal siklus (20,7509 μ detik) hanya mengalami sedikit perbedaan dengan saat akhir siklus (20,7328 μ detik). Hal tersebut diperkirakan karena hasil

penjumlahan antara tampang lintang serapan bahan bakar dan moderator pada saat awal siklus hampir sama dengan akhir siklus.



Gambar 3. Perubahan nilai umur neutron serempak terhadap fraksi bakar



Gambar 4. Perubahan nilai waktu generasi neutron serempak terhadap fraksi bakar

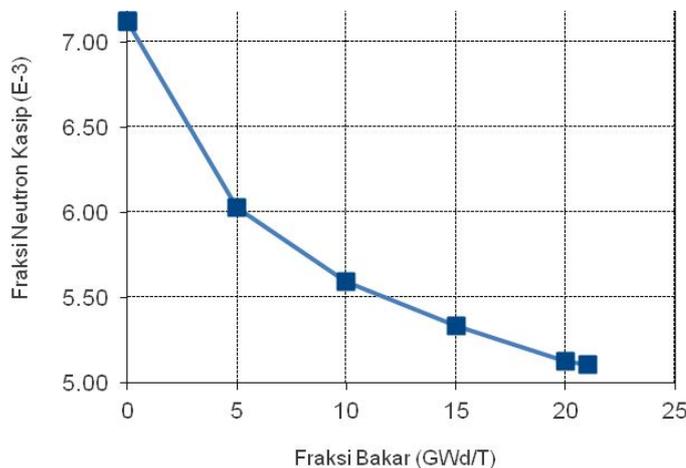
Neutron Kasip

Tabel 4 menunjukkan perbandingan nilai umur neutron kasip antara hasil perhitungan menggunakan paket program SRAC modul CITATION dengan nilai yang tercantum dalam referensi. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa perbedaan fraksi neutron kasip tersebut adalah sebesar 5,01%. Sehingga dapat dikatakan bahwa perhitungan fraksi neutron kasip menggunakan paket program SRAC modul CITATION menunjukkan hasil yang juga cukup akurat.

Tabel 4. Perbandingan hasil perhitungan fraksi neutron kasip (β_{eff}) teras AP1000

Fraksi neutron kasip, β_{eff}		
Referensi[2]	Perhitungan	Perbedaan
7,5E-3	7,12392E-3	5,01%

Gambar 5 menunjukkan perubahan nilai fraksi neutron kasip terhadap fungsi fraksi bakar siklus operasi pertama teras AP1000 dari awal siklus sampai akhir siklus. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar nilai fraksi bakar teras AP1000, maka nilai fraksi neutron kasip akan semakin kecil. Hal tersebut disebabkan karena akumulasi nuklida Pu yang semakin banyak. Karena nuklida Pu mempunyai tampang lintang serapan yang lebih besar dibandingkan ^{235}U . Sehingga dalam satu reaksi fisi, semakin banyaknya Pu akan menghasilkan prosentase neutron serempak yang lebih besar, atau sebaliknya neutron kasip yang lebih kecil. Besarnya nilai fraksi neutron kasip tersebut tidak terpengaruh oleh perubahan besarnya konsentrasi boron dalam moderator, tetapi hanya tergantung pada komposisi nuklida bahan bakar. Diperkirakan bahwa semakin nilai kecil fraksi neutron kasip suatu teras maka dari perubahan daya akibat perubahan reaktivitas akan semakin besar dan teras reaktor semakin sulit untuk dikendalikan. Dari gambar tersebut juga dapat diketahui bahwa nilai minimum β_{eff} yang dihasilkan oleh teras AP1000 sepanjang siklus operasi pertama adalah 0,00510482 atau masih diatas nilai batas keselamatan yang ditentukan 0,0044[2].



Gambar 5. Perubahan nilai fraksi neutron kasip terhadap fraksi bakar

Tabel 5 dan 6 masing-masing menunjukkan perubahan nilai fraksi neutron kasip tiap *group* dan konstanta peluruhan neutron kasip tiap *group* fungsi fraksi bakar. Dari Tabel 5 tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar tingkat fraksi bakar, maka masing-masing nilai fraksi neutron kasip tiap *group* juga akan semakin kecil. Dari Tabel 6 menunjukkan bahwa nilai peluruhan neutron kasip tiap *group* fungsi fraksi bakar tidak menunjukkan perubahan. Karena nilai tersebut merupakan konstanta peluruhan nuklida hasil fisi yang nilainya tetap tidak bergantung pada waktu. Nilai fraksi neutron kasip

tiap *group* dan konstanta peluruhan neutron kasip tiap *group* digunakan sebagai inputan dalam perhitungan dinamika reaktor yang menggunakan paket program dinamik.

Tabel 5. Hasil perhitungan fraksi neutron kasip tiap fraksi bakar

Fraksi bakar (GWd/T)	Fraksi neutron kasip tiap <i>group</i> , $\beta_{eff}(i)$					
	1	2	3	4	5	6
0	2,11324E-4	1,45086E-3	1,36089E-3	2,79777E-3	9,63880E-4	3,39188E-4
0,001	2,11066E-4	1,44958E-3	1,36000E-3	2,79691E-3	9,64532E-4	3,39348E-4
5,0	1,75544E-4	1,25340E-3	1,15155E-3	2,32413E-3	8,25251E-4	2,95125E-4
10,0	1,60510E-4	1,17753E-3	1,06474E-3	2,13388E-3	7,76130E-4	2,79492E-4
15,0	1,50883E-4	1,13328E-3	1,01025E-3	2,01850E-3	7,50860E-4	2,71432E-4
20,0	1,42316E-4	1,09596E-3	9,63598E-4	1,92415E-3	7,35161E-4	2,66375E-4
21,0	1,41292E-4	1,09205E-3	9,58050E-4	1,91360E-3	7,33874E-4	2,65945E-4

Tabel 6. Hasil perhitungan konstanta peluruhan neutron kasip tiap fraksi bakar

Fraksi bakar (GWd/T)	Konstanta peluruhan neutron kasip tiap <i>group</i> , $\lambda_{eff}(i)$					
	1	2	3	4	5	6
0	1,25052E-2	3,07138E-2	0,115006	0,310000	1,20789	3,23840
0,001	1,25057E-2	3,07151E-2	0,115032	0,310061	1,20833	3,23985
5,0	1,25547E-2	3,06832E-2	0,116923	0,313889	1,22382	3,24571
10,0	1,25830E-2	3,06535E-2	0,117975	0,316405	1,23792	3,25316
15,0	1,26047E-2	3,06248E-2	0,118767	0,318536	1,25216	3,26158
20,0	1,26287E-2	3,05997E-2	0,119620	0,320906	1,26798	3,27449
21,0	1,26316E-2	3,05951E-2	0,119721	0,321224	1,27048	3,27628

KESIMPULAN

Telah dilakukan perhitungan parameter kinetika fungsi fraksi bakar pada siklus pertama teras AP1000 kondisi daya penuh dari saat awal siklus hingga akhir siklus operasi menggunakan paket program SRAC modul CITATION. Perbandingan hasil perhitungan nilai umur neutron serempak (ρ) dan fraksi neutron kasip (β_{eff}) teras menggunakan paket program tersebut dengan nilai referensi menunjukkan perbedaan masing-masing sebesar 5,25 % dan 5,01 %. Karena perbedaan hasil tidak signifikan maka perhitungan pada *control document* AP1000 dapat diterima. Sedangkan nilai minimum β_{eff} yang dihasilkan oleh teras AP1000 sepanjang siklus operasi pertama teras AP1000 adalah 0,00510482 atau masih diatas nilai batas keselamatan yang ditentukan yaitu 0,0044. Dan dari segi kinetika teras, siklus pertama teras AP1000 dari saat awal siklus hingga akhir siklus dapat dioperasikan secara aman.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, from <http://en.wikipedia.org/wiki/AP1000> , Diakses Jan 20, 2012
2. Anonim, "AP1000 Design Control Document Chapter 4", from: http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/ap1000/dcd/Tier%202/Chapter%204/4-1_r14.pdf , Diakses Jan 20, 2012
3. KEISUKE OKUMURA, TERUHIKO KUGO, KUNIO KANEKO and KEICHIRO TSUCHIHASHI, "SRAC2006; A Comprehensive Neutronics Calculation Code System", JAERI-Data/Code 2007-004, Japan Atomic Energy Agency, January 2007
4. TAGOR MALEM SEMBIRING, SURIAN PINEM, "Evaluasi Parameter Neutron Kasip Reaktor PWR AP1000", Prosiding Seminar Nasional ke-18 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, 29 September 2012, hal.67-75
5. JATI SUSILO, "Analisis Parameter Neutronik Teras Setimbang RSG-GAS Berbahan Bakar U₃Si₂-Al Menggunakan SRAC", IPTEK NUKLIR, Bunga Rampai Presentasi Ilmiah Peneliti Madya/Utama, Vol. 1, No. 2, Tahun 2010, Pusat Desiminasi IPTEK Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional, hal.73-98
6. JATI SUSILO, ROKHMADI "Analisis Parameter Kritikalitas Teras Reaktor AP1000 Dengan SRAC-CITATION", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah – Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2013, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN, Yogyakarta, 26 Juni 2013(dalam proses)
7. FUKUTARO ISHIMORI, "Reactor Engineering Lecture 3 === Reactor Physic", Baifūkan, July 25, 1973 (in Japanese). hal.171-185
8. JOHN R. LAMARSH, "Introduction to Nuclear Engineering 2nd Edition", Addison-Wesley Publishing Company, 1983, (in English), p.277

DISKUSI/ TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Darwis Isnaini, PTRKN-BATAN)

- Berapa prosen perbedaan hasil perhitungan masih dikatakan tidak signifikan? Bagaimana jika hasil perhitungan tersebut digunakan untuk data input pada perhitungan berikutnya, berapa prosen perbedaan yang masih dapat diterima ?
- Perhitungan dilakukan dengan konsentrasi boron sehingga fungsi fraksi bakar. Bagaimana jika terjadi refueling bahan bakar, maka ada perangkat bahan bakar yang fresh (fraksi bakar 0%) dan sebagian sudah terbakar ratusan atau ribuan MWd ?

JAWABAN : (Jati Susilo, PTRKN-BATAN)

- Diatas 10%. Perhitungan perlu dikaji ulang (pendapat pribadi). Jika digunakan untuk perhitungan lainnya, tentu lebih baik jika lebih rendah dari 10%. Agar lebih akurat, lebih baik menggunakan data hasil pengukuran.
- Parameter kinetika tergantung pada komposisi material pada bahan bakar dan moderator. Untuk itu pada kasus dilakukannya refueling, maka perlu dilakukan perhitungan kembali tersendiri. Perhitungan dapat dilakukan dengan modul COREBN untuk distribusi fraksi bahan bakarnya. Kemudian CITATION untuk perhitungan parameter teras.