

Studi Perhitungan Parameter Kinetik HTR Pebble Bed

Ruly Gumilar^{1,a)}, Zuhair^{2,b)} dan M Nurul Subkhi^{1,c)}

¹Laboratorium Fisika Nuklir dan Energi,
Kelompok Keilmuan Fisika Reaktor Nuklir,
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati,
Jl. AH Nasution no. 105 Bandung, Indonesia, 40614

²Laboratorium Komputasi,
Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir,
Badan Tenaga Nuklir Nasional,
Kawasan Puspiptek, Gedung 80, Tangerang Selatan, Indonesia, 15310

a) rulygumilar@gmail.com

b) zuhair@batan.go.id

c) nsubkhi@gmail.com

Abstrak

Parameter kinetik reaktor nuklir menjadi salah satu aspek penting dalam analisis keselamatan reaktor nuklir karena berkaitan dengan sistem keselamatan dan kontrol reaktor nuklir. Perhitungan parameter kinetik reaktor HTR Pebble Bed dengan program transport Monte Carlo MCNP telah berhasil dilakukan. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengkayaan ^{253}U dan fraksi packing TRISO terhadap factor multiplikasi efektif reaktor fraksi neutron kasip efektif (k_{eff}), fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}), umur neutron serempak (l) dan waktu generasi neutron rerata (Λ). Hasil perhitungan menunjukkan pengkayaan ^{253}U dan fraksi packing TRISO berpengaruh terhadap k_{eff} , l , Λ dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap β_{eff} . Nilai parameter kinetik yang diperoleh untuk seluruh pengkayaan ^{253}U dan fraksi packing TRISO yang dipertimbangkan memenuhi standar system keselamatan dan kontrol reaktor nuklir HTR Pebble Bed. Nilai l dan Λ berada dalam batas aman yang disarankan lebih tinggi dari 0.00001 s dengan kesalahan relatif kurang dari 5%.

Kata-kata kunci: Parameter Kinetik, Fraksi Neutron Kasip Efektif, Umur Nerton Serempak, Waktu Generasi Neutron Rerata, MCNP

PENDAHULUAN

Energi merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan manusia. Seluruh aktivitas manusia tidak terlepas dari kebutuhan energi. Meningkatnya populasi manusia berdampak pada kebutuhan energi dunia yang terus mengalami peningkatan. Sebagian besar atau sekitar 80% pasokan energi berasal dari bahan bakar fosil. Setiap tahun pertumbuhan permintaan energi dunia semakin meningkat sementara persediaan bahan bakar fosil sudah semakin berkurang dan permasalahan lain yang timbul dari penggunaan bahan bakar ini adalah semakin meningkatnya emisi gas karbon. Oleh karena itu dibutuhkan alternatif pasokan energi yang efisien dan efektif dari segi biaya maupun keamanan dan ramah lingkungan[1].

Energi nuklir merupakan salah satu jenis sumber energi baru yang memiliki kriteria tersebut dan berpotensi untuk menggantikan peran utama sebagai pemasok energi. Dalam pengembangan desain reaktor nuklir salah satu standar yang harus diperhatikan atas rekomendasi oleh *International Agency Energy Atomic* (IAEA) yaitu parameter keselamatan yang mencakup parameter kinetik. Parameter kinetik merupakan konsekuensi dari reaksi fisi yang bergantung terhadap waktu[24, 20].

Produksi neutron bebas $2n$, $3n$ atau lebih terjadi akibat reaksi fisi berantai. Neutron bebas yang terpancar dalam reaksi fisi terlihat seperti terjadi secara spontan, namun faktanya tidak semua neutron berfisi dalam waktu bersamaan. Hal ini akan menyebabkan terjadinya reaktivitas lebih, sehingga perhitungan parameter kinetik sangat penting untuk dilakukan karena menyangkut keselamatan dan kendali reaktor. Khususnya jika terjadi transien dan ekskursi daya diperlukan perhitungan parameter kinetik yang akurat [6, 18].

Parameter kinetik sangat bergantung pada jumlah bahan bakar dalam reaktor, pengkayaan ^{235}U , konfigurasi dan pustaka data nuklir yang digunakan dalam perhitungan. Parameter ini selalu disediakan oleh manufaktur dalam tahap desain dan tidak berlaku untuk jenis teras yang berbeda, sehingga perhitungan parameter kinetik harus dilakukan untuk setiap reaktor nuklir yang berbeda [16].

Perhitungan parameter kinetik pada reaktor nuklir memiliki peran yang penting dalam analisis keselamatan, namun perhitungan dan pengukuran parameter ini sangat sulit dilakukan. Terdapat beberapa program komputer yang berdasarkan pada teori perturbasi dan metode perhitungan khusus seperti program WIMS, SRAC, MTR_PC dan MCNP. Metode perhitungan MCNP yaitu melakukan simulasi partikel secara acak dan memperhitungkan setiap interaksinya yang secara umum dikenal dengan metode probabilitas. Metode ini memiliki tingkat akurasi yang baik [6].

Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) merupakan lembaga penelitian pengembangan teknologi nuklir di Indonesia. Dalam perkembangan penelitannya, BATAN sedang menggalakkan studi untuk perencanaan pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) dari jenis HTR dengan bahan bakar *pebble* yang akan dibangun di Serpong-Tangerang Selatan. Oleh karena itu dalam penelitian ini sebagai salah satu referensi dalam studi *safety assessment* dilakukan studi perhitungan parameter kinetik pada reaktor HTR *Pebble Bed* yang meliputi fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}), umur neutron serempak (l) dan waktu generasi neutron rerata (Λ) Perhitungan menggunakan metode prompt dan program transport Monte Carlo MCNP dimana teras reaktor dimodelkan terdiri hanya atas bahan bakar saja (Full Power). Pengkayaan bahan bakar dan fraksi *packing* TRISO divariasikan. Sebagai tambahan perhitungan parameter kinetik menggunakan program transport Monte Carlo belum pernah dilakukan di Indonesia.

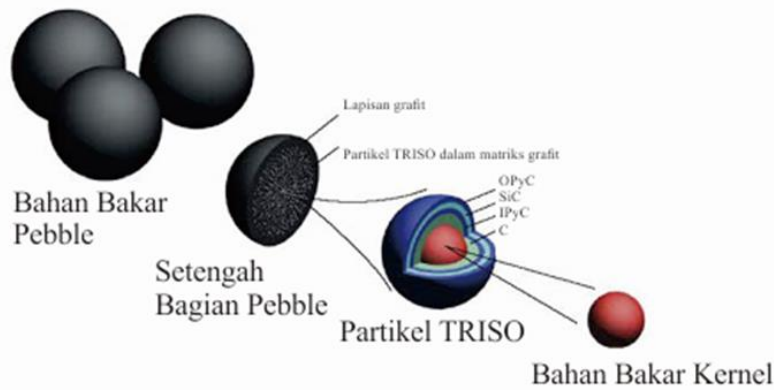
PERHITUNGAN PARAMETER KINETIK REAKTOR

Pemodelan *High Temperature Reactor (HTR) Pebble Bed*

HTR *pebble bed* adalah reaktor termal dengan bahan bakar berbentuk bola (*pebble*), moderator dan reflektor grafit serta pendingin helium yang secara karakteristik neutronik tidak aktif dan tidak korosif. Karena karakteristik tersebut, reaktor dapat dioperasikan hingga mencapai temperatur *outlet* teras lebih dari 900°C .

Bahan bakar *pebble* menggunakan kernel uranium oksida (UO_2) dengan pengkayaan ^{235}U tidak tentu yang disusun oleh ribuan partikel bahan bakar berlapis. Dalam HTR-10 teras aktif terdiri atas bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* dengan perbandingan jumlah 57/43. Selain untuk memverifikasi fitur teknis dan keselamatan HTR modular, HTR-10 didesain untuk memantapkan basis eksperimental bagi pengembangan aplikasi panas proses nuklir dan daur bahan bakar serta pengembangan turbin gas untuk menghasilkan listrik. Dalam reaktor ini dapat diyakinkan bahwa temperatur maksimum elemen bakar adalah sebesar 1600°C yang tidak akan terlampaui dalam skenario kecelakaan apapun [5, 24, 21].

Elemen bakar HTR *pebble bed* mengandung kernel uranium (U), thorium (Th) atau plutonium (Pu) dari jenis karbida atau oksida. Kernel ini kemudian dilapisi dengan *podrous carbon* (C), *inner pyrolytic carbon* (IPyC), *silicon carbide* (SiC), dan *outer pyrolytic carbon* (OPyC) yang keseluruhan disebut dengan *tristructural-isotropic* (TRISO). Setiap lapisan TRISO masing-masing mempunyai fungsi spesifik, namun secara umum berfungsi mencegah pelepasan produk fisi, baik plutonium, aktinida minor maupun gas hasil pembelahan agar tetap berada di dalam bahan bakar *pebble*. Skema sistem bahan bakar *pebble* ditunjukkan dalam gambar 1 [23].

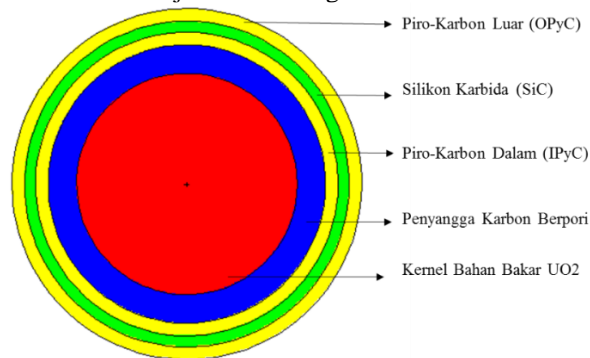


Gambar 1. Skema sistem bahan bakar *pebble*

Pemodelan HTR *Pebble Bed*

HTR *pebble bed* memiliki geometri yang kompleks dan dua heterogenitas, yaitu heterogenitas pada partikel TRISO dalam matriks grafit dan distribusi *pebble* dalam teras. Hal ini tentu akan sulit ditangani untuk mendapatkan akurasi yang baik bila dilakukan menggunakan pemodelan deterministik. MCNPX adalah program transport Monte Carlo, sebuah program yang dapat melakukan pemodelan secara detail dan mampu menangani geometri yang kompleks. Akurasi yang tinggi dapat diperoleh dengan metode Monte Carlo dalam MCNPX.

Pemodelan HTR *pebble bed* diawali dengan memodelkan partikel TRISO secara detail dengan struktur *simple cubic* (SC). Model ini untuk menangani keacakan distribusi kernel bahan bakar dalam matriks grafit. Model partikel TRISO dalam MCNPX ditunjukkan dalam gambar 2.



Gambar 2. Model partikel bahan bakar TRISO dalam MCNPX

Spesifikasi model partikel bahan bakar TRISO disajikan dalam tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi bahan bakar partikel TRISO

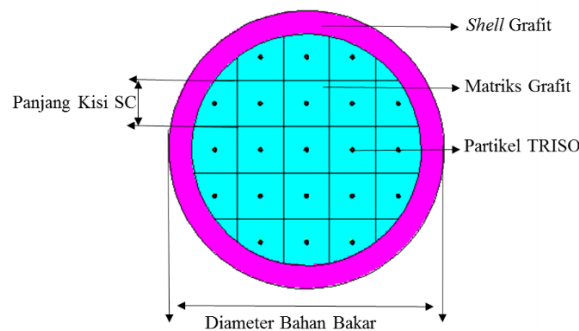
No	Lapisan	Komposisi	Densitas (g/cm ³)	Radius (cm)
1	Kernel	UO ₂	10,41	0,0250
2	Penyangga	C	1,14	0,0340
3	IPyC	C	1,89	0,0380
4	SiC	SiC	3,20	0,0415
5	OPyC	C	1,89	0,0455

Optimasi bahan bakar perlu dilakukan untuk mendapatkan desain bahan bakar yang optimal secara neutronik, karena bahan bakar berperan penting dalam reaktor sebagai penghasil reaksi fisi sehingga diperoleh energi untuk berbagai jenis kebutuhan. Optimasi dilakukan pada fraksi *packing* TRISO dan pengkayaan Uranium-235. Pengkayaan Uranium-235 perlu dilakukan karena uranium alam hanya mengandung sekitar 0.7% sedangkan Uranium-235 sebagai bahan fisil merupakan faktor utama dalam reaksi fisi. Optimasi dilakukan dengan pengkayaan dari 4% hingga 20%.

Tabel 2. Densitas atom bahan bakar *pebble* (atom/barn cm)

Pengkayaan (%)	N _{UO2}	N _O	N _{U235}	N _{U238}
4	0.0232	0.04641	0.00094	0.02226
6	0.02321	0.04642	0.00141	0.0218
8	0.02321	0.04643	0.00188	0.02133
10	0.02322	0.04644	0.00235	0.02087
12	0.02322	0.04645	0.00282	0.02041
14	0.02323	0.04646	0.00329	0.01994
16	0.02323	0.04647	0.00376	0.01948
18	0.02324	0.04648	0.00423	0.01901
20	0.02324	0.04649	0.0047	0.01855

Model partikel TRISO yang disusun dalam matriks grafit diekspansikan sehingga membentuk bahan bakar *pebble* seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.



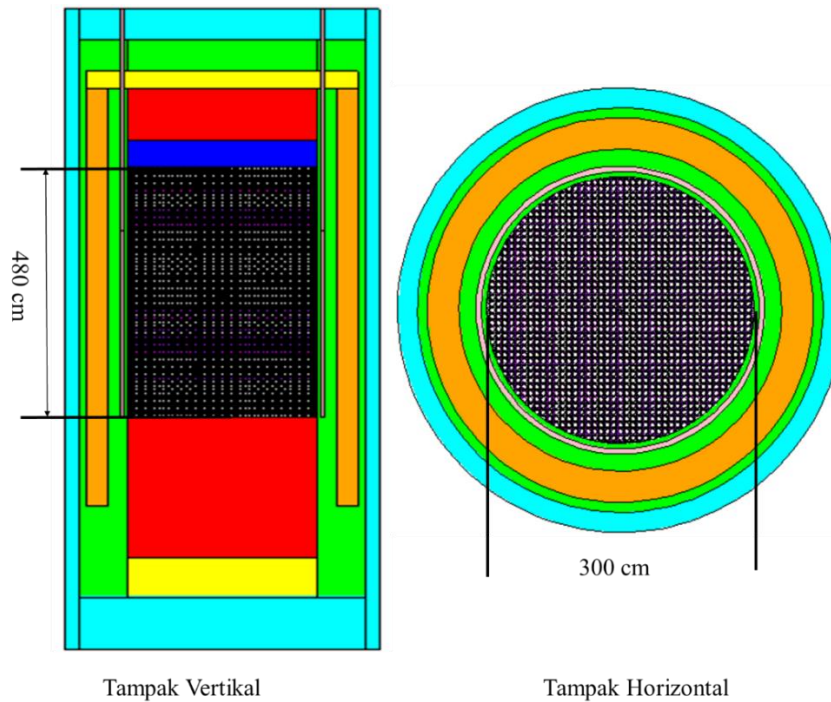
Gambar 3. Model bahan bakar *pebble* dalam MCNPX

Model bahan bakar *pebble* dimodelkan dengan fraksi *packing* TRISO yang divariasikan dari 5% hingga 30% akan berdampak pada kenaikan jumlah partikel TRISO per *pebble*. Seperti yang ditunjukkan dalam tabel 3.

Tabel 3. Kisi SC sebagai fungsi fraksi *packing* TRISO

Fraksi <i>Packing</i> TRISO (%)	N _{TRISO} (bola)	Panjang Kisi SC (cm)
5	8294	0,19906
10	16588	0,57990
15	24882	0,13802
20	33175	0,12540
25	41469	0,11641
30	49763	0,10955

Teras reaktor HTR *pebble bed* dimodelkan dengan tinggi reaktor 4.8 meter agar menghindari osilasi xenon dengan bahan bakar baru dari atas. Diameter teras 3 meter untuk menghindari penetrasi batang kendali dengan teras reaktor dan menjaga kapabilitas termal untuk mentransfer panas dari teras dengan mekanisme alami sehingga teras memiliki keselamatan melekat. Geometri HTR *pebble bed* dimodelkan dalam MCNPX seperti ditunjukkan dalam gambar 4[15, 17].



Gambar 4. Model geometri HTR *pebble bed* dalam MCNPX tampak vertikal dan horizontal

Dalam teras reaktor, bahan bakar *pebble* dimodelkan dengan model kisi *Body Centered Cubic* (BCC) dengan fraksi *packing* 61% sebagai solusi untuk menangani keacakan distribusi *pebble* dalam teras reaktor.

Fraksi Neutron Kasip Efektif

Ketika reaksi fisi terjadi sebagian besar neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi, pada umumnya 99% dipancarkan seketika yang disebut neutron serempak. Sedangkan neutron kasip dihasilkan relatif lama setelah reaksi fisi terjadi. Meskipun neutron kasip yang dihasilkan hanya terdiri atas kurang dari 1% tetapi memiliki peran penting dalam sistem nuklir.

Neutron kasip berasal dari peluruhan produk fisi. ^{87}Br (barium) meluruh menjadi ^{87}Kr (krypton) dengan mengemisi radiasi beta, kemudian membentuk keadaan tereksitasi. Dalam hal ini neutron yang terikat dengan lemah pada ^{87}Kr akan tereksitasi dari inti dengan energi 0.3 MeV. Neutron ini teremisi dengan cepat setelah keadaan tereksitasi terbentuk yang terlihat dari waktu paruh ^{87}Br sebesar 56 detik. ^{87}Br didefinisikan sebagai prekursor yaitu nuklida yang bisa menghasilkan neutron kasip[6].

Pengaruh neutron kasip dalam parameter kinetik reaktor dikenal sebagai fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) yang menggambarkan efektivitas produksi neutron dari peluruhan produk fisi yang mengindikasikan reaksi fisi. Dalam MCNPX perhitungan kritikalitas akan memperhitungkan produksi neutron kasip dan serempak. β_{eff} dihitung dengan melibatkan perhitungan kritikalitas dan menggunakan metode Prompt. Secara matematis didefinisikan dalam persamaan (1) [3].

$$\beta_{eff} = 1 - \frac{k_p}{k_{eff}} \tag{1}$$

Dimana k_p adalah faktor multiplikasi efektif hanya memperhitungkan neutron kasip yang mengindikasikan reaksi fisi, diperoleh dengan menon-aktifkan kartu TOTNU. k_{eff} adalah faktor multiplikasi efektif memperhitungkan semua neutron yang mengindikasikan reaksi fisi, diperoleh dengan mengaktifkan kartu TOTNU [7].

Umur Neutron Serempak dan Waktu Generasi Neutron Rerata

Waktu rata – rata waktu dari emisi neutron serempak dalam fisi sampai neutron mati oleh beberapa proses fisika seperti fisi, *capture* atau *leakage*, disebut umur neutron serempak (l). Perbedaan antara waktu generasi

neutron rerata (Λ) dan l adalah Λ hanya memperhitungkan penyerapan neutron yang mengindikasikan fisi. Secara matematis didefinisikan dalam persamaan (2) [16].

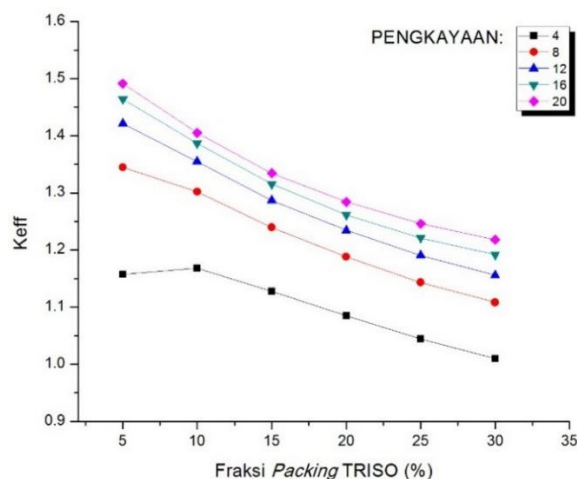
$$\Lambda = \frac{l}{k_{eff}} \quad (2)$$

HASIL DAN DISKUSI

Seluruh perhitungan dilakukan menggunakan program transport Monte Carlo MCNPX. Parameter kinetik yang dianalisis pada penelitian ini yaitu fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}), umur neutron serempak (l) dan waktu generasi rerata (Λ). Perhitungan parameter kinetik melibatkan perhitungan kritikalitas atau faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Perhitungan kritikalitas dikerjakan dengan opsi kartu KCODE dan KSRC. Kartu KCODE digunakan untuk menentukan faktor multiplikasi reaktor dan dipilih 2,500,000 dengan 10,000 histori neutron per siklus, 50 siklus pertama dibuang dan kartu KSRC digunakan untuk menentukan titik koordinat sumber neutron, dan dalam studi ini dipilih pada pusat kernel bahan bakar reaktor.

Teras reaktor dimodelkan dengan model teras penuh hanya oleh bahan bakar *pebble* dengan pengkayaan ^{235}U dari 4%, 8%, 12%, 16% hingga 20%. Kemudian fraksi *packing* TRISO dipilih dari 5%, 10%, 15%, 20%, 25% hingga 30%. Variasi pengkayaan ^{235}U dan fraksi *packing* TRISO dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap parameter kinetik HTR *pebble bed*.

Gambar 5 menunjukkan nilai k_{eff} meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya pengkayaan ^{235}U . Hal tersebut karena terjadinya reaksi fisi berantai disebabkan oleh neutron yang berinteraksi dengan bahan fisil, yaitu isotop ^{2345}U , sehingga dengan bertambahnya pengkayaan kernel bahan bakar maka konsentrasi isotop ^{235}U akan meningkat yang berdampak pada reaksi fisi berantai semakin tinggi dan berakibat pada meningkatnya k_{eff} .

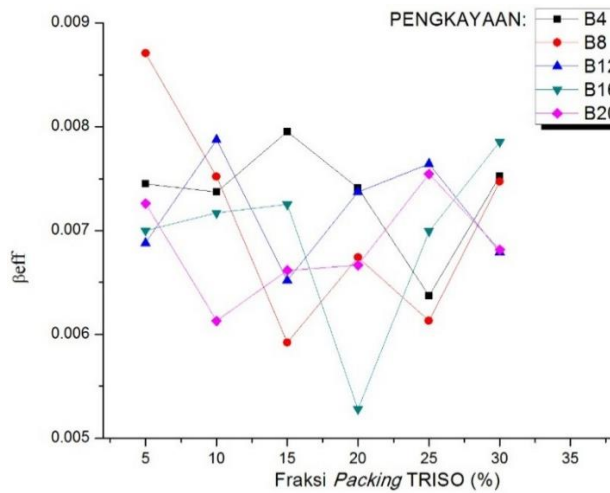


Gambar 5. Nilai k_{eff} sebagai fungsi fraksi *packing* TRISO

Dalam gambar 5 perubahan k_{eff} juga dapat dianalisis dari fraksi *packing* TRISO yang diperhitungkan. Nilai k_{eff} dari setiap fraksi *packing* TRISO tidak semuanya menunjukkan kurva linear yang menurun, tetapi terdapat nilai k_{eff} yang meningkat kemudian menurun. Pada pengkayaan ^{235}U sebesar 4% fenomena tersebut terjadi secara signifikan. Pada fraksi *packing* TRISO 5% nilai k_{eff} adalah 1.15668 ± 0.00056 dan pada fraksi *packing* TRISO 10% nilai k_{eff} meningkat menjadi 1.16791 ± 0.00052 untuk kemudian kemudian terus menurun sampai fraksi *packing* TRISO 30% nilai k_{eff} menjadi 1.01092 ± 0.00053 . Perubahan nilai k_{eff} pada rentang fraksi *packing* TRISO yang dipertimbangkan terjadi karena kondisi *over moderated* dan *under moderated*. Kedua kondisi tersebut dapat dikaitkan dari rasio jumlah partikel TRISO dan matriks grafit dalam bahan bakar *pebble*. Pada fraksi *packing* TRISO 5%, nilai k_{eff} di bawah titik maksimum karena rasio volume matriks grafit lebih besar daripada jumlah partikel TRISO sehingga terjadi kondisi *over moderated* yaitu menurunnya faktor pemakaian neutron termal. Meningkatnya nilai k_{eff} pada fraksi *packing* TRISO 10% terjadi karena rasio antara

jumlah partikel TRISO dan volume matriks grafit dalam bahan bakar seimbang sehingga pemakaian neutron termal dalam reaksi fisi maksimal. Penurunan nilai k_{eff} yang terjadi dari fraksi *packing* TRISO 15% sampai 30% karena rasio jumlah partikel TRISO lebih besar daripada volume matriks grafit dalam bahan bakar *pebble* sehingga terjadi kondisi *under moderated* yang berdampak pada penurunan probabilitas lolos resonansi.

Hasil perhitungan β_{eff} dirangkum dalam tabel 4. Nilai β_{eff} tidak bergantung secara signifikan untuk seluruh fraksi *packing* TRISO yang dibuat. Nilai β_{eff} cenderung fluktuatif.

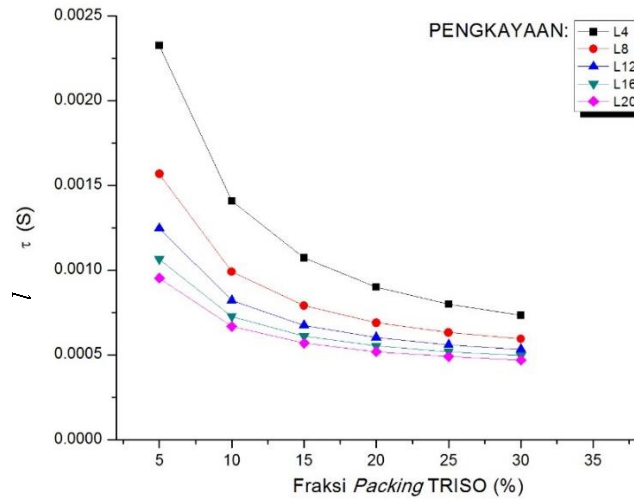


Gambar 6. Nilai β_{eff} sebagai fungsi fraksi *packing* TRISO

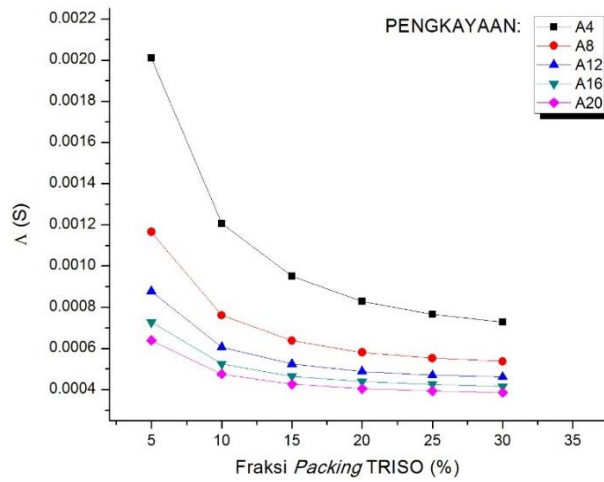
Tabel 4. Nilai β_{eff} sebagai fungsi fraksi *packing* TRISO

Fraksi <i>Packing</i> TRISO (%)	β_{eff}
5	(7.46±1.11)E-03
10	(7.21±1.13)E-03
15	(6.85±1.10)E-03
20	(7.21±1.15)E-03
25	(6.94±1.14)E-03
30	(7.29±1.12)E-03

Data-data di atas membuktikan bahwa karakteristik β_{eff} yang tidak bergantung nilai β_{eff} pada fraksi *packing* TRISO dan pengkayaan ^{235}U . Nilai β_{eff} tidak memiliki kecenderungan seperti yang dimiliki l dan A . Nilai l dan A menurun dengan bertambahnya pengkayaan dan fraksi *packing* TRISO seperti ditunjukkan dalam gambar 7 dan gambar 8.



Gambar 7. Nilai l sebagai fungsi *packing* TRISO



Gambar 8. Nilai λ sebagai fungsi *packing* TRISO

Tabel 5. Penurunan nilai λ dan l sebagai fungsi fraksi *packing* TRISO

Fraksi <i>Packing</i> TRISO (%)	λ (S)		l (S)	
	Max	Min	Max	Min
5	0.002330	0.000952	0.002010	0.000638
10	0.001410	0.000665	0.001210	0.000473
15	0.001070	0.000566	0.000949	0.000424
20	0.000903	0.000517	0.000832	0.000402
25	0.000799	0.000490	0.000764	0.000393
30	0.000734	0.000470	0.000726	0.000386

Nilai l dan λ untuk seluruh fraksi *packing* TRISO yang diperhitungkan cenderung menurun. Penurunan tersebut karena meningkatnya fraksi *packing* TRISO mengakibatkan jumlah partikel TRISO dalam bahan bakar *pebble* menjadi meningkat dimana produksi spektrum neutron bergeser dari energi neutron termal ke energi neutron cepat. Begitu pula yang terjadi dengan bertambahnya pengkayaan ^{235}U sebagai salah satu faktor utama dalam terjadinya reaksi fisi berantai.

Terdapatnya perbedaan antara nilai l dan λ disebabkan oleh sifat dari kedua parameter yang berbeda. Pada l estimasi perhitungan merupakan waktu rata-rata dari emisi neutron serempak, sedangkan λ hanya memperhitungkan waktu rata-rata neutron yang mengindikasikan fisi dari reaksi absorpsi dalam reaktor. Nilai yang diperoleh untuk l dan λ dalam studi ini masih menunjukkan tingkat keamanan yang baik karena berada pada orde mikro sesuai dengan standar keselamatan reaktor nuklir tipe reaktor dengan spektrum neutron termal

berada pada rentang 0.1 mS - 1 mS, sedangkan nilai l dan Λ lebih besar dari 0.01 mS membuat reaktor nuklir akan sulit dikendalikan. Besarnya nilai perhitungan l dan Λ mengindikasikan seberapa cepat neutron baru dihasilkan, maka dapat diketahui laju reaksi fisi berantai terhadap waktu dan daya yang dihasilkan.

Nilai β_{eff} yang terukur dari setiap parameter bahan bakar dapat digunakan sebagai referensi dalam analisis transien karena nilai kesalahan relatif maksimal yang disarankan oleh IAEA kurang dari ± 0.05 sedangkan kesalahan realtif yang didapatkan kurang dari $\pm 0,01$. Nilai tertinggi yang diperoleh dari hasil perhitungan MCNPX dengan fraksi *packing* TRISO 5% sebesar $7.46E-03 \pm 1.11E-03$ dan nilai terkecil dengan fraksi *packing* TRISO 15% sebesar $6.85E-03 \pm 1.10E-03$. Hal ini menunjukkan reaktor dengan fraksi *packing* TRISO 15% akan menghasilkan puncak daya lebih tinggi daripada fraksi *packing* TRISO 5%, sesuai dengan defisini dari β_{eff} sebagai rasio antara neutron serempak dan neutron kasip dalam reaktor. Semakin kecil nilai β_{eff} yang diperoleh menunjukkan populasi neutron serempak semakin tinggi.

KESIMPULAN

Studi perhitungan parameter kinetik HTR *pebble bed* melalui pemodelan reaktor dalam MCNPX berhasil dilakukan dengan model kisi BCC. Dapat diketahui faktor multiplikasi efektif reaktor (k_{eff}) semakin meningkat dengan bertambah pengkayaan ^{235}U dimana terjadi kondisi *under moderated* dan *over moderated* sebagai akibat dari perubahan fraksi *packing* TRISO. Fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) tidak menunjukkan kebergantungan yang signifikan terhadap tingginya pengkayaan ^{235}U dan fraksi *packing* TRISO, sedangkan waktu umur neutron serempak (l) dan waktu generasi neutron rerata (Λ) semakin pendek akibat bertambahnya pengkayaan ^{235}U dan fraksi *packing* TRISO. Desain HTR *pebble bed* dengan pengkayaan ^{235}U lebih dari 16% dan fraksi *packing* TRISO lebih dari 15% harus dipertimbangkan menyangkut sistem kendali reaktor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Penulis juga berterima kasih kepada Bapak Ir. Suwoto dan Drs. Tukiran Surbakti atas diskusi yang bermanfaat.

REFERENSI

1. ESDM. (2015, Desember 7). *Hingga 2030 Permintaan Energi Dunia Meningkat Hingga 45%*. Online 07 Mei 2016, sumber: <http://www.esdm.go.id>
2. Hassanzadeh, M., Fegghi, S., dan Khalaf, H., *Calculation of Kinetic Parameters in an Accelerator Driven Subcritical TRIGA Reactor using MCNIC Method*, Annals of Nuclear Energy **59** (2013), 188-193.
3. Hosseini, S. A., dan Allaf, M. A., *Benchmarking of the HTR-10 Reactor's Kinetic Parameters: Effective Delayed Neutron Fraction*, Progress in Nuclear Energy **75** (2014), 0149-1970.
4. Hosseini, S. A., Vosoughi, N., Ghofran, M. B., dan Gharib, M., *Calculation Measurement and Sensitivity Analysis of Kinetic Parameters of Tehran Research Reactor*, Annals of Nuclear Energy **37** (2010), 463-470
5. Jeong, H., dan Chang, S. H., *Monte Carlo Calculation for Modeling HTR-10 Core*, TRANSACTIONS OF THE KOREAN NUCLEAR SOCIETY SPRING MEETING, At Gyeongju, Korea Advanced Institute of Science and Technology (2008), 29-30.
6. Lamarsh, J. R dan Baratta, A.J., *Introduction to Nuclear Engineering*, Messachusetts, Addison-Wesley (1982)
7. Marck, S. C., dan Meulekamp, R. K., *Calculating the Effective Delayed Neutron Fraction Using Monte Carlo Techniques*. THE PHYSICS OF FUEL CYCLES AND ADVANCED NUCLEAR SYSTEMS: GLOBAL DEVELOPMENTS, At Chicago, American Nuclear Society (2004), 20-29.
8. Mary G. R., Dalle, H. M., dan Campolina, D. A. *Measured and Calculate Effective Delayed Neutron Fraction of the IPR-R1 TRIGA Reactor*. INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, At Belo Horizonte, ABEN (2011), 24-28.
9. Mghar, M., Chetaine, A., dan Darif, A., *Calculation of the Moroccan TRIGA Mark-II Reactor Using the Monte Carlo Code MCNP*, Advances in Applied Physics (2015), 1-8.
10. Michalek, S., Hascik, J., dan Farkas, G., *MCNP5 Delayed Neutron Fraction Calculation in Training Reactor VR-1*, Electrical Engineering (2008), 221-224.

11. Nagaya, Y., dan Mori, T., *Calculation of Effective Delayed Neutron Fraction with Monte Carlo Perturbation Techniques*, *Annals Nuclear Energy* (2011), 254-260.
12. Nauchi, Y., dan Kameyama, T., *Proposal of Direct Calculation of Kinetic Parameters β_{eff} and Λ Based on Continuous Energy Monte Carlo Method*, *Nuclear Science and Technology* (2005), 5003-514.
13. Pelowitz, D. B., *MCNPX TM User's Manual Version 2.6.0.*, Los Alamos National Laboratory (2008).
14. Setiadipura, T., *Requirements of Pebble Bed Reactor's Plant Information Model*, At Serpong, Tangerang Selatan, BATAN-Indonesia (2015).
15. Setiadipura, T., Irianto, D., dan Zuhair., *Preliminary Neutronic Design of High Burnup OTTO Cycle Pebble Bed Reactor*. *Atom Indonesia* (2015), 7-15.
16. Snoj, L., Kavcic, A., Zerovnik, G., dan Ravnik, M. *Calculation of Kinetic Parameters for Mixed TRIGA Cores with Monte Carlo*. *Annals of Nuclear Energy* **37** (2010) 0306-4549
17. Teuchert, E., Gerwin, H., dan Haas, K., *Simplification of the Pebble Bed High Temperature*. Potential of Small Nuclear Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources (1992), 220-228.
18. Tukiran, S., Pinem, S. dan Sembiring, T., *Analisis Pengaruh Densitas Bahan Bakar Silsida terhadap Parameter Kinetik Teras Reaktor RSG-GAS*, *Jurnal Pendidikan Fisika dan Aplikasinya* **3** (2013), 2087-9946
19. Yamamoto, T., dan Sakamoto, H., *A New Concept of Monte Carlo Kinetics Parameter Calculation using Complex-Valued Perturbation*. *Annals of Nuclear Energy* (2014), 480-488.
20. Yehie, A. dan Boogard, H. *Safety Assessment for Research Reactors and Preparation of the Safety Analysis Report*. Vienna, IAEA (2012).
21. Zongxin, W. D.. *The Design Features of the HTR-10*. *Nuclear Engineering and Design* (2002), 25-32.
22. Zuhair, *Studi Desain Neutronik Perangkat Kritik Reaktor Temperatur Tinggi Berbahan Bakar Bola*, *Jurnal Penelitian Sains* **15** (2012), 15104.
23. Zuhair, Suwoto, dan Irianto, I., *Studi Optimasi Moderasi Neutron dalam Teras HTR Pebble Bed*. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* (2010), 96-106.
24. Zuhair, Suwoto, dan Supriatna, P., *Studi Model Heksagonal MCNP5 Dalam Perhitungan Benchmark Fisika Teras HTR-10*, *Jurnal Matematika dan Sains* **17** (2012), 61-70