

ANALISIS KOMPOSISI NUKLIDA BAHAN BAKAR BEKAS REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL (RDE) MENGGUNAKAN MCNPX 2.6.0

Kristina, Muhammad Subekti²

¹Jurusan Fisika, Universitas Sriwijaya

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN

Email: kristinazhang@student.unsri.ac.id

ABSTRAK

ANALISIS KOMPOSISI NUKLIDA BAHAN BAKAR BEKAS REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL (RDE) MENGGUNAKAN MCNPX 2.6.0. Reaktor Daya Eksperimental (RDE) adalah reaktor nuklir yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik, pembangkit panas dan untuk memproduksi hidrogen. Jenis bahan bakar RDE yang dibahas pada penelitian ini adalah sebuah *pebble* bergeometri bola yang di dalamnya terdapat 8335 TRISO berkisi *simple cubic* (SC). Satu buah TRISO dalam *pebble* mengandung 5 lapisan, dimana bahan *fissile* terdapat pada *kernel* yang merupakan lapisan paling dalam dengan kandungan UO_2 . Proses *burnup* pada MCNPX 2.6.0 dilakukan selama 90 hari pembakaran dan 10 tahun pendinginan dengan hasil energi *burnup* dan *keff* 1,05343 untuk *autofilled TRISO in pebble* (ATIP) dan 1,04651 untuk *organized TRISO in pebble* (OTIP). Jumlah nuklida yang terkandung sebanyak 170 nuklida (14 aktinida dan 156 nonaktinida). Aktinida dengan massa terbesar ialah ^{238}U (2,323 gram untuk ATIP dan 2,316 untuk OTIP) dan aktivitas terbesar ialah ^{241}Pu (7,791 Ci untuk ATIP dan 7,639 Ci untuk OTIP), sedangkan nonaktinida dengan massa terbesar ialah ^{16}O (0,6734 gram untuk ATIP dan OTIP) dan aktivitas terbesar ialah ^{137}Cs (4,716 Ci for ATIP untuk 4,757 Ci untuk OTIP). Kesalahan relatif *keff* ATIP terhadap OTIP yang diperoleh sebesar 0,661%. Kesalahan relatif yang kecil ini serta geometri kompleks OTIP yang membutuhkan waktu lama untuk didesain menyebabkan ATIP lebih direkomendasi daripada OTIP. .

Kata kunci: komposisi nuklida, *pebble*, bahan bakar bekas, RDE, MCNPX 2.6.0

ABSTRACT

ANALYSIS OF NUCLIDES COMPOSITION OF SPENT FUEL OF EXPERIMENTAL POWER REACTOR (EPR) USING MCNPX 2.6.0 . *Experimental Power Reactor (EPR) is a nuclear reactor that can be used to generate electricity, heat and to produce hydrogen gas. The type of EPR's fuel discussed in this paper is a pebble with spherical geometry. There are 8335 TRISO structured with simple cubic (SC) lattice in pebble. A single TRISO contains 5 layers, where the fissile material (UO_2) is located in kernels, the deepest layer. The burnup process in MCNPX 2.6.0 took 90 days of buning and 10 years of cooling with energy and keff 1.05343 for autofilled TRISO in pebble (ATIP) and 1.04651 for organized TRISO in pebble (OTIP). The number of nuclides is 170 (14 actinides and 156 nonactinides). Actinide with the largest mass is ^{238}U (2.323 gram for ATIP and 2.316 for OTIP) and the largest activity is ^{241}Pu (7,791 Ci for ATIP and 7,639 Ci for OTIP) while non-actinide with the largest mass is ^{16}O (0.6734 gram for both ATIP and OTIP) and the largest activity is ^{137}Cs (4.716 Ci for ATIP and 4.757 Ci for OTIP). The relative error of keff is 0.661 %. This small number of error and the complex geometry of OTIP that took much time to design make ATIP more recommended than OTIP.*

Keywords: nuclides composition, *pebble*, spent fuel, EPR, MCNPX 2.6.0

PENDAHULUAN

Reaktor nuklir merupakan tempat berlangsungnya reaksi nuklir. Reaktor nuklir sudah banyak digunakan baik di negara-negara maju maupun negara berkembang termasuk Indonesia. Sebagian besar reaktor nuklir yang beroperasi digunakan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. Reaktor nuklir terdapat berbagai jenis, baik berdasarkan fungsi, alat pendingin serta bahan moderatornya ^[1].

RDE atau reaktor daya eksperimental adalah reaktor nuklir yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik, pembangkit panas dan untuk memproduksi hidrogen. Karena sifatnya yang eksperimental maka dalam pengoperasian lebih banyak untuk tujuan dalam meningkatkan penguasaan teknologi.

Penguasaan teknologi reaktor untuk ketiga hal tersebut sangat penting mengingat Indonesia masih kekurangan listrik, pupuk dan banyak industri yang membutuhkan energi panas untuk berbagai proses industri. Produksi hidrogen dapat digunakan untuk pembuatan pupuk tanaman yang sampai saat ini sangat dibutuhkan dalam peningkatan produktivitas pertanian. Sedangkan energi panas dimanfaatkan untuk kebutuhan proses industri ^[2].

Pembangunan RDE itu sendiri telah dikembangkan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sejak tahun 2014 silam. Tujuan penelitian ini ialah memberikan informasi komposisi nuklida bahan bakar bekas yang dibutuhkan dalam desain *safeguard* RDE nantinya. Penelitian ini dirumuskan dalam tiga bahasan, yaitu :

1. Mendesain bahan bakar bekas Reaktor Daya Eksperimental (RDE), yaitu pebble dengan visual editor MCNPX 2.6.0.
2. Menganalisis komposisi nuklida bahan bakar setelah dilakukan proses burnup.
3. Membandingkan hasil yang diperoleh antara autofilled TRISO in pebble dengan organized TRISO in pebble.

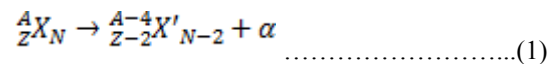
TEORI

Peluruhan Radioaktif

Unsur dapat dibedakan menjadi dua, yaitu unsur yang stabil dan unsur yang tidak stabil. Unsur stabil mengandung jumlah proton dan neutron yang sama. Sedangkan unsur tidak stabil mempunyai jumlah proton dan neutron yang tidak sama. Jumlah neutron dan proton yang tidak sama menyebabkan inti menjadi tidak seimbang, sehingga atom bersifat radioaktif.

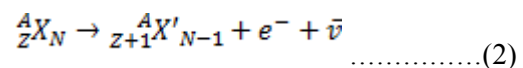
Ketidakstabilan inti biasanya terjadi karena adanya kelebihan energi. Untuk memperoleh kestabilan, unsur radioaktif akan melepaskan kelebihan energi tersebut. Peristiwa pelepasan energi dalam bentuk radiasi dari unsur radioaktif dinamakan proses peluruhan radioaktif. Peluruhan radioaktif terdiri atas peluruhan alpha (α), beta (β), dan gamma (γ) ^[3].

Partikel alpha yang dikenalkan oleh Rutherford ialah sebuah inti atom ${}^4\text{He}$. Proses peluruhan alpha yaitu :

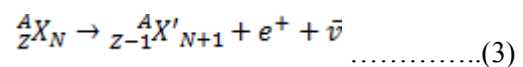


Partikel beta mempunyai muatan dan massa seperti elektron. Peluruhannya yaitu :

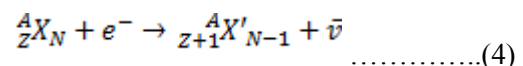
- *Negative Beta Decay*



- *Positive Beta Decay*



- *Orbital Electron Capture*



Partikel gamma merupakan partikel yang tidak bermuatan dan tidak bermassa. Proses peluruhan gamma yaitu ^[4]:



Bahan Bakar Nuklir

Uranium adalah salah satu unsur radioaktif diantara unsur-unsur yang sangat melimpah dan terdapat di kulit bumi. Dalam konsentrasi kecil, uranium dapat ditemukan dimana saja seperti di dalam tanah, sungai bahkan makanan dan tubuh manusia. Konsentrasi uranium secara kuantitas sangat bervariasi berdasarkan daerah asalnya.

Tabel 1. Kandungan Uranium Alam [5]

Isotop	Persen Berat (%)	Nomor Massa	Waktu Paruh (Tahun)
$^{234}_{92}\text{U}$	0,006	234,0409	$2,4 \times 10^5$
$^{235}_{92}\text{U}$	0,712	235,0439	$7,0 \times 10^8$
$^{238}_{92}\text{U}$	99,282	238,0508	$4,5 \times 10^9$

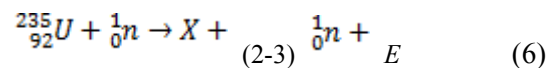
Semua siklus pembakaran bahan bakar nuklir didasari oleh pencapaian kritikalitas dengan adanya nuklida *fissile* dalam reaktor. Bahan *fissile* ^{235}U mempunyaiampang lintang yang bisa diterima untuk neutron termal sehingga kebanyakan bahan bakar reaktor nuklir menggunakan uranium.

Uranium yang digunakan sebagai bahan bakar pada reaktor nuklir terdiri atas dua isotop ^{235}U (0,72%) bersifat *fissile* dan ^{238}U (99,27%) bersifat *fertile*. Inti yang bersifat *fertile* merupakan inti non-*fissile* yang dapat diubah menjadi *fissile* melalui proses penangkapan neutron dan peluruhan beta. Contoh dari proses tersebut ialah ^{238}U yang menghasilkan ^{239}Pu dan ^{232}Th yang menghasilkan ^{233}U [6].

Reaksi Fisi

Dalam reaktor nuklir juga terjadi reaksi fisi. Untuk reaktor berbahan bakar uranium akan memelalui tahapan yaitu pertama-tama inti atom membelah menjadi dua bagian karena bereaksi dengan satu neutron sehingga uranium menjadi tidak stabil. Selanjutnya 2 hingga 3 neutron lepas dari inti. Selama proses pembelahan dihasilkan energi dalam bentuk

panas dan adanya pancaran radiasi.



Reaksi fisi akan terjadi berulang-ulang hingga sudah tidak ada lagi yang dapat bereaksi. Hal ini karena neutron yang dihasilkan akan bereaksi dengan inti atom yang belum bereaksi. Reaksi yang secara berulang-ulang tersebut dinamakan reaksi berantai yang mana menghasilkan energi yang semakin besar.

Definisi Burnup

Burnup disebut dengan derajat bakar suatu reaktor. Definisi *burnup* secara rinci adalah banyaknya jumlah energi yang dihasilkan oleh reaktor nuklir per ton bahan bakar yang digunakan. Banyak nilai *burnup* yang dicapai oleh sebuah reaktor bergantung kepada banyaknya pengayaan. Semakin banyak presentase kandungan Uranium 235 dalam Uranium alam maka semakin tinggi *burnup* yang dapat dicapai. Persamaan *burnup* yaitu [7].

$$BU = \frac{MWd}{MTU} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\frac{MWd}{MTU} = \frac{P_o \times CF \times T}{MTU} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$CF = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_o T} \quad \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan :

BU = *Burnup*

MWd = Megawatt-day / jumlah energi yang dihasilkan reaktor

MTU = Banyaknya U dalam teras (ton)

P_o = Daya reaktor yang diinginkan (% atau MW)

CF = Faktor Kapasitas (%)

$P(t)$ = Daya termal pada waktu t selama periode operasi T (%)

T = Panjangnya waktu operasi reaktor

MCNPX 2.6.0

MCNP atau *Monte Carlo N-Particle Transport Code* bekerja dengan memanfaatkan metode probabilistik yang dikembangkan di LANL (*Los Alamos National Laboratory*) sejak tahun 1957^[8]. Keuntungan utama menggunakan MCNP ialah kemampuan menangani geometri yang rumit^[9]. MCNPX adalah generasi selanjutnya dari seri MCNP yang dapat mensimulasikan pergerakan partikel neutron, foton, dan elektron. MCNPX 2.6.0 yang dikeluarkan pada 30 April 2008, mempunyai banyak kapabilitas baru dalam proses transmudasi, *burnup* dan *delayed particle production* serta sumber *tally* baru dan pilihan variasi reduksi^[10].

METODOLOGI

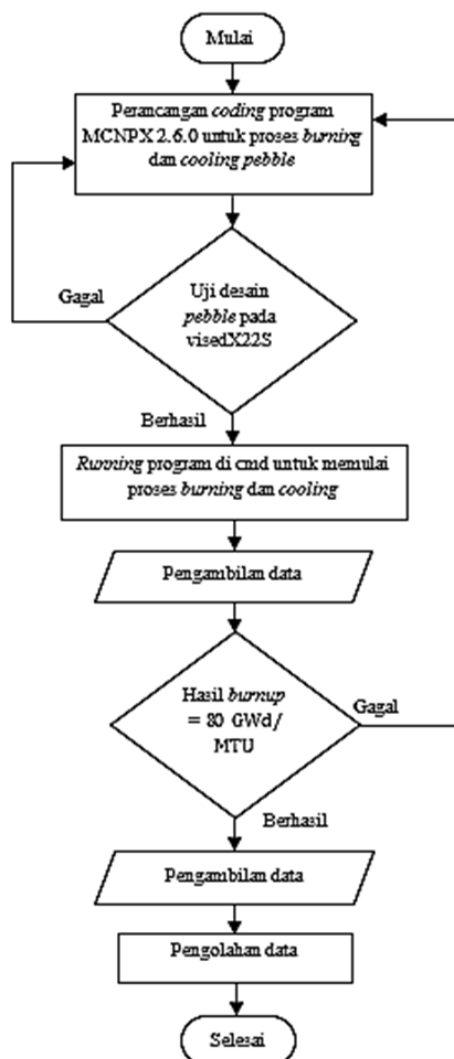
Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas perangkat keras dan perangkat lunak yaitu :

- Perangkat Keras (*Hardware*), yaitu *Personal Computer* (PC).
- Perangkat Lunak (*Software*), yaitu MCNPX 2.6.0 (*Visual Editor; visedX22S*), AcroEdit, Ms.Excel, dan cmd (*Windows Command Processor*).

Diagram alir penelitian

Alur penelitian yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.

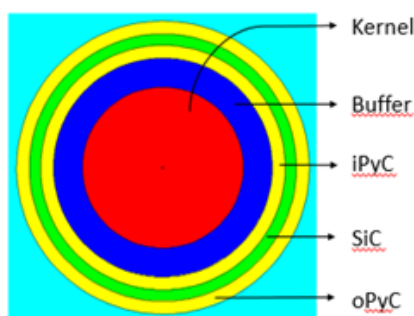


Gambar 1. Diagram alir penelitian

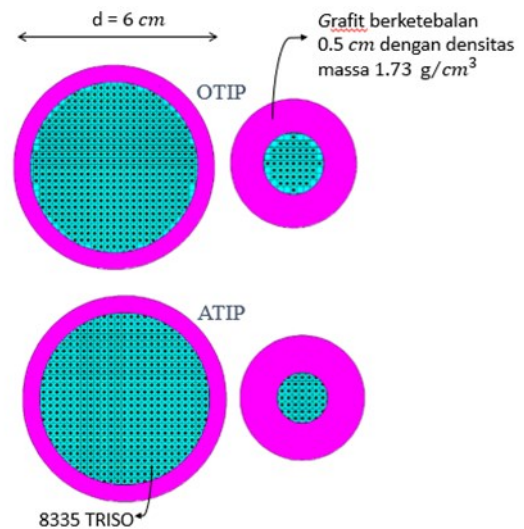
HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain *Pebble*

Pebble didesain berdimensi bola dengan diameter 6 cm yang pada dasarnya merupakan grafit berketebalan 0,5 cm dengan densitas massa 1,73 gram/cm³ yang terdiri atas 8335 TRISO di dalamnya. Satu buah TRISO terdiri atas 5 lapisan dengan lapisan terdalam (kernel) mengandung UO₂ (Uranium Dioksida) dengan ketebalan 0,05 cm yang merupakan bahan *fissile pebble*. UO₂ mempunyai densitas massa 10,4 g/cm³ dimana di dalam UO₂ terkandung 17% ²³⁵U dan 83% ²³⁸U dengan total massa 5 gram (4,15 gram ²³⁸U dan 0,85 gram ²³⁵U. Material di luar UO₂ ialah Buffer berketebalan 0,009 cm dengan densitas massa 1,1 gram/cm³. Material di luar Buffer ialah *Inner* Pirolitik Karbon (iPyC) dengan ketebalan 0,004 cm dan densitas massa 1,9 gram/cm³. Material di luar iPyC ialah Silikon Karbida (SiC) berketebalan 0,035 cm dan densitas massa 3,18 gram/cm³. Material di luar SiC ialah *Outer* Pirolitik Karbon (oPyC) dengan ketebalan dan densitas massa sama dengan iPyC. TRISO dalam *pebble* disusun dengan struktur kisi *simple cubic* (SC). Dengan bantuan *visual editor* MCNPX 2.6.0, susunan ribuan TRISO ke dalam *pebble* dapat langsung tesusun dengan menggunakan perintah *FILL*. Namun, perintah tersebut menyebabkan adanya TRISO terpotong sehingga penelitian ini menggunakan dua penyusunan *pebble*, yaitu *autofilled TRISO in pebble* (ATIP) dan *organized TRISO in pebble* (OTIP).



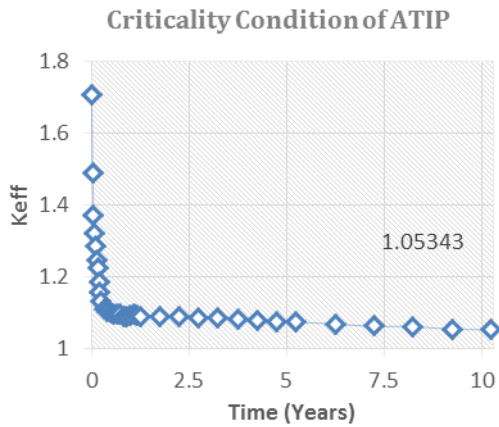
Gambar 2. Desain TRISO



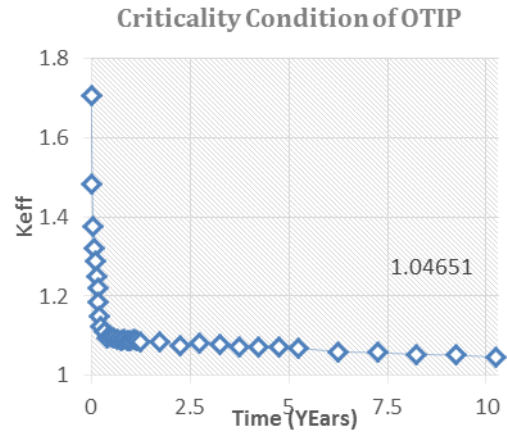
Gambar 3. Desain *Pebble*

Proses *Burnup*

Pebble didesain dengan suhu 150 °C yang melewati proses *burnup* yaitu *burning* dengan *power* sebesar $4,5 \times 10^{-3}$ MW selama 90 hari dan *cooling* selama 10 tahun. *Burning* selama 90 hari dilakukan untuk mencapai energi *burnup* 80 GWd/MTU. Sedangkan *cooling* selama 10 tahun dilakukan untuk menurunkan panas dan radiasi yang sangat besar akibat proses *burning*. *Burning* dilakukan dengan interval 10 hari selama 90 hari dan *cooling* dengan interval 1 bulan selama 1 tahun, 1 semester selama 4 tahun, serta 1 tahun selama 5 tahun (total 10 tahun) dengan lama 1 tahun berdurasi 365,25 hari. Hasil *burnup* yang diperoleh ialah sebesar 81,02 GWd/MTU dengan *keff* sebesar 1,05343 (ATIP) dan 1,04651 (OTIP) dengan kesalahan relatif 0,661%. Besar nilai *keff* yang diperoleh menunjukkan bahwa bahan bakar *pebble* adalah kritis (*keff* = 1).



Gambar 4. Kondisi kritikalitas dari ATIP



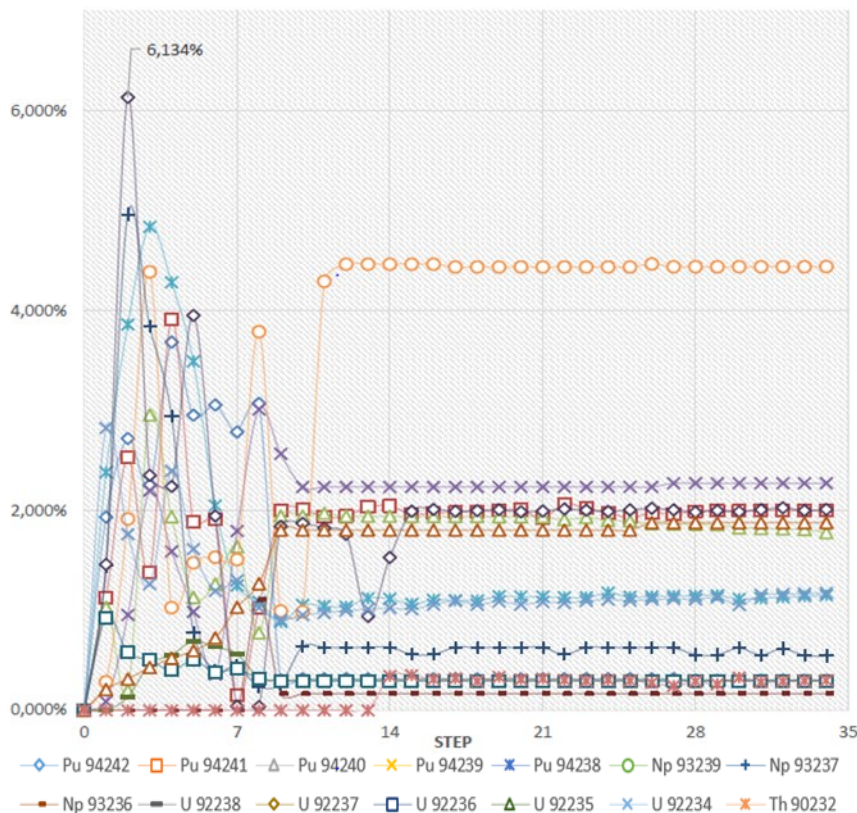
Gambar 5. Kondisi kritikalitas dari OTIP

Nuklida yang terkandung setelah proses *burnup* ialah 170 nuklida (14 aktinida dan 156 nonaktinida) dengan massa terbesar ^{238}U (2,323 gram untuk ATIP dan 2,316 gram untuk OTIP) dan aktivitas terbesar ^{241}Pu (7,791 Ci untuk ATIP dan 7,639 Ci untuk OTIP). Sedangkan nonaktinida dengan massa terbesar ^{16}O (0,6734

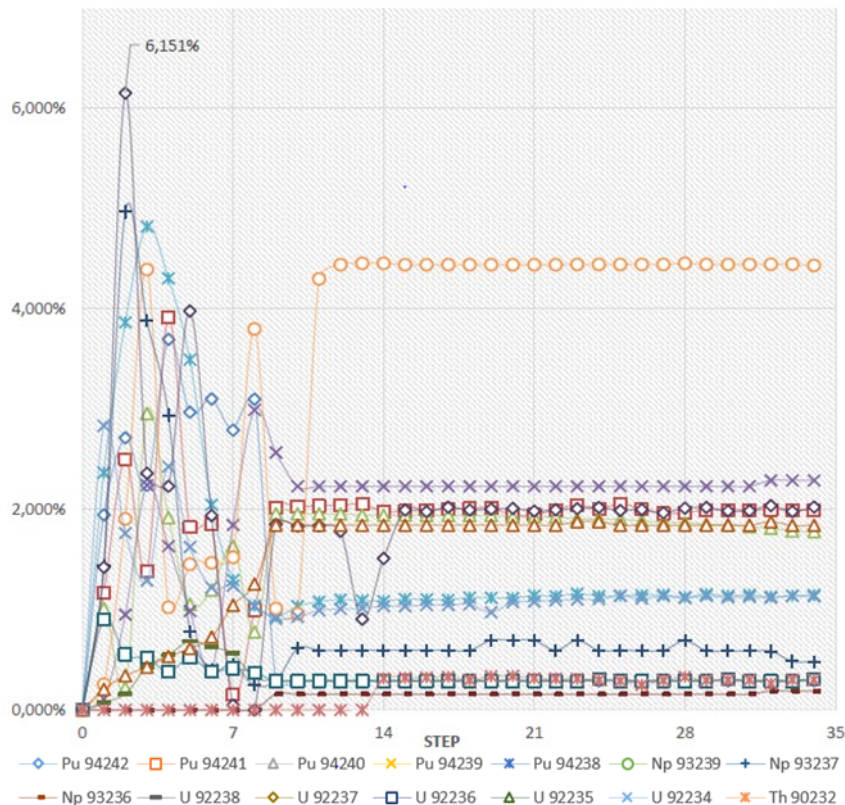
gram) dan aktivitas terbesar ^{137}Cs (4,716 Ci untuk ATIP dan 4,757 Ci untuk OTIP).

Perbandingan Hasil Desain *Pebble*

Gambar 6 dan 7 menunjukkan relative error dari massa dan aktivitas Aktinida yang telah dihitung.



Gambar 6. Relative error massa Aktinida



Gambar 7. *Relative error* aktivitas Aktinida

lihat pada grafik di atas menunjukkan kesalahan relatif ATIP terhadap OTIP dimana Gambar 6 untuk massa aktinida dengan *error* terbesar 6,1314 % dan Gambar 7 untuk aktivitas aktinida dengan *error* terbesar 6,151 %. Nilai *error* tersebut masih tergolong kecil sehingga perbedaan antara ATIP dan OTIP masih dapat dimaklumi. Dengan memperhitungkan hasil *error* tersebut serta pembuatan desain OTIP yang cukup rumit dan lama, maka dapat dikatakan bahwa penggunaan ATIP lebih efisien daripada OTIP.

KESIMPULAN

Analisis komposisi nuklida bahan bakar bekas RDE menggunakan MCNPX 2.6.0 telah dilakukan dengan dua jenis desain bahan bakar yaitu ATIP dan OTIP. Kedua desain *pebble* menunjukkan komposisi nuklida yang sama yaitu berjumlah 170 nuklida (14 aktinida dan 156 nonaktinida). Berdasarkan *relative error* yang telah dihitung, dapat disimpulkan bahwa ATIP lebih efisien digunakan karena hasil ke-

dua *pebble* mempunyai *error* yang kecil serta pembuatan OTIP cukup rumit dan lama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PTKRN-BATAN yang telah memberikan kesempatan kepada kami untuk melakukan penelitian dan kepada Wahid Luthfi, S.T., dan R. Andhika Putra Dwijayanto, S.T., yang telah mengarahkan dalam proses eksekusi MCNPX.2.6.0.

DAFTAR PUSTAKA

1. Adiwardojo, Ruslan, Parmanto E.M., Effendi E. Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya. Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2010.
2. Badan Tenaga Nuklir Nasional. Reaktor Daya Eksperimental. (www.batan.go.id).

3. Parmanto E.M, Irawan D. Mengenal PLTN dan prospeknya di Indonesia. Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2007.
4. Krane K.S. Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons Incorporate, 1988.
5. Agung A. Diktat Kuliah Analisis Reaktor Nuklir. Universitas Gadjah Mada, 2017.
6. Bruno J., Ewing R.C. Spent nuclear fuel. Journal of Elements 2006; Volume II: pp. 343.
7. Heriyanto M., Alfarizy G. Reaktivitas reaktor nuklir sebagai fungsi burnup dan waktu operasi reaktor. Institut Teknologi Bandung, 2015.
8. Xu Z. Design strategies for optimizing high Burnup fuel in pressurized water reactors. Massachusetts Institute of Technology, 2003.
9. Snoj L., Ravnik M. Calculation of power density with MCNP in TRIGA reactor. Jožef Stefan Institute, 2006.
10. Pelowitz D. B. MCNPXTM User's Manual". Los Alamos National Laboratory, 2008.