



## Analisis Pengaruh Penambahan Minor Aktinida Am-241 dan Np-237 pada Performa Sel Bahan Bakar Uranium Metallic U-10%wtZr

Muhamad Tauffan Hidayatullah Norman<sup>1</sup>, Fiber Monado<sup>2,\*</sup>), Menik Ariani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Prodi S2 Fisika, FMIPA, Universitas Sriwijaya

<sup>2</sup>Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Sriwijaya

Jl. Raya Palembang-Indralaya KM.32, Indralaya Indah, Kec. Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan, 30862

\*E-mail korespondensi: fibermonado@unsri.ac.id

### Info Artikel:

Dikirim:  
11 Desember  
2024

Revisi:  
29 Januari 2025

Diterima:  
10 Februari 2025

### Kata Kunci:

Gas cool-Fast  
Reactor; Nuclear  
Waste; SRAC

### Abstract

Nuclear reactors are capable of producing electricity using nuclear fuel in a sustainable system. Despite its benefits, the combustion of nuclear fuel in a reactor produces fission products known as nuclear waste. One type of nuclear waste is minor actinide, minor actinide is included in burnable poison so it can be recycled as additional fuel. This research was conducted to analyze the effect of the addition of minor actinides Am-241 and Np-237 on the burn-up performance of the Uranium Metallic U-10%wtZr fuel cell in a Gas cool-Fast Reactor with S-CO<sub>2</sub> gas coolant and stainless steel cladding material. SS-316. The fuel pin was designed to be cylindrical with a diameter of 1.4 cm and then tested by adding 0 – 8% minor actinide to the fuel. Calculations were carried out based on the neutron transport equation using the SRAC program which produces survey parameters : Kinf value, burn-up level, conversion ratio, and atomic density throughout the burn-up period of 120 years. The results show that there is a slight increase in the Kinf value for each minor actinide addition at the beginning to the end of the burn-up period. The total atomic density of Am-241 and Np-237 in the fuel added with minor actinides decreased as the burn-up period ended. The addition of minor actinides did not have a significant effect on the neutronic performance of U-10%wtZr fuel but was able to reduce the amount of Am-241 and Np-237 elements at the end of the burn-up period.

## PENDAHULUAN

Penggunaan energi global terus meningkat seiring dengan berkembangnya produk-produk berbasis listrik [1]. Menurut IEA, permintaan energi dunia diproyeksikan meningkat 45% pada tahun 2030, dengan laju pertumbuhan tahunan rata-rata 1,6% [2]. Kondisi ini menuntut ketersediaan sumber energi yang efisien dan berkelanjutan, salah satunya adalah energi nuklir yang dinilai unggul dalam perlindungan lingkungan dan mitigasi perubahan iklim [3]. Energi nuklir digunakan sebagai bahan bakar reaktor untuk menghasilkan listrik dan telah dikembangkan sejak tahun 1942, mulai dari generasi I hingga generasi IV. Saat ini, lebih dari 450 reaktor beroperasi di lebih dari 30 negara, dan jumlah ini diperkirakan terus bertambah, termasuk rencana Indonesia membangun reaktor generasi IV pada 2030 untuk mendukung target penurunan emisi

sebesar 29% [4]. Salah satu reaktor generasi IV adalah **Gas-cooled Fast Reactor (GFR)** [5], yang masih dalam tahap pengembangan. GFR dinilai lebih efisien karena memiliki rasio pembiakan bahan fisil yang tinggi dan mampu mengurangi radiotoksistas limbah [6–8]. GFR menggunakan gas pendingin seperti helium (He) atau karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) [9], dan bahan bakarnya berasal dari unsur radioaktif seperti Uranium dan Thorium [10,11], khususnya Uranium alam yang mengandung 99,3% U-238 dan 0,7% U-235 [12]. Untuk meningkatkan efisiensi, unsur tambahan seperti Zirconium juga digunakan [13,14].

Namun, pembakaran bahan bakar nuklir menghasilkan limbah radioaktif dengan waktu paruh yang sangat panjang [15]. Limbah ini berasal dari reaksi fisi berantai dan terbagi menjadi limbah yang dapat dan tidak dapat didaur ulang [16,17]. Salah satu limbah yang dapat didaur ulang adalah *burnable poison* atau racun bakar, yang berguna dalam mengelola reaktivitas dan memperpanjang masa operasi reaktor [18–20]. Jenis racun bakar ini termasuk **minor aktinida** seperti Amerisium (Am), Neptunium (Np), dan Curium (Cm), yang dapat ditransmutasi dalam reaktor cepat dan meningkatkan efisiensi bahan bakar [21,22]. Berbagai penelitian menunjukkan penambahan minor aktinida pada bahan bakar reaktor cepat berpendingin sodium dan gas menghasilkan peningkatan burn-up [22,23]. Studi desain reaktor cepat berpendingin S-CO<sub>2</sub> dengan bahan bakar uranium metalik menunjukkan nilai Keff yang baik untuk operasi reaktor, yaitu 1,0490 pada BOC dan 1,0598 pada EOC [24]. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung performa sel bahan bakar pada reaktor GFR berpendingin S-CO<sub>2</sub> dengan bahan bakar uranium metalik (U-10%wtZr) dan penambahan minor aktinida (Am-241 dan Np-237). Fokus utama adalah menganalisis pengaruh penambahan minor aktinida terhadap performa *burn-up* serta kontribusinya dalam mengurangi radiotoksistas limbah.

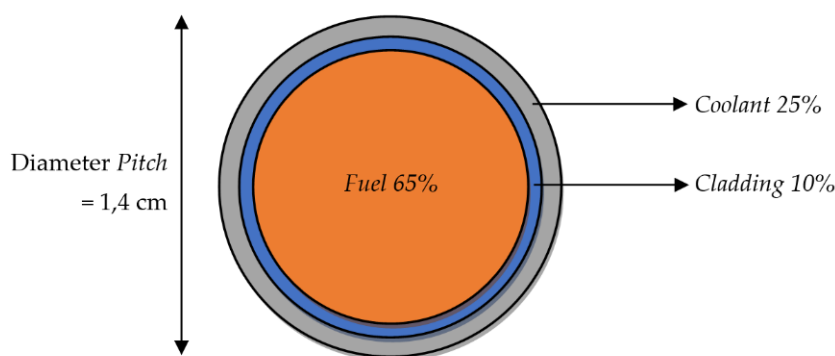
## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan menggunakan komputer dengan sistem operasi Linux Mint dan software SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*) dengan program paket data nuklida JENDL 4.0. Data hasil perhitungan SRAC kemudian diolah dengan menggunakan Microsoft Office Excel dan Origin. Menggunakan program SRAC, perhitungan dilakukan pada tingkat sel bahan bakar dengan menggunakan modul PIJ. Penginputan pada modul PIJ dengan memasukkan geometri sel bahan bakar termasuk densitas atom bahan bakar, jenis coolant, dan cladding yang digunakan. Kemudian simulasi perhitungan sel bahan bakar dilanjutkan dengan menambahkan dua jenis minor aktinida, yaitu Am-241 dan Np-237. Hasil dari perhitungan pada PIJ akan diperoleh parameter diantaranya, faktor multiplikasi infinite (Kinf), level burn-up, rasio konversi, dan densitas atom U-235, U-238, Pu-239, Am-241, dan Np-239 sepanjang waktu burn-up selama 120 tahun. Pin bahan bakar di desain berbentuk silinder dengan pendingin S-CO<sub>2</sub>, yang konsisten dengan spesifikasi desain GFR seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan geometri sel bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 1.

**Tabel 1. Spesifikasi Sel Bahan Bakar**

Parameter	Spesifikasi
Bahan Bakar	Uranium Metalic (U-10%wtZr) : Minor Aktinida (Am-241 dan Np-237), 100 – 92% : 0 – 8%
<i>Cladding</i>	<i>Stainless Steel (SS-316)</i>
<i>Coolant</i>	S-CO <sub>2</sub>
Fraksi Volume ( <i>Fuel:Cladding:Coolant</i> )	65%:10%:25%
Pitch pin diameter	1,4 cm
Geometri sel bahan bakar	Pin-Silinder 1D

Metode penelitian berisi tentang rancangan kegiatan penelitian, ruang lingkup atau objek, bahan dan alat utama, lokasi, teknik pengambilan data, teknik analisis data, definisi operasional variabel penelitian. Ketika menggunakan peralatan karakterisasi atau alat uji mohon dicantumkan jenis alat/tipe alat/merk alat. Sedangkan jika menggunakan bahan kimia dituliskan asal bahan (jika bahan alam misal: “batu pasir dari Kota Pangkalpinang”) atau merk/spesifikasi bahan, misal: HCl 37% (Merck).

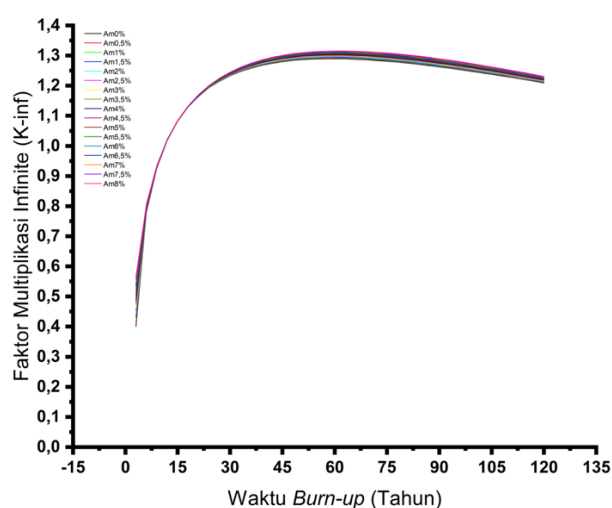


Gambar 1. Geometri Sel Bahan Bakar

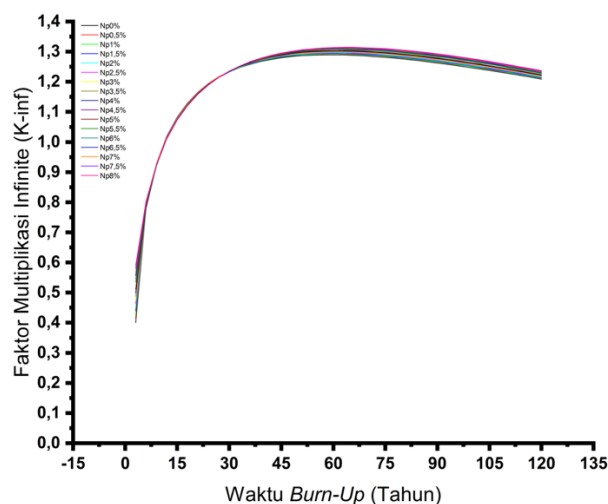
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Faktor Multiplikasi Infinite ( $K_{inf}$ )

Faktor multiplikasi infinite ( $K_{inf}$ ) menggambarkan perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan dalam satu generasi terhadap jumlah neutron yang dihasilkan pada generasi sebelumnya dengan memperhatikan reaktor tanpa adanya kebocoran neutron. Grafik perhitungan  $K_{inf}$  untuk periode waktu *burn-up* selama 120 tahun di tunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. (a) Faktor Multiplikasi Infinite ( $K_{inf}$ ) dengan penambahan Am-241;



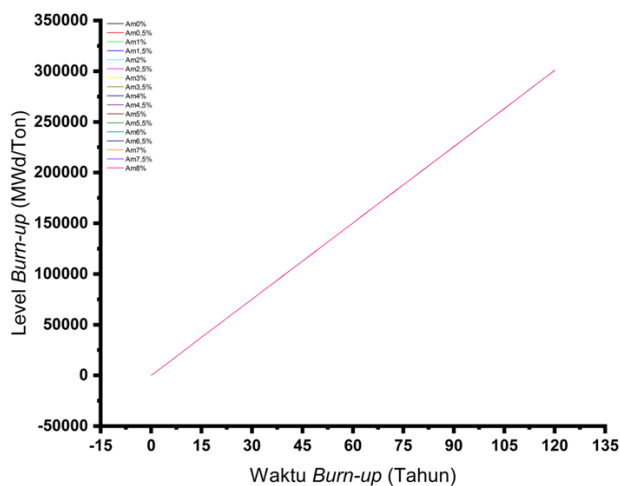
Gambar 2. (b) Faktor Multiplikasi Infinite ( $K_{inf}$ ) dengan penambahan Np-237.

Gambar 2 menunjukkan peningkatan faktor multiplikasi infinite secara terus menerus hingga mencapai titik maksimumnya yang terjadi akibat reaksi fisi dari atom U-235, transmudasi dari atom U-238, dan penangkapan neutron. Nilai  $K_{inf}$  meningkat secara bertahap seiring dengan

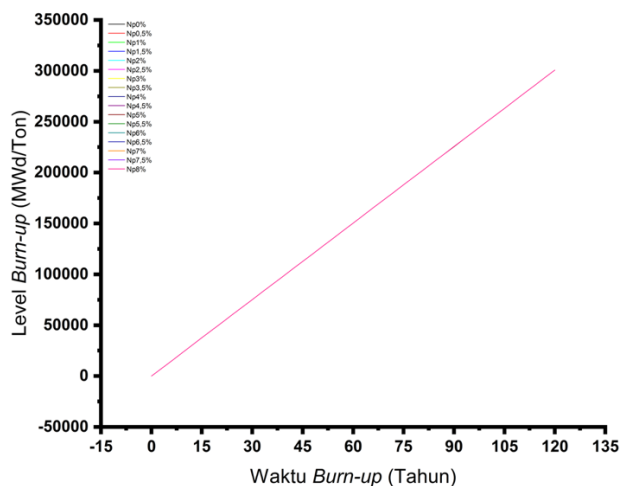
penambahan persentase jumlah minor aktinida Am-241. Penambahan amerisium hingga sebanyak 8%, nilai  $K_{inf}$  menunjukkan pada angka 0,565947 pada tahun ketiga. Kemudian dilanjutkan dengan penambahan minor aktinida yang berbeda yaitu Np-237. Terjadi peningkatan pada nilai  $K_{inf}$  yang sedikit lebih tinggi dibandingkan Am-241. Penambahan Np-237 sebanyak 8%, nilai  $K_{inf}$  menunjukkan angka 0,590064. Peningkatan nilai  $K_{inf}$  dapat dikatakan tidak signifikan ketika ditambahkan minor aktinida Am dan Np. Terlihat pada gambar 2 menunjukkan nilai  $K_{inf}$  tanpa penambahan minor aktinida yaitu 0,400565 pada tahun ketiga. Nilai  $K_{inf}$  yang bertambah tidak signifikan ketika ditambahkan minor aktinida ini disebabkan karena nilai *cross section* yang besar untuk reaksi penangkapan neutron pada Am-241 dan Np-237, sehingga di awal tahun pembakaran nilai  $K_{inf}$  menurun kemudian menuju di pertengahan tahun nilai  $K_{inf}$  meningkat akibat dari Am-241 dan Np-237 menangkap neutron dan menjadi bahan bakar fisil [25]. Dan pada pertengahan hingga akhir waktu pembakaran nilai  $K_{inf}$  mengalami sedikit penurunan akibat berkurangnya densitas atom dari U-235 dan U-238. Berdasarkan kedua grafik dari gambar 3.1.a dan 3.1.b tidak ada pengaruh yang signifikan terhadap nilai  $K_{inf}$  pada reaktor akibat dari penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237 yang divariasikan dari 0,5 – 8%. Walaupun tidak signifikan, peningkatan nilai  $K_{inf}$  akibat penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237 terjadi karena transmudasi cepat yang terjadi pada unsur Am-241 dan Np-237 akibat fluks neutron cepat dan berenergi tinggi yang dihasilkan oleh reaktor cepat (*fast reactor*), sehingga merubah unsur minor aktinida yang fertil menjadi unsur yang fisil dan menghasilkan energi [24].

### Level Burn-up

Level *burn-up* mengindikasikan tingkat energi yang dilepaskan per satuan massa bahan bakar. Menggunakan satuan MWd/Ton untuk menunjukkan jumlah daya yang dihasilkan dalam satu hari per setiap ton bahan bakar.



Gambar 3. (a) Level *Burn-up* dengan penambahan Am-241;



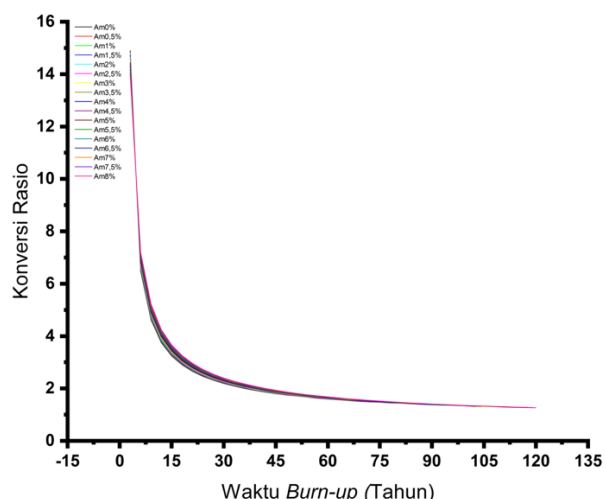
Gambar 3. (b) Level *Burn-up* dengan penambahan Np-237

Grafik pada gambar 3 menunjukkan level *burn-up* pada proses pembakaran bahan bakar dengan penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237. Kedua grafik menunjukkan tidak ada perbedaan terhadap perubahan level *burn-up* sepanjang waktu pembakaran akibat penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237. Terlihat pada penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237 sebanyak 8% tidak ada perubahan yang signifikan terhadap bahan bakar yang tidak ditambahkan minor aktinida yang hanya berkisar 3 – 95 MWd/Ton sepanjang waktu pembakaran. Grafik pada gambar 3 juga menunjukkan periode *burn-up* yang berbanding lurus dengan waktu *burn-up* terlihat dari grafik yang semakin lama semakin meningkat. Peningkatan

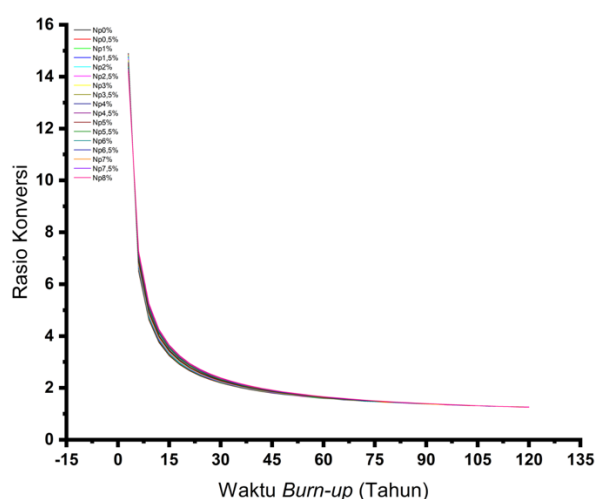
level *burn-up* pada penambahan minor aktinida terjadi akibat proses transmudasi yang terjadi pada unsur Am-241 dan Np-237 menjadi unsur fisil akibat tembakan fluks neutron cepat dan bernergi tinggi [24]. Tidak adanya perbedaan nilai level *burn-up* antara bahan bakar yang tidak ditambahkan minor aktinida Am-241 dan Np-237 dan bahan bakar dengan penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237 sebanyak 0 – 8 % dikarenakan penambahan minor aktinida ini di gunakan sebagai unsur pengganti bahan bakar, ini sesuai dengan deskripsi pada spesifikasi sel bahan bakar yaitu penambahan setiap 0,5% minor aktinida menggantikan 0,5% dari unsur uranium alam pada komposisi bahan bakar uranium *metallic* (90% uranium alam, 10% *zirconium*), sehingga transmudasi minor aktinida akibat fluks neutron cepat yang terjadi pada reaktor cepat menggantikan energi yang dihasilkan oleh transmudasi atom U-238 dan fisi U-235 [26].

### Konversi Rasio

Konversi rasio menunjukkan rasio antara jumlah atom bahan bakar fisil yang diproduksi dan jumlah atom yang dikonsumsi sepanjang waktu pembakaran di dalam reaktor nuklir. Konversi rasio penting di perhatikan untuk melihat tingkat efisiensi reaktor dalam mengubah bahan bakar menjadi energi.



**Gambar 4. (a) Konversi Rasio dengan penambahan Am-241**



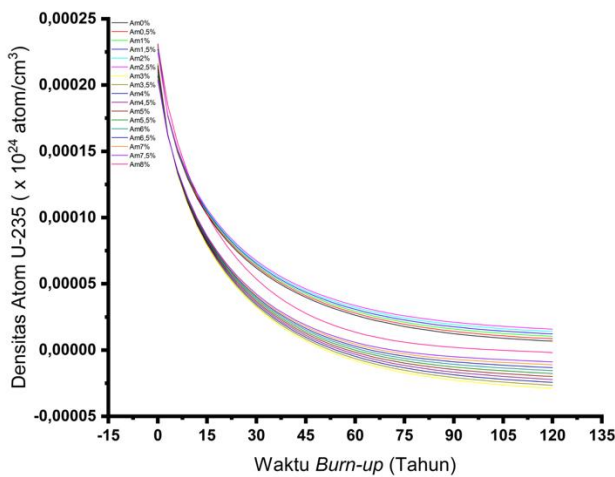
**Gambar 4. (b) Konversi Rasio dengan penambahan Np-237**

Gambar 4 menunjukkan grafik konversi rasio sepanjang periode pembakaran sel bahan bakar selama 120 tahun. Grafik konversi rasio mengalami penurunan yang signifikan pada awal tahun pembakaran dan kemudian menurun secara perlahan pada pertengahan dan akhir waktu *burn-up*. Penurunan ini tentunya disebabkan akibat dari pembakaran bahan bakar selama periode *burn-up* dan akhirnya habis. Grafik pada gambar 4 juga menunjukkan pada tahun ketiga pembakaran nilai konversi rasio untuk bahan bakar yang ditambahkan dengan minor aktinida Am-241 dan Np-237 lebih rendah dibandingkan bahan bakar yang tidak ditambahkan dengan minor aktinida. Nilai konversi rasio untuk bahan bakar dengan penambahan Am-241 dan Np-237 masing-masing sebesar 14.009585 dan 14.206967 sedangkan untuk yang bahan bakar tanpa penambahan minor aktinida sebesar 14.903816. Artinya terjadi penurunan nilai konversi rasio ketika bahan bakar ditambahkan dengan minor aktinida. Dan penurunan nilai konversi rasio ini terus terjadi setiap penambahan minor aktinida sebanyak 0,5 – 8% pada tahun ketiga pembakaran. Namun mulai tahun kesembilan periode pembakaran, nilai konversi rasio untuk bahan bakar yang ditambahkan dengan minor aktinida sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar yang tidak ditambahkan minor aktinida. Hingga pada akhir periode *burn-up* nilai

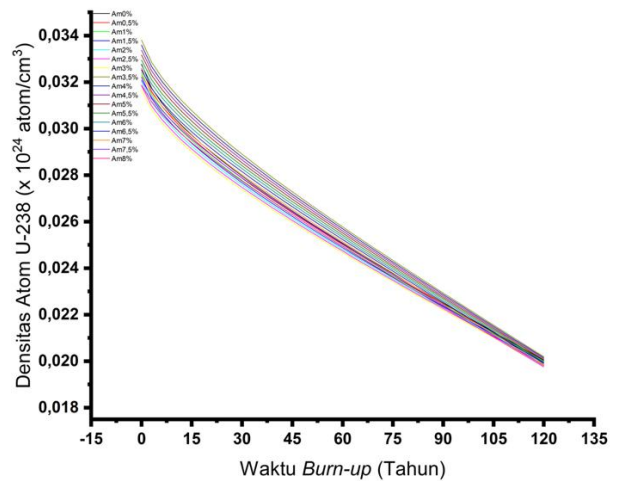
konversi rasio tidak terdapat perbedaan yang signifikan. Artinya tingkat persentase penambahan minor aktinida berpengaruh terhadap nilai konversi rasio selama periode *burn-up* yang dikarenakan pengaruh nilai *cross section* dari minor aktinida Am-241 dan Np-237 dan akan berdampak jangka panjang terhadap operasional reaktor nuklir.

**Densitas Atom**

Densitas atom diperlukan untuk melihat jumlah populasi atom yang dihasilkan dari reaksi fisi selama periode *burn-up* pada reaktor nuklir. Bahan bakar utama yang digunakan adalah U-235 dan U238. Hasil dari reaksi fisi dan transmudasi dari U-235 dan U-238 akan menghasilkan unsur-unsur lain salah satunya yaitu Pu-239. Selain itu perlu diamati juga densitas atom dari unsur-unsur minor aktinida yang digunakan yaitu Am-241 dan Np-237.

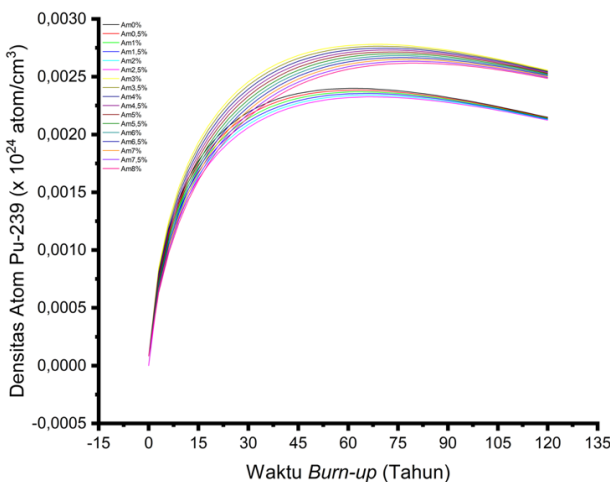


**Gambar 5. (a) Densitas Atom U-235 dengan penambahan Am-241 0 - 8%**

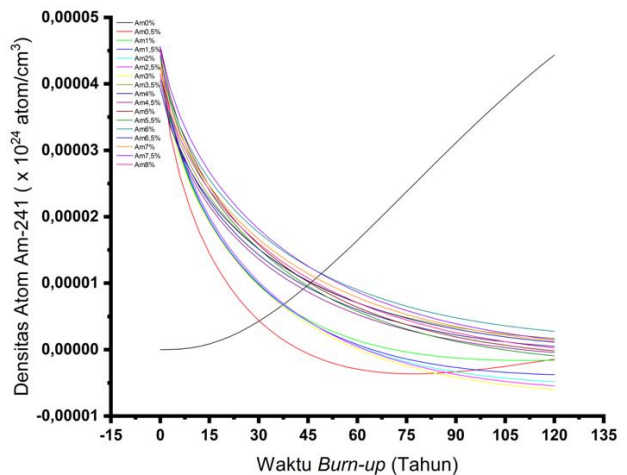


**Gambar 5. (b) Densitas Atom U-238 dengan penambahan Am-241 0 - 8%**

Gambar 5.(a) menunjukkan grafik densitas atom U-235 yang dihasilkan selama periode *burn-up*, terlihat densitas atom U-235 mengalami penurunan seiring dengan berakhirnya periode *burn-up*. Gambar 5.(b) menunjukkan grafik densitas atom U-238 yang juga mengalami penurunan jumlah atom selama periode pembakaran.

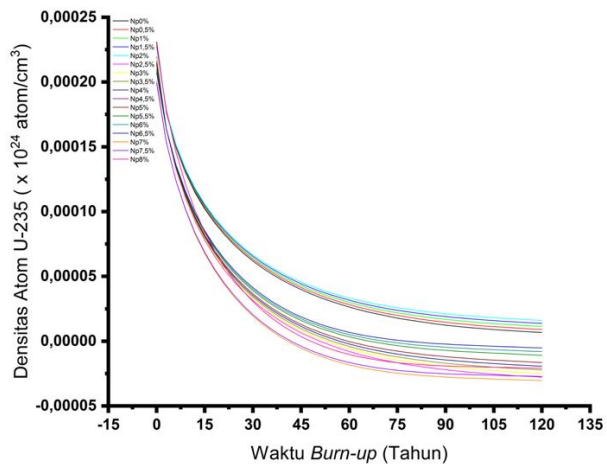


**Gambar 5. (c) Densitas Atom Pu-239 dengan penambahan Am-241 0 - 8%**

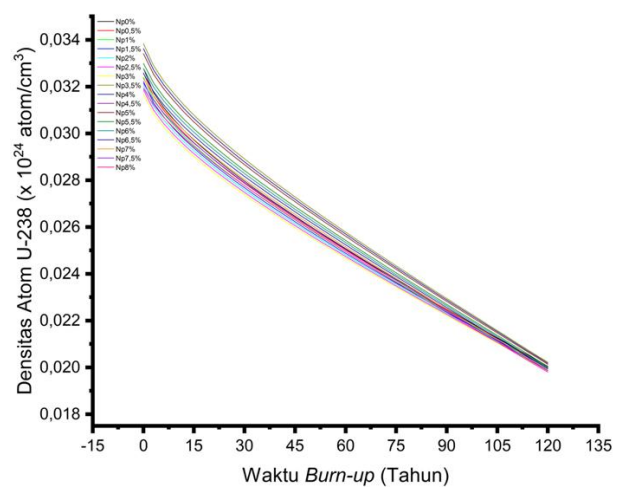


**Gambar 5. (d) Densitas Atom Am-241 dengan penambahan Am-241 0 - 8%**

Gambar 5.(c) menunjukkan peningkatan densitas atom yang signifikan dari awal hingga pertengahan periode burn-up dan mencapai titik maksimumnya. Kemudian mulai pertengahan hingga akhir periode burn-up densitas atom Pu-239 mengalami penurunan secara bertahap. Gambar 5.(d) menunjukkan densitas atom Am-241, grafik menunjukkan penurunan jumlah atom Am-241 pada bahan bakar yang ditambahkan minor aktinida Am-241. Sedangkan untuk bahan bakar tanpa penambahan minor aktinida Am-241 kurva grafik menunjukkan peningkatan densitas atom Am-241.

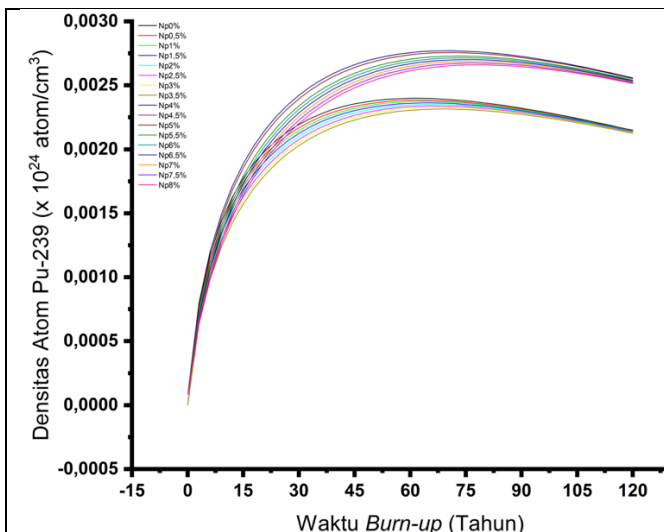


Gambar 6. (a) Densitas Atom U-235 dengan penambahan Np-237 0 - 8%

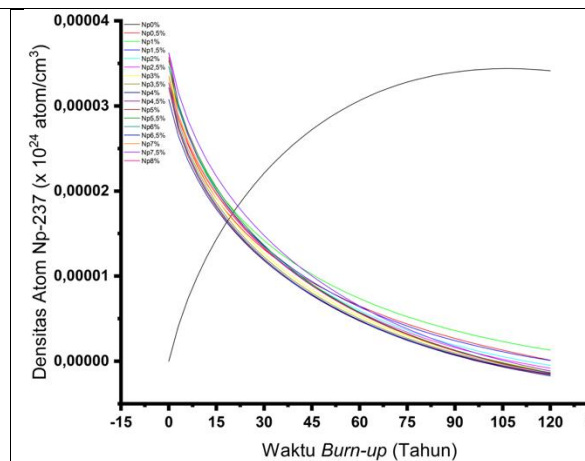


Gambar 6. (b) Densitas Atom U-238 dengan penambahan Np-237 0 - 8%;

Gambar 6 menunjukkan grafik densitas atom untuk U-235, U-238, Pu-239, dan Np-237 selama periode *burn-up* untuk bahan bakar yang ditambahkan minor aktinida Np-237 sebanyak 0 - 8%. Gambar 6.(a) dan 6.(b) menunjukkan densitas atom U-238 dan U-235 yang mengalami penurunan hingga akhir periode *burn-up* akibat dari proses fisi dan transmudasi yang terjadi selama proses pembakaran. Hasil dari proses fisi dan transmudasi pada U-235 dan U-238 menghasilkan unsur-unsur lain, salah satunya Pu-239.



Gambar 6. (c) Densitas Atom Pu-239 dengan penambahan Np-237 0 - 8%



Gambar 6. (d) Densitas Atom Np-237 dengan penambahan Np-237 0 - 8%

Gambar 6.(c) menunjukkan densitas atom Pu-239 yang mengalami kenaikan jumlah atom hingga titik maksimumnya pada pertengahan periode *burn-up* dan mengalami penurunan secara bertahap pada pertengahan hingga akhir periode *burn-up*. Gambar 6.(d) menunjukkan densitas atom Np-237 yang menurun selama periode *burn-up* untuk bahan bakar yang ditambahkan minor aktinida Np-237 sebanyak 0 – 8%. Sedangkan bahan bakar tanpa penambahan minor aktinida menunjukkan densitas atom yang meningkat seiring dengan berakhirnya periode *burn-up*.

**Tabel 2. Perbandingan Jumlah Densitas Atom Am-241 Sepanjang Periode *Burn-up* dan Jumlah Atom Am-241 yang Hilang**

Penambahan Minor Aktinida Am-241 (%)	Densitas Atom (atom/cm <sup>3</sup> )		Jumlah Densitas Atom yang Hilang Sepanjang Periode <i>Burn-up</i>	Persentase Jumlah Densitas Atom yang Hilang Sepanjang Periode <i>Burn-up</i>
	Tahun ke-			
	0	120		
0	0.00E+00	4.44E+19	0	0%
0,5	1.83E+20	5.00E+19	1.33E+20	73%
1	3.67E+20	5.60E+19	3.11E+20	85%
1,5	5.50E+20	6.23E+19	4.88E+20	89%
2	7.33E+20	6.90E+19	6.64E+20	91%
2,5	9.16E+20	7.61E+19	8.40E+20	92%
3	1.10E+21	8.35E+19	1.02E+21	92%
3,5	1.28E+21	9.14E+19	1.19E+21	93%
4	1.47E+21	9.98E+19	1.37E+21	93%
4,5	1.65E+21	1.09E+20	1.54E+21	93%
5	1.83E+21	1.18E+20	1.71E+21	94%
5,5	2.01E+21	1.27E+20	1.88E+21	94%
6	2.20E+21	1.38E+20	2.06E+21	94%
6,5	2.38E+21	1.48E+20	2.23E+21	94%
7	2.56E+21	1.59E+20	2.40E+21	94%
7,5	2.75E+21	1.71E+20	2.58E+21	94%
8	2.93E+21	1.83E+20	2.75E+21	94%

Penurunan densitas atom Am-241 dan Np-237 dapat dilihat pada tabel 2 dan tabel 3 yang berisi perbandingan jumlah densitas atom Am-241 dan Np-237 pada tahun ke-0 dan tahun ke-120. Terlihat jelas pada bahan bakar yang ditambahkan dengan minor aktinida Am-241 dan Np-237 sebanyak 0,5 – 8%, terjadi penurunan densitas atom Am-241 dan Np-237. Berbanding terbalik dengan bahan bakar yang tidak ditambahkan minor aktinida Am-241 dan Np-237, densitas atom Am-241 dan Np-237 mengalami peningkatan dari 0 pada tahun ke-0 menjadi  $4,44 \times 10^{19}$  atom/cm<sup>3</sup> pada tahun ke-120 untuk Am-241 dan untuk Np-237 terjadi peningkatan densitas atom dari 0 pada tahun ke-0 menjadi  $3,41 \times 10^{19}$  pada tahun ke-120. Terlihat juga pada tabel 2 dan tabel 3, jumlah densitas atom Am-241 yang hilang sepanjang periode *burn-up* tertinggi pada penambahan Am-241 sebanyak 5 – 8% dengan persentase atom yang hilang sebanyak 94% dan untuk jumlah densitas atom Np-237 yang hilang sepanjang periode *burn-up* tertinggi pada penambahan Np-237 sebanyak 3,5 – 8% dengan persentase atom yang hilang sebanyak 91%. Pengurangan densitas atom Am-241 dan Np-237 terbanyak terjadi pada penambahan persentase minor aktinida yang tinggi pada bahan bakar, ini artinya semakin tinggi

persentase penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237 pada bahan bakar, maka semakin banyak juga atom Am-241 dan Np-237 yang mengalami transmudasi dan berubah menjadi atom fisil akibat dari fluks neutron cepat dan berenergi tinggi yang dihasilkan reaktor cepat.

**Tabel 3. Perbandingan Jumlah Densitas Atom Np-237 Sepanjang Periode *Burn-up* dan Jumlah Atom Np-237 yang Hilang**

Penambahan Minor Aktinida Np-237 (%)	Densitas Atom (atom/cm <sup>3</sup> )		Jumlah Densitas Atom yang Hilang Sepanjang Periode <i>Burn-up</i>	Persentase Jumlah Densitas Atom yang Hilang Sepanjang Periode <i>Burn-up</i>
	Tahun ke-			
	0	120		
0	0.00E+00	3.41E+19	0	0%
0,5	1.83E+20	4.49E+19	1.38E+20	75%
1	3.67E+20	5.61E+19	3.11E+20	85%
1,5	5.50E+20	6.79E+19	4.82E+20	88%
2	7.33E+20	8.02E+19	6.53E+20	89%
2,5	9.17E+20	9.31E+19	8.24E+20	90%
3	1.10E+21	1.07E+20	9.93E+20	90%
3,5	1.28E+21	1.21E+20	1.16E+21	91%
4	1.47E+21	1.35E+20	1.34E+21	91%
4,5	1.65E+21	1.51E+20	1.50E+21	91%
5	1.65E+21	1.51E+20	1.50E+21	91%
5,5	2.02E+21	1.83E+20	1.84E+21	91%
6	2.20E+21	2.01E+20	2.00E+21	91%
6,5	2.38E+21	2.19E+20	2.16E+21	91%
7	2.57E+21	2.38E+20	2.33E+21	91%
7,5	2.75E+21	2.57E+20	2.49E+21	91%
8	2.93E+21	2.77E+20	2.65E+21	91%

## KESIMPULAN

Nilai faktor multiplikasi infinite ( $K_{inf}$ ) setelah penambahan minor aktinida hingga 8% belum mencapai keadaan kritisnya pada awal periode *burn-up*. Namun terjadi peningkatan nilai  $K_{inf}$  setiap penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237. Terjadi peningkatan level *burn-up* setelah ditambahkan minor aktinida Am-241 dan Np-237 pada bahan bakar. Nilai konversi rasio menurun setelah ditambahkan minor aktinida Am-241 dan Np-237 pada periode awal *burn-up*. Namun menuju pertengahan hingga akhir periode *burn-up* terjadi peningkatan nilai konversi rasio. Densitas atom U-235 dan U-238 mengalami penurunan selama periode *burn-up* akibat proses fisi dan transmudasi selama pembakaran. Sedangkan densitas atom Pu-239 mengalami peningkatan hingga pertengahan periode *burn-up*, kemudian menurun seiring dengan berakhirnya periode *burn-up*. Densitas atom Am-241 dan Np-237 untuk bahan bakar yang ditambahkan minor aktinida Am-241 dan Np-237 mengalami penurunan yang signifikan selama periode *burn-up*. Sedangkan Densitas atom Am-241 dan Np-237 untuk bahan bakar tanpa penambahan minor aktinida mengalami kenaikan. Sehingga penambahan unsur minor aktinida

Am-241 dan Np-237 pada bahan bakar reaktor nuklir GFR terbukti mampu mengurangi jumlah Am-241 dan Np-237 tanpa harus mempengaruhi performa *burn-up* pada sel bahan bakar.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. R. Septiana, E. Kartini, W. Honggowiranto, S. Sudaryanto, and R. Hidayat, “Efek Penggunaan Cairan Ionik sebagai Aditif terhadap Konduktivitas Ionik Elektrolit Baterai Ion Litium,” *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 9, no. 02, 2019
- [2] D. C. P. Putra, Imani Rizkia Dawami, Muhammad Rofiul Haq, Achmad Daffa Danang Luthfiansyah, Alfian Mubarak, and Dafit Ari Prasetyo, “Konsep Rancang Bangun Smart Home Base Berbasis IOT untuk Skala Perumahan,” *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 1, no. 2, 2023
- [3] C. A. Pratama, M. Priyatna, and Y. Adharani, “Kesiapan Regulasi Indonesia dalam Mengelola Energi Nuklir serta Dampaknya Terhadap Lingkungan Hidup,” *LITRA: Jurnal Hukum Lingkungan, Tata Ruang, dan Agraria*, vol. 3, no. 1, 2023
- [4] H. Susiati *et al.*, *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia (Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission)*, no. May. 2023.
- [5] A. Ibrahim, “Neutronic comparative analysis between DOE and CEA model designs for fourth generation 2400 MW-th gas cooled fast reactor,” *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, vol. 16, no. 4, 2023
- [6] A. Z. Paydar, S. K. M. Balgehshiri, and B. Zohuri, “Next generation nuclear plant (NGNP),” in *Advanced Reactor Concepts (ARC)*, 2023
- [7] S. Novalianda, “Power Flattening Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U, Pu)N,” *Journal of Electrical Technology*, vol. 4, no. 3, 2019.
- [8] F. H. Irka, Z. Su’ud, D. Irwanto, S. N. Khotimah, and H. Sekimoto, “Analisis Kekritisian dan Rasio Konversi Reaktor Cepat Berpendingin Gas dengan Variasi Fraksi Bahan Bakar UN-PuN Menggunakan Skema Burn-up Modified CANDLE Arah Radial,” *Newton-Maxwell Journal of Physics*, vol. 4, no. 1, 2023
- [9] R. Riska, D. Fitriyani, and F. H. Irka, “Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>),” *Jurnal Fiskas Unand*, vol. 5, pp. 28–34, 2016.
- [10] W. Sardi, D. Fitriyani, and F. H. Irka, “Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Umur Teras dan Daya Reaktor,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 7, no. 2, 2018
- [11] S. Novalianda, P. M. Sihombing, and F. N. Hulu, “Studi Desain Sel Bahan Bakar Thorium Nitride (ThN) pada Gas-Cooled Fast Reactor,” 2022.
- [12] R. Darmawati, M. Ariani, and F. Monado, “Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur Panjang Berpendingin S-CO<sub>2</sub> dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 9, no. 3, 2020
- [13] V. Vionita, F. Monado, M. Ariani, and I. Royani, “Perhitungan Desain Konsep Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida Superkritis dan Berbahan Bakar Uranium Metalik Alam,” *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, vol. 10, no. 2, 2022
- [14] F. Al Afghani, Yanlinastuti, A. S. D. Putri, Y. D. A. Susanto, and R. Sigit, “Pengaruh Suhu Hydriding Terhadap Laju Korosi Material Struktur Reaktor Nuklir Berbasis Paduan Zirconium dan Baja Tahan Karat,” *Majalah Ilmiah Pengelolaan Instalasi Nuklir*, 2019.
- [15] M. L. Terranova and O. A. P. Tavares, “Trends and Perspectives on Nuclear Waste Management: Recovering, Recycling, and Reusing,” *Journal of Nuclear Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 299–317, Aug. 2024

- [16] Ferhat Aziz, *Pemanfaatan Pemodelan dan Simulasi Berbasis Komputasi dalam Pengembangan Reaktor Nuklir*. 2023
- [17] P. Ramadania, “Postur Kerja Pekerja Pengelolaan Limbah Radioaktif Padat di Instalasi Nuklir X : Potensi Risiko dan Rekomendasi Pengendalian,” *Reaktor : Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, vol. 19, no. 1, 2022, doi: 10.17146/bprn.2022.19.1.6537.
- [18] D. Hariyanto and S. Permana, “Three-dimensional (X-Y-Z) Core Design of Long-Life Pressurized Water Reactor Using (Th-U)O<sub>2</sub> Fuels with The Addition of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pa-231 as Burnable Poisons,” *Indonesian Journal of Physics*, vol. 31, no. 1, 2020
- [19] S. M. Reda, S. S. Mustafa, and N. A. Elkhawas, “Investigating the Performance and safety features of Pressurized water reactors using the burnable poisons,” *Ann Nucl Energy*, vol. 141, 2020, doi: 10.1016/j.anucene.2020.107354.
- [20] M. L. Grossbeck and J.-P. A. Renier, “Development Of Improved Burnable Poisons For Commercial Nuclear Power Reactors Final Report on NERI Project Number 99-0074,” *Other Information: PBD: 30 Sep 2003*, no. 99, 2003.
- [21] W. E. Russell II, C. Monetta, and L. Trosman, “Burnable poison materials and apparatuses for nuclear reactors and methods of using the same,” Oct. 20, 2010
- [22] H. Guo, T. Kooyman, P. Sciora, and L. Buiron, “Application of Minor Actinides as Burnable Poisons in Sodium Fast Reactors,” *Nucl Technol*, vol. 205, no. 11, 2019
- [23] W. Gontina, F. Monado, and M. Ariani, “Studi Parameter Burn-up Sel Bahan Bakar Uranium Nitrit Dengan Penambahan Minor Aktinida Berpendingin S-CO<sub>2</sub>,” *Jurnal Penelitian Sains*, vol. 24, no. 3, 2022
- [24] R. Darmawati, M. Ariani, and F. Monado, “Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur Panjang Berpendingin S-CO<sub>2</sub> dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 9, no. 3, pp. 401–407, Aug. 2020
- [25] R. D. Syarifah and Z. Suud, “The prospect of uranium nitride (UN) and mixed nitride fuel (UN-PuN) for pressurized water reactor,” in *AIP Conference Proceedings*, 2015
- [26] V. V. Korobeinikov, V. V. Kolesov, and A. V. Mikhalev, “Comparison of the minor actinide transmutation efficiency in models of a fast neutron uranium-thorium fueled reactor,” *Nuclear Energy and Technology*, vol. 8, no. 1, 2022