

Research Articles

Perhitungan *Burnup* Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride

Sari Novalianda^{1*}, Andri Ramadhan¹, Zaki Su'ud²

¹Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

²Program Studi Fisika, Institut Teknologi Bandung, Jawa Barat, Indonesia

Received 16 Mei 2020; Accepted 27 Mei 2020; Published 31 Mei 2020

<p>Keyword: Burnup; GFR; Uranium</p>	<p>ABSTRACT Research on nuclear power plants as one of alternative energy sources is growing rapidly along with the increasing need for energy, especially electrical energy. The Calculation burnup design of the Uranium Nitride-based Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) reactor with helium as the coolant. Neutronic analysis is calculated using a Standard Reactor Analysis Code (SRAC) program. Burnup level calculations using natural uranium and enrichment of Uranium 235 from 1% to 10% produce energy of 167 GWd / ton for 50 years. Atomic Density of Uranium 235 and Uranium 238 will be reduced during burnup and Plutonium will be created at the beginning of the burnup. @2020 Published by UP2M, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University</p>
<p>Kata Kunci: <i>Burnup</i>; GFR; Uranium</p>	<p>ABSTRAK: Riset tentang PLTN sebagai salah satu sumber energi alternatif berkembang pesat seiring dengan semakin bertambahnya kebutuhan akan energi terutama energi listrik. Perhitungan <i>burnup</i> Desain reaktor <i>Gas-Cooled Fast Reactor</i> (GFR) berbasis bahan bakar Uranium Nitride dengan helium sebagai pendinginnya. Analisis neutronik yang dihitung menggunakan separangkat program <i>Standard Reactor Analysis Code</i> (SRAC). Perhitungan level <i>burnup</i> menggunakan uranium alam dan pengayaan Uranium 235 sebesar 1% sampai 10% menghasilkan energi sebesar 167 GWd/ton selama 50 tahun waktu <i>burnup</i>nya. Densitas Atom dari Uranium 235 dan Uranium 238 akan berkurang selama <i>burnup</i> dan akan mulai tercipta Plutonium di awal <i>burnup</i>. @2020 Published by UP2M, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University</p>

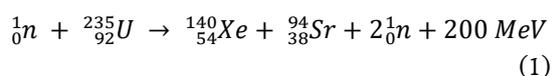
* Corresponding author.

E-mail address: sari_novalianda@yahoo.com

PENDAHULUAN

Reaktor nuklir mulai dikembangkan sebagai sumber energi alternatif sejak awal tahun 1950-an dan sejak saat itu teknologi nuklir berkembang pesat. Perkembangan reaktor nuklir dimulai dari generasi I sampai generasi IV. Reaktor generasi IV memiliki keunggulan dibidangnya yaitu selain menghasilkan daya listrik tetapi juga dapat menghasilkan energi termal, dengan siklus bahan bakarnya tertutup dan sistem keselamatannya dibuat secara *inherent* dan *passive safety*. Salah satu jenis reaktor generasi IV adalah *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR) yaitu reaktor cepat yang memanfaatkan spektrum neutron cepat dan menggunakan helium sebagai pendingin [1].

Prinsip kerja reaktor nuklir sama dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada bahan bakar yang digunakan dan sumber energi. Bahan bakar reaktor nuklir dibedakan atas dua jenis material yaitu bahan fisi contohnya Uranium 235, Plutonium 239 dan bahan fertil seperti Uranium 238, Thorium 232 [2]. Untuk sumber energi pada pembangkit listrik konvensional berasal dari pembakaran fosil yang menghasilkan polusi dan pencemaran udara. Sedangkan pada reaktor nuklir sumber energi berasal dari reaksi fisi [3].



Reaksi fisi uranium seperti Pers (1) menghasilkan Neutron. Neutron yang dihasilkan dapat menumbuk kembali inti uranium untuk membentuk fisi selanjutnya. Mekanisme akan terus terjadi dalam waktu yang sangat cepat hingga membentuk reaksi fisi berantai. Pada reaksi fisi yang dihasilkan oleh reaktor nuklir tidak menghasilkan gas CO₂ dan efek rumah kaca.

Riset tentang reaktor nuklir di Indonesia di kembangkan oleh BATAN. BATAN telah berhasil membangun tiga reaktor nuklir yang difungsikan sebagai reaktor riset yaitu Reaktor TRIGA 2000 Bandung, Reaktor Kartini Yogyakarta dan Reaktor Serpong. Indonesia juga aktif bergabung dalam Badan Tenaga Atom Internasional – *International Atomic Energy Agency* (IAEA) [4].

BATAN berencana untuk membangun sebuah reaktor daya eksperimental (RDE) yang akan digunakan untuk pembangkit listrik, pembangkit panas dan memproduksi hidrogen. Penguasaan teknologi reaktor nuklir sangatlah penting mengikat Indonesia sedang mengalami krisis energi, sehingga dibutuhkan sumber Energi Baru dan Terbarukan (EBT) yang salah satunya adalah energi nuklir. Dimana nuklir adalah energi yang bersih tanpa menghasilkan polusi udara. Hal ini mendukung upaya penurunan emisi rumah kaca sebagaimana Peraturan Presiden Nomor 61 tahun 2011 tentang Rencana aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca.

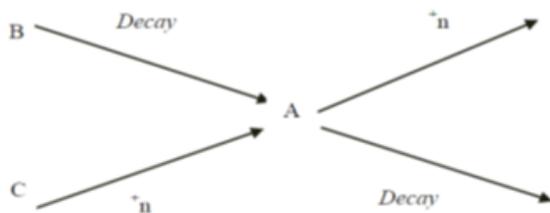
TINJAUAN PUSTAKA

Desain sebuah reaktor nuklir memerlukan analisis yang akurat yaitu meliputi analisis neutronik, termal dan keselamatan. Pada analisis neutronik terkait dengan pengendalian jumlah bahan bakar yang digunakan. Salah satu dalam perhitungan analisis neutronik yaitu perhitungan *burnup*.

Perhitungan *burnup* dilakukan guna mengetahui karakteristik perubahan isotop dalam reaktor yaitu pada manajemen menggunakan bahan bakar yang meliputi perhitungan penyusutan dan produksi isotop serta banyaknya energi yang dihasilkan per satuan waktu bahan bakar yang dinyatakan dalam Mega Watt-hari (MWd) per ton bahan bakar [5].

Perhitungan *burnup* berkaitan dengan perubahan jangka panjang (hari-bulan dan tahun) komposisi bahan-bahan dalam reaktor akibat berbagai reaksi nuklir yang terjadi saat pengoperasian reaktor nuklir. Dimana bahan pecahan fisi jumlahnya sangat banyak (lebih dari 1200 nuklida) dan karakteristiknya sangat beragam [6].

Persamaan kecepatan reaksi menggambarkan densitas jumlah inti dalam teras yang dapat diperoleh dengan menggunakan keseimbangan yang sederhana. Misalkan $N_A(r,t)$ adalah densitas untuk nuklida jenis A, maka persamaan kecepatan reaksi secara umum terhadap jumlah produksi peluruhan (Gambar 1).



Gambar 1. Prinsip Keseimbangan Nuklida A

dengan bentuk persamaannya:

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - \left[\sum_g \sigma_{Ag}^A \phi_g \right] N_A + \lambda_B N_B + \left[\sum_g \sigma_{Ag}^C \phi_g \right] N_C \tag{2}$$

Dimana suku $\lambda_A N_A$ menyatakan bagian yang hilang karena peluruhan radioaktif, sedangkan $[\sum_g \sigma_{Ag}^A \phi_g] N_A$ adalah bagian yang hilang karena tangkapan neutron, $\lambda_B N_B$ merupakan nuklida tambahan A akibat peluruhan B menjadi A dan $[\sum_g \sigma_{Ag}^C \phi_g] N_C$ adalah perubahan C menjadi A melalui tangkapan neutron [7]:

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_{a,i} \phi) N_i + \sum_m S_{m,i} N_m \tag{3}$$

dimana N_i adalah densitas atom inti ke-i, λ_i adalah konstanta peluruhan ke-i, $\sigma_{a,i}$ adalah penampang lintang absorpsi mikroskopis, ϕ adalah fluks neutron, $S_{m,i}$ adalah kecepatan produksi inti ke-i dari inti ke-m.

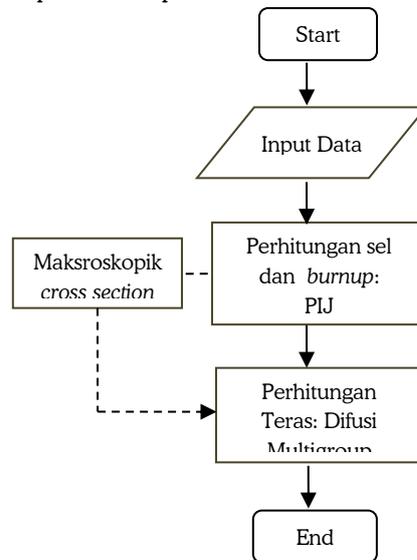
METODE PENELITIAN

Parameter desain reaktor GFR pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Desain Reaktor GFR

Parameter	Spesifikasi
Sel bahan bakar (<i>Fuel</i>)	Uranium Nitride
<i>Cladding</i>	(UN)
<i>Coolant</i>	<i>Stainless Steel</i>
Pengayaan U-235	(SS316)
Fraksi Volume:	Helium
<i>Fuel/Cladding/Coolant</i>	1 – 10 %
Diameter <i>Pin Pitch</i>	60%/10%/30%
Geometri Cell	
Periode <i>Refueling</i>	1,4 cm
	Silinder
	10 Tahun

Analisis perhitungan neutronik pada penelitian ini menggunakan seperangkat program *Standard Reactor Analysis Code (SRAC)* yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency (JAEA)* [8]. Diagram alur penelitian reaktor GRF dapat dilihat pada Gambar 2.

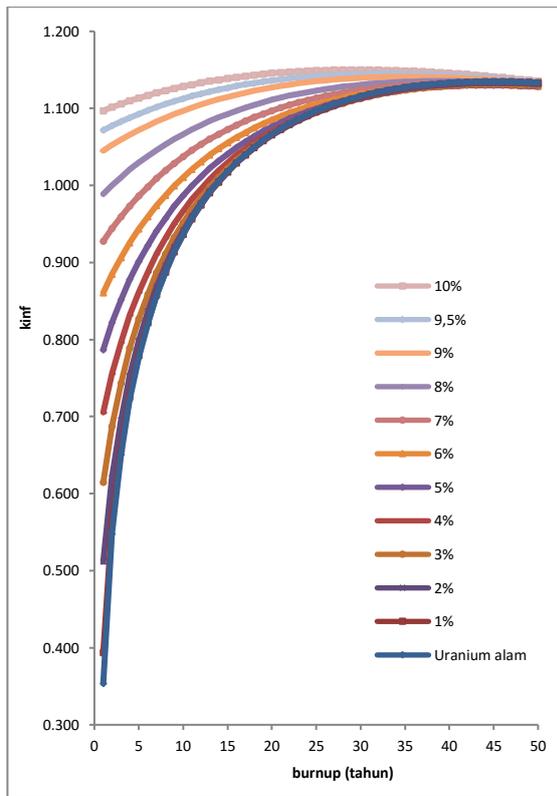


Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

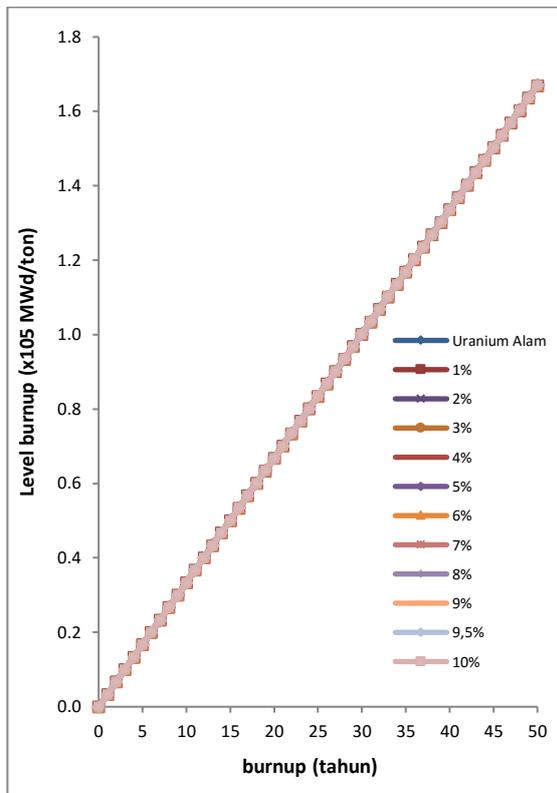
HASIL DAN PEMBAHASAN

Faktor multiplikasi infinitif (k_{inf}) menyatakan ukuran kenaikan atau penurunan fluks neutron, yang dihitung tanpa adanya faktor kebocoran. Gambar 3 menunjukkan perubahan nilai k_{inf} terhadap waktu *burnup*-nya. Di mana semakin besar densitas atom Uranium 235 yang diberikan maka nilai k_{inf} juga akan terus meningkat. Pada uranium alam dan variasi pengayaan Uranium 235 dari 1% sampai 8% nilai $k_{inf} < 1$ yang berarti sel belum mencapai kondisi kritisnya. Kekritisan sel dapat dicapai pada pengayaan Uranium 235 sebesar 9% sampai 10% dengan $k_{inf} > 1$.

Gambar 4. menunjukkan bahwa rata-rata perubahan level *burnup* yang terjadi pada uranium alam dan variasi pengayaan U-235 di tahun kelimpuluh, nilai level *burnup*-nya rata-ratanya sebesar 167 GWd/ton, artinya dalam 1 ton bahan bakar uranium menghasilkan energi sebesar 167 GW per harinya. Kenaikan level *burnup* pada Gambar 4 ini dipengaruhi oleh proses nuklir yaitu reaksi fisi yang menghasilkan berbagai produk fisi yang akan terus bertambah seiring lamanya waktu *burnup*.



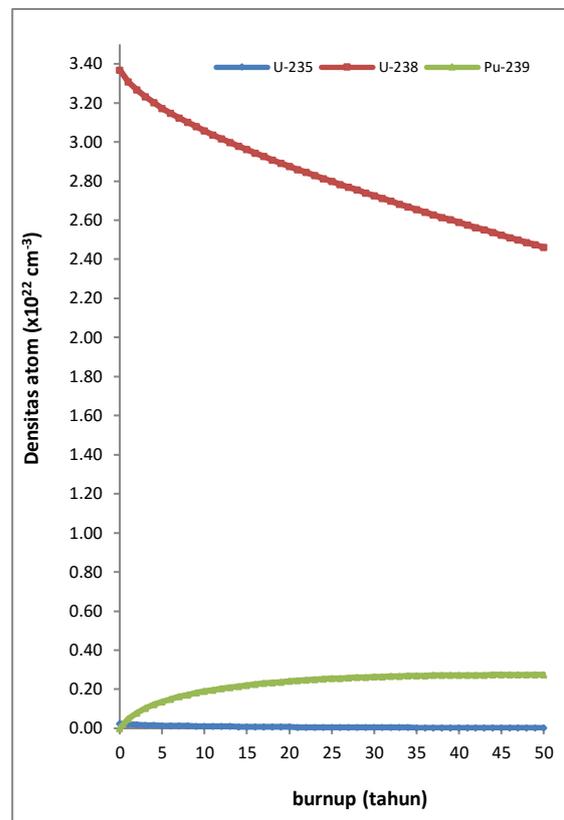
Gambar 3. Perubahan Nilai k_{inf}



Gambar 4. Perubahan Level *Burnup*

Selama proses *burnup*, densitas setiap atom akan berubah sesuai dengan waktu *burnup*-nya. Dimana di antara atom-atom yang mengalami

perubahan yang signifikan dapat diamati pada Uranium 235, Uranium 238 dan Plutonium 239. Gambar 5 untuk densitas atom Uranium 235 akan terus mengalami penurunan dari $0,33 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ sampai $0,05 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ dikarenakan Uranium 235 yang bersifat fisil akan berubah menjadi unsur lainnya. Sedangkan untuk Uranium 238 yang bersifat fertil yang pada awal *burnup* jumlahnya $3,38 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ akan terus berkurang sampai $2,42 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ dikarenakan akan berubah menjadi unsur lainnya sesuai rantai *burnup*-nya. Salah satu produk fisi dari Uranium 238 adalah Plutonium 239. Plutonium 239 yang pada awal reaksi belum tercipta (nol), seiring bertambahnya waktu *burnup* jumlah densitas atom Plutonium 239 akan terus bertambah seiring waktu *burnup* dimana pada tahun ke limapuluh densitas atom Plutonium 239 menjadi $0,24 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.



Gambar 5. Densitas Atom Uranium 235, Uranium 238 dan Plutonium 239

Plutonium dihasilkan dari reaksi tangkapan neutron yang terjadi pada Uranium 238. Dari reaksi fisi yang terjadi di reaktor GFR berbasis Uranium Nitride ini sesuai rantai *burnup* Plutonium memiliki lima isotop yang dominan, yaitu Plutonium 238, Plutonium 239, Plutonium

240, Plutonium 241, dan Plutonium 242. Dari kelima isotop tersebut Plutonium 239 dan Plutonium 241 saja yang bersifat fisil, yang bisa digunakan dan dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar reaktor nuklir lainnya. Pada Reaktor GFR yang menggunakan Uranium 235 alam seperti pada penelitian [5,6] jumlah Plutonium yang dihasilkannya sangat sedikit dan memerlukan waktu *start up* yang lama untuk reaktor mulai beroperasi mencapai kondisi kritisnya. Dengan demikian desain reaktor GFR berbahan bakar uranium nitride dengan pengayaan Uranium 235 sebesar 9,5 % dapat mencapai kekritisannya di tahun pertama dan limbah plutonium 239 yang dihasilkannya dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar pada reaktor pembiakan cepat (*Fast Breeder Reactor*, FBR).

KESIMPULAN

Desain reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride (UN) dengan menggunakan uranium alam dan pengayaan Uranium 235 sebesar 1% sampai 10% menghasilkan nilai level *burnup* sebesar 167 GWd/ton selama 50 tahun waktu *burnup*nya. Densitas Atom dari Uranium 235 dan Uranium 238 akan berkurang selama *burnup* dan akan mulai tercipta Plutonium di awal *burnup*.

REFERENSI

- [1] GIF. GIF R&D Outlook For Generation IV Nuclear Energy Systems. 2009.
- [2] Novalianda, Sari., Menik Ariani., Fiber Monado, Zaki Su'ud. *Neutronic Design of Plutonium Uranium Fuel-Based Gas-Cooled Fast Reactor*. Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia Vo 14 No 2 (2018)
- [3] Novalianda, Sari., Menik Ariani., Fiber Monado, Zaki Su'ud . Studi Awal {erhitungan Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Oksida (UO₂) Pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. Jurnal Lingkungan dan Pembangunan. Vol 2 No 1 (2016)
- [4] BATAN. Indonesia Menuju Teknologi Eksplorasi, Penambangan dan Pengolahan Uranium. 2014.
- [5] Fiber, Monado. Su'ud, Z. Waris, A. Basar, K. Menik, A. and Sekimoto, H. *Advanced Materials Research* Vol 772 (2013): 501-506.
- [6] Menik, A. Su'ud, Z. Monado, F. Waris, A. Rijal, K. Arif, I. Ferhat, A. And Sekimoto, H. *Applied Mechanics and Materials*, Vol 260-261 (2013): 307-311.
- [7] Duderstadt, J.J. dan Hamilton, J.H. *Nuclear Reactor Analysis*. USA: John Wiley & Sons Inc. 1976.
- Okumura, K. Kugo, T. Kaneko, K. and Tsuchihashi, K. *A Comprehensive Neutronic Calculation Code System*. JAEA Data/ Code 2007-004. Reactor Physics Group, Nuclear Science and Engineering Directorate. Japan Atomic Energy Agency. (2007)