

# Studi Desain Teras *Gas-Cooled Fast Reactor* Berbahan Bakar Thorium Nitride

**Author:**

Sari Novalianda<sup>1</sup>  
Dwiyanto<sup>2</sup>  
Panangian Mahadi  
Sihombing<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Universitas Al-Azhar<sup>1,3</sup>  
Politeknik Penerbangan  
Surabaya<sup>2</sup>

**Corresponding email**

[sarivaldano4@gmail.com](mailto:sarivaldano4@gmail.com)<sup>1</sup>

**Histori Naskah:**

Submit: 2024-08-06  
Accepted: 2024-08-08  
Published: 2024-08-09



This is an Creative Commons License  
This work is licensed under a Creative  
Commons Attribution-NonCommercial  
4.0 International License

**Abstrak:**

Energi nuklir merupakan salah satu energi terbarukan yang cukup menarik perhatian pemerintah Indonesia bahkan dunia. Energi nuklir memiliki keunggulan dari kepadatan dayanya serta biaya operasinya yang relatif murah dibandingkan dengan sistem-sistem lainnya. Pada tahun 1950 Energi nuklir mulai digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga nuklir dan mulai berkembangnya reaktor nuklir dari generasi pertama hingga ke generasi keempat. *Gas-Cooled Fast Reactor* merupakan salah satu jenis reaktor generasi empat berpendingin helium yang memiliki kelebihan yaitu tidak bereaksi dengan unsur lainnya. Thorium sebagai bahan bakar nuklir bersifat lebih aman, tidak mudah terbakar dan menghasilkan produk fisi jangka panjang. Metode penelitian yang digunakan menggunakan seperangkat program SRAC disertai data nuklida pada JENDL 3.2. Hasil penelitian menunjukkan teras reaktor GFR dengan geometri teras silinder dan berbahan bakar Thorium Nitride yang homogen telah mencapai keadaan kritis dengan nilai *excess reactivity* sebesar 0,0034% pada fraksi volume 55% *fuel*, 10% *cladding* dan 35% *coolant*.

**Kata kunci:** Bahan Bakar; Desain Teras; GFR;  $k_{eff}$ ; Thorium.

## Pendahuluan

Batubara merupakan sumber energi utama dunia saat ini, namun penggunaannya menghasilkan emisi gas rumah kaca yang signifikan yang berkontribusi pada perubahan iklim. Reaktor nuklir menawarkan alternatif yang potensial untuk menghasilkan energi tanpa emisi gas rumah kaca sehingga tidak berkontribusi pada pemanasan global. Selain itu keuntungan lainnya reaktor nuklir menghasilkan energi dalam jumlah besar dari sedikit bahan bakar, sehingga lebih efisien daripada pembangkit listrik bertenaga batubara. Reaktor nuklir dapat beroperasi secara terus menerus, tidak seperti pembangkit listrik bertenaga angin atau matahari yang bergantung pada kondisi cuaca. Dari segi Skalabilitas, Reaktor nuklir dapat dibangun dalam berbagai ukuran, sehingga dapat memenuhi kebutuhan energi dari komunitas kecil hingga kota besar.

Indonesia berkomitmen untuk memanfaatkan energi nuklir secara damai dan bertanggung jawab. Indonesia aktif dalam berbagai forum internasional terkait nuklir, seperti Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), Perjanjian Non-Proliferasi Nuklir (NPT) dan Perjanjian Larangan Uji Coba Senjata Nuklir (CTBT) (LEMHANNAS 2013 & ESDM 2013).

Perkembangan reaktor nuklir dimulai dari generasi pertama hingga generasi keempat. *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) merupakan reaktor nuklir generasi keempat yang didinginkan dengan gas dan

menggunakan bahan bakar cepat. GFR memiliki potensi untuk menjadi sumber energi nuklir yang lebih aman, lebih efisien, dan lebih berkelanjutan dibandingkan dengan reaktor nuklir konvensional. Salah satu keunggulan GFR adalah dapat menggunakan thorium sebagai bahan bakar. Thorium adalah elemen yang berlimpah di alam dan jauh lebih aman daripada uranium, bahan bakar yang biasa digunakan dalam reaktor nuklir. Thorium tidak mudah terbakar dan tidak menghasilkan produk fisi jangka panjang yang sangat radioaktif.

Desain GFR yang menggunakan thorium memiliki beberapa keunggulan, antara lain: Dari segi keamanan Thorium tidak mudah terbakar dan tidak menghasilkan produk fisi jangka panjang yang sangat radioaktif, sehingga reaktor GFR yang menggunakan thorium lebih aman daripada reaktor nuklir konvensional. Efisiensinya GFR dapat beroperasi pada suhu yang lebih tinggi daripada reaktor nuklir konvensional, sehingga lebih efisien dalam menghasilkan energi, dan segi keberlanjutan, thorium jauh lebih berlimpah di alam daripada uranium, sehingga GFR yang menggunakan thorium dapat menjadi sumber energi nuklir yang lebih berkelanjutan (IAEA, 2005).

Penelitian terkait reaktor nuklir berbasis thorium terus berkembang pesat di berbagai negara di dunia. Pertama **THOR-ES (Thorium Energy System)** di Amerika Serikat: TerraPower, sebuah perusahaan energi nuklir di Amerika Serikat, sedang mengembangkan THOR-ES, reaktor nuklir modular berpendingin gas yang menggunakan thorium sebagai bahan bakar utama. THOR-ES dirancang untuk menghasilkan energi listrik 500 MW dan diharapkan dapat beroperasi di 2028. Kedua **TMSR (Thorium Molten Salt Reactor)** di China: adalah akademi Ilmu Pengetahuan China (CAS) sedang mengembangkan TMSR, reaktor nuklir berpendingin garam cair yang menggunakan thorium sebagai bahan bakar utama. TMSR dirancang untuk menghasilkan energi listrik 100 MW dan diharapkan dapat beroperasi pada tahun 2030, dan **LFTR (Liquid Fluoride Thorium Reactor)** di India: *Bhabha Atomic Research Centre (BARC)* saat ini sedang mengembangkan LFTR, reaktor nuklir berpendingin fluorida cair yang menggunakan thorium sebagai bahan bakar utama. LFTR dirancang untuk menghasilkan energi listrik 600 MW dan diharapkan dapat beroperasi pada tahun 2040.

## Studi Literatur

Dalam fisika nuklir, reaksi nuklir merupakan suatu reaksi dimana proses dua nuklida atau partikel nuklir bertumbukan untuk memproduksi hasil yang berbeda dari produk awal. Reaksi transformasi pertama yaitu penembakan inti nitrogen dengan partikel alfa pada tahun 1919 yang dilakukan oleh Rutherford. Reaksi yang sering terjadi yaitu antara suatu nuklida dengan partikel ringan seperti neutron, proton, deuteron, triton, ion helium, elektron dan meson (Stacey, 2007).

Reaksi nuklir terdiri dari 2 jenis, yaitu reaksi fusi nuklir dan reaksi fisi nuklir. Reaksi fusi nuklir adalah reaksi peleburan dua atau lebih inti atom menjadi atom baru dan menghasilkan energi. Reaksi fusi juga menghasilkan radiasi sinar alfa, beta dan gamma yang sangat berbahaya bagi manusia. Sedangkan reaksi fisi nuklir adalah reaksi pembelahan inti atom akibat tumbukan inti atom lainnya. Reaksi fisi ini menghasilkan energi dan atom baru yang bermassa lebih kecil, serta radiasi elektromagnetik. Selisih massa yang hilang berubah menjadi energi panas dalam reaktor nuklir.

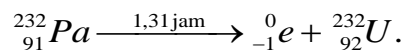
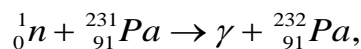
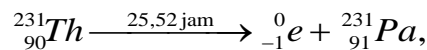
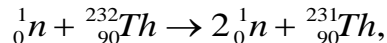
Pada reaktor nuklir, partikel neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi digunakan kembali untuk memicu reaksi fisi yang baru, sehingga reaksi fisi dapat berlangsung terus-menerus. Reaksi fisi yang berlangsung terus menerus secara terkendali disebut dengan reaksi fisi berantai. Reaksi fisi berantai dapat terjadi jika energi kinetik yang dimiliki sekitar 200 MeV (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Perilaku neutron fisi ketika berinteraksi dengan inti menentukan terjadinya reaksi fisi berantai. Interaksi neutron terhadap inti

dapat terjadi dengan beberapa cara yaitu reaksi hamburan dan penangkapan neutron (Purwoningsih, 2012).

Beberapa proses fisi terjadi secara spontan. Biasanya fisi dihasilkan hanya jika sejumlah energi yang cukup diberikan kepada inti melalui tangkapan neutron lambat atau penembakan dengan neutron, proton, deuteron atau sinar gamma memancarkan dua atau tiga neutron yang kemudian diteruskan pada reaksi fisi selanjutnya yang disebut dengan reaksi fisi berantai (Stacey, 2007). Reaksi fisi nuklir termasuk reaksi eksoterm yang menghasilkan energi (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Proses reaksi fisi yang terjadi pada atom Thorium-232 sebagai berikut (Ragheb, 2011).

Reaksi nuklir pada Thorium merupakan reaksi fisi yang berbeda dengan reaksi fisi uranium, bahan bakar yang umum digunakan dalam reaktor nuklir saat ini. Subkhi, et al, 2016, Thorium-232, isotop Thorium yang paling umum, tidak dapat mengalami fisi nuklir secara spontan. Oleh karena itu, Thorium-232 merupakan bahan bakar fertile. Thorium-232 yang menyerap neutron lambat akan berubah menjadi Uranium-233 yang bersifat fisil, bias mengalami fisi dengan neutron lambat dan menghasilkan energi. Reaksi fisi thorium menghasilkan lebih sedikit neutron dibandingkan reaksi fisi uranium-235. Namun, Uranium-233 yang dihasilkan dari thorium justru lebih efisien dalam menghasilkan neutron dari fisi.

Secara keseluruhan, reaksi inti Thorium berperan dalam "membiakkan" bahan bakar fisil (Uranium-233) dari bahan fertile (Thorium-232). Reaktor Thorium memanfaatkan neutron yang dilepaskan dari fisi Uranium-233 untuk memecah belah inti Thorium-232 lebih lanjut, sehingga reaksi berantai nuklir dapat berlangsung.



Gambar 1. Reaksi Fisi Thorium 232

Studi desain teras reaktor *High Temperature Gas-Cooled Reactor* (HTGR) dengan model mesh triangular duadimensi berbahan bakar Thorium berpendingin CO<sub>2</sub> berhasil mencapai kondisi kritis dengan nilai  $k_{\text{eff}}$  1,000008 dan menghasilkan rapat daya maksimal sebesar 107, 5371 watt/cm<sup>3</sup> (Nasta, et al, 2022).

Menurut Ariani et al, 2015, Potensi Thorium sebagai bahan bakar reaktor berpendingin gas untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir dengan skema pembakaran CANDLE yang dimodifikasi, dapat digunakan untuk reaktor berukuran kecil dan berumur panjang. Penggunaan Thorium sebagai bahan bakar ini tanpa memerlukan pengolahan dan pengayaan dandapat menghasilkan daya listrik berukuran 500 MWth.

Studi lainnya terkait dengan penggunaan bahan bakar Thorium adalah desain reaktor Air Bertekanan (PWR) berukuran kecil berumur panjang untuk fraksi bahan bakar dari 35% sampai dengan 65%, konsentrasi U-233 dan Pa-231 yang variatif dan optimasi neutronik juga akan dilakukan untuk mereduksi

ukuran geometri teras aktifseks reaktivitas seoptimal mungkin dengan distribusi daya yang merata (Subkhi et al, 2016).

Pada penelitian ini menyajikan desain reaktor gennerasi keempat yaitu Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) yaitu jenis reaktor cepat yang menggunakan pendingin berupa helium dengan kelebihanannya tidak bereaksi dengan unsur lainnya dan menggunakan bahan bakar Thorium Nitride.

### Metode Penelitian

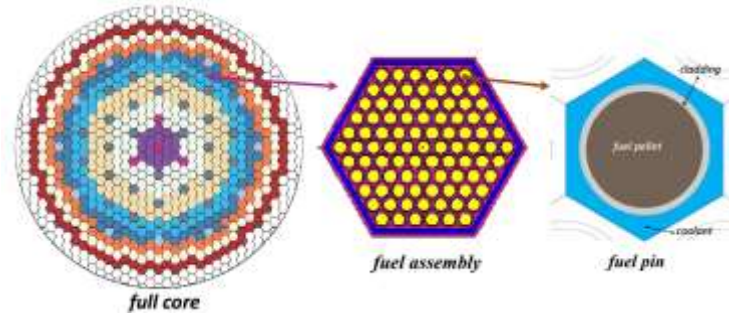
Penelitian ini dilakukan melalui simulasi komputasi menggunakan kode program SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*) adalah kode program komputer yang digunakan untuk perhitungan neutronik untuk berbagai macam tipe reaktor yang dikembangkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*). Desain reaktor yang digunakan adalah reaktor cepat berpendingin gas dengan spektrum neutron cepat menggunakan strategi shuffling arah radial. Pada simulasi ini reaktor dioperasikan pada siklus tertutup yaitu siklus dimana selama operasi berlangsung tidak dilakukan pengisian ulang bahan bakar pada reaktor. SRAC adalah sebuah program komprehensif dan terintegrasi yang memiliki lima kode pokok untuk melakukan berbagai perhitungan neutronik, yaitu : PIJ yang berdasarkan pada metode CP, SN transport, TWOTRAN (2D), difusi dan CITATION (Okumara, 2007 & Shafii 2013).

Dalam mendesain reaktor diperlukan spesifikasi ukuran sel bahan bakar dan teras, dimana parameter desain GFR ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Desain GFR.

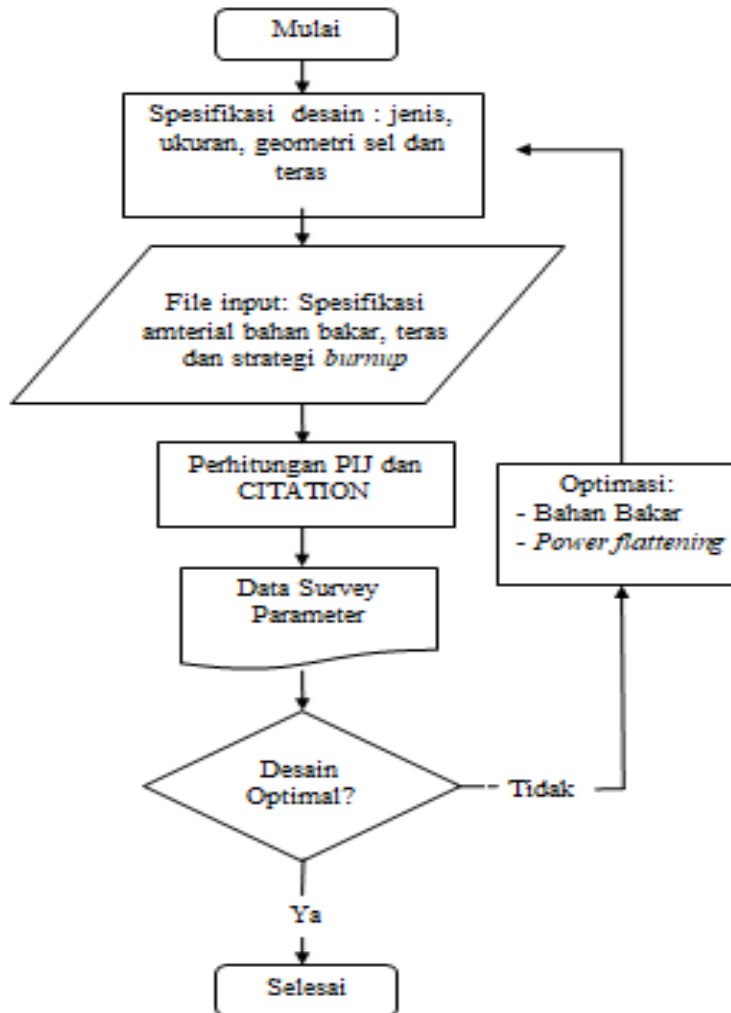
No	Spesifikasi Umum Desain Reaktor	
	Parameter Desain	Spesifikasi
1	Daya termal	500 MWt
2	Geometri Teras	Cylinder Balance
3	Karakteristik Teras	Small-long life
4	Material Bahan Bakar ( <i>fuel</i> )	<i>Thorium Nitride</i> (ThN)
5	Material Struktur ( <i>Cladding</i> )	<i>Stainless Steel</i> (SS316)
6	Material Pendingin ( <i>coolant</i> )	Helium
7	Tipe Pin cell	Cylindrical cell
8	Pin pitch / diameter	1,4 cm
9	Tinggi Teras aktif	3,5 m
10	diameter teras aktif	2,4 m
11	Fraksi: <i>fuel, cladding, coolant</i>	50-65%, 10%, 25-40%
12	Densitas daya	50-100 watt/cm <sup>3</sup>
13	Lebar Reflektor	100 cm

Teras reaktor tersusun atas ratusan assembly, dimana assembly juga tersusun atas pin atau sel bahan bakar (*fuel pin*) yang merupakan bagian terkecil dari teras reaktor seperti pada Gambar 2. Geometri sel bahan bakar yang digunakan berupa silinder (*cylindrical cell*) yang terdiri dari *fuel, cladding* dan *coolant* (Novalianda et al., 2020).



Gambar 2. Ilustrasi Penampang Lintang Teras serta Bagian Penyusunnya.

Diagram alir penelitian dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3 sebagai berikut:



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

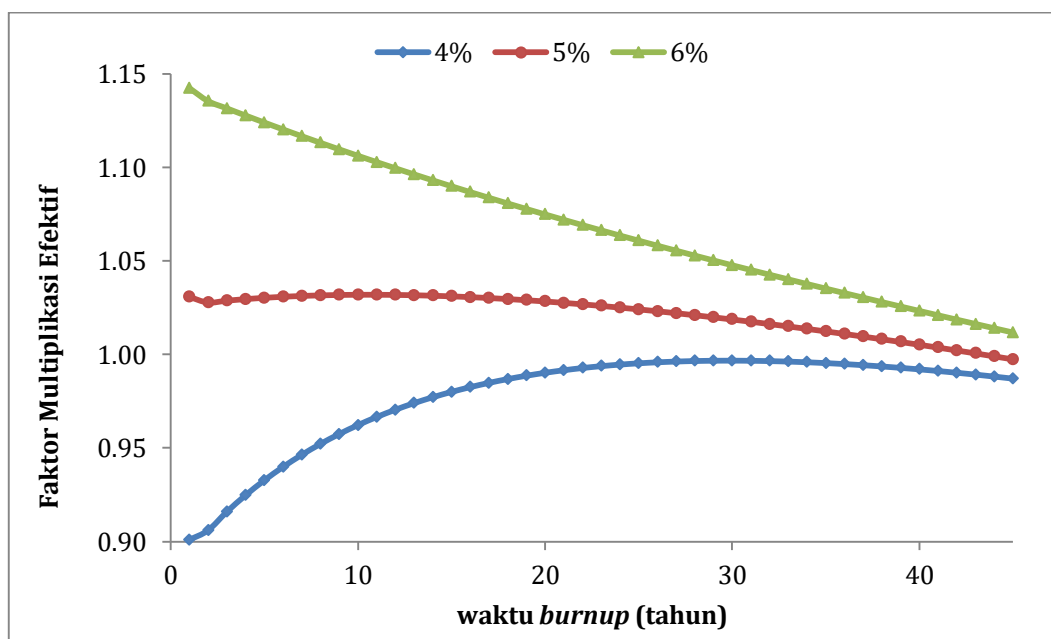
## Hasil

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan bahan bakar *thorium nitride* (ThN) dan uranium-233 sebagai bahan fisilnya. Pada bahan bakar ThN diberi pengayaan Uranium-233 agar dapat meningkatkan performa pembakaran bahan bakar dari tahun pertama reaktor beroperasi. Komposisi yang digunakan dengan memvariasikan persentase pengayaan Uranium-233 untuk mendapatkan nilai *macro* pada sel bahan bakar.

Untuk mendapatkan desain reaktor dengan penggunaan bahan bakar yang lebih efisien, dilakukan perhitungan nilai  $k_{eff}$  dengan mengganti nilai fraksi volume bahan bakar pada sel bahan bakar. Kemudian perhitungan dilanjutkan pada teras reaktor. Faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) menunjukkan rasio antara jumlah neutron yang dihasilkan pada suatu generasi terhadap jumlah neutron pada generasi sebelumnya (Novalianda et al., 2022). Perilaku neutron yang dilihat dari persamaan transport neutron diselesaikan dengan menggunakan pendekatan difusi multigrup.

## Pembahasan

Faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) menunjukkan rasio antara jumlah neutron yang dihasilkan pada suatu generasi terhadap jumlah neutron pada generasi sebelumnya. Perilaku neutron yang dilihat dari persamaan transport neutron diselesaikan dengan menggunakan pendekatan difusi multigrup. Berdasarkan nilai faktor multiplikasi efektif pada sel bahan bakar, diperoleh rentang persentase pengayaan uranium-233 yang akan menjadi acuan untuk digunakan dalam perhitungan di teras reaktor.



Gambar 4. Faktor Multiplikasi Efektif pada teras terhadap waktu *burnup* untuk variasi pengayaan uranium-233.

Persentase pengayaan uranium-233 yang digunakan untuk dihitung dan dihomogenisasi di dalam teras reaktor yaitu 4%, 5% dan 6%. Gambar 4 menunjukkan nilai faktor multiplikasi efektif pada teras reaktor.  $k_{eff}$  pada teras akan bernilai lebih kecil dibandingkan dengan nilai  $k_{eff}$  di sel bahan bakar. hal ini dikarenakan di dalam teras berisi susunan beberapa sel bahan bakar yang kemudian akan dihomogenisasi. Selain itu, di dalam teras reaktor juga terdapat kebocoran yang menjadi salah satu faktor dalam

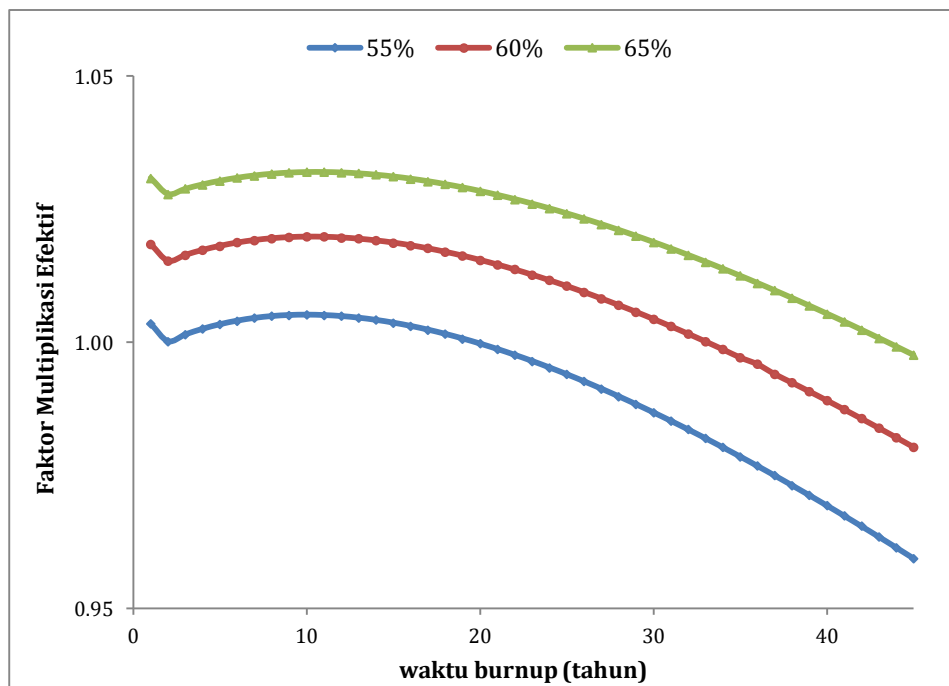


berkurangnya nilai  $k_{eff}$ . Pengayaan uranium sebanyak 4% berada dalam keadaan subkritis ( $k_{eff} < 1$ ). Keadaan subkritis akan membuat reaktor kurang efisien dalam penggunaan bahan bakar dan daya yang dihasilkan.

Tabel 2. *Excess Reactivity* pada pengayaan U-233 5% dan 6%.

	Pengayaan U-233 5%	Pengayaan U-233 6%
<i>Excess Reactivity</i>	0,0220%	0,0640%

Nilai  $k_{eff}$  pada pengayaan uranium-233 sebanyak 5% dan 6% telah berada dalam keadaan kritis ( $k_{eff} = 1$ ). Tingginya tingkat kekritisan reaktor dilihat dari rendahnya nilai kelebihan reaktivitasnya (*excess reactivity*). Nilai *excess reactivity* ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai *excess reactivity* pada pengayaan uranium-233 sebanyak 5% lebih kecil dibandingkan dengan nilai *excess reactivity* pada pengayaan uranium-233 sebanyak 6%. Sehingga *thorium nitride* dengan pengayaan uranium-233 sebesar 5% lebih efisien dalam penggunaan bahan bakar dan daya yang dihasilkan serta lebih aman digunakan.



Gambar 4. Nilai Faktor Multiplikasi Efektif terhadap waktu *burnup* untuk variasi fraksi volume bahan bakar.

Gambar 4 menunjukkan nilai  $k_{eff}$  untuk variasi fraksi volume bahan bakar. Variasi fraksi volume bahan bakar yang digunakan yaitu 65%, 60% dan 55% dengan fraksi volume kelongsong (*cladding*) tetap 10%. Dapat dilihat bahwa semakin kecil persentase fraksi volume bahan bakar maka nilai  $k_{eff}$  juga akan semakin kecil. Untuk menentukan variasi fraksi volume yang memiliki tingkat kekritisan lebih tinggi, dapat dilihat pada nilai *excess reactivity*nya.

Tabel 3. *Excess Reactivity* pada variasi fraksi volume bahan bakar.

	55%	60%	65%
<i>Excess Reactivity</i>	0,0034%	0,0139%	0,0220

Tabel 3 menunjukkan nilai *excess reactivity* pada fraksi volume 65%, 60% dan 55%. Fraksi volume bahan bakar sebesar 55% memiliki nilai *excess reactivity* terendah. Sehingga fraksi volume bahan bakar sebesar 55% lebih efisien dengan mencapai kritis pada tahun pertama dan dapat beroperasi dalam periode tanpa pengisian ulang bahan bakar selama 19 tahun.

## Kesimpulan

Reaktor GFR dengan geometri Silinder pada teras berbahan bakar Thorium Nitride telah mencapai keadaan kritis pada pengayaan uranium-233 sebesar 5% dengan nilai *excess reactivity* sebesar 0,044% pada fraksi volume 65% *fuel*, 10% *cladding* dan 25% *coolant*.

## Referensi

- Anggoro D.Yohanes, D. D. 2013. Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 69-79.
- Ariani Menik dan Zaki . Su"ud. 2013. Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 MWth dengan Uranium Alam Sebagai Input Siklus Bahan Bakar. *Jurnal Ilmu Dasar*, 11-15.
- Ariani Menik, Supardi, Fiber Monado Dan Zaki Su'ud. Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Untuk Pltn. Prosiding Semirata2015 Bidang Mipa Bks-Ptn Barat Universitas Tanjungpura Pontianak Hal 39 - 45.
- Duderstadt, J., & Hamilton, L. 1976. Nuclear reactor analysis. John Wiley and Sons, New York
- ESDM. 2013. *Supply Demand*. Kementrian Energi dan Sumber daya Mineral Republik Indonesia.
- IAEA. 2005. Thorium Fuel Cycle Potential Benefits and Challenges. *International Atomic Energy*.
- Kamei, T. &. 2011. Evaluation of implementation of thorium fuel cycle with LWR and MSR. *Journal Of Progress in Nuclear Energy*, 820-824.
- LEMHANNAS. 2013. Pengembangan Teknologi Nuklir Guna Pemanfaatan Energi Terbarukan dal Rangka Meningkatkan Ketahanan Energi Nasional. *Jurnal Kajian LEMHANNAS RI*, 11-23.
- Purwoningsih, Tuti. 2012. Komputasi Distribusi Neutron dalam Statistik Maxwell Boltzmann. *Jurnal Matematika, Sains dan Teknologi*, 13(1), 22-32.
- Novalianda, S., dkk. 2020. Pengaruh Perubahan Fraksi Volume Terhadap Kekritisian Desain Gas-Cooled Fast Reactor Berbahan Bakar Uranium Nitride. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*. Vol.9, No.4, Oktober 2020, hl.450-456.
- Novalianda, S., dkk. 2020. Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar. *Jurnal Penelitian Sains*, 22 (2) 2020: 50-54.



- Novalianda, S., dkk. 2020. Analysis of Enhance Reliability Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) Based on Fuel Uranium Nitride (UN). *International Journal of Scientific Engineering and Science*, Volume 4, Issue 8, pp. 4-8, 2020.
- Novalianda, S., Panangian Mahadi Sihombing dan Fitria Nova Hulu. 2022. Studi Desain Sel Bahan Bakar Thorium Nitride (Thn) Pada *Gas-Cooled Fast Reactor*. *Jurnal Fisika Sains dan Aplikasinya*. Vol. 7, No. 2., pp. 15-20. Oktober 2022
- Okumura, K. T. 2007. *Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Atomic Energy Agency (JAEA). Jepang.
- Ragheb, Magdi. 2011. Thorium Fission and Fission-Fusion Fuel Cycle. *Journal of Nuclear Power-Deployment, Operation and Sustainability*.
- Shafii, M. A. 2013. Beberapa Metode Penyelesaian Persamaan Transport Neutron dalam Reaktor Nuklir. *Jurnal Ilmu Dasar*, 14(2), 59–65.
- Stacey, Weston M. 2007. *Nuclear Reactor Physics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Jerman.
- Subkhi, M. N., Zaki Su'ud, Abdul Waris, & Sidik Permana. 2016. Design Concept of Small Long-Life PWR Using Square and Hexagonal Thorium Fuel. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(2), 830–832
- Trianti, N. Z. 2011. Design Study Of Thorium Cycle Based Long Life Modular Boiling Water Reactors. *Indonesian Journal Of Physics*, 133-137.