

## Pengaruh Perubahan Fraksi Volume Terhadap Kekritisian Desain *Gas-Cooled Fast Reactor* Berbahan Bakar Uranium Nitride

Sari Novalianda\*, Andri Ramadhan

Fakultas Teknik Universitas Al-Azhar

Jl. Pintu Air IV No.214, Kwala Bekala, Medan, 20142 Indonesia

### Info Artikel

#### Histori Artikel:

Diajukan: 4 Juni 2020

Direvisi: 25 September 2020

Diterima: 1 Oktober 2020

#### Kata kunci:

Bahan Bakar  
Fraksi Volume  
GFR  
Kelongsong  
Pendingin

#### Keywords:

Core  
Fraction Volume  
Fuel  
GFR  
Cladding  
Coolant

#### Penulis Korespondensi:

Sari Novalianda

Email: [sari\\_novalianda@yahoo.com](mailto:sari_novalianda@yahoo.com)

### ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan pengaruh perubahan fraksi volume desain *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) berbahan bakar Uranium Nitride. Fraksi volume reaktor cepat terdiri dari bahan bakar, kelongsong dan pendingin. Penelitian ini terdiri dari tiga desain sel bahan bakar dengan perbedaan fraksi volume yang terdiri dari *fuel*, *cladding*, dan *coolant* yaitu desain A 55%:10%:35%, desain B 60%:10%:30% dan 65%:10%:25% untuk desain C. Parameter survey yang diukur adalah faktor kekritisian reaktor yaitu  $k_{eff}$ ,  $k_{inf}$  dan perubahan level burnup terhadap waktu burnupnya. Perhitungan desain GFR menggunakan seperangkat program *Standart Reactor Analysis Code* (SRAC). Hasil perhitungan ketiga desain reaktor, didapat bahwa desain B berbahan bakar Uranium Nitride dengan pengayaan 9,5% uranium 235 dan fraksi volume 60% bahan bakar, 10 % kelongsong dan 30% pendingin mencapai kondisi kritis pada  $k_{eff} > 1,008$  dan  $k_{inf} > 1,012$ . Desain reaktor B dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa proses *refueling* dengan *excess reactivity* 0,031%.

*The research presents the effect of changes in the volume fraction on the criticality of the Uranium Nitride Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) design. The fast reactor volume fraction consists of fuel, cladding, and coolant. This research consisted of three fuel cell designs his research consists of three fuel cell designs with different volumes fraction consisting of fuel, cladding, and coolant namely A design 55%:10%:35%. B design 60%:10%:30% and 65%:10%:25% for C design. The survey parameters measured were the criticality of the reactor, namely  $k_{eff}$ ,  $k_{inf}$ , and burnup level changes with the burnup time. GFR design calculations use a set of Standard Reactor Analysis Code (SRAC) programs. The third calculation of the reactor design, found that design B was fueled with Uranium Nitride with enrichment of 9.5% uranium 235 and volume fraction of 60% fuel, 10% cladding, and 30% coolant reached critical conditions at  $k_{eff} > 1,008$  and  $k_{inf} > 1,012$ . Design B reactor can operate for 10 years without refueling with an excess reactivity of 0.031%.*

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

## I. PENDAHULUAN

Energi nuklir merupakan salah satu bagian dari bentuk renewable energy atau energi baru dan terbarukan di Indonesia. Pengembangan energi nuklir di Indonesia didasarkan pada PP Nomor 79 tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional dan PP Nomor 2 Tahun 2014 tentang perizinan instalasi nuklir dan pemanfaatan bahan nuklir. Energi nuklir memiliki potensi untuk bisa dikembangkan di Indonesia. Secara geologi seperempat daratan Indonesia mengandung deposit mineral radioaktif terutama Uranium dan Thorium. Pemetaan daerah yang berpotensi Uranium dan Thorium berada di Bangka Belitung, pulau Sulawesi, Sumatera dan di Kalimantan salah satunya di wilayah Kalan, yang telah diteliti oleh Ngadenin, dkk (2014).

Kelebihan utama dalam pengoperasian energi nuklir sebagai PLTN adalah ramah lingkungan yakni tidak menimbulkan polusi udara seperti karbon monoksida, sulfur dioksida, nitrogen oksida dan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca. Selain itu karena proses perubahan energi panas menjadi energi nuklir hanya bergantung pada reaktor nuklir dan tidak menggunakan sumber energi lain maka biaya bahan bakarnya sangat rendah tetapi energi yang dihasilkan sangat besar menurut IAEA (2014) dan Novalianda (2016).

Data Badan Energi Atom International (*International Atomic Energy Agency*, IAEA) (2014) telah dioperasikan 438 unit PLTN yang tersebar di 30 negara di seluruh dunia dan 72 PLTN sedang dibangun di 15 negara. Daya listrik yang dihasilkan sekitar 2.359 TWh pada tahun 2013 dengan kontribusi sekitar 11% dari produksi listrik dunia. Di Indonesia BATAN mengelola tiga buah reaktor nuklir riset, yaitu reaktor nuklir Kartini, TRIGA dan reaktor nuklir G.A Siwabessy yang memiliki kapasitas maksimal sebesar 30 MW.

Anggoro dkk (2013) memaparkan bahwa teknologi reaktor nuklir mengalami beberapa fase perkembangan yang cukup pesat di mulai dari generasi pertama (tahun 1950-1970), generasi kedua (tahun 1970-2030), generasi ketiga (2000 dan seterusnya) dan generasi keempat merupakan sistem reaktor maju (2030 dan seterusnya). Salah satu jenis reaktor nuklir generasi keempat adalah reaktor cepat berpendingin helium (*Gas-cooled Fast Reactor*- GFR). GFR memiliki kelebihan dalam hal ketahanan karena memiliki siklus bahan bakar tertutup, *inherent safety* dan dapat memproduksi hidrogen pada suhu 850°C, yang telah dilakukan oleh Monado dkk (2014), Novalianda dkk (2018).

Riset-riset tentang perancangan desain reaktor nuklir yang sering diteliti terkait dengan berbagai aspek diantaranya analisis neutronik, thermal hidrolis, sistem keselamatan dan pengelolaan limbah nuklir. Aspek neutronik menekankan pada perilaku neutron di dalam teras reaktor selama reaktor beroperasi. Hal yang menentukan kekritisitas sebuah reaktor adalah tentang bagaimana perhitungan jumlah penyusun partikel bahan bakar reaktor nuklir serta persentase materi satu dibandingkan dengan materi lainnya sehingga reaktor dapat beroperasi dalam waktu yang telah ditentukan.

Menurut Ariani dkk (2013) rancangan GFR dengan strategi *burnup modified CANDU* pada teras reaktor dapat menghasilkan daya termal 600 MWt menggunakan bahan bakar uranium alam-nitrid, dengan geometri sel bahan bakar berbentuk silinder (*cylindrical cell*) dan perbandingan fraksi volume; 55%:10%:35%. Reaktor cepat ini dapat beroperasi dalam satu siklus pengisian bahan bakar selama 10 tahun.

Fraksi volume merupakan perbandingan volume bahan bakar terhadap volume keseluruhan pin bahan bakar yang terdiri dari bahan bakar (*fuel*), kelongsong (*cladding*) dan pendingin (*coolant*). Bahan bakar berfungsi sebagai sumber energi panas di dalam reaktor nuklir. Bahan bakar nuklir yang sering digunakan adalah uranium dan thorium. Kelebihan utama dari Uranium adalah dapat menghasilkan energi yang besar, dimana satu kilogram Uranium sebanding dengan 1.500 ton batubara. Kemudian Uranium lebih mudah bereaksi fisi dengan neutron lambat sehingga reaksi fisi berantai terus berlangsung. Uranium di alam terdiri dari tiga isotop yaitu uranium 238, uranium 235 dan uranium 234. Diantara ketiga isotop tersebut, uranium 235 memegang peranan penting sebagai sumber bahan bakar nuklir karena uranium 235 merupakan bahan bakar yang bersifat fisil. Agar proses reaksi fisi berantai di dalam reaktor nuklir terus berlangsung maka dibutuhkan proses pengayaan (*enrichment*) uranium 235 yang densitas atomnya harus ditingkatkan dikarenakan jumlah uranium 235 di alam hanya terbatas yaitu 0,07%. Proses pengayaan uranium 235 yang diperkenankan oleh IAEA adalah 1% hingga 20%.

Menurut Meyers dkk (2007) *cladding* berfungsi sebagai pemisah fisis antara bahan bakar dengan pendingin guna mencegah reaksi fisi memasuki sistem pendingin. Material *cladding* harus memiliki ketahanan yang kuat pada temperatur tinggi, resistansi tinggi terhadap korosi dan tahan terhadap radiasi jangka panjang. Material terakhir yaitu *coolant* berfungsi sebagai pendingin. *Coolant* pada reaktor GFR berupa helium, dimana helium merupakan gas inert yaitu tidak mengalami reaksi kimia dengan material lainnya dan memiliki konduktivitas yang tinggi, sekitar  $0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  menurut Laidler (1993).

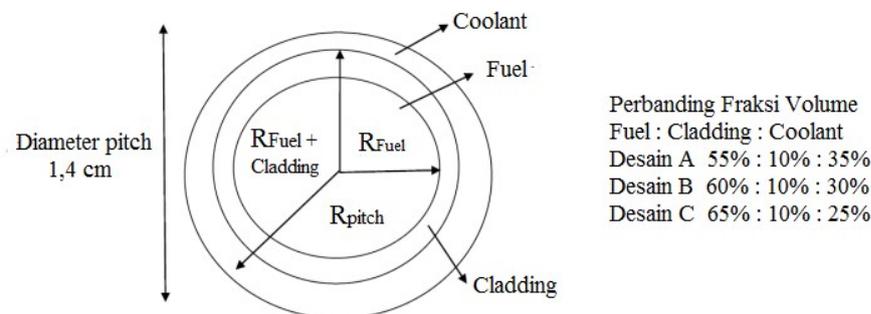
Analisis pengaruh densitas bahan bakar terhadap fluks neutron pada teras reaktor riset tipe MTR dengan variasi bahan bakar uranium, silisida, dan molybdenum diperoleh bahwa teras reaktor yang paling optimum adalah berbasis uranium dengan fluks neutron termal  $3,02 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2.\text{s}$  (Tukiran, 2012).

Komposisi fraksi volume bahan bakar dalam desain reaktor nuklir memegang peranan penting dalam menentukan kekritisan sebuah reaktor dan lamanya sebuah reaktor nuklir dapat beroperasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan fraksi volume terhadap kekritisan desain *Gas-cooled Fast Reactor* berbahan uranium nitride, dimana penggunaan uranium nitride merupakan bahan bakar potensial untuk reaktor generasi keempat dengan tingkat densitas, konduktivitas termal dan kestabilan radiasi yang tinggi.

## II. METODE

### 2.1 Geometri Teras Reaktor

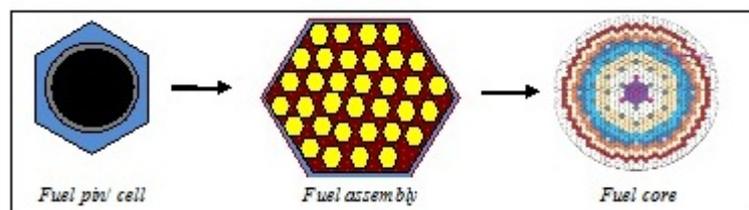
Sel bahan bakar yang digunakan berbentuk pin yang terdiri dari *fuel*, *cladding* dan *coolant*. Susunan sel bahan bakar pada penelitian ini terdiri dari tiga desain. Desain A dengan 55% *fuel*, 10% *cladding* dan 35% *coolant*, desain B 60% *fuel*, 10% *cladding* dan 30% *coolant* dan desain C terdiri dari 65% *fuel*, 10% *cladding* dan 25% *coolant*. Geometri sel bahan bakar berbentuk silinder dengan penampang lintang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Geometri Sel Bahan Bakar

### 2.2 Susunan Teras Reaktor

Teras reaktor merupakan tempat terjadinya reaksi fisi yang terdiri dari ratusan *assembly*. *Assembly* ini tersusun dari sekumpulan sel-sel bahan bakar nuklir yang letaknya diatur berdasarkan fraksi volumennya sehingga mencapai kondisi kritis. Gambar 2 menunjukkan penampang lintang teras reaktor.



Gambar 2 Penampang Lintang Teras Reaktor

### 2.3 Paramater Desain GFR

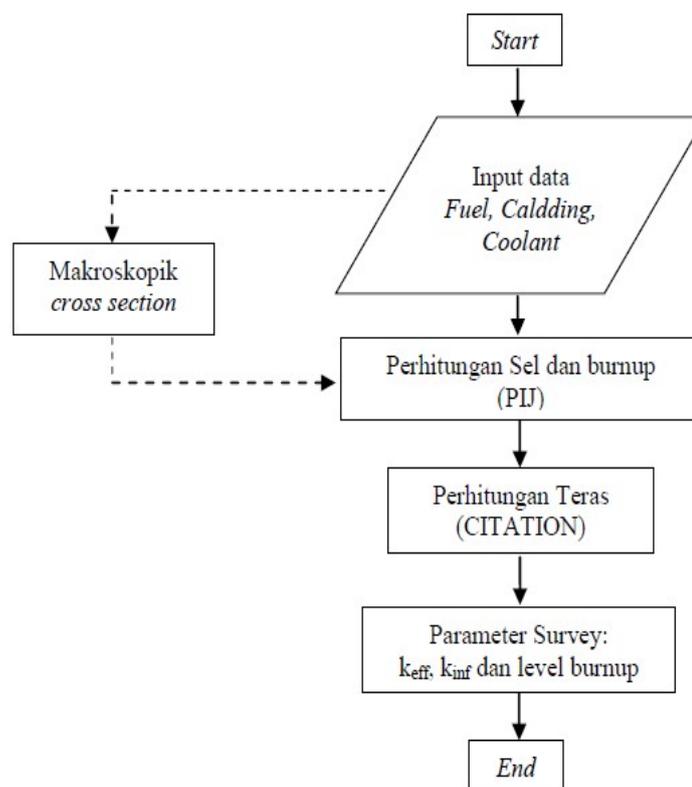
Parameter desain pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1** Parameter Desain GFR

Parameter	Spesifikasi
Daya <i>thermal</i>	500 MWt
Bahan Bakar	Uranium Nitride
Pengayaan U-235	9,5%
<i>Cladding</i>	<i>Stainless Steel</i> (SS316)
<i>Coolant</i>	Helium
Fraksi Volume	55%:10%:35% (Desain A)
( <i>Fuel:cladding:coolant</i> )	60%:10%:30% (Desain B)
	65%:10%:25% (Desain C)
Diameter pin pitch	1,4 cm
Geometri teras	Silinder
Ukuran teras aktif	240 cm x 350 cm
Geometri teras	100 cm
Lebar reflektor	Silinder
Tebal reflektor	100 cm
Periode <i>refueling</i>	10 tahun

### 2.4 Standart Reactor Analysis Code (SRAC)

Perhitungan kekritisan reaktor nuklir pada penelitian ini menggunakan seperangkat program SRAC dari Okumura dkk (2007). SRAC mulai sejak tahun 1978 oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) yang sebelumnya bernama *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI). Diagram alir perhitungan SRAC dapat dilihat pada Gambar 3.

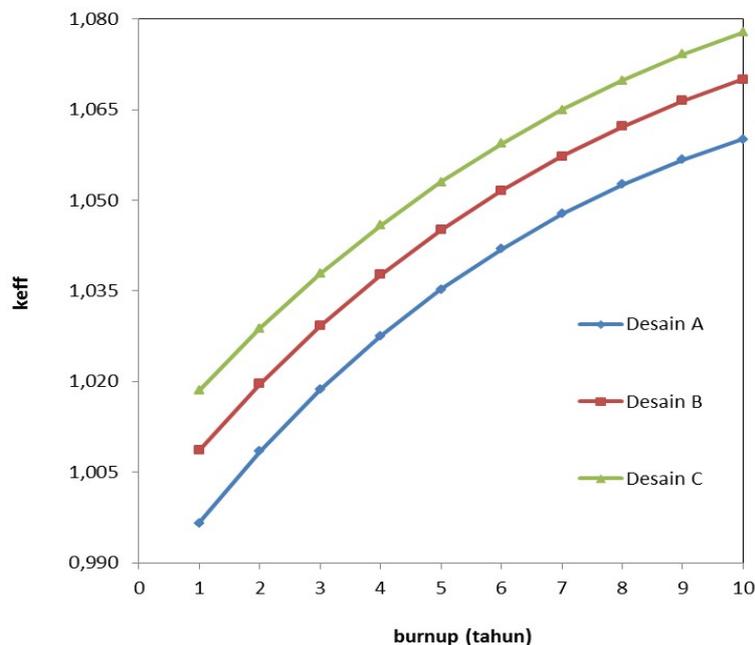


**Gambar 3** Diagram Alir Perhitungan SRAC

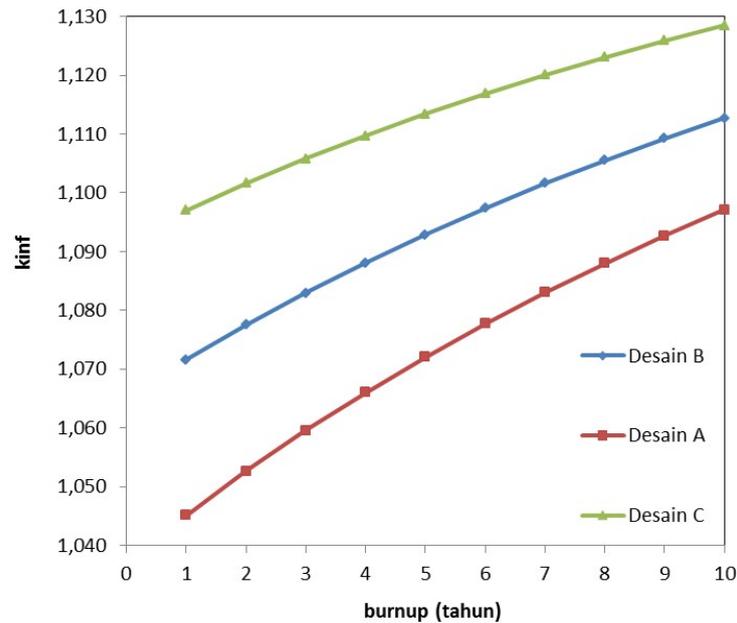
### III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil perhitungan SRAC pada reaktor GFR dilakukan dengan membandingkan ketiga desain reaktor terhadap perbedaan fraksi volume sel bahan bakar yang digunakan. Bahan bakar yang digunakan adalah Uranium Nitride (UN). Uranium memiliki beberapa isotop diantaranya Uranium 234, 235 dan 238. Diantara ketiga isotop hanya Uranium 235 yang bersifat fisil dan jumlahnya di alam hanya 0,07 %, sehingga diperlukan proses pengayaan (*enrichment*) Uranium 235 untuk meningkatkan densitas atomnya. Proses pengayaan Uranium 235 pada Desain A, B dan C adalah sebesar 9,5 %, dikarenakan mulai dari pengayaan 9,5 % uranium 235 sel bahan bakar reaktor nuklir mencapai kekritisannya. Sel bahan bakar yang digunakan pada teras reaktor adalah sel yang mencapai kondisi kritis reaktor dengan nilai  $k_{eff} > 1$  agar reaktor dapat beroperasi dengan jumlah neutron yang dihasilkannya jauh lebih besar dari neutron yang terpakai.

Gambar 4 menunjukkan perubahan variasi fraksi volume bahan bakar di teras reaktor. Desain A dengan fraksi bahan bakar 55 % menghasilkan nilai  $k_{eff} < 1$  (0,996) artinya teras reaktor tidak dapat digunakan karena reaktor belum mencapai kondisi kritis. Hal ini dikarenakan jumlah neutron yang diproduksi sebelumnya lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah neutron sesudahnya sehingga makin lama neutron yang mengalami reaksi fisi akan habis sebelum masa operasi reaktor berakhir. Kekritisan reaktor terjadi pada Desain B dan Desain C dengan nilai  $k_{eff} > 1$ . Desain B mencapai kondisi kritis pada  $k_{eff} > 1,008$  dengan *excess reactivity* 0,031% sedangkan untuk Desain C kekritisan reaktor pada  $k_{eff} > 1,018$  dan *excess reactivity* nya bernilai 0,039%. *Excess reactivity* menyatakan adanya kelebihan reaktivitas reaktor akibat kenaikan nilai  $k_{eff}$  di dalam teras reaktor. Dengan demikian desain B yang memiliki *excess reactivity* lebih kecil dari desain C, memiliki kelebihan reaktivitas reaktor lebih kecil dibandingkan desain C. Pada Gambar 5 menunjukkan perubahan nilai  $k_{inf}$  terhadap waktu burnup. Nilai  $k_{inf}$  menyatakan pertambahan dan pengurangan fluks neutron tanpa adanya faktor kebocoran. Semakin besar komposisi densitas atom uranium 235 yang diberikan maka nilai  $k_{inf}$  juga akan semakin meningkat. Desain A nilai  $k_{inf} > 1,002$ , Desain B  $k_{inf} > 1,014$  dan Desain C  $k_{inf} > 1,023$ .

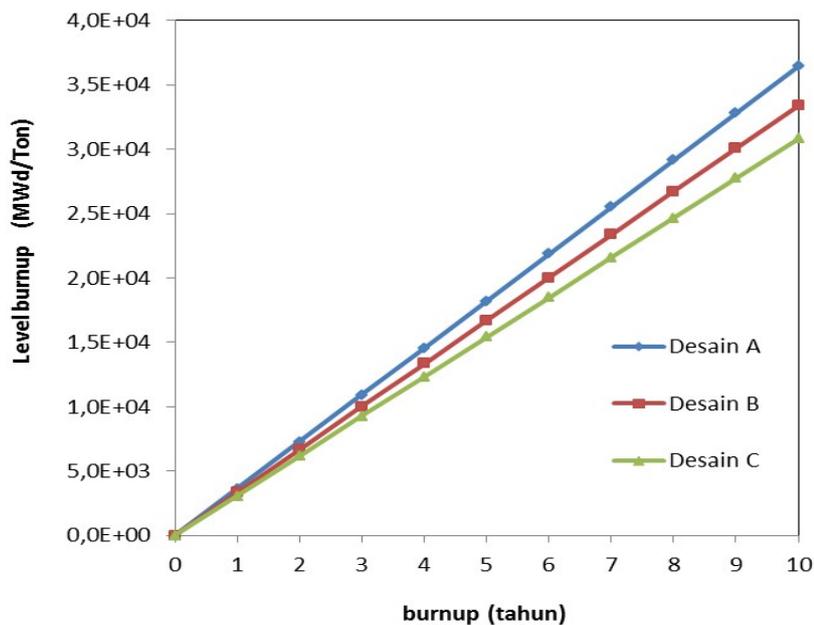


**Gambar 4** Perubahan  $k_{eff}$  Variasi Fraksi Volume terhadap waktu burnup



**Gambar 5** Perubahan  $k_{inf}$  Variasi Fraksi Volume terhadap waktu burnup

Perbedaan fraksi volume pada Desain A, B dan C menyebabkan perbedaan nilai level burnup. Burnup menyatakan total energi per unit massa bahan bakar sebagai hasil pembakaan bahan bakar. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6 menunjukkan perubahan level burnup sepanjang waktu burnupnya, dimana level burnup akan terus meningkat selama bertambahnya waktu burnup. Perbedaan fraksi volume bahan bakar yang digunakan, dapat dilihat pada Gambar 6, bahwa semakin tinggi fraksi volume bakar bakar yang digunakan semakin kecil level burnupnya. Hal ini dipengaruhi semakin besar komposisi bahan bakar fisil uranium 235 yang digunakan maka akan mengurangi jumlah penggunaan uranium 238 yang akan mengalami penyusutan akibat dari berbagai proses nuklir seperti reaksi fisi, penangkapan neutron dan hamburan (*scattering*).



**Gambar 6** Perubahan Level Burnup

#### IV. KESIMPULAN

Desain GFR berbasis bahan bakar Uranium nitride dengan pengayaan 9,5% uranium 235 dan fraksi volume 60% *fuel*, 10% *cladding* dan 30 % *coolant* , reaktor mencapai kondisi kritis pada  $k_{eff} > 1$  (1,008 –1,051) dan  $k_{inf} > 1$  (1,071–1,112) dengan *excess reactivity* 0,031%. Level burnup di tahun kesepuluh menghasilkan energi sebesar 3,083 GWD/ton. Reaktor GFR Desain B dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa proses *refueling* memiliki kondisi efektivitas dan efisiensi bahan bakar lebih baik dibandingkan kedua desain lainnya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Anggoro, D.Y., Nurlaila, D.D., Yuliyanto, A. T., Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Volume 15, Nomor 2, 2013.
- Ariani, M., Su'ud, Z., Monado, F., Waris, A., Arif, K.I., Azis, F., dan Sekimoto, H., Optimization of Small Long Life Gas Cooled Fast Reactors with Natural Uranium as Fuel Cycle Input. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 260-261, 2013: 307-311.
- IAEA. International Status and Prospects for Nuclear Power 2014. GOV/INF/2014/13-GC(58)/INF/6. 2014.
- Laidler, K.J., *The World of Physical Chemistry*. Oxford University Press, Oxford.1993.
- Meyers, M.K., Fielding, R., Gan, J., Nuclear Fuels and Structural Materials for Next Generation Nuclear Reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 371, 2007: 281–287.
- Monado, F., Ariani, M., Su'ud, Z., Waris, A., Basar, K., Aziz, F., Permana, S., and Sekimoto, H., Conceptual Design Study on Very Small Long –Life Gas Cooled Fast Reactor using Metallic Natural Uranium-Zr as Fuel Cycle Input. *AIP Conference Proceedings* 2014: 105-108.
- Ngadenin, Syaeful, H., Widana, K.S., Nurdin, M., Potensi Thorium dan Uranium di Kabupaten Bangka Barat. *Eksplorium*, Volume 35 No.2, November 2014: 69-84.
- Novalianda, S., Ariani, M., Monado, F., dan Su'ud, Z., Neutronic Design Of Uranium-Plutonium Nitride Fuel-Based Gas-Cooled Fast Reactor (GFR). *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia* 14 (2) 2018: 92-98.
- Novalianda, S., Ramadhan, A., Su'ud, Z., Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*, Volume 22, Nomor 2, 2020: 50-54.
- Okumura, Kugo, T., Kaneko, K., and Tsuchihashi, K., SRAC2006: *A Comprehensive Neutronic Calculation Code System*, JAEA-Data/Code 2007-004, Reactor Physics Group, Nuclear Science and Engineering Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 2007.
- Syarifah, R.D., Su'ud,Z., Basar, K., and Irwanto, D., The Prospect of Uranium nitride (UN-PuN) fuel for 25-100 MWe gas cooled fast reactor long life without refuelling. 8th International Conference on Physics and its Applications (ICOPIA). *Journal of Physics: Conference Series* 776, 2016.
- Tukiran, S., Suparlina, L., Analisis Pengaruh Densitas Bahan Bakar Terhadap Fluks Neutron Pada Teras Reaktor Riset Tipe MTR. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah-Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2012*. Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATAN. ISSN 0216-3128.