

Analisis Kekritisian dan Rasio Konversi Reaktor Cepat Berpendingin Gas dengan Variasi Fraksi Bahan Bakar UN-PuN Menggunakan Skema *Burn-up Modified CANDLE* Arah Radial

Feriska Handayani Irka^{1,2,*}, Zaki Su'ud¹, Dwi Irwanto¹, Siti Nurul Khotimah¹, Hiroshi Sekimoto³

¹Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

²Departemen Fisika, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

³Emeritus Professor, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

ARTICLE INFO

Riwayat Artikel:

Draft diterima: 7 April 2023

Revisi diterima: 18 April 2023

Diterima: 24 April 2023

Tersedia Online: 30 April 2023

Corresponding author:

feriska@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Analisis kekritisian dan rasio konversi reaktor cepat berpendingin gas (GFR) dengan variasi fraksi bahan bakar UN-PuN menggunakan skema *burn-up modified CANDLE* arah radial telah dilakukan. Fraksi bahan bakar divariasikan dari 40%-60% dengan interval 5%, fraksi material perisai (*cladding*) dibuat tetap 10% dan fraksi pendingin bervariasi dari 30%-50%. Perhitungan data dilakukan menggunakan pemrograman SRAC 2006 dengan data pustaka JENDL 4.0. Reaktor dibagi menjadi 10 region dengan volume yang sama pada arah radial. Masing masing region diisi bahan bakar uranium alam tanpa pengayaan dengan tingkat pembakaran berbeda. Penyusunan region dilakukan sedemikian rupa agar reaktor mampu mencapai kondisi kritis sepanjang periode *burn-up*. Hasil penelitian menunjukkan variasi fraksi bahan bakar 40% belum mampu mencapai kondisi kritis pada awal periode *burn-up*, sedangkan variasi fraksi bahan bakar 45%-60% sudah mencapai kekritisian reaktor. Rasio konversi untuk semua fraksi bahan bakar bernilai lebih dari 1, yang mengindikasikan telah terjadi proses pembiakan di dalam teras reaktor GFR. Rasio konversi untuk semua variasi fraksi bahan bakar memiliki pola yang hampir sama untuk semua region. Region 1 memiliki nilai rasio konversi terbesar karena diinputkan uranium alam yang memiliki densitas ^{238}U paling besar dibanding region lainnya.

Kata kunci: fraksi bahan bakar, rasio konversi, modified CANDLE, keff, GFR.

ABSTRACT

Analysis of the criticality and conversion ratio of a gas-cooled fast reactor (GFR) with various UN-PuN fuel fractions using modified CANDLE scheme burn-up in radial direction has been conducted. The fuel fraction varies from 40% - 60% with 5% intervals, the cladding fraction is 10% and the coolant fraction varies from 30% -50%. Data calculations were performed using SRAC 2006 programming with JENDL 4.0 library data. The reactor is divided into 10 regions with equal volume in the radial direction. Each region is filled with natural uranium fuel without enrichment with different burn-up levels. Regions are arranged in such a way that the reactor can reach critical conditions throughout the burn-up period. The results showed that variations in the 40% fuel fraction had not been able to reach critical conditions at the beginning of life, while 45%-60% fuel fraction variations had reached reactor criticality. The conversion ratio for all fuel fractions is greater than 1, which indicates that a breeding process appears in the GFR reactor core. The conversion ratio for all variations in fuel fractions has almost the same pattern for all regions. The first region has the largest conversion ratio value because it has natural uranium as fuel input which has the highest density ^{238}U compared to other regions.

Keywords: fuel fraction, conversion ratio, modified CANDLE, keff, GFR.

1. PENDAHULUAN

Reaktor cepat berpendingin gas (*gas cooled fast reactor*-GFR) adalah satu dari enam reaktor generasi keempat yang sedang dikembangkan. GFR memiliki siklus tertutup dengan pendingin gas helium. Reaktor ini juga berpeluang untuk menghasilkan efisiensi termal yang tinggi karena mampu beroperasi dengan suhu masukan dan suhu keluaran teras yang lebih tinggi. GFR mampu membakar aktinida minor dan produk fisi karena beroperasi dengan spektrum neutron cepat (*fast neutron*). Keunggulan lainnya adalah dalam segi ketahanan, reaktor ini memiliki umur operasi yang panjang (*sustainability aspect*) dan dapat beroperasi menggunakan uranium alam/limbah bahan bakar (*depleted uranium*) sehingga terhindar dari isu penyalahgunaan energi nuklir sebagai senjata nuklir (*proliferation issue*) [1].

Penggunaan uranium alam di dalam teras reaktor langsung tanpa adanya proses pengayaan isotop ^{235}U tentu bukan hal yang mudah. Uranium alam memiliki isotop fisiil ^{235}U dengan fraksi yang kecil (0,711%). Reaktor komersil biasanya beroperasi dengan pengayaan isotop ^{235}U sebanyak 3-5 % [2]. Selain isotop ^{235}U di dalam uranium alam juga terdapat isotop ^{238}U yang bersifat fertil yang memiliki persentase 99,284%. Isotop ^{238}U jika bereaksi melalui reaksi pembelahan dengan neutron yang berenergi lebih dari 1 MeV, akan menghasilkan isotop ^{239}Pu yang bersifat fisiil seperti yang terlihat pada persamaan 1 [3]. Kemampuan bahan fertil dirubah menjadi bahan fisiil disebut rasio konversi (CR), yang besarnya dapat dicari menggunakan persamaan 2 [4]. Jika nilai rasio konversi lebih besar dari satu maka kondisi ini disebut rasio breeding (BR).



$$CR = \frac{\text{jumlah konversi atom fertil}}{\text{jumlah konsumsi atom fisiil}} \quad (2)$$

$$k = \frac{v\Sigma_f/\Sigma_a}{1+L^2B_g^2} \quad (3)$$

Ide penggunaan isotop fertil ^{238}U pada reaktor cepat agar dihasilkan isotop fisiil ^{239}Pu sebagai bahan bakar sudah banyak diteliti. Sejak tahun 1958 studi teoritis mengenai penggunaan bahan bakar hasil konversi ^{238}U menjadi ^{239}Pu dan penggunaan limbah uranium sudah dilakukan, jenis reaktor ini disebut breed and burn reactor (*B&B reactor*) [5]. Dalam perkembangannya *B&B reactor* dikenal dengan istilah *travelling wave reactor*, karena reaktor ini mampu mempropagasi pembakaran di dalam teras reaktor dengan mengkonversi isotop fertil menjadi fisiil menggunakan transmudasi nuklir yang ditandem dengan pembakaran isotop fisiil [6-7]. Sekimoto menamakan reaktor dengan jenis pembakaran seperti ini dengan *CANDLE* (*Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy producing reactor*), yang berarti pembakaran dalam teras reaktor menyebar secara mandiri pada arah aksial dengan densitas, fluks dan daya reaktor yang konstan persis seperti terbakarnya lilin [8]. Su'ud memodifikasi skema bakar ini dengan membagi daerah diskrit dalam teras reaktor pada arah aksial, radial dan campuran aksial-radial, skema ini disebut *modified CANDLE* [9-13]. *B&B reactor*, *travelling wave reactor*, *CANDLE* dan *Modified CANDLE* adalah terobosan yang dilakukan agar reaktor mampu beroperasi dengan siklus input bahan bakar uranium alam tanpa pengayaan dan reaktor mampu beroperasi dengan umur panjang.

Penggunaan uranium alam langsung tanpa pengayaan membutuhkan strategi dan kajian neutronik agar reaktor bisa beroperasi pada kondisi kritis. Kekritisan reaktor dilihat dari nilai faktor multiplikasi (k) seperti yang terlihat pada persamaan 3 [14]. Dengan k adalah faktor multiplikasi, v adalah jumlah neutron rata-rata yang dihasilkan dalam satu kali fisi, L adalah jumlah neutron yang hilang dalam teras reaktor, B_g adalah *geometrical buckling* dan Σ adalah penampang lintang makroskopik fisi (Σ_f) dan serapan (Σ_a); yang dipengaruhi oleh penampang lintang mikroskopik (σ) dan densitas atomik masing-masing material (N). densitas atomik berkorelasi linear dengan fraksi bahan bakar, semakin besar nilai fraksi bahan bakar semakin besar nilai densitas atomik.

K_{eff} adalah gambaran jumlah neutron pada satu generasi dibandingkan dengan generasi sebelumnya untuk reaktor yang berukuran *finite* [14]. Dalam mendesain reaktor nuklir tugas utama yang harus dicapai adalah membuat teras reaktor beroperasi dalam kondisi kritis, yaitu nilai k_{eff} sama dengan satu. Jika nilai k_{eff} kecil dari satu, jumlah neutron berkurang dari generasi ke generasi dan mengakibatkan terputusnya reaksi nuklir berantai. Hal ini menunjukkan reaktor berada dalam kondisi subkritis. Jika nilai k_{eff} lebih besar dari satu, reaksi berantai akan berkembang tanpa batas karena jumlah neutron di generasi berikutnya akan semakin besar. Reaktor dengan kondisi ini disebut superkritis. Analisis rasio konversi dilakukan untuk melihat proses konversi bahan fertil ^{238}U menjadi bahan fisiil ^{239}Pu karena siklus input bahan bakar yang digunakan adalah uranium alam tanpa pengayaan.

Pada artikel ini dilakukan analisis kekritisan GFR dan rasio konversi ^{238}U menjadi ^{239}Pu dengan memvariasikan fraksi bahan bakar. Berdasarkan *Gen IV GFR statues of study*, desain teras GFR terdiri dari fraksi bahan bakar 40%-50% [15]. Pada penelitian ini GFR menggunakan siklus input bahan bakar uranium alam tanpa pengayaan, dikhawatirkan fraksi bahan bakar yang kecil belum mampu membuat teras reaktor berada dalam kondisi kritis, maka variasi fraksi bahan bakar divariasikan dari 40%-60%. Tujuan

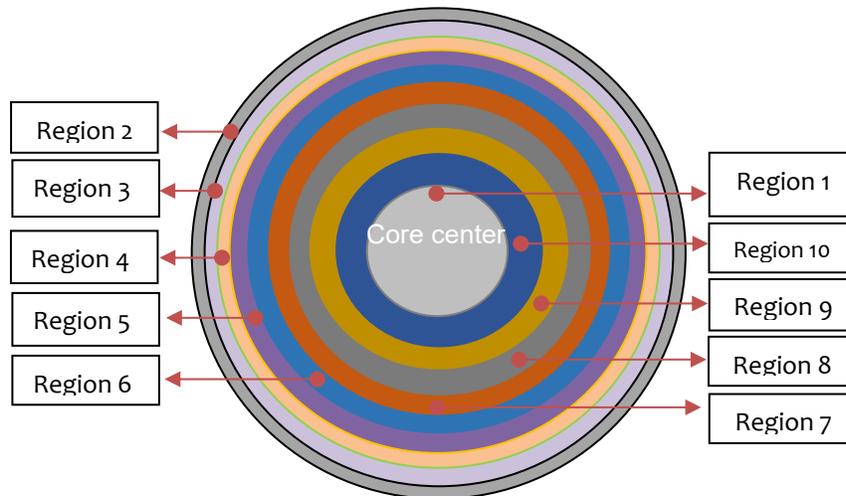
dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan fraksi bahan bakar yang sesuai dengan desain GFR dan mampu bertahan dengan siklus input bahan bakar uranium alam tanpa pengayaan.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan rasio konversi dan analisis kekritisan GFR dengan siklus input bahan bakar uranium alam tanpa pengayaan. spesifikasi desain reaktor yang digunakan seperti yang terlihat pada tabel 1. Geometri teras berupa silinder 2D R-Z dengan tipe teras seimbang (*balance core*). Perhitungan kekritisan reaktor (k_{eff}) dan rasio konversi dilakukan menggunakan simulasi komputasi SRAC (*Standard reactor analysis code*) 2006 menggunakan data pustaka nuklir JENDL 4.0[16,17]. SRAC adalah kode komputasi yang dikembangkan oleh JAERI (*Japan atomic energy research institute*) yang memungkinkan perhitungan neutronik untuk beberapa jenis reaktor nuklir.

Tabel 1. Spesifikasi parameter reaktor.

Parameter	Spesifikasi
Geometri pin bahan bakar	Silinder sel
Geometri teras	Silinder 2D R-Z
Pengisian ulang bahan bakar (tahun)	10
Bahan bakar	UN-PuN
Cladding	SS316
Pendingin	Helium
Diameter pin bahan bakar (cm)	1.4
Fraksi bahan bakar (%)	40-60
Fraksi cladding (%)	10
Fraksi pendingin (%)	30-50
Diameter teras aktif (cm)	212
Tinggi teras aktif (cm)	212
Lebar reflektor (cm)	50
Daya keluaran (MWt)	300



Gambar 1. Skema penyusunan bahan bakar

Pada modul PIJ SRAC dilakukan perhitungan homogenisasi sel dan perhitungan *burn-up* sel. Data makroskopik hasil modul PIJ nantinya digunakan untuk perhitungan teras reaktor pada modul Citation. *Power density* yang didapatkan dari modul citation nantinya digunakan lagi pada modul PIJ, begitu seterusnya sampai tercapai data yang konvergen dengan error kecil dari 10^{-7} . Nilai k_{eff} didapatkan dari perhitungan teras pada modul citation dan nilai rasio konversi ^{238}U menjadi ^{239}Pu untuk semua region didalam teras reaktor didapatkan dari modul PIJ. Reaktor pada penelitian ini dibagi menjadi 10 region dengan volume yang sama pada arah radial. Penempatan bahan bakar di dalam teras reaktor diatur sedemikian rupa agar hasil pembakaran selama 100 tahun dalam perhitungan sel pada modul PIJ mampu untuk mempertahankan reaktor beroperasi selama 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar.

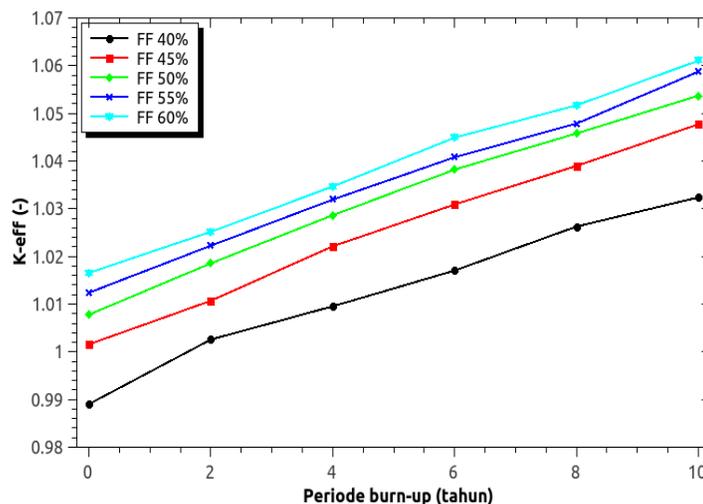
Bahan bakar berupa uranium alam diletakkan pada region 1. Setelah 10 tahun masa pembakaran, bahan bakar pada region 1 dipindahkan ke region 2, bahan bakar pada region 2 dipindahkan ke region 3 dan seterusnya sehingga bahan bakar pada region 10 dikeluarkan dari teras reaktor. Region 2 adalah uranium alam yang telah dibakar selama 10 tahun, region 3 adalah uranium alam yang telah dibakar selama 20 tahun dan begitu seterusnya sampai region 10 berisi uranium alam yang telah dibakar selama 90 tahun. Skema penyusunan bahan bakar ini bisa dilihat pada gambar 1. Pada penelitian ini dilakukan variasi fraksi bahan bakar dari 40-60% dengan interval kenaikan 5%. Bahan bakar yang digunakan uranium plutonium nitrida (UN-PuN), cladding stainless steel 316 (SS316) dan daya reaktor 300 MWth.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada gambar 2 terlihat nilai k_{eff} selama periode burn-up untuk bahan bakar dengan fraksi 40%-60%. Tren grafik dari masing-masing variasi fraksi bahan bakar hampir sama yaitu nilai k_{eff} sepanjang periode burn-up cenderung naik. Penambahan fraksi bahan bakar mengakibatkan kenaikan nilai k_{eff} di awal dan sepanjang periode burn-up. Hal ini sudah sesuai dengan persamaan 3, yang menyatakan bahwa penambahan fraksi bahan bakar akan meningkatkan densitas nuklida bahan bakar dan mengakibatkan naiknya nilai k_{eff} .

Fraksi bahan bakar 40% belum mampu mencapai kondisi kritis di awal periode siklus. Hal ini menggambarkan bahwa densitas nuklida bahan bakar dengan variasi fraksi 40% belum mampu mempertahankan populasi neutron dari satu generasi ke generasi berikutnya. Dari kelima variasi fraksi bahan bakar yang dihitung, didapatkan variasi fraksi 45% memiliki performa yang paling baik secara ekonomi dan kinerja reaktor nuklir. Nilai persentase 45% juga sudah masuk kedalam rentang nilai fraksi bahan bakar yang bisa diset untuk reaktor generasi IV GFR [15].

Rasio konversi isotop fertil ^{238}U menjadi isotop ^{239}Pu terlihat pada gambar 3a-3e masing-masing region menunjukkan nilai rasio konversi diatas 1 yang berarti kondisi pembiakan telah tercapai. Nilai rasio konversi untuk awal periode burn-up di semua region dengan variasi fraksi bahan bakar 40%-60% juga bisa dilihat pada tabel 2. Rasio konversi di region 1 memiliki nilai paling besar dan terjadi penurunan secara drastis selama 10 tahun periode pembakaran. Hal ini terjadi karena region 1 berisi uranium alam yang merupakan bahan bakar baru sehingga memiliki densitas ^{238}U yang besar di banding region yang lain. Region 10 memiliki nilai rasio konversi terkecil karena bahan bakar yang ditempatkan di region 10 adalah uranium alam yang telah dibakar selama 90 tahun

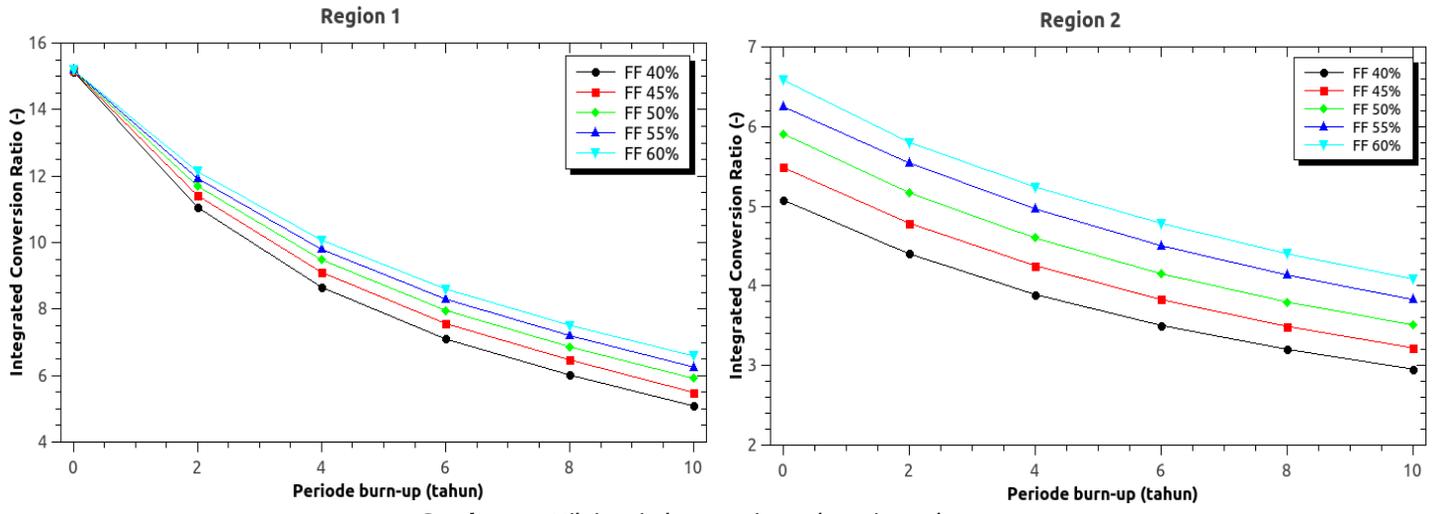


Gambar 2. Nilai k_{eff} untuk fraksi bahan bakar 40%-60%

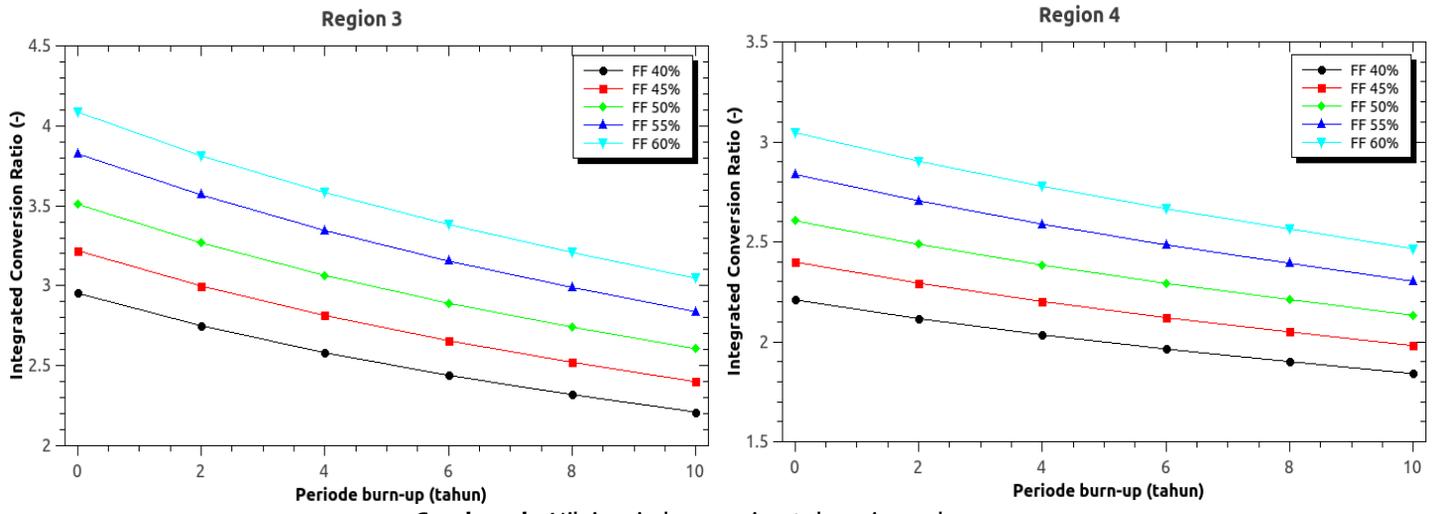
Tabel 2. Nilai rasio konversi region 1-10 di awal periode siklus untuk lima variasi fraksi bahan bakar.

Fuel Fraction	60%	55%	50%	45%	40%
Region ke					
1	15,19082	15,1841	15,17483	15,1617	15,14272
2	6,58569	6,250587	5,909264	5,486297	5,078508
3	4,086794	3,825931	3,509449	3,219851	2,953564
4	3,046208	2,837457	2,605481	2,398905	2,209589
5	2,464924	2,302365	2,132191	1,980154	1,840173
6	2,094402	1,969997	1,843906	1,729861	1,623722

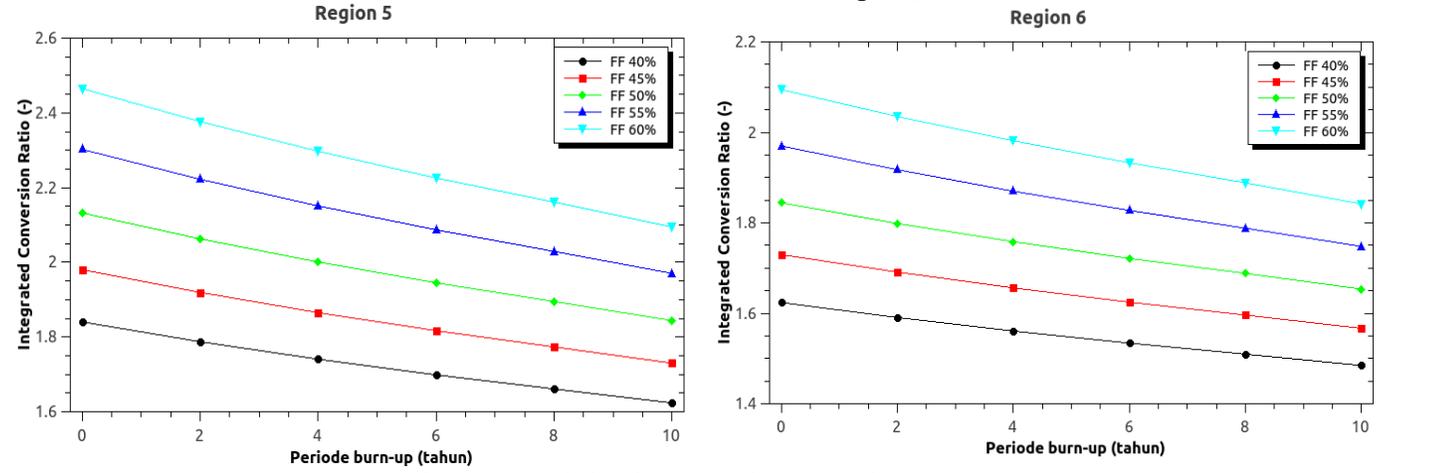
7	1,841497	1,747425	1,653359	1,566673	1,484642
8	1,663184	1,592372	1,521649	1,454835	1,390217
9	1,536441	1,482703	1,428684	1,376111	1,323992
10	1,448355	1,40617	1,363412	1,320524	1,277021



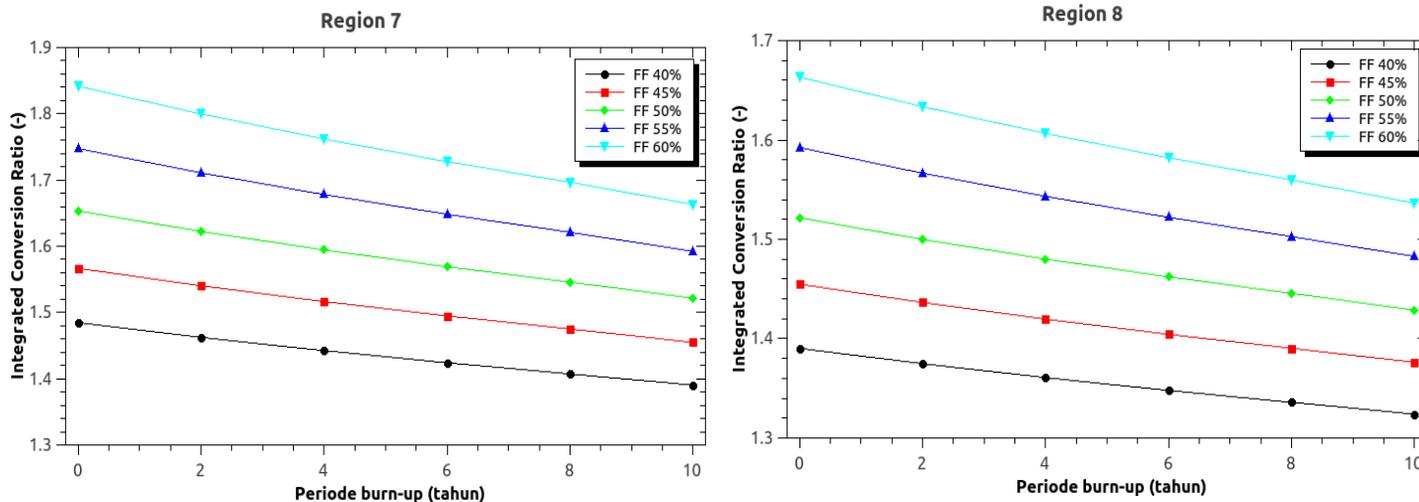
Gambar 3a. Nilai rasio konversi untuk region 1 dan 2



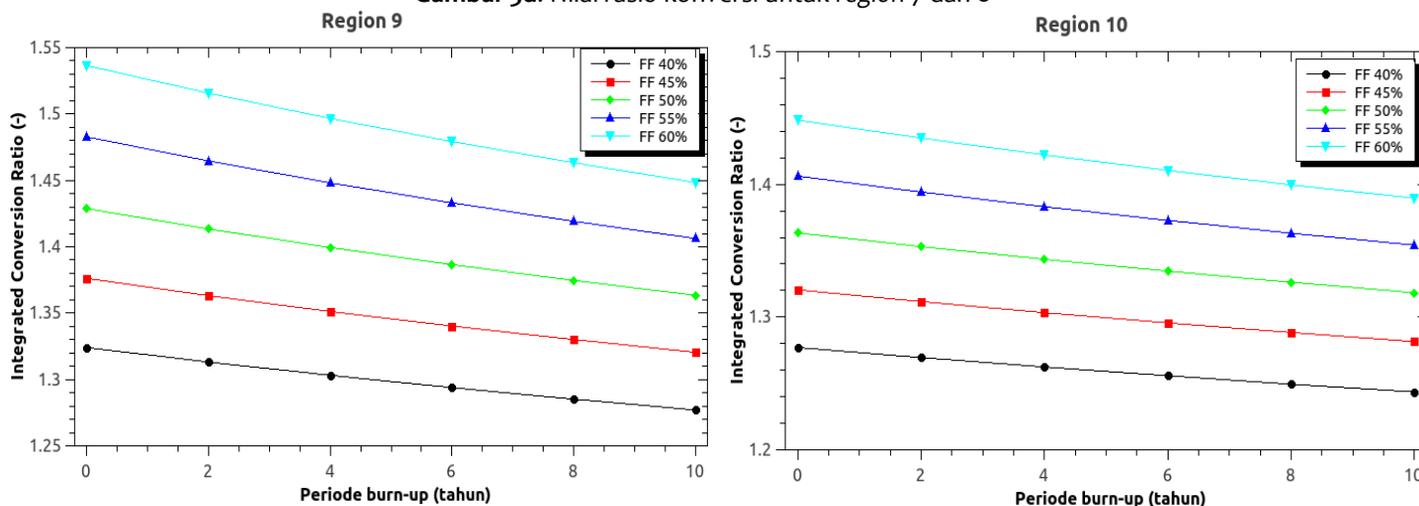
Gambar 3b. Nilai rasio konversi untuk region 3 dan 4



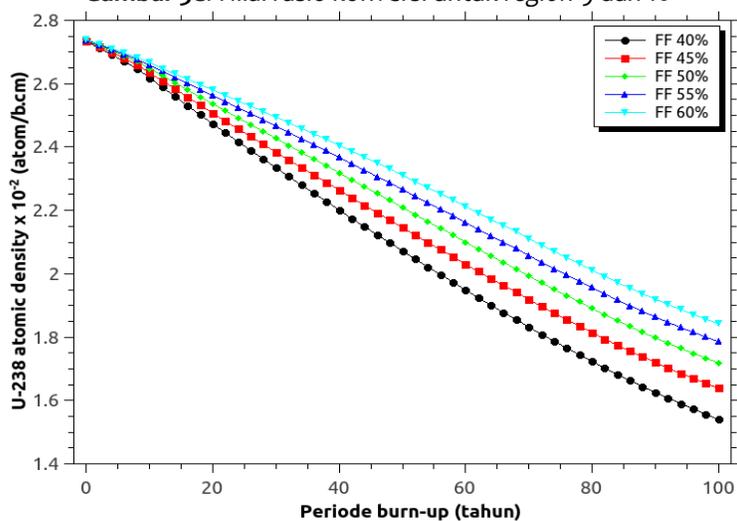
Gambar 3c. Nilai rasio konversi untuk region 5 dan 6



Gambar 3d. Nilai rasio konversi untuk region 7 dan 8



Gambar 3e. Nilai rasio konversi untuk region 9 dan 10

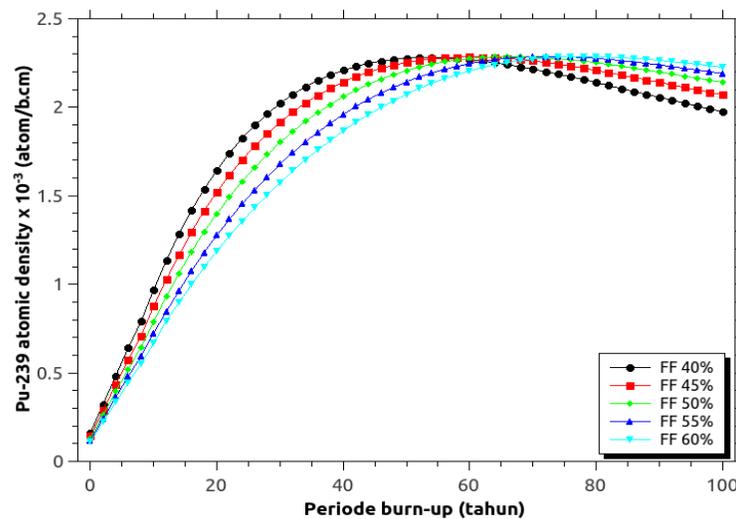


Gambar 4. Densitas atom ^{238}U sepanjang periode burn-up.

Tabel 3. Nilai maksimum *burn-up* untuk lima variasi fraksi bahan bakar

Fuel fraction	Nilai maksimum <i>burn-up</i> (%HM)
40%	33,45
45%	29,76
50%	26,82
55%	24,41
60%	22,39

Hal ini menunjukkan nilai densitas ^{238}U sudah berkurang dan pemakaian isotop fisil ^{239}Pu juga sudah semakin besar seperti yang terlihat pada gambar 4 dan gambar 5. Hal inilah yang melatarbelakangi penempatan *region* pada desain GFR menggunakan siklus input uranium alam tanpa pengayaan ini, sehingga *region* 1 diletakkan berdekatan dengan *region* 10. Dari hasil penelitian ini terlihat bahwasanya rasio konversi yang lebih besar dari 1 menunjukkan proses *breeding* (pembiasaan) isotop fisil telah terjadi dan variasi fraksi bahan bakar 45% sudah mampu mempertahankan kekritisan reaktor sepanjang periode *burn-up* dengan nilai *burn-up* maksimum untuk setiap variasi fraksi bahan bakar seperti yang tertera pada tabel 3.



Gambar 5. Densitas atom ^{239}Pu sepanjang periode *burn-up*.

Densitas atom ^{238}U pada gambar 4 cenderung berkurang seiring dengan bertambahnya periode pembakaran. Hal ini menunjukkan terjadi reaksi serapan neutron yang mengakibatkan munculnya isotop fertil ^{239}Pu seperti reaksi pada persamaan 1. Kelima variasi fraksi bahan bakar yang digunakan menunjukkan pola yang sama. Perbedaannya terlihat dari jumlah densitas atom di awal dan di akhir yang tentunya dipengaruhi oleh fraksi bahan bakar. Semakin besar fraksi bahan bakar maka nilai densitas atomnya juga semakin tinggi seperti dijelaskan pada persamaan 3. Densitas atom ^{238}U ini tentunya mempengaruhi densitas atom ^{239}Pu seperti yang terlihat pada gambar 5. Pada awal periode *burn-up* untuk semua variasi fraksi bahan bakar densitas ^{239}Pu nol yang mengindikasikan belum terjadi konversi dan pembiakan isotop fisil ^{239}Pu dari isotop fertil ^{238}U . Seiring berjalannya waktu, densitas atom ^{239}Pu semakin besar dan mencapai nilai maksimum sebelum akhirnya densitas atomnya berkurang. Hal ini menunjukkan jumlah atom fisil yang dikonsumsi lebih banyak dibandingkan jumlah atom fisil ^{239}Pu yang diproduksi. Fraksi bahan bakar 40% mencapai nilai maksimum lebih cepat dibandingkan fraksi bahan bakar lainnya. Semakin besar fraksi bahan bakar waktu untuk mencapai densitas atom maksimumnya semakin besar.

4. KESIMPULAN

Perhitungan dan analisis kekritisan serta rasio konversi reaktor cepat berpendingin gas dengan melakukan variasi fraksi bahan bakar telah dilakukan. Hasil yang diperoleh menunjukkan fraksi bahan bakar 40% belum mampu mencapai kekritisan reaktor pada awal periode *burn-up*, sedangkan variasi lainnya 45%-60% sudah mencapai kekritisan reaktor sepanjang periode *burn-up*. rasio konversi untuk semua variasi fraksi bahan bakar bernilai lebih dari satu. Hal ini menandakan bahwa GFR dengan spektrum neutron cepat telah berhasil membiakkan isotop fertil ^{238}U menjadi isotop fisil ^{239}Pu dan GFR mampu beroperasi dengan siklus input bahan bakar uranium alam tanpa pengayaan sepanjang periode *burn-up*.

5. REFERENSI

- [1] Pioro I. L, Handbook of Generation IV Nuclear Reactors Worehead Publishing Series in Energy 103 1-10, 2016.
- [2] World nuclear association, Uranium Enrichment, 2022.
- [3] Batan, Prinsip Reaktor Pembangkit Cepat, Ensiklopedi, 2023.
- [4] Murray, L. Raymond dan Holbert, Keith E. Nuclear Energy (eighth edition), book chapter science direct, 505-523, 2020.
- [5] Feinberg, S. M. Discussion Comment, Rec. Of Proc. Session B-10. ICP UAE, United Nations, Geneva, Switzerland, 1958.
- [6] Zhang, D., Chen, X. N., Flad, M., Rineiski, A. & Maschek, W. Theoretical and numerical studies of TWR based on ESFR core design. Energy Convers. Manag., 72, 12–18, 2013.
- [7] Zhang, D. et al. Numerical studies of stepwise radial fuel shuffling in a traveling wave reactor. Sci. China Technol. Sci. 57, 1229–1237, 2014.
- [8] Sekimoto, H., Ryu, K. & Yoshimura, Y. CANDLE: The new burn-up strategy. Nucl. Sci. Eng. 139, 306–317, 2001.
- [9] Su'ud, Z. & Sekimoto, H. Optimization of Modified Candle Burn-up Scheme Based Long Life Pb-Bi Cooled Fast Reactor with Natural Uranium as Fuel Cycle Input, Japan: N. P., 2008.
- [10] Su'ud, Z. & Sekimoto, H. The prospect of gas-cooled fast reactors for long-life reactors with natural uranium as fuel cycle input. Ann. Nucl. Energy 54, 58–66, 2013.
- [11] Rida, S. N. M. & Su'ud, Z. A design study of Pb-Bi-cooled fast reactors with natural uranium as the fuel cycle input. Int. J. Nucl. Energy Sci. Technol. 4, 217–222, 2009.
- [12] Su'ud, Z., Ilham, M., Widiawati, N. & Sekimoto, H. Modified CANDLE Burn-up Calculation System, Its Evolution, and Future Development. J. Phys. Conf. Ser. 1090, 2018.
- [13] Su'ud, Z., Irka, F. H., Imam, T. T., Sekimoto, H. & Sidik, P. Desain study of Pb-Bi cooled fast reactors with natural uranium as fuel cycle input using special shuffling strategy in radial direction. Advance Material Research, 772, 530–535, 2013.
- [14] Duderstadt, J. J. dan Hamilton, L. J. Nuclear Reactor Analysis, John Wiley Sons, 1976.
- [15] Rouault, J. dan Wei, T.Y.C., The Gen IV Gas Cooled Fast Reactor: Statues of Studies, nuclear energy agency, 2005.
- [16] Okumura, K., T. Kugo, K. Kaneko, dan K. Tsuchihashi, SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System, Japan: Japan Atomic Energy Agency, 2007.
- [17] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa et al., JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering, J. Nucl. Sci. Technol., 48, 1–30, 2011.