

Analisis Desain Teras *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) Berpendingin S-CO₂ Berbahan Bakar Uranium Nitrit dengan Minor Aktinida

Wulan Gontina, Fiber Monado*, Menik Ariani, Hadir Kaban, Erwin
Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya,
Kampus Pascasarjana Unsri, Jalan Padang Selasa, Palembang-30139

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 5 Oktober 2023
Direvisi: 11 Desember 2023
Diterima: 22 Desember 2023

Kata kunci:

GFR
Minor Aktinida
S-CO₂
Uranium Nitrit

Keywords:

GFR
Actinide Minor
S-CO₂
Uranium Nitrite

Penulis Korespondensi:

Fiber Monado
Email: fibermonado@unsri.ac.id

ABSTRAK

Telah dilakukan analisis desain teras *Gas cooled Fast Reactor* (GFR) berpendingin S-CO₂ berbahan bakar Uranium Nitrit dengan Minor Aktinida sehingga dapat beroperasi dalam waktu lama. Sistem suhu tinggi, keandalan spektrum cepat dan siklus bahan bakar tertutup GFR dapat meminimalkan limbah reaktor dengan penggunaan Uranium berkelanjutan dari minor aktinida. Karakteristik S-CO₂ yang stabil, tidak mudah terbakar dan suhu puncak reaktif rendah (~650°C) mampu mendinginkan teras reaktor. Metode penyusunan bahan bakar menggunakan strategi *burn-up Modified CANDLE*. Strategi pembakaran MCANDLE dalam *shuffling* arah radial dengan dua pengisian bahan bakar, skema X (dari luar teras ke arah dalam) dan skema Y (dari pusat teras ke luar), telah diterapkan. Digunakan SRAC dan data JENDL-4.0 dalam perhitungan. Pada penelitian ini diperoleh studi parameter melalui perhitungan nilai faktor multiplikasi infinite, faktor multiplikasi efektif, reaktivitas dan distribusi daya. Hasil perhitungan menunjukkan nilai K_{eff} sebelum penambahan Minor Aktinida untuk skema X dan Y adalah 1,0893 dan 1,0915. Setelah penambahan minor aktinida nilai K_{eff} 1% - 7% pada skema X dan Y berada pada kondisi kritis dan setelah penambahan minor aktinida 4% - 7% reaktor berada pada kondisi superkritis. Reaktivitas reaktor pada skema X dan Y adalah 0,0939 dan 0,1089. Untuk distribusi daya arah aksial skema X dan Y 1,5285 dan 1,5323. Untuk distribusi daya arah radial pada skema X dan Y adalah 1,5862 dan 1,8320. Berdasarkan hasil tersebut penambahan minor aktinida dan skema penyusunan bahan bakar mempengaruhi kekritisan dan distribusi daya teras GFR.

An analysis of the design core Gas-cooled Fast Reactor (GFR) with S-CO₂ coolant fueled Uranium Nitrite with Minor Actinide has been done so that it can operate for a long time. GFR's high-temperature system, fast spectrum performance, and closed fuel cycle can minimize reactor waste with continuous use of Uranium from actinide minor. The characteristics of S-CO₂, which are stable, non-flammable, and low real peak temperature (~650°), can cool the reactor core. The fuel method uses a Modified CANDLE burn-up strategy. The MCANDLE burning strategy in the radial direction with two refueling schemes, scheme X (from the outside of the core to the inside) and scheme Y (from the center of the core to the outside), has been implemented. We used SRAC and JENDL-4.0 data in the calculations. In this research, parameter studies were obtained by calculating the values of the infinite multiplication factor, effective multiplication factor, reactivity, and power distribution. The results show that the K_{eff} value before adding Minor Actinides for schemes X and Y is 1.0893 and 1.0915. After adding minor actinide, the K_{eff} value of 1% - 7% in schemes X and Y is in critical condition, and after adding minor actinide 4% - 7%, the reactor is in supercritical condition. The reactor reactivity in schemes X and Y is 0.0939 and 0.1089. For the axial direction power distribution for the X and Y schemes, 1.5285 and 1.5323. The radial direction power distribution in the X and Y schemes is 1.5862 and 1.8320. Based on these results, the addition of minor actinides and the fuel preparation scheme affect the criticality and power distribution of the GFR core.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Reaktor nuklir sudah banyak digunakan baik di negara-negara maju maupun berkembang. Reaktor artinya tempat bereaksinya nuklir berantai secara berkesinambungan dengan laju konstan. Dulu, penggunaan reaktor nuklir dimaksudkan sebagai mesin pembuat hulu ledak nuklir hasil proliferasi Plutonium (Handayani et al., 2020). Dalam perkembangannya reaktor nuklir telah dibuat dari generasi ke-I, generasi ke-II, generasi ke-III, generasi ke-III+ dan generasi ke-IV (Sardi et al., 2018). Reaktor nuklir generasi ke-IV telah dibuat *passive safety*-nya agar tidak terulang kejadian seperti *Chernobyl* ataupun *Fukushima* (Ariani et al., 2015). Kelebihan lain reaktor generasi ke-IV ini adalah dari segi efisiensi *fuel*-nya, proliferasinya, faktor ekonominya, faktor operasionalnya, serta *area safety* eksklusifismenya (Sardi et al., 2018).

Reaktor generasi ke-IV seperti GFR terus dikembangkan sehingga bisa dikomersilkan di tahun 2030 mendatang (Ariani et al., 2013). Selama 2 dekade terakhir ini telah dilakukan penyelidikan oleh Komisi Eropa terhadap desain GFR. Hasil penyelidikan menetapkan bahwa akan dilakukan upaya tindak lanjut terhadap pengembangan reaktor GFR. Bahkan desain awal GFR yang menggunakan kelongsong logam dengan bahan bakar karbida maupun oksigen telah diprakarsai oleh Perusahaan Energi dan Pertahanan Amerika sejak 1962 lalu (*General Atomics*) (Raflis et al., 2021). Keunggulan desain GFR yaitu sistem suhu tinggi dan keandalan spektrum cepat dengan siklus bahan bakar tertutup. Dengan penggunaan Uranium berkelanjutan dalam spektrum cepat serta penggunaan aktinida sebagai hasil dari *recycle fuel* terbukti dapat meminimalkan limbah reaktor. Selanjutnya dapat dikembangkan sistem pengamanan pasif untuk meminimalkan kecelakaan reaktor (Monado et al., 2013).

Pada teras reaktor diperlukan *coolant* (bahan pendingin) dalam pengoperasiannya agar dapat menguraikan panas berlebih (Handayani et al., 2020). Selain gas karbondioksida dengan kondisi kritis terdapat juga pendingin gas karbondioksida dengan kondisi superkritis (S-CO₂). Keunggulan S-CO₂ adalah efisiensi termalnya dapat meningkat secara signifikan, mempunyai suhu puncak reaktif rendah (~650°C), titik kritisnya mencapai 31°C, harganya lebih murah, jumlahnya berlimpah di alam, stabil, tidak beracun, lembam, relatif tidak korosif dan tidak mudah terbakar (Lewis et al., 2011). Dengan menggunakan pendingin S-CO₂ ini diharapkan mampu menyerap panas dengan baik, daya serap terhadap neutron rendah dan dapat menyalurkan panas yang dihasilkan dari reaksi fisi berantai pada reaktor nuklir.

Telah diketahui bahwa disamping menghasilkan energi listrik penggunaan unsur Uranium menjadi bahan bakar reaktor tentunya akan menyisakan sejumlah limbah nuklir pada akhir pengoperasian reaktornya (Su'ud & Sekimoto, 2013). Campuran Uranium dengan Nitrit dapat dijadikan sumber bahan bakar utama. Pemanfaatan isotop N¹⁵ bertujuan untuk meningkatkan ekonomi neutron dan mengurangi pembentukan C¹⁴ dari reaksi N¹⁴ (n,p) C¹⁴, serta memiliki penampang penangkap neutron yang lebih kecil dari isotop N¹⁴ (Widiawati et al., 2022) Dalam limbah nuklir terdapat unsur-unsur Minor Aktinida dengan persentase sangat kecil jika dibandingkan unsur Plutonium (Waris & Budiono, 2008). Unsur-unsur Minor Aktinida dalam limbah PLTN terdiri atas nuklida-nuklida Np²³⁷, Am²⁴¹, Am²⁴², Am²⁴³, Cm²⁴² dan Cm²⁴⁴ dengan sifat radiotoksitas tinggi serta berumur panjang (Silakhuddin, 2008). Pada penelitian ini akan dilakukan penambahan unsur-unsur Minor Aktinida pada bahan bakar, yang terdiri atas nuklida Am²⁴¹ dan Np²³⁷. Dengan penambahan Minor Aktinida tersebut dapat dianalisis efektivitas dan efisiensi dalam reaksi fisi berantai yang terjadi di dalam teras reaktor.

Penelitian ini melakukan analisis desain teras GFR berpendingin gas S-CO₂ berbahan bakar Uranium Nitrit dengan penambahan Minor Aktinida merupakan inovasi baru dari penelitian sebelumnya tentang desain teras GFR. Desain teras GFR dari penelitian dengan pendingin S-CO₂ yang menggunakan Uranium Metalik alam sebagai bahan bakar dengan daya termal 350 MWth menghasilkan nilai K_{eff} awal siklus pembakaran 1,0490 hingga akhir siklus sebesar 1,0598 sehingga reaktor dikatakan memenuhi syarat untuk beroperasi (Darmawati et al., 2020).

II. METODE

Dalam perhitungan teras reaktor digunakan program *Standard Reactor Analysis Code* (SRAC) dan data JENDL-4.0. Spesifikasi parameter desain teras reaktor dapat dilihat pada tabel 1.

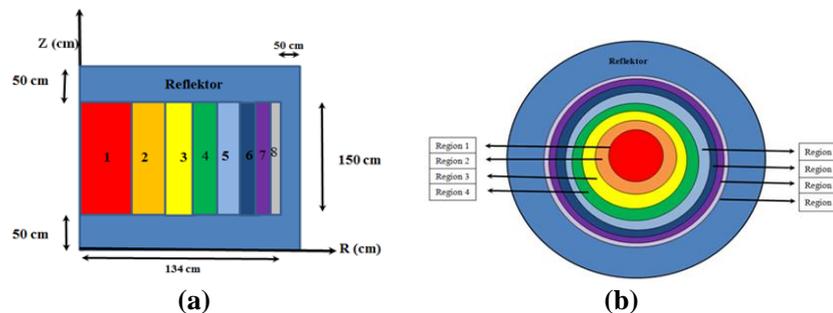
Tabel 1 Spesifikasi parameter desain teras reaktor

Parameter	Deskripsi
Daya Thermal	500 MWth
Siklus Bahan Bakar	15 Tahun
Pembakaran bahan Bakar	120 Tahun
Cladding	SS-316 (<i>Stainless Steel- 316</i>)
Coolant	CO ₂ Superkritis (S-CO ₂)
Fuel	UN (Uranium Nitrit) 93% : Am ²⁴¹ , Np ²³⁷ 7% (Minor Aktinida)
Fraksi Volume(<i>fuel:cladding:coolant</i>)	65% : 10% : 25%
Jari-jari teras	134 cm
Ketinggian teras	150 cm
Lebar reflektor (radial dan aksial)	50 cm
Pin pitch	1,4 cm

Berdasarkan tabel spesifikasi di atas dengan tinggi teras 150 cm dan jari-jari teras 134 cm maka desain reaktor menggunakan model teras *Pancake* karena ukuran diameter teras lebih besar dibandingkan tinggi terasnya. Model geometri teras *pancake* ini terbukti menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan geometri teras *Tall* (Monado et al., 2020) serta dapat mengurangi beban aksial dari aliran panas yang intens (Widiawati et al., 2022). Penelitian ini juga mempunyai daya termal keluaran 500 MWth.

2.1 Desain Teras Reaktor

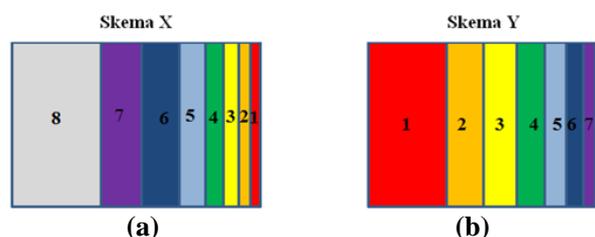
Teras reaktor dipartisi menjadi delapan wilayah dengan luas yang sama untuk menyederhanakan pengisian bahan bakar dalam arah radial setiap 15 tahun (Widiawati et al., 2022). Spesifikasi dari teras reaktor yaitu jari-jari teras 134 cm, tinggi teras 150 cm serta lebar reflektor 50 cm. Gambar desain teras reaktor dan konfigurasi bahan bakar desain teras reaktor secara detail dalam arah radial dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 (a) Desain Teras Reaktor (b) Konfigurasi Bahan Bakar Dalam Arah Radial

2.2 Skema Pengisian Bahan Bakar

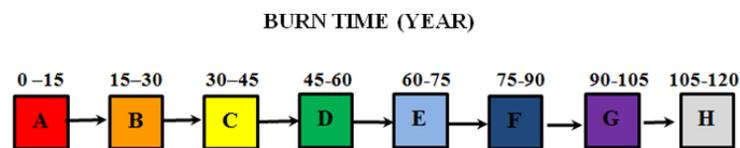
Reaktor *MCANDLE* merupakan modifikasi konsep reaktor *CANDLE* yang menganalogikan proses *burn-up* nya seperti proses lilin terbakar dalam arah aksial (Ariani et al., 2013). Dalam penelitian ini menggunakan konsep reaktor *MCANDLE* yang memisahkan teras reaktor menjadi beberapa zona sepanjang arah radial agar dapat membuat reaktor kritis selama operasi (Widiawati et al., 2022). Untuk mendapatkan desain optimal, dilakukan analisis pengaturan bahan bakar UN (isotop N¹⁵) yang ditambahkan Am²⁴¹ serta Np²³⁷ sebagai Minor Aktinida yang ditempatkan di tengah atau di bagian terluar teras reaktor sebagai selimut teras. Setelah reaktor *startup*, selanjutnya hanya diperlukan suplai bahan bakar *fresh* yang masih bersifat fertil seperti Uranium alam (Darmawati et al., 2020).



Gambar 2 (a) Skema Pengisian Bahan Bakar X (b) Skema Pengisian Bahan Bakar Y

Reaktor harus mampu beroperasi hingga 120 tahun dengan komposisi bahan bakar yang sama. Variasi arah pengisian bahan bakar yaitu bergerak ke dalam dan keluar teras reaktor. Skema pengisian bahan bakar terdiri dari dua skema yaitu skema X (skema *shuffling* bahan bakar dari luar teras ke arah dalam) dan skema Y (skema *shuffling* bahan bakar dari pusat teras ke luar) dapat dilihat pada Gambar 2. Skema X menempatkan bahan bakar (Uranium Nitrit dengan Minor Aktinida) di bagian terluar teras. Hal ini diharapkan dapat meningkatkan reaktivitas reaktor. Selanjutnya bahan bakar secara bertahap bergerak ke pusat atau *shuffling* bahan bakar ke arah dalam. Tujuannya adalah untuk mengurangi kebocoran neutron dan meningkatkan reaktivitas. Skema Y menempatkan bahan bakar (Uranium Nitrit dengan Minor Aktinida) di pusat teras reaktor, diharapkan dapat mengurangi reaktivitas di awal dan sebagai *shuffling* bahan bakar dari dalam ke luar (Widiawati et al., 2022).

Bahan bakar pertama dan selanjutnya adalah Uranium Nitrit dengan Minor Aktinida (Am²⁴¹ dan Np²³⁷). Di wilayah kedua bahan bakarnya mengandung sedikit Plutonium. Plutonium ini muncul dalam bahan bakar karena merupakan hasil iradiasi *burn-up* bahan bakar selama 15 tahun pertama. Di wilayah ketiga bahan bakar mengandung Plutonium dari wilayah kedua sebagai hasil iradiasi di wilayah pertama dan kedua. Di daerah ketiga sampai keenam kandungan Plutonium menjadi sangat tinggi dan menjadi bahan utama teras aktif dan tidak ada pengayaan Uranium di dalam reaktor (Monado et al., 2013).

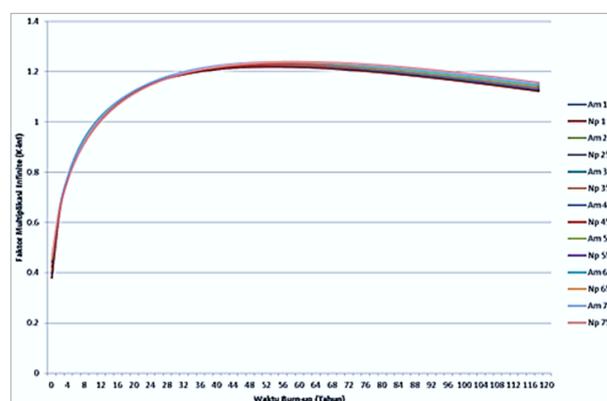


Gambar 3 Deskripsi Komposisi Bahan Bakar

Densitas atom dari setiap bagian *fuel cell* akan dihitung dan digunakan dalam *input* untuk menghitung teras reaktor. Modul PIJ akan digunakan untuk mengetahui performa *fuel cell* selama proses pembakaran, dengan mengadopsi *Collision Probability Method* (CMP) pada *SRAC* untuk menghitung *fuel cell*-nya. *Output* dari perhitungan PIJ akan disimpan dalam sebuah folder dan digunakan sebagai *input* untuk perhitungan *CITATION* (Tsuchihashi et al., 1983). Dengan menggunakan kode-kode *CITATION* pada *SRAC* akan dilakukan perhitungan teras reaktor. Perhitungan teras reaktor akan menghasilkan parameter survei berupa faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) yang menunjukkan tingkat kekritisan reaktor serta distribusi daya di dalam teras reaktor.

III. HASIL DAN DISKUSI

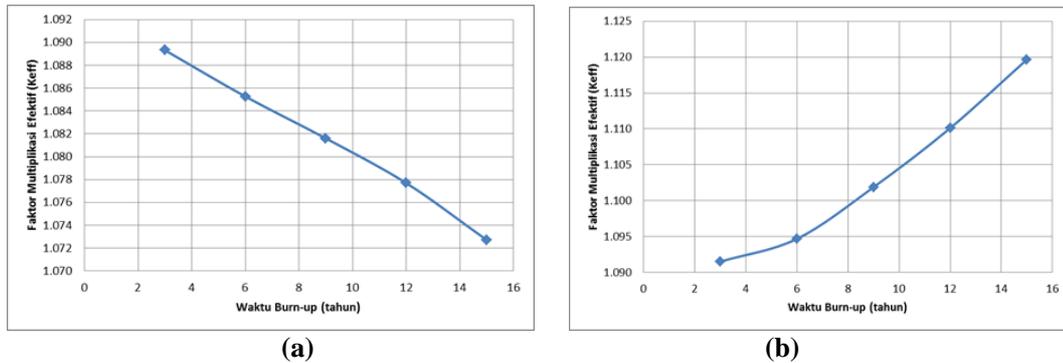
Pada Gambar 4 berikut disajikan grafik faktor multiplikasi tak hingga (K_{inf}). Faktor multiplikasi tak hingga adalah konstanta atau tetapan dari ukuran populasi aliran neutron selama pembakaran dengan tidak mempertimbangkan faktor kebocoran dari *fuel cell*.



Gambar 4 Perubahan faktor multiplikasi infinite (K_{inf}) dengan 1% - 7% Minor Aktinida selama pembakaran 120 tahun

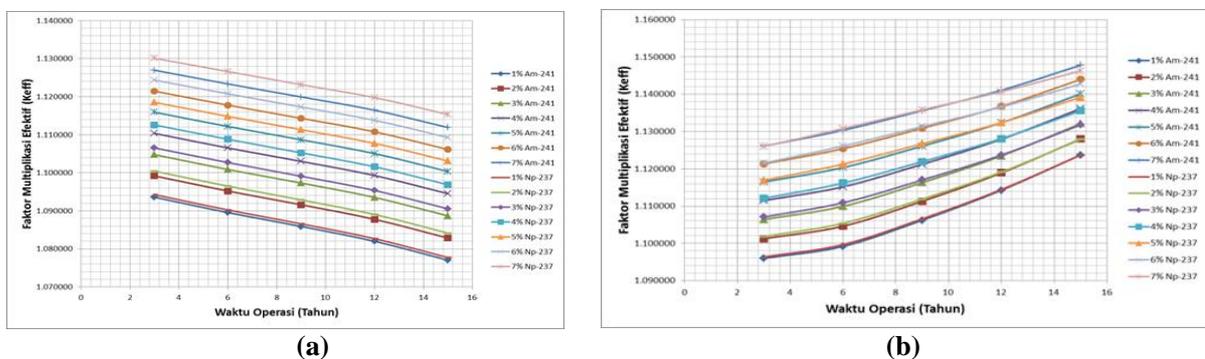
Pada tingkat *fuel cell* nilai K_{inf} di tahun ke-1 pembakaran bernilai sekitar 0,3 dan mencapai nilai 1,2 setelah 50 tahun pembakaran. Setelah pembakaran selama 120 tahun nilai K_{inf} mengalami penurunan secara perlahan. Hal ini menunjukkan banyaknya jumlah neutron di tiap area pembakaran. Jumlah atom U²³⁵ yang menurun setelah pembakaran 50 tahun menyebabkan menurunnya nilai K_{inf} .

Untuk mengetahui kemampuan suatu reaktor menghasilkan neutron tiap siklus bahan bakar serta melihat faktor kebocoran neutron maka dilakukan perhitungan faktor multiplikasi efektif (K_{eff}). Untuk menentukan tingkat kestabilan reaksi fisi berantai di dalam teras reaktor, diharapkan K_{eff} akan berkisar 1 pada desain konsep teras reaktornya. Grafik K_{eff} selama teras beroperasi 15 tahun sebelum penambahan Minor Aktinida untuk skema X dan Y ditunjukkan pada Gambar 5(a). Nilai k_{eff} untuk skema X di awal siklus berkisar 1.0893 dan untuk skema Y adalah sekitar 1.0915. Kedua nilai K_{eff} tersebut menunjukkan kondisi kritis. Nilai K_{eff} yang diperoleh dari penelitian ini nilai marginnya lebih besar dibandingkan nilai K_{eff} ($K_{eff}=1,0598$) dari penelitian (Darmawati et al., 2020).



Gambar 5 Perubahan Faktor Multiplikasi Efektif (K_{eff}) (a) skema X, (b) skema Y sebelum penambahan Minor Aktinida

Perubahan faktor multiplikasi efektif setelah penambahan Minor Aktinida untuk skema X dan Y ditunjukkan oleh Gambar 6. Jika $K_{eff} < 1$, dinamakan kondisi subkritis artinya jumlah populasi neutron terus berkurang. Jika $K_{eff} = 1$, teras reaktor berada dalam kondisi kritis, karena jumlah populasi neutronnya konstan. Jika $K_{eff} > 1$ maka teras reaktor berada dalam kondisi superkritis artinya jumlah populasi neutron terus bertambah tak terkendali dan hal ini berbahaya jadi harus dihindari. Perubahan faktor multiplikasi efektif skema X saat penambahan Minor Aktinida 1% dan 2% nilai k_{eff} untuk nuklida Am²⁴¹ dan Np²³⁷ masih berada pada kondisi kritis. Pada penambahan Minor Aktinida 3% dan 4% nilai faktor multiplikasi efektif mengalami peningkatan sehingga reaktor berada pada kondisi superkritis. Namun di tahun ketiga hingga kelima faktor multiplikasi efektif berada pada kondisi kritis kembali. Setelah tahun kelima hingga tahun terakhir nilai faktor multiplikasi efektif berada pada kondisi superkritis. Pada penambahan Minor Aktinida 5% hingga 7% nilai faktor multiplikasi efektif berada pada kondisi superkritis. Hal ini disebabkan karena produksi neutron meningkat sehingga reaktor berada dalam kondisi superkritis. Suatu teras reaktor akan berada dalam keadaan kritis jika $k_{eff} = 1$, artinya jumlah neutron di tiap generasi pada reaksi berantai adalah independen (sama) serta nilai reaktivitasnya (ρ) adalah nol. Nilai perubahan reaktivitas ($\Delta\rho$) akan berada dalam kondisi aman selama operasi jika bernilai dibawah 0,5% $\Delta k/k$, jika melebihi maka eksperimen harus didesain ulang (Kuntoro, 2023).

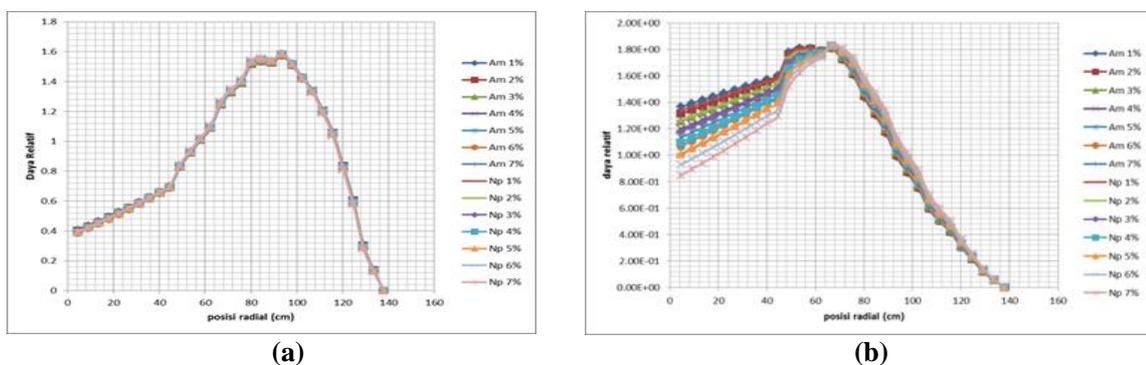


Gambar 6 Perubahan Faktor Multiplikasi Efektif (K_{eff}) (a) skema X dan (b) skema Y setelah penambahan Minor Aktinida Am²⁴¹ dan Np²³⁷

Dari hasil penelitian ini diperoleh nilai reaktivitas sebesar 0.0939 selama 15 tahun operasi yang mengimplikasikan reaktor masih aman beroperasi karena nilainya bernilai dibawah 0,5% $\Delta k/k$. Pada Gambar 6(b) perubahan faktor multiplikasi efektif skema Y pada penambahan Minor Aktinida 1% nilai K_{eff} untuk nuklida Am²⁴¹ masih berada pada kondisi kritis di tahun pertama dan kedua pembakaran.

Namun pada penambahan Minor Aktinida 2% hingga 7% nilai faktor multiplikasi efektif mengalami peningkatan sehingga reaktor berada pada kondisi superkritis. Artinya produksi neutron di dalam teras meningkat sehingga reaktor GFR berada dalam kondisi superkritis. Hal ini menunjukkan bahwa skema pengisian bahan bakar dan jumlah Minor Aktinida dalam bahan bakar reaktor akan mempengaruhi kondisi kekritisan suatu teras reaktor bahkan menjadikan teras reaktor berada dalam kondisi superkritis.

Distribusi radial kerapatan daya relatif dan perubahannya setelah 15 tahun waktu operasi untuk skema X dan Y ditunjukkan pada Gambar 7. Distribusi daya yang merata dapat dijadikan sebagai parameter suatu teras reaktor dapat beroperasi dengan aman. Pada Gambar 7(a) terlihat bahwa di tengah teras GFR pada region ke-4 terjadi peningkatan panas paling tinggi sebesar 1.5862. Distribusi daya mengalami peningkatan paling tinggi ketika terjadi penambahan Minor Aktinida sebanyak 7%. Distribusi daya kemudian mengalami penurunan secara signifikan hingga posisi 134 cm distribusi dayanya sebesar 0.1265 (ujung teras radial). Selanjutnya posisi 134 cm sampai ke ujung tidak ada neutron yang dihasilkan dan tidak ada energi panas yang dibangkitkan karena area ini adalah area reflektor dalam arah radial yang nilainya adalah nol.



Gambar 7 Distribusi daya arah radial setelah 15 tahun (a) skema X dan (b) skema Y

Pada skema Y distribusi daya bergerak dari pusat teras reaktor menuju ke bagian paling luar teras GFR. Dari Gambar 7(b) terlihat bahwa distribusi daya mengalami kenaikan di region 5 teras reaktor sebesar 1.8320 pada jarak 65 cm dari pusat teras reaktor artinya pada posisi tersebut terjadi distribusi daya maksimal hal ini terjadi setelah penambahan Minor Aktinida sebanyak 7%. Distribusi daya kemudian mengalami penurunan secara signifikan hingga posisi 134 cm sebesar 0.0658. Dalam desain teras GFR, distribusi dayanya harus merata dalam arah aksial maupun radial karena jika distribusi daya tidak merata, artinya terjadi penumpukan daya di wilayah tertentu saja sehingga temperatur termal reaktor meningkat tajam, maka akan menyebabkan kegagalan rancangan teras reaktor yang kita buat. Distribusi daya arah radial menunjukkan persebaran daya yang terjadi secara horizontal sedangkan distribusi daya arah aksial menunjukkan persebaran daya dalam arah vertikal (Sihotang, 2022). Pada penelitian desain teras GFR ini terlihat bahwa distribusi dayanya tidak merata di dalam teras reaktor sehingga perlu dilakukan penelitian lanjutan proses pemerataan daya (*power flattening*) dengan penyusunan ulang bahan bakar dan sel bahan bakar.

IV. KESIMPULAN

Telah dilakukan analisis desain teras GFR berpendingin S-CO₂ berbahan bakar uranium nitrit dengan Minor Aktinida. Hasil parameter survei diperoleh nilai faktor multiplikasi infinite (K_{inf}), faktor multiplikasi efektif (K_{eff}), reaktivitas dan distribusi daya. Pada tingkat *fuel cell* nilai K_{inf} di tahun ke-1 pembakaran bernilai sekitar 0,3 dan mencapai nilai 1,2 setelah 50 tahun pembakaran. Setelah pembakaran selama 120 tahun nilai K_{inf} mengalami penurunan secara perlahan. Hal ini menunjukkan banyaknya jumlah neutron di tiap area pembakaran. Jumlah atom U²³⁵ yang menurun setelah pembakaran 50 tahun menyebabkan menurunnya nilai K_{inf} . Nilai K_{eff} untuk skema X dan Y pada penambahan Minor Aktinida 1% dan 2% masih berada pada kondisi kritis di tahun ke-1 dan ke-2 pembakaran. Namun pada penambahan Minor Aktinida 3% hingga 7% nilai K_{eff} mengalami peningkatan sehingga reaktor berada pada kondisi superkritis. Nilai distribusi daya paling besar setelah penambahan Minor Aktinida sebanyak 7% Pada skema X dan Y arah radial yaitu 1.5862 dan 1.8320. Skema pengisian bahan bakar dan penambahan Minor Aktinida mempengaruhi kondisi suatu teras reaktor.

Untuk penelitian desain teras GFR selanjutnya dapat dilakukan proses pemerataan daya (*power flattening*) dengan penyusunan bahan bakar ulang dan mengubah fraksi sel bahan bakar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Publikasi ini didukung oleh Universitas Sriwijaya melalui hibah penelitian kompetitif dengan SK Rektor Nomor 01/88/UN9.3.1/SK/2023 tanggal 18 April 2023; Diva Unsri Nomor SP DIPA-023.17.2.677/515/2023, tanggal 30 November 2022.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariani, M., Su'ud, Z., & Monado, F. (2013). Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 MWth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar Design of Gas-Cooled Fast Reactor 600MWth with Natural Uranium As Fuel Circle Input. *14*(1), 11–15.
- Ariani, M., Supardi, Monado, F., & Su'ud, Z. (2015). Potensi Torium Sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas untuk PLTN. *Prosiding Semirata 2015 Bidang MIPA BKS-PTN Barat*, 39–45.
- Darmawati, R., Ariani, M., & Monado, F. (2020). Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur Panjang Berpendingin S-CO₂ dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam. *Jurnal Fisika Unand*, *9*(3), 401–407. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.3.401-407.2020>
- Handayani, H., Yulianti, Y., & Manurung, P. (2020). Perhitungan Burn Up pada Reaktor HCLWR Model Geometri Kotak Tiga Dimensi dengan Bahan Bakar Thorium Menggunakan Kode COREBN. *Jurnal Fisika Indonesia*, *24*(2), 102. <https://doi.org/10.22146/jfi.v24i2.57167>
- Kuntoro, I. (2023). Keselamatan Reaktor Nuklir: Reaktor Serba Guna G.A Siwabesy (RSG-GAS). In *Keselamatan Reaktor Nuklir: Reaktor Serba Guna G.A Siwabesy (RSG-GAS)*. BRIN.
- Lewis, T. G., Parma, E. J., Wright, S. A., Vernon, M. E., Fleming, D. D., & Rochau, G. E. (2011). Sandia's supercritical CO₂ direct cycle gas fast reactor (SC-GFR) concept. *ASME 2011 Small Modular Reactors Symposium, SMR 2011, February 2015*, 91–94.
- Monado, F., Ariani, M., Royani, I., & Su'ud, Z. (2020). Comparative study of conceptual design of gas-cooled fast reactor core type tall versus pan cake based on MCANDLE-B burn up strategy. *Journal of Physics: Conference Series*, *1568*(1).
- Monado, F., Su'ud, Z., Waris, A., Basar, K., Ariani, M., & Sekimoto, H. (2013). Application of modified candle burnup to very small long life gas-cooled fast reactor. *Advanced Materials Research*, *772*(August), 501–506. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.772.501>
- Rafli, H., Muhammad, I., Su'ud, Z., Waris, A., & Irwanto, D. (2021). Reflector materials selection for core design of modular gas-cooled fast reactor using OpenMC code. *International Journal of Energy Research*, *45*(8), 12071–12085. <https://doi.org/10.1002/er.6042>
- Sardi, W., Fitriyani, D., & Irka, F. H. (2018). Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Umur Teras dan Daya Reaktor. *Jurnal Fisika Unand*, *7*(2), 151–158.
- Sihotang, F. H. M. (2022). Studi Desain Reaktor Cepat Berpendingin Helium Dengan Bahan Bakar Uranium Dan Plutonium. *Institut teknologi Bandung*.
- Silakhuddin. (2008). Analisis Dan Konsep Penanganan Aktinida Minor Dalam Limbah Pltn Menggunakan Teknologi Ads. *GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir*, *11*(2), 53–59.
- Su'ud, Z., & Sekimoto, H. (2013). The prospect of gas cooled fast reactors for long life reactors with natural uranium as fuel cycle input. *Annals of Nuclear Energy*, *54*, 58–66.
- Tsuchihashi, K., Takano, H., Horikami, K., Ishiguro, Y., Kaneko, K., & Hara, T. (1983). SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code for Reactor Design and Analysis. *Jaeri 1285, January*.
- Waris, A. B. (2008). Studi Tentang Fisibilitas Daur Ulang Aktinida Minor Dalam BWR. *Jurnal Sains Dan Teknologi Nuklir Indonesia*, *9*, 11–24.
- Widiawati, Nina; Su'ud, Zaki; irwanto, Dwi; Permana, Sidik; Takaki, Naoyuki; Sekimoto, H. (2022). Design study of 208Pb-Bi eutectic-cooled reactor with natural uranium as fuel cycle input with radial fuel shuffling. *Annals of Nuclear Energy*, *171*(109003).