



## Studi parameter *burn-up* sel bahan bakar Uranium Nitrit dengan penambahan minor aktinida berpendingin S-CO<sub>2</sub>

WULAN GONTINA, FIBER MONADO\*, DAN MENIK ARIANI

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan 30862, Indonesia

### Kata kunci:

sel bahan bakar, Uranium Nitrit, minor aktinida, S-CO<sub>2</sub>

**ABSTRAK:** Bahan bakar nuklir adalah komponen utama dalam reaktor yang diperoleh dari isotop alami misalnya Uranium. Hasil pengolahan Uranium menghasilkan limbah nuklir dan menimbulkan permasalahan. Komponen limbah nuklir diantaranya Plutonium dan unsur-unsur minor aktinida. Komponen limbah nuklir tersebut masih bisa didaur ulang menjadi tambahan bahan bakar nuklir. Untuk itu dilakukan studi parameter *burn-up* sel bahan bakar Uranium Nitrit dengan penambahan minor aktinida berpendingin S-CO<sub>2</sub>. Perbandingan bahan bakarnya yaitu 93% Uranium Nitrit dan 7% penambahan minor aktinida. Nuklida dari minor aktinida yang digunakan adalah Am<sup>241</sup> dan Np<sup>237</sup> dengan komposisi 1% hingga 7%. Persentase fraksi volume tingkat sel adalah 65% *fuel*, 10% *cladding* (*stainless steel*) dan 25% *coolant*. Untuk mengetahui performa dari sel bahan bakar selama *burn-up* nya maka digunakan modul PIJ. Parameter survei yang dihasilkan dari perhitungan sel bahan bakar yaitu *K-inf*, level *burn-up*, densitas atom U<sup>235</sup>, U<sup>238</sup> dan Pu<sup>239</sup> serta konversi rasio sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun. Berdasarkan perhitungan neutronik sel bahan bakar dapat dilihat performa dari bahan bakar selama *burn-up* nya. Dengan penambahan minor aktinida Am<sup>241</sup> dan Np<sup>237</sup> hingga 7% pada bahan bakar Uranium Nitrit berpendingin S-CO<sub>2</sub>, menghasilkan kenaikan level *burn-up* yang tinggi. Hal ini menunjukkan nilai efisiensi bahan bakar yang makin baik sehingga memberikan keuntungan secara ekonomi.

### Keywords:

fuel cell, Uranium Nitrite, actinide minor, S-CO<sub>2</sub>

**ABSTRACT:** Nuclear fuel is the main component in the reactor which is obtained from natural isotopes such as Uranium. Uranium processing results produce nuclear waste and cause problems. The components of nuclear waste include Plutonium and minor actinide elements. The nuclear waste components can still be recycled into additional nuclear fuel. For this reason, a study of the burn-up parameters of Uranium Nitrite fuel cells with the addition of S-CO<sub>2</sub> cooled actinide minor was carried out. The fuel ratio is 93% Uranium Nitrite and 7% minor actinide additions. The nuclides of the minor actinides used are Am<sup>241</sup> and Np<sup>237</sup> with a composition of 1% to 7%. The percentage of cell level volume fraction is 65% fuel, 10% cladding (*stainless steel*) and 25% coolant. To determine the performance of the fuel cell during its burn-up, the PIJ module is used. The survey parameters generated from the calculation of the fuel cell are *K-inf*, burn-up level, atomic density of U<sup>235</sup>, U<sup>238</sup> and Pu<sup>239</sup> as well as the conversion ratio throughout the history of burn-up for 120 years. Based on the fuel cell's neutronic calculations, it can be seen the performance of the fuel during its burn-up. With the minor addition of actinides Am<sup>241</sup> and Np<sup>237</sup> up to 7% in S-CO<sub>2</sub> cooled Uranium Nitrite fuel, resulting in a high increase in burn-up level. This shows the value of fuel efficiency is getting better so as to provide economic benefits.

## 1 PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan harga energi adalah asumsi dasar yang dikembangkan untuk memperoleh gambaran kebutuhan energi sampai dengan tahun 2050 [1]. Menurut Badan Energi Internasional (IEA), permintaan energi dunia meningkat sebesar 1,3 % setiap tahun. Me-

ingkatnya permintaan untuk layanan energi tidak dibatasi oleh upaya lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi [2]. Energi nuklir berkembang pesat sebagai salah satu solusi paling andal untuk iklim dan kerawanan energi. Saat ini, 441 reaktor tenaga nuklir beroperasi di 30 negara dan 395.103 MW(e) total kapasitas telah terpasang bersih [3].

\* Corresponding Author: email: [fibermonado@unsri.ac.id](mailto:fibermonado@unsri.ac.id) No. HP: +6281273620812

Telah ditemukan sumber energi bebas emisi, yaitu energi nuklir. Energi ini terbukti efektif dalam mengurangi jumlah polusi bumi seperti pembentukan lapisan ozon, efek rumah kaca dan hujan asam [4]. Penggunaan reaktor nuklir sebagai pembangkit listrik telah dimanfaatkan di berbagai negara baik negara maju maupun negara berkembang. Negara-negara yang telah menggunakan pembangkit listrik dengan reaktor nuklir diantaranya adalah USA sebanyak 99 unit, Perancis 58 unit dan Jepang 43 unit PLTN [5].

Komisi Eropa telah menyelidiki desain teras reaktor cepat berpendingin gas (GFR) selama dua dekade, dan GFR telah ditetapkan sebagai salah satu kandidat untuk pengembangan reaktor tingkat lanjut. Kemudian *General Atomic* Amerika Serikat telah memprakarsai konsep desain awal GFR dengan penggunaan kelongsong logam pada bahan bakar karbida atau oksida sejak tahun 1962 [6].

Bahan bakar nuklir adalah komponen utama dalam reaktor yang diperoleh dari isotop alami seperti Uranium dan Thorium, yang terbelah selama reaksi dengan neutron [7]. Uranium dengan simbol kimia U merupakan salah satu unsur kimia alami bernomor atom 92, artinya di dalam susunan atomnya terdapat proton dan elektron sebanyak 92 buah. Seperti diketahui unsur Uranium sangat dibutuhkan sebagai bahan bakar nuklir. Namun diakhir pengoperasian suatu reaktor nuklir disamping menghasilkan energi listrik nyatanya pemanfaatan Uranium menjadi bahan bakar juga menghasilkan limbah nuklir [8].

Pengelolaan limbah dari pemanfaatan energi nuklir masih menjadi permasalahan penting. Hal ini karena limbah nuklir mengandung nuklida yang bersifat toksik sangat tinggi dengan waktu paruh yang cukup lama. Terdapat dua jenis limbah nuklir yang masih potensial untuk di-recycle yaitu buntut dari proses pengayaan dan bahan bakar bekas. Komponen utama dalam limbah nuklir adalah Plutonium. Selain Plutonium terdapat juga Minor Aktinida meskipun jumlahnya sangat kecil [9].

Dari reaksi fisi berantai tembakan neutron terhadap inti-inti Uranium terbentuklah unsur-unsur yang disebut minor aktinida yang sering disebut juga produk fisi reaktor nuklir. Unsur-unsur minor aktinida antara lain adalah  $Np^{237}$ ,  $Am^{241}$ ,  $Am^{242}$ ,  $Am^{243}$ ,  $Cm^{242}$  dan  $Cm^{244}$ . Namun karena umurnya yang sangat panjang membuat unsur-unsur minor aktinida menyumbangkan radiotoksitas tinggi dalam bahan bakar bekas reaktor nuklir [10].

Studi tentang pemanfaatan minor aktinida dalam bahan bakar telah dilakukan pada penelitian terdahulu [9],[10].

Dalam makalah ini, kami melakukan perhitungan tingkat sel bahan bakar pada Uranium Nitrit dengan penambahan minor aktinida dan berpendingin S-CO<sub>2</sub>. Nuklida-nuklida dari minor aktinida yang digunakan yakni  $Am^{241}$  dan  $Np^{237}$ . Tujuan dari penelitian ini adalah dengan penambahan minor aktinida pada bahan bakar Uranium Nitrit berpendingin S-CO<sub>2</sub> dapat meningkatkan performa sel bahan bakar selama *burn-up* nya, sehingga dapat memberikan keuntungan secara ekonomi.

## 2 BAHAN DAN METODE

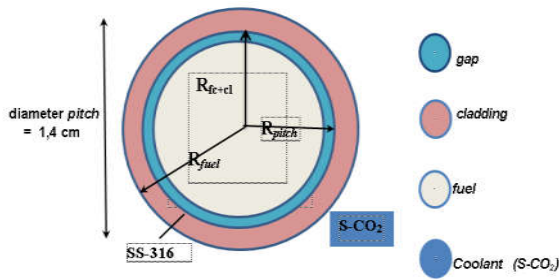
Penelitian ini telah dilaksanakan di Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya. Peralatan penelitian yang digunakan adalah laptop dengan *Operating System* (OS) linux ubuntu 20.04 dan paket program SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*), data nuklida JENDL-4.0 serta *Microsoft Office Excel*.

Pada perhitungan tingkat sel bahan bakar dihitung densitas atomnya untuk selanjutnya dijadikan sebagai *input* perhitungan teras reaktor. Untuk mengetahui *performance* dari *fuel cell* selama *burn-up* nya maka digunakan modul PIJ. Parameter survei yang dihasilkan dari perhitungan sel bahan bakar yaitu nilai *K-inf* sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun, level *burn-up* sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun, densitas atom terkait  $U^{235}$ ,  $U^{238}$  dan  $Pu^{239}$  serta konversi rasio sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun. Spesifikasi parameter desain sel bahan bakar disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Spesifikasi Desain Parameter

| Parameter                                      | Spesifikasi   |
|--|---|
| <i>Burn-up</i> bahan Bakar                     | 120 Tahun   |
| Jenis Kelongsong                               | <i>Stainless Steel 316 (SS-316)</i>   |
| Jenis pendingin                                | S-CO <sub>2</sub>   |
| Jenis bahan Bakar                              | Uranium Nitrit (UN) : Minor Aktinida ( $Am^{241}$ dan $Np^{237}$ ) perbandingan 93%: 7% |
| Fraksi Volume ( <i>fuel:cladding:coolant</i> ) | 65% : 10% : 25%   |
| Geometri Cell                                  | <i>Cylindrical Cell</i>   |
| Diameter <i>Pin pitch</i>                      | 1,4 cm  |

Penelitian ini menggunakan geometri sel bahan bakar dengan bentuk silinder (*cylindrical cell*), terdiri atas sel dari bahan bakar (*fuel*), kelongsong (*cladding*) dan pendingin (*coolant*). Gambar geometri *fuel cell*-nya dapat dilihat pada Gambar 2.1.

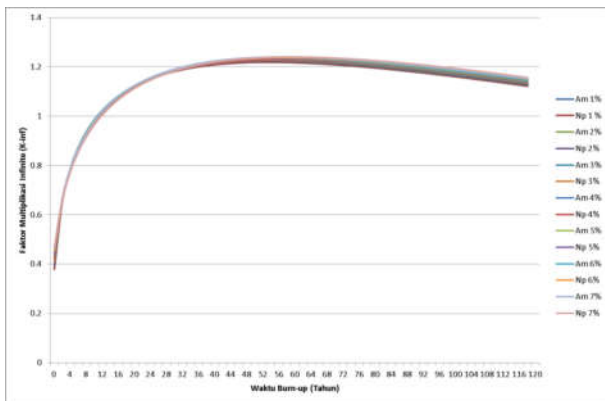


Gambar 2.1. Geometri Sel Bahan Bakar

Parameter survei yang dihasilkan dari perhitungan sel bahan bakar yaitu nilai  $K_{inf}$ , level *burn-up*, konversi rasio dan densitas atom  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ ,  $Pu^{239}$  sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun.

### 3 HASIL

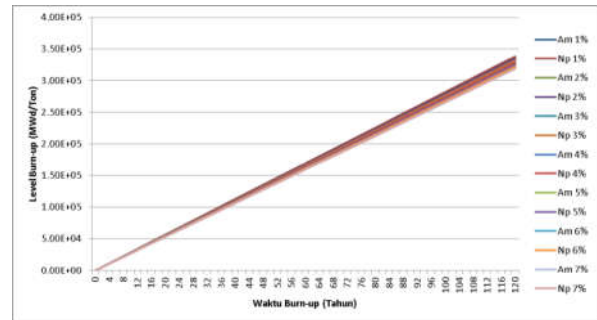
Perhitungan dilakukan pada sel bahan bakar Uranium Nitrit dengan penambahan minor aktinida dengan nuklida Am<sup>241</sup> dan Np<sup>237</sup> dengan komposisi 1% hingga 7%. Setiap bagian sel bahan bakar dihitung densitas atomnya. Untuk mengetahui *performance* dari *fuel cell* selama *burn-up* nya maka digunakan paket modul PIJ merujuk pada metode *Collision Probability* sebagai metode perhitungan tingkat sel pada program SRAC. Parameter survei yang dihasilkan dari perhitungan sel bahan bakar yaitu nilai  $K_{inf}$  sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun, level *burn-up* sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun, densitas atom terkait  $U^{235}$ ,  $U^{238}$  dan  $Pu^{239}$  serta konversi rasio sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun. Data hasil parameter survei disajikan pada Gambar grafik.



Gambar 3.1. Perubahan faktor multiplikasi infinite ( $K_{inf}$ ) sel bahan bakar komposisi minor aktinida 1% sampai 7% selama 120 tahun waktu *burn-up*

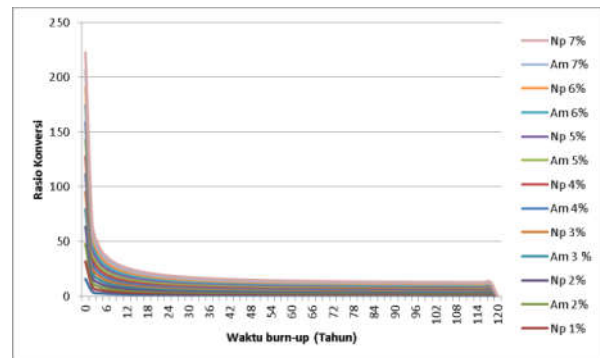
Faktor multiplikasi tak hingga ( $K_{inf}$ ) merupakan tetapan untuk ukuran populasi aliran neutron tanpa memperhatikan faktor kebocoran sel bahan bakar

during *burn-up*. Faktor multiplikasi tak hingga ditunjukkan oleh Gambar 3.1.



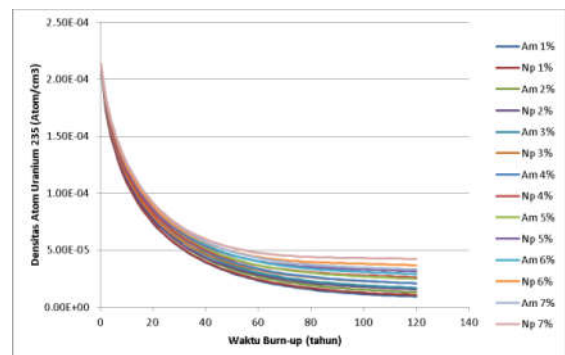
Gambar 3.2. Perubahan Level Burn-up Sel Bahan Bakar untuk komposisi minor aktinida 1% sampai 7% selama 120 tahun waktu *burn-up*

Perubahan level *burn-up* menunjukkan ukuran konsumsi bahan bakar reaktor yang dinyatakan dengan banyaknya atom yang mengalami reaksi fisi. Perubahan level *burn-up* ditunjukkan pada Gambar 3.2.

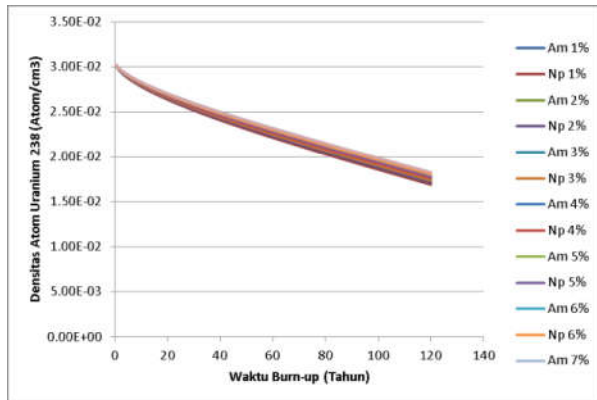


Gambar 3.3. Perubahan Rasio Konversi Selama 120 Tahun Waktu *Burn-up*

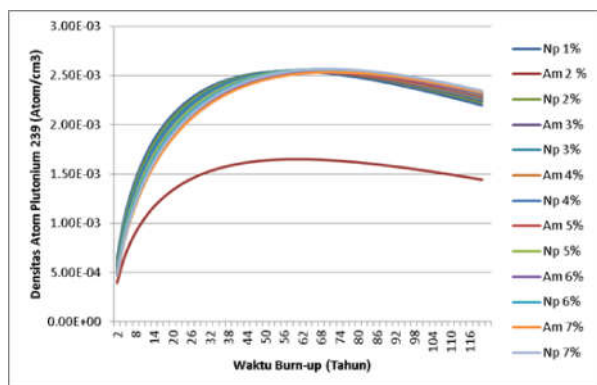
Perubahan level rasio konversi menunjukkan nilai perbandingan jumlah atom fisi yang dihasilkan dengan jumlah atom fisi yang digunakan dalam bahan bakar reaktor. Perubahan level rasio konversi dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.4. Perubahan Densitas atom  $U^{235}$  Selama 120 Tahun Waktu *Burn-up*



Gambar 3.5. Perubahan Densitas  $U^{238}$  Selama 120 Tahun Waktu *Burn-up*



Gambar 3.6. Perubahan Densitas  $Pu^{239}$  Selama 120 Tahun Waktu *Burn-up*

Populasi dari atom per satuan volume atom tiap  $cm^3$  dinyatakan dengan densitas atom atau kerapatan atom. Perubahan densitas atom dilakukan untuk menganalisis limbah nuklir yang dihasilkan. Gambar perubahan densitas atom  $U^{235}$ ,  $U^{238}$  dan  $Pu^{239}$  dapat ditunjukkan pada Gambar 3.4., Gambar 3.5. dan Gambar 3.6.

#### 4 PEMBAHASAN

Komponen untuk tingkat sel dihitung dengan menggunakan modul PIJ dalam program SRAC. Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan yakni Uranium Nitrit dengan penambahan minor aktinida. Perbandingan bahan bakarnya yaitu Uranium Nitrit 93% berbanding 7% minor aktinida. Nuklida dari minor aktinida yang digunakan yakni  $Am^{241}$  dan  $Np^{237}$  dengan komposisi 1% hingga 7%. Pendingin yang digunakan pada penelitian ini adalah  $S-CO_2$ . Persentase fraksi volume tingkat sel adalah 65% *fuel*, 10% *cladding (stainless steel)* dan 25% *coolant*.

Perhitungan parameter survei neutronik digunakan untuk melihat perubahan  $K-inf$ , perubahan *level burn-up*, rasio konversi dan perubahan densitas

atom  $U^{235}$ ,  $U^{238}$  dan  $Pu^{239}$  ditunjukkan melalui Gambar grafik. Untuk perubahan faktor multiplikasi *infinite* ditunjukkan pada Gambar 3.1. Nilai  $K-inf$  sel bahan bakar di tahun pertama masih berkisar di angka 0,3. Namun setelah 50 tahun *burn-up* nilai  $K-inf$  mencapai 1,2 dan kemudian menurun perlahan sampai pada 120 tahun *burn-up* nya. Kenaikan dan penurunan nilai  $K-inf$  ini menunjukkan ukuran populasi aliran neutron di tiap wilayah *burn-up* nya. Penurunan nilai  $K-inf$  setelah 50 tahun *burn-up* terjadi karena pengurangan jumlah atom  $U^{235}$ .

Gambar 3.2 menunjukkan perubahan level *burn-up* dengan penambahan minor aktinida dengan persentase komposisi hingga 7%. Grafik mengalami kenaikan secara signifikan dari tahun pertama *burn-up* hingga 120 tahun *burn-up*. Dengan penambahan minor aktinida hingga 7% menunjukkan kenaikan level *burn-up* yang lebih tinggi. Artinya dengan level *burn-up* yang tinggi menunjukkan makin baiknya nilai efisiensi bahan bakar sehingga memberikan keuntungan secara ekonomi [11]. Gambar 3.3 menunjukkan perubahan rasio konversi. Nilai rasio konversi awalnya besar namun turun menjadi 1 bahkan dibawah 1 setelah pembakaran berlangsung. Artinya jumlah fisil yang diproduksi jauh lebih kecil dibandingkan jumlah fisil yang dikonsumsi, dan seiring waktu *burn-up* maka bahan bakar reaktor akan habis.

Gambar 3.4, 3.5 dan 3.6 menunjukkan densitas atom untuk  $U^{235}$ ,  $U^{238}$  dan  $Pu^{239}$ . Densitas bahan bakar akan berubah ketika suatu reaktor nuklir dioperasikan hingga akhir pengoperasiannya [12]. Pada Gambar 3.4. terlihat perubahan densitas  $U^{235}$  terhadap waktu *burn-up* nya.  $U^{235}$  menjadi *fuel* utama untuk men-*trigger* reaksi berantai sehingga terbentuk produk fisi pada suatu reaktor, sehingga densitas  $U^{235}$  akan terus berkurang selama proses *burn-up* berlangsung. Perubahan densitas  $U^{238}$  terhadap waktu *burn-up* terlihat pada gambar 3.5. Pada Gambar 3.6 terlihat perubahan densitas bahan bakar yang signifikan terjadi pada  $Pu^{239}$ . Peningkatan nilai densitas  $Pu^{239}$  yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6. disebabkan adanya tangkapan neutron oleh  $U^{238}$  sehingga mengakibatkan terjadinya transmudasi menjadi  $Pu^{239}$ .

#### 5 KESIMPULAN

Telah dilakukan analisis parameter *burn-up* tingkat sel bahan bakar Uranium Nitrit dengan penambahan minor aktinida berpendingin  $S-CO_2$  dengan persentase fraksi volume tingkat sel adalah 65% *fuel*, 10% *cladding (stainless steel)* dan 25% *coolant*. Hasil parameter survei diperoleh dari perhitungan sel bahan bakar yaitu nilai  $K-inf$  sepanjang sejarah *burn-up*



selama 120 tahun, level *burn-up* sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun, densitas atom terkait  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  dan  $Pu^{239}$  serta konversi rasio sepanjang sejarah *burn-up* selama 120 tahun. Hasil perhitungan parameter tingkat sel memperlihatkan dampak dari penambahan minor aktinida terhadap bahan bakar Uranium Nitrit untuk performa sel bahan bakar selama *burn-up* nya. Dengan penggunaan bahan bakar Uranium Nitrit dan penambahan minor aktinida  $Am^{241}$  dan  $Np^{237}$  dengan komposisi hingga 7% terjadi peningkatan level *burn-up* nya. Hal ini menunjukkan makin baiknya nilai efisiensi bahan bakar sehingga memberikan keuntungan secara ekonomi.

## REFERENSI

- [1] K. ESDM. (2019, 2022). *Indonesia Energi Outlook 2019*. Available: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-indonesia-energy-outlook-2019-english-version.pdf>
- [2] Nurlina and Z. Su'ud, "Analisis Neutronik Bahan Bakar Thorium Nitrida dan Thorium Plutonium Nitrida untuk Reaktor Air Bertekanan Tahan Lama 200 MWth," in *Paper presented at the AIP Conference Proceeding*, 2019, vol. 2320.
- [3] IAEA. (2022 25-06-2022). *The Database on Nuclear Power Reactors*. Available: <https://pris.iaea.org/PRIS/About.aspx>
- [4] M. Ariani, F. Monado, and Z. Su'ud, "Design of Gas Cooled Fast Reactor 600MWth with Natural Uranium as Fuel Circle Input," *Jurnal ILMU DASAR*, vol. 14, no. 1, pp. 11-15, 2013.
- [5] H. Handayani, Y. Yulianti, and P. Manurung, "Perhitungan Burn Up pada Reaktor HCLWR Model Geometri Kotak Tiga Dimensi dengan Bahan Bakar Thorium Menggunakan Kode COREBN" *Jurnal Fisika Indonesia*, vol. 24, no. 2, 2020.
- [6] H. Raffles, I. Muhammad, Z. Su'ud, A. Waris, and D. Irwanto, "Reflector Materials Selection for Core Design of Modular Gas-cooled Fast Reactor Using openMC Code Energy," *Energy Research*, vol. 45, no. 8, pp. 12071-12085, 2020.
- [7] S. C. Putri, M. Ariani, I. Royani, Arsali, and F. Monado, "The Calculation of Uranium Metallic Fuel (U-10%wtZr) Cell with Helium Coolants Using SRAC 2K6," *Journal of Physics: Conference Series*, 2126 (The 1st International Conferences on Physics Issues (ICoPIs)), pp. 1-7, 2021.
- [8] Z. Su'ud and H. Sekimoto, "The Prospect of Gas cooled Fast Reactors for Long Life Reactors with Natural Uranium as Fuel Cycle Input," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 54, pp. 58-66, 2013.
- [9] A. Waris and Budiono, "Studi tentang fisibilitas daur ulang aktinida minor dalam BWR," *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, vol. IX, no. 1, pp. 11-24, 2008.
- [10] Silakhuddin, "Analisis dan Konsep Penanganan Aktinida Minor dalam Limbah PLTN menggunakan Teknologi ADS," *GANENDRA*, vol. XI, no. 2, pp. 53-59, 2008.
- [11] T. S. Syahputra and Z. Su'ud, "Startup Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbahan Bakar UN-PuN dengan Daya 800 MWth," *POSITRON*, vol. VII, no. 1, pp. 12-16, 2017.
- [12] M. Ariani *et al.*, "Optimization of small long life gas cooled fast reactors with natural Uranium as fuel cycle input," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 260-261, pp. 307-311, 2013.