

# Perhitungan Desain Konsep Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida Superkritis dan Berbahan Bakar Uranium Metalik Alam

Via Vionita<sup>a</sup>, Fiber Monado<sup>b\*</sup>, Menik Ariani, Idha Royani

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

e-mail: [yionitavia2@gmail.com](mailto:yionitavia2@gmail.com)

\*e-mail korespondensi: [fibermonado@unsri.ac.id](mailto:fibermonado@unsri.ac.id)

**Abstract.** This study discusses the design concept of the fast reactor core with supercritical carbon dioxide as coolant and natural metallic uranium as fuel that has been burnup for one hundred years. Calculations and simulations are performed using the SRAC code. The PIJ-SRAC module is for calculating the fuel cell level, and the CITATION-SRAC module is for calculating the reactor core level. Radial-modified CANDLE is applied as a fuel arrangement strategy in the reactor core. The survey parameters were calculated in the form of burnup level, infinite multiplication factor ( $k_{inf}$ ), the density of fissile and fertile atoms, conversion ratio, and effective multiplication factor ( $k_{eff}$ ). The calculated reactor core thermal power varies from 400 MWt, 450 MWt, and 500 MWt. Based on calculation and simulation results, a reactor with thermal power of 450 MWt with geometry RZ ( $R = 150$  cm and  $Z = 150$  cm) is the best design. The calculation results show that the  $k_{eff}$  value from the beginning of the combustion cycle is around 1.002662 with a reactivity value of 0.2654%; until the end of the cycle, the  $k_{eff}$  value is 1.041057 with a reactivity value of 3.9437%.

**Keywords:** Fast Reactor, Modified CANDLE, S-CO<sub>2</sub>, SRAC, Metallic Uranium.

**Abstrak.** Penelitian ini membahas konsep desain untuk teras reaktor cepat dengan pendingin karbondioksida superkritis berbahan bakar uranium metalik alam yang di burnup selama seratus tahun. Perhitungan dan simulasi yang dilakukan menggunakan kode SRAC. Modul PIJ-SRAC untuk perhitungan tingkat sel bahan bakar dan modul CITATION-SRAC untuk perhitungan tingkat teras reaktor. CANDLE yang dimodifikasi arah radial diterapkan sebagai strategi penyusunan bahan bakar di dalam teras reaktor. Parameter-parameter survei yang dihitung berupa level burnup, faktor multiplikasi takhingga ( $k_{inf}$ ), desitas atom-atom fisil dan fertil, rasio konversi dan faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ). Daya termal teras reaktor yang dihitung bervariasi mulai dari 400 MWt, 450 MWt dan 500 MWt. Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi, reaktor dengan daya termal 450 MWt dengan geometri RZ ( $r = 150$  cm dan  $z = 150$  cm) merupakan desain yang terbaik. Hasil perhitungan menunjukkan nilai  $k_{eff}$  dari awal siklus pembakaran sekitar 1,002662 dengan nilai reaktivitas 0,2654% hingga akhir siklus nilai  $k_{eff}$  sebesar 1,041057 dengan nilai reaktivitas 3,9437%.

**Kata Kunci:** Reaktor Cepat, Modified CANDLE, S-CO<sub>2</sub>, SRAC, Uranium Metalik.

## PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan sumber energi alternatif yang diperlukan saat semakin menipisnya energi fosil seperti minyak bumi, gas alam dan batubara. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menyatakan untuk beberapa tahun kedepan

ketersediaan energi fosil akan semakin berkurang dan diperkirakan akan segera habis [1].

Saat ini perkembangan tenaga nuklir telah berkembang menjadi yang terbaik dari generasi I ke generasi IV, saat ini dalam tahap perencanaan. Keuntungan dari generasi keempat dibandingkan generasi sebelumnya termasuk biaya dasar yang

lebih rendah, keselamatan nuklir yang lebih besar, pengurangan limbah nuklir, dan pengurangan yang lebih besar dalam risiko produksi senjata [2]. Salah satu reaktor generasi keempat yang sedang dikembangkan adalah reaktor cepat berpendingin gas, *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR) [3].

Membangun suatu reaktor nuklir memerlukan proses simulasi terlebih dahulu agar mendapatkan hasil yang optimum serta sebagai acuan untuk keselamatan reaktor nuklir. Salah satu simulasi komputasi nuklir yang digunakan dalam reaktor nuklir adalah SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*) yang dibuat oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) pada tahun 1978 [4]. Penelitian ini menggunakan *Japan Evaluated Nuclear Data Library* versi 4.0 (JENDL 4.0), database nuklir terbaru yang dikembangkan oleh Jepang. Kode SRAC bekerja pada sistem operasi Linux. Kode SRAC memiliki dua bentuk perhitungan, yang pertama adalah perhitungan sel bahan bakar (modul PIJ) dan yang kedua adalah perhitungan teras (modul CITATION) [5].

## TINJAUAN PUSTAKA

Reaktor nuklir adalah tempat reaksi fisi nuklir, juga dikenal sebagai reaksi berantai fisi terkontrol. Tempat berlangsungnya reaksi fisi inti disebut dengan teras reaktor [6]. Komponen-komponen dari reaktor nuklir terdiri dari bahan bakar, teras reaktor, moderator, pendingin, batang pengendali, dan perisai. Uranium alam merupakan bahan bakar utama yang biasanya digunakan untuk reaktor nuklir [7]. *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR) merupakan reaktor generasi ke-4. GFR ini termasuk kandidat reaktor yang potensial dan layak dibangun pada tahun 2030 [1]. GFR ini menggunakan gas sebagai pendinginnya dan menggunakan sistem pembakaran tertutup [3].

Salah satu bahan fisil yang sering digunakan sebagai bahan bakar utama reaktor nuklir adalah uranium. Uranium dapat melepaskan energi sekitar 200 MeV dalam setiap reaksi fisi. Dapat diumpamakan dengan satu kilogram Uranium-235 yang berfisi akan menghasilkan energi panas sebesar 24 juta kWh atau setara dengan pembakaran batu bara sebanyak 3000 ton [8]. Bahan bakar metalik telah dipandang sebagai pengisi atom baru karena beberapa manfaatnya. Salah satunya untuk mencegah potensi kerusakan serta meningkatkan performa dan keselamatan reaktor nuklir. Dalam berbagai bahan bakar logam berbasis uranium, zirkonium sering ditambahkan untuk meningkatkan suhu leleh bahan bakar dan stabilitas dimensi di bawah iradiasi [9].

Fisi nuklir adalah proses pembelahan atom berat menyebabkan terbentuknya atom-atom yang lebih ringan, biasanya karena tumbukan neutron. Proses ini menimbulkan panas dan melepaskan neutron. Neutron ini dapat terus menyebabkan fisi lebih lanjut, sehingga menyebabkan reaksi berantai. Pada keadaan tertentu, reaksi fisi dapat menimbulkan reaksi berantai, di mana neutron yang dipancarkan oleh satu fisi dapat menghasilkan fisi tambahan, dengan pelepasan energi yang sangat signifikan [10].

Penelitian sebelumnya membahas tentang desain konseptual teras reaktor cepat berumur panjang Berpendingin karbondioksida superkritis (S-CO<sub>2</sub>) dengan bahan bakar uranium metalik alam dengan strategi *burnup* CANDLE yang dimodifikasi arah aksial [11]. Pada penelitian ini, penulis membahas tentang desain konseptual reaktor cepat berpendingin S-CO<sub>2</sub> berbahan bakar uranium metalik alam dengan strategi *burnup* CANDLE yang dimodifikasi arah radial.

**METODOLOGI PENELITIAN**

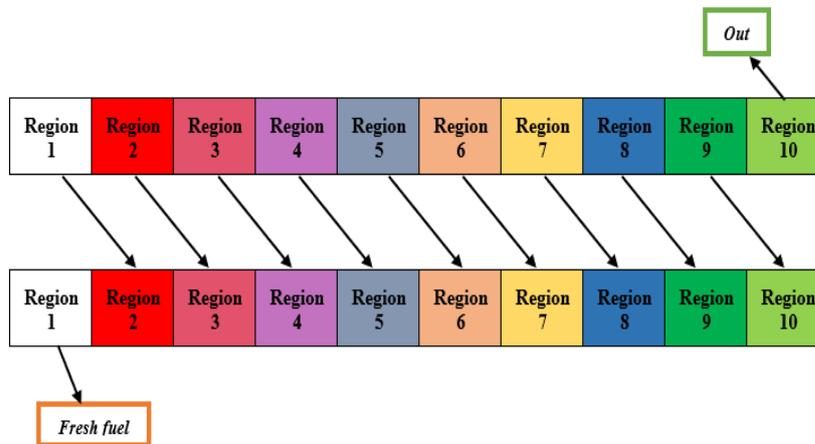
Perhitungan teras reaktor dilakukan menggunakan modul CITATION pada kode SRAC yang dikembangkan oleh JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*) dengan data nuklida JENDL-4.0 [12]. Parameter desain teras reaktor disajikan pada Tabel 1.

Penerapan strategi penyusunan bahan bakar *burn-up modified* CANDLE ditunjukkan pada gambar 1. Terlihat pada gambar 1 bahwa di dalam teras reaktor dibagi menjadi 10 region dengan volume

yang sama. Pada region 1 menunjukkan bahan bakar uranium metalik alam. Untuk region 2 menunjukkan bahan bakar yang telah dibakar selama 10 tahun, kemudian untuk region 3 menunjukkan bahan bakar yang sudah dibakar selama 20 tahun, region 4 menunjukkan bahan bakar yang sudah dibakar selama 30 tahun, sampai dengan region 10 yang menunjukkan bahan bakar yang telah dibakar selama 90 tahun. Kemudian hasil *burnup* region 10 dikeluarkan dari teras reaktor sehingga region 1 dapat diisi dengan *fresh fuel* (bahan bakar baru).

**Tabel 1.** Parameter desain teras reaktor

<b>Parameter</b>	<b>Deskripsi</b>
Daya termal	450 MWt
<i>Waktu Burnup</i>	100 tahun
<i>Waktu refueling</i>	10 tahun
Geometri teras	Silinder (R-Z)
Material <i>fuel pellet</i>	Uranium metalik (U-10% wtZr)
Material kelongsong	Stainlees Steel 316 (SS316)
Material pendingin	Karbondioksida superkritis (S-CO <sub>2</sub> )
Fraksi volume: ( <i>fuel</i> ; kelongsong ; pendingin)	65% ; 10% ; 25%
Diameter <i>pitch</i>	1,4 cm
Jari-jari teras aktif	150 cm
Tinggi teras aktif	150 cm
Tebal reflektor	50 cm

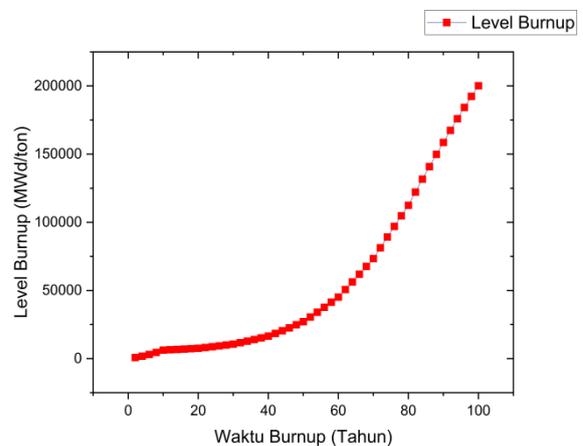


Gambar 1. Susunan bahan bakar arah radial

## HASIL DAN PEMBAHASAN

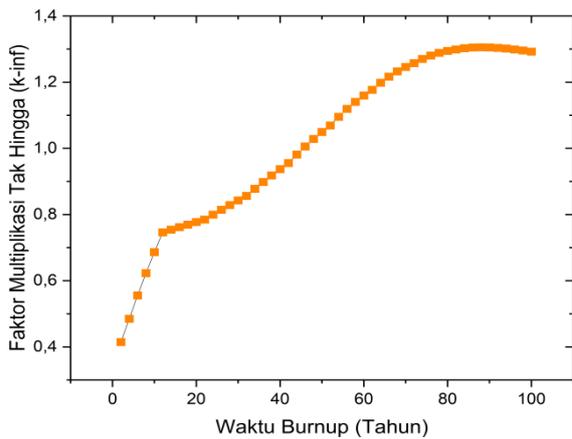
Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan untuk teras reaktor dengan parameter desain seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan skema susunan bahan bakar di teras ditampilkan pada Gambar 1. Adapun parameter hasil survei perhitungan adalah level *burnup*, faktor multiplikasi tak hingga ( $k_{inf}$ ), densitas/massa jenis atom, *conversion ratio* (CR), serta pada teras reaktor yang akan menghasilkan parameter faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) dalam 1 siklus pengisian bahan bakar selama 10 tahun.

Gambar 2 menunjukkan bahwa bahan bakar perlahan mengalami kenaikan hingga mencapai  $2 \times 10^5$  MWd/ton. Kenaikan tersebut disebabkan karena bahan bakar melakukan reaksi fisi sehingga jumlah neutron akan semakin meningkat dari tahun ke tahun dan menyebabkan daya juga mengalami peningkatan.

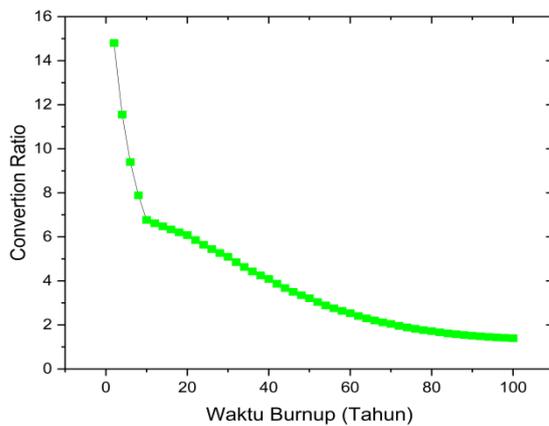


Gambar 2. Grafik perubahan level burnup selama 100 tahun

Dapat dilihat dari Gambar 3 bahwa nilai  $k_{inf}$  pada periode *burnup* (di bawah 50 tahun) memiliki nilai kecil dari satu, hal ini dikarenakan pada awal periode *burnup* densitas bahan bakar fisi (U-235 dan Pu-239) masih kecil. Hal ini berdampak pada jumlah neutron yang dihasilkan di dalam teras reaktor dan menghasilkan nilai faktor multiplikasi di bawah satu. Kemudian nilai  $k_{inf}$  pada periode *burnup* di atas 50 tahun terus mengalami kenaikan setiap tahunnya hingga nilai  $k_{inf}$  mencapai 1,305346 dan kemudian pada tahun ke-90 nilai  $k_{inf}$  mengalami penurunan hingga tahun ke-100. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya densitas atom pada bahan bakar.



**Gambar 3.** Grafik nilai faktor multiplikasi tak hingga ( $k_{inf}$ ) selama 100 tahun

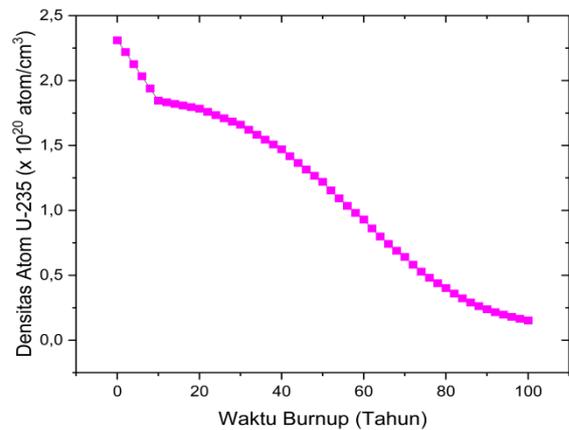


**Gambar 4.** Conversion ratio

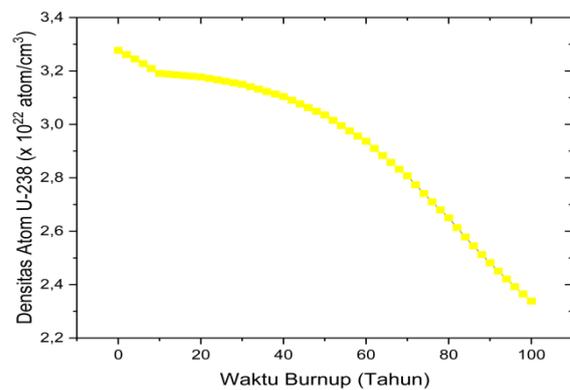
Untuk grafik *conversion ratio* dapat dilihat pada Gambar 4. Pada Gambar 4 menunjukkan rasio konversi bahan fertil (U-238) menjadi bahan fisil (Pu-239). Terlihat pada grafik bahwa *conversion rasio* mengalami penurunan seiring dengan lamanya waktu *burnup*. Pu-239 merupakan bahan fisil yang dikonsumsi untuk menghasilkan reaksi fisi, sedangkan U-238 merupakan bahan fertil yang memproduksi bahan fisil dimana bahan fisil yang dihasilkan yaitu Pu-239.

Distribusi densitas atom digunakan untuk melihat populasi atom dari reaksi fisi pada sel bahan bakar untuk waktu selama 100 tahun. Satuan dari densitas atom yaitu atom/cm<sup>3</sup>. Gambar 5 menunjukkan grafik perubahan distribusi densitas atom pada bahan bakar U-235 dimana populasi atom

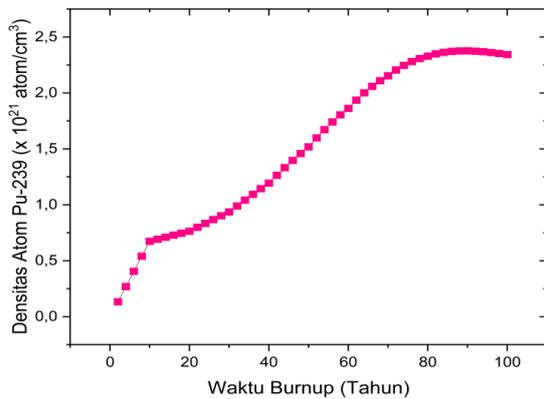
U-235 mengalami penurunan seiring bertambahnya periode *burnup*. Gambar 6 menunjukkan grafik perubahan distribusi densitas atom pada bahan bakar U-238. Dapat dilihat bahwa densitas U-238 semakin berkurang dari tahun ke tahun dikarenakan terus bertransmutasi, melalui peristiwa penangkapan neutron kemudian bertransmutasi menjadi Pu-239. Sedangkan pada Gambar 7 menunjukkan bahan fisil Pu-239 yang awalnya bernilai rendah kemudian menjadi bertambah dengan bertambahnya periode *burnup*.



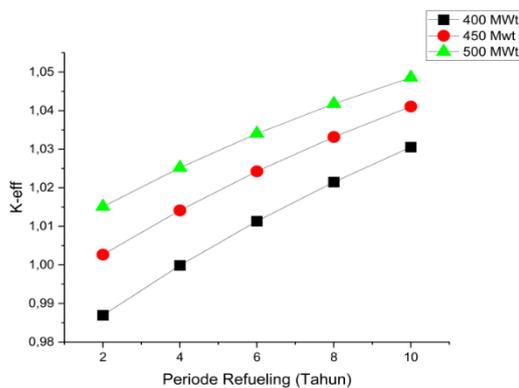
**Gambar 5.** Perubahan densitas atom U-235



**Gambar 6.** Perubahan densitas atom U-238



**Gambar 7.** Perubahan densitas atom Pu-239



**Gambar 8.** Perubahan faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) selama waktu operasi 10 tahun

Faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) merupakan konstanta yang digunakan untuk mengetahui tingkat populasi neutron di dalam teras reaktor dengan

mempertimbangkan faktor kebocoran ke luar teras reaktor.  $K_{eff}$  ini juga merupakan tolak ukur tercapainya suatu desain reaktor. Pada penelitian ini digunakan jari-jari teras aktif yaitu sebesar 150 cm dan tinggi teras aktif 150 cm dan fraksi volume bahan bakar 65% serta variasi terhadap daya termal sebesar 400 MWt, 450 MWt, dan 500 MWt.

Dari Tabel 2 terlihat bahwa untuk daya termal sebesar 400 MWt, nilai faktor multiplikasi efektif untuk tahun ke-2 dan ke-4 didapatkan nilainya masih di bawah satu ( $k_{eff} < 1$ ) dengan *excess reactivity* di bawah 10% yang berarti belum dalam keadaan kritis atau subkritis, namun kemudian nilai  $k_{eff}$  meningkat pada tahun ke-6 hingga tahun ke-10. Pada daya termal 450 MWt didapatkan nilai  $k_{eff} = 1$  (dalam kondisi kritis) selama pembakaran untuk satu siklus operasi selama 10 tahun dengan nilai *excess reactivity* di bawah 10%, kemudian nilai  $k_{eff}$  meningkat hingga akhir siklus. Kemudian nilai  $k_{eff}$  selama pengisian 10 tahun dari teras reaktor, didapatkan nilai  $k_{eff} = 1$  (kondisi kritis) untuk daya termal 500 MWt dengan nilai *excess reactivity* di bawah 10% dan terus meningkat hingga akhir siklus.

**Tabel 2.** Nilai faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ )

Daya Termal (MWt)	Tahun ke-2	Tahun ke-4	Tahun ke-6	Tahun ke-8	Tahun ke-10
400	0,986949	0,999862	1,011323	1,021475	1,030529
450	1,002662	1,014121	1,024242	1,033255	1,041057
500	1,015105	1,025178	1,034027	1,041766	1,048580

Pada Gambar 9 ditampilkan nilai faktor multiplikasi efektif ( $k_{\text{eff}}$ ) untuk daya termal sebesar 400 MWt, 450 MWt, dan 500 MWt. Dari hasil yang telah didapatkan bahwa nilai  $k_{\text{eff}}$  untuk daya termal 450 MWt dan 500 MWt yang dihasilkan berkisar di atas satu, namun untuk  $k_{\text{eff}}$  pada daya termal 450 MWt nilainya lebih mendekati satu daripada nilai  $k_{\text{eff}}$  dengan daya termal 500 MWt yang nilainya sedikit lebih besar. Maka hasil yang dianggap paling baik yaitu pada daya termal 450 MWt dengan nilai  $k_{\text{eff}}$  pada awal siklus pembakaran sebesar 1,002662 dengan nilai reaktivitas 0,002654 hingga akhir siklus pembakaran nilai  $k_{\text{eff}} = 1,041057$  dengan nilai reaktivitas 0,039437.

### KESIMPULAN

Desain teras reaktor terbaik yang menghasilkan daya 450 MWt memiliki ukuran jari-jari teras aktif 150 cm dan tinggi teras aktif 150 cm dengan fraksi volume bahan bakar sebesar 65%. Didapat nilai teras reaktor dalam kondisi aman dan stabil yaitu nilai  $k_{\text{eff}}$  pada awal siklus pembakaran sebesar 1,002662 dengan nilai reaktivitas 0,2654% hingga akhir siklus pembakaran nilai  $k_{\text{eff}} = 1,041057$  dengan nilai reaktivitas 3,9437%.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lutviana, B. S. L., Monado, F., & Ariani, M. (2020). Studi Awal Distribusi Temperatur Elemen Bahan Bakar Reaktor Cepat Berpendingin Gas. *Penelitian SAINTEK*, 25(2), 135–142. <https://journal.uny.ac.id/index.php/saintek>
- [2] GIF. (2002). A technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System. GIF-IV (The Generation IV International Forum) and U.S DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee.
- [3] Irka, F. H., & Su'ud, Z. (2015). Analisis Burn Up pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika | Universitas Andalas*, 7(2), 78–86. <https://doi.org/10.25077/jif.7.2.78-86.2015>
- [4] Sari, N., Fitriyani, D., & Irka, F. (2016). Analisis Neutronik Super Critical Water Reactor (SCWR) Dengan Variasi Bahan Bakar (UN-PuN, UC-PuC Dan MOX). *Jurnal Fisika Unand*, 5(1), 47–52. <https://doi.org/10.25077/jfu.5.1.47-52.2016>
- [5] Syarifah, R. D., Nabhan M. H. N, Hanifah, Z., Karomah, I. & Mabruhi, A. M. (2021). Analisis Fraksi Volume Bahan Bakar Uranium Karbida Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan SRAC Code. *Jurnal Jaring SainTek*, 3(1), 13–18. <https://doi.org/10.31599/jaring-saintek.v3i1.333>
- [6] Susanty, E., Ariani, M., Royani, I., Su'ud, Z., & Monado, F. (2020). Desain Konseptual Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida dan Berbahan Bakar Uranium Alam Dengan Daya 2400 MW. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 17(2), 125. <https://doi.org/10.20527/flux.v1i1.7184>
- [7] Apriliana, Yulianti, Y., & karo karo, P. (2018). Perhitungan Laju Reaksi Neutron Model Perangkat Annular Pada Jenis Reaktor Scwr (Supercritical Water Reactor) Bahan Bakar Thorium.

- Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika, 6(2), 219–228.  
<https://doi.org/10.23960/jtaf.v6i2.1847>
- [8] Kuntoro, I. (2018). Keselamatan Reaktor Nuklir. Jakarta : BATAN.
- [9] Park, J., Cho, S. Y., Youn, Y. S., Lee, J., Kim, J. Y., Park, S. H., Bae, S. E., Kuk, S. W., Park, J. Y., Rhee, C. K., & Lim, S. H. (2019). Anisotropic lattice thermal expansion of uranium-based metallic fuels: A high-temperature X-ray diffraction study. *Journal of Nuclear Materials*, 527, 151803. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151803>
- [10] Maemunah, I. R., Yuningsih, N., & Irwanto, D. (2019). Studi Komparasi Reaksi Fisi dan Fusi pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Masa Depan. *Prosiding Seminar Nasional Fisika 5.0*, 0, 473–481.
- [11] Darmawati, R., Ariani, M., & Monado, F. (2020). Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur Panjang Berpendingin S-CO<sub>2</sub> dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, 9(3), 401–407.
- [12] Okumura, K., 2007. SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code Systems. Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Japan.