



## Analisis neutronik Gas Cooled Fast Reactor berpendingin S-CO<sub>2</sub> dengan bahan bakar Thorium Nitride

ERWIN ALPARIS, MENIK ARIANI\*, FIBER MONADO, DAN AKMAL JOHAN

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

<p><b>Kata kunci:</b> reaktor, Thorium Nitride, S-CO<sub>2</sub>, modified CANDLE</p>	<p><b>ABSTRAK:</b> Analisis neutronik Gas Cooled Fast Reactor dilakukan dengan menggunakan simulasi program SRAC. Reaktor ini menggunakan bahan bakar utama Thorium-232 yang diperkaya dengan Uranium-233 agar reaktor dapat beroperasi, serta berpendingin karbondioksida superkritis S-CO<sub>2</sub>. Strategi pembakaran bahan bakar menggunakan prinsip modified CANDLE. Susunan bahan bakar pada metode modified CANDLE dibagi menjadi 10 wilayah bahan bakar dan 10 tahun siklus pembakaran. Setelah 10 tahun proses burn-up bahan bakar di wilayah pertama dipindahkan ke wilayah kedua, bahan bakar di wilayah kedua dipindahkan ke wilayah ketiga, bahan bakar di wilayah ketiga dipindahkan ke wilayah keempat, dan seterusnya. Bahan bakar di wilayah 10 kemudian dikeluarkan. Wilayah pertama diisi dengan bahan bakar baru Thorium alam. Proses tersebut diulangi sampai tercapai kondisi keseimbangan. Dari hasil simulasi perhitungan pada desain teras diperoleh nilai faktor multiplikasi (<math>K_{eff}</math>) serta level burn-up yang paling optimal.</p>
<p><b>Keywords:</b> reactor, Thorium Nitride, S-CO<sub>2</sub>, modified CANDLE</p>	<p><b>ABSTRACT:</b> Neutronic analysis of Gas Cooled Fast Reactor was carried out using the SRAC simulation program. This reactor uses Thorium main fuel which is enriched with Uranium 233 so that the reactor can operate, and SCO<sub>2</sub> (supercritical carbon dioxide) as cooled. The fuel combustion strategy uses the modified CANDLE principle. The composition of the fuel in the modified CANDLE method is divided into 10 fuel regions and 10 years of combustion cycle. After 10 years the burn-up process of fuel in the first region is transferred to the second region, the fuel in the second region is transferred to the third region, the fuel in the third region is transferred to the fourth region, and so on. Fuel in region 10 is then ejected. The first region is filled with new natural Thorium fuel. The process is repeated until equilibrium conditions are reached. From the simulation results of the calculations on the core design, the multiplication factor (<math>K_{eff}</math>) and the most optimal burn-up level are obtained.</p>

### 1 PENDAHULUAN

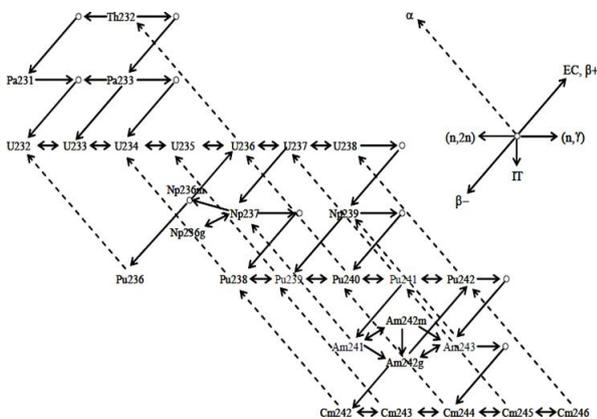
Pada kuartal I 2022 permintaan akan ketersediaan energi listrik mengalami pertumbuhan dan penambahan yang jauh lebih cepat dibandingkan dengan permintaan jenis energi lainnya, hal ini ditandai dengan naiknya konsumsi listrik nasional sebesar 8,42% [1]. Tentunya sangat diperlukan berbagai upaya untuk mengantisipasi dan mengatasi terus melonjaknya permintaan akan ketersediaan energi listrik, baik secara nasional maupun global. Hal ini terkait dengan ketersediaan sumber daya alam batubara dan bahan bakar fosil lainnya yang semakin menipis jumlahnya sebagai bahan bakar utama pembangkit listrik. PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) merupakan salah satu bentuk sumber energi bauran (*mix energy*) yang dapat dijadikan solusi

mengatasi peningkatan kebutuhan listrik [2]. PLTN memanfaatkan reaktor nuklir sebagai sumber energinya untuk dapat dikonversikan menjadi energi listrik [3].

Sebagian besar reaktor yang beroperasi di seluruh dunia saat ini menggunakan bahan bakar Uranium seperti U<sup>235</sup> dan U<sup>238</sup>, namun terdapat keterbatasan atas ketersediaan bahan bakar tersebut. Selain Uranium jenis bahan bakar lain yang sangat potensial yang dapat digunakan sebagai bahan bakar pada reaktor nuklir adalah Thorium yang jumlah ketersediaannya di alam tiga kali lebih banyak daripada Uranium [4]. Salah satu alasan penggunaan Thorium sebagai bahan bakar reaktor adalah karena efisiensinya. Untuk menghasilkan daya 1000 MWe atau 1 giga watt per tahun dibutuhkan 7 ton Thorium, se-

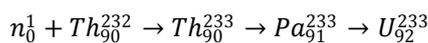
\* Corresponding Author: email: [menik\\_ariani@unsri.ac.id](mailto:menik_ariani@unsri.ac.id)

dangkankan jika menggunakan Uranium dibutuhkan 200 – 250 ton, dan 3,5 juta – 4 juta ton jika menggunakan batubara untuk menghasilkan daya yang sama [5]. Selain itu siklus Thorium secara umum memiliki rasio konversi yang lebih baik dibandingkan dengan siklus Uranium dalam spektrum *thermal*. Karena Thorium bersifat fertil maka Thorium memerlukan material fisil seperti  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  sebagai material penggerak agar Thorium dapat digunakan sebagai bahan bakar pada reaktor nuklir. Pada rantai konversi  $Th^{232}$  menjadi  $U^{233}$  dikenal adanya nilai CR (*Conversion Ratio*), yaitu nilai yang menunjukkan tingkat pengkonversian, dimana jika nilai  $CR < 1$ , maka disebut *converter*. Reaksi fisi berantai dari  $Th^{232}$  hingga menghasilkan  $U^{233}$  beserta material fisil lainnya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Rantai Reaksi Thorium [6]

Reaksi penangkapan neutron pada  $Th^{232}$  yang menghasilkan bahan fisil  $U^{233}$  dapat dilihat pada persamaan reaksi berikut ini.



Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan terdiri dari Thorium alam ditambah dengan bahan bakar fisil Uranium ( $U^{233}$ ). Perhitungan dan analisis neutronik pada reaktor thermal yang dirancang dilakukan dengan menggunakan kode SRAC 2K6 dengan database JENDL 4.0 [7]. Sedangkan skema pembakaran (*burn-up*) bahan bakar menggunakan skema *modified CANDLE* arah aksial. Metode *burn-up Modified CANDLE* (MCANDLE) pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Zaki Su'ud dari ITB Indonesia. Konsep MCANDLE sendiri merupakan modifikasi dari metode CANDLE (*Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide density, and power profile While Life of Produksi energi*) yang diperkenalkan dan diusulkan oleh Prof. Hiroshi Sekimoto dari Tokyo Institute of Technology, Jepang. Dalam metode ini memungkinkan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menggunakan Uranium alam dalam siklus

*inputnya* [8]. Berbeda dari penelitian-penelitian terdahulu pada penelitian ini menggunakan bahan bakar Thorium Nitride dengan pendingin  $S-CO_2$ .

## 2 BAHAN DAN METODA

Untuk mendesain reaktor diperlukan spesifikasi desain teras reaktor meliputi ukuran sel bahan bakar dan teras reaktor. Desain reaktor menggunakan model teras bertipe "tall". Reaktor tipe *tall* mempunyai ukuran tinggi lebih besar daripada lebar diameter teras [9]. Parameter desain GFR ditunjukkan pada tabel berikut:

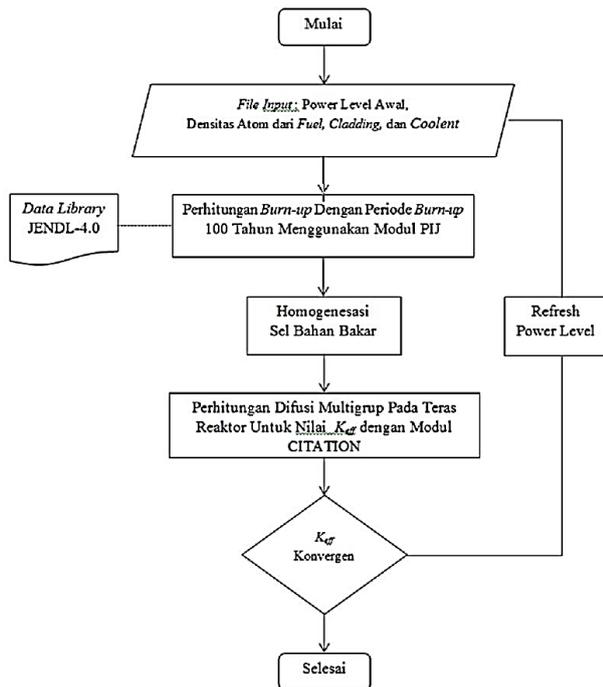
Tabel 1. Spesifikasi Parameter Desain Teras Reaktor

Parameter	Deskripsi
Daya Thermal	600 MWth
Siklus Bahan Bakar	10 Tahun
Jenis Kelongsong	Stainless Steel (SS 316)
Jenis Pendingin	$S-CO_2$
Jenis Bahan Bakar	Thorium Uranium Nitride (Th,U)N
Fraksi Volume (fuel : cladding : coolant)	65% : 10% : 25%
Ukuran Teras Aktif	200 cm x 300 cm
Lebar Reflektor	50 cm
Pin pitch/Diameter Bahan Bakar Pin	1.4/1.232 cm

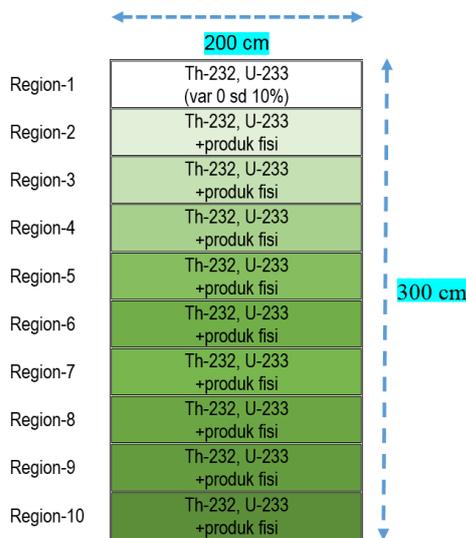
Geometri sel bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk silinder (*Cylindrical cell*), yang terdiri dari sel bahan bakar (*fuel*) yang dilapisi dengan kelongsong (*Cladding*) dan pendingin (*Coolant*).

Perhitungan tingkat sel bahan bakar dihitung densitas atomnya untuk selanjutnya dijadikan sebagai *input* perhitungan teras reaktor. Diagram alir perhitungan di tingkat sel bahan bakar dan teras reaktor disajikan pada Gambar 2.

Strategi penyusunan bahan bakar menggunakan *Modified CANDLE*, yang membagi teras menjadi 10 region bervolume sama namun dengan komposisi bahan bakar berbeda. Penampang teras disajikan pada Gambar 3. Variasi jumlah penggunaan Uranium-233 sebagai bahan fisil dilakukan pada bagian teras (*Region-1*). *Region-1* berisikan Thorium-232 dengan penambahan material fisil Uranium-233 bervariasi dari 0% s.d 10%. Hal ini bertujuan untuk memperoleh teras reaktor yang kritis atau memiliki nilai faktor multiplikasi efektif  $K_{eff} \geq 1$ . *Region-2* sampai dengan *Region-10* berisikan Thorium-232 dengan penambahan Uranium-233 serta produk fisi (material hasil reaksi pembakaran bahan bakar dalam teras).



Gambar 2. Diagram Alir Perhitungan sel bahan bakar dan teras reaktor dengan SRAC

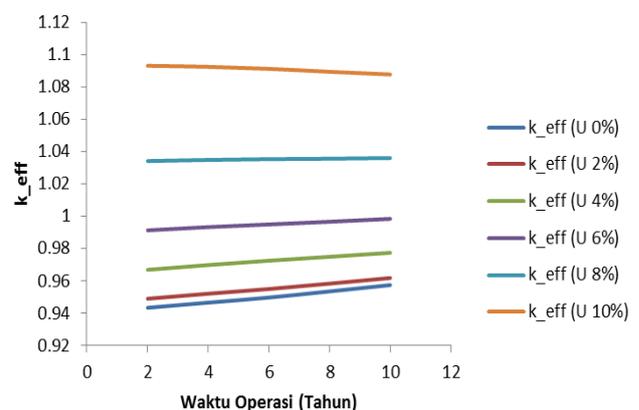


Gambar 3. Susunan dan komposisi bahan bakar dalam teras reaktor

### 3 HASIL

Kondisi kekritisan suatu reaktor ditunjukkan oleh nilai faktor multiplikasi efektif ( $K_{eff}$ ). Kondisi kritis ( $K_{eff} \sim 1$ ) pada reaktor dapat dicapai melalui pengaturan fraksi jenis bahan bakar di teras. Hasil pengaturan fraksi jenis bahan bakar (ThU)N, dengan berbagai variasi pengayaan Uranium-233 mulai dari 0%, 2%, 4%, 6%, 8% hingga 10%, dan nilai  $K_{eff}$  yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.

Dari Gambar 4, dapat dilihat bahwa nilai faktor multiplikasi efektif  $K_{eff}$  pada awal pengoperasian reaktor tanpa pengayaan Uranium-233 (U 0%) berkisar antara 0.94334 hingga 0.95740. Hal ini menandakan bahwa di Region-1 belum terjadi reaksi fisi yang menghasilkan energi. Reaksi yang terjadi adalah penangkapan neutron oleh Thorium-232. Penambahan Uranium-233 sebagai bahan fisil di Region-1 diperlukan untuk meningkatkan nilai  $K_{eff}$  sehingga reaktor dapat mencapai kritis. Pada pengayaan Uranium 2%, 4%, hingga 6% nilai  $K_{eff}$  mulai mengalami kenaikan mulai dari 0.94896 pada pengayaan Uranium 2% hingga 0.99835 pada pengayaan Uranium 6%, tetapi masih belum mencapai 1 ( $K_{eff} \sim 1$ ) sehingga reaktor masih belum bisa dikatakan layak beroperasi pada pengayaan bahan bakar dengan persentasi 2% hingga 6%. Nilai  $K_{eff}$  yang menunjukkan kinerja yang baik (kondisi kritis) ( $K_{eff} \sim 1$ ) terjadi pada saat pengayaan Uranium 8% dan 10%. Pada fraksi pengayaan bahan bakar 8% dan 10% reaktor mampu mempertahankan kondisi kekritisan hingga pengoperasian 10 tahun, hal ini menunjukkan bahwa reaktor mampu beroperasi dengan baik. Pada pengayaan Uranium 8% nilai  $K_{eff}$  cenderung mengalami kenaikan, sedangkan pada pengayaan Uranium 10% nilai  $K_{eff}$  mulai mengalami penurunan tetapi nilainya masih berkisar 1 serta masih mampu beroperasi selama 10 tahun tanpa pengisian bahan bakar. Penurunan nilai  $K_{eff}$  mengindikasikan bahwa reaksi fisi yang terjadi pada reaktor terus berkurang setiap tahunnya seiring dengan bertambahnya waktu pengoperasian reaktor, sehingga menyebabkan neutron yang dihasilkan di dalam reaktor pun berkurang. Tabel 2 menunjukkan nilai  $K_{eff}$  dan nilai kelebihan reaktivitas di setiap 2 tahun operasi reaktor.



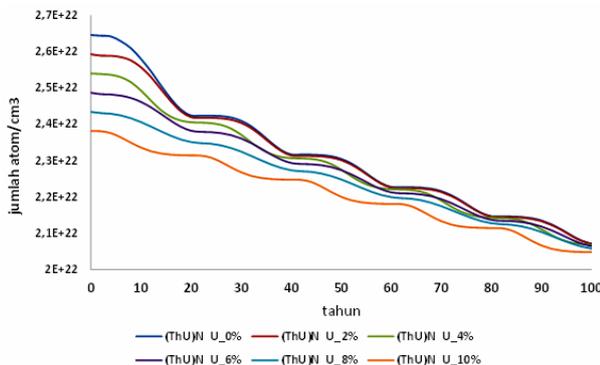
Gambar 4. Perubahan  $K_{eff}$  pada teras dengan variasi pengayaan  $U^{233}$  selama 10 Tahun

Tabel 2. Nilai Faktor Multiplikasi Efektif ( $K_{eff}$ ) Dengan pengayaan Uranium-233 8% dan 10%

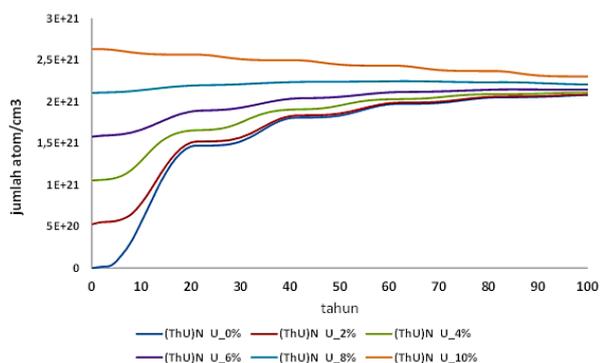
Tahun Operasi	$U_{233}$ -8%, $k_{eff}$	Reaktivitas $\delta k = (k-1)/k$	$U_{233}$ -10%, $k_{eff}$	Reaktivitas $\delta k = (k-1)/k$
2	1.03413	0,033	1.09306	0,085
4	1.03480	0,034	1.09242	0,085
6	1.03529	0,034	1.09118	0,084
8	1.03558	0,034	1.08935	0,082
10	1.03596	0,035	1.08768	0,081

Reaktivitas  $\delta k = (k - 1)/k$  adalah nilai yang menunjukkan penyimpangan dari kekritisan. Ketika reaktor kritis maka nilai  $\delta k = 0$ . Teras reaktor dengan pengayaan Uranium-233 sebesar 8% memberikan nilai reaktivitas lebih rendah jika dibandingkan dengan yang 10%. Dengan demikian maka teras yang menggunakan pengayaan Uranium-233 sebesar 8% memiliki tingkat paling efisien dalam penggunaan bahan bakar.

Selain faktor multiplikasi dan reaktivitas, analisis terhadap produk fisi yang dihasilkan selama proses pembakaran di dalam teras juga diperlukan. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan proses akumulasi rapat atom dari nuklida yang terlibat rantai pembakaran bahan bakar Thorium Nitride.



Gambar 5. Perubahan rapat atom  $Th^{232}$  sepanjang burn-up



Gambar 6. Perubahan rapat atom  $U^{233}$  sepanjang burn-up

Gambar 5 dan 6 menunjukkan perubahan densitas atom pada Thorium-232 dan Uranium-233 sepanjang waktu pembakaran bahan bakar dalam teras. Pada Gambar 5 terlihat bahwa densitas atom Thorium-232 untuk semua variasi pengayaan mengalami penurunan, sesuai dengan berkurangnya jumlah atom akibat mengalami reaksi penangkapan neutron. Sebaliknya densitas atau rapat atom Uranium-233 ( $U^{233}$ ) mengalami kenaikan jumlah untuk semua variasi pengayaan kecuali pada 10%. Penurunan jumlah densitas atom Thorium-232 disebabkan karena atom-atom Thorium-232 ( $T^{232}$ ) berubah menjadi Uranium ( $U^{233}$ ) melalui penyerapan neutron pada saat burn-up (pembakaran). Thorium-232 yang bersifat fertil dapat 'dibiakkan' melalui serangkaian reaksi yang menghasilkan Uranium-233 yang bersifat fisil.

### 4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi analisis yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa kekritisan reaktor dapat dicapai dan dipertahankan dengan cara pengaturan pengayaan bahan bakar. Bahan bakar Thorium-232 yang bersifat fertil dapat dibiakkan untuk menghasilkan Uranium-233 yang bersifat fisil. Pengayaan atau penambahan Uranium-233 diawal pembakaran diperlukan agar tercapai nilai faktor multiplikasi efektif  $\geq 1$  dari awal hingga 10 tahun pengoperasian. Pengayaan Uranium-233 sebesar 8% diperlukan agar teras reaktor 600 MWth dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar. Reaktor juga memiliki tingkat efisiensi tinggi dalam hal penggunaan bahan bakar.

### REFERENSI

- [1] D. Marini, M. Ariani, and A. Johan, "Analisis neutronik reaktor cepat berpendingin Helium dengan daya 900 MWth berbasis bahan bakar Thorium Mixed Oxyde," *Jurnal Penelitian Sains*, vol. 24, 2022.
- [2] I. Prayogi, Y. Yulianti, and R. Marjunus, "Desain Inti Teras Reaktor (Core) Model Mesh Triangular Pada Reaktor CANDU Menggunakan Bahan Bakar Daur Ulang Thorium," *Jurnal Fisika Indonesia*, vol. 24, no. 3, pp. 170-174., 2020.
- [3] N. M. Dilaga, Y. Yulianti, and A. Riyanto, "Desain Teras Reaktor High Temperatur Gas-Cooled Reactor (HTGR) Model Mesh Triangular Dua Dimensi Berbahan Bakar Thorium Berpendingin Gas CO<sub>2</sub>," 2019, vol. 7, no. 1, pp. 107-115, 2019.
- [4] J.-L. F. Yrobel Lima-Reinaldo, Cecilia Martín-del-Campo, "Analysis of the use of thorium in the GFR2400 gas-cooled fast reactor," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 343, pp. 11-21, 2019.

- [5] B. Wijanarko. Pengembangan Thorium Sebagai Sumber Energi Alternatif Untuk Kepentingan Pertahanan Negara [Online].
- [6] K. Okumura, Kugo, Teruhiko, Kaneko, Kunio, Tsuchihashi, Keichiro "SRAC2006: A comprehensive neutronics calculation code system," 2007. Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki (Japan)
- [7] K. Tsuchihashi, H. Takano, K. Horikami, Y. Ishiguro, K. Kaneko, and T. Hara, SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System For Design Analysis. Japan: Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI 1285, 1983.
- [8] F. Monado, M. Ariani, I. Royani, and Z. Su'ud, "Comparative Studi of Conceptual Design of Gas-cooled Fast Reactor Core Type Tall versus Pancake Based on MCANDLE Burn up Strategy," *Journal of Physics: Conference Series*, 2019.
- [9] N. R. Galih, "Studi Desain Teras Reaktor Cepat berbahan Bakar Campuran Uranium Karbida - Thorium Karbida dan Berpendingin Helium Dengan Skema Modified CANDLE Arah Aksial," FMIPA, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, 2019.
- [10] 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. \_\_\_\_\_