

Desain Konseptual Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida dan Berbahan Bakar Uranium Alam Dengan Daya 2400 MW

Enda Susanty¹⁾, Menik Ariani¹⁾, Idha Royani¹⁾, Zaki Su'ud²⁾, and Fiber Monado^{1,*)}

¹⁾ Dept. of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University, Indonesia

²⁾ Nuclear and Biophysics Research Division, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Bandung Institute of Technology, Bandung, Indonesia

*Email korespondensi: fibermonado@unsri.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v17i2.7184>

Submitted: 09 Oktober 2019; Accepted: 05 Mei 2020

ABSTRACT- This paper presents the design concept of a carbon dioxide-cooled fast reactor. This reactor utilize U-10%Zr as fuel and SS316 as cladding. The strategy of modified CANDLE (*Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy production*) was applied for burnup in the core with power 2400 MW. The reactor core calculations were performed with a cylindrical geometry that is varied on the height and diameter of the core using a set of CITATION and PIJ modules on the SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*) program. The ideal core size was obtained with a high of 350 cm, and a diameter of 240 cm with the resulting survey parameter are effective multiplication factor (k_{eff}), excess reactivity, radial and axial power distribution, and power peaking. The reactor core reaches a critical condition with k_{eff} 1.05 and excess reactivity 5.3% and radial power peaking 1.73. Optimization was done with power flattening, that is by dividing the core into two parts with a fuel fraction of 60% for the inner part with thick of 80 cm and fuel fraction of 65% for the outer part with thick of 40 cm, the results are 1.013, 1.3% and 1.5 for k_{eff} , excess reactivity, and radial power peaking, respectively.

KEYWORDS: carbon dioxide; GFR; modified CANDLE; SRAC; power flattening

PENDAHULUAN

Sejumlah besar energi diperlukan untuk mendukung kehidupan manusia. Energi fosil adalah bagian utama dari energi. Namun, energi fosil memiliki masalah yaitu jumlah sumber daya yang terbatas dan pemanasan global yang disebabkan oleh karbondioksida (Sekimoto, 2001). Energi nuklir merupakan salah satu solusi alternatif dalam menghasilkan energi yang sedang dikembangkan saat ini (Riska, Fitriani, & Irka, 2016). Reaktor nuklir adalah suatu instalasi yang bekerja berdasarkan reaksi fisi atau reaksi pembelahan inti atom secara berantai dan terkendali. Reaksi fisi inti berlangsung pada bagian yang disebut teras reaktor. Uranium merupakan bahan nuklir yang dapat

melepaskan energi sekitar 200 MeV dalam setiap reaksi fisi. Sebagai gambaran, 1 kg U²³⁵ yang berfisi akan menghasilkan energi panas sebesar 24 juta kWh atau setara dengan pembakaran batu bara sebanyak 3 juta kg (Kuntoro, 2018).

Gas-cooled Fast Reactor (GFR) adalah salah satu pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) Generasi-IV dengan karakteristik spektrum neutron cepat. Neutron spektrum cepat dapat digunakan untuk membuat reaktor daya dengan rasio konversi (kemampuan pembiakan) tinggi dan menggunakan gas sebagai pendingin reaktor (Monado et al., 2013).

Penelitian ini mendesain teras reaktor GFR berbahan bakar uranium zirconium (U-

10%Zr) berpendingin karbondioksida (CO₂) yang menerapkan strategi CANDLE (*Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy production*) yang telah dimodifikasi yaitu *modified CANDLE*. Strategi ini menjadikan reaktor dapat terus beroperasi dalam jangka panjang hanya dengan menambahkan bahan bakar uranium alam sebagai input siklus bahan bakarnya (Ariani, Monado, Su'ud, & Waris, 2013).

METODOLOGI PENELITIAN

Pada perhitungan neutronik teras yang harus dilakukan adalah membuat suatu deskripsi mengenai keadaan neutron di dalam teras reaktor. Keadaan neutron yang dimaksud mencakup populasi neutron, distribusi neutron, kerapatan neutron, fluks neutron dan sebagainya (Stacey, 2007).

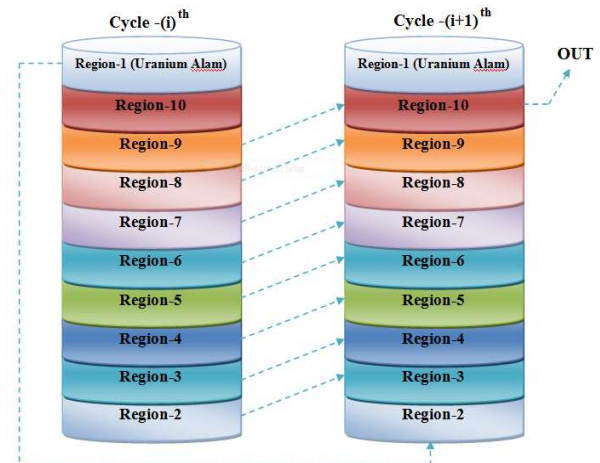
Parameter-parameter utama desain teras reaktor disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi parameter

Parameter	Deskripsi
Daya Termal	2400 MW
Burnup Bahan Bakar	100 tahun
Siklus Refueling	10 tahun
Geometri Teras	Silinder RZ
Material Fuel Pellet	Uranium metalik (U-10%Zr)
Material Cladding	Stainless Steel (SS316)
Material Coolant	Karbon dioksida (CO ₂)
Fraksi Volume :	
(Fuel: Cladding: Coolant)	65 % : 10% : 25% (85% TD)
Diameter pitch (cm)	1,4 cm
Diameter Teras aktif	240 – 265 cm
Tinggi teras aktif	300 – 370 cm
Lebar reflektor (cm)	50 cm

Pembagian komposisi bahan bakar pada strategi *modified CANDLE* pada teras dapat dilihat pada Gambar 1, dimana teras dibagi menjadi 10 dengan volume sama. Pada kondisi awal, region-1 berisi uranium alam (*fresh*), region-2 berisi atom-atom setara dengan bahan bakar yang telah diburn selama 10 tahun, region-3 berisi atom-atom setara dengan bahan bakar yang telah diburn selama 20 tahun dan seterusnya. Setelah 1 siklus (10 tahun *burnup*)

maka bahan bakar dari region-1 berisi atom-atom setara dengan bahan bakar yang telah diburn selama 10 tahun akan dipindahkan ke region-2, sedangkan bahan bakar di region-2 dipindahkan ke region-3, dan seterusnya, kemudian region terakhir yaitu region-10 dikeluarkan dari teras.



Gambar 1 Skema Konsep Dasar Strategi Burnup Modified CANDLE

Pada penelitian ini digunakan *software SRAC (Standard Reactor Analysis Code)* versi 2K2 untuk perhitungan tingkat sel bahan bakar dan teras reaktor (Okumura, 2007). Parameter survei yang dihasilkan pada perhitungan teras antara lain adalah faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) pada Pers (1), *excess reactivity* pada Pers (2), dan faktor *power peaking* (Fpp) pada Pers (3). Faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dapat dinyatakan dengan :

$$k_{eff} = \frac{\text{jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{jumlah neutron pada generasi sebelumnya}} \quad (1)$$

Suatu reaktor nuklir harus tetap mempertahankan kondisi kritisnya. Kekritisan reaktor nuklir dapat dinyatakan dengan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Reaktor dinyatakan superkritis jika $k_{eff} > 1$ yang artinya jumlah neutron meningkat sebagai fungsi waktu, subkritis $k_{eff} < 1$ yang artinya jumlah neutron menurun sebagai fungsi waktu dan dalam keadaan kritis jika $k_{eff} = 1$ yang artinya jumlah neutron tidak berkurang ataupun bertambah tetapi konstan (Zweifel, 1973).

Reaktivitas adalah nilai yang menyatakan simpangan dari kondisi kritis ($k_{eff} = 1$) pada suatu reaktor nuklir (Surbakti & Purwadi, 2017). Sedangkan nilai rata-rata

reaktivitas (ρ) dalam persen untuk 1 siklus pengisian bahan bakar dapat dinyatakan sebagai *excess reactivity*.

$$\rho = \frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff}} = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \quad (2)$$

Persamaan (2) dapat menunjukkan kondisi seperti ketika faktor multiplikasi efektif atau ketika teras reaktor berada dalam keadaan kritis ($k_{eff} = 1$), maka nilai reaktivitas (ρ) akan bernilai 0, hal ini berarti reaksi fisi berantai yang independen terhadap waktu dan jumlah neutron pada suatu generasi sama dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya.

Rapat daya bersatuan watt/cc menyatakan besarnya daya yang dihasilkan persatuan volume di satu *mesh*. Sedangkan rapat daya rata-rata (ϕ_{ave}) adalah besaran yang menyatakan jumlah rapat daya yang dihasilkan di seluruh *mesh* dalam teras aktif dibagi jumlah total *mesh*. Besaran daya puncak yang dihasilkan reaktor dikenal sebagai "*power peaking factor*" yang merupakan perbandingan antara rapat daya maksimum (ϕ_{max}) dengan rapat daya rata-rata (ϕ_{ave}), sehingga dapat diformulasikan sebagai berikut (Duderstadt & Hamilton, 1976):

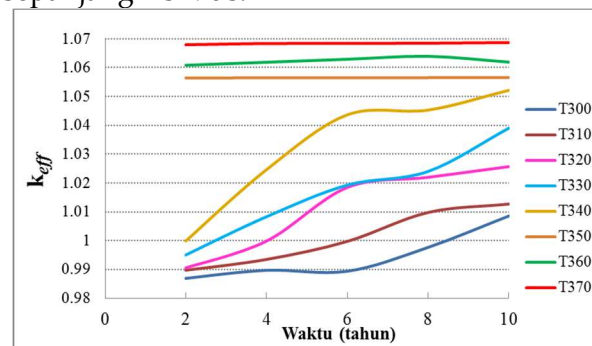
$$F_{pp} = \frac{\phi_{max}}{\phi_{ave}} \quad (3)$$

Penelitian terdiri dari empat tahapan yaitu tahapan awal dimulai dengan menghitung sel bahan bakar dengan variasi fraksi bahan bakar (*fuel*) dan didapatkan sel bahan bakar fraksi *fuel* 65% yang digunakan pada teras reaktor. Tahapan kedua mencari

ukuran desain yang optimal untuk teras reaktor dengan daya 2400 MW yang divariasi pada tinggi dan diameter teras, kemudian dilanjutkan mencari ukuran desain yang memiliki efisiensi bahan bakar dengan membandingkan k_{eff} dan *excess reactivity*, dan bagian yang terakhir adalah optimasi pemerataan daya dalam arah radial dan axial pada teras reaktor yang kritis dan efisien dengan menggunakan fraksi volume bahan bakar yang berbeda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain teras dengan variasi tinggi yang digunakan berkisar antara 300 cm – 370 cm, dengan diameter yang sama yaitu 240 cm. Hasil perhitungan nilai k_{eff} dan *excess reactivity* masing-masing desain diberikan pada Tabel 2 dan grafik hubungan k_{eff} terhadap waktu *burnup* disajikan pada Gambar 2. Desain teras dengan tinggi 350 cm menunjukkan nilai k_{eff} yang stabil dengan nilai *excess reactivity* terkecil. Nilai k_{eff} yang stabil menunjukkan jumlah bahan bakar yang bereaksi fisi sama sepanjang 1 siklus.



Gambar 2 Nilai k_{eff} dengan Variasi Tinggi

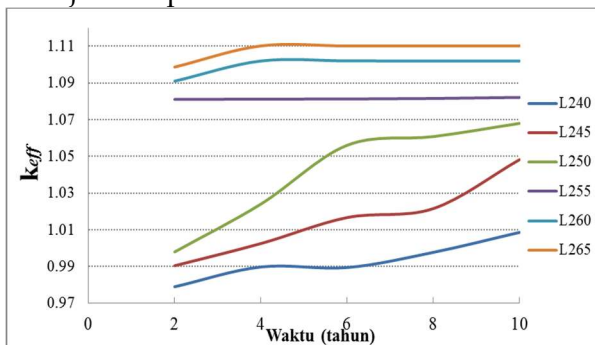
Tabel 2 Nilai k_{eff} dan *Excess Reactivity* untuk desain Teras dengan Variasi Tinggi

Desain	Tinggi (cm)	k_{eff} tahun ke-					Excess reactivity (%)
		2	4	6	8	10	
1	300	0,97892	0,98969	0,98937	0,99765	1,00854	-0,72
2	310	0,98973	0,99347	0,99973	1,00977	1,01270	0,11
3	320	0,99055	0,99984	1,01845	1,02196	1,02568	1,12
4	330	0,99503	1,00829	1,01926	1,02405	1,03901	1,68
5	340	0,99986	1,02462	1,04364	1,04528	1,05216	3,21
6	350	1,05644	1,05648	1,05650	1,05653	1,05659	5,35
7	360	1,06083	1,06188	1,06292	1,06394	1,06195	5,87
8	370	1,06796	1,06837	1,06842	1,06850	1,06871	6,40

Tabel 3 Nilai k_{eff} dan Excess Reactivity untuk desain teras dengan variasi diameter

Desain	Lebar (cm)	k_{eff} tahun ke-					Excess reactivity (%)
		2	4	6	8	10	
1	240	0,97892	0,98969	0,98937	0,99765	1,00854	-0,72
2	245	0,99038	1,00245	1,01663	1,02154	1,04820	1,56
3	250	0,99791	1,02399	1,05605	1,06080	1,06799	3,97
4	255	1,08105	1,08123	1,08129	1,08158	1,08215	7,53
5	260	1,09103	1,10201	1,10208	1,10201	1,10201	9,08
6	265	1,09873	1,11025	1,11020	1,11026	1,11027	9,74

Desain teras yang divariasikan pada diameter teras menggunakan tinggi yang sama yaitu 300 cm, dimana desain dengan diameter 255 cm menunjukkan nilai k_{eff} yang stabil dengan nilai *excess reactivity* terkecil (Tabel 3) dan grafik k_{eff} sebagai fungsi waktu ditunjukkan pada Gambar 3.



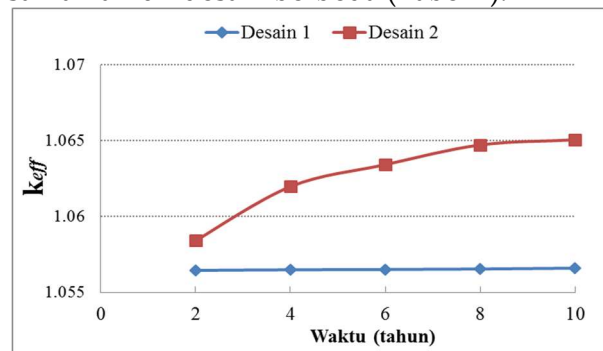
Gambar 3 Nilai k_{eff} dengan variasi diameter teras

Tabel 4 Spesifikasi 2 tipe desain teras dengan volume sama

	Fraksi Fuel	Tinggi (cm)	Diameter (cm)	Volume (cm ³)
Desain 1	65%	350	240	15825600
Desain 1	65%	310	255	15823834

Dari 2 tipe desain teras yang dibuat bervariasi pada tinggi dan diameter, terlihat bahwa kedua tipe desain ini mempengaruhi nilai k_{eff} namun belum dapat memastikan tipe desain yang paling efisien diantara keduanya karena tidak memiliki volume teras yang

sama. Sehingga dilakukan perbandingan untuk teras yang memiliki volume hampir sama namun desain berbeda (Tabel 4).



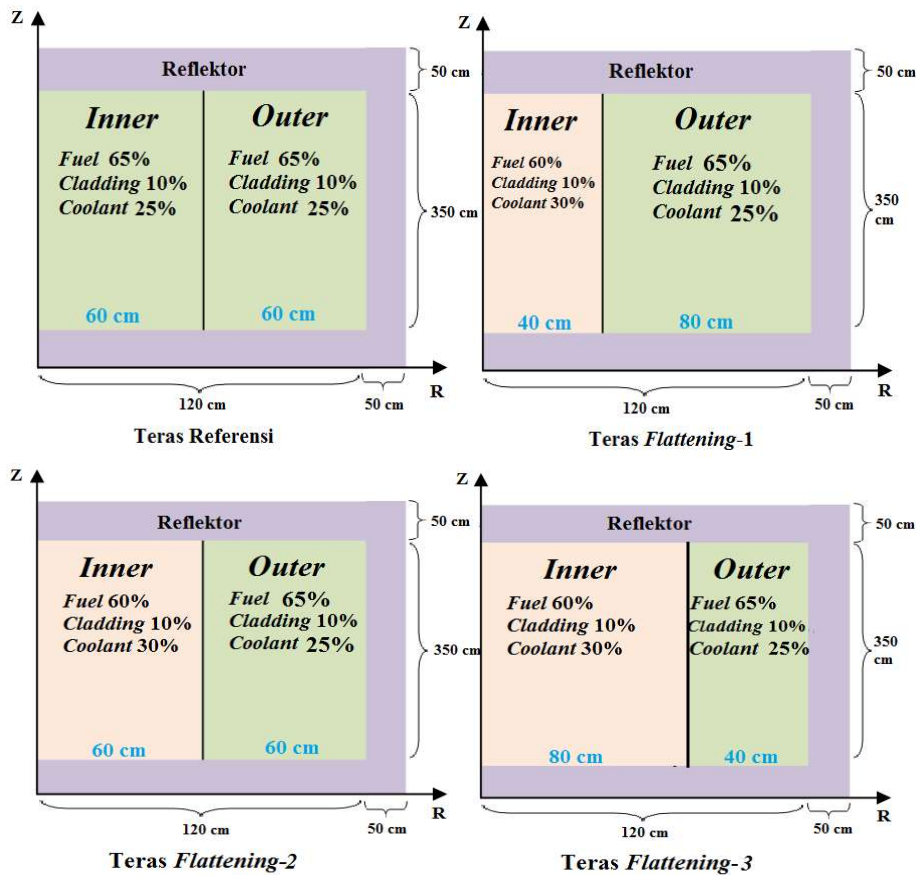
Gambar 4 Nilai k_{eff} untuk 2 tipe desain dengan volume sama

Semakin kecil nilai *excess reactivity* (Tabel 5) menunjukkan bahwa teras dalam kondisi kekritisan yang lebih baik. Gambar 4 juga menampilkan nilai k_{eff} yang lebih konstan untuk desain-1. Sehingga dapat disimpulkan bahwa diantara dua desain teras yang dibandingkan, teras desain pertama dapat dikatakan lebih optimal dan dapat digunakan sebagai teras referensi sebelum dilakukan optimasi (*power flattening*).

Untuk menghasilkan reaktor cepat yang aman dan ideal perlu diperhatikan kondisi distribusi daya baik secara aksial maupun radial. Maka perlu dilakukan pengaturan ulang komposisi sel bahan bakar yang akan disusun pada teras reaktor cepat dengan cara optimasi. Desain optimasi ini menggunakan

Tabel 5 Nilai k_{eff} dan excess reactivity untuk 2 variasi desain teras dengan volume sama

Desain	k_{eff} tahun ke-					Excess reactivity (%)
	2	4	6	8	10	
1	1,05644	1,05648	1,05650	1,05654	1,05659	5,3
2	1,05840	1,06198	1,06342	1,06472	1,06506	5,9



Gambar 5 Susunan bahan bakar *power flattening* pada setengah teras

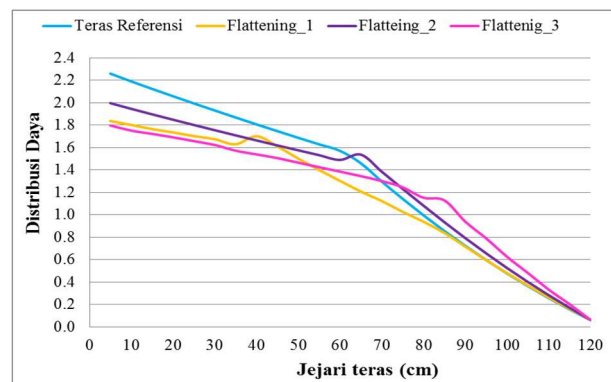
Tabel 6 Perbandingan nilai k_{eff} , *excess reactivity*, dan hasil perhitungan daya pada teras referensi dan teras *flattening* secara radial

	Referensi	Flattening-1	Flattening-2	Flattening-3
k_{eff}	1,05651	1,04433	1,01587	1,01373
<i>Excess reactivity</i> (%)	5,35	4,25	1,56	1,36
<i>Max power density</i> (watt/cc)	2,25984	1,83698	1,99627	1,79664
<i>Average power density</i> (watt/cc)	1,30177	1,14306	1,24531	1,19734
<i>Power peaking factor</i>	1,73598	1,60708	1,60303	1,50053

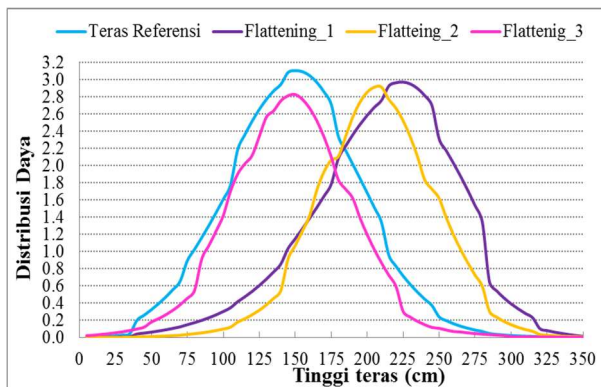
bahan bakar sejenis dengan fraksi *fuel* berbeda yang diletakkan di bagian dalam (*inner*) dan di bagian luar (*outer*) teras sebagaimana disajikan pada Gambar 5. Parameter desain yang digunakan sama, dimana kedua bagian (*inner* dan *outer*) dibagi menjadi 10 region secara aksial sesuai dengan strategi *modified CANDLE* (Su'ud & Sekimoto, 2013) (Su'ud, Ilham, Widiawati, & Sekimoto 2018).

Terlihat bahwa nilai k_{eff} dan *excess reactivity* semakin menurun setelah dilakukan optimasi teras dengan berbagai strategi. Strategi pada desain teras *flattening-3* merupakan strategi optimasi terbaik karena memiliki nilai k_{eff} dan *excess reactivity* terkecil yang berarti bahwa teras dalam kondisi paling

kritis. Setelah dilakukan optimasi terlihat bahwa terjadi penurunan nilai k_{eff} , *excess*, dan distribusi daya dalam arah radial mengalami penurunan nilai *power peaking* (Tabel 6).



Gambar 6 Distribusi daya dalam arah radial pada teras referensi dan teras *flattening*



Gambar 7 Distribusi daya dalam arah axial pada teras referensi dan teras flattening

Gambar 6 menampilkan distribusi daya arah radial, terlihat adanya pemerataan daya pada teras *Flattening-3*. Sedangkan distribusi daya dalam arah axial hanya mengalami sedikit penurunan nilai rapat daya maksimum (ϕ_{max}) yang dapat dilihat pada Gambar 7, hal ini disebabkan oleh volume teras reaktor yang dibagi rata searah axial.

KESIMPULAN

Teras reaktor cepat yang berukuran tinggi 350 cm dan diameter 240 cm mencapai kondisi kritis dengan k_{eff} 1,05 dan *excess reactivity* 5,3% dengan periode pengisian ulang bahan bakar selama 10 tahun, serta *power peaking* arah radial 1,73. Setelah dilakukan optimasi dengan pemerataan daya yaitu membagi teras menjadi 2 bagian dengan fraksi bahan bakar 60% untuk bagian *inner* dengan tebal 80 cm dan fraksi bahan bakar 65% untuk bagian *outer* dengan tebal 40 cm diperoleh penurunan nilai k_{eff} 1,013 dan *excess reactivity* 1,3% serta *power peaking* arah radial 1,5.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sampaikan terima kasih kepada pihak Universitas Sriwijaya yang telah mendanai penelitian ini melalui skema penelitian Unggulan Kompetitif tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

Ariani, M., Su'ud, Z., Monado, F., & Waris, A.

- (2013). Optimization of Small Long Life Gas Cooled Fast Reactors with Natural Uranium as Fuel Cycle Input. *Applied Mechanics and Materials*, 260-261, 307-311.
- Duderstadt, J., & Hamilton. (1976). *Nuclear Reactor Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Kuntoro, I. (2018). *Keselamatan Reaktor Nuklir*. Jakarta: BATAN.
- 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, 501-506.
- Okumura, K. (2007). *Introduction of SRAC for Reactor Physics Analyses*. Japan: JAEA.
- Riska, Fitriyani, D., & Irka, F. H. (2016). Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Unand*, 5(1), 28-34.
- Sekimoto, H. (2001). The New Burnup Startegy. *Nuclear Science and Engineering*, 139, 306-317.
- Stacey, W.M. (2007). *Nuclear Reactor Physics*. Willey-VCH: USA.
- Surbakti & Purwadi. (2017). Karakteristik Reaktivitas Teras Kerja RSG-Gas Selama 30 Tahun Beroperasi. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 07.
- Su'ud, Z., Ilham, M., Widiawati, N., & Sekimoto, H. (2018). Modified CANDLE Burnup Calculation System, Its Evolution, and Future Development. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1090 012006.
- 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.
- Zweifel, P.F. (1973). *Reactor Physics*. McGraw-Hill : USA.