

## 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*

Menik Ariani<sup>1\*)</sup>, Zaki Su'ud<sup>2)</sup>, Fiber Monado<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Fisika, Universitas Sriwijaya

<sup>2)</sup>Jurusan Fisika, Institut Teknologi Bandung

\*Email: menikariani@gmail.com

#### ABSTRACT

This article presents the conceptual design of gas-cooled fast reactor (helium), the small size of the long-lived 600 MWth. Early stages of the design is to determine the geometry of the terrace, the value of the volume fraction and the mass fraction of fuel, cladding and coolant structure to calculate the parameters of reactivity, burnup, power distribution and density changes nuclides U238 and Pu239. The calculation is done using SRAC-CITATION code. SRAC code with JENDL-3.2 Data nuclides produced macroscopic cross section values for the eight energy group. Multi-group numerical solution of diffusion equations for 2-D geometry terrace RZ performed by CITATION code. The study results showed that the scheme Modified CANDLE, thermal power output is 600 MWth, with a fuel cycle for 10 years. This reactor has the advantage of requiring only the input of natural uranium in the fuel cycle, without the need for enrichment processes that affect the economic value.

**Keywords** : Reactor, natural uranium, modified candle, burnup

#### PENDAHULUAN

Energi nuklir merupakan sumber energi terbesar yang bebas dari emisi. PLTN yaitu pembangkit listrik tenaga nuklir tidak menghasilkan polusi udara yang tidak dapat dikendalikan seperti belerang dan partikel-partikel penghasil gas rumah kaca. Penggunaan energi nuklir sebagai pengganti sumber energi lain membantu untuk menjaga udara bersih, melestarikan iklim bumi, menghindari pembentukan ozon di tingkat dasar dan mencegah hujan asam. Di sisi lain uranium alam tetap menjadi pilihan yang menarik untuk reaktor saat ini dan yang akan datang, dengan berbagai alasan. Bahan bakar ini sederhana, hanya terdiri dari tujuh komponen dasar, dan dapat dengan mudah diproduksi di banyak negara termasuk Indonesia.

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir mendapat pertimbangan untuk menjadi salah satu sumber energi listrik alternatif di Indonesia. Energi nuklir memiliki keunggulan dari kepadatan energinya serta biaya operasinya yang relatif murah dibandingkan dengan sistem-sistem energi lainnya terutama energi fosil.

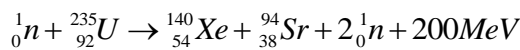
Teknologi reaktor nuklir kini sudah semakin maju, bahkan reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dengan konsep CANDLE selain akan membuat harga listrik menjadi sangat murah juga memiliki tingkat keselamatan sangat tinggi.

Reaktor CANDLE (*Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy producing reactor*) adalah sebuah konsep reaktor nuklir dimana proses pembakaran bahan bakar dapat dianalogikan dengan terbakarnya lilin [3,4]. Daerah pembakaran bergerak sepanjang sumbu reaktor dengan kecepatan sebanding dengan keluaran energi. Distribusi rapat atom, fluks neutron, dan rapat daya dalam daerah pembakaran tersebut tidak berubah dalam proses penjalaran tersebut. Reaktor ini tidak memerlukan proses pengayaan uranium yang memakan modal sangat besar, tetapi langsung dipasang oleh uranium alam. Reaktor ini juga mampu membakar limbah nuklir untuk menambah pasokan energinya. Selama ini limbah radioaktif menjadi sesuatu yang dikhawatirkan oleh dunia karena selain membahayakan lingkungan juga bisa menjadi bahan baku senjata nuklir.

*Gas-cooled Fast Reactor* (GFR) adalah reaktor cepat Generasi IV yang sedang dalam tahap pengembangan dan baru akan dikomersialkan setelah tahun 2030. Fitur GFR berupa pendingin helium spektrum cepat dan perputaran bahan bakar tertutup. Temperatur outlet yang tinggi dari pendingin helium memungkinkan untuk menghasilkan listrik, hidrogen atau proses panas lain dengan efisiensi tinggi. Reaktor cepat berpendingin helium pada penelitian ini menerapkan strategi CANDLE yang telah dimodifikasi yaitu *Modified CANDLE burnup* sehingga hanya memerlukan bahan bakar uranium alam dan limbah nuklir (Plutonium) (Sekimoto & Yan, 2007; Su'ud & Sekimoto, 2010; Ariani dkk, 2012; Su'ud & Sekimoto, 2013).

### TEORI

Prinsip kerja reaktor nuklir mirip dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada sumber energi dan jenis bahan bakar. Sumber energi pada pembangkit listrik konvensional berasal dari proses pembakaran secara kimia bahan bakar fosil, sedangkan sumber energi reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi nuklir pada material-material fisil. Reaksi fisi nuklir termasuk reaksi eksoterm yang menghasilkan energi, contohnya yaitu (Duderstadt & Hamilton, 1976):



Deskripsi fisis keadaan neutron (populasi, distribusi, energi, kerapatan dan fluks neutron) pada teras reaktor dinyatakan oleh persamaan transport. Penyederhanaan melalui aproksimasi difusi menghasilkan persamaan difusi multigrup (Duderstadt & Hamilton, 1976):

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g(\vec{r}, t)}{\partial t} - \bar{\nabla} \cdot D_g(\vec{r}) \bar{\nabla} \phi_g(\vec{r}, t) + \sum_{g'} \bar{\Sigma}_{g'}(\vec{r}) \phi_{g'}(\vec{r}, t) = \sum_{g'=1}^G \sum_{s_g'g'} \bar{\Sigma}_{s_g'g'}(\vec{r}) \phi_{g'}(\vec{r}, t) + \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g'=1}^G v_{g'} \sum_{f_g'} \bar{\Sigma}_{f_g'}(\vec{r}) \phi_{g'}(\vec{r}, t) \quad (1)$$

Dengan *cross section* total:

$$\sum_{sg} \bar{\Sigma}(\vec{r}) + \sum_{sg} \bar{\Sigma}(\vec{r}) = \sum_{sg} \bar{\Sigma}(\vec{r})$$

Selama masa pengoperasian reaktor, komposisi bahan bakar akan senantiasa

berubah karena isotop-isotop fisil akan terkonsumsi (berkurang) dan dihasilkan produk fisi. Persamaan *burnup* yang menyatakan hal ini yaitu:

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - \left[ \sum_g \sigma_{Ag}^A \phi_g \right] N_A + \lambda_B N_B + \left[ \sum_g \sigma_{\lambda g}^C \phi_g \right] N_C \quad (2)$$

Suku  $\lambda_A N_A$  adalah bagian yang hilang karena peluruhan radioaktif, sedangkan

$\left[ \sum_g \sigma_{Ag}^A \phi_g \right] N_A$  adalah bagian yang hilang

karena tangkapan neutron,  $\lambda_B N_B$  merupakan nuklida tambahan nuklida A akibat peluruhan

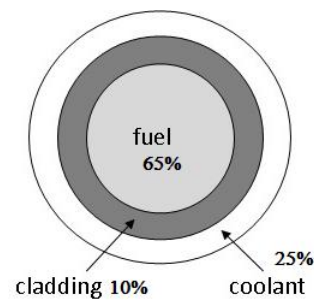
B menjadi A dan  $\left[ \sum_g \sigma_{\lambda g}^C \phi_g \right] N_C$  adalah

perubahan C menjadi A melalui tangkapan neutron.

Fluks neutron dan penampang lintang dari hasil perhitungan difusi multigrup digunakan untuk analisis *burnup*, selanjutnya perubahan komposisi nuklida hasil dari persamaan *burnup* harus dimasukkan kembali ke dalam persamaan difusi.

### DESAIN DAN PERHITUNGAN

Strategi burnup Modified CANDLE pada teras reaktor berpendingin helium yang menghasilkan daya termal 600 MWth. Parameter desain teras reaktor disajikan pada Tabel 1. Geometri sel bahan bakar yang digunakan pada perhitungan desain reaktor dalam penelitian ini yaitu bentuk silinder (*cylindrical cell*). Penampang lintangnya disajikan pada seperti pada Gambar 1.



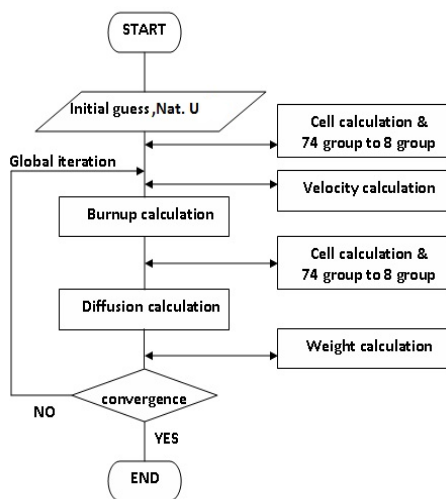
Gambar 1. Geometri dan ukuran sel bahan bakar

Ukuran *fuel pellet*, *cladding* dan *coolant* berkaitan dengan fraksi volume (*volume fraction*).

Tabel 1. Parameter desain reaktor

Parameter	Nilai / deskripsi
Daya	600 MWth
Material bahan bakar	Nat. U/Pu ( <i>Nitride</i> )
Material <i>cladding</i>	<i>Stainless steel</i>
Material pendingin	helium
Fraksi ( <i>fuel:cladding:coolant</i> )	55% :10% 35%
Diameter <i>pitch</i>	1.4 cm
Tinggi teras aktif	350 cm
Diameter teras aktif	240 cm
Siklus bahan bakar	10 tahun
<i>burnup</i> material bahan bakar	100 tahun

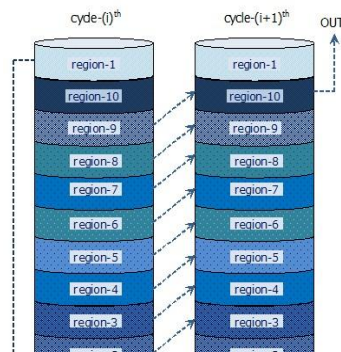
Analisis neutronik dilakukan melalui perhitungan dan penyelesaian persamaan difusi 2-D multigrup (8 grup) pada geometri R-Z, yang terkopel dengan persamaan *burnup* yang meliputi 85 nuklida. *Group constant* diperoleh dari kode SRAC dengan library JENDL-3.2 [2]. Diagram alir perhitungan disajikan pada Gambar 2. Survey parameter untuk analisa hasil desain meliputi: *k-effective* selama 1 siklus, *k-infinite*, level *burnup*, distribusi daya arah aksial serta distribusi densitas U-238 & Pu-239 selama *burnup* bahan bakar 100 tahun.



Gambar 2. Diagram alir perhitungan

Pembagian komposisi bahan bakar pada teras diatur dengan strategi Modified CANDLE (Gambar 3). Teras dibagi menjadi 10 bagian dengan volume sama. Pada kondisi awal,

Region-1 berisi uranium alam (*fresh*). Setelah 1 siklus (10 th *burnup*) maka bahan bakar dari Region-1 ini dipindahkan ke Region-2, sedangkan bahan bakar di Region-2 dipindahkan ke Region-3, dan seterusnya berlaku: bahan bakar di Region-*i* dipindahkan ke Region (*i+1*). Region terakhir yaitu Region-10 dikeluarkan dari teras.

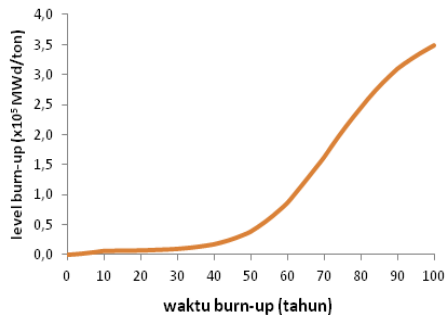


Gbr. 3. Skema Modified CANDLE burnup

## HASIL

Hasil analisa neutronik untuk reaktor cepat berpendingin helium yang menerapkan strategi CANDLE yang dimodifikasi disajikan sebagai berikut. Pada tingkat perhitungan sel, bahan bakar dibakar selama 100 tahun, dengan interval pengambilan data setiap 2 tahun. Perhitungan ini menghasilkan beberapa survey parameter neutronik seperti level *burnup*, faktor multiplikasi tak hingga, distribusi densitas nuklida serta data penampang lintang makroskopik dari sekumpulan nuklida yang kemudian digunakan pada tingkat perhitungan teras reaktor.

*Burnup* didefinisikan sebagai total energi yang dilepaskan per unit massa bahan bakar sebagai hasil pembakaran bahan bakar. Satuan yang digunakan *megawatt days per metric ton* (MWd/MT) bahan bakar, yaitu jumlah berat yang diperlukan untuk menghasilkan daya per hari. Efisiensi *burnup* juga dapat dinyatakan dalam satuan derajat pelepasan bahan bakar (*discharge burnup*) dalam satuan %HM (*heavy metal*).

Gambar 4. Level *burnup* sepanjang sejarah burnup

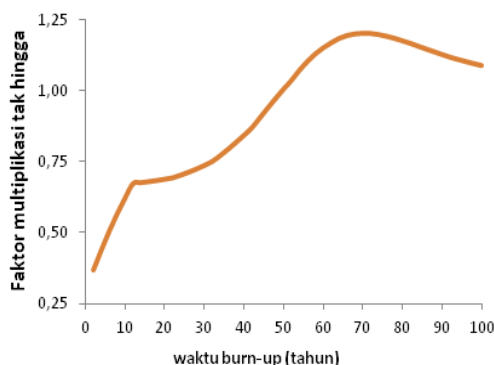
Gambar 4 menunjukkan perubahan level *burnup* sepanjang sejarah *burnup* bahan bakar. Grafik naik secara signifikan, sebanding dengan jumlah/bobot uranium yang diperlukan untuk menghasilkan daya. Jumlah bahan bakar yang diperlukan sepanjang umur reaktor ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai rata-rata *burnup*

Parameter	U-65%
Average <i>burnup</i> (GWd/ton)	107,1
Peak <i>burnup</i> (GWd/ton)	348,9
Average <i>Burnup</i> (%HM)	11,4
Peak <i>burnup</i> (%HM)	37,2

Tabel 2 menyatakan nilai *burnup* rata-rata sepanjang sejarah pembakaran material di dalam teras reaktor yaitu 100 tahun, yang dinyatakan dalam satuan GWd/ton dan %HM.

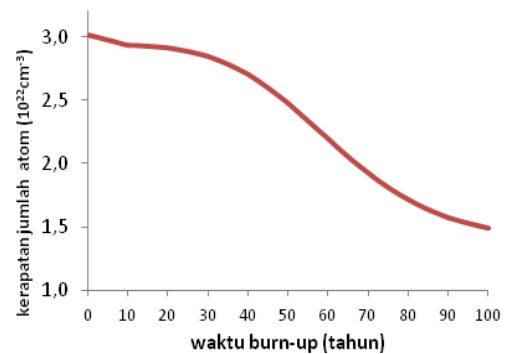
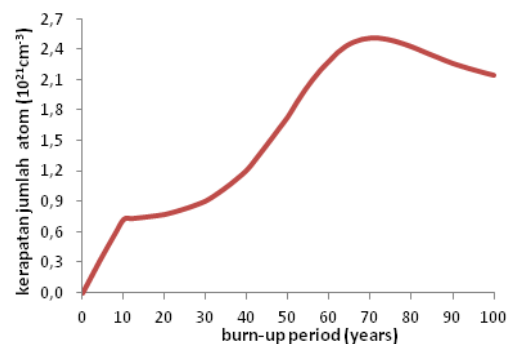
Gambar 5 menunjukkan survey parameter berikutnya: *k-infinite*, yaitu faktor multiplikasi tak hingga. Konstanta ini akan menunjukkan ukuran kenaikan atau penurunan fluks neutron, yang dihitung tanpa adanya faktor kebocoran ke luar teras.



Gambar 5. Nilai faktor multiplikasi tak hingga

Disini terjadi perubahan bahan bakar dari uranium-238 yang belum bisa secara efektif

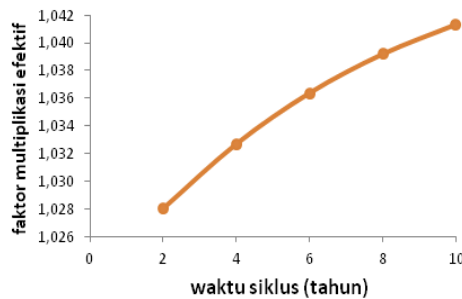
menghasilkan daya besar, menuju bahan bakar utama yang mengandung cukup bahan *fisile* yaitu plutonium-239 sehingga dapat menghasilkan daya yang cukup besar. Profil grafik perubahan  $k_{\infty}$  juga sesuai dengan grafik perubahan densitas Pu-239. Dalam grafik terlihat bahwa dalam waktu *burnup* 10 tahun pertama terjadi kenaikan nilai faktor multiplikasi tak hingga cukup tajam. Hal ini berkaitan dengan skema *burnup* pada Gambar 3, dimana *region-1* yang berisi uranium alam diletakkan di sebelah *region-10* (berisi material *burnup* 90-100 th) yang telah memiliki material fisi cukup banyak. uranium yang mengalami fisi cukup cepat menghasilkan jumlah neutron lebih banyak sehingga nilai  $k_{\infty}$  naik secara cepat.

Gambar 6. Kerapatan atom u-238 selama *burnup*Gambar 7. Kerapatan Pu-239 sepanjang *burnup*

Selama proses *burnup*, sebagian dari uranium-238 sebagai bahan bakar utama yang bersifat fertil berubah menjadi unsur lain akibat fisi maupun serapan neutron, yaitu produk fisi seperti plutonium-239, plutonium-240, plutonium-241, plutonium-242, neptunium-237, americium-241. Proses *burnup* dengan strategi *Modified CANDLE* menghasilkan

produk fisi (*Fission Product*) dengan konsentrasi yang cukup tinggi. Beberapa atom mengalami perubahan densitas yang cukup signifikan, seperti uranium-238 dan plutonium-239, yang disajikan pada Gambar 6 dan 7. Poses akumulasi plutonium-239 sepanjang sejarah *burnup*nya dalam reaktor yaitu 100 tahun, berkorelasi dengan proses pengurangan uranium-238 yang menghasilkan Plutonium-239.

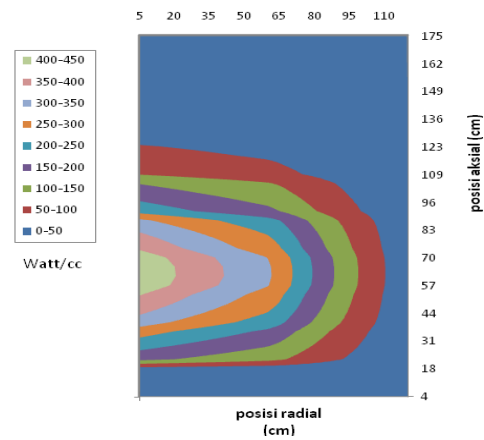
Perhitungan pada teras reaktor dilakukan dengan menyelesaikan persamaan difusi multigrup yang terkopel dengan persamaan *burnup*. Parameter yang dihasilkan yaitu faktor multiplikasi efektif dan distribusi daya pada arah radial dan aksial



Gambar 8. Nilai faktor multiplikasi efektif

Gambar 8 menunjukkan perubahan nilai faktor multiplikasi efektif sepanjang 1 siklus bahan bakar. Terlihat bahwa reaktor dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar karena nilai *k-eff* selalu di atas 1.0. Nilai *k-eff* > 1 disebut dengan keadaan superkritis, dimana populasi neutron terus bertambah. Selanjutnya tiap 10 tahun pengisian ulang bahan bakar dilakukan dengan input uranium alam.

Profil distribusi daya disajikan pada Gambar 9. Nilai densitas daya tertinggi di sini mencapai 441 watt/cm<sup>3</sup>. Nilai maksimum ini memerlukan pendingin berkecepatan tinggi untuk menghilangkan panas pada pin-pin bahan bakar.



Gambar 9. Distribusi daya arah radial-aksial

## KESIMPULAN

Konsep CANDLE yang dimodifikasi dapat diterapkan pada reaktor cepat berpendingin helium berdaya termal kecil (600 MWth), dengan sejarah *burnup* bahan bakar selama 100 tahun. Reaktor ini memiliki kelebihan secara ekonomis, karena dapat terus beroperasi dengan hanya input uranium alam di setiap awal siklus pengisian bahan bakar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ariani, M., Su'ud, Z., et.al, 2012, *Optimization of Small Long Life Gas Cooled Fast Reactors with Natural Uranium as Fuel Cycle Input*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 260-261, p.307
- Duderstadt, J.J. & Hamilton, L.J. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons, Inc.
- Okumura, K. Kaneko and K. Tsuchihashi. 2002. SRAC(Ver.2002): *The Comprehensive Neutronics Calculation Code System*, JAERI report Japan Atomic Energy Research Institute, Japan.
- Sekimoto, H & Yan,M.Y. 2007. *Design Research of Small Long Life CANDLE Fast Reactor*, Annals of Nuclear Energy 35, p. 18-36
- Su'ud, Z.& Sekimoto, H. 2010. *Design Study of Long-life Pb-Bi Cooled Fast Reactor with Natural uranium as Fuel Cycle Input using Modified CANDLE Burnup Scheme*, IJNEST Vol 5, No.4, p.347-358
- Su'ud, Z and 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 Vol 54, p.56-66