

Perhitungan Neutronik Teras Homogen dari *High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)* dengan Bahan Bakar Uranium Nitrida

Ratna Dewi Syarifah*, Indah Rosidah Maemunah, dan Zaki Su'ud

Abstrak

HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) adalah salah satu reaktor nuklir berpendingin gas yang menawarkan keuntungan dalam produksi hidrogen, ramah lingkungan karena tidak menghasilkan karbondioksida, sulfur, dan nitrogen oksida yang mencemari lingkungan. *HTGR* didesain dengan menggunakan bahan bakar keramik yang di suport oleh *inherent safety* dari *HTGR*. Bahan bakarnya berbentuk *tristruktural-isotropik (TRISO)*. *TRISO* terdiri dari kernel bahan bakar terbentuk dari *UOX (Uranium Oxide)* di tengah-tengahnya. Pada penelitian ini dilakukan analisis perhitungan neutronik teras homogen *HTGR* dengan bahan bakar uranium nitride (*UN*). Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk *block/prismatic TRISO*. Desain reaktor yang diteliti berdaya 30MWt dengan menggunakan *hexagonal cell* untuk geometri pin bahan bakarnya. Perhitungan neutroniknya dihitung dengan menggunakan kode *SRAC (Standard thermal reactor analysis code)* yang dikembangkan oleh *JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute)* dan *JENDL 3.2* sebagai database nuklirnya. *SRAC* melakukan perhitungan dari pin sel bahan bakar, kemudian setelah data yang didapatkan sudah homogen, akan dilanjutkan perhitungan teras bahan bakar. *Burn-up* dilakukan selama 660 hari pada variasi enrichment bahan bakar 2%, 3%, dan 4%, dengan dimensi teras R , θ , dan Z , dan menggunakan teras yang homogen. Dari hasil perhitungan, k -eff terbaik yang didapatkan pada enrichment 4% dengan nilai k -eff 1,0705 di beginning of life nya. Pada distribusi daya arah aksial dan radial masih terdapat *peaking power* sehingga masih dibutuhkan pemerataan daya pada penelitian selanjutnya.

Kata-kata kunci: *HTGR, uranium nitrida, k-eff, prismatic, triso, burn up*

Pendahuluan

Penemuan sumber energi nuklir memiliki banyak perkembangan dengan seiring bertambahnya kebutuhan manusia terhadap energi. Reaktor nuklir semakin berkembang dari 1950an sampai sekarang, dari mulai Generasi I sampai ke Generasi terkini yaitu Generasi IV. Reaktor nuklir semakin maju dengan menjawab tantangan terkait energi yang dapat mengurangi polusi global, mudah didistribusikan di seluruh dunia, serta memiliki tingkat keselamatan yang tinggi dan ekonomis. Reaktor nuklir generasi IV saat ini memiliki banyak perhatian untuk menjawab spesifikasi energi di atas. *Supercritical Water Reactor (SCWR)*, *Very High Temperature Reactor (VHTR)*, *Molten Salt Reactor (MSR)* dan *High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)* adalah beberapa contoh reaktor thermal generasi IV. Sedangkan *Gas Cooled Fast Reactor (GCFR)*, *Sodium Cooled Fast Reactor (SFR)*, dan *Lead Cooled Fast Reactor (LFR)* adalah contoh-contoh reaktor cepatnya.

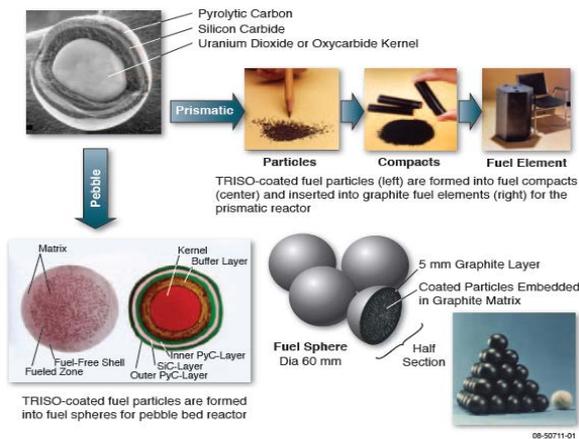
HTGR adalah salah satu reaktor Generasi IV yang banyak diminati oleh dunia, karena dapat memproduksi hidrogen dan dapat dioperasikan dalam suhu tinggi. Pada penelitian ini dijelaskan tentang analisis neutronik *HTGR* dengan menggunakan bahan bakar uranium nitrida.

Uranium nitrida memiliki titik leleh yang tinggi sehingga cocok dipakai untuk bahan bakar *HTGR* yang beroperasi dalam suhu tinggi.

HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) adalah salah satu reaktor nuklir yang menawarkan keuntungan dalam produksi hidrogen, ramah lingkungan karena tidak menghasilkan karbondioksida, sulfur, dan nitrogen oksida yang mencemari lingkungan. *HTGR* didesain dengan menggunakan bahan bakar keramik yang di suport oleh *inherent safety* dari *HTGR*. Bentuk bahan bakarnya disebut dengan *TRISO* dan di produksi di US dan Jerman pada tahun 1980an.

Bahan bakar *tristruktural-isotropik (TRISO)* adalah jenis partikel bahan bakar mikro. *TRISO* terdiri dari kernel bahan bakar terbentuk dari *UOX (Uranium Oxide)* di tengah-tengahnya. Lalu lapisan yang terdiri dari empat layer dari tiga material isotropik. Keempat lapisan adalah lapisan berpori penyangga yang terbuat dari karbon, diikuti oleh lapisan dalam padat karbon pirolitik (*PyC*), diikuti oleh lapisan keramik *SiC* untuk mempertahankan produk fisi pada temperatur tinggi dan memberikan partikel *TRISO* integritas struktural, diikuti oleh lapisan luar padat *PyC*.

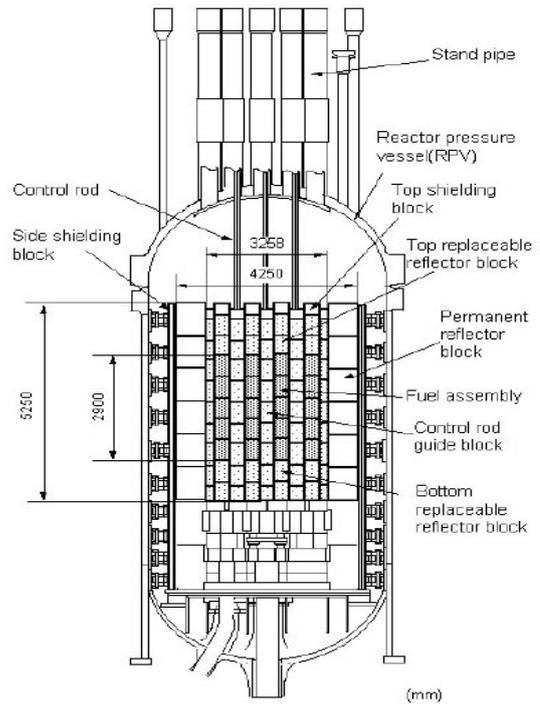
HTGR juga dapat dikategorikan berdasarkan bentuk susunan bahan bakar yang digunakan yaitu tipe *block/prismatic* dan *pebble bed*. Pada tipe *block*, partikel TRISO dijadikan dalam bentuk *compact* dan diletakkan di dalam block grafit berbentuk heksagonal. Lain dengan tipe *pebble bed*, partikel TRISO dijadikan bentuk *pebble* dan diletakkan di teras. Perbedaan dan karakter lain dari HTGR dapat dilihat di gambar 1. Pada penelitian ini, digunakan TRISO dengan tipe *prismatic/block* seperti yang digunakan pada reaktor HTR30 (salah satu jenis HTGR yang dikembangkan oleh Jepang) [3], [4], [7].



Gambar 1. Tipe bahan bahan bakar TRISO yang berbentuk *pebble bed* dan *prismatic/block* [8]

Desain yang dikembangkan mirip dengan HTR 30, yaitu reaktor bermoderat grafit dan berpendingin gas helium dengan elemen-elemen bahan bakar prismatic berupa blok-blok berbentuk heksagonal berukuran tinggi 580 mm dan lebar melintang (sisi ke sisi nya berhadapan) 360 mm. Teras aktif keseluruhan berukuran tinggi 2,9 m dan berdiameter 2,3 itu terdiri kolom bahan bakar yang dikelilingi oleh kolom-kolom perisai grafit dapat ganti, kolom-kolom batang kendali dan kolom-kolom uji iradiasi. Perisai lestari mengelilingi perisai grafit dapat ganti dan juga kedudukannya oleh mekanisme restraint teras, seperti ditunjukkan pada gambar 2.

Keseluruhan komponen teras aktif tersusun secara silinder. Satu kolom dalam arah aksial tersusun dari sembilan komponen teras. Dua belas kolom perisai grafit dapat ganti ditempatkan bersebelahan dengan sembilan batang kendali dan tiga kolom uji radiasi, keseluruhannya dikelilingi blok perisai lestari. Setiap kolom bahan bakar terdiri dua blok perisai atas, lima perangkat elemen bakar, dan dua blok perisai bawah.



Gambar 2. Penampang vertikal teras HTR30 [2]

Desain konsep

Reaktor sendiri terdiri dari komponen teras, sistem pendingin, dan komponen reaktor internal lainnya. Tabel di bawah ini merupakan spesifikasi desain reaktor yang dipakai:

Tabel 1. Desain parameter HTGR yang dikembangkan

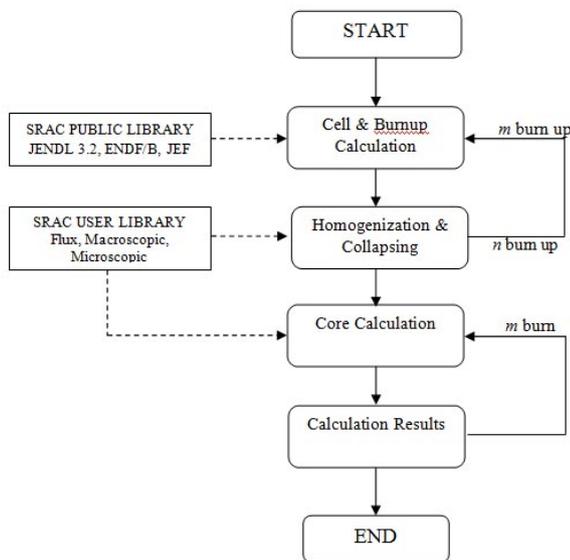
Parameter	Spesifikasi
Daya	30 MWt
Suhu pendingin (<i>coolant</i>) keluar	950 °C
Suhu pendingin (<i>coolant</i>) kedalam	395 °C
Tekanan pimer pendingin	4 Mpa
Material pendingin	Gas Helium
Fuel pin geometri	Hexagonal cell
Core geometri	3-D Cylinder
Fuel	Uranium Nitride (UN)
Tipe fuel	Prismatic

Metode Perhitungan

Perhitungan neutronik merupakan bagian terpenting untuk menentukan seberapa baik reaktor yang telah didesain, yang perhitungannya mencakup distribusi fluks, nilai kekritisan dan proses pembakaran reaksi fisi dalam reaktor tersebut. Perhitungan neutronik ini

menggunakan program SRAC sebagai program nuklir yang memiliki kemampuan dalam perhitungan neutronik yang komprehensif.

SRAC (*Standard thermal Reactor Analysis Code*) adalah kode yang dapat diaplikasikan untuk menganalisis neutronik dari berbagai jenis reaktor. SRAC system di desain dan dikembangkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*), yang sekarang disebut dengan JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*), untuk perhitungan neutronik berbagai thermal reaktor. Itu berarti SRAC dapat menangani energi rendah secara akurat. Perhitungan SRAC berdasar pada nilai-nilai *cross section* dari database nuklir seperti JENDL, ENDF, JEFF, dsb [5]. Alur perhitungannya ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Alur perhitungan SRAC.

Hasil dan diskusi

Dalam pendesainan reaktor ini pertama kali dilakukan perhitungan densitas untuk masing-masing nuklida dari komposisi material teras reaktor, meliputi komposisi kompak bahan bakar (kernel, lapisan mantel partikel bahan bakar, matrik), homogenisasi kompak bahan bakar, racun dapat bakar, komposisi batang bahan bakar (*graphite sleeve*), *block hexagonal* bahan bakar, *block* perisai dapat ganti, *block* grafit bahan bakar (*dummy block*) dan *block* perisai lestari, serta blok pandu batang kendali.

Pengaturan material di dalam teras reaktor memegang peranan penting. Di penelitian ini hanya menggunakan satu jenis bahan bakar dengan *enrichment* yang sama dalam sekali perhitungan *k-eff*. Variasi yang digunakan adalah variasi *enrichment* bahan bakar 2%, 3% dan 4%.

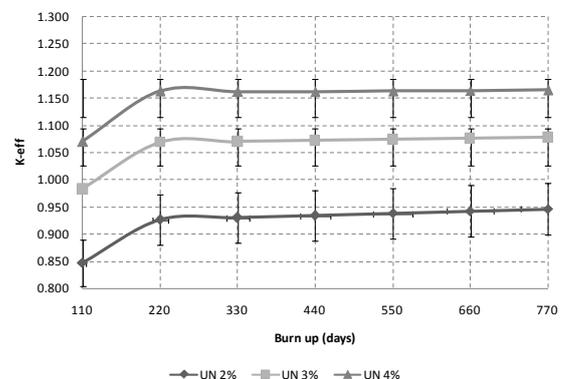
HTGR adalah reaktor yang didesain sebagai reaktor termal yang kritis, maka faktor

multiplikasi efektif haruslah lebih besar dari 1 ($k\text{-eff} > 1$) dan demikian seterusnya selama reaktor beroperasi. $K\text{-eff} > 1$ terjadi ketika jumlah neutron pada suatu generasi lebih banyak dari jumlah neutron pada generasi sebelumnya. Neutron-neutron akan tercipta akibat dari reaksi fisi, dan akan bergerak di dalam reaktor hingga pada akhirnya berkurang atau musnah karena proses *leakage*, *capture* dan *scattering* yang menyebabkan turunnya harga *k-eff*. Proses ini akan berlangsung sesuai masa operasi reaktor yang telah ditentukan.

Tabel 2. Nilai *k-eff* untuk variasi *enrichment* 2%, 3% dan 4%

Burn up time (days)	Enrichment (%)		
	2	3	4
110	0.8468358	0.9831134	1.0705760
220	0.9260527	1.0699860	1.1631620
330	0.9296910	1.0705270	1.1622340
440	0.9338185	1.0720370	1.1624690
550	0.9380500	1.0738570	1.1631790
660	0.9422912	1.0757760	1.1640830
770	0.9465206	1.0777280	1.1650640

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan (dapat dilihat pada tabel 2), nilai $k\text{-eff} > 1$ terjadi pada *enrichment* (pengayaan) bahan bakar 4% selama 770 hari dengan nilai $k\text{-eff}$ 1,0705 di *beginning of life* nya. Data dari hasil yang diperoleh juga di sajikan dalam bentuk grafik (gambar 4). Gambar 4 menunjukkan bahwa $k\text{-eff}$ mula-mula naik pada awal diaktifkan, yaitu pada waktu burn-up 110 hari, dan cenderung stabil setelahnya (waktu burn-up 220 sampai 770). Hal ini disebabkan karena masih banyak nya bahan bakar fisi yang ada di dalam reaktor, sehingga terjadi lonjakan nilai $k\text{-eff}$.

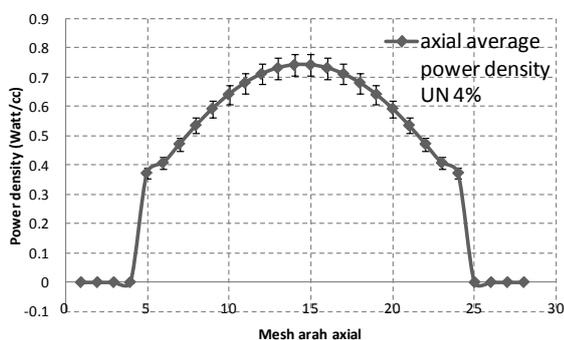


Gambar 4. Grafik faktor multiplikasi efektif (*k-eff*) teras reaktor untuk variasi daya 2%, 3% dan 4%

Untuk menjaga keselamatan reaktor, sangat penting mengontrol peningkatan suhu bahan bakar hal ini berarti terkait dengan pengaturan distribusi daya (*power distribution*) yang tentunya

tidak lepas dari pengaturan letak pengayaan bahan bakar pada teras reaktor. Pada penelitian ini dikhususkan untuk perhitungan teras homogen karena masih merupakan studi awal. Gambar 5 menunjukkan distribusi daya rata-rata arah aksial teras reaktor pada awal diaktifkan (*beginning of life*) dengan 30 kolom bahan bakar.

Pada sebuah reaktor, distribusi daya paling baik adalah ketika dayanya sama disetiap titik di teras reaktor. Sedangkan pada gambar 5 dapat dilihat bahwa masih terdapat *peaking power*, sehingga dibutuhkan pemerataan daya dengan memperbanyak variasi bahan bakar pada teras, dengan melakukan perhitungan neutronik teras heterogen yang akan dilakukan pada penelitian selanjutnya.



Gambar 5. Grafik distribusi daya arah aksial teras 30 kolom bahan bakar

Kesimpulan

HTGR adalah reaktor yang menawarkan keuntungan dalam produksi hidrogen dan dapat dioperasikan pada suhu yang tinggi. Pada penelitian ini *burn-up* dilakukan selama 660 hari pada variasi enrichment bahan bakar 2%, 3%, dan 4%, dengan dimensi teras R, θ , dan Z, dan menggunakan teras yang homogen. Dari hasil perhitungan, *k-eff* terbaik yang didapatkan pada *enrichment* 4% dengan nilai *k-eff* 1,0705 di *beginning of life* nya. Pada distribusi daya arah aksial dan radial masih terdapat *peaking power* sehingga masih dibutuhkan pemerataan daya pada penelitian selanjutnya.

Referensi

[1] Duderstadt, JJ. Nuclear Reactor Analysis. 1964. Canada: John Wiley & Sons

[2] Japan Atomic Energy Research Institute, et al, "High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) Reactor Physics Benchmark", URL http://www.ngnpalliance.org/images/general_files/HTGR%20%20page%20individual%20040611.pdf, [accessed 3 August 2015]

[3] Masuro Ogawa, and Tetsuo Nishihara, "Present status of energy in Japan and

HTTR project", Nuclear Engineering and Design 233, 5-10 (2004)

[4] Nozomu Fujimoto, Naoki Nojiri, Hiroei Ando, and Kiyonobu Yamashita, "Nuclear design", Nuclear Engineering and Design 233, 23-36 (2004)

[5] Okumura, K. 2002. SRAC2002: The comprehensive Neutronic Calculation Code System. Japan: JAEA

[6] Stacey. 2003. Nuclear Reactor Physics. Canada: John Wiley and Sons

[7] S. Shiozawa, S. Fujikawa, T. Iyoku, K. Kunitomi, and Y. Tachibana, "Overview of HTTR design features", Nuclear Engineering and Design 233, 11-21 (2004)

[8] US Department of Energy, "The High Temperature Gas Cooled Reactor Next Generation Nuclear Energy, safe, clean, and sustainable energy for the future", URL <http://www.smr.inl.gov/> [accessed 3 August 2015]

Ratna Dewi Syarifah*

Nuclear Physics and Biophysics Research Division
Institut Teknologi Bandung
syarifah.physics@gmail.com
ratnadewi.syarifah@s.itb.ac.id

Indah Rosidah Maemunah

Nuclear Physics and Biophysics Research Division
Institut Teknologi Bandung
indah.maymunah@gmail.com

Zaki Su'ud

Nuclear Physics and Biophysics Research Division
Institut Teknologi Bandung
szaki@fi.itb.ac.id

*Corresponding author