
ANALISIS INVENTORI REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL JENIS REAKTOR GAS TEMPERATUR TINGGI

Sri Kuntjoro, Pande Made Udiyani

¹Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir-BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: srikuncoro@batan.go.id

(Naskah diterima : 29-12-2015, Naskah direvisi: 18-01-2016, Naskah disetujui: 26-01-2016)

ABSTRAK

ANALISIS INVENTORI REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL JENIS REAKTOR GAS TEMPERATUR TINGGI. Berkaitan dengan rencana Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) untuk mengoperasikan reaktor eksperimental jenis Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT), maka diperlukan analisis keselamatan terhadap reaktor terutama yang berkaitan dengan issue lingkungan. Analisis sebaran radionuklida dari reaktor ke lingkungan pada kondisi operasi normal atau abnormal diawali dengan estimasi sumber radionuklida di teras reaktor (inventori teras) berdasarkan pada tipe, daya, dan operasi reaktor. Tujuan penelitian adalah melakukan analisis inventori teras untuk disain Reaktor Daya Eksperimental (RDE) jenis reaktor gas temperature tinggi berdaya 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt. Analisis dilakukan menggunakan program ORIGEN2 berbasis pustaka penampang lintang pada temperatur tinggi. Perhitungan diawali dengan membuat modifikasi beberapa parameter pustaka tampang lintang berdasarkan temperatur rata-rata teras sebesar 5700 °C dan dilanjutkan dengan melakukan perhitungan inventori reaktor untuk reaktor RDE berdaya 10 MWt. Parameter utama reaktor RDE 10 MWt yang digunakan dalam perhitungan sama dengan parameter utama reaktor HTR-10. Setelah inventori reaktor RDE 10 MWt diperoleh, dilakukan perbandingan dengan hasil dari peneliti terdahulu. Berdasarkan kesesuaian hasil yang didapat dilakukan desain untuk reaktor RDE 20MWt dan 30 MWt untuk memperoleh parameter utama reaktor tersebut berupa jumlah bahan bakar pebble bed di teras reaktor, tinggi dan diameter teras. Berdasarkan parameter utama teras dilakukan perhitungan inventori teras RDE 20 MWt dan 30 MWt dengan metode yang sama dengan metode perhitungan pada RDE 10 MWt. Hasil yang diperoleh adalah inventori terbesar untuk reaktor RDE 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt secara berurutan untuk kelompok Kr adalah sekitar 1,00E+15 Bq, 1,20E+16 Bq, 1,70E+16 Bq untuk kelompok I sebesar 6,50E+16 Bq, 1,20E+17 Bq, 1,60E+17 Bq dan untuk kelompok Cs sebesar 2,20E+16 Bq, 2,40E+16 Bq dan 2,60E+16 Bq. Inventori teras selanjutnya akan digunakan untuk menghitung suku sumber dari reaktor yang akan digunakan sebagai dasar untuk perhitungan sebaran radionuklida ke lingkungan.

Kata kunci: Inventori, RDE, daya 10 MWt, daya 20 MWt, daya 30 MWt.

ABSTRACT

THE ANALYSIS FOR INVENTORY OF EXPERIMENTAL REACTOR HIGH TEMPERATURE GAS REACTOR TYPE. *Relating to the plan of the National Nuclear Energy Agency (BATAN) to operate an experimental reactor of High Temperature Gas Reactors type (RGTT), it is necessary to reactor safety analysis, especially with regard to environmental issues. Analysis of the distribution of radionuclides from the reactor into the environment in normal or abnormal operating conditions starting with the estimated reactor inventory based on the type, power, and operation of the reactor. The purpose of research is to analyze inventory terrace for Experimental Power Reactor design (RDE) high temperature gas reactor type power 10 MWt, 20 MWt and 30 MWt. Analyses were performed using ORIGEN2 computer code with high temperatures cross-section library. Calculation begins with making modifications to some parameter of cross-section library based on the core average temperature of 570 °C and continued with calculations of reactor inventory due to RDE 10 MWt reactor power. The main parameters of the reactor 10 MWt RDE used in the calculation of the main parameters of the reactor similar to the HTR-10 reactor. After the reactor inventory 10 MWt RDE obtained, a comparison with the results of previous researchers. Based upon the suitability of the results, it make the design for the reactor RDE 20MWEt and 30 MWt to obtain the main parameters of the reactor in the form of the amount of fuel in the pebble bed reactor core, height and diameter of the terrace. Based on the main parameter or reactor obtained perform of calculation to get reactor inventory for RDE 20 MWT and 30 MWT with the same methods as the method of the RDE 10 MWt calculation. The results obtained are the largest inventory of reactor RDE 10 MWt, 20 MWt and 30 MWt sequentially are to Kr group are about 1,00E+15 Bq, 1,20E+16 Bq, 1,70E+16 Bq, for group I are 6,50E+16 Bq, 1,20E+17 Bq, 1,60E+17 Bq and for groups Cs are 2,20E+16 Bq, 2,40E+16 2,60E+16 Bq. Reactor inventory will then be used to calculate the reactor sourceterm and it will be used as the basis for calculating the distribution of radionuclides into the environment.*

Keywords: *Inventory, RDE, 10 MWt power, 20 MWt power, 30 MWt power.*

PENDAHULUAN

Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) berencana membangun reaktor daya eksperimental (RDE) untuk dapat melakukan eksperimen terkait dengan temperatur tinggi dan pemenuhan sebagian energi listrik untuk lingkungan kawasan PUSPIPTEK. Sehubungan dengan hal tersebut maka dipilih reaktor yang memiliki daya berkisar antara 10 MWt hingga 30 MWt bertipe reaktor gas temperatur tinggi (*High Temperatur Gas Reaktor/HTGR*). Reaktor tersebut akan dibangun di sebuah kawasan Puspiptek Serpong yang berada di Desa Setu, Kota Tangerang Selatan. Untuk membangun reaktor tersebut diperlukan berbagai izin dari instansi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) dan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) antara lain izin Lingkungan, Analisis Dampak Lingkungan (ANDAL), Program Evaluasi Tapak (PET), izin Tapak, Izin Konstruksi, izin Komisioning dan program dekomisioning. Untuk memenuhi izin tersebut dibuat dokumen-dokumen, dan di dalam dokumen tersebut terdapat bab yang berisi tentang kajian dispersi radionuklida ke lingkungan disekitar reaktor pada kondisi reaktor beroperasi normal maupun abnormal. Untuk melakukan kajian tersebut diperlukan data utama yaitu *sourceterm* reaktor. *Sourceterm* yang diperlukan adalah untuk kondisi reaktor beroperasi normal serta reaktor kondisi abnormal yaitu pada kondisi kecelakaan desain dasar (*Design Basic Accident/DBA*) serta kecelakaan diluar desain dasar (*Beyond Design Basic Accident/DBDA*). *Sourceterm* dapat dihitung bila inventori reaktor dapat ditentukan, oleh karenanya analisis untuk menentukan inventori reaktor pada kondisi teras setimbang (*equilibrium core*) sangat penting untuk dilakukan.

Penentuan inventori reaktor untuk reaktor HTGR cukup sulit, karena saat ini tidak ada reaktor berjenis HTGR yang beroperasi secara komersial, sehingga terlampaui sedikit data kajian atau pustaka

yang merepresentasikan. Berbeda dengan reaktor jenis air ringan (*Light Water Reaktor/LWR*) penentuan inventori reaktor telah banyak dibahas oleh para peneliti seperti ditunjukkan pada data pustaka^[1]. Berbagai program komputer juga telah dibuat dan digunakan untuk berbagai tipe reaktor. Pada *Pressurized Water Reaktor* (PWR) dilakukan perhitungan inventori reaktor menggunakan kombinasi perhitungan teras reaktor^[2], juga kombinasi program deplesi radionuklida (WIMS dan ORIGEN) menggunakan perhitungan teras reaktor^[2], juga kombinasi program deplesi radionuklida (ORIGEN2) dengan program transport produk fisi (ASTAC)^[3], serta kombinasi program MCODE dan MOCUP sebagai kopling untuk program MCNP-ORIGEN^[4]. Selanjutnya, untuk melakukan perhitungan inventori dan *sourceterm* di reaktor air mendidih (*Boiling Water Reaktor/BWR*) Yamamoto telah menggunakan program kopling MPV-BURN^[5] dan program SRAC^[6]. Selain itu untuk reaktor jenis air berat (*Pressurized Heavy Water Reaktor/PHWR*) untuk perhitungan yang sama menggunakan program WIMSD4^[7], kombinasi program ORIGEN-ARP dengan program SCALE 5^[8] serta kombinasi program ORIGEN dengan program MCNP^[9].

Reaktor Daya Eksperimental yang akan dibangun di kawasan Puspiptek Serpong-Tangerang Selatan merupakan reaktor jenis temperatur tinggi berpendingin gas (reaktor HTGR). Beberapa peneliti telah melakukan penelitian untuk reaktor HTGR, antara lain tentang teras reaktor HTGR merujuk pada pustaka^[10,11,12,13,14,15,16], juga penelitian tentang bahan bakar TRISO oleh peneliti sesuai pustaka^[17,18,19]. Penelitian lain juga melakukan penelitian tentang keselamatan reaktor HTGR yaitu Zuhair dan kawan-kawan mengenai efek kecelakaan water ingress pada reaktor HTGR sesuai pustaka^[20]. Selain dari pada itu, telah dilakukan perhitungan inventori reaktor HTR-10 oleh Yuanzhong L^[21] dan Jeong H^[22]. Yuanzhong L melakukan perhitungan

menggunakan program ORIGEN2 dengan mengasumsikan teras reaktor terdiri dari 5 buah kanal pendingin (arah radial) serta beberapa titik arah axial. Untuk data pendingin digunakan data kanal ke 3 dimana temperatur pendingin sebesar 587,9 °C. Temperatur ini digunakan sebagai temperatur untuk mengge-nerasi tampang lintang material yang selanjutnya digunakan sebagai data pustaka untuk ORIGEN2. Sedangkan Jeong H melakukan perhitungan dengan cara menentukan teras setimbang menggunakan program kopling dari program MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN yang disebut perhitungan fraksi bakar Monte Carlo (*Monte Carlo Burnup Calculation*), dimana perhitungan pertama kali dilakukan menggunakan program MCNP untuk mendapatkan *fluks neutron* dan tampang lintang material, dan kedua hasil tersebut diambil dan diumpkan ke program ORIGEN2. Oleh ORIGEN2 dilakukan perhitungan fraksi bakar material sebagai fungsi waktu dan hasil tersebut diambil oleh MONTEBURNS untuk diumpkan ke MCNP dan diperuntukkan guna memperbaiki data material yang digunakan dan hasil akhir yang didapat adalah inventori dari reaktor.

Pada makalah ini disajikan analisis inventori reaktor RDE berdaya 10 MWt hingga 30 MWt dengan tipe reaktor HTGR berbahan bakar Pebble Bed. Analisis yang pertama adalah melakukan perhitungan inventori reaktor RDE 10 MWt berdasarkan reaktor HTR-10 yang memiliki daya similar sebesar 10 MWt. Perhitungan inventori di teras reaktor dilakukan dengan menggunakan program ORIGEN2. Dipilih program ORIGEN2, karena program tersebut dapat mensimulasikan deplesi radionuklida hasil dari reaksi fisi pada bahan bakar reaktor. Untuk penggunaan program ORIGEN2 pada reaktor temperature tinggi terlebih dahulu dilakukan generasi tampang lintang untuk pustaka tampang lintang pada kondisi temperature tinggi. Asumsi temperatur yang digunakan adalah temperatur rata-rata reaktor yaitu 475 °C dikalikan dengan Fraksi

Puncak Daya sebesar 1,20 yaitu sebesar 570 °C. Harga Faktor Puncak Daya sebesar 1,20 berdasarkan perhitungan *benchmark* HTR-10 merujuk pada pustaka^[23]. Pada perhitungan inventori teras RDE 10 MWt teras dibagi dalam arah *axial* berdasarkan fraksi bakar dengan perbedaan tingkat fraksi bakar sebesar 10.000 MWD/MTH, dengan bahan bakar baru berada di bagian paling atas teras dan fraksi bakar terendah berada di bagian terbawah teras. Iradiasi bahan bakar untuk mencapai fraksi bakar tertentu dilakukan untuk seluruh bahan bakar di teras reaktor dengan daya sebesar 10 MWt. Bahan bakar yang berada di teras reaktor berjumlah 27.000 bahan bakar Pebble bed, dengan pengkayaan uranium 17%, Fraksi bakar maksimum 80.000 MWD/MTH dan setiap pebble terdiri dari 5 gUO₂. Setelah diperoleh inventori radionu-kliida di teras reaktor kemudian dilakukan perhitungan untuk menentukan fraksi lepasan radionuklida dari teras reaktor ke pendingin dengan menggunakan program komputer PANAMA^[24]. Program komputer PANAMA memodelkan bahan bakar TRISO dengan lapisan SiC. Model yang disimulasikan adalah ternyata tekanan gas internal karena terbentuknya gas Oksigen pada lapisan SiC yang menyebabkan penurunan kekuatan lapisan SiC sebagai akibat dari proses iradiasi pada bahan bakar tersebut. Akibat penurunan kekuatan pada lapisan bahan bakar TRISO suatu saat akan mengakibatkan terdiffusinya radionuklida menerobos lapisan SiC keluar ke sistem pendingin. Berdasarkan rangkaian perhitungan tersebut dilakukan perhitungan untuk menentukan inventori radionuklida di reaktor RDE berdaya 20 MWt dan 30 MWt. Langkah yang dilakukan similar dengan langkah pada perhitungan reaktor RDE 10 MWt.

Perhitungan inventori radionuklida dilakukan menggunakan program deplesi radionuklida berdasarkan rumusan sebagai berikut^[25]:

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{i=1}^N I_{ij} \lambda_j X_j + \phi \sum_{i=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i + r_i) X_i \dots \dots i = 1 \dots V \dots \dots (1)$$

dengan;

- X_i = densitas atom untuk nuklida i
- N = jumlah radionuklida
- λ_i = konstanta peluruhan radionuklida
- I_{ij} = fraksi disintegrasi radionuklida untuk nuklida lain dimulai dari unsur i
- φ = fluks neutron
- f_{ik} = fraksi absorpsi neutron oleh nuklida lain, dimulai dari unsur i
- σ_k = tampang lintang absorpsi neutron dari nuklida k
- r_i = laju kehilangan nuklida i dari sistem
- F_i = laju pembentukan nuklida i

sedangkan fluence neutron dihitung dengan rumusan sebagai berikut;

$$Fluence = \phi \cdot t \dots \dots \dots (2)$$

Dengan:

- Φ = fluks neutron (n/cm².detik)
 - t = waktu (jam)
- dan fluks neutron dihitung berdasarkan persamaan (3) sebagai berikut;

$$\phi = \frac{6,242 \times 10^{18} (P)}{\sum_i X_i^f \sigma_i^f R_i} \dots \dots \dots (3)$$

$$R_i = 1,29927 \times 10^{-3} (Z^2 A^{0,5}) + 33,12 \dots \dots \dots (4)$$

Dengan:

- φ = fluks neutron, (n/cm².s)
- P = daya reaktor, (Mw)
- X_i^f = jumlah nuklida hasil fisi i dalam bahan bakar, (gr atom)
- σ_i^f = tampang lintang mikroskopik fisi untuk nuklida i (cm⁻¹)
- R_i = energi yang dibangkitkan kembali perfisi untuk nuklida ke i, (MeV/fisi)
- Z = nomor atom
- A = nomor massa

selanjutnya untuk menentukan daya untuk iradiasi bahan bakar untuk program ORIGEN2 memakai rumusan seperti tertera pada persamaan (5); diganti

$$P_{irr} \left(\frac{MW}{MTH} \right) = \frac{Daya \text{ reaktor } (MW)}{10^6 \left(\frac{gram}{MTH} \right) \cdot \left(\frac{Jumlah \text{ bahan bakar pebble} \cdot massa \text{ Uranium per pebble } (gram)}{MTH} \right)^*} \dots \dots \dots (5)$$

Sedangkan wanktu iradiasi dalam hari (D/days) dihitung berdasarkan persamaan (6):

$$T_{irr} (D) = \frac{80.000 (MWD/MTH)}{P_{irr} (MW/MTH)} \dots \dots \dots (6)$$

Untuk Fraksi Volume teras menggunakan rumusan sesuai persamaan (7);

$$F_{Vol.BB} = Volume \text{ Bahan Bakar} / Volume \dots \dots (7)$$

Perhitungan untuk mendapatkan fraksi lepasan dari bahan bakar ke sistem pendingin dilakukan setelah inventori bahan bakar di teras reaktor diperoleh. Perhitungan dilakukan menggunakan program PANAMA. Program PANAMA mengasumsikan fraksi lepasan bahan bakar terjadi karena tiga hal yaitu adanya kegagalan dalam fabrikasi bahan bakar (φ₀), karena proses iradiasi menghasilkan tekanan gas karena terbentuknya Oksigen didalam lapisan SiC (Pressure Vessel Model (φ₁)) dan karena proses dekomposisi (φ₂).

$$\phi_{total} = 1 - (1 - \phi_0) \cdot (1 - \phi_1) \cdot (1 - \phi_2) \dots \dots \dots (9)$$

Pada kondisi operasi dianggap bahan bakar semua baik, sehingga fraksi lepasan yang berasal dari kegagalan fabrikasi tidak ada yaitu φ₀ = 0 dan pada kondisi operasi normal juga tidak memperhitungkan terjadinya proses dekomposisi yaitu φ₂ = 0. Dengan demikian yang dihitung adalah adanya tekanan pada lapisan SiC dan dimodelkan menggunakan persamaan (10) sebagai berikut:

$$\phi_1 (t, T) = 1 - e^{ln 2 \cdot (\sigma_1 - \sigma_0) \cdot t} \dots \dots \dots (10)$$

Dengan:

- t = waktu iradiasi
- T = temperatur saat iradiasi
- σ₀ = tensil strength dari SiC di akhir iradiasi (Pa)
- σ₁ = stress yang terjadi di lapisan SiC karena terbentuknya gas Oxigen (Pa)

dan :

$$\sigma_1 = \frac{r \cdot P}{2 \cdot d_0} \cdot \left(1 + \frac{V \cdot t}{d_0} \right) \dots \dots \dots (11)$$

Dengan:

- r = rata-rata radius dari lapisan SiC (m)
- p = tekanan gas fisi pada partikel (Pa)
- d₀ = radius awal dari lapisan SiC (m)
- v = laju korosi fungsi temperatur T (m/s)
- t = waktu iradiasi (s)

sedangkan σ₀ adalah:

$$\sigma_0 = \sigma_{00} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_s}\right) \dots\dots\dots(12)$$

Dengan:

- Γ = fluence neutron cepat (10²⁵ m⁻²)
- Γ_s = keterkaitan dengan temperatur iradiasi (s)

METODOLOGI

Metoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi perhitungan menggunakan program komputer ORIGEN2. Langkah awal adalah menentukan inventori reaktor RDE berdaya 10 MWt. Sebagai pustaka adalah reaktor HTR-10 yang memiliki daya sama dengan RDE 10 MWt. Adapun spesifikasi dari HTR-10 yang digunakan sebagai pustaka dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter disain dari HTR-10

No.	Parameter	Harga
1	Daya termal reaktor (MW)	10
2	Tekanan pendingin Helium (MPa)	3.0
3	Diameter teras (cm)	180
4	Tinggi teras (cm)	197
5	Tipe bahan bakar	UO ₂
6	Jenis bahan bakar	<i>Pebble</i>
7	Jumlah heavy metal tiap <i>Pebble</i> (gram)	5
8	Jumlah TRISO setiap <i>pebble</i>	8335
9	Pengkayaan pada bahan bakar segar (%)	17
10	Jumlah <i>pebble</i> kondisi teras equilibrium	27000

Asumsi yang diambil pada penelitian ini adalah teras reaktor dalam kondisi equilibrium terdiri dari lapisan bahan bakar dimana setiap lapisan bahan bakar berisi bahan bakar dengan *burnup* sebesar 10.000 MWD/THM. Lapisan bahan bakar di teras merupakan bahan bakar dengan komposisi

lapisan teratas berupa bahan bakar segar dan lapisan terbawah merupakan bahan bakar dengan fraksi bakar (*burnup*) terbesar yaitu sebesar 70.000 MWD/THM. Bahan bakar yang diiradiasi sebanyak sebanyak 135.000 g dengan daya 10 MWt hingga mencapai fraksi bakar maksimum sebesar 80.000 MWD/MTH.

Berdasarkan dari data tersebut diatas kemudian dilakukan perhitungan untuk menentukan inventori di teras reaktor menggunakan program ORIGEN2. Input yang diperlukan untuk program ORIGEN2 antara lain berupa massa ²³⁵U yang dihitung menggunakan persamaan (8). Sebelum program dijalankan, disiapkan terlebih dahulu data pustaka tampang lintang untuk ORIGEN2 dengan temperatur sesuai dengan temperatur pendingin. Temperatur yang digunakan sebagai temperatur pustaka tampang lintang adalah temperatur rata-rata input (250 °C) dan output (700 °C) dari sistim pendingin primer dikalikan dengan faktor daya teras sebesar 1,20 dan diperoleh harga sebesar 570 °C. Setelah input lengkap dilakukan perhitungan untuk mendapatkan aktivitas inventori dari reaktor RDE 10 MWt. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan hasil dari penelitian terdahulu^[18]. Penelitian dilanjutkan untuk mendapatkan inventori untuk reaktor RDE 20 MWt dan 30 MWt.

Untuk mendapatkan inventori teras reaktor RDE 20 MWt dan 30 MWt dilakukan terlebih dahulu perhitungan untuk memperoleh jumlah bahan bakar yang digunakan di teras reaktor. Asumsi yang diambil adalah perbandingan perbandingan volume bahan bakar dan volume teras sebesar 0,61 untuk daya 20 MWt dan daya 30 MWt. Juga ditetapkan kerapatan daya untuk reaktor RDE 20 MWt dan 30 MWt masing-masing sebesar 2,15 dan 2,35. Setelah komposisi bahan bakar di teras reaktor diperoleh, dilakukan perhitungan inventori reaktor dengan cara yang sama dengan menentuka inventori untuk reaktor berdaya 10 MWt.

Perhitungan menentukan lepasan radionuklida dari bahan bakar ke sistem pendingin dilakukan menggunakan program PANAMA. Sebagai masukan adalah sejarah iradiasi bahan bakar, tipe bahan bakar *kernel*, radius setiap lapisan bahan bakar *pebble*, serta fluence neutron cepat dengan energy lebih besar dari 0,10 MeV dalam orde 10^{25} n/m². *Fluence neutron* diperoleh dari keluaran program ORIGEN2. Hasil yang diperoleh adalah fraksi radionuklida yang lepas dari bahan bakar ke sistem pendingin.

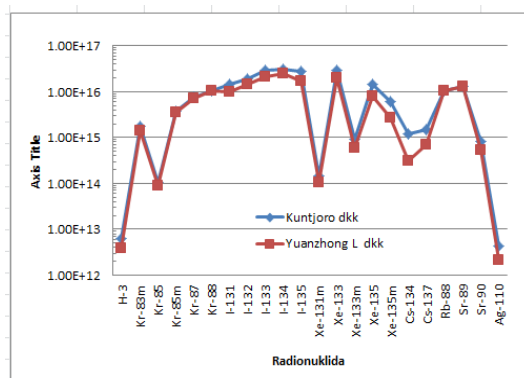
Fraksi bahan bakar selanjutnya digunakan sebagai fraksi sehingga diperoleh inventori bahan bakar yang ada di sistem pendingin reaktor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan inventori reaktor untuk daya 10 MWt dilakukan menggunakan program ORIGEN2. Hasil yang diperoleh adalah jumlah aktivitas radionuklida dalam satuan Bq dan dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 1.

Tabel 2. Perbandingan hasil perhitungan inventori radionuklida dari reaktor RDE 10 MWt (HTR-10)

Radionuklida	Kuntjoro	Yuanzhong L	Radionuklida	Kuntjoro	Yuanzhong L
	dkk	dkk		dkk	dkk
H-3	6.27E+12	3.81E+12	Xe-131m	1.49E+14	1.07E+14
Kr-83m	1.77E+15	1.41E+15	Xe-133	3.00E+16	2.05E+16
Kr-85	1.04E+14	8.75E+13	Xe-133m	9.35E+14	5.90E+14
Kr-85m	3.85E+15	3.59E+15	Xe-135	1.46E+16	7.94E+15
Kr-87	7.39E+15	7.12E+15	Xe-135m	5.94E+15	2.64E+15
Kr-88	1.04E+16	1.03E+16	Cs-134	1.51E+15	3.11E+14
I-131	1.45E+16	9.77E+15	Cs-137	1.20E+15	6.92E+14
I-132	1.93E+16	1.46E+16	Rb-88	1.06E+16	1.03E+16
I-133	2.99E+16	2.11E+16	Sr-89	1.33E+16	1.30E+16
I-134	3.02E+16	2.47E+16	Sr-90	8.06E+14	5.34E+14
I-135	2.80E+16	1.70E+16	Ag-110	4.20E+12	2.16E+12

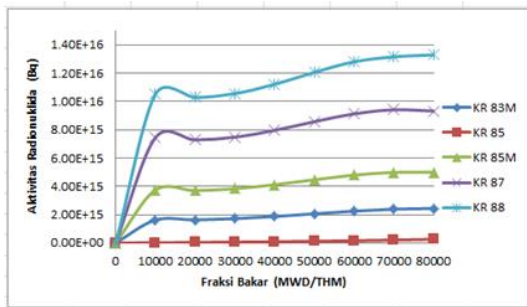


Gambar 1. Perbandingan hasil perhitungan inventori radionuklida dari reaktor RDE 10 MWt (HTR-10)

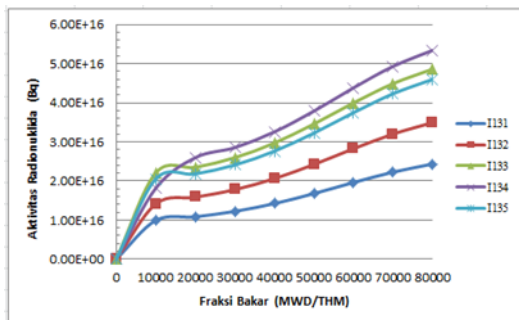
Dari Tabel 1 dan Gambar 1 terlihat aktivitas tertinggi untuk kelompok krypton berasal dari nuklida Kr-88 sebesar $1.04E+16$ Bq, untuk kelompok xenon adalah

nuklida Xe-133 sebesar $3.00E+16$ Bq, untuk kelompok iodine adalah nuklida I-134 sebesar $3.02E+16$ Bq dan untuk kelompok stronsium adalah nuklida Sr-89 sebesar $1.33E+16$ Bq, dan untuk kelompok Cesium adalah nuklida Cs-134 sebesar $1.51E+15$ Bq. Dari perbandingan hasil yang diperoleh dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari peneliti terdahulu terdapat kesamaan kecenderungan untuk inventori reaktor. Terdapat kesamaan hasil dengan penelitian yang dilakukan oleh Yuanzhong L^[18].

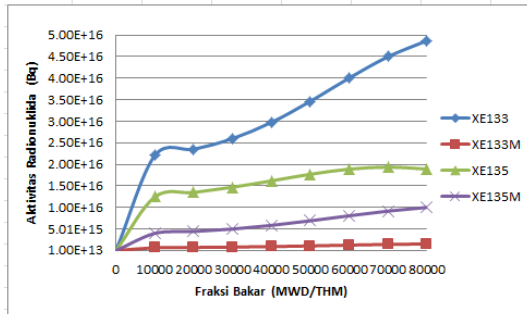
Selain inventori radionuklida untuk teras RDE 10 MWt, juga diperoleh aktivitas radionuklida sebagai fungsi burnup, hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4.



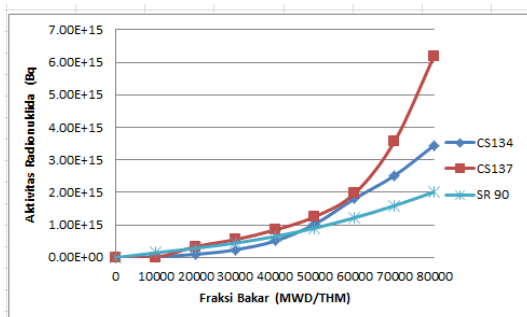
Gambar 2. Aktivitas kelompok radionuklida Kr (Bq) fungsi fraksi bakar (GWD/MTH)



Gambar 3. Aktivitas kelompok radionuklida iodine (Bq) fungsi fraksi bakar (GWD/MTH)



Gambar 4. Aktivitas kelompok radionuklida xenon (Bq) fungsi fraksi bakar (GWD/MTH)



Gambar 5. Aktivitas kelompok radionuklida cesium (Bq) fungsi fraksi bakar WD/MTH)

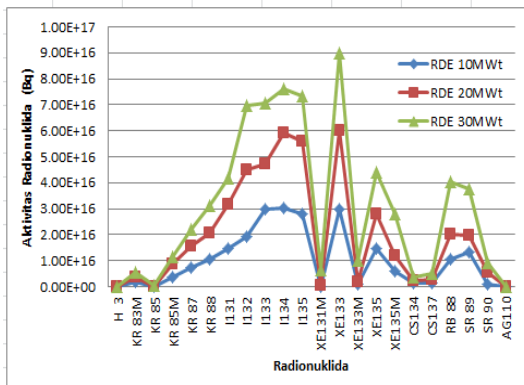
Gambar 2, 3, 4 dan Gambar 5 terlihat aktivitas nuklida untuk setiap kelompok radionuklida akan bertambah nilainya sebagai fungsi dari fraksi bakar. Hal ini karena nuklida-nuklida tersebut merupakan hasil fisi dari uranium, oleh karenanya selama terjadi reaksi fisi nuklida –nuklida tersebut akan terbentuk dan bertambah jumlahnya dengan bertambahnya waktu. Dari gambar-gambar tersebut terlihat terdapat nuklida yang memiliki aktivitas terbesar yaitu Kr-88 untuk kelompok kromium, I-134 untuk kelompok iodine, Xe-133 untuk kelompok xenon dan Cs-137 untuk kelompok cesium. Keempat nuklida tersebut memiliki nilai tertinggi karena memiliki aktivitas setiap MWt terbesar pada kelompoknya yaitu untuk Kr-88 sebesar 20,50 Kci/ MWt, Xe-133 sebesar 55,8 KCi/ MWt, I-134 sebesar 55,6 KCi/ MWt serta Cs-137 sebesar 1,16 Kci/ MWt.

Hasil perhitungan tersebut terdapat kesesuaian dengan penelitian yang dihasilkan oleh peneliti terdahulu, dengan demikian dapat disimpulkan metode yang digunakan sudah benar. Berdasarkan hasil tersebut maka metode perhitungan yang digunakan juga dapat digunakan untuk menentukan inventori radionuklida untuk reaktor 20 MWt dan 30 MWt. Perhitungan selanjutnya adalah untuk mendapatkan inventori untuk reaktor RDE 20 MWt dan 30 MWt. Langkah pertama adalah mendisain parameter reaktor 20 MWt dan 30 MWt berdasarkan data disain parameter reaktor RDE 10 MWt. Parameter utama yang dihitung adalah jumlah bahan bakar *pebble* untuk reaktor berdaya 20 MWt dan 30MW berdasarkan persamaan (7) dan persamaan (8), yaitu dengan mengasumsikan rapat daya untuk Reaktor berdaya 20 MWt dan 30 MWt sebesar 2,15 dan 2,35 dan Fraksi volume bahan bakar sebesar 0,61. Parameter yang diperoleh untuk reaktor RDE 20 MWt dan RDE 30 MWt dibandingkan dengan reaktor RDE 10 MWt dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan disain parameter reaktor RDE 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt

Power (W)	10000000	20000000	30000000
H/D	1.10	1.10	1.10
D (cm)	180	220	246
H (cm)	198	242	270
Volume (cm ³)	5003410	9265574	12786492
PD	2.00	2.15	2.35
Fvol	0.61	0.61	0.61
Vol. Pabble (cm ³)	3052080	5652000	7799760
Vol 1 Pabble (cm ³)	113.04	113.04	113.04
Jumlah Pebble	27000	50000	69000
Power Irradiasi (MW)	10	20	30
Panjang Siklus (hari)	1080	1000	920
Fraksi Bakar (MWD/THM)	80000	80000	80000

Berdasarkan Tabel 3 dapat dilihat, jumlah bahan bakar dan daya reaktor untuk mengirradiasi bahan bakar pada perhitungan inventori menggunakan program ORIGEN2 untuk daya 10 MWt dan 20 MWt berturut adalah 50.000 *pebble* dan 69.000 *pebble* serta daya untuk iradiasi bahan bakar sebesar 20 MWt dan 30 MWt. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan inventori reaktor dengan langkah seperti pada perhitungan inventori untuk reaktor 10 MWt. Inventori reaktor yang diperoleh dibandingkan dengan inventori reaktor 10 MWt dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan aktivitas radionuklida inventori reaktor RDE 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt

Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa aktivitas radionuklida di teras paling besar terdapat pada teras reaktor 30 MWt dan mengecil dengan berkurangnya daya reaktor. Terdapat kecenderungan aktivitas radionuklida yang sama untuk ketiga reaktor. Aktivitas radionuklida bertambah

sesuai dengan penambahan jumlah bahan bakar di teras reaktor. Aktivitas radionuklida tertinggi berorde 10^{17} Bq, harga ini cukup kecil karena akan memberikan nilai dosis untuk lingkungan yang kecil.

Setelah inventori radionuklida di teras reaktor diperoleh kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan fraksi lepasan dari bahan bakar ke sistem pendingin menggunakan program PANAMA. Sebagai masukan utama adalah *Fluence* neutron cepat yang digunakan untuk menghitung fraksi lepasan radionuklida. *Fluence* neutron diperoleh dari perhitungan neutronik untuk energy neutron cepat sebesar 3,50 MeV. *Fluence* neutron cepat untuk daya reaktor 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. *Fluence* neutron cepat energi 3,50 Mev untuk RDE berdaya 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt

Kelompok Radionuklida	Fluence Neutron (n/m^2)		
	RDE 10MWt	RDE 20MWt	RDE 30MWt
Kelompok Kr	1.38E+23	8.19E+23	6.18E+24
Kelompok I	4.07E+23	1.51E+24	1.78E+25
Kelompok Cs	2.56E+23	7.83E+23	3.59E+24

Tabel 4 memperlihatkan bahwa *fluence* neutron cepat bertambah besar sebanding dengan kenaikan daya reaktor. Hal ini disebabkan karena jumlah bahan bakar bertambah besar sesuai dengan bertambahnya daya reaktor, sehingga neutron hasil fisi juga bertambah besar sesuai dengan kenaikan daya reaktor tersebut. Selanjutnya dengan memasukkan *fluence* neutron cepat sebagai input pada PANAMA code diperoleh hasil fraksi lepasan radionuklida terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Fraksi lepasan radionuklida untuk RDE 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt

Kelompok Radionuklida	Fraksi Lepsan Radionuklida		
	RDE 10MWt	RDE 20MWt	RDE 30MWt
Kelompok Kr	1.74E-07	4.79E-07	8.23E-07
Kelompok I	4.53E-07	4.78E-07	6.34E-07
Kelompok Cs	4.59E-07	5.14E-07	2.59E-05

Tabel 5 memperlihatkan bahwa fraksi lepasan radionuklida dari bahan bakar ke

sistem pendingin sangat kecil, hal ini disebabkan karena *fluence neutron* $< 10^{25}$ n/m², sehingga kebolehjadian keluarnya radionuklida dari bahan bakar sangat kecil dan untuk setiap radionuklida memiliki kebolehjadian lepas yang sama. Bertambah besar sesuai dengan kenaikan daya reaktor. Berdasarkan fraksi lepasan radionuklida dari bahan bakar ke sistim

pendingin, maka dapat ditentukan aktivitas radionuklida yang terdapat di dalam sistem pendingin dengan cara mengalikan aktivitas inventori radionuklida di teras dengan harga fraksi lepasan sebesar yang tertera pada Tabel 5. Inventori reaktor RDE 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt di teras reaktor dan di sistem pendingin dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. Inventori di teras reaktor RDE berdaya 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt

Nuklida	RDE 10MWt	RDE 20MWt	RDE 30MWt	Nuklida	RDE 10MWt	RDE 20MWt	RDE 30MWt
H 3	6.27E+12	1.17E+13	1.62E+13	XE131M	1.49E+14	3.22E+14	6.28E+15
KR 83M	1.77E+15	3.55E+15	5.32E+15	XE133	3.00E+16	5.99E+16	8.98E+16
KR 85	1.04E+14	1.94E+14	2.69E+14	XE133M	9.35E+14	1.87E+15	9.87E+15
KR 85M	3.85E+15	8.54E+15	1.15E+16	XE135	1.46E+16	2.81E+16	4.40E+16
KR 87	7.39E+15	1.55E+16	2.22E+16	XE135M	5.94E+15	1.19E+16	2.78E+16
KR 88	1.04E+16	2.08E+16	3.12E+16	CS134	1.21E+15	2.25E+15	3.83E+15
I131	1.45E+16	3.16E+16	4.17E+16	CS137	1.40E+15	2.85E+15	4.98E+15
I132	1.93E+16	4.51E+16	6.98E+16	RB 88	1.06E+16	2.04E+16	4.03E+16
I133	2.99E+16	4.73E+16	7.07E+16	SR 89	1.33E+16	1.97E+16	3.78E+16
I134	3.02E+16	5.93E+16	7.62E+16	SR 90	8.06E+14	5.45E+15	9.00E+15
I135	2.80E+16	5.60E+16	7.34E+16	AG110	1.80E+12	1.58E+13	3.11E+13

Tabel 7. Inventori di sistem pendingin reaktor RDE berdaya 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt

Nuklida	RDE 10MWt	RDE 20MWt	RDE 30MWt	Nuklida	RDE 10MWt	RDE 20MWt	RDE 30MWt
H 3	2.88E+06	6.00E+06	4.19E+06	XE131M	6.82E+07	1.65E+08	1.63E+09
KR 83M	8.14E+08	1.82E+09	1.38E+09	XE133	1.38E+10	3.08E+10	2.33E+10
KR 85	4.78E+07	9.97E+07	6.97E+07	XE133M	4.29E+08	9.61E+08	2.56E+09
KR 85M	1.76E+09	4.39E+09	2.99E+09	XE135	6.72E+09	1.45E+10	1.14E+10
KR 87	3.39E+09	7.97E+09	5.74E+09	XE135M	2.72E+09	6.10E+09	7.20E+09
KR 88	4.77E+09	1.07E+10	8.07E+09	CS134	5.56E+08	1.16E+09	9.92E+08
I131	6.65E+09	1.63E+10	1.08E+10	CS137	6.40E+08	1.46E+09	1.29E+09
I132	8.86E+09	2.32E+10	1.81E+10	RB 88	4.85E+09	1.05E+10	1.04E+10
I133	1.37E+10	2.43E+10	1.83E+10	SR 89	6.12E+09	1.01E+10	9.79E+09
I134	1.38E+10	3.05E+10	1.97E+10	SR 90	3.70E+08	2.80E+09	2.33E+09
I135	1.29E+10	2.88E+10	1.90E+10	AG110	8.26E+05	8.11E+06	8.06E+06

SIMPULAN

Pelapisan Inventori reaktor untuk reaktor RDE berdaya 10 MWt telah diperoleh. Berdasarkan reaktor RDE 10 MWt telah diperoleh parameter disain untuk reaktor RDE berdaya 20 MWt dan 30 MWt. Parameter utama antara lain jumlah bahan bakar yaitu sebanyak 50.000 dan 69.000 bahan bakar *Pebble* UO₂ dengan pengkayaan uranium sebesar 17%, diameter teras

sebesar 200 cm dan 220 cm serta tinggi masing-masing adalah 231 cm dan 264 cm. Berdasarkan parameter teras tersebut dapat ditentukan pula inventori reaktor untuk reaktor RDE berdaya 20 MWt dan 30 MWt. Selain itu juga diperoleh fraksi lepasan radionuklida dari bahan bakar ke sistim pendingin terbesar untuk daya 10 MWt, 20 MWt dan 30 MWt secara berurutan sebesar 4.59E-07, 5.14E-07 dan 2,59E-05. Dengan diperolehnya fraksi lepasan

tersebut, maka dapat diperoleh aktivitas radio-nuklida yang berada di dalam sistem pendingin, dengan cara mengalikan aktivitas inventori di teras reaktor dengan harga $4.59E-07$ untuk daya 10 MWt, $5.14E-07$ untuk daya 20 MWt dan $2.59E-05$ untuk daya 30 MWt. Aktivitas inventori sangat kecil dibandingkan dengan inventori reaktor daya yang telah diteliti^[1] dalam orde 10^{18} Bq, dimana untuk aktivitas radionuklida dalam orde tersebut memberikan nilai dosis lebih kecil dari batas dosis diijinkan berada dilingkungan sesuai dengan ketentuan badan pengawas yaitu 5 mSv/tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SEMBIRING T, (2014), Kerangka Pustaka Kerja Dokumen Teknis Keselamatan Reaktor Daya Eksperimental, BATAN.
- [2] Udiyani PM. (2011), Karakterisasi Radio-Nuklida Pada Tiap Sub-sistem Keselamatan Reaktor Daya Berbahan Bakar MOX, TRI DASA MEGA, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir; 13(2):116-119.
- [3] Rahgoshay M., Tilehnoee MH., (2013), *Calculating the Inventory of Heavy Metals in The Fuel Assemblies of VVER-1000 During the First Cycle*, Elsevier, *Annals of Nuclear Energy*, 3;58:33-35.
- [4] Ahmad S-I., Ahmad N., (2006), *Burnup-Dependent Core Neutronics Analysis and Calculation Of Actinide and Fission Product Inventories in Discharged Fuel of a Material Test Research Reaktor*, Elsevier, *Progress in Nuclear Energy*;48:599-616.
- [5] El Bakkari B., at all. (2009), *Development of an MCNP-Tally Based Burnup Code and Validation Through PWR Benchmark Exercises*, Elsevier, *Annals of Nuclear Energy*, 2009;36:626–633.
- [6] Yamamoto T., Yamamoto M., (2008), *Analysis of Rod-by-Rod FP Inventory*, (2008), *Distributions in BWR 8 x 8 UO₂ Assemblies Using Lattice Physics Method*, *Journal of Nuclear Science and Technolgy*, 45(1): 25–35.
- [7] Amar H., Su'ud Z., dan Pasek AD. (2011), *Source Term Analysis of Long-Life 620 MWt BWR During Loss of Coolant Accident (LOCA)*, *Indonesian Journal of Physics*, 2011; 22(1).
- [8] Yasin Z., Iqbal J., Shahzad MI. (2011), *Comparison of Radionuclide's Inventories and Activities with Slightly Enriched Uranium and Plutonium Fuel in CANDU Reactors*, *World Journal of Nuclear Science and Technology*; 1:31-36.
- [9] Pavelescu., Octavian A., *CANDU (2011), Radiotoxicity Inventories Estimation: A Calculated Experiment Cross-Check for Data Verification and Validation*, *World Journal of Nuclear Science and Technology*;1:31-36.
- [10] Noh K., Chang. dan Hah J. (2015), *Radiation Source Term Analysis for Wolsong Unit 1 Using MCNP/ORIGEN*, *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology ISSN Online*; 4(2):2347-6435
- [11] Setiadipura T., Irwanto D., Zuhair, (2015), *Preliminary Neutronic Design of High Burnup OTTOCycle Pebble Bed Reactor*, *Jurnal Atom Indonesia*; 41(1): 7-15.
- [12] Zuhair, Suwoto, Irianto D. Ing. (2010), *Pemodelan Teras Untuk Analisis Perhitungan Konstanta Multiplikasi Reaktor HTR-PROTEUS*, *Jurnal TRI DASA MEGA*; 12(2): 91-102.
- [13] Suwoto, Zuhair, (2015), *Analisis Sensitivitas Ketebalan Reflektor Grafit Teras RGTT200K Menggunakan perhitungan Monte Carlo*, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*; 16(2): 73-83.
- [14] Zuhair, Suwoto, Irianto D. Ing. (2010), *Studi Optimasi Moderasi Neutron Dalam Teras HTR Pebble Bed*, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*; 12(2): 96-106.

-
- [15] Liem PH., (2016), *Impact of New Evaluated Nuclear Data Libraries on Core Characteristic of Innovative Reactor Design*, Elsevier, Progress in Nuclear Energy; 87: 74-88.
- [16] Abedi A., (2011), *An Exact MCNP Modelling of Pebble Bed Reactor*, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering; 5(11): 1034-1038.
- [17] Zuhair, Suwoto, Ilham P., (2013), *Investigasi Parameter Bahan Bakar reaktor Pebble Dalam Perhitungan Teras Thorium RGTT200K*, Jurnal Sain dan Teknologi Nuklir Indonesia; 14(2):65-48.
- [18] Zuhair, Suwoto, Irianto D. Ing., (2011), *Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Doppler Partikel TRISO Reaktor Temperatur Tinggi*, Jurnal Pengembangan Energi Nuklir; 13(1); 1-8.
- [19] Powers JJ., (2010), *A Review of TRISO Fuel Performance Models*, Elsevier, Journal of Nuclear Materials; 405: 74-82.
- [20] Zuhair, Suwoto, (2015), *Analisis Efek Kecelakaan Water Ingress Terhadap Reaktivitas Doppler Teras RGTT200K*, Jurnal TRI DASA MEGA; 17(1): 31-40
- [21] Yuanzhong L., Jianzu C., *Fission, (2002), Product Release and its environment Impact for Normal Reaktor Operations and for Relevant Accident*, Elsevier, Nuclear Engineering and Design; 218:81-90.
- [22] Jeong H., Chang SH., (2008), *Development of a method of evaluating an inventory of fission products for a pebble bed reaktor*, Elsevier, Annals of Nuclear Energy; 35: 2161-2171.
- [23] IAEA, (2003), *Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance*; IAEA-TECDOC-1382: 271-289.
- [24] Verfondern K., Nabelek H., (1990), *The Mathematical Basis of the PANAMA-I Code for Modelling Pressure Vessel Failure of TRISO Coated Particles under Accident Condition*, KFA Julich.
- [25] Croff AG, Origen2, (1983), *a Versatile Computer Code For Calculating The Nuclide Compositions And Characteristics of Nuclear Materials*, P.O. Box Oak Ridge Tennessee 37830 USA, Oak Ridge National Laboratory Chemical Technology Division.