

RANCANGAN KONSEPTUAL REAKTOR SUBKRITIK UNTUK KAJIAN TRANSMUTASI LIMBAH PLTN BERBASIS REAKTOR KARTINI

Syarip, Tegas Sutondo, Edi Triyono BS

Pusat Teknologi Akselerator & Proses Bahan (PTAPB) BATAN

Jl. Babarsari POB 6101 ykbb, Yogyakarta, 55281, Fax 274-487824

E-mail: syarip@batan.go.id

ABSTRAK

RANCANGAN KONSEPTUAL REAKTOR SUBKRITIK UNTUK KAJIAN TRANSMUTASI LIMBAH PLTN BERBASIS REAKTOR KARTINI. Disajikan hasil rancangan konseptual berupa kajian perhitungan aspek teoretis dan analisis kelayakan teknis suatu sistem reaktor subkritik dengan sumber neutron luar berasal dari akselerator (*Small Scale Reactor Accelerator Driven System / SS-RADS*) berbasis reaktor Kartini. Model teras reaktor berbentuk silinder berisi aktinida minor (MA) yang dikelilingi oleh bahan bakar reaktor Kartini. Modul ADS-CDS yang berbasis pada program SRAC digunakan untuk kajian aspek neutronik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa keberadaan unsur MA akan memberikan reaktivitas positif yang nilainya semakin besar dengan meningkatnya konsentrasi MA. Program komputer ORIGEN2 digunakan untuk perhitungan transmudasi radionuklida MA sebagai fungsi energi dan fluks neutron. Hasil analisis menunjukkan bahwa transmudasi radionuklida MA tersebut akan berlangsung lebih optimum dengan neutron termal dibandingkan dengan neutron cepat. Unsur MA yang paling banyak mengalami transmudasi adalah Am^{241} yaitu dengan laju transmudasi 50% selama 1000 hari operasi pada tingkat fluks neutron termal 10^{13} n/cm² s, dan yang paling sedikit mengalami transmudasi adalah Cm^{244} yaitu hanya 0,5%, serta laju transmudasi rerata total 32%. Dapat disimpulkan bahwa SS-RADS berbasis reaktor Kartini dapat digunakan untuk eksperimen transmudasi limbah nuklir (MA) jika tingkat fluks neutron termalnya 10^{13} n/cm² s.

Kata kunci: PLTN, reaktor subkritik, limbah nuklir, aktinida minor.

ABSTRACT

CONCEPTUAL DESIGN OF SUBCRITICAL ASSEMBLY FOR NPP NUCLEAR WASTE TRANSMUTATION STUDY BASED ON KARTINI REACTOR. The conceptual design theoretical study and technical feasibility analysis results of subcritical assembly (*Small Scale Reactor Accelerator Driven System /SS-RADS*) based on Kartini reactor is presented in this paper. The reactor core model is a cylindrical containing minor actinide (MA) surrounded by Kartini reactor fuels. ADS-CDS module based on SRAC code was used to study neutronic aspect. Calculation results show that the present of MA as nuclear waste will provide positive reactivity value and will increasing according to its concentration. The ORIGEN2 computer code was used to calculate MA transmutation as a function of neutron energy and flux. The analysis results show that the optimum waste transmutation of the above radionuclide will achieved with thermal neutron (thermal reactor), instead of fast neutron. The most transmuted element is Am^{241} with 50% transmutation rate at thermal neutron flux of 10^{13} n/cm² s, the lowest transmuted is Cm^{244} i.e. only 0,5%, and total average transmutation is 32%. It can be concluded that the SS-RADS based on Kartini reactor can be used for nuclear waste transmutation study if the thermal neutron flux level is around 10^{13} n/cm² s. **Keywords:** nuclear power plants, subcritical reactor, nuclear waste, minor actinide.

1. PENDAHULUAN

Program pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia saat ini masih mengalami kendala a.l. berupa penolakan dari sekelompok masyarakat. Salah satu alasan dari penolakan tersebut adalah operasi PLTN akan menghasilkan limbah radionuklida umur panjang dengan radiotoksitas tinggi yang akan membahayakan generasi mendatang. Mereka masih meragukan kemampuan tenaga Indonesia dalam mengatasi dan mengelola limbah PLTN tersebut. Usaha-usaha untuk menciptakan penerimaan masyarakat saat ini tengah dan terus dilakukan antara lain dengan seminar-seminar dan *workshop* yang memberikan penjelasan meliputi aspek teknologi, keselamatan, manfaat, operasional, dan aspek limbah nuklir.

Salah satu solusi untuk mengatasi problem limbah nuklir tersebut adalah dengan teknik transmudasi nuklida limbah nuklir yang berumur panjang menjadi berumur lebih pendek atau stabil. Teknik transmudasi tersebut dapat dilakukan pada fasilitas *Reactor Accelerator Driven System* (RADS). Di negara-negara maju seperti Jepang, USA dan beberapa negara Eropa, teknik RADS untuk transmudasi limbah nuklir sudah mulai dikembangkan.^[1,2] Oleh karena fasilitas RADS skala besar memerlukan biaya yang sangat besar, maka sebagai langkah awal khususnya bagi negara-negara yang sedang berkembang seperti Indonesia adalah dengan membangun fasilitas RADS skala kecil terlebih dahulu atau *small scale* (SS-RADS) untuk eksperimen transmudasi limbah nuklir. Negara yang sudah mulai mengembangkan SS-RADS a.l. Belarusia dan India. Dengan sistem yang kecil ini dapat dilakukan beberapa eksperimen dasar untuk mendapatkan data-data penting mengenai proses transmudasi nuklida limbah nuklir umur panjang. Kajian teoretis terkait RADS di Indonesia juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti^[3-6].

Pada penelitian ini dikaji aspek teoretis dan kelayakan teknis suatu sistem hibrida akselerator generator neutron 150 keV dengan reaktor subkritik skala kecil (SS-RADS). Kedua komponen utama SS-RADS tersebut sudah tersedia di PTAPB BATAN Yogyakarta bahkan generator neutron merupakan perangkat yang pernah direkayasa sendiri, tetapi masih perlu ditingkatkan dan disempurnakan lebih lanjut untuk tujuan ini.

2. METODOLOGI

Metode penelitian meliputi kajian dan perhitungan dengan menerapkan strategi pengelompokan topik kajian sebagai berikut :

- Kajian akselerator generator neutron 150 keV, meliputi kajian atas komponen-komponen generator neutron yaitu: sumber ion, sistem pemercepat, sistem target tritium, sistem vakum dan sistem utilitas.
- Kajian perangkat reaktor subkritik daya nol meliputi kajian modifikasi teras reaktor Kartini menjadi sistem reaktor subkritik, perhitungan neutronik, perhitungan termohidrolik, dan aspek keselamatan teknis. Melakukan perhitungan rapat atom dari setiap nuklida dari komponen yang digunakan dalam sistem teras RADS yang direncanakan. Perhitungan dilakukan untuk beberapa variasi konsentrasi aktinida minor atau *minor actinide* (MA).
- Melakukan perhitungan *cell/ super cell* untuk menentukan tampang lintang makroskopik / *few group constants* untuk seluruh komponen yang ditinjau, yang akan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan kritikalitas (k_{ef}). Perhitungan kritikalitas untuk menentukan konfigurasi teras RADS berdasarkan kriteria subkritikalitas yang ditetapkan yaitu dengan faktor multiplikasi neutron $k_{ef} = 0,980 - 0,985$ untuk beberapa variasi konsentrasi MA. Perhitungan *cell/super cell* maupun perhitungan k_{ef} digunakan modul ADS-CDS (*Core Design System*) yang berbasis pada program SRAC.

- Kajian sistem pengkopelan antara generator neutron dengan perangkat subkritik dan sistem pengendali fluks neutron.
- Kajian transmudasi nuklida limbah nuklir dan fasilitas eksperimen SS-RADS menggunakan program komputer ORIGEN-2.

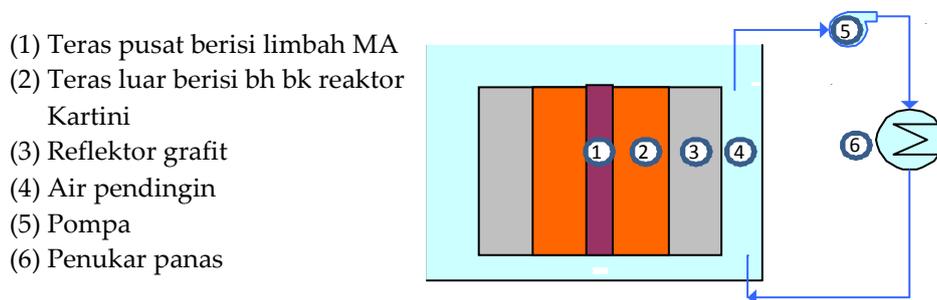
Model Elemen Aktinida

Sebagai dasar dalam kajian ini digunakan data komposisi 3 nuklida MA dari bahan bakar bekas PLTN jenis PWR yaitu Np, Am, dan Cm, yang telah dipisahkan dari produk fisi atau produk aktivasi lainnya. Selanjutnya nuklida MA tersebut dicampurkan secara homogen dengan grafit (C) dengan prosentase divariasi kemudian dipadatkan sehingga membentuk padatan matriks C-MA. Pemilihan C sebagai bahan matriks dalam hal ini selain memiliki sifat neutronik yang baik yaitu tampang lintang serapannya kecil dan memiliki sifat moderasi neutron yang baik juga stabil baik dari aspek kimia maupun sifat fisisnya, sehingga tidak menimbulkan permasalahan baru terkait radioaktivitas akibat pengaruh reaksi dengan neutron.

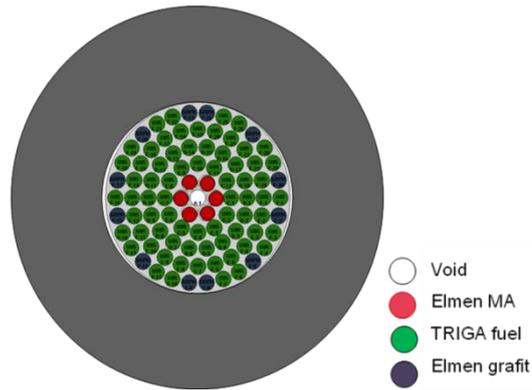
Ukuran diameter dan tinggi dari padatan C-MA ini dibuat sama dengan ukuran *meat* dari bahan bakar reaktor Kartini (standar TRIGA) tipe 104. Padatan C-MA tersebut selanjutnya dimasukkan ke dalam kelongsong dari SS-304 dan pada kedua ujungnya diberi grafit sebagai reflektor arah aksial sehingga membentuk elemen MA dengan ukuran yang sama seperti pada elemen bahan bakar reaktor Kartini [7], yaitu tinggi total 72 cm, tinggi aktif 38 cm dan diameter luar 3,7 cm.

Model Sistem Teras RADS

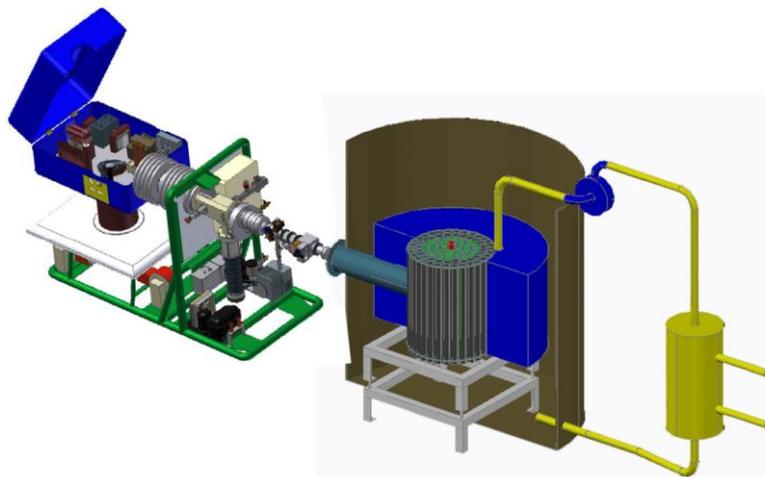
Model teras yang dirancang adalah berbasis pada ukuran teras reaktor Kartini seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dengan elemen MA berada di bagian tengah dan dikelilingi oleh sejumlah bahan bakar reaktor Kartini pada bagian luarnya. Gambar 2 memperlihatkan posisi dari elemen MA yang ditempatkan pada ring B (6 buah) sedang ring A (pusat teras) dalam studi ini berisi elemen *void* (udara), yang dapat digunakan untuk menempatkan sumber neutron isotopic seperti Am-Be atau Pu-Be, dsb atau target spalasi bila menggunakan akselerator. Gambar 3 memperlihatkan model dari pengkopelan sumber neutron dari akselerator generator neutron dengan sistem teras RADS berbasis reaktor Kartini. Sistem teras tersebut, terdiri dari beberapa komponen utama yaitu elemen bahan bakar, elemen MA dan komponen non bahan bakar seperti elemen grafit, elemen *void* dan air sebagai pendingin.



Gambar 1. Konsep Disain Sistem RADS Berbasis Reaktor Kartini.



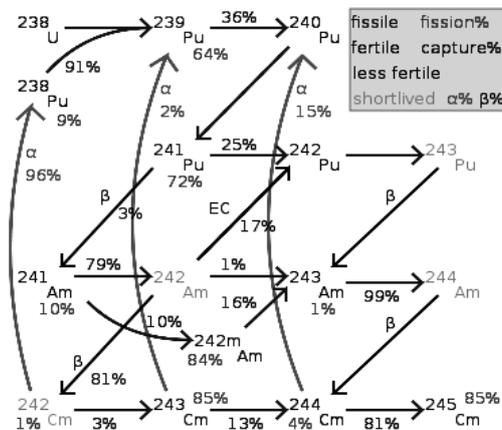
Gambar 2. Posisi Elemen MA Di Dalam Teras RADS Berbasis Reaktor Kartini.



Gambar 3. Pengkopelan Generator Neutron Dengan Teras Subkritik RADS Reaktor Kartini.

Model Perhitungan Transmutasi MA

Radioionuklida Np^{237} , Am^{241} , Am^{241} , dan Cm^{244} adalah kelompok nuklida aktinida (MA) yang terjadi karena reaksi transmutasi inti uranium di dalam reaktor nuklir dan bersifat radioaktif dengan umur paro panjang. Siklus atau perputaran transmutasi inti dari radionuklida tersebut disajikan pada Gambar 4^[8].



Gambar 4. Skema Transmutasi Inti MA di Dalam Reaktor Nuklir.

Radioinuklida tersebut dikategorikan sebagai limbah nuklir berbahaya karena dapat mengalami transmudasi inti menjadi radioisotop plutonium. Salah satu usaha pengamanan limbah ini adalah dengan membakar/iradiasi limbah dalam teras reaktor agar dapat bertransmutasi inti menjadi radionuklida lainnya yang tidak sensitif *safeguard*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Neutronik

Hasil perhitungan rapat atom dari nuklida/komponen penyusun teras RADS-Kartini, disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Selanjutnya dilakukan perhitungan *cell* untuk komponen bahan bakar reaktor Kartini, maupun komponen non bahan bakar termasuk elemen C-MA. Perhitungan kritikalitas (k_{ef}) model teras hipotetis dijadikan dasar penentuan konfigurasi teras RADS untuk beberapa variasi konsentrasi MA yang ditinjau. Berdasarkan kriteria subkritikalitas (k_{ef}) yang ditetapkan yaitu antara 0,980 sampai maksimum 0,985 diperoleh hasil konfigurasi sistem teras RADS berbasis reaktor Kartini seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa keberadaan elemen C-MA akan memberikan kontribusi terhadap kenaikan reaktivitas teras, yang akan semakin besar dengan meningkatnya konsentrasi MA, sehingga perlu dilakukan pengurangan / penggantian elemen bahan bakar reaktor Kartini pada ring F dengan elemen grafit ataupun kanal air yang lebih banyak.

Tabel 1. Data Komposisi dari Komponen Bahan Bakar TRIGA Tipe 104

Elemen Bahan Bakar $\rho = 5.99 \text{ g/cc}$	Berat Atom	Fraksi Berat	Rapat Atom (#/barn cm)
U-total	238.029	0.0850	1.2882E-03
U-234	234.040	0.0002	2.5313E-06
U-235	235.043	0.0169	2.5909E-04
U-238	238.050	0.0679	1.0297E-03
Zr	91.224	0.8983	3.6745E-02
H	1.000	0.0167	6.0387E-02
Zr rod	91.224	1.0	4.2252E-02
Komposisi kelongsong bahan bakar (SS-304), $\rho = 7,89 \text{ g/ml}$			
<i>Chromium</i> (Cr)	52.000	6.967E-01	1.7362E-02
<i>Iron</i> (Fe)	55.845	6.967E-01	5.9281E-02
<i>Nickel</i> (Ni)	58.693	9.250E-02	7.4887E-03
<i>Manganese</i> (Mn)	54.938	2.000E-02	1.7299E-03
<i>Carbon-12</i> (C-12)	12.000	8.000E-04	3.1678E-04
Komposisi dari komponen elemen non-bahan bakar			
Kanal Air	18.000	0.1	3.3342E-02
<i>Void</i> /Udara : N	14.007	0.811	4.1844E-05
O	16.000	0.189	8.5369E-06
Elemen Grafit : C	12.011	1.0	8.0228E-02

Tabel 2. Komposisi dan Rapat Atom Dari Komponen Elemen MA

Komposisi	Berat Atom	C = 90 %, MA = 10 %		C = 80%, MA = 20 %		C = 70%, MA = 30 %	
		Fraksi Molar	Rapat Atom (#/barn cm)	Fraksi Molar	Rapat Atom (#/barn cm)	Fraksi Molar	Rapat Atom (#/barn cm)
C	12.011	0.9000	7.2206E-02	0.8000	6.4183E-02	0.7000	5.6160E-02
Np	237.000	0.0498	3.9967E-03	0.0996	7.9933E-03	0.1494	1.1990E-02
Am -241	241.000	0.0349	2.8009E-03	0.0698	5.6017E-03	0.1047	8.4026E-03
Am-242	242.000	0.0001	1.1473E-05	0.0003	2.2945E-05	0.0004	3.4418E-05
Am-243	243.000	0.0110	8.8572E-04	0.0221	1.7714E-03	0.0331	2.6572E-03
Cm-244	244.000	0.0037	2.9853E-04	0.0074	5.9706E-04	0.0112	8.9559E-04
Cm-245	245.000	0.0003	2.5914E-05	0.0006	5.1828E-05	0.0010	7.7741E-05
Al	26.982	1.000	6.0266E-02	1.000	6.0266E-02	1.000	6.0266E-02
Lanjutan		C = 60 %, MA = 40 %		C = 50%, MA = 50 %		C = 40%, MA = 60 %	
C	12.011	0.6000	4.8137E-02	0.5000	4.0114E-02	0.4000	3.2091E-02
Np	237.000	0.1993	1.5987E-02	0.2491	1.9983E-02	0.2989	2.3980E-02
Am-241	241.000	0.1396	1.1203E-02	0.1746	1.4004E-02	0.2095	1.6805E-02
Am-242	242.000	0.0006	4.5891E-05	0.0007	5.7363E-05	0.0009	6.8836E-05
Am-243	243.000	0.0442	3.5429E-03	0.0552	4.4286E-03	0.0662	5.3143E-03
Cm-244	244.000	0.0149	1.1941E-03	0.0186	1.4927E-03	0.0223	1.7912E-03
Cm-245	245.000	0.0013	1.0366E-04	0.0016	1.2957E-04	0.0019	1.5548E-04
Al	26.982	1.000	6.0266E-02	1.000	6.0266E-02	1.000	6.0266E-02

Tabel 3. Konfigurasi Sistem Teras RADS Untuk Beberapa Variasi Konsentrasi MA

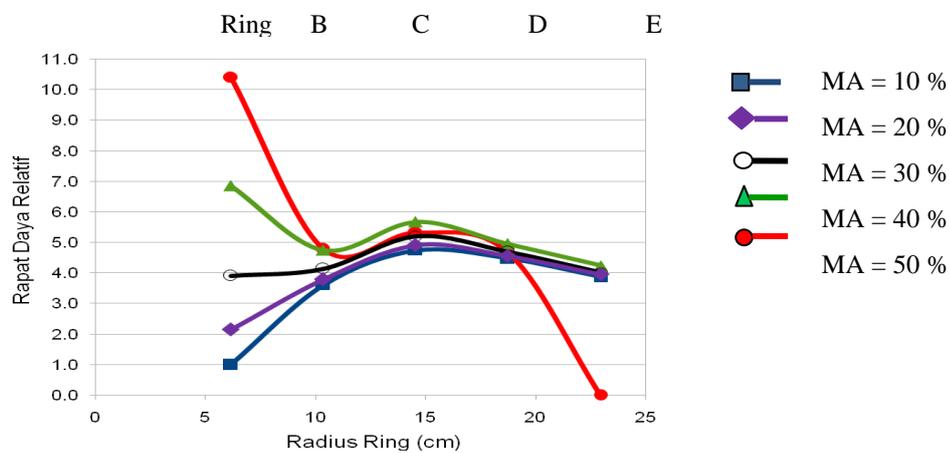
Konsentrasi MA (% molar)	10%	20%	30%	40%	50%
Ring A	VOID	VOID	VOID	VOID	VOID
Ring B	6 MA	6 MA	6 MA	6 MA	6 MA
Ring C	12 bb	12 bb	12 bb	12 bb	12 bb
Ring D	18 bb	18 bb	18 bb	18 bb	18 bb
Ring E	24 bb	24 bb	24 bb	24 bb	24 bb
Ring F (*)	22 bb + 8 grafit	18 bb + 12 grafit	12 bb + 18 grafit	2 bb + 28 grafit	5 grafit + 25 air
Ring F (**)	22 bb + 8 grafit	18 bb + 12 grafit	12 bb + 18 grafit	2 bb + 28 grafit	30 (semua) air

(*) → Dengan kavitas udara / Lazy Susan pada bagian reflektor radial
(**) → Tanpa kavitas udara / Lazy Susan pada bagian reflektor radial

Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa untuk konsentrasi MA = 50 %, agar bisa didapatkan nilai k_{eff} sesuai dengan kriteria yang ditetapkan, bisa dilakukan dengan

menggantikan seluruh posisi elemen bakar pada ring F dengan air (tanpa elemen bahan bakar maupun elemen grafit). Gambar 5 memperlihatkan distribusi rapat daya pada setiap ring B hingga ring F untuk beberapa variasi konsentrasi MA. Terlihat adanya kecenderungan kenaikan rapat daya pada ring B (yang berisi MA) dengan meningkatnya konsentrasi MA. Untuk konsentrasi MA hingga 30 % maka rapat daya pada ring B masih lebih rendah dari rapat daya pada ring diluarnya, dimana nilai tertinggi terjadi pada ring D.

Untuk konsentrasi MA sebesar 40 % maka rapat daya pada ring B telah melampaui nilai pada ring di luarnya namun masih belum terlalu tinggi perbedaannya terhadap nilai pada ring D yaitu sekitar 1,2 kalinya, dan pada konsentrasi 50 % terlihat perbedaan tersebut sudah cukup tinggi yang hampir 2 kali dari rapat daya pada ring D. Dengan demikian jumlah muatan bahan bakar reaktor Kartini yang diperlukan akan semakin berkurang dan laju reaksi transmudasi MA juga semakin meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi MA untuk mendapatkan tingkat subkritikalitas yang ditetapkan. Distribusi rapat daya relatif pada arah aksial untuk seluruh konsentrasi MA yang sama besarnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



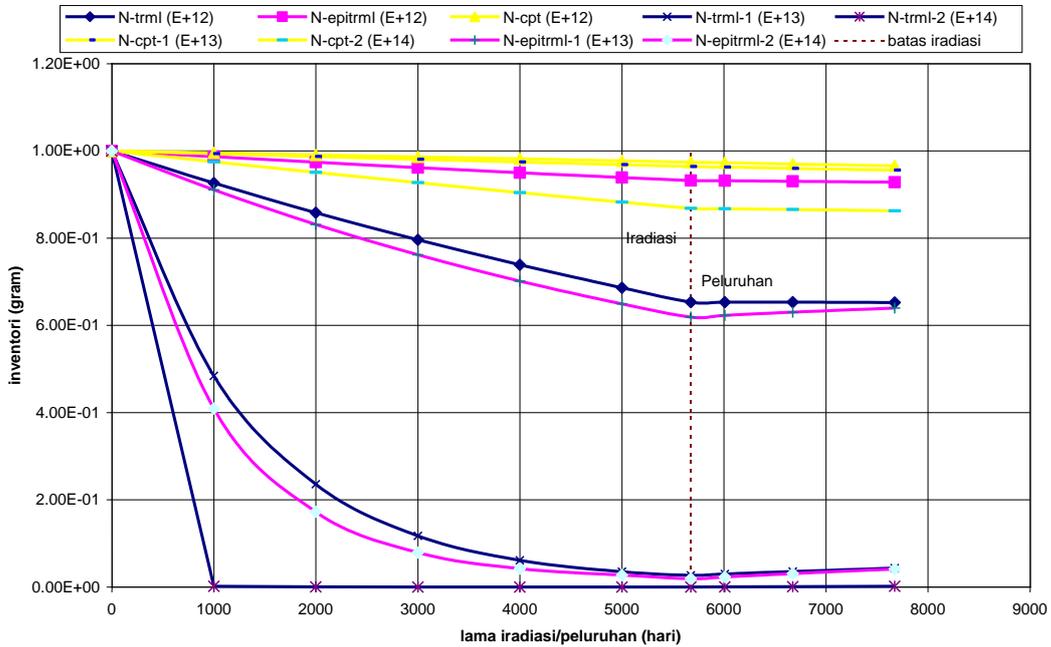
Gambar 5. Distribusi Rapat Daya Relatif Pada Ring Teras RADS Sebagai Fungsi Konsentrasi MA.

3.2. Hasil Perhitungan Transmutasi Limbah Nuklir (MA)

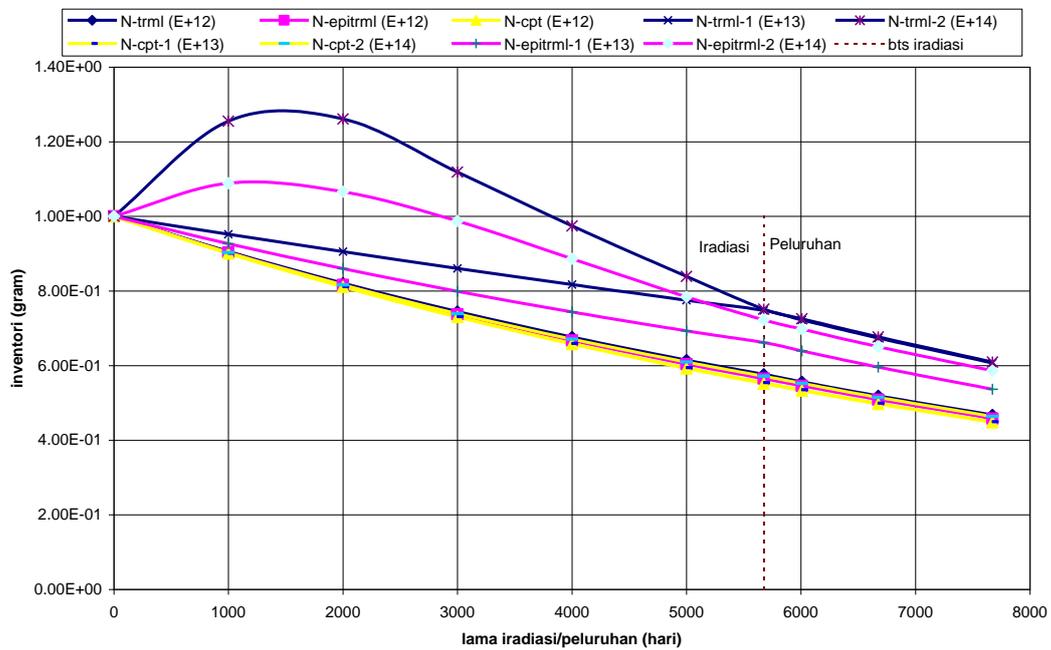
Perhitungan simulasi transmudasi inti dilakukan menggunakan program komputer ORIGEN2. Kriteria dalam simulasi ditetapkan sebagai berikut: nuklida Np^{237} , Am^{241} , Am^{243} , Cm^{244} , adalah kelompok aktinida yang dikategorikan limbah dengan umur paro panjang dan keberadaannya dalam kesetimbangan sebagai limbah tidak dapat saling dipisahkan. Dalam kajian transmudasi aktinida ini dianggap nuklida tersebut masing-masing mempunyai inventori 1 gram sebagai limbah aktinida dan diiradiasi/dibakar dalam reaktor nuklir dengan fluks dan energi neutronnya disimulasikan bervariasi meliputi neutron cepat, epitermal, dan neutron termal. Fluks neutron disimulasikan dalam tiga variasi yaitu 10^{12} n/cm² s, 10^{13} n/cm² s dan 10^{14} n/cm² s. Sedangkan lama waktu iradiasi atau waktu operasi disimulasikan 5675 hari dan lama peluruhan 999 hari. Hasil perhitungan disajikan pada Gambar 6 s/d Gambar 9.

Berdasarkan hasil perhitungan simulasi dari keempat radionuklida tersebut yang paling banyak mengalami transmudasi adalah Am^{241} (lihat Gambar 7) yaitu dengan laju transmudasi 50% selama 1000 hari operasi pada tingkat fluks neutron termal 10^{13} n/cm² s, dan akan mencapai 100% pada tingkat fluks neutron 10^{14} n/cm² s. Dengan kondisi waktu operasi dan tingkat fluks neutron yang sama seperti di atas, maka dapat dilihat yang paling lambat

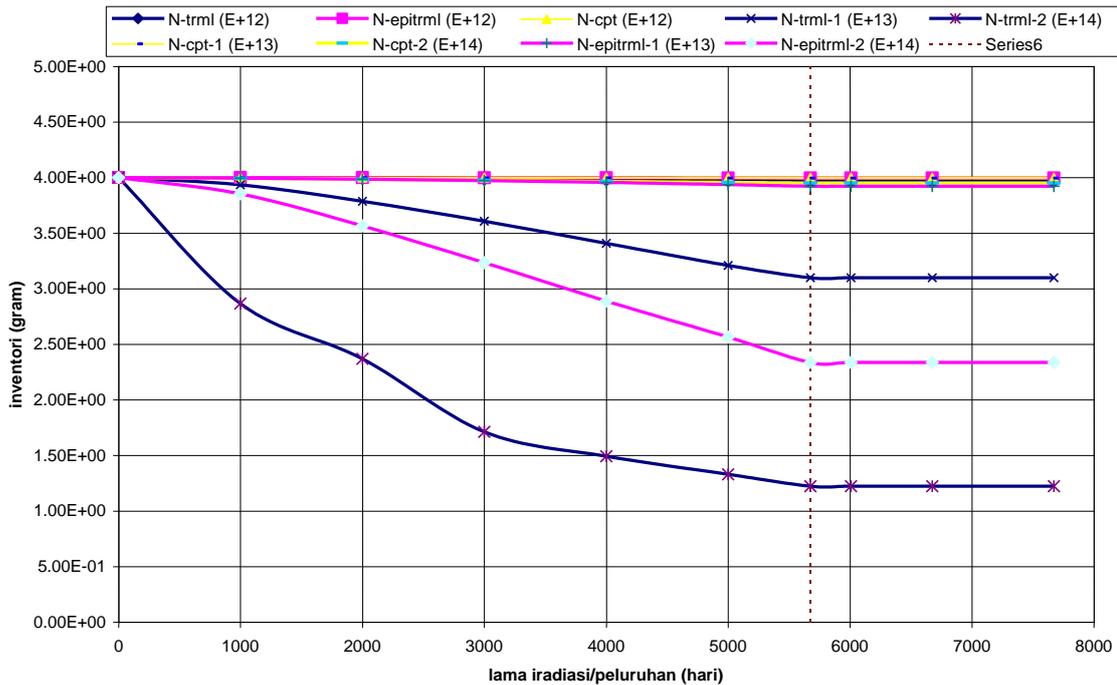
atau sedikit mengalami transmutasi adalah Cm^{244} yaitu hanya 0,5%, bahkan pada tingkat fluks neutron $10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ inventori Cm^{244} cenderung bertambah kemudian berkurang lagi setelah melewati waktu operasi 1400 hari (lihat Gambar 7).



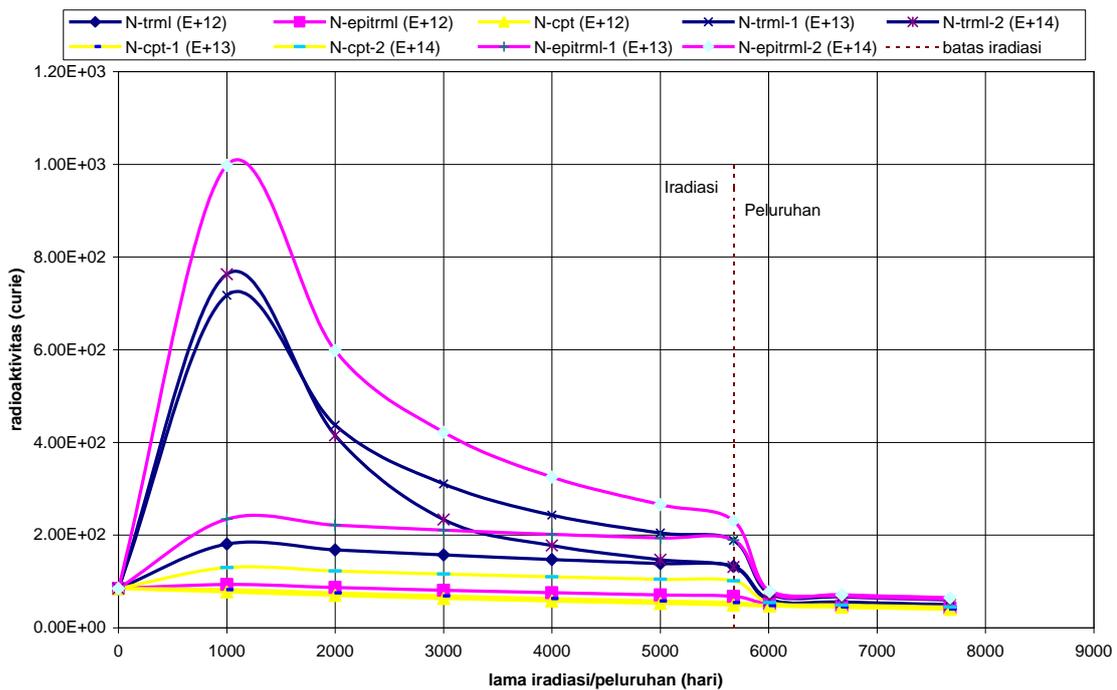
Gambar 6. Grafik Pembakaran/Iradiasi Nuklida Am^{241} Sebagai Fungsi Energi dan Fluks Neutron.



Gambar 7. Grafik Pembakaran/Iradiasi Nuklida Cm^{244} Sebagai Fungsi Energi dan Fluks Neutron.



Gambar 8. Grafik Pembakaran/Iradiasi Nuklida Total Np^{237} , Am^{241} , Am^{243} dan Cm^{244} Sebagai Fungsi Energi dan Fluks Neutron.



Gambar 9. Grafik Pembakaran/Iradiasi Nuklida Total Np^{237} , Am^{241} , Am^{243} dan Cm^{244} Sebagai Fungsi Energi dan Fluks Neutron.

Secara keseluruhan keempat radionuklida limbah tersebut akan mengalami transmudasi rata-rata 32% selama 1000 hari operasi pada tingkat fluks neutron termal 10^{14} n/cm²s (lihat Gambar 8). Demikian pula tingkat radioaktivitas total aktinida minor tersebut mula-mula akan naik mencapai puncaknya selama operasi 1100 hari, kemudian menurun

dan jika operasi dihentikan, tingkat radioaktivitasnya akan kembali ke tingkat semula dalam waktu 350 hari (Gambar 9).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa model teras reaktor SS-RADS berbasis reaktor Kartini adalah berbentuk silinder berisi aktinida minor (MA) yang dikelilingi oleh bahan bakar reaktor Kartini. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa keberadaan unsur MA akan memberikan reaktivitas positif yang nilainya semakin besar dengan meningkatnya konsentrasi MA. Sedangkan berdasarkan hasil perhitungan simulasi pembakaran/iradiasi limbah nuklir MA dapat disimpulkan bahwa transmutasi inti / pembakaran limbah terjadi paling efektif pada reaktor termal (dengan neutron termal). Sekaligus pembakaran limbah ini juga dapat menghasilkan penurunan radioaktif limbah yang teriradiasi. Secara keseluruhan limbah MA tersebut akan mengalami transmutasi rata-rata 32% selama 1000 hari operasi pada tingkat fluks neutron termal 10^{14} n/cm² s. Dapat disimpulkan bahwa sistem SS-RADS berbasis reaktor Kartini hanya akan memiliki kapabilitas transmutasi limbah nuklir yang cukup baik jika tingkat fluks neutron termalnya bisa mencapai orde 10^{13} n/cm² s.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A.M. KOZODAEV, *et all*, Construction of Small-Scale Multipurpose ADS at ITEP, Proc. Of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001.
- [2]. H. AÏT ABDERRAHIM, *et-all*, MYRRHA: A Multipurpose Accelerator-Driven System for R&D Pre-Design Study Completion, Report SCK•CEN, Boeretang 200, B-2400 Mol (Belgium), 2002.
- [3]. EDI TRIYONO B.S., SYARIP, "Analisis Perhitungan Transmutasi Limbah Aktinida Minor: Kajian Awal SS-ADS Berbasis Reaktor Kartini", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah IX, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN dan Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, ISSN 1410-6086, Jakarta, Desember 2011.
- [4]. SILAHUDIN, SYARIP AND SUPRAPTO, Progress and Status Relating to Small Scale Accelerator Driven System (SS-ADS) Development in Indonesia, paper presented at the 8th International Workshop on Asian Network for ADS and Nuclear Transmutation Technology, Sungkyunkwan University Suwon Republic of Korea, 25-26 October 2010.
- [5]. ZUHAIR DAN MAMAN MULYAMAN, Analisis Perhitungan Laju Transmutasi Plutonium dan Aktinida Minor di Reaktor Triga-JAERI Dengan ADS, J. Tek. Reaktor. Nukl., ISSN 1411-240X Vol. 9 No. 1, Februari 2007.
- [6]. DJATI H. SALIMY, ATW (Accelerator Driven Transmutation Waste) Sebagai Teknologi Alternatif Penutupan Daur Bahan Bakar Nuklir, JFN, Vol.1 No.1, ISSN 1978-8738, Mei 2007
- [7]. DOKUMEN LAPORAN TEKNIS "SS-ADS Bebas Reaktor Kartini", Rev. 1, PTAPB BATAN Yogyakarta, 2011.
- [8]. E.M. GONZALES, Nuclear Waste Transmutation, CIEMAT, European Physics Society: Nuclear Physics Board, Valencia, May, 1st 2004.