

PERHITUNGAN REAKTIVITAS Xe & Sm TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al KERAPATAN 5,2 gU/cc

Jati Susilo, Lily Suparlina, Tukiran Surbakti
Pusat Teknologi Reaktor Dan Keselamatan Nuklir

ABSTRAK

PERHITUNGAN REAKTIVITAS Xe & Sm TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al KERAPATAN 5,2 gU/cc. Sebagai data dukung jika dilakukan konversi bahan bakar U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat yang lebih tinggi, maka telah dilakukan perhitungan beberapa parameter neutronik teras RSG-GAS. Salah satunya adalah reaktivitas xenon. Penelitian sebelumnya telah dilakukan perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al tingkat muat ~ 4,8 gU/cc. Dalam makalah ini, dilakukan perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al tingkat muat 5,2 gU/cc pada daya operasi reaktor 15 MW dan 30 MW. Perhitungan dilakukan dengan paket program XenSam. Hasil perhitungan reaktivitas xenon setimbang teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al tingkat muat 5,2 gU/cc pada daya 15MW dan 30MW tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan yaitu 2,6090% dan 2,9139%, atau selisih 0,305%. Kenaikan daya operasi reaktor sangat berpengaruh terhadap reaktivitas puncak xenon setelah reaktor shut-down yaitu 5,3242% (15MW) dan 9,6433% (30MW), atau mengalami perbedaan 4,3191%. Pada daya yang sama kenaikan tingkat muat bahan bakar U_3Si_2 -Al sangat berpengaruh terhadap semakin kecilnya reaktivitas puncak xenon setelah reaktor shut-down. Teras reaktor RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al tingkat muat 5,2 gU/cc tidak memiliki waktu mati reaktor (dead time of reactor).

Kata kunci : reaktivitas xenon, Xenon-135, Samarium-149, XenSam, U_3Si_2 -Al 5,2 gU/cc

ABSTRACT

CALCULATION OF Xe & Sm POISONING REACTIVITY FOR RSG-GAS FUELLED WITH U_3Si_2 -Al 5.2 gU/CC DENSITY. If The fuel of RSG-GAS will be converted to silicide fuel with high density as support data then some neutronic parameter data was calculated. One important neutronic parameter of RSG-GAS fuelled U_3Si_2 -Al with high density is value of xenon reactivity. In the research before, xenon reactivity of RSG-GAS fuelled U_3Si_2 -Al ~4.80 gU/cc has been done. In this research, the calculation was performed for xenon reactivity of RSG-GAS fuelled U_3Si_2 -Al 5.20 gU/cc density at the power level 15 MW and 30 MW using XenSam computer code. The calculation results showed that value of equilibrium xenon reactivity RSG-GAS fuelled U_3Si_2 -Al 5.20 gU/cc density have not significant different that are about 2,6090% and 2.9139% or deviation about 0.305%. Increasing in power of reactor is very influence to peak of xenon reactivity after reactor shut-down, that are from 5,3242% (15MW) to 9,6433% or deviation about 4.3191%.. In the same power level, increase of U_3Si_2 -Al fuel density is very influence decrease to value peak of xenon reactivity. RSG-GAS core fuelled by U_3Si_2 -Al with 5.20 gU/cc density that operated at the 15 MW and 30 MW power level have not dead time of reactor.

Key words ; reactivity, xenon-135, Samarium-149, XenSam, U_3Si_2 -Al 5,2 gU/cc

PENDAHULUAN

Peningkatan unjuk kerja teras RSG-GAS dapat dilakukan dengan cara memperpanjang siklus operasi melalui penggunaan bahan bakar U_3Si_2 -Al tingkat muat tinggi. Batasan tingkat muat bahan bakar U_3Si_2 -Al yang telah dilisensikan oleh USNRC (*United State Nuclear Regulatory Commission*) sebagai standard LEU (*Low Enriched Uranium*) adalah sebesar 4,8 gU/cc. Namun demikian bahan bakar U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat 5,2 gU/cc

masih dapat dipabrikasi¹⁾. Sebagai data dukung jika suatu saat nanti konversi bahan bakar dengan tingkat muat yang lebih tinggi direalisasikan, maka telah disiapkan data-data hasil perhitungan berupa parameter neutronik teras RSG-GAS. Salah satunya adalah reaktivitas xenon. Reaktivitas xenon adalah reaktivitas negatif yang disebabkan oleh adanya atom Xenon-135 (Xe) dan Samarium-149 (Sm) hasil reaksi fisi. Atom-atom tersebut mempunyai tampang lintang serapan terhadap neutron termal yang sangat besar sehingga mengakibatkan dampak negatif terhadap reaktivitas lebih teras.

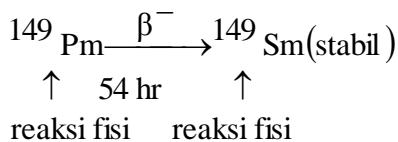
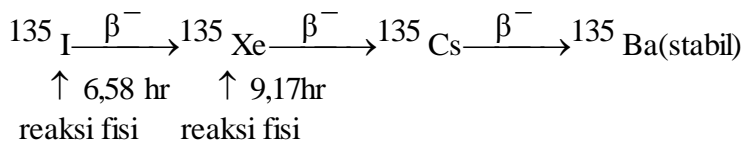
Dalam penelitian sebelumnya telah dilakukan perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat $\sim 4,80$ gU/cc pada daya 15 MW dan 30 MW^{2,3)}. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa pada daya yang sama semakin besar tingkat muat bahan bakar yang digunakan oleh RSG-GAS, maka akan menghasilkan reaktivitas xenon setimbang yang hampir sama dan harga reaktivitas puncak xenon setelah *shut-down* yang semakin kecil. Untuk teras RSG-GAS yang menggunakan bahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc diperkirakan juga akan mengalami fenomena perubahan reaktivitas xenon yang serupa. Namun demikian besarnya reaktivitas xenon tersebut perlu diketahui sebagai data dukung.

Dalam penelitian ini, dilakukan perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc pada daya 15 MW dan 30 MW. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan paket program XenSam⁴⁾. Sedangkan inputan yang diperlukan dalam perhitungan tersebut yaitu yang berupa harga γ , Σ_{fisi} , Σ_{abs} , σ_{abs} dan ϕ didapatkan dari hasil perhitungan neutronik teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc menggunakan paket program SRAC-ASMBURN⁵⁾. Parameter yang dianalisa meliputi harga reaktivitas xenon pada kondisi setimbang, setelah reaktor *shut down* dan setelah peluruhan xenon. Dari hasil perhitungan diharapkan dapat diketahui karakteristik reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc.

TEORI DAN METODOLOGI

Reaktivitas Racun Xe & Sm ^[6,7,8]

Proses pembentukan atom Xe dan Sm dapat ditunjukkan dalam reaksi berantai dibawah ini.



Sedangkan besarnya konsentrasi atom Xe dan Sm pada saat t detik dapat ditunjukkan dalam persamaan berikut;

$$\begin{aligned}
 \text{Xe}(t) = & \frac{(\gamma_{\text{I}} + \gamma_{\text{Xe}})\Sigma_f\Phi_0}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}}\Phi_0} \left[1 - \exp\left(-(\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}}\Phi_0) \cdot t\right) \right] \\
 & + \frac{\gamma_{\text{I}}\Sigma_f\Phi_0}{-\lambda_{\text{I}} + \lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}}\Phi_0} \left[\exp\left(-(\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}}\Phi_0) \cdot t\right) - \exp(-\lambda_{\text{I}} \cdot t) \right] \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Sm}(t) = & \frac{(\gamma_{\text{Pm}} + \gamma_{\text{Sm}})\Sigma_f\Phi_0}{\lambda_{\text{Sm}} + \sigma_a^{\text{Sm}}\Phi_0} \left[1 - \exp\left(-(\lambda_{\text{Sm}} + \sigma_a^{\text{Sm}}\Phi_0) \cdot t\right) \right] \\
 & + \frac{\gamma_{\text{Pm}}\Sigma_f\Phi_0}{-\lambda_{\text{I}} + \lambda_{\text{Sm}} + \sigma_a^{\text{Sm}}\Phi_0} \left[\exp\left(-(\lambda_{\text{Sm}} + \sigma_a^{\text{Sm}}\Phi_0) \cdot t\right) - \exp(-\lambda_{\text{Pm}} \cdot t) \right] \dots\dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

Untuk konsentrasi Xe dan Sm kondisi setimbang dengan waktu $t=\infty$, maka diperoleh persamaan berikut ini;

$$\text{Xe}_{\infty} = \frac{(\gamma_{\text{I}} + \gamma_{\text{Xe}})\Sigma_f\Phi_0}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}}\Phi_0} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Sm}_{\infty} = \frac{\gamma_{\text{Pm}}\Sigma_f\Phi_0}{\sigma_a^{\text{Sm}}} \dots\dots\dots(4)$$

Besarnya konsentrasi atom Xe dan Sm setelah reaktor padam adalah

$$\text{Xe}(t) = \text{Xe}_{\infty} \exp(-\lambda_{\text{Xe}} \cdot t) + \frac{\lambda_{\text{I}}\text{I}_{\infty}}{\lambda_{\text{I}} - \lambda_{\text{Xe}}} \left[\exp(-\lambda_{\text{Xe}} \cdot t) + \exp(-\lambda_{\text{I}} \cdot t) \right] \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{Sm}(t) = \text{Sm}_{\infty} + \text{Pm}_{\infty} \left[1 - \exp(-\lambda_{\text{Pm}} \cdot t) \right] \dots\dots\dots(6)$$

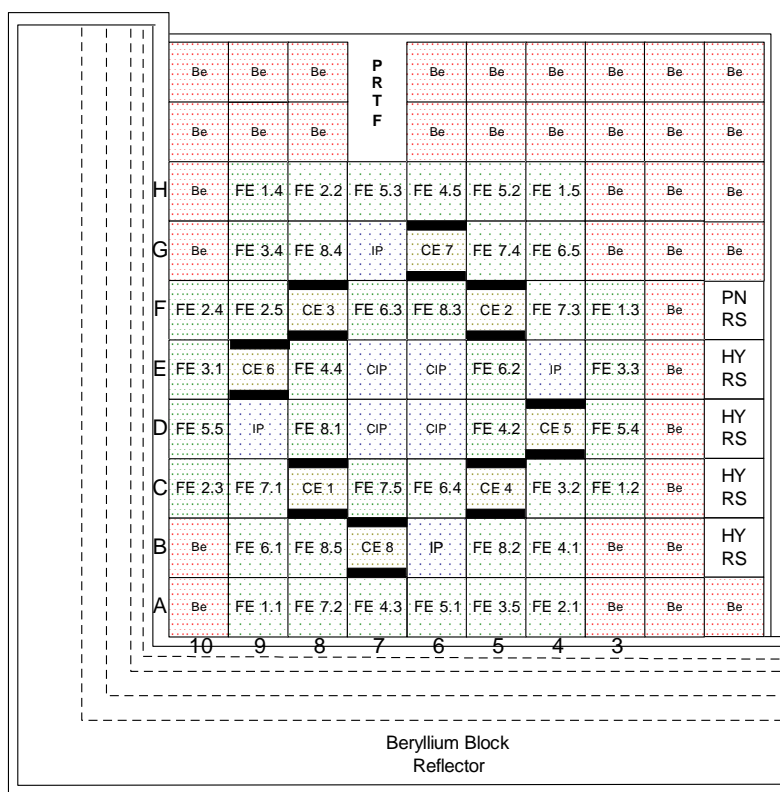
Perubahan harga reaktivitas karena adanya atom Xe atau Sm dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut

$$\Delta\rho = \rho_{\text{Xe,Sm}} \cong -\frac{\Sigma_a^{\text{Xe,Sm}}}{\Sigma_a} = -\frac{\sigma_a^{\text{Xe,Sm}}}{\Sigma_a} \text{Xe}(t), \text{Sm}(t) \dots\dots\dots(7)$$

Metode Perhitungan

Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ tingkat muat 5,2 gU/cc pada daya 15MW dan 30MW.

Konfigurasi teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc diperlihatkan pada Gambar 1. Komposisi teras tersebut sama dengan teras setimbang saat ini yang menggunakan bahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 2,98 gU/cc, hanya bahan bakarnya saja yang diganti dengan U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc. Perhitungan neutronik teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc dilakukan pada daya 15 MW dan 30 MW menggunakan paket program SRAC-ASMBURN^[5]. Perhitungan tersebut untuk mendapatkan data inputan yang diperlukan dalam perhitungan reaktivitas xenon yaitu berupa harga γ , Σ_{fisi} , Σ_{abs} , σ_{abs} dan ϕ . Perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc dilakukan dengan paket program XenSam^[4]. Asumsi perhitungan adalah teras RSG-GAS beroperasi selama 48 jam dan waktu padam selama 72 jam.



Gambar 1. Konfigurasi teras setimbang RSG-GAS

HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Data keluaran hasil perhitungan neutronik teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc dengan paket program SRAC-ASMBURN yaitu berupa harga γ , Σ_{fisi} , Σ_{abs} , σ_{abs} dan ϕ diperlihatkan pada Tabel 1. Sedangkan harga λ

merupakan konstanta peluruhan yang nilainya sama untuk semua teras juga diperlihatkan pada Tabel 1. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai data inputan dalam perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc pada daya 15 MW dan 30 MW menggunakan paket program XenSam. Hasil perhitungan reaktivitas xenon dengan paket program XenSam akan dijelaskan di bagian bawah antara lain masing-masing besarnya reaktivitas atom Xe, atom Sm dan besarnya reaktivitas xenon (Xe+Sm).

Tabel 1. Data untuk perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2gU/cc

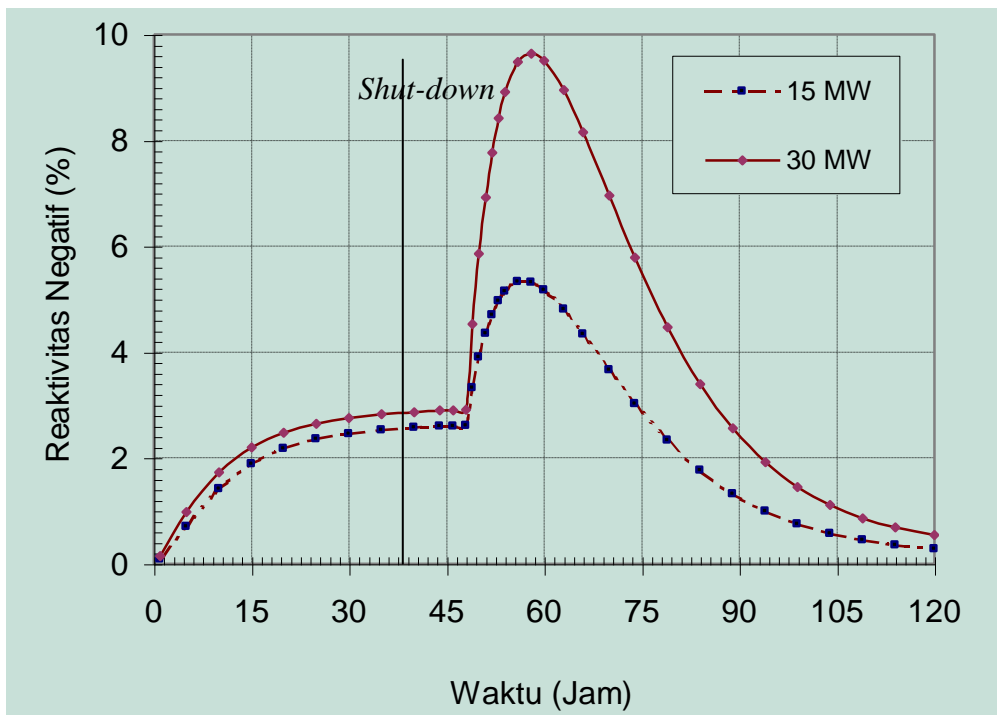
No	Parameter	Unit	Daya teras	
			15 MW	30 MW
1	Σ_{abs}	cm^{-1}	1,2499E-02	1,2378E-02
2	Σ_{fissi}	cm^{-1}	6,1990E-03	6,1394E-03
3	ϕ	$n/(cm^2det)$	3,2556E+13	6,5843E+13
4	λ^I	det^{-1}	2,8500E-05	2,8500E-05
5	λ^{Xe}	det^{-1}	2,0940E-05	2,0940E-05
6	λ^{Sm}	det^{-1}	1,0000E-20	1,0000E-20
7	λ^{Pm}	det^{-1}	3,0000E-06	3,0000E-06
8	γ^{Xe}	%	3,0886E-03	3,1033E-03
9	γ^I	%	6,3134E-02	6,3140E-02
10	γ^{Sm}	%	3,0394E-10	3,0808E-10
11	γ^{Pm}	%	1,0891E-02	1,0897E-02
12	σ_a^{Xe}	barn	2,7764E+06	2,7802E+06
13	σ_a^{Sm}	barn	7,2574E+04	7,2178E+04

reaktivitas lebih (ρ_{ex}) BOC = 12,58 % $\Delta k/k$

Reaktivitas atom Xe

Gambar 2 menunjukkan perubahan reaktivitas atom Xe teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc akibat perbedaan daya operasi antara 15 MW dan 30 MW. Kenaikan daya operasi reaktor mengakibatkan kenaikan reaktivitas atom Xe setimbang sebesar 0,3049%, puncak Xe 4,3165% dan peluruhan Xe sebesar 0,2641%. Dengan kata lain bahwa teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc juga tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan untuk harga reaktivitas atom Xe setimbang. Sedangkan untuk reaktivitas puncak atom Xe akan semakin besar jika daya yang dibangkitkan semakin besar. Besarnya reaktivitas puncak Xe selain dipengaruhi oleh konsentrasi atom Xe juga oleh peluruhan atom I saat reaktor *shut-down*. Karena pada daya

teras reaktor yang lebih tinggi akan menghasilkan fluks neutron termal yang semakin besar, maka hal tersebut akan menyebabkan semakin besarnya reaktivitas puncak Xe. Sedangkan reaktivitas peluruhan atom Xe setelah reaktor *shut-down* selama 72 jam masing-masing adalah sebesar 0,182 % dan 0,463 %. Dari urain tersebut dapat disimpulkan bahwa besarnya daya operasi sangat berpengaruh terhadap besarnya reaktivitas puncak atom Xe setelah reaktor *shut-down*.



Gambar 2. Reaktivitas Xe teras U_3Si_2-Al 5,2 gU/cc RSG-GAS

Tabel 2. Reaktivitas atom Xe teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al 5,2 gU/cc

Daya teras	MW	15	30	Selisih
Kondisi atom Xe :		Reaktivitas negatif Xe:		
1. Xe setimbang	%	2,5680	2,8413	0,2733
2. Puncak Xe	%	5,286	9,5365	4,2505
	(jam)	8,80	9,92	1,12
3. Peluruhan Xe	%	0,1476	0,2885	0,1409

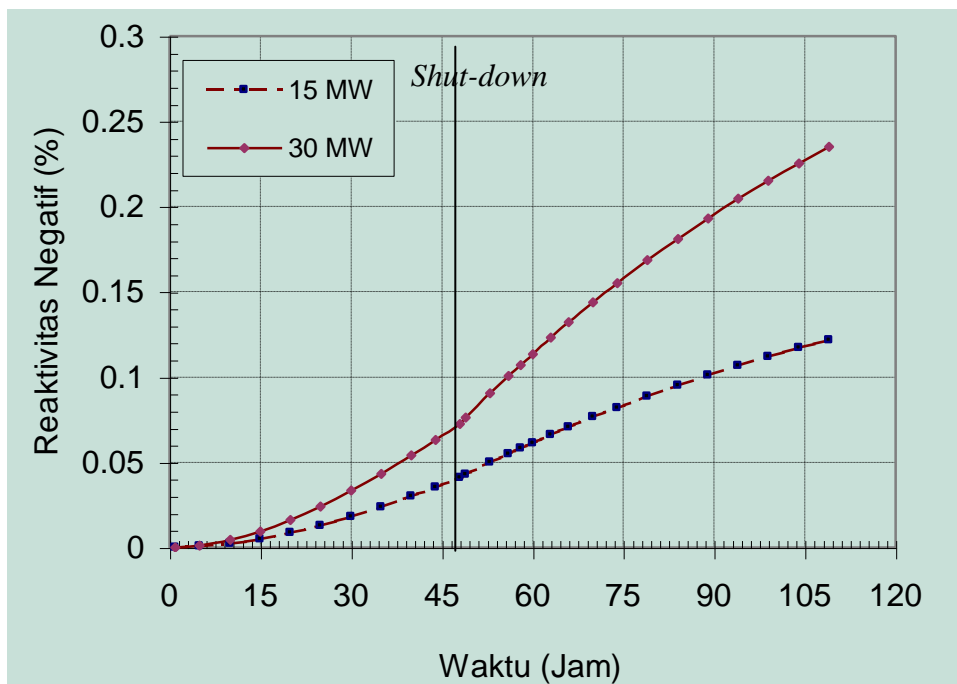
Reaktivitas atom Sm

Gambar 3 menunjukkan perubahan reaktivitas atom Sm teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc pada daya 15 MW dan 30 MW. Berbeda halnya dengan reaktivitas atom Xe, atom Sm sejak dari awal operasi sampai setelah reaktor *shut-*

down menunjukkan peningkatan nilai reaktivitas-nya. Hal tersebut disebabkan karena atom Sm merupakan atom yang stabil. Sehingga setelah reaktor *shut-down* tidak akan terjadi peluruhan atom tersebut, tetapi yang terjadi adalah peluruhan atom Pm menjadi atom Sm, sehingga nilai reaktivitasnya juga akan semakin besar. Pada daya 30 MW reaktivitas atom Sm menunjukkan harga yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan teras yang beroperasi pada daya 15 MW. Hal tersebut juga disebabkan karena harga rata-rata fluks thermal yang semakin besar dengan kenaikan daya operasi. Dari Tabel 2 dan 3 menunjukkan bahwa jika dibandingkan dengan reaktivitas atom Xe, maka nilai reaktivitas atom Sm sangat kecil baik saat operasi maupun setelah reaktor *shut-down*. Hal tersebut disebabkan karena perbedaan besarnya tampang lintang serapan terhadap neutron termal atom-atom tersebut yaitu masing-masing $2,65 \times 10^6$ barns (atom Xe-135) dan $5,85 \times 10^4$ barns (atom Sm-149).

Tabel 3. Reaktivitas Sm teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al 5,2 gU/cc

Daya teras	MW	15	30	Selisih
Kondisi atom Xe :		Reaktivitas negatif Sm:		
1. Xe setimbang	%	0,0411	0,0726	0,0315
2. Puncak Xe	%	0,0562	0,1068	0,0506
3. Peluruhan Xe	%	0,1315	0,2547	0,1232



Gambar 3. Reaktivitas Sm teras U_3Si_2-Al 5,2 gU/cc RSG-GAS

Reaktivitas xenon (Xe+Sm)

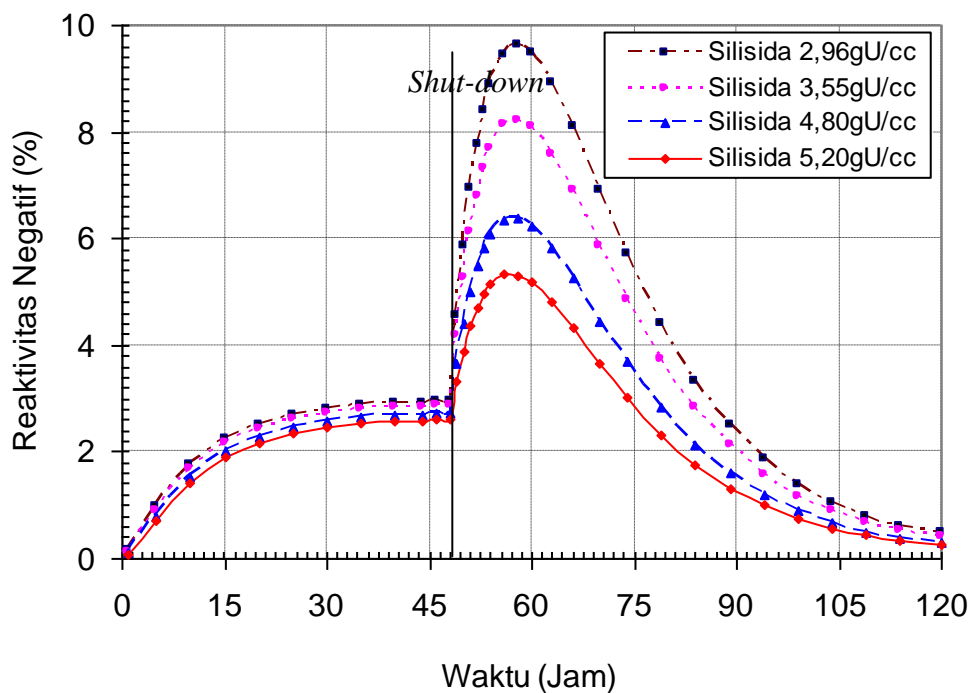
Tabel 4 menunjukkan perbandingan harga total reaktivitas atom Sm dan atom Xe atau disebut dengan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc pada daya 15 MW dan 30 MW serta selisih keduanya. Pada kondisi atom Xe setimbang, besarnya masing-masing reaktivitas xenon adalah 2,6090 % dan 2,9139 % atau mengalami kenaikan sebesar 0,3049%. Hal tersebut menunjukkan bahwa besarnya daya operasi pada teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc tidak menimbulkan perbedaan reaktivitas xenon setimbang yang signifikan. Sedangkan besarnya reaktivitas puncak xenon setelah reaktor *shut-down* masing-masing adalah sebesar 5,3242 % dan 9,6433% atau mengalami kenaikan yang cukup signifikan sebesar 4,3191%. Jika reaktivitas lebih teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc adalah 12,58%, maka teras tersebut tidak akan mempunyai waktu mati reaktor baik pada daya 15 MW maupun 30 MW. Hal tersebut disebabkan karena reaktivitas puncak xenon setelah reaktor *shut-down* lebih kecil dari reaktivitas lebih teras saat BOC. Kenaikan daya operasi dari 15 MW menjadi 30 MW sedikit berpengaruh terhadap reaktivitas peluruhan xenon, atau mengalami kenaikan sebesar 0,261%.

Tabel 4. Reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al 5,2 gU/cc

Daya teras	MW	15	30	Selisih
Kondisi atom Xe :		Total reaktivitas negatif xenon Xe+Sm):		
1. Xe setimbang	%	2,6090	2,9139	0,3049
2. Puncak Xe	%	5,3242	9,6433	4,3191
3. Peluruhan Xe	%	0,2791	0,5432	0,2641

Gambar 4. menunjukkan perubahan reaktivitas xenon terhadap waktu teras RSG-GAS akibat perbedaan tingkat muat bahan bakar U_3Si_2-Al yang digunakan yaitu dari 2,96 gU/cc, 3,55 gU/cc, 4,8 gU/cc sampai 5,2 gU/cc. Besarnya reaktivitas xenon saat setimbang berturut-turut sebesar 2,9476%, 2,8663%, 2,7157% dan 2,6090%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada daya yang sama reaktivitas xenon setimbang akan menjadi sedikit lebih kecil, tetapi tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Sedangkan besarnya reaktivitas puncak xenon dan waktu pencapaian-nya setelah reaktor *shut-down* adalah berturut-turut 9,6089% (10jam), 8,2268% (10 jam), 6,3802% (10jam) dan 5,3418% (9jam). Hal tersebut menunjukkan bahwa besarnya reaktivitas puncak xenon mengalami penurunan yang berarti dengan semakin besarnya tingkat muat bahan bakar, sedangkan waktu pencapaian-nya hampir sama seluruhnya yaitu sekitar 10 jam setelah reaktor *shut-*

down. Besarnya reaktivitas xenon setelah peluruhan selama 72 jam adalah berturut-turut sebesar 0,4673%, 0,3989%, 0,2951%, dan 0,2791%. Seperti halnya reaktivitas xenon setimbang, peluruhan xenon juga menunjukkan harga yang semakin kecil dengan semakin besarnya tingkat muat bahan bakar U_3Si_2-Al tetapi tidak mengalami perbedaan yang signifikan.



Gambar 4. Perubahan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al pada daya 15 MW

KESIMPULAN

Telah dilakukan perhitungan reaktivitas xenon teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc menggunakan paket program XenSam. Reaktivitas xenon teras tersebut menunjukkan karakteristik yang serupa dengan teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat yang lebih rendah. Yaitu reaktivitas xenon setimbang tidak mengalami perubahan yang signifikan pada daya yang 15MW dan 30 MW. Reaktivitas puncak xenon menunjukkan harga yang semakin kecil dengan penurunan daya reaktor. Sedangkan kenaikan tingkat muat bahan bakar U_3Si_2-Al memberikan pengaruh yang signifikan terhadap semakin kecilnya reaktivitas puncak xenon. Sehingga pada teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat 5,2 gU/cc yang dioperasikan pada daya 15 MW maupun 30 MW tidak memiliki waktu mati reaktor (*dead time of reactor*).

DAFTAR PUSTAKA

1. S. SOENTONO, dkk., "Pengembangan Elemen Bakar UxSiy Menggunakan Jalur Produksi UAI_x", Prosiding Seminar Teknologi & Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, PPTA-Serpong, 9-10 Februari 1993.
2. Jati S. dkk., "Analisis Reaktivitas Racun Xe Dan Sm Teras Silisida 4,8 gU/CC RSG-GAS Pada Daya 15 & 30 MW, Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Nuklir, 12 Juli 2005, ISSN : 0216-3128.
3. Jati S. dkk., "Perhitungan Reaktivitas Racun Xenon-135 Teras RSG-GAS Berbahan Bakar Silisida", Buletin Reaktor Nuklir TRI DASA MEGA, Volume 3, Nomor 2, Juni 2001, ISSN 1411-240X.
4. R.NABBI, "Experimental Reactor Physics for the Indonesian Research Reactor MPR-30", IAEA, 1989
5. JAERI-Data/Code96-015, "SRAC95; Banyoukakukeisan Kodo Shisutemu", Nihon Genshiryoku Kenkyujyo, 1996 nen 3 gatsu, (in Japanese)
6. J. J. DUDERSTADT, L. J. HAMILTON (FUJITA, NARITA translation), "Genshiro no Riron to Kaiseki", Gendai Kougakusha, 1976 (in Japanese)
7. FUKUTARO ISHIMORI et.all., Nihon Genshiryoku Kenkyūjyo, "Genshiro Kougaku Kouza 3 = Genshiro Butsuri", Baifūkan, 1973 nen 7 gatsu 25 nichu (in Japanese)
8. JOHN R.LAMARSH, "Introduction to NUCLEAR ENGINEERING 2nd Edition", ADDISON-WESLEY, 1983

Keterangan simbol

γ_I	= prosen jumlah atom I yang dihasilkan per fisi
γ_{Xe}	= prosen jumlah atom Xe yang dihasilkan per fisi
γ_{Pm}	= prosen jumlah atom Pm yang dihasilkan per fisi
γ_{Sm}	= prosen jumlah atom Sm yang dihasilkan per fisi
λ_I	= konstanta peluruhan atom I
λ_{Xe}	= konstanta peluruhan atom Xe
λ_{Pm}	= konstanta peluruhan atom Pm
λ_{Sm}	= konstanta peluruhan atom Sm
σ_a^{Xe}	= tampang lintang mikroskopis serapan atom Xe
σ_a^{Sm}	= tampang lintang mikroskopis serapan atom Sm
Σ_{abs}	= tampang lintang makroskopis serapan bahan fissi
ϕ	= fluks neutron termal
Σ_{fisi}	= Tampang lintang makroskopis fissi