

ANALISIS FAKTOR PUNCAK DAYA TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al 4,8 gU/cc DENGAN KAWAT KADMIUM

Jati Susilo, Endiah Pudjihastuti
Pusat Teknologi Reaktor Dan Keselamatan Nuklir

Diterima editor 02 September 2010
Disetujui untuk dipublikasi 23 September 2010

ABSTRAK

ANALISIS FAKTOR PUNCAK DAYA TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR U_3Si_2 -AL 4,8 gU/cc DENGAN KAWAT KADMIUM. Untuk meningkatkan kinerja teras RSG-GAS, maka telah dilakukan penelitian tentang penggunaan bahan bakar U_3Si_2 -Al kerapatan 4,8 gU/cc. Penggunaan bahan bakar tersebut dapat meningkatkan panjang siklus operasi dari 20 menjadi 49 hari. Sehingga reaktor beroperasi lebih efisien. Selain itu juga akan menaikkan reaktivitas lebih teras yang berakibat pada nilai reaktivitas batang kendali saat *one stuck rod* menjadi positif. Hal tersebut dapat diantisipasi dengan cara penambahan kawat kadmium pada kedua sisi tiap-tiap pelat bahan bakar. Untuk teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al kerapatan 4,8 gU/cc maka diperlukan kawat kadmium dengan minimal diameter 0,7 mm. Selain reaktivitas lebih, parameter neutronik lainnya yang perlu diketahui dalam mendesain suatu teras agar tidak terjadi kerusakan bahan bakar adalah nilai faktor puncak daya (*power peaking factor* ppf). Untuk itu, dalam penelitian ini dilakukan perhitungan distribusi faktor daya teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al kerapatan 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium. Perhitungan tersebut dilakukan dengan paket program SRAC modul CITATION. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al kerapatan 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium mempunyai ppf sebesar 1,2225 yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan ppf teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al kerapatan 2,96 gU/cc (1,1642). Dari analisis hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa nilai ppf untuk teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2 -Al kerapatan 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium masih dibawah nilai batas dalam LAK RSG-GAS.

Kata Kunci : faktor puncak daya, kawat kadmium, SRAC

ABSTRACT

ANALYSIS OF POWER PEAKING FACTOR FOR RSG-GAS CORE USING U_3Si_2 -AL 4,8 GU/CC DENSITY FUEL WITH CADMIUM Wire. To upgrade the ability of RSG-GAS core, research about utilization of U_3Si_2 -Al fuel with 4.8 gU/cc density has been done. The using of U_3Si_2 -Al fuel with 4.8 gU/cc density in the RSG-GAS core could increase the operation cycle length from 20 to 29 days. To the reactor can be operated more efficiently. In another side, the effect of high density fuel is the value of control rod reactivity in the one stuck rod condition to be positive caused by increasing core excess reactivity. Those problem has been solved by added cadmium wire at two each side of all the fuel plate. For the RSG-GAS core U_3Si_2 -Al fueled with 4.8 gU/cc density need cadmium wire with minimum diameter about 0.7 mm. Beside excess reactivity, another neutronic parameter that important to observed in the core design in order the fuel damage cannot happen is value of power peaking factor (ppf). Therefore, in this research, the calculation of power factor distribution for RSG-GAS core U_3Si_2 -Al fuel 4,8 gU/cc density with Cd wire has been done by using CITATION module of SRAC code. Calculation result show that the RSG-GAS core U_3Si_2 -Al fuel 4.8 gU/cc density with added cadmium wire at the each side of fuel plate have ppf about 1.2225. Those value only a little bigger compared with ppf for current RSG-GAS core fueled U_3Si_2 -Al with 2,96 gU/cc density, that is 1.1642. From the analysis of calculation result can concluded that the value of ppf for the RSG-GAS core U_3Si_2 -Al fuel 4.8 gU/cc density with added by cadmium wire was still lower than maximum margin value at the design data in the SAR of the RSG-GAS.

Key words ; power peaking factor; cadmium wire, SRAC

PENDAHULUAN

Untuk meningkatkan kinerja teras RSG-GAS, maka telah dilakukan penelitian tentang penggunaan bahan bakar uranium silisida (U_3Si_2-Al) kerapatan 4,8 gU/cc. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan bahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc pada teras RSG-GAS maka akan dapat memperpanjang lamanya siklus operasi reaktor dari 20 menjadi 49 hari[1-2]. Akan tetapi hal tersebut berdampak pada semakin besarnya nilai reaktivitas lebih teras sehingga berakibat tidak terpenuhinya batasan nilai reaktivitas saat kondisi satu batang kendali terbesar gagal masuk atau *'one stuck rod'* [3]. Untuk itu penelitian tentang sistem kendali reaktivitas pada RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc telah dilakukan dengan penambahan 2 batang kendali pengaman (BKP) yang terbuat dari Ag-In-Cd [4]. Dari penelitian tersebut teras telah memenuhi parameter keselamatan sesuai dengan LAK RSG-GAS. Selain itu, telah dilakukan perhitungan untuk menurunkan reaktivitas lebih dengan cara penambahan kawat kadmium pada kedua sisi tiap-tiap pelat bahan bakar-nya [5]. Untuk teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc, maka diperlukan kawat kadmium dengan diameter minimal sebesar 0,7 mm. Sehingga teras tersebut memenuhi syarat batas keselamatan yaitu reaktivitas saat kondisi satu batang kendali terbesar gagal masuk bernilai negatif ($\rho \leq -0,5\% \Delta k/k$).

Parameter neutronik lainnya yang berhubungan dengan keselamatan reaktor dalam mendesain teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium adalah faktor puncak daya (ppf). Nilai ppf tersebut akan digunakan dalam analisis kanal terpanas pada perhitungan termohidraulika yang akan menentukan ketahanan suatu bahan bakar terhadap panas yang dihasilkannya agar tidak terjadi kerusakan saat reaktor dioperasikan.

Dalam makalah ini dilakukan perhitungan ppf dengan menggunakan paket program SRAC[6] modul CITATION dalam bentuk geometri 3 dimensi. Untuk generasi tampang lintang bahan bakar dilakukan perhitungan dengan menggunakan paket program SRAC modul PIJ. Sedangkan untuk generasi tampang lintang material non bahan bakar lainnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan modul ANISN dan modul CITATION.

TEORI & METODOLOGI

Distribusi Faktor Daya[7]

Faktor daya dapat didefinisikan sebagai rapat daya yang dihasilkan oleh suatu bahan bakar dibagi dengan rapat daya rata-rata yang dihasilkan oleh seluruh bahan bakar didalam teras reaktor. Faktor daya suatu bahan bakar P_i dapat ditentukan dengan,

$$P_i = \frac{q_i}{q_{ave}} \quad (1)$$

dengan q_i adalah rapat daya yang ditimbulkan oleh bahan bakar i dalam satuan watt/cc, sedangkan q_{ave} adalah rapat daya rata-rata yang dihasilkan oleh teras reaktor juga dalam satuan Watt/cc. Rapat daya rata-rata dapat dirumuskan dengan,

$$q_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n q_i \quad (2)$$

dengan, N = jumlah bahan bakar didalam teras reaktor, n = bahan bakar ke- N

Sedangkan faktor puncak daya (*power peaking factor*, ppf) merupakan faktor daya tertinggi yang dihasilkan oleh suatu bahan bakar didalam teras dan dapat didefinisikan sebagai rapat daya maksimum q_{maks} dibagi dengan rapat daya rata-rata q_{ave} . Faktor puncak daya ppf dapat ditentukan dengan,

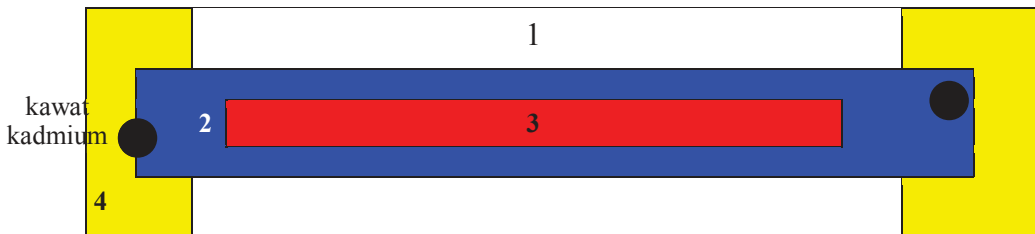
$$ppf = \frac{q_{max}}{q_{ave}} \quad (3)$$

Dalam penelitian ini dilakukan analisis faktor daya teras RSG-GAS secara radial dan aksial. Untuk memperoleh karakteristik distribusi faktor daya teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc yang telah dipasang kawat kadmium, maka dilakukan perbandingan dengan distribusi rapat daya teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 2,96 gU/cc. Perhitungan teras tersebut dilakukan dalam bentuk geometri 3 dimensi menggunakan paket program SRAC modul CITATION. Sebagai salah satu inputan yaitu pemodelan kisi sel bahan bakar, elemen bahan bakar standar dan elemen kendali, material non bahan bakar lainnya dan teras reaktor yang akan dijelaskan sebagai berikut ini.

Pemodelan Bahan Bakar Teras RSG-GAS

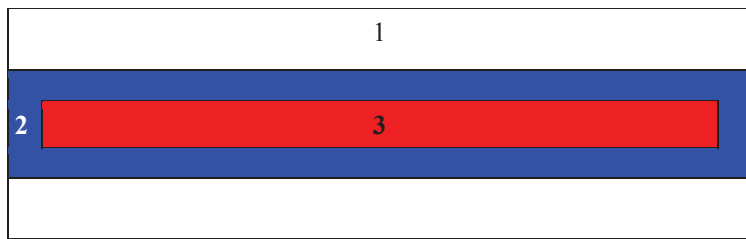
Elemen bahan bakar RSG-GAS yang dihitung tersusun dari 21 pelat bahan bakar U_3Si_2-Al dengan pengayaan 19,75 wt% dan kerapatan uranium 4,8 gU/cc dengan nominal masa U-235 pada tiap elemen bahan bakar sebesar 400 g. Masing-masing pelat bahan bakar dipasangkan pada rak bahan bakar dikedua sisi-nya, dengan disela-sela pelat terdapat air ringan (H_2O) yang berfungsi selain sebagai moderator juga sebagai pendingin. Ukuran dimensi penampang satu elemen bahan bakar adalah panjang 8,1 cm dan lebar 7,71 cm, dengan panjang rak sebelah kiri kanan bahan bakar adalah 8,05 cm dan lebar 0,45 cm.

Elemen kendali pada dasarnya sama dengan elemen bahan bakar, hanya saja 3 pelat bahan bakar pada kedua sisi terluar dipindahkan untuk ruang pergerakan bilah penyerap. Sehingga elemen kendali hanya mempunyai 15 pelat bahan bakar. Sedangkan bahan penyerap pada elemen kendali terbuat dari AgInCd dengan perbandingan berat 80%:15%:5%. Pada saat *full-up* batang kendali, maka posisi bahan penyerap tersebut digantikan dengan air ringan (H_2O). Panjang bahan penyerap, tinggi aktif elemen bahan bakar dan tinggi elemen kendali adalah 60 cm.



Keterangan ; 1. H₂O, 2.Kelongsong, 3. Meat bahan bakar, 4. Rak bahan bakar

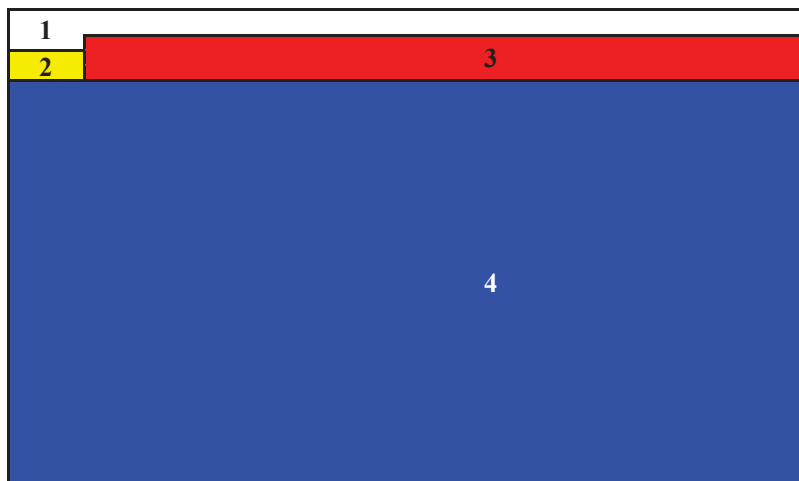
Gambar 1. Pemodelan kisi sel bahan bakar dengan *side plate*



Keterangan ; 1. H₂O, 2. Kelongsong, 3. Meat bahan bakar,

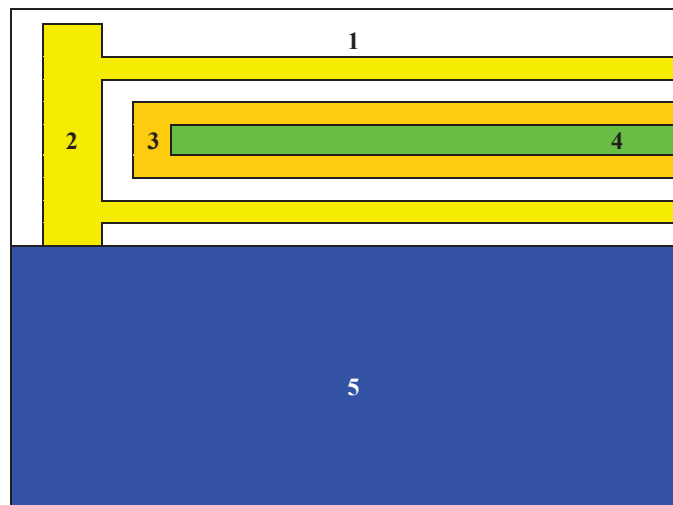
Gambar 2. Pemodelan kisi sel bahan bakar tanpa *side plate*

Sebagai persiapan data tampang lintang elemen bahan bakar dan elemen kendali RSG-GAS, maka terlebih dahulu dilakukan perhitungan kisi sel bahan bakar dengan paket program SRAC modul PIJ. Pemodelan kisi sel bahan bakar dilakukan dalam 2 bentuk yaitu kisi sel 1 dan kisi sel 2. Kisi sel 1 seperti ditunjukkan pada Gambar 1, terdiri dari meat U₃Si₂-Al dengan panjang 6,275 cm dan lebar 0,054 cm, kelongsong AlMg₂ dengan ketebalan 0,038 cm dan panjang 7,15 cm, dan moderator dengan jarak celah sebesar 0,1275 cm, serta rak bahan bakar dengan panjang 0,45 cm dan lebar 0,385 cm. Untuk kisi sel yang menggunakan kawat kadmium, maka kawat kadmium tersebut dipasangkan pada kedua sisi tiap-tiap pelat bahan bakar seperti yang terlihat pada Gambar 1. Sedangkan kisi sel 2 seperti yang terlihat pada Gambar 2 terdiri dari meat U₃Si₂-Al, kelongsong AlMg₂ dan moderator H₂O, tanpa rak bahan bakar.



Keterangan ; 1. H₂O, 2. Rak bahan bakar, 3. Kisi sel bahan bakar 1, 4. Kisi sel bahan bakar 2

Gambar 3. Pemodelan 1/4 bagian elemen bahan bakar



Keterangan ; 1. H₂O, 2. Rak bahan bakar, 3. Pengarah batang kendali, 4. Bahan penyerap/H₂O, 5. Kisi sel bahan bakar

Gambar 4. Pemodelan ¼ bagian elemen batang kendali

Perhitungan tampang lintang makroskopik elemen bahan bakar dan elemen kendali juga dilakukan dengan paket program SRAC modul PIJ. Pemodelan elemen bahan bakar dan elemen kendali seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4 dilakukan dalam geometri 2 dimensi dalam bentuk ¼ bagian. Model elemen bahan bakar tersusun dari air ringan (H₂O), rak bahan bakar, kisi sel 1 dan kisi sel 2. Sedangkan model elemen kendali terdiri dari air (H₂O), rak bahan bakar, pengarah batang kendali, bahan penyerap atau air (H₂O) dan kisi sel 1.

Tampang lintang makroskopik material non bahan bakar diperoleh dengan perhitungan teras ke-1 RSG-GAS yang tersusun dari 17 material dalam bentuk geometri 2 dimensi dengan menggunakan paket program SRAC modul CITATION.[8] Sedangkan perhitungan tampang lintang material *top of fuel* (TOF) dan *bottom of fuel* (BOF) dilakukan dengan modul ANISN bentuk geometri 1 dimensi.

Teras setimbang RSG-GAS terdiri dari 40 elemen bahan bakar, 8 elemen kendali, 4 posisi *Irradiation Position* (IP), 4 posisi *Central Irradiation Position* (CIP), elemen beryllium dan reflektor. Sedangkan model teras RSG-GAS arah sumbu Z atau arah vertikal dilakukan dengan cara membagi teras menjadi 3 bagian yaitu bagian atas bahan bakar sebanyak 10 mesh, bagian bawah bahan bakar sebanyak 10 mesh dan daerah bahan bakar atau daerah teras aktif sebanyak 30 mesh dengan jarak 2 cm.

Perhitungan Rapat Daya Dengan SRAC-CITATION

Perhitungan rapat daya radial dan aksial teras setimbang RSG-GAS dilakukan dengan menggunakan paket program SRAC modul CITATION dalam bentuk geometri 3 dimensi (X-Y-Z). Data distribusi rapat daya yang telah diperoleh diolah menjadi bentuk distribusi faktor daya dan faktor puncak daya teras dengan menggunakan rumus (1) dan (3).

Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan rapat daya radial teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar U₃Si₂-Al kerapatan 4,80 gU/cc dengan penambahan kawat kadmium pada tiap-tiap sisi pelat bahan bakar. Perhitungan rapat daya radial dilakukan dengan

kedalaman batang kendali berturut-turut sebesar 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm dan 60 cm. Sedangkan perhitungan rapat daya aksial selain dilakukan dengan kondisi kedalaman batang kendali *full-up* dan *full-down*, juga dengan kedalaman batang kendali 20 cm, 30 cm dan 40 cm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Faktor Daya Radial

Gambar 5 menunjukkan perubahan distribusi faktor daya akibat perubahan bahan bakar yang digunakan pada teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar U3Si2-Al kerapatan 4,8 gU/cc pada kondisi *full-up* batang kendali. Baris ke-1 adalah nama elemen bahan bakar dan elemen kendali dimana pada gambar masing-masing ditunjukkan dengan huruf FE.x.y dan CE x. Huruf x menunjukkan kelas fraksi bakar sedangkan huruf y menunjukkan urutan nomor bahan bakar. Baris ke-2 dan baris ke-3 menunjukkan distribusi nilai faktor daya dengan masing-masing berbahan bakar U3Si2-Al kerapatan 2,96 gU/cc dan 4,8 gU/cc yang telah dipasang kawat kadmium.

H	Be	FE1.4 0,9950 0,8506	FE2.2 1,0787 1,1027	FE5.3 0,8677 0,8537	FE4.5 0,9121 0,9779	FE5.2 1,0529 1,0655	FE1.5 0,9995 0,9629	Be
G	Be	FE3.4 1,0032 1,0191	FE8.4 0,8942 0,8569	IP	CE 7 1,0112 1,0006	FE7.4 0,9111 0,8596	FE6.5 0,8917 0,8610	Be
F	FE2.4 1,0594 0,9467	FE2.5 0,9080 0,8049	CE 3 1,0849 1,0689	FE6.3 1,0584 1,1040	FE8.3 1,0582 1,0746	CE 2 1,0730 1,0786	FE7.3 0,9881 1,0319	FE1.3 1,0042 0,9568
E	FE3.1 0,9765 1,0534	CE 6 1,0461 1,0058	FE4.4 1,0888 1,1745	CIP	CIP	FE6.2 1,0930 1,2061	IP	FE3.3 1,0517 1,0481
D	FE5.5 0,8479 0,8494	IP	FE8.1 0,8682 0,8476	CIP	CIP	FE4.2 0,9902 1,0193	CE 5 1,0531 1,0848	FE5.4 0,9189 0,9375
C	FE2.3 1,1173 0,9710	FE7.1 0,8480 0,8433	CE 1 1,1642 1,2135	FE7.5 0,8480 0,8082	FE6.4 1,0729 1,1237	CE 4 1,0485 1,1297	FE3.2 1,0082 0,9289	FE1.2 1,0402 0,9844
B	Be	FE6.1 0,9402 0,9567	FE8.5 0,9195 0,7946	CE 8 1,0205 1,0302	IP	FE8.2 0,9526 0,9309	FE4.1 1,0313 1,1962	Be
A	Be	FE1.1 1,0551 1,0751	FE7.2 0,9918 0,9791	FE4.3 1,0592 1,1818	FE5.1 1,0724 1,2225	FE3.5 1,0170 0,9211	FE2.1 1,0072 1,0064	Be
	10	9	8	7	6	5	4	3

Keterangan : Baris ke-1 = Nama bahan bakar, Baris ke-2 = Teras RSG-GAS U3Si2-Al 2,96 gU/cc, Baris ke-3 = Teras RSG-GAS U3Si2-Al 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium

Gambar 5. Perbandingan distribusi faktor daya radial teras RSG-GAS

Dari gambar tersebut dapat diketahui perbedaan distribusi faktor daya dan nilai ppf teras RSG-GAS akibat perubahan bahan bakar dari U3Si2-Al kerapatan 2,96 gU/cc menjadi U3Si2-Al kerapatan 4,8 gU/cc yang telah dipasang kawat kadmium. Perubahan distribusi faktor daya tersebut adalah terjadinya kenaikan dan penurunan nilai faktor daya pada tiap bahan bakar akibat perubahan bahan bakar yang digunakan pada teras RSG-GAS. Naik turunnya nilai faktor daya tersebut tidak terjadi secara spesifik pada posisi tertentu, melainkan terjadi secara acak pada seluruh bahan bakar. Hal tersebut disebabkan karena pemasangan kawat kadmium dilakukan pada kedua sisi pelat untuk seluruh bahan bahan yang ada. Perubahan nilai faktor daya terendah terjadi dari 0,8479 pada bahan bakar FE5.5 posisi D-10 menjadi 0,7946 pada bahan bakar FE8.5 posisi B-8. Sedangkan nilai faktor daya ppf tertinggi terjadi perubahan dari 1,1642 pada bahan bakar CE 1 posisi C-8 menjadi 1,2225 pada bahan bakar FE5.1 posisi A-6. Perubahan nilai ppf tersebut hanya mengalami kenaikan sebesar 0,0583 (5,01%). Nilai ppf tersebut masih memenuhi/dibawah nilai ppf maksimum yang tercantum dalam LAK[8] (2,6).

Gambar 6 menunjukkan perubahan distribusi faktor daya radial akibat perubahan posisi kedalaman/insersi batang kendali pada teras RSG-GAS berbahan bakar U3Si2-Al kerapatan 4,8 gU/cc yang telah dipasang kawat kadmium pada kedua sisi tiap-tiap pelat. Baris ke-1 adalah nama bahan bakar, baris ke-2 sampai dengan baris ke-7 masing-masing menunjukkan nilai faktor daya akibat kedalaman insersi batang kendali sebesar 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm dan 60 cm. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin dalam posisi batang kendali didalam teras akan mengakibatkan semakin tingginya nilai ppf maksimum bahan bakar FE 5.1 pada posisi A-6, yaitu berturut-turut sebesar 1,2426, 1,2782, 1,3327, 1,4126, 1,4987 dan 1,5388. Atau mengalami perubahan kenaikan nilai ppf tertinggi sebesar 22,59%. Perubahan kenaikan nilai ppf tersebut diakibatkan berkurangnya reaksi fisi pada daerah insersi batang kendali dimana terdapat bahan penyerap, sehingga reaksi fisi bergeser ke arah pinggir teras.

Selain itu, insersi batang kendali kedalam teras juga mengakibatkan perubahan distribusi faktor daya teras. Bahan bakar yang dekat dengan bahan penyerap mengalami penurunan nilai faktor daya sedangkan bahan bakar yang posisinya jauh dari batang kendali mengalami kenaikan faktor daya. Hal tersebut disebabkan karena jumlah neutron termal yang bereaksi dengan bahan bakar untuk menghasilkan panas otomatis sebagian juga akan terserap oleh batang kendali.

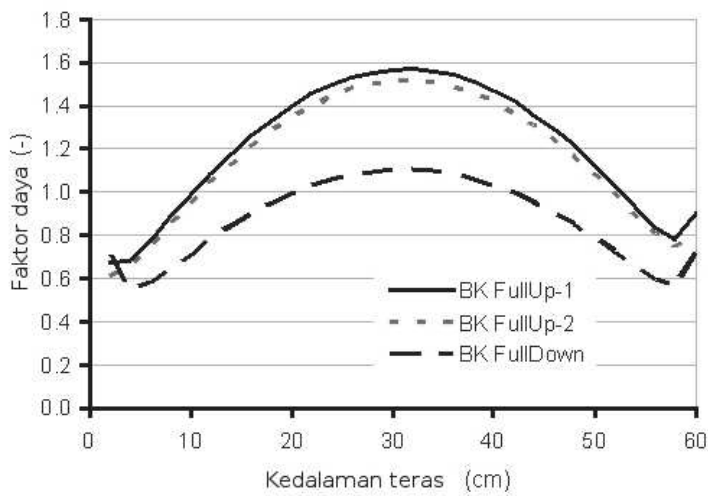
H	Be	FE1.4	FE2.2	FE5.3	FE4.5	FE5.2	FE1.5	Be	
		0,8691	1,1252	0,8576	0,9769	1,0794	0,9827		
		0,9006	1,1647	0,8637	0,9759	1,1031	1,0159		
G	Be	0,9451	1,2236	0,8709	0,9732	1,1375	1,0618	Be	
		1,0043	1,3066	0,8788	0,9676	1,1852	1,1220		
		1,0644	1,3949	0,8874	0,9604	1,2357	1,1826		
		1,0944	1,4362	0,8935	0,9578	1,2598	1,2148		
		FE3.4	FE8.4	IP	CE 7	FE7.4	FE6.5		Be
		1,0296	0,8441		0,9742	0,8655	0,8732		
1,0455	0,8208	0,9323	0,8736		0,8931				
1,0660	0,7846	0,8722	0,8828		0,9199				
1,0912	0,7327	0,7898	0,8924		0,9538				
1,1167	0,6789	0,7046	0,9011		0,9872				
1,1322	0,6551	0,6632	0,9082	1,0059					
F	Be	FE2.4	FE2.5	CE 3	FE6.3	FE8.3	CE 2	FE7.3	FE1.3
		0,9368	0,8201	1,0377	1,0920	1,0642	1,0669	1,0175	0,9740
		0,9217	0,8453	0,9889	1,0693	1,0450	1,0195	0,9929	1,0024
		0,8996	0,8805	0,9192	1,0330	1,0154	0,9512	0,9568	1,0409
		0,8681	0,9264	0,8234	0,9800	0,9734	0,8571	0,9069	1,0906
		0,8340	0,9722	0,7236	0,9251	0,9297	0,7595	0,8546	1,1407
		0,8168	0,9958	0,6739	0,9020	0,9090	0,7117	0,8283	1,1679
E	Be	FE3.1	CE 6	FE4.4	CIP	CIP	FE6.2	IP	FE3.3
		1,0766	0,9705	1,1571			1,2037		1,0556
		1,1183	0,9162	1,1262			1,1959		1,0682
		1,1819	0,8409	1,0794			1,1821		1,0859
		1,2740	0,7394	1,0127			1,1617		1,1094
		1,3732	0,6344	0,9432			1,1406		1,1335
1,4200	0,5805	0,9111	1,1321	1,1451					
D	Be	FE5.5	IP	FE8.1	CIP	CIP	FE4.2	CE 5	FE5.4
		0,8611		0,8417			1,0348	1,0469	0,9492
		0,8801		0,8341			1,0614	0,9881	0,9674
		0,9056		0,8256			1,1012	0,9056	0,9913
		0,9377		0,8163			1,1581	0,7943	1,0209
		0,9694		0,8065			1,2192	0,6804	1,0499
		0,9872		0,7987			1,2489	0,6237	1,0662
C	Be	FE2.3	FE7.1	CE 1	FE7.5	FE6.4	CE 4	FE3.2	FE1.2
		0,9842	0,8570	1,1816	0,8008	1,1200	1,0971	0,9199	0,9972
		1,0053	0,8816	1,1339	0,7895	1,1089	1,0467	0,9063	1,0177
		1,0343	0,9196	1,0682	0,7719	1,0880	0,9763	0,8875	1,0463
		1,0720	0,9754	0,9800	0,7466	1,0542	0,8812	0,8625	1,0853
		1,1106	1,0354	0,8867	0,7195	1,0180	0,7824	0,8366	1,1271
		1,1300	1,0626	0,8356	0,7073	1,0046	0,7312	0,8234	1,1490
B	Be	FE6.1	FE8.5	CE 8	IP	FE8.2	FE4.1	Be	
		0,9722	0,7925	1,0051		0,9309	1,1994		
		1,0001	0,7888	0,9674		0,9325	1,2089		
		1,0425	0,7824	0,9162		0,9366	1,2268		
		1,1038	0,7720	0,8490		0,9445	1,2565		
		1,1691	0,7601	0,7784		0,9539	1,2886		
1,1988	0,7550	0,7391	0,9570	1,2993					
A	Be	FE1.1	FE7.2	FE4.3	FE5.1	FE3.5	FE2.1	Be	
		1,0993	0,9878	1,1633	1,2426	0,9333	1,0308		
		1,1432	1,0025	1,1309	1,2782	0,9533	1,0745		
		1,2102	1,0245	1,0819	1,3327	0,9807	1,1410		
		1,3073	1,0558	1,0124	1,4126	1,0157	1,2369		
		1,4118	1,0888	0,9404	1,4987	1,0504	1,3403		
		1,4598	1,1038	0,9075	1,5388	1,0682	1,3896		
	10	9	8	7	6	5	4	3	

Keterangan : Baris ke-1 = Nama bahan bakar, Baris ke-2,3,4,5,6,7 = ppf saat kedalaman batang kendali 10, 20, 30, 40, 50 & 60 cm

Gambar 6. Perubahan distribusi faktor daya radial terhadap kedalaman batang kendali

Distribusi Faktor Daya Aksial

Gambar 7 menunjukkan perbandingan faktor daya arah aksial bahan bakar pada posisi F-8 akibat perubahan posisi batang kendali antara pada saat *full-up* dan *full-down*. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa untuk teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium, pada saat batang kendali *full-up* menunjukkan distribusi faktor daya aksial yang lebih besar dibandingkan pada saat *full-down*. Hal tersebut disebabkan karena faktor bahan penyerap batang kendali. Kecuali pada posisi kedalaman teras aktif sekitar 0 cm yang menunjukkan nilai faktor daya saat *full-up* yang hampir sama dengan pada saat *full-down*. Hal tersebut disebabkan karena adanya pengaruh faktor reflektor air ringan, sementara efek penyerap oleh batang kendali di luar teras tidak ada lagi. Dari gambar tersebut juga dapat diketahui bahwa teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc yang telah dipasang kawat kadmium mempunyai karakteristik/bentuk distribusi faktor daya aksial yang hampir sama dengan teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 2,96 gU/cc.

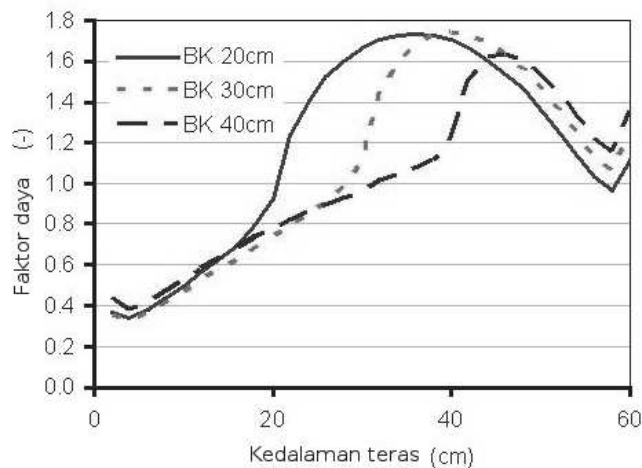


Keterangan :

- BK = Batang kendali
- BK full up-1 = Teras berbahan bakar U_3Si_2-Al 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium
- BK full up-2 = Teras berbahan bakar U_3Si_2-Al 2,96 gU/cc

Gambar 7. Perbedaan distribusi faktor daya aksial bahan bakar posisi C-8 pada saat batang kendali *full-up* dan *full-down*.

Gambar 8 menunjukkan perubahan distribusi aksial faktor daya akibat insersi batang kendali sebesar 20 cm, 30 cm dan 40 cm. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin dalam insersi batang kendali kedalam teras, maka nilai ppf aksial maksimum pada bahan bakar tersebut juga akan bergerak ke arah bawah dimana tidak terdapat bahan penyerap batang kendali. Hal tersebut disebabkan karena pengaruh adanya bahan penyerap pada bagian atas yang mengurangi reaksi fisi pada bagian tersebut, sehingga reaksi fisi bahan bakar yang akan menghasilkan panas juga akan bergeser ke arah bawah.



Gambar 8. Perubahan distribusi faktor daya aksial bahan bakar posisi C-8 akibat insersi batang kendali.

KESIMPULAN

Dari analisa hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium mempunyai ppf yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 2,96 gU/cc. Teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc yang telah dipasang kawat kadmium mempunyai bentuk distribusi faktor daya aksial yang hampir sama dengan teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 2,96 gU/cc. Selain itu, panjang siklus operasi dapat ditingkatkan dari 20 menjadi 49 hari sehingga reaktor dapat dioperasikan lebih efisien. Teras RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al kerapatan 4,8 gU/cc dengan kawat kadmium mempunyai nilai ppf yang masih memenuhi kriteria keselamatan sesuai LAK RSG-GAS, sehingga aman untuk dioperasikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lily Suparlina, Tagor Malem Sembiring. Manajemen teras RSG-GAS berbahan bakar silisida 4,5 dan 4,8 gU/cc. *Jurnal Sains Dan Teknologi Nuklir Indonesia*. 2003; 4: 9 – 24.
2. Jati Susilo, Lily Suparlina, Tukiran Surbakti. Kajian neutronik teras kompak RSG-GAS tanpa CIP silisida 3,55gU/cc & 4,8 gU/cc. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian P2TRR*; 24-25 Pebruari 2004; Banten, Serpong; 2004. p. 237 – 244.
3. Jati Susilo, Rokhmadi. Analisis reaktivitas batang kendali teras setimbang silisida RSG-GAS dengan SRAC-CITATION. *Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Nuklir*; 10 Juli 2007; Yogyakarta; 2007. p. 74 – 81.

4. Iman Kuntoro, Tagor Malem Sembiring. Peningkatan kemampuan batang kendali reaktor RSG-GAS dengan penambahan BKP AgInCd. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir TRI DASA MEGA. 2004; 3: 74 – 81.
5. Jati Susilo, Lily Suparlina. Penentuan diameter kawat kadmium pada bahan bakar uranium silisida 4,8 gU/cc untuk teras RSG-GAS. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir TRI DASA MEGA. 2007; 11: 12 – 24.
6. JAERI-Data/Code-2002. SRAC (Ver. 2002) the comprehensive neutronics calculation code system. Japan Atomic Energy Research Institute; 2002.
7. Fukutaro Ishimori, et al. Japan Atomic Energy Research Institute, lecture 3 of reactor engineering = reactor physic. Baifukan; 1973 (in japanese)
8. Jati Susilo. perhitungan parameter neutronik teras reaktor menggunakan paket program komputer SRAC. Diktat *coaching* Analisis Neutronik Keselamatan Teras Reaktor; Banten, Serpong; 2009.
9. Anonim. Laporan analisis keselamatan – Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy. No. Ident : RSG.KK03.04.6, Rev.10, PRSG-BATAN; Banten, Serpong; 2008.