
ANALISIS KOEFISIEN REAKTIVITAS TERAS RSG-GAS PADA KONDISI HOT FULL POWER (HFP)

THE ANALYSIS OF THE RSG-GAS CORE REACTIVITY COEFFICIENT AT HOT FULL POWER CONDITIONS

Jonny Haratua Panggabean¹⁾, Santo Paulus Rajagukguk¹⁾ and Tukiran Surbakti²⁾

¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Medan

E-mail: santopaulusrajagukguk98@gmail.com

²⁾Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir-BATAN

Kawasan Puspipstek Gd 80 Tangsel, Banten.

Diterima: 21 Februari 2022, diperbaiki : 5 April 2022, disetujui : 22 April 2022

ABSTRAK

ANALISIS KOEFISIEN REAKTIVITAS TERAS RSG-GAS PADA KONDISI *HOT FULL POWER (HFP)*. Analisis koefisien reaktivitas teras RSG-GAS pada kondisi *Hot Full Power (HFP)* telah dilakukan karena sangat berhubungan dengan keselamatan operasi. Perhitungan parameter ini belum pernah dilakukan, saat ini dilakukan dengan menggunakan dengan program komputer WIMSD-5B dan Batan-2DIFF. Program WIMSD-5B menggunakan data nuklir ENDFB-VIII.0 dengan muatan 250 gram digunakan untuk menggenerasi tampang lintang makroskopik material teras dan program Batan-2DIFF digunakan untuk perhitungan teras. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besaran parameter neutronik koefisien reaktivitas pada teras RSG-GAS dengan kondisi *hot full power*. Hasil perhitungan koefisien reaktivitas temperatur moderator dan temperatur bahan bakar pada kondisi HFP adalah negatif dan nilainya tidak sama untuk setiap temperatur. Dari hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa teras reaktor bersifat *undermoderated* dan sesuai dengan harapan.

Kata kunci : koefisien reaktivitas, teras RSG-GAS, WIMSD-5B, BATAN-2DIFF, *hot full power*

ABSTRACT

THE ANALYSIS OF THE RSG-GAS CORE REACTIVITY COEFFICIENT AT HOT FULL POWER CONDITIONS. The analysis of the reactivity coefficient of the RSG-GAS core under *Hot Full Power (HFP)* conditions has been carried out because it is closely related to operating safety. This parameter calculation has never been done, currently it is done using the WIMSD-5B and Batan-2DIFF computer codes. The WIMSD-5B code using nuclear data ENDFB-VIII.0 with a loading mass of 250 grams is used to generate macroscopic cross-sections of core material and the Batan-2DIFF code is used for core calculations. The purpose of this study was to determine the value of the neutronic parameter of the reactivity coefficient at the RSG-GAS core with hot full power conditions. The results of the calculation of the reactivity coefficient of moderator and fuel temperatures at HFP conditions are negative and the value is not the same for each temperature. From the calculation results it can be concluded that the reactor core is *undermoderated* and in line with expectations.

Keywords : Reactivity coefficient, RSG-GAS core, WIMSD-5B, Batan-2DIFF, *hot full power*

PENDAHULUAN

Dalam menentukan parameter neutronik terutama koefisien reaktivitas teras perlu dilakukan secara eksperimen dan perhitungan dengan menggunakan program komputer yang sudah lazim digunakan di PRSG (Pusat Reaktor Serba Guna) Serpong, Tangerang Selatan, Banten. Banyak sekali parameter neutronik yang harus diperoleh untuk membuktikan bahwa nilai eksperimen sesuai dengan hasil perhitungan. Namun dalam kesempatan ini ditentukan parameter koefisien reaktivitas temperatur moderator dan bahan bakar pada kondisi *Hot Full Power* (HFP) teras reaktor RSG-GAS. Selama ini penentuan parameter koefisien reaktivitas dilakukan pada kondisi *Low Power*. Koefisien reaktivitas merupakan parameter yang sangat berhubungan erat dengan keselamatan operasi reaktor sehingga perlu ditentukan secara akurat. Koefisien reaktivitas ini juga ada pada saat reaktor dioperasikan pada daya rendah maupun dioperasikan pada daya tinggi. Beberapa peneliti di PRSG telah melakukan penelitian dan telah membuktikan bahwa nilai parameter koefisien reaktivitas pada *low power* adalah negatif sehingga sesuai dengan desain reaktor namun untuk *hot full power* juga perlu dibuktikan secara perhitungan. Parameter koefisien reaktivitas moderator dan bahan bakar juga merupakan parameter yang menunjukkan karakteristik teras reaktor RSG-GAS [1]. Reaktor dapat beroperasi dengan aman sesuai dengan desainnya, maka salah satu syaratnya adalah parameter neutronik teras tidak boleh melebihi nilai batasan maksimum yang telah ditetapkan dalam desain. Teras TWC (*Typikal Working Core*) adalah teras kerja yang mempunyai parameter neutronik yang tidak berubah secara signifikan. Namun parameter neutronik koefisien reaktivitas

teras reaktor RSG-GAS pada kondisi *High Power* belum pernah ditentukan. Hal ini dilakukan untuk menambahkan parameter neutronik di dalam dokumen SAR (*Safety Analysis Report*). Dokumen ini merupakan dokumen hidup yang setiap saat bisa direvisi atau ditambahkan parameter neutronik yang sudah diperoleh dengan hasil eksperimen maupun perhitungan. Dokumen ini dibutuhkan saat perpanjangan izin operasi ke Bapeten sebagai Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nasional [2]. Dalam penelitian ini akan dilakukan perhitungan parameter neutronik koefisien reaktivitas moderator dan bahan bakar pada teras teras RSG-GAS pada kondisi daya tinggi (*high power*). Perhitungan dilakukan pada Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) pada teras TWC yang terdiri dari 40 bahan bakar silisida (U_3Si_2Al) dengan densitas uranium sebesar $2,96 \text{ g/cm}^3$ dan 8 batang kendali serta 8 absorber yang terbuat dari $AgInCd$. Program WIMSD-5B terdapat 69 kelompok energi neutron yang saat ini telah digunakan di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) dan sudah memiliki nilai tampang lintang makroskopik elemen bahan bakar uranium silisida [3]. Teras RSG-GAS didesain menggunakan teras transisi I sampai VI, Teras VI merupakan teras penuh atau TWC (*Typikal Working Core*). Pada setiap teras transisi dilakukan perhitungan maupun eksperimen untuk memperoleh besaran parameter neutronik yang akan memberikan informasi sebagai karakteristik teras menuju teras penuh dan reaktor dapat dioperasikan secara aman. Teras transisi I RSG-GAS mempunyai dimensi yang paling kecil yaitu 12 buah elemen bahan bakar standar (EB) dan 6 buah elemen bakar kendali (EK), yang disusun oleh bahan bakar segar sedangkan teras setimbang disusun oleh bahan bakar dengan fraksi

bakar merata teras pada awal siklus sebesar 23,8% untuk pola pergantian 6/1 [4].

Penelitian ini diharapkan mampu untuk menyediakan data neutronik reaktor RSG-GAS menggunakan program WIMSD-5B dan program komputer difusi neutron 2-dimensi BATAN-2DIFF dengan data nuklir ENDF-BVIII.0[5]. Tujuan penelitian ini adalah menentukan besaran parameter neutronik koefisien reaktivitas

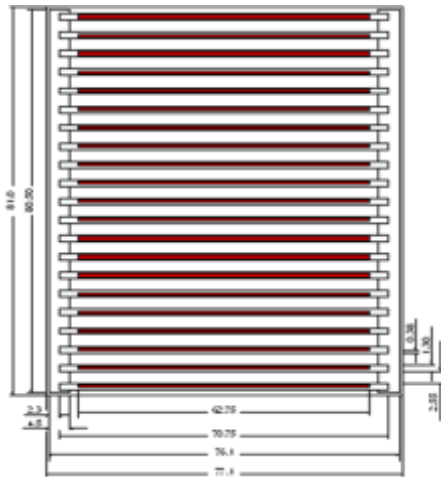
METODOLOGI

Dalam melakukan penelitian, penulis memiliki beberapa batasan yaitu dalam hal parameter yang ditentukan. Parameter neutronik koefisien reaktivitas temperatur moderator teras TWC RSG-GAS pada daya tinggi yang dimaksud adalah berapa besar perubahan reaktivitas teras dengan terjadinya kenaikan temperatur pada moderator. Parameter neutronik koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar adalah berapa besar perubahan reaktivitas teras dengan kenaikan temperatur bahan bakar.

Untuk analisis perhitungan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah program WIMSD-5B dengan data nuklir ENDF-BVIII.0 dan difusi neutron 2-dimensi BATAN-2DIFF. Sebelum dilakukan perhitungan, maka terlebih dahulu disiapkan konstanta makroskopik material bahan bakar sebagai fungsi temperatur dengan paket program WIMSD-5B, paket program ini menyiapkan konstanta kelompok dalam 4 kelompok tenaga neutron. Hal ini dibuat agar dapat dilakukan perhitungan kesetimbangan reaktivitas teras RSG-GAS. Sedangkan untuk perhitungan teras dilakukan dengan paket program manajemen teras BATAN-2DIFF, metode yang digunakan dalam paket program ini adalah metode difusi neutron banyak kelompok dengan geometri dua dimensi (X-Y).

temperatur moderator dan bahan bakar teras TWC RSG-GAS pada kondisi daya tinggi. Perhitungan parameter neutronik koefisien reaktivitas teras TWC RSG-GAS dilakukan dengan program WIMSD-5B dan difusi neutron 2-dimensi BATAN-2DIFF. Objek perhitungan adalah teras TWC RSG-GAS dan elemen bahan bakar silisida (U_3Si_2/Al) dengan densitas uranium sebesar $2,96 \text{ g/cm}^3$ dan pengkayaan 19,75%[6].

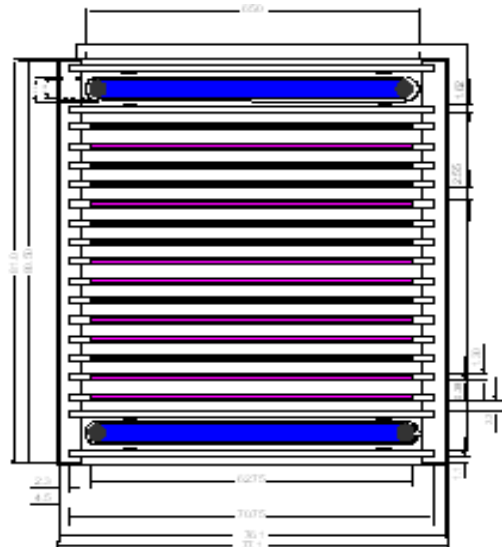
Sebelum dilakukan perhitungan teras reaktor, maka terlebih dahulu disiapkan konstanta kelompok difusi dengan paket program WIMSD-5B dan Program difusi neutron 2-dimensi BATAN-2DIFF digunakan untuk menghitung distribusi fluks neutron regular maupun *adjoint*. Paket program WIMSD-5B ini menyiapkan konstanta kelompok difusi neutron dalam 4 kelompok tenaga neutron. Syarat batas yang digunakan adalah 10 MeV; 0,831 MeV; 5,531 keV dan 0,625 eV[7]. Disamping sebagai fungsi energi neutron, konstanta kelompok difusi yang dibangkitkan dinyatakan dalam fungsi jenis elemen bahan bakar, berat uranium, fungsi kondisi reaktor (panas, dingin, xenon setimbang, dan tanpa xenon) dan massa ^{235}U (densitas 2,96 gram/cc). Hal ini dibuat agar dapat dilakukan perhitungan parameter neutronik teras TWC RSG-GAS. Gambar 1. menunjukkan bahan bakar teras RSG-GAS



Gambar 1. Elemen bakar standard teras RSG-GAS [8,9]

Paket program perhitungan sel (*cell* atau *lattice*) menentukan fluks neutron dan faktor perlipatan tak hingga dari sel bahan bakar. Diperlukan masukan tampang lintang neutron beberapa nuklida, deskripsi geometri sel dan menyelesaikan persamaan transport neutron untuk seluruh daerah sel. Sel yang digunakan berupa unit sel dan paket perhitungan sel memasukkan persamaan transport neutron untuk mendapatkan distribusi fluks neutron dan faktor perlipatan tak hingga (k -inf) dalam kelompok tenaga neutron dan fungsi ruang. Dalam studi saat ini, unit sel yang ditangani oleh WIMSD secara mendasar terdiri dari 4 daerah yaitu bahan bakar (1), kelongsong (2), pendingin (3) dan ekstra region (4) [10,11] yang direpresentasikan dalam geometri pelat disebut dengan *slab*. Gambar 2 mengilustrasikan elemen kendali standar teras RSG-GAS. Tabel 1. Data nuklir perangkat bahan bakar Teras RSG-GAS. Parameter integral yang dihitung adalah faktor multiplikasi tak terhingga (k -inf), komposisi isotop dan tampang lintang makroskopik seperti koefisien difusi, tampang lintang absorpsi, tampang lintang *removal*, nu-fisi untuk

kelompok energi 69 [12] yang dihitung dengan energi termal 0,625 eV. Komposisi dan radius yang mewakili sel didefinisikan dalam data material dan spektrum yang disesuaikan dengan keempat daerah tersebut dan hal ini sudah dilakukan oleh paket program WIMSD-5B. Jika tidak ingin materialnya dibobot oleh spektrum yang ada, maka diberi tanda negatif agar terjadi pengabaian. Hal ini terutama perlu dilakukan jika menghadapi sel berpenyerap kuat. Dengan menggunakan bentuk spektrum tersebut dilakukan perhitungan sel. Konsep ini mengindikasikan paket program WIMSD memakai trik untuk mendapatkan hasil yang akurat. Untuk memprediksi komposisi isotop dalam bahan bakar dan juga mempelajari perubahan reaktivitas karena fraksi bakar dan *cooling time* setelah diiradiasi.



Gambar 2. Elemen kendali standar teras RSG-GAS [13,14]

Perubahan reaktivitas terjadi akibat fraksi bakar meningkat di dalam teras karena bahan bakar diiradiasi, faktor meningkatnya perubahan reaktivitas juga dipengaruhi oleh material disekitar bahan

bakar dan di fasilitas iradiasi serta kondisi temperatur disetiap material terutama bahan bakar dan moderator pada teras RSG-GAS. Perhitungan dilakukan

dengan menggunakan program WIMSD-5B dengan nuklir data file ENDFBVIII.0. Hasil perhitungan akan dibandingkan dengan referensi [15,16].

Tabel 1. Data nuklir bahan bakar teras RSG-GAS[17]

Parameter	Karakteristik
Tipe Reaktor	Tipe kolam
Tipe elemen bakar	Oksida pengkayaan rendah
Sistem pendinginan	Konveksi paksa
Moderator/pendingin	H ₂ O
Reflektor	Be dan H ₂ O
Daya nominal (MW)	30
Jumlah elemen bakar standar	40
Jumlah elemen bakar kendali	8
Jumlah penyerap tipe garpu (pasang)	8
Panjang siklus pada daya nominal (hari)	25
Fraksi bakar rerata awal siklus (%hilangnya U ²³⁵)	23,3
Fraksi bakar rerata akhir siklus (%hilangnya U ²³⁵)	31,3
Dimensi elemen bakar/kendali (mm)	77,1 x 81 x 600
Ketebalan pelat bakar (mm)	1,3
Lebar kanal pendingin (mm)	2,55
Jumlah pelat per elemen bakar	21
Jumlah pelat per elemen kendali	15
Material kelongsong bahan bakar	AlMg ₂
Ketebalan kelongsong bahan bakar (mm)	0,38
Dimensi <i>Fuel Meat</i> (mm)	0,54 x 62,75 x 600
Material <i>Fuel Meat</i>	U ₃ O ₈ Al
Pengkayaan U ²³⁵ (w/o)	19,75
Densitas Uranium dalam <i>meat</i> (mm)	2,96
Muatan U ²³⁵ per elemen bakar (g)	250
Muatan U ²³⁵ per elemen kendali (g)	178,6
Material penyerap	Ag-In-Cd
Ketebalan bahan penyerap (mm)	3,38
Material kelongsong penyerap (mm)	SS-321
Ketebalan kelongsong penyerap (mm)	0,85

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perhitungan WIMSD-5B

Perhitungan sel koefisien reaktivitas temperatur moderator teras RSG-GAS dilakukan dengan program WIMSD, hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2. Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa koefisien reaktivitas temperatur moderator terjadi akibat kenaikan temperatur moderator pada kenaikan daya reaktor. Pada kenyataannya temperatur moderator tidak sama disetiap titik moderator namun dalam hal perhitungan disederhanakan dengan menyamakan seluruh titik moderator. Sehingga untuk menentukan satu nilai temperatur moderator dinaikkan suhunya dari (20-100)°C, namun yang ditampilkan hanya suhu 20°C dan 40°C saja untuk membuktikan bahwa nilai koefisien reaktivitas di sel bahan bakar adalah negatif. Pada referensi [18] menjelaskan hasil pengukuran koefisien reaktivitas temperatur moderator teras silisida RSG-GAS 250 gram bahwa suhu yang digunakan dari 24.8-40.2°C menunjukkan hasil perubahan reaktivitas yang negatif. Kenaikkan temperatur moderator juga tidak sama pada selang waktu yang sama, sehingga menyebabkan perubahan reaktivitas juga tidak sama. Untuk menentukan nilai koefisien reaktivitas temperatur moderator ada beberapa cara, salah satunya nilai koefisien reaktivitas temperatur moderator disetiap level *burn up* ditentukan pada kondisi HFP. Hal ini dapat ditunjukkan pada hasil perhitungan sel koefisien reaktivitas temperatur moderator teras RSG-GAS pada Tabel 2. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai koefisien reaktivitas temperatur moderator pada setiap level *burn up* adalah negatif dan nilainya sangat bervariasi. Dengan berubahnya temperatur moderator akan merubah densitas moderator dan temperatur

neutron sehingga menghasilkan harga k_{inf} adalah sbb,

a. ϵ , η dan p tidak berubah

b. Harga f dapat dinyatakan sebagai berikut,

Pada reaktor homogen f tidak tergantung pada temperatur moderator. Pada reaktor heterogen dengan naiknya temperatur moderator akan menurunkan harga faktor kerugian termal (*thermal disadvantage factor*) (ϕ_m/ϕ_u) oleh karena penurunan tampang lintang absorpsi uranium. Konsekuensinya harga f dan k_{inf} akan naik demikian juga dengan reaktivitas. Pada Tabel 3 diperoleh hasil perhitungan sel koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar pada kondisi HFP. Pada perhitungan sel bahan bakar temperaturnya dihitung mulai dari 20-200°C namun ditampilkan dalam skripsi ini hanya suhu 20°C dan 40°C saja untuk membuktikan nilainya negatif. Nilai koefisien reaktivitas nilainya negatif disetiap level *burn up* dan nilainya sangat bervariasi. Perubahan temperatur bahan bakar akan mempengaruhi parameter-parameter berikut ini :

a. kemungkinan lolos resonansi (p) pada rumus k_{inf} (karena pelebaran resonansi ^{238}U) akan menurun dengan naiknya temperatur bahan bakar. Oleh karena k_{inf} turun maka konsekuensinya reaktivitasnya akan turun.

b. Seperti yang telah disebutkan di atas, naiknya temperatur bahan bakar akan memperluas ukuran teras reaktor sehingga menurunkan *buckling* (B^2) yang artinya menurunkan harga reaktivitas. Walaupun demikian efek ini kurang berarti dibandingkan faktor probabilitas lolos resonansi.

Tabel 2. Hasil perhitungan sel koefisien reaktivitas temperatur moderator

Burn up (%)	Reaktivitas (ρ_1)		Reaktivitas (ρ_2)		$\Delta\rho$ ($\rho_2-\rho_1$)	α_m (pcm/°C)
	k-inf	Reaktivitas	k-inf	Reaktivitas		
	Temperatur 20 °C		Temperatur 40 °C			
0	1,598933	37,46	1,598620	37,45	-0,01	-0,50
0,1	1,598173	37,43	1,597859	37,42	-0,01	-0,50
0,6	1,594981	37,30	1,594669	37,29	-0,01	-0,50
5,0	1,576225	36,56	1,575902	36,54	-0,02	-1,00
11,0	1,551810	35,56	1,551449	35,54	-0,02	-1,00
17,0	1,525875	34,46	1,525471	34,45	-0,02	-1,00
23,0	1,497528	33,22	1,497077	33,20	-0,02	-1,00
29,0	1,466651	31,81	1,466156	31,79	-0,02	-1,00
35,0	1,432489	30,19	1,431955	30,17	-0,02	-1,00
41,0	1,394254	28,28	1,393688	28,25	-0,03	-1,50
47,0	1,352047	26,04	1,351462	26,01	-0,03	-1,50
53,0	1,304277	23,33	1,303687	23,29	-0,04	-2,00
60,0	1,240108	19,36	1,239532	19,32	-0,04	-2,00
68,0	1,150801	13,10	1,150295	13,07	-0,03	-1,50
75,0	1,053162	5,05	1,052797	5,01	-0,04	-2,00
82,0	0,926876	-7,89	0,926774	-7,90	-0,01	-0,50
90,0	0,724577	-38,01	0,725066	-37,92	-0,09	-4,50

Secara numerik analisis dari faktor-faktor yang telah dibahas di atas menunjukkan bahwa efek total adalah menurunkan reaktivitas dengan naiknya temperatur moderator atau bahan bakar sehingga koefisien reaktivitas temperatur biasanya negatif. Walaupun demikian, air sebagai

moderator teras pada rasio moderator dan bahan bakar yang khusus dapat bernilai positif pada *range* temperatur operasi tertentu.

Tabel 3. Hasil perhitungan sel koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar

Burn up (%)	Reaktivitas (ρ_1)		Reaktivitas (ρ_2)		$\Delta\rho = (\rho_2-\rho_1)$	α_f (pcm/°C)
	k-inf	Reaktivitas	k-inf	Reaktivitas		
	Temperatur 20 °C		Temperatur 40 °C			
0	1,599540	37,48	1,598620	37,45	-0,03	-1,50
0,1	1,598779	37,45	1,597859	37,42	-0,03	-1,50
0,6	1,595587	37,33	1,594669	37,29	-0,04	-2,00
5,0	1,576810	35,80	1,575902	36,54	-0,06	-3,00
11,0	1,552342	35,58	1,551449	35,54	-0,04	-2,00
17,0	1,526349	34,48	1,525471	34,45	-0,03	-1,50
23,0	1,497939	33,24	1,497077	33,20	-0,06	-3,00
29,0	1,467006	31,83	1,466156	31,79	-0,06	-3,00
35,0	1,432793	30,21	1,431955	30,17	-0,04	-2,00
41,0	1,394507	28,29	1,393688	28,25	-0,04	-2,00
47,0	1,352259	26,05	1,351462	26,01	-0,04	-2,00

53,0	1,304462	23,34	1,303687	23,29	-0,05	-2,50
60,0	1,240278	19,37	1,239532	19,32	-0,05	-2,50
68,0	1,150997	13,12	1,150295	13,07	-0,05	-2,50
75,0	1,053445	5,07	1,052797	5,01	-0,06	-3,00
82,0	0,9273512	-7,83	0,9267744	-7,90	-0,07	-3,50
90,0	0,7255175	-37,83	0,7250663	-37,92	-0,09	-4,50

2. Hasil Perhitungan Teras

Hasil perhitungan parameter teras setimbang reaktor RSG-GAS diketahui bahwa margin padam minimum atau reaktivitas padam serta kondisi *stuck rod* sudah dipenuhi yang merupakan persyaratan mutlak untuk operasi teras setimbang dalam satu siklus. Hasil perhitungan hanya mencantumkan perhitungan koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator saja. Jika pada bahan bakar terjadi kenaikan temperatur maka tampang lintang *resonance capture* puncak akan turun pada ^{238}U atau terjadi *resonance broadening* akan menyebabkan kehilangan neutron pada penyerapan energi resonan pada ^{238}U akan naik sehingga mengakibatkan spektrum neutron akan berubah ke arah keras dan keff turun (energi resonan 7eV – 200 eV). Rasio $[\sigma_f/\sigma_a]_f$ akan berubah besarnya tergantung bahan bakarnya baru atau equilibrium. Untuk bahan bakar baru rasionya turun sedangkan jika bahan

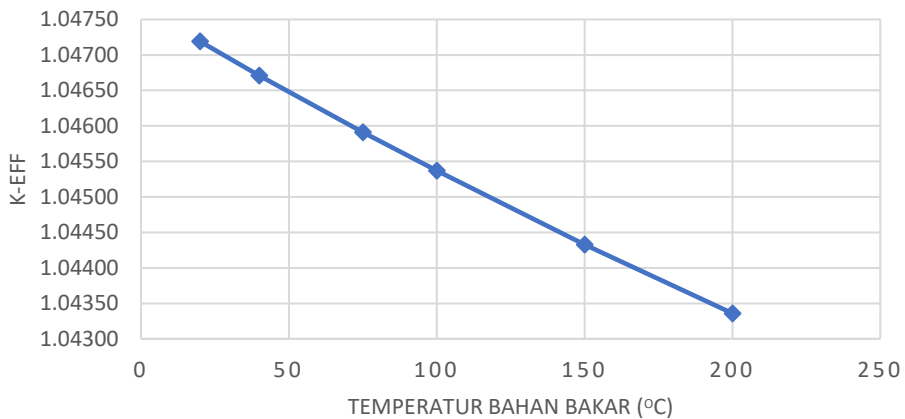
bakar yang mempunyai fraksi bakar maka terdapat plutonium di dalam bahan bakar sehingga rasionya naik. Dengan kata lain, jika temperatur sistem naik energi neutron naik sehingga rasio tampang lintang turun sering disebut dengan peristiwa *Hot Neutron Effect*. Hal ini akan menyebabkan pada ^{235}U tampang lintang fisinya turun menghasilkan nilai k_{eff} turun tetapi nilai tampang lintang fisi untuk ^{239}Pu naik sehingga k_{eff} naik. Kombinasi keduanya akan menghasilkan lebih besar pengaruh yang pertama dari yang kedua sehingga menyebabkan reaktivitas turun dan koefisien reaktivitas bahan bakar negatif. Namun pada teras setimbang (*equilibrium core*) jika fraksi bakar terlalu besar dapat menyebabkan nilai koefisien reaktivitas bahan bakar justru positif. Hal ini tidak diminati oleh desainer teras reaktor riset. Koefisien reaktivitas bahan bakar bersifat *prompt* (<1sekon) sehingga keselamatannya terhadap bahan bakar signifikan sering disebut dengan *inherent safety*.

Tabel 4. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar teras RSG-GAS kondisi HFP

Temperatur (°C)	k-eff	Reaktivitas (ρ) ($\Delta k/k$)	$\alpha_r = \Delta\rho/\Delta T$ ($\Delta k/k / ^\circ\text{C}$)	α_r (pcm/ $^\circ\text{C}$)
20	1,04719	$4,51 \times 10^{-2}$	0	0
40	1,04671	$4,46 \times 10^{-2}$	$-2,5 \times 10^{-5}$	-2,5
75	1,04591	$4,39 \times 10^{-2}$	$-2,0 \times 10^{-5}$	-2,0
100	1,04537	$4,34 \times 10^{-2}$	$-2,0 \times 10^{-5}$	-2,0
150	1,04433	$4,24 \times 10^{-2}$	$-2,0 \times 10^{-5}$	-2,0
200	1,04336	$4,16 \times 10^{-2}$	$-1,6 \times 10^{-5}$	-1,6

Tabel 4 menunjukkan nilai koefisien reaktivitas umpan balik temperatur bahan bakar untuk teras setimbang RSG-GAS muatan 250 gram dengan densitas 2,96 g/cc. Perubahan reaktivitas akibat kenaikan temperatur bahan bakar yang divariasikan dari suhu (20 – 200)°C kemudian dirata-ratakan. Sehingga diperoleh nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar seperti Tabel 4. Semakin naik temperatur bahan bakar semakin cepat diserap oleh material bahan bakar uranium namun tidak terjadi fisi atau reaksi pembelahan inti maka nilai koefisien reaktivitasnya semakin besar.

Efek Doppler juga berpengaruh dengan perubahan massa yang terjadi di dalam teras sehingga menyumbangkan reaktivitas negatif. Sebagai referensi hasil perhitungan dengan program komputer yang sama pada teras RSG-GAS berbahan bakar uranium silisida densitas 2,96 g/cm³ pengkayaan rendah pada kondisi *cold zero power* adalah -1,65x10⁻³ %Δk/k°C atau -1,65 pcm/°C. Koefisien reaktivitas bahan bakar ini merupakan umpan balik yang bermanfaat untuk operasi reaktor sehingga lebih aman jika nilainya negatif.



Gambar 3. Nilai k_{eff} fungsi temperatur bahan bakar teras RSG-GAS

Gambar 3. menunjukkan nilai k_{eff} dengan berubahnya temperatur bahan bakar bahwa nilai k_{eff} turun dengan naiknya temperatur bahan bakar untuk kondisi HFP (*hot full power*). Sehingga nilai koefisien reaktivitas umpan balik sebagai fungsi temperatur untuk teras setimbang RSG-GAS dengan densitas 2,96 g/cm³ adalah negatif. Perubahan reaktivitas akibat temperatur bahan bakar memberikan pengaruh yang besar dibanding pengaruh kerapatan moderator dan temperatur bahan bakar dan sifatnya spontan (*prompt reactivity feedback*).

Tabel 5. menunjukkan bahwa perubahan reaktivitas akibat kenaikan temperatur moderator untuk teras setimbang RSG-GAS dengan muatan 250 gram. Perubahan reaktivitas akibat kenaikan temperatur moderator yang divariasikan dari (20 – 100)°C kemudian dirata-ratakan. Semakin tinggi temperatur moderator nilai koefisien reaktivitas moderatornya semakin besar. Hal ini disebabkan oleh karena terjadinya perubahan temperatur moderator, tanpa perubahan kerapatan, mengakibatkan bertambahnya serapan resonansi dan

tangkapan-pembelahan (η). Bertambahnya serapan resonansi membuat nilai k_{eff} berkurang sedangkan parameter tangkapan pembelahan membuat nilai k_{eff} bertambah. Penambahan ini lebih besar dibanding muatan bahan bakar yang kecil. Secara total yang dapat dirasakan teras reaktor

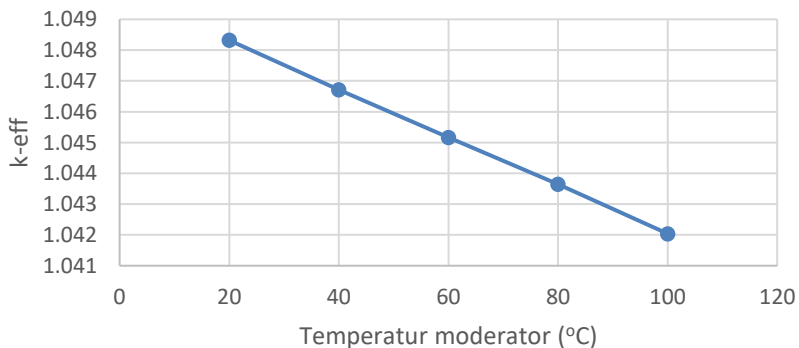
bahwa dengan bertambahnya jumlah atom ^{238}U akan menyebabkan naiknya nilai reaktivitas teras. Hal ini terlihat dengan nilai koefisien reaktivitas yang negatif di dalam Tabel 5.

Tabel 5. Koefisien reaktivitas moderator teras RSG-GAS kondisi HFP

Temperatur (°C)	k-eff	Reaktivitas (ρ)	$\alpha_f = \Delta\rho/\Delta T$ ($(\Delta k/k/^\circ\text{C})$)	α_f (pcm/°C)
20	1,04832	$4,61 \times 10^{-2}$	0	-7,25
40	1,04671	$4,46 \times 10^{-2}$	$-7,5 \times 10^{-5}$	(rerata)
60	1,04516	$4,32 \times 10^{-2}$	$-7,0 \times 10^{-5}$	
80	1,04365	$4,18 \times 10^{-2}$	$-7,0 \times 10^{-5}$	
100	1,04204	$4,03 \times 10^{-2}$	$-7,5 \times 10^{-5}$	

Jika temperatur moderator naik akan menurunkan tampang lintang absorpsi uranium sehingga menurunkan nilai faktor kerugian termal (*thermal disadvantage factor* = ϕ_m/ϕ_u) nilai k_{eff} naik maka nilai reaktivitas akan naik. Nilai yang diperoleh dari hasil perhitungan Batan-2DIFF untuk teras RSG-GAS sangat bersesuaian dengan hasil yang diharapkan. Jika dibandingkan dengan referensi hasil perhitungan dengan program komputer

yang sama pada teras RSG-GAS berbahan bakar uranium silisida densitas $2,96 \text{ g/cm}^3$ adalah $-7,70 \times 10^{-3} \text{ \%}\Delta k/k^\circ\text{C}$ atau $-7,70 \text{ pcm/}^\circ\text{C}$. Hasilnya berbeda karena kondisi bahan bakarnya berbeda yaitu yang didalam SAR (*Safety Analysys Report*) adalah bahan bakar oksida. Kondisi yang dihitung disini adalah kondisi HFP sedangkan pada referensi adalah CZP (*Cold zero power*).



Gambar 4. Nilai k_{eff} fungsi temperatur moderator teras RSG-GAS

Gambar 4. menunjukkan nilai k_{eff} teras RSG-GAS sebagai fungsi temperatur moderator pada kondisi HFP. Nilai k_{eff} turun dengan bertambahnya temperatur moderator di dalam teras. Hal ini menunjukkan bahwa nilai koefisien reaktivitas moderator dalam teras RSG-GAS adalah negatif. Sehingga teras RSG-GAS dapat disebut bersifat *undermoderated*. Nilai koefisien reaktivitas akibat perubahan densitas moderator teras RSG-GAS dengan muatan 250 gram paling besar dibanding dengan muatan lainnya. Koefisien reaktivitas ini juga sangat signifikan untuk menyumbangkan umpan balik negatif terhadap teras. Perubahan reaktivitas akibat perubahan temperatur moderator air sementara itu densitasnya dipertahankan pada temperatur kamar, memberikan pengaruh yang lebih kecil dibanding pengaruh temperatur bahan bakar. Hal ini diakibatkan perubahan kerapatan air merubah konstanta kelompok difusi sehingga mengurangi kemampuan hamburan dan menambah tangkapan resonansi.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan nilai reaktivitas dengan menggunakan program WIMSD-5B dan program difusi neutron 2-dimensi BATAN-2DIFF pada teras TWC RSG-GAS dengan densitas $2,96 \text{ g/cm}^3$ dan jumlah 40 elemen bahan bakar (EB) dan 8 elemen batang kendali (EK) didapatkan nilai reaktivitas lebih teras 7,02 % dengan nilai k_{eff} 1,0754517. Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator adalah negatif untuk semua level temperatur. Dari hasil tersebut terlihat bahwa dengan naiknya temperatur bahan bakar maka nilai koefisien reaktivitas rerata menurun. Dari seluruh nilai reaktivitas yang paling besar pengaruhnya terhadap umpan balik

reaktivitas adalah koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar. Perubahan reaktivitas dengan kenaikan temperatur bahan bakar dan moderator besarnya tidak linier terhadap kenaikan temperatur. Namun hal ini sudah memenuhi persyaratan yang ditetapkan yaitu setiap teras harus mempunyai koefisien reaktivitas negatif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada kepala Pusat PTKRN yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian di PTKRN.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. T. Surbakti, S. Pinem, T. M. Sembiring, "Analisis Pengaruh Densitas Bahan Bakar Silisida Terhadap Parameter Kinetik Teras Reaktor RSG-GAS", Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya. 3(1): 19-30, 2013.
- [2]. T. M. Sembiring, T. Surbakti, S. Pinem, "Neutronic Design of Mixed Oxide-Silicide Cores for the Core Conversion of RSG-GAS Reactor", Atom Indonesia., Vol. 27, no. 2, pp. 85-1001, 2001.
- [3]. S. Pinem, P. H. Liem, T. M. Sembiring, T. Surbakti, "Fuel element burn-up measurements for the equilibrium LEU silicide RSG GAS (MPR-30) core under a new fuel management strategy", Ann. Nucl. Energy, vol. 98, 2016.
- [4]. P. H. Liem, "Validation of BATAN'S Standard 3-D Diffusion Code, BATAN-3DIFF, on the First Core of RSG GAS", Atom Indonesia, vol. 25, no. 1, pp. 47-53, 1999.
- [5]. P. H. Liem, T. Taryo, T. M. Sembiring, S. Hiroshi, and N. Yoshitaka, "Study on the control rod interaction effect in RSG gas

- multipurpose reactor (MPR-30)", *Ann. Nucl. Energy*, vol. 29, no. 6, pp. 701–716, 2002.
- [6]. T. M. Sembiring, "Penggunaan Paket Program WIMSD/5B.12 dan BATAN-2DIFF untuk RSG-GAS," *PRSG*, April, 2011.
- [7]. S. Pinem, T. Surbakti, "Analysis on neutronic parameters of the AP1000 Reactor Core", *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*, 569-75, 2016.
- [8]. S. Pinem, T.M. Sembiring, T. Surbakti, "PWR Fuel Macroscopic Cross Section Analysis for Calculation Core Fuel Management Benchmark", *Journal of Physics: Conference Series* 1198 (2), 022065
- [9]. T. Surbakti, S. Pinem, T. M. Sembiring, L. Suparlina, J. Susilo, "Desain Konseptual Teras Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Uranium-molibdenum dari Aspek Neutronik", *Jurnal Tri Dasa Mega*. 3(14): 178-191. 2012.
- [10]. T. M. Sembiring, P. H. Liem, T. Surbakti, "Fuel management strategy for the compact core design of RSG GAS (MPR-30)", *RRFM 2000: research reactor fuel management*, Colmar, 19-21, 158-162. 2000.
- [11]. P. H. Liem, T Surbakti, D Hartanto, "Kinetics parameters evaluation on the first core of the RSG GAS (MPR-30) using continuous energy Monte Carlo method", *Progress in Nuclear Energy* 109, 196-203
- [12]. T Surbakti, P Purwadi, "Karakteristik reaktivitas teras kerja RSG-GAS selama 30 tahun beroperasi", *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)* 7 (1), 13-26.
- [13]. T Surbakti, M Imron, "Fuel burn-up calculation for working core of the RSG-GAS research reactor at BATAN Serpong", *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)* 7 (2), 89-101.
- [14]. T Surbakti, S Pinem, T. M. Sembiring, A Hamzah, K Nabeshima, "Calculation of Control Rods Reactivity Worth of RSG-GAS First Core Using Deterministic and Monte Carlo Methods", *Atom Indonesia* 45 (2), 69-79. 2019.
- [15]. T Surbakti, P Purwadi, "Analysis of Neutronic Safety Parameters of the Multi-Purpose Reactor–Gerrit Augustinus Siwabessy (RSG-GAS) Research Reactor at Serpong", *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)* 9 (1), 78-91
- [16]. T. Surbakti, T. M. Sembiring, "Analisis Neutronik Teras RSG-GAS Berbahan Bakar Silisida", *Indonesian Journal of Physics* 12 (3), 61-67
- [17]. A. Hamzah, "Analisis Distribusi Fluks dan Spektrum Neutron Reaktor PLTN PWR 1000 MWe Menggunakan Program MCNP", *Prosiding Seminar Nasional ke-18 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*, Bandung 2012.
- [18]. Surian Pinem, Tukiran S, "Analisis Efek Suhu Terhadap Reaktivitas Teras RSG - GAS Berbahan Bakar Silisida", *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, BATAN, 2001.