

ANALISIS EFEK SUHU TERHADAP REAKTIVITAS
TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR SILISIDA
Tukiran Surbakti, Surian Pinem*)

ABSTRAK

ANALISIS EFEK SUHU TERHADAP REAKTIVITAS TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR SILISIDA. Reaktor RSG-G.A. Siwabessy saat ini telah menggunakan elemen bakar silisida dengan tingkat muat 250 g Untuk itu perlu dilakukan perhitungan dan pengukuran efek suhu terhadap reaktivitas teras. Parameter yang ditentukan akibat efek suhu tersebut adalah koefisien reaktivitas suhu moderator, koefisien suhu elemen baker dan koefisien reaktivitas daya. Koefisien reaktivitas yang diperoleh dengan eksperimen berdasarkan hasil kalibrasi batang kendali. Perhitungan koefisien reaktivitas dilakukan dengan menggunakan dua paket program, yaitu WIMS/D4 dan Batan-2DIFF. Perhitungan sel dilakukan untuk memperoleh konstanta makroskopik material teras dan Batan-2DIFF digunakan untuk perhitungan teras. Hasil eksperimen dan perhitungan menunjukkan bahwa harga koefisien reaktivitas teras sesuai dan tidak ada yang melanggar batas keselamatan RSG-GAS. Harga koefisien reaktivitas suhu bahan bakar teras oksida, koefisien reaktivitas daya, koefisien reaktivitas suhu moderator teras silisida RSG-GAS masing-masing $-2,84 \text{ sen}^{\circ}\text{C}$, $-1,29 \text{ sen/MW}$ dan $-0,64 \text{ sen}^{\circ}\text{C}$. Harga-harga ini sesuai dengan kriteria keselamatan.

ABSTRACT

ANALYSIS OF TEMPERATURE EFFECTS ON REACTIVITY OF THE RSG-GAS CORE USING SILICIDE FUELS. RSG-GAS has been operating using new silicide fuels so that it is necessary to estimate and to measure the effect of temperature on reactivity of the core. The parameters to be determined due to temperature effect are reactivity coefficient of moderator temperature, temperatur coefficient of fuel element and power reactivity coefficient. By doing a couple compensation method, determination of reactivity coefficient as well as the reactivity coefficient of moderator temperature can be obtained. Furthermore, coefficient of the reactivity was successfully estimated using the combination of WIMS-D4 and Batan-2DIFF. The cell calculation was done by using WIMS-D4 code to get macroscopic cross section and Batan-2DIFF code is used for core calculation. The calculation and experimental results of reactivity coefficient do not show any deviation from RSG-GAS safety margin. The results are $-2,84 \text{ sen}^{\circ}\text{C}$, $-1,29 \text{ sen/MW}$ and $-0,64 \text{ sen}^{\circ}\text{C}$ for reactivity coefficients of temperature, power, fuel element and moderator temperature, respectively. All of 3 parameters are absolutely met with safety creteria.

Kata Kunci : Reaktivitas, suhu, teras reaktor, silisida moderator

**) Staf BPTR-P2TRR-Batan*

PENDAHULUAN

Bahan bakar teras RSG-GAS telah diganti dari uranium oksida menjadi uranium silisida sehingga perlu dilakukan evaluasi koefisien reaktivitas untuk keselamatan operasi reaktor. Koefisien reaktivitas suhu moderator teras RSG-GAS ditimbulkan oleh karena adanya kenaikan suhu pada air pendingin reaktor yang sekaligus sebagai moderator. Kenaikan suhu oleh karena fisis dapat menyebabkan perubahan kerapatan material dalam teras reaktor. Perubahan pada kerapatan tampang lintang makroskopik efektif dan spektrum neutron dapat menimbulkan gangguan pada operasi reaktor. Koefisien reaktivitas sangat berhubungan erat dengan keselamatan operasi reaktor terutama pada reaktor yang beroperasi dengan fluks tinggi serta berpendingin dan bermoderator air seperti RSG-GAS. Naiknya suhu yang disebabkan oleh reaksi pembelahan di dalam teras dapat menyebabkan perubahan reaktivitas teras.

Koefisien reaktivitas suhu elemen bakar memberikan perubahan reaktivitas per satuan suhu elemen bakar dan tergantung pada jenis dan suhu elemen bakar. Umumnya koefisien suhu negatif dimana reaktivitas akan berkurang dengan kenaikan suhu. Koefisien suhu negatif menjadi lebih kecil dengan kenaikan suhu elemen bakar, karena puncak resonansi berimpit pada suhu tinggi menghasilkan penurunan efek Doppler. Koefisien suhu negatif sangat penting dalam keselamatan operasi reaktor dimana daya reaktor akan berkurang dengan kenaikan suhu.

Analisis koefisien reaktivitas teras silisida RSG-GAS dilakukan dengan metode eksperimen dan perhitungan. Hasilnya akan dibandingkan dengan teras oksida yang telah dipublikasikan¹⁾. Dalam eksperimen untuk menentukan koefisien reaktivitas, reaktor dalam kondisi subkritis dan kenaikan suhu terjadi akibat pengoperasian pompa primer tanpa pompa sekunder, sehingga air moderator menjadi panas tanpa ada pemindahan panas oleh pompa sekunder. Karena suhu moderator naik maka terjadi perubahan reaktivitas teras. Reaktivitas teras RSG-GAS ditentukan dengan eksperimen kalibrasi batang kendali dengan metode kompensasi berpasangan. Kemudian ditentukan besarnya nilai koefisien reaktivitas suhu moderator. Untuk menentukan koefisien reaktivitas daya dilakukan dengan menaikkan daya secara bertahap dan dicatat posisi batang kendali dan ditentukan dari kurve kalibrasi batang kendali.

Koefisien reaktivitas elemen bakar untuk silisida tidak dapat ditentukan dengan eksperimen karena tidak mempunyai Instrumented Fuel Element yang biasanya digunakan untuk koefisien reaktivitas elemen bakar. Untuk itu dilakukan perhitungan koefisien reaktivitas elemen bakar dengan program komputer WIMSD-4 dan Batan-2DIFF.

TEORI

Faktor multiplikasi efektif teras reaktor (k_{eff}) didefinisikan²⁾:

$$k_{eff} = k_{\infty} P_{nl} \quad (1)$$

dengan :

P_{nl} = probabilitas ketidakbocoran neutron yang dapat dituliskan sebagai berikut,

$$P_{nl} = \frac{\exp(-B^2\tau)}{1 + L^2B^2} \quad (2)$$

dengan :

L = panjang difusi neutron termal

B = buckling material

τ = umur Fermi

$P_f = \exp(-B^2\tau)$ adalah faktor ketidak-bocoran neutron cepat

$P_{th} = (1+L^2B^2)^{-1}$ adalah faktor ketidak-bocoran neutron termal.

$P_{nl} = P_f \cdot P_{th}$

K_∞ = faktor multiplikasi tak terhingga

$$K_\infty = \eta\epsilon pf$$

$K_{eff} = 1$ reaktor kritis

$K_{eff} > 1$ reaktor super kritis

$K_{eff} < 1$ reaktor sub kritis

Secara praktis reaktor harus didesain sedemikian rupa sehingga harga $k_{eff} > 1$ karena untuk persiapan menuju operasi reaktor ke suatu level daya tertentu membutuhkan kompensasi efek dari penurunan nilai k_{eff} selama operasi misalnya untuk deplesi bahan bakar, perubahan suhu, akumulasi produk fisi yang bersifat racun seperti X_c dan S_m . Faktor multiplikasi *excess* (Δk) adalah sejumlah harga yang mana faktor multiplikasi efektif lebih besar dari satu.

$$\Delta k = k_{eff} - 1 \quad (4)$$

sebagai konsekuensinya seperti yang telah disebutkan di atas $\Delta k = 0$ untuk reaktor yang beroperasi secara kritis, positif untuk reaktor yang beroperasi secara superkritis dan negatif untuk reaktor yang beroperasi secara subkritis. Reaktivitas (ρ) itu sendiri adalah rasio dari faktor multiplikasi *excess* dengan faktor multiplikasi efektif, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\rho = \frac{\Delta k}{k_{eff}} = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} = 1 - \frac{1 + L^2B^2}{k_\infty \exp(-B^2\tau)} \quad (5)$$

Dari persamaan (5), L^2 , B^2 , K_∞ sangat tergantung pada suhu. Jika terjadi perubahan suhu pada moderator yang disebabkan reaksi fisi maka parameter tersebut akan berubah. Jika terjadi perubahan material bahan bakar dari uranium oksida ke uranium silisida maka parameter di atas juga akan mempengaruhi reaktivitas teras khususnya K_∞ .

Koefisien Reaktivitas

Reaktivitas teras akan berubah jika terjadi perubahan pada kondisi operasi reaktor. Peristiwa yang sering dilakukan adalah merubah posisi batang kendali, memodifikasi reflektor atau susunan teras, memasukkan sumber neutron (material fisi) atau absorber neutron ke dalam teras. Pada waktu yang bersamaan reaktor yang mempunyai faktor-faktor *inherent* yang mengeksekusi kearah perubahan reaktivitas walaupun reaktor beroperasi pada daya konstan. Faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap perubahan reaktivitas tersebut adalah perubahan suhu, berpengaruh terhadap racun produk fisi, perubahan jumlah bahan bakar di dalam teras reaktor, terjadi void di dalam moderator atau pendingin. Perubahan reaktivitas yang disebabkan oleh faktor-faktor yang berbeda di atas disebut koefisien reaktivitas.

Koefisien Reaktivitas Suhu Moderator

Bagian utama energi yang dilepaskan pada saat reaktor beroperasi adalah dalam bentuk panas. Panas ini ditransfer ke pendingin yang sekaligus sebagai moderator. Walaupun reaktor beroperasi pada kondisi *steady state* akan terjadi perubahan suhu di dalam teras reaktor yang menyebabkan sifat-sifat fisis dan nuklir dari material teras akan berubah. Perubahan sifat-sifat ini menyebabkan efek *slowing down* terhadap neutron berbeda, tampang lintang, densitas dan juga volum material teras berubah. Hal ini akan mengakibatkan sifat-sifat absorpsi, fisi dan faktor kemungkinan bocor neutron dari teras akan berubah yang akhirnya berpengaruh terhadap reaktivitas. Perubahan reaktivitas dengan berubahnya suhu disebut koefisien reaktivitas suhu yang dapat dituliskan (α_{T_m}). Beberapa efek yang telah disebutkan di atas dapat menghasilkan koefisien reaktivitas positif yang artinya reaktivitas akan naik dengan kenaikan suhu, sedangkan yang lain dapat pula memberikan kontribusi koefisien reaktivitas negatif. Efek totalnya atau koefisien keseluruhan dapat menghasilkan positif atau negatif tergantung pada komposisi material dan geometrinya di dalam teras. Untuk reaktor yang beroperasi stabil dan aman koefisien reaktivitas suhu didesain negatif. Dalam hal ini k_{eff} turun dengan naiknya suhu dan efek *self-stabilizing* akan terjadi di dalam teras, misalnya pada reaktor yang mempunyai *inherent stability*. Sebaliknya reaktor dengan koefisien reaktivitas positif sangat potensial untuk tidak aman dioperasikan karena *inherent* instabilitinya (dimana k_{eff} naik dengan naiknya suhu).

Perubahan suhu di moderator dan bahan bakar merubah reaktivitas dengan cara yang berbeda. Perubahan kecil pada keseimbangan reaksi pembelahan U-235 dalam reaktor saat beroperasi dapat ditunjukkan pada perubahan reaktivitasnya. Adanya kenaikan suhu pada teras reaktor akan memberikan gangguan atau perubahan terhadap keseimbangan produksi neutron juga ditunjukkan pada perubahan reaktivitas. Besarnya perubahan reaktivitas per satuan perubahan suhu moderator, disebut koefisien reaktivitas suhu yang dapat ditulis sebagai berikut³⁾:

$$\alpha_{T_m} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (6)$$

dengan :

α_{Tm} = koefisien reaktivitas suhu moderator [%/°C]

$\Delta\rho$ = perubahan reaktivitas [%]

ΔT = perubahan suhu [°C]

Koefesien Reaktivitas Suhu Elemen Bakar

Tampang lintang makroskopik U-238 dan inti berat yang lain menunjukkan resonansi pada kelompok energi neutron. Jika energi kinetik diserap neutron terjadi eksitasi energi, kemudian sejumlah neutron diserap dengan probabilitas tinggi. Seperti inti target osilasi sekitar posisi awal tergantung pada suhu material, tidak hanya neutron dengan energi yang diberikan tetapi juga neutron yang lain dengan interval energi sekitar energi yang diserap dengan probabilitas tinggi tersebut.

Dengan kenaikan suhu energi termal dari inti target juga bertambah. Untuk itu neutron dengan energi rendah dan tinggi kemudian energi eksitasi diserap. Puncak resonansi lebih rendah tetapi terbatas pada suhu tinggi, luas dibawah puncak resonansi umumnya konstan. Pelebaran puncak resonansi mempunyai efek yang penting dalam penyerapan resonansi. Energi tinggi neutron dimoderasi dengan tumbukan dengan inti moderator. Neutron kehilangan energi sedikit demi sedikit setelah tumbukan. Pada energi tertentu neutron lewat melalui energi resonansi. Pada energi tertentu probabilitas penyerapan sangat besar pada suhu rendah dan tinggi, sehingga semua neutron dengan energi ini diserap. Pada suhu tinggi interval energi dimana neutron diserap cukup besar absorpsi resonansi bertambah.

Pada reaktor riset dan reaktor dengan pendingin air ringan absorpsi resonansi umumnya oleh U-235, tetapi efek yang sama dilakukan oleh Pu-239 dan Pu-240. Efek suhu ini disebut efek Doppler. Perubahan reaktivitas ini dijelaskan dengan,

$$\alpha_{Tf} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (7)$$

dengan :

α_{Tf} = koefisien reaktivitas suhu elemen bakar [%/°C]

$\Delta\rho$ = perubahan reaktivitas [%]

ΔT = perubahan suhu [°C]

Koefesien suhu elemen bakar memberikan perubahan reaktivitas per satuan suhu elemen bakar dan tergantung pada jenis dan suhu elemen bakar. Koefesien suhu negatif sangat penting dalam keselamatan operasi reaktor dimana daya reaktor akan berkurang dengan kenaikan suhu.

Koefesien Reaktivitas Daya

Perubahan reaktivitas dalam teras reaktor selama kenaikan daya disebabkan oleh kenaikan suhu pada beberapa komponen dalam teras reaktor. Komponen-komponen itu adalah elemen bakar, reflektor beryllium dan elemen reflektor beryllium, elemen dummy dan aliran pendingin. Koefesien reaktivitas daya didefinisikan sebagai

perubahan reaktivitas dari suatu tingkat daya ke tingkat daya yang lain dimana seperti laju alir dan suhu masukan.

Koefisien reaktivitas daya dihitung dengan rumus,

$$\alpha_p = \frac{\Delta\rho}{\Delta P} \quad (8)$$

dengan :

α_p = koefisien reaktivitas daya [%/°C]

$\Delta\rho$ = perubahan reaktivitas [%]

ΔP = perubahan daya [MW]

Reaktor dapat dioperasikan pada daya yang berbeda-beda dengan menjaga laju alir konstan dan suhu berubah atau laju alir berubah dan suhu konstan.

TATA KERJA

1. EKSPRIMEN

Pengukuran Koefisien Reaktivitas Moderator⁴⁾

Reaktor dikritiskan menuju daya rendah bebas sumber, bebas xenon. Pompa primer dan pompa sekunder dioperasikan. Data-data yang diperlukan dicatat, yaitu posisi batang kendali, aliran pendinginan suhu moderator awal. Kemudian pompa sekunder dimatikan sedangkan pompa primer tetap dioperasikan sampai seluruh pengukuran selesai. Selama pengamatan kenaikan suhu dilakukan, reaktor dalam kondisi subkritis dimana satu batang kendali yaitu batang kendali pengatur dalam posisi nol, sedangkan batang kendali lainnya pada posisi BANK.

Pada saat perubahan suhu telah mencapai 0,2°C (stabil), reaktor dikritiskan dengan menaikkan batang kendali pengatur. Catat posisi batang kendali pengatur. Perbedaan reaktivitas dihitung dengan menggunakan data hasil kalibrasi reaktivitas batang kendali. Reaktor disubkritisikan kembali dan pemanasan diteruskan sampai kenaikan suhu 5°C. Data suhu dicatat setiap 30 menit sekali. Bila kenaikan sudah mencapai 5°C, reaktor dikritiskan kembali, catat posisi batang kendali pengatur, hitung reaktivitasnya. Prosedur ini diulang kembali sampai suhu mencapai 42°C.

Pengukuran Koefisien Reaktivitas Suhu Elemen Bakar

IFE (*Instrumented Fuel Element*) dimasukkan pada posisi D-6 di teras reaktor, kemudian dihubungkan dengan decoder. Reaktor dioperasikan dengan aliran pendingin pada daya tinggi (1 MW). Dicatat semua parameter teras pada lembar data (posisi batang kendali, suhu bahan bakar, konversi daya pada detector JKT 04). Setelah stabil daya reaktor dinaikkan ke level 5 MW dan dicatat parameter teras reaktor. Selanjutnya daya reaktor dinaikkan menjadi 10 MW dan 15 MW. Kemudian dievaluasi koefisien reaktivitas elemen bakar.

Pengukuran Koefisien Reaktivitas Daya

Pengukuran koefisien reaktivitas daya dapat dilakukan sekaligus dengan pengukuran koefisien reaktivitas suhu elemen bakar. Namun dalam eksperimen ini dilakukan secara terpisah dengan menaikkan daya reaktor yang bertingkat (1 MW, 2MW, 5 MW, 10 MW dan 15 MW) . Kemudian dilihat posisi batang kendali yang menyatakan perubahan reaktivitas teras akibat kenaikan daya reaktor.

2. PERHITUNGAN

Perhitungan koefisien reaktivitas suhu moderator dilakukan dengan menggenerasi tampang lintang material teras menggunakan program WIMSD/4. Model multi slab, 4 group energi neutron dan geometri x,y digunakan dalam membentuk unit sel pada input program WIMSD/4⁵⁾. Satu elemen bakar yang terdiri dari 21 plat elemen bakar dinyatakan dalam 1/2 bahan bakar, yang jika disusun dalam slab terdiri atas 44 slab material. Ada 4 material yang menyusun sel bahan bakar reaktor RSG-GAS yaitu:

- 1). Material/daerah *meat* yang mempunyai ketebalan 0,027 cm.
- 2). Material/daerah kelongsong yang mempunyai ketebalan 0,038 cm.
- 3). Material/daerah *moderator* (H₂O) yang mempunyai ketebalan 0,255 cm.
- 4). Material/ daerah *extra region* .

Daerah yang tidak termasuk ke-3 daerah tersebut dikumpulkan dalam satu daerah yang disebut *extra region*. Daerah *extra region* merupakan campuran AlMg₂ dan H₂O.

Hasil keluaran berupa konstanta tampang lintang material teras digunakan pada program BATAN-2 DIFF ditambah geometri teras RSG-GAS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukurun koefisien reaktivitas suhu moderator dilakukan pada teras RSG-GAS, hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1 untuk teras oksida dan Tabel 2 untuk teras silisida. Dari hasil pengukuran dapat dilihat bahwa koefisien reaktivitas suhu moderator yang dibangkitkan dari aliran pompa berbeda pada kenaikan suhu yang berbeda. Suhu moderator tidak sama disetiap posisi termokopel. Sehingga untuk menentukan satu nilai suhu moderator kelima termokopel dirata-ratakan. Kenaikkan suhu moderator juga tidak sama pada selang waktu yang sama, sehingga menyebabkan perubahan reaktivitas juga tidak sama. Untuk menentukan nilai koefisien reaktivitas suhu moderator maka nilai koefisien reaktivitas suhu moderator sesaat dirata-ratakan, sehingga nilainya menjadi -0,65 sen/°C. Nilai ini tidak jauh (5,2%) berbeda dengan hasil desain di SAR. Perbedaan nilai koefisien reaktivitas suhu moderator teras oksida dan silisida tidak jauh berbeda yaitu - 0,64 sen/°C untuk teras oksida dan - 0,526 sen/°C untuk teras silisida. Perbedaan ini disebabkan oleh karena daya hantar panas bahan bakar silisida relatif lebih baik dibanding oksida.

Dengan berubahnya suhu moderator, densitas moderator dan suhu neutron akan berubah dan menghasilkan harga k_{∞} adalah sebagai berikut : ϵ , η dan p tidak berubah

dan harga f dapat dinyatakan sebagai berikut : Pada reaktor homogen f tidak tergantung pada suhu moderator. Pada reaktor heterogen (seperti RSG-GAS), dengan naiknya suhu 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_{∞} akan naik demikian juga dengan reaktivitas.

Penurunan densitas moderator yang disebabkan oleh kenaikan suhu moderator mempunyai kosekuensi sebagai berikut :

$\tau \approx 1/\Sigma_s^2 = 1/(\sigma_s N)^2$ akan naik yang memaksa harga reaktivitas turun, tetapi efek ini biasanya kecil.

$L^2 = \lambda_{tr} \lambda_{s2}/3 = 1/3 \cdot 1/\Sigma_{tr} \cdot 1/\Sigma_s$ berbanding terbalik dengan kuadrat densitas dan σ_s (*absorbtion cross section*).

Ketertangungan panjang difusi termal pada suhu moderator akan jelas terlihat. Dalam kenyataannya dengan menaikkan suhu moderator harga L akan naik dan bersamaan dengan itu kobocoran termal akan naik juga dan mengakibatkan reaktivitas menjadi turun.

Kenaikan suhu moderator dan suhu bahan bakar akan menyebabkan kenaikan ukuran teras reaktor yang akan menurunkan harga *buckling* (B^2) dan akhirnya harga reaktivitas naik.

Perubahan suhu bahan bakar akan mempengaruhi parameter-parameter berikut ini : kemungkinan lolos resonansi (p) pada rumus k_{∞} (karena pelebaran resonance U-238) akan menurun dengan naiknya suhu bahan bakar. Oleh karena k_{∞} turun maka konsekuensinya reaktivitasnya akan turun. Seperti yang telah disebutkan di atas, naiknya suhu 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.

Secara numerik analisis dari faktor-faktor yang telah dibahas di atas menunjukkan bahwa efek total adalah menurunkan reaktivitas dengan naiknya suhu moderator atau bahan bakar sehingga koefisien reaktivitas suhu biasanya negatif. Walaupun demikian, air sebagai moderator teras pada rasio moderator dan bahan bakar yang khusus dapat bernilai positif pada range suhu operasi tertentu.

Gambar 1. menunjukkan hubungan reaktivitas dengan suhu secara eksperimen. Kemiringan grafik merupakan koefisien reaktivitas suhu moderator. Untuk suhu dibawah 35°C koefisien reaktivitas suhu moderator silisida lebih besar dari oksida sedangkan untuk suhu diatas 35°C koefisien reaktivitas suhu moderator silisida lebih kecil dari oksida. Namun perbedaannya relatif sangat kecil karena muatan uraniumnya sama.

Hasil pengukuran koefisien reaktivitas daya dapat dilihat pada Tabel 3. Besarnya koefisien reaktivitas daya teras silisida adalah $-1,29 \text{ sen/MW}$. Untuk teras oksida tidak dilakukan pengukurannya namun secara perhitungan telah dilakukan besarnya $-1,9 \text{ sen/MW}$. Koefisien reaktivitas daya teras silisida lebih kecil dibanding teras oksida. Hal

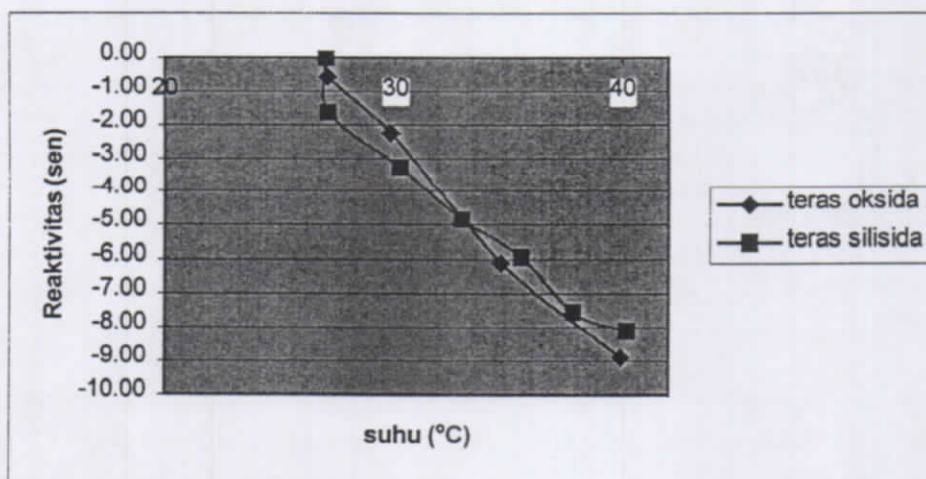
ini disebabkan oleh karena bahan bakar silisida mempunyai daya hantar yang relatif lebih baik dari teras oksida sehingga nilainya relatif lebih kecil.

Hasil pengukuran koefisien reaktivitas suhu bahan bakar teras oksida dapat dilihat pada Tabel 4. Sedangkan hasil pengukuran untuk teras silisida belum dapat dilakukan karena belum mempunyai IFE yang bahan bakarnya silisida. Hasil perhitungan koefisien reaktivitas suhu bahan bakar oksida dan silisida dapat dilihat pada Tabel 5. Besarnya koefisien reaktivitas suhu bahan bakar teras oksida dengan pengukuran adalah $-2,84 \text{ sen/}^\circ\text{C}$. Hasil eksperimen ini jika dibandingkan dengan perhitungan berbeda jauh. Karena dalam eksperimen banyak pengaruh yang material teras yang dalam perhitungan sudah disederhanakan misalkan derajat bakar dari bahan bakar oksida. Jika dibandingkan hasil perhitungan antara teras oksida dan silisida tidak jauh berbeda tetapi jika dibandingkan dengan nilai desain perbandingannya yaitu $1,60 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{K}^6$ dan masing masing $1,61 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{K}$ (oksid), $1,65 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{K}$ (silisida). Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar diambil sekitar kenaikan suhu (ΔT) 70°C , karena suhu bahan bakar ini mendekati suhu pada saat dilakukan eksperimen. Perbedaan nilai koefisien reaktivitas suhu bahan bakar antara teras silisida dan oksida berbeda kecil sekali karena suhu pada bahan bakar pada daya yang sama dianggap tidak berbeda.

Tabel 1. Hasil Pengukuran KRSM Teras oksida RSG-GAS 250 gU ⁷⁾

Arus JKT04 = $2,5\text{E}-09 \text{ A}$ Posisi Bank = 252 mm Aliran pendingin = $3250 \text{ m}^3/\text{jam}$

Parameter		1	2	3	4	5
Suhu rerata (T1-T5)	$^\circ\text{C}$	27	27,08	29,76	34,60	39,90
Perubahan suhu (ΔT)	$^\circ\text{C}$	-	0,08	2,68	4,84	5,30
Posisi Reg. Rod	Mm	270	271	274	281	286
Perb. Reaktivitas	Sen	-	0,56	1,67	3,89	2,78
	Sen/kom	-	0,56	2,23	6,12	8,90
KRSM	Sen/ $^\circ\text{C}$	-	-	-0,62	-0,80	0,52
	$\Delta k/k/^\circ\text{K}$	-	-	-4,7E-5	-6,1E-5	-4,0E-5



Gambar 1. Hasil eksperimen hubungan reaktivitas dengan suhu

Keterangan :

KRSM = Koefisien reaktivitas suhu moderator

KRD = Koefisien reaktivitas daya

KRSEM = Koefisien reaktivitas suhu elemen bakar

Tabel 2. Hasil Pengukuran KRSM Teras silisida RSG-GAS 250 gU

Arus JKT04 = 2,5E-09 A Posisi Bank=254 mm Aliran pendingin=3250 m³/jam

Parameter		1	2	3	4	5	6	7
Suhu rerata (T1-T5)	°C	24,8	27,1	30,2	32,9	35,5	37,8	40,2
Perubahan suhu	°C	-	2,3	3,1	2,8	2,5	2,3	2,4
Posisi Reg. Rod	Mm	254	257	260	263	265	268	269
Perb. Reaktivitas	Sen (negatif)		-1,621	-1,622	-1,621	-1,081	-1,621	-0,541
	Kom. (neg)		-1,621	-3,243	-4,864	-5,94	-7,566	-8,107
KRSM	Sen/°C (neg)		-0,705	-0,523	-0,578	-0,432	-0,705	-0,225
	Δk/k/°K (E-05)		-5,39	-4,00	-4,42	-3,30	-5,39	-1,74

Tabel 3. Hasil Pengukuran KRD Teras Silisida RSG-GAS 250 gU

Aliran pendingin=3250 m³/jam

Posisi Bank=254 mm

Parameter		1	2	3	4	5
Daya JKT 04	(MW)	1	2	3	5	15
	(A)	0,35 E-05	0,7 E-05	1,5 E-05	2,2 E-05	0,59E-04
Posisi Reg. Rod	mm	253	256	259	262	273
Perb. Reaktivitas	Sen (negatif)		-1,622	-1,621	-1,622	-5,946
	Sen/ kom (negatif)		-1,622	-3,243	-4,865	-10,811
KRD	Sen/MW (negatif)		-1,622	-1,621	-0,811	-0,595
	Δk/k/MW (negatif)		-1,24E-04	-1,24E-04	-0,62E-04	-0,46E-04

NB. Pengukuran KRD untuk teras oksida tidak dilakukan

Tabel 4. Hasil Pengukuran KRSEB Teras oksida RSG-GAS 250 gU

Parameter	Rerata	
Suhu (T1-T5) °C	66,98	
Daya/Arus JKT04	19,398 MW / 0,68 X10 ⁻⁴ A	
Posisi Bank/Reg. Rod, mm	310 / 317	
Suhu (T1-T5) °C	88,44	
Daya/Arus JKT04	29,491 MW / 1,02 X10 ⁻⁴ A	
Posisi Bank/Reg. Rod, mm	310 / 334	
Perubahan suhu (ΔT) °C	21,46	
Perubahan reaktivitas, Sen	-7,569	
Perubahan daya, MW	10,093	
KRSEB	Sen/°C	-2,84
	Δk/k/°K	-2,17E-5

NB. Pengukuran KRSEB teras silisida tidak dilakukan karena IFE silisida belum ada.

Tabel 5. Perhitungan KRTEB Teras Oksida dan Silisida RSG-GAS 250 gU

T(°C)	Teras Oksida			Teras Silisida		
	k_{eff}	$\Delta\rho \times 10^{-4}$	$\alpha_r (\times 10^{-5})$	k_{eff}	$\Delta\rho \times 10^{-4}$	$\alpha_r (\times 10^{-5})$
20	1,0920241	-	-	1,0924517	-	-
38	1,0914931	4,4549	-2,4749	1,0919340	4,3399	-2,4111
50	1,0911721	7,1501	-2,3834	1,0915810	6,4623	-1,9340
70	1,0909271	9,2083	-1,8417	1,0912706	9,9072	-1,9814
80	1,0908021	10,259	-1,7098	1,0911702	10,7504	-1,7917
90	1,0906791	11,293	-1,6132	1,0910688	11,6021	-1,6574
100	1,0904541	13,184	-1,6480	1,0908563	13,3875	-1,6734
150	1,0892041	23,708	-1,8237	1,0897261	22,8951	-1,7612

*) SAR $\alpha_r = -1,6 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ K^8)$

KESIMPULAN

Koefisien reaktivitas teras reaktor RSG-GAS menentukan faktor keselamatan sehingga perlu ditentukan secara akurat baik secara eksperimen maupun perhitungan. Beberapa parameter kinetik yang telah ditentukan baik dengan eksperimen dan perhitungan tidak ada yang melanggar batas-batas keselamatan sehingga parameter ini dapat digunakan dalam perhitungan lebih lanjut untuk analisis keselamatan teras. Ada parameter kinetik yang belum dapat dilakukan secara eksperimen di teras RSG-GAS seperti koefisien reaktivitas void moderator karena keterbatasan alat.

DAFTAR PUSTAKA

1. YUSNI P. "Pengukuran Koefisien Reaktivitas Suhu Moderator Teras RSG-GAS" Skripsi, Jurusan Fisika, FMIPA-USU, Medan, 1998.
2. TUKIRAN S. "Pengukuran Koefisien Reaktivitas Suhu dan Void Teras RSG-GAS" Proseding Uspen PRSG- Batan, Serpong, 1994.
3. G. R. KEEPIN, "Physics of Nuclear Kinetics", Addison-Wesley Pub. Co. Inc. USA, 1965
4. M. ASH, " Nuclear Reactor Kinetics", Mc. Graw Hill Pub. 1979.
5. M.J. ROTH, J.D MACDOUGALL, P.B. KEMSHELL. " The Preparation of Input Data for WIMS" RSICC, Documentation for CCC-576, 1991
6. J. R. LAMARSH, "Intoduction to Nuclear Reactor Theory", Addison-Wesley Pub.Co. Inc. USA, 1972.
7. PRSG-BFR, Laporan Data Teras VI, PRSG-Batan, Serpong No. Ident. 06/PR/TT-6/RSGEFT/92, 1992.
8. INTERATOM, "Safety Analysis Report" Rev. 7, Batan, 1987.