

PENGUKURAN KOEFISIEN REAKTIVITAS DAYA REAKTOR RSG-GAS

MEASUREMENT OF RSG-GAS REACTOR POWER REACTIVITY

Susanto¹, Sukarno Sigit², Suparjo³
1,2,3PRSG-BATAN, Kawasan Puspiptek Gd.30, Serpong, 15310
Sukarnosigit250@gmail.com

Diterima : 21 Juli' 2020, diperbaiki : 22 Agustus 2020, disetujui : 11 September 2020

ABSTRAK

PENGUKURAN KOEFISIEN REAKTIVITAS DAYA REAKTOR RSG-GAS. Koefisien reaktivitas daya (KRD) adalah parameter neutronik yang sangat penting untuk keselamatan operasi reaktor. Koefisien reaktivitas daya merupakan kombinasi dari koefisien reaktivitas doppler, moderator dan void. Koefisien reaktivitas daya RSG-GAS pernah diukur pada saat teras pertama, teras reaktor RSG-GAS telah dikonversi dari teras oksida (U_3O_8 -AL) ke teras silisida (U_3Si_2Al) sehingga perlu dilakukan pengukuran ulang. Koefisien reaktivitas daya didesain bernilai negatif. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung koefisien reaktivitas daya reaktor RSG-GAS melalui eksperimen kenaikan daya. Koefisien reaktivitas daya ditentukan dengan menaikkan daya dari 1 – 15 MW secara bertahap dengan posisi batang kendali bank tetap dan batang kendali pengatur berubah. Perubahan reaktivitas ditentukan sesuai dengan posisi batang kendali pengatur. Dari hasil perhitungan diketahui koefisien reaktivitas daya rata-rata sebesar -1.028 sen/MW dan akan semakin negatif mengikuti kenaikan daya. Hal ini terjadi karena kenaikan daya reaktor akan meningkatkan temperatur bahan bakar yang mengakibatkan terjadinya efek doppler. Selain itu daya moderasi moderator akan menurun akibat kenaikan suhu pendingin reaktor. Nilai koefisien reaktivitas daya teras silisida lebih rendah dibanding teras oksida (KRD teras oksida = 1.97 sen/MW). Hal ini disebabkan karena pembangkitan panas pada teras oksida untuk tingkat muatan uranium sebesar 250 gr lebih tinggi dibanding silisida (oksidasi 1.87 W/gr, silisida 1.85 W/gr) sehingga efek doppler yang terjadi lebih tinggi. Namun jika dibandingkan dengan beberapa reaktor riset lainnya, nilai KRD RSG-GAS reaktif lebih besar. Dengan nilai KRD yang negatif dan semakin negatif mengikuti kenaikan daya reaktor maka reaktor dapat dioperasikan dengan stabil dan aman.

Kata Kunci : reaktivitas, daya, batang kendali pengatur.

ABSTRACT

MEASUREMENT OF REACTIVITY COEFFICIENT OF RSG-GAS REACTORS. The power reactivity coefficient (KRD) is a neutronic parameter which is very important for the safety of reactor operation. The power reactivity coefficient is a combination of the doppler, moderator and void reactivity coefficients. The power reactivity coefficient of RSG-GAS was measured at the time of the first core, the RSG-GAS reactor core had been converted from an oxide core (U_3O_8 -AL) to a silicide core (U_3Si_2Al) so it was necessary to re-measure it. The power reactivity coefficient is designed to be negative. The purpose of this study is to calculate the power reactivity coefficient of the RSG-GAS reactor through an experimental power increase. The power reactivity coefficient is determined by increasing the power from 1 - 15 MW gradually with the position of the bank control rod fixed and the control rod changing. The change in reactivity is determined according to the position of the control rod. From the calculation, it is known that the average power reactivity coefficient is -1.028 cents / MW and will be more negative as the power increases. This happens because the increase in reactor power will increase the temperature of the fuel which results in the Doppler effect. In addition, the

moderating power of the moderator will decrease due to the increase in reactor coolant temperature. The reactivity coefficient value of the silicide core was lower than that of the oxide core (KRD of the oxide core = 1.97 cents / MW). This is because the heat generation in the oxide core for the uranium charge level is 250 gr higher than the silicide (1.87 W / gr oxide, 1.85 W / g silicide) so that the doppler effect that occurs is higher. However, when compared with several other research reactors, the KRD RSG-GAS value is relatively higher. With a negative and more negative KRD value following the increase in reactor power, the reactor can be operated stably and safely.

Keywords: reactivity, power, control rod control.

PENDAHULUAN

Reaktor RSG-GAS adalah reaktor tipe MTR (Material Testing Reactor) menggunakan reflektor berilium dan air ringan sebagai moderator dan pendingin. Daya nominal 30 MW (termal) dihasilkan oleh 40 elemen bahan bakar standar (FE) dan 8 elemen bahan bakar kontrol (CE) pada posisi grid 10 x 10 teras. Reaktor RSG-GAS memiliki 8 posisi grid teras dari perangkat fluks neutron untuk mendapatkan fluks neutron termal yang tinggi. Pada daya 30 MW, fluks neutron termal rata-rata 2×10^{14} neutron / $\text{cm}^2\text{s}^{[1]}$. Bahan bakar yang digunakan adalah $\text{U}_3\text{Si}_2\text{Al}$ dengan pengkayaan kurang dari 19,75 % dan kerapatan 2.96 g/cc^[2].

Reaktor RSG-GAS telah beroperasi selama 32 tahun, untuk itu perlu dilakukan pengukuran beberapa parameter reaktor untuk menjamin keselamatan operasi reaktor. Beberapa pengukuran parameter keselamatan yang telah dilakukan adalah pengukuran fraksi bakar, batang kendali, fluks neutron termal dan spektrum neutron^[3].

Selama operasi reaktor nuklir ada dua efek dasar yang bekerja pada perubahan reaktivitas. Efek pertama akibat perubahan temperatur moderator yang terkait dengan karakteristik moderator. Efek kedua perubahan daya reaktor (suhu bahan bakar) yang

disebut efek daya. Kedua efek ini disebut sebagai koefisien reaktivitas yang mempengaruhi pola operasi reaktor. Untuk itu, koefisien reaktivitas sangat penting untuk keselamatan operasi reaktor^[4]. Sehingga banyak penelitian yang dilakukan untuk menghitung dan mengukur parameter tersebut untuk keselamatan operasi reaktor seperti pada Tabel 1. Dari Tabel 1 dapat dilihat belum ada penelitian yang membahas mengenai koefisien reaktivitas daya

Koefisien reaktivitas daya merupakan parameter keselamatan yang bernilai negatif untuk stabilitas dan keselamatan operasi reaktor nuklir^[5]. Koefisien reaktivitas daya adalah kombinasi dari koefisien reaktivitas Doppler, moderator dan void^[6]. Hal ini dinyatakan sebagai perubahan reaktivitas per perubahan daya, $\Delta\rho/\Delta p$. Koefisien reaktivitas daya bernilai lebih negatif pada akhir siklus oleh perubahan koefisien temperatur moderator^[7]. Koefisien reaktivitas daya pernah diukur pada saat teras pertama reaktor RSG-GAS dengan nilai sebesar 1.976 sen /MW^[8]. Saat ini teras reaktor RSG-GAS sudah dikonversi dari teras oksida ($\text{U}_3\text{O}_8\text{-AL}$) ke teras silisida dengan tingkat kerapatan dan jumlah muatan uranium persatu elemen bahan bakar sama (2.96 g/cc dan 250 gram)^[9]

Sehingga tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pengukuran ulang koefisien reaktivitas daya untuk teras

silisida. Dalam penelitian ini dibatasi hanya pada perhitungan koefisien reaktivitas daya dan tidak dilakukan

perhitungan pengaruh suhu terhadap reaktivitas reaktor.

Tabel 1 Daftar penelitian terkait

No	Nama Peneliti dan Tahun Penelitian	Judul Penelitian	Fokus Penelitian
1	Pardi, Purwadi , 2020	Analisis nilai reaktivitas batang kendali teras RSG-GAS Setelah 30 tahun beroperasi	Penelitian ini memfokuskan pada perhitungan reaktivitas batang kendali reaktor RSG-GAS dilakukan dengan metode difusi menggunakan program komputer WIMSD-5B dan Batan-3DIFF.
2	Tukiran Surbakti Purwadi	Analysis of Neutronic Safety Parameters of the Multi-Purpose Reactor–Gerrit Augustinus Siwabessy (RSG-GAS) Research Reactor at Serpong	Penelitian ini memfokuskan pada perhitungan parameter keselamatan seperti reaktivitas suhu bahan bakar, reaktivitas densitas moderator dan reaktivitas void
3	T.Surbakti, P. Purwadi, 2017	Karakteristik Reaktivitas Teras Kerja RSG-GAS selamat 30 Tahun Beroperasi	Penelitian ini memfokuskan pada pengukuran reaktivitas padam, reaktivitas padam stuck rod, reaktivitas lebih, reaktivitas total, reaktivitas batang kendali untuk teras kerja 6 s.d teras kerja 91 reaktor RSG-GAS
4	Purwadi, 2017	Karakteristika Teras Rsg-Gas Dengan Bakar Bakar Silisida	Penelitian ini memfokuskan pada pengukuran karakteristik teras reaktor RSG-GAS dengan material bahan bakar yang berbeda namun pengkayaan dan densitas yang sama. Parameter kinetik yang diukur antara lain : Fraksi neutron kasip, konstanta peluruhan neutron serempak, umur generasi neutron, umur neutron serempak, konstantan peluruhan neutron rerata, konstanta peluruhan neutron serempak. Sedangkan parameter neutronik nya : koefisien reaktivitas temperature bahan bakar, koefisien reaktivitas temperature moderator
5	Tukiran S , Tagor MS, 2001	Analisis Neutronik Teras RSG-Gas Berbahan Bakar Silisida	Penelitian ini memfokuskan pada analisis neutronik kelayakan pemakaian bahan bakar silisida dengan muatan 300 gr. Parameter neutronik yang dihitung adalah : derajat bahan bakar, fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}).
6	Taswanda Taryo, Rokhmadi, 1998	Perhitungan Reaktivitas Teras RSG-GAS dengan Program Citation-3d	Pada penelitian ini dilakukan perhitungan Keff dengan menggunakan program Citation 3-d

Pengukuran koefisien reaktivitas daya dilakukan dengan menaikkan daya reaktor ke level tertentu dan melihat perubahan posisi batang kendali. Sebelum dilakukan pengukuran reaktivitas daya terlebih dahulu dilakukan kalibrasi batang kendali. Data ini diperlukan untuk menentukan harga reaktivitas akibat kenaikan daya reaktor.

DASAR TEORI

Reaktivitas teras akan berubah jika terjadi perubahan pada kondisi operasi reaktor, misalnya perubahan posisi batang kendali, modifikasi reflektor, susunan teras dan masuknya sumber neutron atau penyerap neutron ke dalam teras. Secara matematis reaktivitas dinyatakan dalam Persamaan 1^[10]:

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} \dots \dots \dots (1)$$

Dengan ρ adalah reaktivitas dan k_{eff} adalah faktor multiplikasi efektif.

Beberapa parameter koefisien reaktivitas di teras reaktor adalah koefisien reaktivitas bahan bakar, moderator, void. Koefisien reaktivitas daya (KRD) adalah penjumlahan dari koefisien reaktivitas suhu moderator, koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, dan koefisien reaktivitas void.

Koefisien reaktivitas daya pada dasarnya timbul dari perubahan temperatur, geometri teras dan kondisi fisik bahan bakar selama iradiasi. Koefisien reaktivitas daya tergantung pada koefisien reaktivitas suhu isothermal, kenaikan relatif suhu bahan bakar, kelongsong dan pendingin. Koefisien reaktivitas daya ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2^{[11][12]}.

$$\text{KRD}(0) = \frac{K(P2) - K(P1)}{P2 - P1} \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan

- KRD(0) = koefisien reaktivitas daya static
- K(P2) – K(P1) = perubahan reaktivitas dari daya setimbang awal P1 ke daya setimbang P2

Koefisien reaktivitas daya didesain bernilai negatif, karena peningkatan level daya menyebabkan peningkatan suhu bahan bakar. Peningkatan suhu bahan bakar menyebabkan reaktivitas negatif akibat adanya fenomena efek doppler. Efek Doppler ialah fenomena pelebaran daerah neutron resonansi pada tampang lintang energi neutron seiring dengan kenaikan temperatur pada bahan bakar. Pelebaran daerah resonansi mempunyai efek yang sangat penting dalam fenomena penyerapan neutron resonansi (neutron dengan bentuk kurva energi yang tajam)^[13]. Selain itu peningkatan suhu bahan bakar menyebabkan meningkatnya suhu pendingin reaktor. Dengan meningkatnya suhu pendingin reaktor mengakibatkan daya moderasi pendingin akan turun dan menyebabkan reaktivitas negative. Hal ini terkait dengan sistem keselamatan pasive reaktor. Dengan mengetahui besaran koefisien reaktivitas daya akibat adanya perubahan daya, maka kestabilan reaktor dapat ditentukan. Kestabilan ini dapat dicapai apabila besaran koefisien reaktivitas daya dijaga tetap negatif untuk semua keadaan operasi^[14].

Perhitungan koefisien reaktivitas daya berkaitan dengan kurva harga batang kendali differensial dan integral batang kendali pengatur. Kurva differensial dan integral terlebih dahulu dipastikan bentuknya benar untuk operasi normal. Kurva differensial

digunakan untuk mengetahui distribusi fluks neutron ke arah aksial. Secara umum bentuknya adalah cosinus dengan puncak ada di tengah teras^[15]. Sedangkan kurva batang kendali integral bentuknya mendekati kurva $S^{[16]}$. Kurva integral digunakan untuk mengetahui reaktivitas (sen) untuk setiap ketinggian batang kendali pengatur.

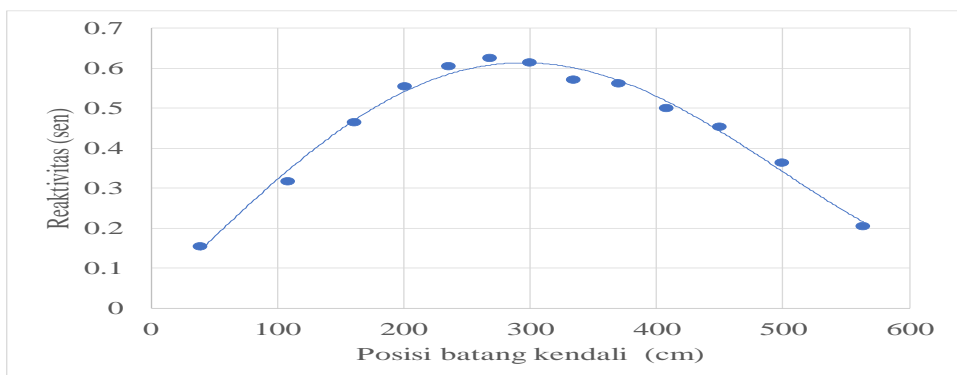
METODOLOGI

Sebelum menghitung koefisien reaktivitas daya, hal yang dilakukan adalah membuat kurva harga batang kendali diferensial dan integral batang kendali pengatur berdasarkan data kalibrasi batang kendali teras 99 dan memastikan bentuk kurvanya benar. Setelah itu dilakukan pengambilan data pada tanggal 16 Agustus 2019, teras 99 berdasarkan ijin operasi no : IO 99/05/2019 dengan mengoperasikan sistem pendingin utama (sistem pendingin primer dan sekunder) dan sistem pendukung operasi reaktor lainnya. Berikut ini langkah-langkah untuk memperoleh data perhitungan koefisien reaktivitas daya :

1. Reaktor distabilkan pada daya rendah dan dijamin bahwa reaktor kritis dalam keadaan bebas sumber. Pada eksperimen ini reaktor distabilkan pada daya 1 MW dan semua batang kendali posisi *bank*.
2. Daya reaktor dinaikkan ke tingkat daya yang lebih tinggi dan posisi batang kendali *bank* sama dengan daya 1 MW, yang berubah adalah posisi batang kendali pengatur.
3. Mencatat posisi batang kendali pengatur.
4. Mencatat reaktivitas untuk setiap ketinggian batang kendali berdasarkan kurva integral.
5. Menghitung koefisien reaktivitas daya reaktor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari data kalibrasi batang kendali dihasilkan kurva harga batang kendali diferensial dan integral untuk batang kendali pengatur seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.

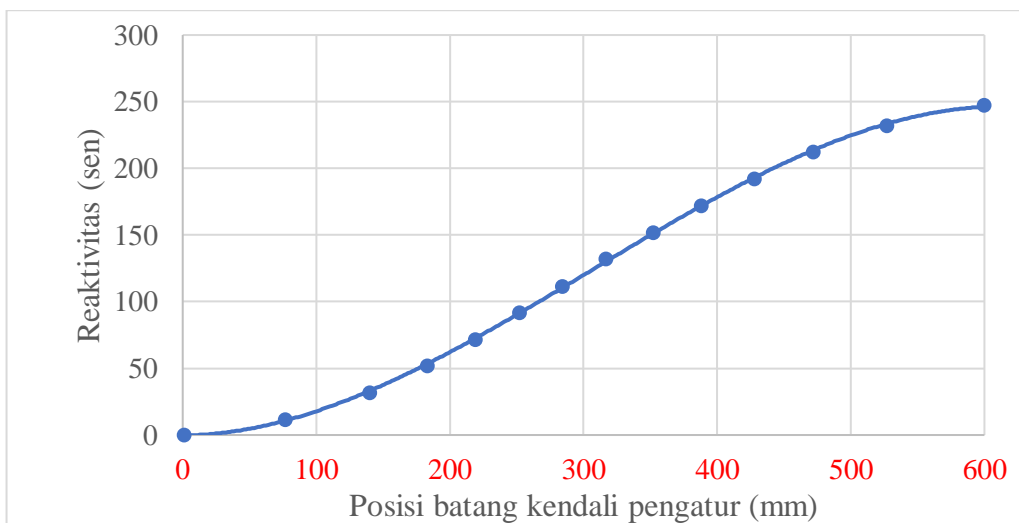


Gambar 1. Kurva harga batang kendali diferensial untuk batang kendali pengatur

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, kurva diferensial digunakan untuk mengetahui distribusi fluks neutron ke arah aksial. Secara umum bentuknya adalah *cosinus* dengan puncak ada di tengah teras tetapi dalam hal ini tergantung pada posisi batang kendali dan waktu pengukuran. Pada bagian bawah fluks neutron lebih sedikit sehingga pergerakan batang kendali memberi efek yang kecil terhadap perubahan reaktivitas. Ketika batang kendali mendekati tengah teras efek batang kendali sangat besar sehingga perubahan harga batang kendali per perubahan satuan posisi menjadi besar. Ketika batang kendali bergerak dari tengah mendekati bagian atas maka perubahan harga batang kendali turun karena kerapatan fluks bagian atas berkurang.

Kurva batang kendali integral ditunjukkan pada Gambar 2, dimana bentuknya mendekati kurva S seperti yang diharapkan. Berdasarkan Gambar 2 dapat dilihat bahwa slope kurva dan jumlah reaktivitas yang diinsersi per satuan posisi batang kendali terbesar terjadi dekat di tengah teras. Ini terjadi karena fluks neutron terbesar terjadi di tengah teras reaktor (posisi batang kendali / ketinggian).

Dengan meningkatnya daya reaktor, suhu moderator akan meningkat dan memberikan umpan balik reaktivitas negatif. Hal ini terjadi karena daya moderasi moderator berkurang dan memberikan reaktivitas negatif ke dalam teras.



Gambar 2. Kurva harga batang kendali integral untuk batang kendali pengatur

Karena pengaruh koefisien temperatur yang negatif, sejumlah besar reaktivitas

diperlukan untuk mengatasi kenaikan suhu agar reaktor tetap beroperasi pada

level daya yang lebih tinggi dalam kondisi tunak. Untuk mempertahankan daya reaktor konstan pada tingkat yang diinginkan akibat kehilangan reaktivitas dikompensasi dengan menaikkan batang kendali pengatur.

Tabel 2 menyajikan hasil yang diperoleh dari pengukuran koefisien reaktivitas daya. Harga reaktivitas batang kendali pengatur berdasarkan kurva harga batang kendali integral dan nilai koefisien reaktivitas daya ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2 dengan contoh perhitungan (untuk daya 5 MW) sebagai berikut :

$K(P1) = 136,792$ sen (reaktivitas pada daya awal 1 MW)

$K(P2) = 140,442$ sen (reaktivitas pada daya 5 MW)

Maka Koefisien reaktivitas daya (KRD) pada daya 5 MW adalah

$$KRD(0) = \frac{K(P2) - K(P1)}{P2 - P1}$$

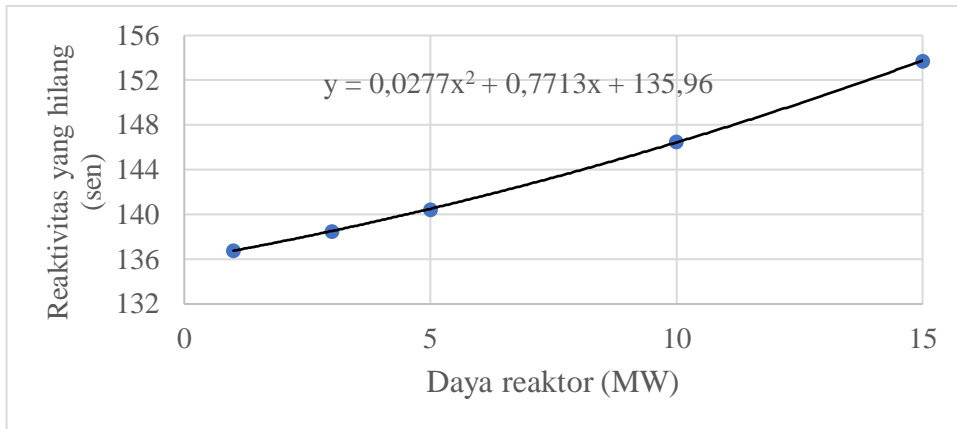
$$KRD(0) = \frac{140,442 - 136,792}{5 - 1}$$

$$= 0,913 \text{ sen/MW}$$

Dari Tabel 2, dapat dilihat kehilangan reaktivitas untuk mencapai daya yang diinginkan (kolom reaktivitas) yang dikompensasi dengan menaikkan batang kendali dengan bentuk grafik seperti pada Gambar 3.

Tabel 2. Pengukuran koefisien reaktivitas daya rata-rata reaktor RSG-GAS

No	Daya (MW)	Posisi Bank (mm)	Posisi RR (mm)	Reaktivitas (sen)	Reaktivitas total (sen)	KRD (sen/MW)
1	1	330	329	136,792	0	0
2	2	330	332	138,518	1,825	0,913
3	5	330	335	140,442	3,650	0,913
4	10	330	345	146,507	9,714	1,079
5	15	330	357	153,738	16,946	1,210
Koefisien reaktivitas daya rata-rata						1,028



Gambar 3. Reaktivitas yang hilang versus daya reaktor

Tabel 3. Perbandingan nilai KRD RSG-GAS dengan reaktor riset lain

No	Nama Reaktor	Nilai KRD	Nilai KRD dalam satuan cent/MW	Keterangan
1	RSG-GAS	1,028 cent/MW	1,028	
2	IPR R1 Reactor at Nuclear Technology Developptmen Center (CTDN) Brazil	0,63 cent/KW	0,00063	
3	Tehran reactor Research	0,89 pcm/KW	0.107 e-3	Dengan $\beta_{eff} = 0.0083$

Untuk hasil pengukuran koefisien reaktivitas daya rata-rata untuk setiap tingkat daya adalah sebesar -1.028sen/MW dan cenderung makin negatif mengikuti kenaikan daya. Kenaikan daya reaktor mengakibatkan temperatur bahan bakar meningkat yang akan mengakibatkan pelebaran puncak energi neutron resonansi, yaitu neutron dengan bentuk kurva energi yang tajam berupa puncak dan lembah yang terlihat jelas pada kurva tarnpang lintang serapan mikroskopik dari U-238 . Sehingga pelebaran dari puncak neutron resonansi akan meningkatkan serapan neutron oleh U-238 (efek doppler). Hal ini mengakibatkan

berkurangnya jumlah neutron termal yang diserap oleh U-235 sehingga K_{eff}

menjadi berkurang. Seperti pada Persamaan 1 maka jika K_{eff} mengalami penurunan, reaktivitas yang terjadi di dalam teras akan ikut menurun. Dan juga dipengaruhi oleh reaktivitas negative akibat kenaikan suhu moderator.

Nilai KRD setelah konversi teras lebih kecil dari pada pada saat teras awal yaitu sebesar 1.976 sen / MW hal ini mungkin disebabkan oleh pembangkitan panas teras oksida lebih tinggi dibanding silisida (teras oksida =

18.71 W/gram, teras silisida = 18.5 W/gram)^[17]. Sehingga efek doppler yang terjadi akan lebih besar dan mengakibatkan reaktivitas negative pada teras oksida lebih besar dibanding silisida. Tetapi jika dibandingkan KRd reaktor riset yang lain (IPR R1 Reactor at Nuclear Technology Development Center (CTDN) Brazil^[18], Tehran research reactor^[19] dengan β_{eff} ^[20]) nilai koefisien reaktor RSG-GAS masih relative lebih besar seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Dengan nilai koefisien reaktivitas yang negative dan cenderung makin negative mengikuti kenaikan daya maka reaktor dapat dioperasikan dengan stabil dan aman.

KESIMPULAN

Perhitungan koefisien reaktivitas daya dilakukan setelah pengukuran reaktivitas reaktor melalui pengaturan batang kendali pada setiap kenaikan daya. Koefisien reaktivitas daya reaktor sendiri bernilai negatif dengan bertambahnya daya karena efek doppler dan meningkatnya suhu pendingin reaktor. Nilai koefisien reaktivitas daya reaktor pada teras 99 rata-rata sebesar -1.028 sen /MW. Nilai ini lebih rendah dibanding teras pertama reaktor (teras oksida). Hal ini disebabkan pembangkitan panas oksida yang lebih tinggi dibanding teras silisida (oksidasi = 1,87 W/gr, silisida 1.85 W/gr) sehingga efek doppler pada teras oksida lebih tinggi dibanding silisida. Tetapi jika dibandingkan dengan nilai KRd reaktor riset lainnya, nilai KRd RSG-GAS relative lebih besar. Dengan nilai KRd yang negative dan makin negatif mengikuti kenaikan daya maka reaktor dapat dioperasikan dengan aman dan stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Kuntoro, T.M. Sembiring, Desain teras alternative untuk Reaktor riset inovatif (RRI) dari aspek neutronik”, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, Vol.16, hal. 1-10 2014
- [2] Laporan Analisis Keselamatan, PRSG-GAS Rev10.1, Desember 2011
- [3] S. Pinem, P. H. Liem, T. M. Sembiring, and T. Surbakti, “Fuel Element Burnup Measurements For The Equilibrium LEU Silicide RSG GAS (MPR-30) Core Under a New Fuel Management Strategy,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 98, 2016.
- [4] Budi Rohman, “Reaktor Kartini,” Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar *Pus. Pengkaj. Sist. dan Teknol. Pengawas. Instal. dan Bahan Nukl. Badan*, 2010.
- [5] M. Iqbal Hosan, M. A. M. Soner, K. A. Kabir, M. A. Salam, and M. Fazlul Huq, “Study on neutronik safety parameters of BAEC TRIGA research reaktor,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 80, pp. 447–450, 2015.
- [6] M. H. Rabir, “Measurement Of The Power And Temperatur Reactivity Coefficients Of The RTP TRIGA reaktor,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 265, pp. 269–271, 2013.
- [7] <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11223A207.pdf> diakses pada tanggal 9/10/2020 pukul 08.28 am.
- [8] RSG-GA.Siwabessy, Multipurpose Reactor Commissioning Test 0 – 10.7 MW power, PRSG, BATAN, 1988
- [9] T. Surbakti, “Analisis Kecelakaan Reaktivitas Teras RSG-GAS

- Berbahan Bakar Silisida, Prosiding Seminar ke-7 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Bandung, Tahun 2002, ISSN : 0854-2910.
- [10] T.Surbakti, P. Purwadi, "Karakteristik Reaktivitas Teras Kerja RSG-GAS selama 30 Tahun Beroperasi, Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA) 7 (1), 13-26.
- [11] John C.Lee, "Nuclear Reactor : Physics and Engineering," John Wiley & Sons, Inc, 2020.
- [12] S. Dawahra, K. Khattab, and G. Saba, "Reactivity Temperatur Coefficients For The HEU and LEU fuel of the MNSR reaktor," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 88, pp. 28–32, 2016
- [13] S.Tukiran, Rokhmadi, 2007, "Analisis Koefisien Reaktivitas Moderator Pwr Dengan Wims-Anltemperatur, Prosiding PPI - PDIPTN, Yogyakarta : 10 Juli 2007, Hal 186-194, ISSN 0216 – 3128.
- [14] J. S. Surian Pinem, Tukiran, "Pengukuran Parameter Kinetik Teras Silisida Dengan Kerapatan 2,96 g U/cc Reaktor RSG-GAS," *J. Fis. Himpun. Fis. Indones.*, vol. 6, no. 0201, pp. 1549-1555., 2004.
- [15] C.S. Aldison., S.M.Aquilino, C.G. Alessandro, 2012, "Reconstruction of the Neutron Flux in a Slab Reactor", *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 2, 181-186.
- [16] H. Anglart, "Applied Reactor Technology", KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [17] Setiyanto, "Pengaruh Konversi Teras RSG-GAS Dari Oksida Ke Silisida Terhadap Kerapatan Gamma, Prosiding pertemuan dan presentasi ilmiah, Yogyakarta :23-25 April 1996, ISSN 0216-3128.
- [18] R. M. G. D. P. Souza and A. Z. Mesquita, "Measurements Of The Isothermal, Power And Temperatur Reactivity Coefficients Of The IPR-R1 TRIGA reaktor," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 53, no. 8, pp. 1126–1131, 2011.
- [19] A. Lashkari, " vol. 5, no. 1, pp. 1–7.
- [20] A. Lashkari, H. Khalaf, H. Kazeminejad, "Effective delayed neutron fraction and prompt neutron lifetime of Tehran research reactor mixed-core", 2013, *Annals of Nuclear Energy* 55 (2013) 265–271