

ANALISIS PENGUKURAN REAKTIVITAS BATANG KENDALI TERAS RSG-GAS DENGAN METODE KOMPENSASI

Purwadi Purwadi dan Pardi Pardi

Pusat Reaktor Serba Guna, Kawasan Puspiptek, Gd. 31, Setu, Tangerang Selatan, 15310

ABSTRAK

ANALISIS PENGUKURAN REAKTIVITAS BATANG KENDALI TERAS RSG-GAS DENGAN METODE KOMPENSASI. Pengukuran nilai reaktivitas batang kendali teras Reaktor Serba Guna - G. A. Siwabessy (RSG-GAS) sangat penting karena berhubungan dengan keselamatan. Banyak metode yang dapat digunakan untuk mengukur nilai reaktivitas batang kendali teras RSG-GAS. Dari beberapa metode yang sudah dilakukan, ada yang memiliki kelebihan ada yang masih terdapat kekurangan. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis nilai reaktivitas batang kendali teras RSG-GAS dengan metode kompensasi berpasangan individu dan kompensasi *bank*. Pengukuran reaktivitas batang kendali dilakukan pada awal siklus pada saat teras reaktor dalam keadaan dingin bebas racun Xenon. Nilai reaktivitas yang diperoleh dari hasil penggunaan metode berpasangan individu dibandingkan dengan hasil dari metode kompensasi bank. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa perbedaan rata rata nilai reaktivitas batang kendali adalah sebesar 9,02 % setiap individu dan memberikan hasil yang akurat. Setelah dibandingkan kedua metode ini maka dari aspek efektivitas metode kompensasi berpasangan individu jauh lebih cepat.

Kata kunci: kompensasi, RSG-GAS, batang kendali, metode berpasangan, metode bank

ABSTRACT

ANALYSIS OF CONTROL ROD REACTIVITY MEASUREMENT OF THE RSG-GAS CORE USING COMPENSATION METHOD. Measurement of control rods reactivity value of the G.A. Siwabessy Multi-Purpose Reactor (RSG-GAS) is very important because it is related to safety. Several methods can be used to measure the reactivity value of RSG-GAS core control rods. Of the several methods that have been done, there are methods, that have advantages and disadvantages. In this study an analysis of the RSG-GAS core control rod reactivity value was performed using paired and bank compensation methods. The measurement of control rod reactivity was carried out at the beginning of the cycle when the reactor core was under cold-shutdown condition and free of xenon poison. Control rods reactivity values obtained from the individual paired methods were compared with the bank compensation method. The results obtained show that the difference in the average value of the control rod reactivity is 9.02 % for each individual, which is an accurate result. After comparing these two methods, it is concluded that the individual paired compensation method gives a faster result from the aspect of the effectiveness.

Keywords: compensation, RSG-GAS, control rod, paired method, bank method.

PENDAHULUAN

Batang kendali sebagai suatu perangkat yang mengandung bahan penyerap neutron selain digunakan sebagai pengendali reaksi fisi juga digunakan untuk *start-up*, *shut-down*, dan menaikkan atau menurunkan daya reaktor [1,2]. Sesuai dengan sifatnya sebagai penyerap neutron dan pengendali reaksi fisi, batang kendali mempunyai reaktivitas negatif karena bersifat menyerap neutron. Kekuatan batang kendali menyerap neutron dapat dilihat dari besarnya nilai reaktivitas negatif batang kendali tersebut. Besarnya nilai reaktivitas batang kendali di dalam teras sangat ditentukan oleh geometri dan jenis material yang digunakan sebagai penyerap pada batang kendali tersebut [3 - 4]. Karena jenis material menentukan tampang lintang serapannya terhadap neutron, maka seperti pada batang kendali teras Reaktor Serba Guna – G. A. Siwabessy (RSG-GAS) digunakan jenis material Ag, In dan Cd masing-masing dengan perbandingan konsentrasinya 80 %, 15 %, 5 % [5 - 7].

Nilai reaktivitas batang kendali harus ditentukan secara teliti dengan pengukuran sebelum reaktor diperasikan pada daya tinggi. Tujuan dari pengukuran (eksperimen) kalibrasi batang kendali adalah untuk memperoleh nilai reaktivitas batang kendali baik secara individu (masing-masing) maupun secara total serta kurva kalibrasi batang kendali. Kurva dan nilai reaktivitas

setiap batang kendali sangat penting untuk operasi dan manajemen operasi reaktor [8 - 10]. Kurva kalibrasi diperoleh dengan mengukur nilai reaktivitas batang kendali yang berhubungan dengan tinggi kenaikan batang kendali. Kurva kalibrasi batang kendali ada dua jenis yaitu: model kurva integral dan diferensial. Besarnya kenaikan posisi batang kendali (Wh) yang mengakibatkan timbulnya reaktivitas (Wp), maka dapat dibuat grafik reaktivitas ρ terhadap ketinggian h yang disebut dengan kurva kalibrasi integral. Sedangkan kurva kalibrasi diferensial dapat diperoleh dengan membuat grafik Wp/Wh terhadap h . Tetapi pada pengukuran kali ini yang digunakan hanya kurva kalibrasi batang kendali integral.

Batang kendali (*control rod*) teras RSG-GAS mempunyai peranan yang sangat penting di dalam operasi reaktor karena berhubungan dengan keselamatan operasi reaktor. Untuk menentukan nilai reaktivitas batang kendali teras RSG-GAS dapat dilakukan dengan beberapa metode diantaranya: metode *rod drop*, periode positif, invers kinetik, kompensasi berpasangan dan kompensasi *bank* [11 - 13]. Setiap metode mempunyai kelemahan dan kelebihan sehingga perlu diinvestigasi lebih dalam agar dapat ditentukan mana yang lebih efektif dan akurat untuk diaplikasikan pada teras RSG-GAS. Pada penelitian ini ditentukan nilai reaktivitas

batang kendali reaktor RSG-GAS secara eksperimen dengan metode kompensasi berpasangan dan kompensasi *bank*. Kompensasi berpasangan artinya satu batang kendali lawan satu kompensatornya (satu naik satu turun) sehingga sekali pengukuran 2 batang kendali dapat ditentukan nilai reaktivitasnya. Sedangkan pada metode *bank*, satu batang kendali lawan satu *bank* (7 batang kendali). Kemudian dari nilai tersebut dibandingkan agar dapat diketahui nilai yang memenuhi persyaratan keselamatan.

TEORI

Fraksi yang menggambarkan selisih dari kondisi kritis suatu reaktor ($k=1$) dinyatakan dengan reaktivitas (ρ) dan didefinisikan dengan [14] :

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad (1)$$

Dari persamaan di atas, nilai reaktivitas sebanding dengan faktor multiplikasi (k). Sehingga reaktor super kritis terjadi pada saat nilai reaktivitas positif ($\rho > 0$) dan reaktor subkritis terjadi pada saat nilai reaktivitas negatif ($\rho < 0$) dan apabila nilai reaktivitas sama dengan nol ($\rho = 0$) maka reaktor dalam keadaan kritis. Dari persamaan di atas di peroleh perubahan reaktivitas ($\Delta\rho$) dari dua kondisi teras (k_1 dan k_2) [15]:

$$\Delta\rho = \frac{K_2 - K_1}{K_2 K_1} \quad (2)$$

Satuan yang digunakan di dalam menyatakan reaktivitas dan selisih reaktivitas adalah *dollar*, *cent* (seperseratus dollar), persen (%) dan pcm (*percent per mille*).

Reaktor RSG-GAS pada awal teras harus dimuati sejumlah elemen bakar baru untuk menjaga tersedianya reaktivitas lebih teras, dan tidak hanya sekedar mencapai kondisi kritis, karena faktor multiplikasi teras akan berubah selama operasi yang disebabkan proses fraksi bakar dan produksi produk fisi. Reaktivitas lebih teras juga harus juga dapat mengkompensasi reaktivitas umpan balik negatif temperatur dan daya.

Oleh karena itu diperlukan reaktivitas negatif untuk mengkompensasi reaktivitas lebih teras tersebut, sehingga reaktor RSG-GAS dapat diatur dan dikendalikan sesuai dengan keinginan pengguna. Kendali reaktivitas ini digunakan untuk mengkompensasi reaktivitas lebih teras selama satu siklus operasi, mengatur tingkat daya dan memadamkan teras. Kendali reaktivitas ini dilakukan oleh batang kendali yang dapat dimasukkan ke dan ditarik dari teras. Berikut ini diterangkan beberapa definisi yang berkaitan dengan pengendalian reaktivitas:

- **Reaktivitas lebih ρ_{ex}**

Reaktivitas lebih adalah jumlah reaktivitas yang diperlukan dalam

pengoperasian suatu reaktor untuk satu siklus operasi. Reaktivitas teras pada saat seluruh batang kendali di tarik penuh (*fully up*) dari teras. Nilai reaktivitas lebih tergantung pada waktu (akibat fraksi bakar dan produksi fisi) dan temperatur (akibat reaktivitas umpan balik negatif). Nilai ρ_{ex} yang lebih besar memberikan dampak semakin panjangnya umur satu siklus operasi reaktor, tetapi membutuhkan reaktivitas kendali yang lebih besar dan ekonomi neutron yang lebih jelek (akibat reaktivitas batang kendali yang besar maka serapan neutron semakin besar).

- **Nilai padam (*shutdown margin*) ρ_{sm}**
Reaktivitas padam merupakan nilai reaktivitas negatif dimana seluruh batang kendali berada pada posisi terbawah. Reaktivitas negatif teras pada saat seluruh batang kendali di masukkan penuh (*fully inserted*) untuk mencapai faktor multiplikasi teras minimum. Nilai ρ_{sm} juga sebagai fungsi waktu dan temperatur. Nilai padam tipikal yang di pilih sedemikian rupa sehingga teras masih dalam keadaan subkritis meskipun batang kendali yang memiliki reaktivitas terbesar gagal masuk (*full out*) di sebut kriteria *stuck-rod*. Nilai padam juga menunjukkan laju tingkat daya yang dapat dikurangi

pada saat pemadaman (*shutdown*) dan pemancungan (*scram*).

- **Nilai elemen kendali total (*total control element worth*) ($\Delta\rho$)**

Nilai elemen kendali total sering juga di sebut nilai padam total, adalah perbedaan antara nilai reaktivitas lebih dan nilai padam yang dinyatakan sebagai [15]:

$$\Delta\rho = \rho_{ex} + \rho_{sm} \quad (4)$$

- **Nilai reaktivitas batang kendali $\Delta\rho_i$**

Nilai reaktivitas batang kendali adalah nilai untuk satu batang kendali. Semuanya nilai reaktivitas tersebut dihasilkan dari eksperimen kalibrasi batang kendali. Jika hasil eksperimen tidak akurat maka dapat dipastikan akan menghasil nilai reaktivitas yang lain juga menjadi keliru.

Berikut ini juga didefinisikan jenis batang kendali yang digunakan di teras RSG-GAS menurut fungsinya:

- **Batang kendali pancung (*scram control rod*).**

Batang kendali ini mampu memadamkan reaktor di seluruh kondisi operasi. Kemampuan masuknya batang kendali ini harus cepat dan harus beroperasi dengan tingkat keandalan yang sangat tinggi.

- **Batang kendali pengatur (*regulating control rod*).**

Batang kendali ini didesain untuk mengkompensasi perubahan reaktivitas yang kecil akibat perubahan temperatur dan perubahan tingkat daya.

- **Batang kendali shim (shim control rod).**

Batang kendali ini di desain untuk menyediakan reaktivitas lebih yang diperlukan untuk mengkompensasi perubahan fraksi bakar dan terbentuknya produk hasil belah, juga mengatur distribusi daya di teras agar fraksi bakar elemen bakar lebih merata.

Pengukuran nilai reaktivitas batang kendali RSG-GAS dilakukan dengan cara kompensasi *bank* dan kompensasi berpasangan. Pengukuran reaktivitas batang kendali diturunkan dari persamaan kinetika reaktor yaitu [16]:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i + C_i(t)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n(t) - \lambda_i + C_i(t)$$

(5)

dimana:

$n(t)$ = rapat neutron

$C_i(t)$ = konsentrasi neutron kasip kelompok ke -i

β_i = fraksi neutron kasip kelompok ke-i

λ_i = konstanta peluruhan neutron kasip kelompok ke-i

β = fraksi neutron kasip total

l = umur neutron rata-rata

ρ = reaktivitas

Penjabaran dari persamaan (5) akan menghasilkan persamaan berikut [17]:

$$\lambda_i C_i = -\frac{dC_i(t)}{dt} + \frac{\beta_i}{l} n(t) \quad (6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (5) ke dalam persamaan (6) maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} + \beta - \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \left[-\frac{dC_i}{dt} + \frac{\beta_i}{l} n(t) \right] \quad (7)$$

Persamaan (7) dapat disederhanakan menjadi

$$\rho = \frac{1}{n(t)} \left(\frac{dn(t)}{dt} + \sum_{i=1}^6 \frac{dC_i(t)}{dt} \right) \quad (8)$$

Persamaan (8) ini dapat dianalogikan dalam bentuk rangkaian elektronik yang ada di dalam alat reaktivimeter Servogor. Secara umum persamaan (8) dapat dituliskan sebagai berikut,

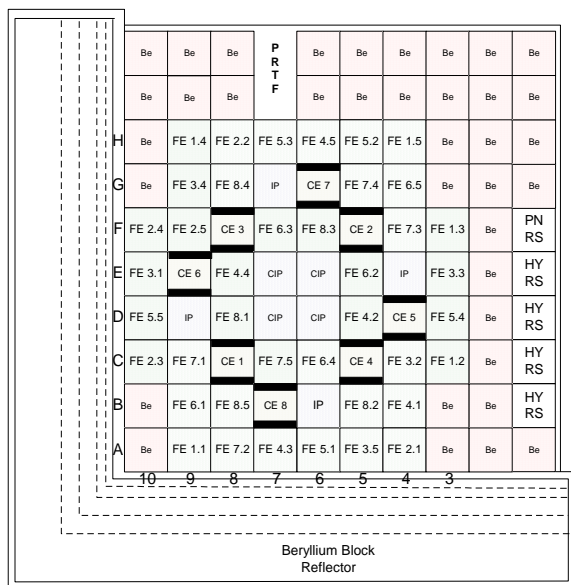
$$\rho = f \left[\frac{dn(t)}{dt}, \frac{dC_i(t)}{dt} \right] \quad (9)$$

Persamaan (9) di atas merupakan dasar dari Reaktivimeter.

METODE EKSPERIMEN

Peralatan yang digunakan adalah: Reaktivimeter, Servogor 320 untuk pencatat reaktivitas, detektor FC *start up* (JKT01), dan detektor daya CIC (JKT04). Reaktor sudah siap beroperasi pada daya rendah bebas sumber neutron dengan satu batang kendali sebagai batang kendali pengatur (*regulating rod*) dan batang kendali yang lain sebagai batang kendali *Bank*.

Langkah selanjutnya adalah mencatat semua kondisi daya pada indikator JKT04 dan posisi setiap batang kendali pada lembar data yang telah disediakan. Susunan batang kendali teras teras RSG-GAS dapat dilihat pada Gambar 1, dimana FE (*fuel element*) adalah bahan bakar dan CE (*control element*) adalah batang kendali, nilai 1,2,3, ... ,7 adalah kelas fraksi bahan bakar di dalam teras RSG-GAS.



Gambar 1. Konfigurasi teras RSG-GAS

Metode yang digunakan untuk mengukur nilai reaktivitas batang kendali RSG-GAS adalah metode kompensasi, yang terdiri dari kompensasi berpasangan dan kompensasi *bank*. Prosedur pelaksanaan eksperimen untuk kedua metode tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Metode Kompensasi Berpasangan.

- a. Kritiskan reaktor pada daya rendah bebas sumber dan diusahakan

posisi batang kendali adalah *all banks*.

- b. Lakukan pemilihan salah satu batang kendali yang akan diukur reaktivitasnya, sebagai contoh JDA06 pada posisi c-8 dan satu batang kendali lagi pada posisi berseberangan sebagai kompensator yang juga akan diukur reaktivitasnya, yaitu JDA02 pada posisi G-6.
- c. Turunkan batang kendali JDA06 hingga mencapai posisi 0 mm. Selama penurunan batang kendali tersebut selalu dilakukan kompensasi dengan menaikkan batang kendali kompensator yaitu JDA02 hingga posisi 600 mm. Setelah kedua posisi batang kendali tercapai, reaktor harus tetap dipertahankan dalam keadaan kritis.
- d. Untuk memulai pengukuran, naikkan batang kendali JDA06. Perhatikan reaktivitas yang diakibatkan penaikan batang kendali tersebut pada Reaktivimeter, yaitu bila mencapai + 10 sen, maka penaikan batang kendali dihentikan.
- e. Tunggu beberapa saat hingga kenaikan daya mendekati harga batas atas. Bila kenaikan daya mendekati harga batas + 10 sen, turunkan batang kendali

kompensator JDA02 sebesar - 20 sen. Setelah nilai tersebut dicapai, hentikan penurunan batang kendali kompensator.

- f. Tunggu beberapa saat hingga penurunan daya mendekati harga batas bawah. Bila harga batas bawah hampir dicapai, segera naikkan kembali batang kendali yang dikalibrasi yaitu JDA06.
- g. Ulangi prosedur c,d, dan e di atas hingga batang kendali yang dikalibrasi mencapai posisi 600 mm dan batang kendali kompensator mencapai posisi 0 mm.
- h. Hasil data eksperimen penaikkan / penurunan batang kendali yang menyatakan perubahan reaktivitas, datanya ditampilkan dalam grafik.

2. Metode Kompensasi Bank

- a. Kritiskan reaktor pada daya rendah, dan usahakan batang kendali pada posisi *all banks*.
- b. Pilih salah satu batang kendali yang akan diukur reaktivitasnya, misalnya JDA05 pada posisi C-5.
- c. Turunkan batang kendali JDA05 hingga ke posisi 0 mm. Selama penurunan batang kendali tersebut selalu dikompensasi dengan menaikkan batang kendali *bank*, agar kondisi kritis tetap dicapai.
- d. Untuk memulai pengukuran, naikkan batang kendali JDA05,

dengan memperhatikan reaktivitas yang diakibatkan penaikan batang kendali pada Reaktivimeter. Bila nilai mencapai + 10 sen, penaikan batang kendali dihentikan.

- e. Tunggu beberapa detik agar kenaikan daya mendekati harga batas atas (terlihat pada Reaktivimeter). Bila harga atas telah dicapai, turunkan batang kendali *bank* sebesar - 20 sen. Setelah harga tersebut dicapai, hentikan penurunan batang kendali *bank*.
- f. Ditunggu beberapa saat hingga penurunan daya mendekati batas bawah (terlihat pada Reaktivimeter). Bila harga batas bawah hampir dicapai segera naikkan kembali batang kendali yang sedang dikalibrasi yaitu JDA05.
- g. Ulangi prosedur c, d, dan e hingga batang kendali yang dikalibrasi mencapai posisi 600 mm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen pengukuran nilai reaktivitas batang kendali dengan metode berpasangan kondisi BOC (*Beginning of Cycle*) dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa semakin besar nilai reaktivitas batang kendali maka jumlah langkah pengukurannya juga semakin

besar. Nilai batang kendali JDA01 atau C-5 adalah 1,90 \$, yang diperoleh dengan jumlah langkah pengukuran sebanyak 14 x. Demikian juga dengan batang kendali JDA04 atau F-5. Kedua batang kendali ini merupakan batang kendali yang mempunyai

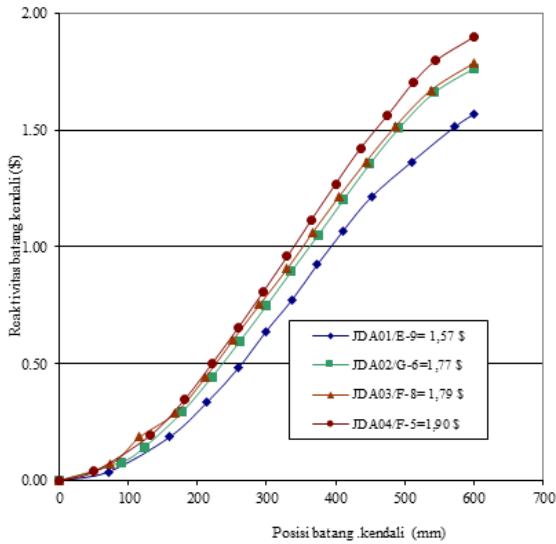
nilai reaktivitas batang kendali terbesar. Total nilai reaktivitas batang kendali adalah 14,28 \$ atau sekitar 10,92 % (nilai $\beta = 0,00765$) [17]. Nilai ini sudah memenuhi kriteria keselamatan karena sudah melebihi 1,5 x dari nilai reaktivitas lainnya.

Tabel 1. Kondisi dan posisi batang kendali metode berpasangan (BOC)

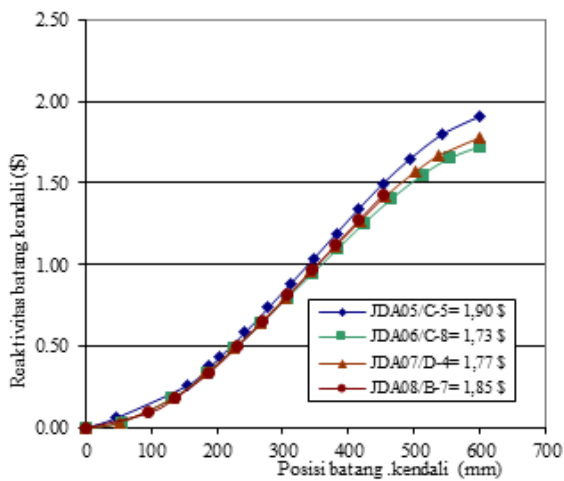
Parameter	Batang kendali yang dikalibrasi							
	JDA01 vs JDA05 (E-9 vs C-5)		JDA02 vs JDA06 (G-6 vs C-8)		JDA03 vs JDA07 (F-8 vs B-7)		JDA04 vs JDA08 (F-5 vs B-7)	
JKT01 CX811 (cps)	5 x 10 ³		5,0 x 10 ³		5,0 x 10 ³		5,0 x 10 ³	
JKT01 CX821 (cps)	5 x 10 ³		7,0 x 10 ³		7,0 x 10 ³		7,0 x 10 ³	
JKT02 CX811 (A)	1 x 10 ⁻⁸		1,0 x 10 ⁻⁶		1,0 x 10 ⁻⁸		1,0 x 10 ⁻⁶	
JKT02 CX821 (A)	3 x 10 ⁻³		2,0 x 10 ⁻⁶		3,0 x 10 ⁻⁶		3,0 x 10 ⁻⁶	
JKT04 DX001 (A)	0,45 x 10 ⁻⁷		0,45 x 10 ⁻⁷		0,45 x 10 ⁻⁷		0,45 x 10 ⁻⁷	
Posisi Awal <u>BK</u> (mm) <u>BANK</u>	0	600	600	0	0	600	0	600
Posisi Akhir <u>BK</u> (mm) <u>BANK</u>	600	0	0	600	600	0	600	0
	184/227 (JDA03)		182/290 (JDA08)		179		206/0/56 (JDA06/JDA01)	
Jumlah langkah	12	14	13	13	12	13	14	13
Reaktivitas (\$)	1,57	1,90	1,77	1,73	1,79	1,77	1,90	1,85

Bentuk kurva S nilai reaktivitas integral batang kendali JDA 01 s/d 04 teras RSG-GAS hasil eksperimen dengan metode kompensasi berpasangan pada kondisi awal siklus (BOC) dapat dilihat pada Gambar 2. Gambar tersebut menunjukkan bahwa dari beberapa langkah pengukuran, dapat diketahui nilai reaktivitas terbesar adalah berada di tengah antara ketinggian 20-40 cm. Pada daerah tersebut batang kendali sangat efektif menyerap neutron. Hal ini sudah sesuai dengan kegunaan batang kendali untuk menyerap neutron pada posisi tengah teras. Nilai terbesar reaktivitas batang kendali pada gambar ini adalah batang kendali JDA04 (F-5) yaitu 1,90 \$ atau 1,45 %. Gambar 3 menunjukkan bentuk kurva S untuk reaktivitas

integral batang kendali JDA 05 s/d 08 teras RSG-GAS hasil eksperimen dengan metode kompensasi berpasangan pada kondisi awal siklus (BOC). Kurva batang kendali ini juga berbentuk S yang artinya bahwa setiap batang kendali yang dipabrikasi oleh PT INUKI telah sesuai dengan desain dan kegunaannya untuk menyerap neutron dimana paling tengah adalah penyerap paling besar. Pada Gambar 3 dapat dilihat nilai reaktivitas paling besar adalah pada batang kendali JDA 05 (C-5) yaitu 1,90 \$ atau 143 %. Nilai ini sama dengan nilai reaktivitas batang kendali JDA 04 (F-5).



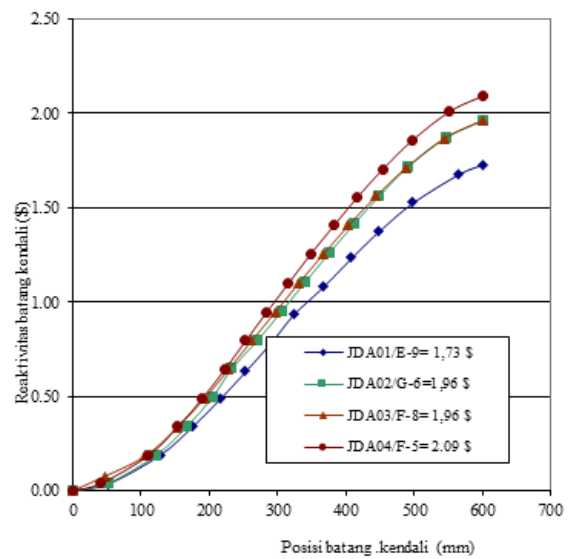
Gambar 2. Hasil pengukuran reaktivitas batang kendali 1 s/d 4 metode berpasangan (BOC)



Gambar 3. Hasil pengukuran reaktivitas batang kendali 5 s/d 8 metode berpasangan (BOC)

Besarnya nilai reaktivitas batang kendali sangat dipengaruhi oleh material di sekelilingnya seperti fraksi bakar, fasilitas iradiasi dan posisinya terhadap teras. Nilai fraksi bakar bahan bakar yang ada di batang kendali tersebut adalah 6,89 % yang merupakan nilai fraksi bakar terkecil.

Gambar 4 menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan bentuk kurva S untuk nilai reaktivitas batang kendali hasil eksperimen metode berpasangan dan bank, namun terdapat perbedaan dari aspek nilai. Hal ini dikarenakan interaksi antara batang kendali sangat mempengaruhi nilai batang kendalinya. Demikian juga kurva S batang kendali JDA 05 s/d 08 bentuknya sama sehingga tidak ditampilkan pada makalah ini, namun nilainya dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 4. Hasil pengukuran reaktivitas batang kendali 1 s/d 4 dengan metode bank (BOC)

Tabel 2. Hasil pengukuran reaktivitas batang kendali metode bank dan berpasangan BOC

Batang kendali	Metode II (\$)	Metode I (\$)	Deviasi (%)
JDA01/E-9	1,73	1,57	9,25
JDA02/G-6	1,96	1,77	9,69
JDA03/F-8	1,96	1,79	8,67
JDA04/F-5	2,09	1,90	9,09
JDA05/C-5	2,14	1,90	11,21
JDA06/C-8	1,91	1,73	9,42
JDA07/D-4	1,92	1,77	7,81
JDA08/B-7	1,99	1,85	7,04

Tabel 2 adalah perbandingan nilai reaktivitas batang kendali hasil eksperimen dengan metode berpasangan dan *bank*. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai reaktivitas masing masing batang kendali tidak jauh berbeda. Dapat dilihat bahwa nilai reaktivitas batang kendali dengan metode *bank* selalu lebih besar karena interaksi antar batang kendali yang sering disebut dengan *shadowing effect*. Pada eksperimen dengan metode kompensasi *bank*, satu batang kendali berinteraksi dengan batang kendali di dalam *bank* yaitu 7 batang kendali, sedangkan pada metode berpasangan batang kendali yang berinteraksi hanya satu lawan satu, sehingga interaksinya kecil. Jika dibandingkan perbedaan setiap individu batang kendali maka diperoleh perbedaannya (deviasi) rerata adalah 9,02 % yang berarti tidak terlalu besar dan sangat akurat. Pada metode kompensasi *bank* dan berpasangan nilai terbesarnya ada pada batang kendali yang sama yaitu pada JDA05 (C-5) yaitu masing masing 2,14 \$ (1,64 %) dan 1,90 \$ (1,45 %). Namun jika dibandingkan waktu yang digunakan untuk melakukan eksperimen, metode kompensasi *bank* jauh lebih lama hampir 2 x nya. Jika disesuaikan prosedur eksperimennya maka metode kompensasi berpasangan untuk sekali eksperimen memperoleh nilai reaktivitas batang kendali 2 buah, sedangkan metode *bank* hanya 1 buah batang kendali.

Batas keselamatan kelonggaran reaktivitas teras pada desain adalah $> 0,5 \%$ [17] pada kondisi *stuck rod* yang telah dipenuhi oleh konfigurasi teras RSG-GAS sehingga dapat dilanjutkan dengan operasi daya tinggi. Tabel 3 adalah nilai reaktivitas batang kendali awal siklus (BOC) dan akhir siklus (EOC) hasil eksperimen dengan metode kompensasi berpasangan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa nilai reaktivitas batang kendali sangat dipengaruhi oleh fraksi bakar teras RSG-GAS.

Tabel 3. Hasil pengukuran reaktivitas batang kendali metode berpasangan BOC dan EOC

Batang kendali	ρ BOC (\$)	ρ EOC (\$)	$\Delta\rho$ (\$)
JDA01/E-9	1,57	1,55	0,02
JDA02/G-6	1,77	1,65	0,22
JDA03/F-8	1,79	1,76	0,03
JDA04/F-5	1,90	1,87	0,03
JDA05/C-5	1,90	1,83	0,07
JDA06/C-8	1,73	1,71	0,02
JDA07/D-4	1,77	1,71	0,06
JDA08/B-7	1,85	1,77	0,08

Setelah beroperasi 1 siklus dengan membakar energi 630 MWD maka fraksi bakar berkurang sehingga nilai reaktivitas batang kendali juga berkurang seperti diperlihatkan pada Tabel 3. Dalam hal ini juga masih diperlihatkan bahwa nilai reaktivitas batang kendali terbesar berada pada JDA04 (F-5) karena belum dilakukan penggantian bahan bakar selama satu siklusnya. Namun jika diadakan penggantian bahan bakar maka kemungkinan besar akan terjadi perubahan nilai reaktivitasnya.

KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen, nilai reaktivitas terbesar dari pengukuran batang kendali dengan metode *bank* dan berpasangan diperoleh sama yaitu pada batang kendali JDA05 (C-5) dengan nilai masing masing yaitu 2,14 \$ atau 1,64 % dan 1,90 \$ atau 1,45 %. Pada kondisi *stuck rod*, batas keselamatan kelonggaran reaktivitas teras adalah $> 0,5$ % sudah dipenuhi oleh konfigurasi teras RSG-GAS sehingga dapat dilanjutkan dengan operasi daya tinggi. Hasil eksperimen menggunakan metode berpasangan dinilai lebih praktis sebab tidak memerlukan proses perhitungan yang rumit. Pengukuran dapat dilakukan dengan cepat dengan instrumentasi reaktor yang tersedia dan hasilnya sangat akurat dan dapat dibaca secara langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. PODGORSKY J. Acceptance Test-Program reactivity Measurement. INTERATOM, 1987.
- [2]. PODGORSKY J., ITA BUDI R. Data Report of Control Rod Calibrations First core MPR 30. INTERATOM-BATAN, 1988.
- [3]. SURBAKTI T., PINEM S., SEMBIRING T. M. Analisis Pengaruh Densitas Bahan Bakar Silisida Terhadap Parameter Kinetik Teras Reaktor RSG-GAS. Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya. 2013. **3**(1): 19-30.
- [4]. YULINATO Y. E., IMRON M. Manajemen Pengoperasian Reaktor RSG-GAS. in: *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir PRSG*, 2013.
- [5]. SEMBIRING T. M., SURBAKTI T., PINEM S. Neutronic Design of Mixed Oxide-Silicide Cores for the Core Conversion of RSG-GAS Reactor. Atom Indonesia. 2001. **27**(2): 85–1001.
- [6]. LIEM P. H., TARYO T., SEMBIRING T. M., HIROSHI S., YOSHITAKA N. Study on the control rod interaction effect in RSG gas multipurpose reactor (MPR-30). Ann. Nucl. Energy. 2002. **29**(6): 701–716.
- [7]. SETIYANTO, SURBAKTI T. Analysis of gamma heating at Triga Mark reactor core Bandung using plate type fuel. Tri Dasa Mega. 2016. **18**(3): 127-134.
- [8]. ROKHMADI, SURBAKTI T. Efek densitas bahan bakar terhadap parameter koefisien reaktivitas teras RRI. Tri Dasa Mega. 2013. **15**(2): 77-89.
- [9]. SUPARLINA L., SURBAKTI T. Analisis pola manajemen bahan bakar desain teras reaktor riset tipe

- MTR. Tri Dasa Mega. 2014. **14**(3): 89-99.
- [10]. SURBAKTI T, PINEM S., SEMBIRING T. M., SUPARLINA L., SUSILO J. Desain konseptual teras reaktor riset inovatif berbahan bakar Uranium-molibdenum dari aspek neutronik. Tri Dasa Mega. 2012. **3**(14): 178-191.
- [11]. SEMBIRING T.M., LIEM P. H., SURBAKTI T. Fuel management strategy for the compact core design of RSG GAS (MPR-30). in: *ENS RRFM 2000 conference: research reactor fuel management*, Colmar. 2000. 158-162.
- [12]. LIEM P.H., SURBAKTI T., HARTANTO D. Kinetics parameters evaluation on the first core of the RSG GAS (MPR-30) using continuous energy Monte Carlo method. *Progress in Nucl. Energy*. 2018. **109**: 196-203.
- [13]. SURBAKTI T., PURWADI. Karakteristik reaktivitas teras kerja RSG-GAS selama 30 tahun beroperasi. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. 2017. **7**(1): 13-26.
- [14]. SURBAKTI T., IMRON M. Fuel burn-up calculation for working core of the RSG-GAS research reactor at BATAN Serpong. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. 2017. **7**(2), 89-101.
- [15]. SURBAKTI T., PINEM S., SEMBIRING T.M., HAMZAH A., NABESHIMA K.. Calculation of control rods reactivity worth of RSG-GAS first core using Deterministic and Monte Carlo Methods. *Atom Indonesia*. 2019. **45**(2): 69-79.
- [16]. SURBAKTI T., 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)*. 2019. **9**(1): 78-91.
- [17]. SURBAKTI T., SEMBIRING T. M. Analisis neutronik teras RSG-GAS berbahan bakar silisida. *Kontribusi Fisika Indonesia*. 2001. **12**(3): 61-67.