

## KARAKTERISTIK REAKTIVITAS TERAS KERJA RSG-GAS SELAMA 30 TAHUN BEROPERASI

### REACTIVITY CHARACTERISTIC OF RSG-GAS WORKING CORE FOR 30 YEARS OPERATION

Tukiran Surbakti<sup>1,a</sup> dan Purwadi<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN), Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN)

Kawasan Puspiptek Gd 80 Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15310, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Reaktor Serbaguna (PRSG), Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN)

Kawasan Puspiptek Gd 30 Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15310, Indonesia

Email:<sup>a</sup> [tukiran@batan.go.id](mailto:tukiran@batan.go.id) dan <sup>b</sup> [purwadi14@batan.go.id](mailto:purwadi14@batan.go.id)

Diterima: 30 Maret 2017    Disetujui: 20 Mei 2017    Direvisi: 30 Mei 2017

#### Abstrak

*RSG-GAS, mulai dari komisioning, operasi teras kerja hingga kini telah 30 tahun beroperasi sehingga perlu dilakukan evaluasi keselamatan parameter neutroniknya. Untuk tujuan keselamatan telah dilakukan berbagai aktivitas penelitian, baik yang berhubungan dengan operasi, keselamatan, maupun dalam rangka penggunaan reaktor. Analisis dan pengelolaan besaran reaktivitas yang menunjang keselamatan operasi reaktor sangat penting dilakukan karena besaran ini mempengaruhi desain, kendali dan jadwal operasi reaktor. Besaran tersebut dapat ditentukan melalui pengukuran reaktivitas batang kendali dan eksperimen pemuatan bahan bakar di dalam teras. Pengukuran reaktivitas batang kendali yang dilakukan pada setiap awal siklus teras (dengan kondisi teras dingin dan bersih, bebas pengaruh xenon), menghasilkan nilai reaktivitas batang kendali yang dapat digunakan untuk menentukan nilai reaktivitas lainnya seperti reaktivitas lebih, reaktivitas padam dan reaktivitas total. Pengelolaan reaktivitas teras telah dilakukan dengan baik selama 30 tahun dalam rangka mendukung operasi reaktor untuk keperluan penelitian dan iradiasi target.*

**Kata kunci:** batang kendali, reaktivitas teras, teras reaktor, RSG-GAS

#### Abstract

*The RSG-GAS, since it's commissioning, until now, has been operating for 30 years so its safety neutronic parameter is necessary to be evaluated. Various research activities related to the routine operation, reactor safety and utilization had been conducted. The analysis and management of the reactivity magnitude which supports the safety operation is necessary to be done because it affects the design, control and operation schedule. The reactivity magnitude could be determined from the results of control rod reactivity measurement and refueling experiment in the core. The control rod reactivity measurement that conducted at every beginning of the cycle (in cold and clean reactor condition, xenon-free, using compensation method), produced the control rod reactivity that can be used to calculate other reactivity values such as core excess, shutdown margin and total control rods reactivity. The management results of*

*core reactivity showed that from the control rods reactivity measurement the core excess reactivity had been safely managed to support reactor operation for 30 years on research and target irradiation in the RSG-GAS core.*

**Keywords:** control rods, reactivity, reactor core, RSG-GAS

**PACS:** 28.50.Dr, 28.41.-i, 28.41.Vx

© 2017 Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA) is licensed under [CC BY NC 4.0](#)

## I. PENDAHULUAN

Selama operasi RSG-GAS, mulai dari kritis pertama tahun 1987 hingga kini (30 tahun), telah dilakukan berbagai aktivitas penelitian, baik yang berhubungan dengan keselamatan, maupun dalam rangka penggunaan reaktor. Reaktivitas dan perubahan reaktivitas merupakan besaran yang memegang peranan sangat penting dalam fisika reaktor, keselamatan dan daur bahan bakar, karena besaran ini mempengaruhi desain, kendali dan jadwal operasi reaktor [1]. Besaran reaktivitas dapat digambarkan dalam bentuk neraca reaktivitas teras reaktor sehingga dapat dengan mudah dikelola. Neraca reaktivitas teras reaktor RSG-GAS menggambarkan kesetimbangan reaktivitas yang dimiliki oleh suatu teras yang dapat digunakan untuk keperluan eksperimen dan iradiasi target selama satu siklus operasi. Neraca reaktivitas dijaga tetap dapat mengakomodasi seluruh keperluan di teras RSG-GAS dan mengutamakan kendali atau aspek keselamatan selama pengoperasian reaktor. Dalam makalah ini dibahas karakteristik reaktivitas teras kerja RSG-GAS selama reaktor beroperasi 30 tahun.

Reaktivitas teras RSG-GAS merupakan fungsi waktu dan suhu sehingga di dalam analisis dan pengelolaannya dilakukan pendekatan pada suhu kamar dan awal siklus. Untuk menganalisis reaktivitas dilakukan dalam bentuk neraca/kesetimbangan yang berasal dari hasil pengukuran kalibrasi batang kendali yang bersifat statis. Pengukuran reaktivitas teras RSG-GAS dilakukan dengan

menggunakan reaktivimeter servogor sebagai fungsi posisi dari batang kendali. Pengukuran reaktivitas batang kendali dengan metode kompensasi berpasangan karena metode ini dianggap lebih menguntungkan dibanding metode lainnya [2]. Dari hasil pengukuran reaktivitas batang kendali dapat ditentukan harga reaktivitas lainnya seperti reaktivitas lebih teras, reaktivitas padam, reaktivitas racun xenon. Dengan demikian, dari eksperimen kalibrasi batang kendali dapat diketahui karakteristik reaktivitas teras kerja RSG-GAS. Karakteristik reaktivitas ini akan dianalisis dan dikelola dengan baik terhadap keselamatan reaktor selama operasi. Melalui analisis neraca reaktivitas ini dapat diketahui tingkat keselamatan dan jadwal operasi yang dihasilkan dalam suatu operasi sesuai dengan keperluan penelitian dan iradiasi target tanpa mengabaikan aspek keselamatan, sedangkan aspek keselamatan seperti fraksi bakar maksimum elemen bakar dijaga agar tidak melampaui kriteria keselamatan dengan model *reshuffling* dan *refueling* tertentu.

Reaktivitas adalah besaran faktor multiplikasi menyimpang dari kondisi kritis pada suatu reaktor nuklir [3].

$$\rho = \frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (1)$$

dengan,

$\rho$  = reaktivitas teras

$k_{eff}$  = konstanta multiplikasi efektif/ faktor perlipatan efektif (perbandingan jumlah

neutron pada suatu generasi dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya). Jika :  
 $\rho = 0$  disebut reaktor dalam keadaan kritis  
 $\rho > 0$  disebut reaktor dalam keadaan superkritis  
 $\rho < 0$  disebut reaktor dalam keadaan subkritis

### Reaktivitas Lebih Teras ( $\rho_{ek}$ )

Reaktivitas lebih teras adalah reaktivitas teras yang ada pada saat elemen kendali diangkat semua ke atas (*fully up*). Reaktivitas lebih teras diperlukan dalam pengoperasian suatu reaktor untuk satu siklus operasi. Harga reaktivitas lebih tergantung pada waktu (dikarenakan oleh adanya perubahan fraksi bakar) dan temperatur (dikarenakan adanya umpan balik reaktivitas [4]. Selama satu siklus operasi, teras harus dapat memberikan reaktivitas lebih guna beroperasinya reaktor dalam keadaan kritis. Harga reaktivitas lebih yang lebih besar akan memberikan umur teras yang lebih lama namun perlu dijaga agar tidak terlalu besar sehingga batang kendali mampu untuk mengatur reaktivitas di dalam teras reaktor. Jika reaktivitas lebih teras terlalu besar maka hal ini akan berbahaya karena ada kalanya batang kendali tidak mampu digunakan untuk mengatur reaktivitas terasnya. Kriteria desain teras RSG-GAS menyebutkan bahwa reaktivitas batang kendali total 14,5 %, sedangkan reaktivitas lebih teras 9,2 %. Jika terjadi *stuck rod* yang artinya satu batang kendali dengan reaktivitas terbesar macet atau tidak dapat difungsikan sebagai alat memadamkan reaktor, maka reaktor masih selamat dengan menurunkan dengan cepat (*scram*) ketujuh batang kendali. Menurut desain reaktivitas *shutdown margin one stuck rod criteria* adalah sekitar - 0,5 % [5].

### Reaktivitas padam (*shutdown*)

Reaktivitas padam merupakan reaktivitas negatif saat seluruh batang kendali berada pada posisi terbawah. Reaktivitas padam juga

merupakan fungsi waktu seperti halnya reaktivitas lebih. Misalnya, reaktivitas padam pada keadaan teras dingin dan bersih dengan temperatur kamar dan bahan bakar yang baru, dimana belum terjadi deplesi maupun pembangkitan produk fisi, akan berbeda harganya dengan teras yang telah dioperasikan pada suatu waktu tertentu. Reaktivitas padam mempunyai harga faktor multiplikasi di bawah kritis ( $k_{eff} < 1$ ) meskipun satu batang kendali dengan reaktivitas terbesar gagal masuk, yang disebut dengan reaktivitas padam pada kondisi *stuck rod*.

### Reaktivitas Total

Reaktivitas total merupakan penjumlahan harga reaktivitas lebih dan reaktivitas padam yang juga merupakan penjumlahan seluruh reaktivitas batang kendali pada posisi 60 cm (*fully up*).

$$\Delta \rho = \rho_{\text{lebih}} + \rho_{\text{padam}} \quad (2)$$

### Reaktivitas Yang Hilang

Reaktivitas yang terpakai selama satu siklus operasi dipengaruhi oleh besarnya energi yang dibangkitkan, sejak awal hingga akhir siklus, dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut [6]:

$$\rho_{f,b} = -k_{f,b} \frac{Q}{m_f} \quad (3)$$

dengan,

$\rho_{f,b}$  : reaktivitas yang terbakar

$k_{f,b}$  : konstanta elemen bakar

$Q$  : energi termal yang dihasilkan

$m_f$  : massa nuklida

### Reaktivitas batang kendali

Reaktivitas batang kendali merupakan harga reaktivitas dari setiap batang kendali yang merupakan akibat dari adanya bahan penyerap dalam teras dan pemasukan elemen bakar. Untuk keperluan operasi reaktor, telah dilakukan pengukuran reaktivitas batang

kendali dengan menggunakan metode kompensasi berpasangan. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan reaktivitas ialah [7].

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (4)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} n(t) - \lambda C_i(t) \quad (5)$$

dengan,

$n(t)$  = rapat neutron

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

$\beta_i$  = fraksi neutron kasip

$\beta$  = fraksi neutron kasip total

$\ell$  = umur rata-rata neutron

$\lambda_i$  = tetapan peluruhan neutron kasip kelompok ke-i

$\rho$  = reaktivitas batang kendali

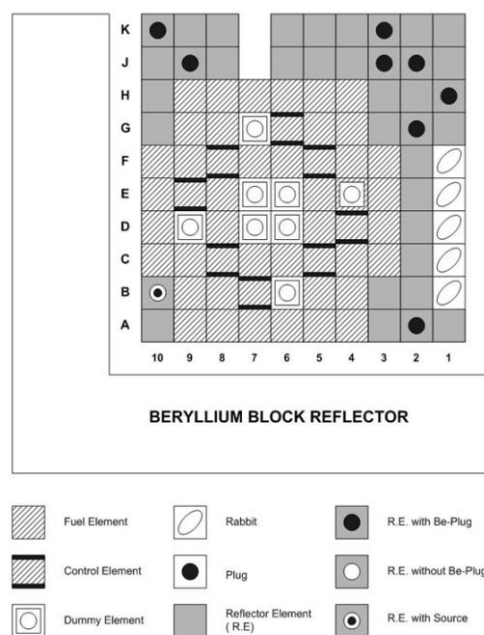
Dengan menyelesaikan persamaan (4) dan (5) diperoleh persamaan per jam (6) yang digunakan untuk menentukan reaktivitas batang kendali secara eksperimen.

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

Posisi kedelapan batang kendali dalam teras reaktor dapat dilihat pada Gambar 1.

### Perhitungan Reaktivitas Batang Kendali

Untuk keperluan operasi diperlukan harga reaktivitas batang kendali guna mengetahui keadaan atau harga reaktivitas pada setiap saat, baik dalam kondisi operasi daya rendah maupun daya tinggi. Perhitungan dengan menggunakan metode interpolasi linier dua titik menghasilkan harga reaktivitas batang kendali dari posisi 0 s/d 60 cm. Perhitungan reaktivitas batang kendali dengan interpolasi linier digunakan untuk memperoleh data setiap kenaikan satu millimeternya.



Gambar 1. Konfigurasi Teras Kerja RSG-GAS

Semua harga reaktivitas teras yang diperoleh berasal dari hasil pengukuran reaktivitas batang kendali dengan menggunakan metode kompensasi, sedangkan karakteristik reaktivitas teras dianalisis berdasarkan data-data desain yang ada pada LAK (Laporan Analisis Keselamatan) [8].

### Deskripsi Teras RSG-GAS

RSG-GAS didesain oleh Interatom Jerman, yang mempunyai kegunaan untuk penelitian dan produksi radio-isotop. RSG-GAS kritis pertama pada tahun 1987, kemudian dilakukan eksperimen komisioning pada beberapa teras untuk pemuatan bahan bakar teras menuju teras setimbang atau sering disebut dengan teras kerja. Teras reaktor didinginkan dan dimoderasi dengan air ringan. Komponen teras disusun dengan matriks 10 x 10 posisi. Lempengan grid dikelilingi oleh aliran pendingin melalui komponen teras. Di bagian luar teras reaktor, ditempatkan berilium blok reflektor berbentuk L berdekatan dengan teras. Matrik grid memiliki 100 lubang yang identik dan didesain cocok untuk elemen bahan bakar, elemen kendali, elemen berilium reflektor dan

fasilitas iradiasi. *Fitting* akhir elemen ini disesuaikan persis dengan lubang yang disebut dengan *boreholes* t.

Desain susunan teras kerja (TWC=*Typical Working Core*) dijelaskan sebagai berikut. Teras TWC RSG-GAS terdiri atas 40 bahan bakar, 8 batang kendali dan 8 fasilitas iradiasi yang ukurannya sama dengan yang lain. Seluruh set-up membentuk 8 x 8 kisi. Teras reaktor dengan matrik yang tersedia 10 x 10 grid, ukurannya 81 mm x 77,1 mm diisi dengan elemen reflektor yang dibuat dari berilium dan aluminium yang menggunakan *stopper*. Fasilitas iradiasi tergantung pada kebutuhan pengguna misalnya fasilitas iradiasi untuk sistem rabbit dan sistem pneumatik. Susunan reflektor ini meliputi dua sisi dari teras. Sisa dua belah pihak teras ditutupi oleh blok berilium reflektor dan fasilitas eksperimental, khususnya tabung neutron dan PRTF (*Power Ramp Test Facility*). Bahan bakar didasarkan pada teknologi MTR (*Material Testing Reactor*) yang telah teruji. Setiap elemen bakar terdiri dari ujung bawah dan perangkat penanganan atas, dua sisi pelat luar dan 21 pelat bahan bakar. Setiap pelat bahan bakar terbuat dari bahan AlMg1 dan dua lembar penutup dari bahan yang sama untuk bahan bakar  $U_3O_8$ -Al dispersi.

Elemen kontrol atau batang kendali didesain untuk menyerap neutron dalam bentuk garpu. Bagian yang mengandung bahan bakar dari elemen kontrol ini sangat mirip dengan bagian bahan bakar dari elemen bahan bakar. 15 pelat dalam yang digunakan untuk mengisi bahan bakar bersama oleh dua sisi pelat penutup. Tiga pelat bahan bakar dikeluarkan pada setiap zona akhir yang ada bahan bakar untuk memberikan ruang bagi masuknya pelat absorber. Dua dari tiga lempeng bahan bakar diganti dengan pelat aluminium. Perakitan penyerap terdiri dari dua stainless steel (bahan

1,4541, setara dengan SS 321) berbentuk pelat dengan material AgInCd (80 %, 15 %, dan 5 %) [9]. Sistem kontrol nuklir menyediakan sarana mengendalikan fluks neutron reaktor dengan gerakan vertikal dari absorber ke atas dan ke bawah dari elemen kontrol untuk menyesuaikan reaktivitas teras. Unsur-unsur berilium terdiri dari ujung bawah, berilium persegi panjang dan perangkat penanganan atas.

Selama reaktor beroperasi, pengaturan teras di atas dapat dimodifikasi sesuai dengan tugas dan fungsi reaktor adalah untuk riset. Selain itu, pada awal masa reaktor, teras yang lebih kecil harus disiapkan dimulai dengan teras pertama dengan elemen bakar segar, kemudian diikuti oleh fase transisi dengan penambahan ukuran teras dan akhirnya menghasilkan teras penuh set-up. Prosedur tersebut telah dilakukan sesuai dengan desain teras reaktor MTR dengan pengkayaan rendah (19,75 %) yaitu elemen bakar MTR yang pengayaan U-235 sama. Setelah finalisasi fase transisi, terdapat juga beberapa fleksibilitas dalam ukuran teras. Teras yang lebih kecil dapat diatur menggunakan lebih rendah derajat bakar dari elemen bahan bakarnya. Akibatnya daya total dari teras harus dikurangi. Teras yang lebih besar dapat diatur menggunakan lebih tinggi fraksi bakar dari elemen bahan bakarnya. Perubahan ukuran teras perlu pengkajian lebih mendalam dari segi keseimbangan *shut-down reactivity* dari teras. Fleksibilitas terjamin untuk pengaturan reaktivitas iradiasi yang tidak tetap untuk posisi yang digunakan. Perubahan besar dari teras perlu penyelidikan yang cermat terutama dalam hal perhitungan faktor puncak dayanya dan keseimbangan reaktivitas terasnya.

Analisis dan evaluasi desain nuklir tentang teras reaktor RSG-GAS untuk menetapkan konfigurasi teras kerja dengan posisi batang

kendali tertentu sehingga keseimbangan reaktivitas teras yang memadai diperoleh untuk menjamin keselamatan dan distribusi fraksi bakar teras serta prosedur yang tepat dan manajemen bahan bakar yang baik sehingga kontrol reaktor dan sistem proteksi reaktor memberikan kontrol reaktivitas yang cukup baik untuk menjamin keselamatan bahkan jika batang kendali dengan nilai reaktivitas tertinggi terjebak dan macet sepenuhnya tidak dapat bergerak (*stuck rod*) masih tetap aman. Teras kerja (*Typical Working Core*) dimulai dari teras 6 (T-6) sedangkan T-1 s/d T-5 adalah teras transisi. Teras ini digunakan untuk eksperimen agar memahami karakteristik teras RSG-GAS dan manajemen bahan bakar. Teras kerja RSG-GAS dalam makalah ini adalah teras dimana bahan bakar di dalamnya terdiri dari 40 elemen bakar standar dan 8 elemen kendali standar yang sering di sebut batang kendali. Fraksi bakar maksimum dan reaktivitas *shut down margin* teras kerja merupakan batasan yang digunakan dalam melihat karakteristik reaktivitas teras terhadap operasi [10].

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan pengukuran reaktivitas pada teras kerja reaktor riset RSG-GAS selama 30 tahun beroperasi. Syarat yang diperlukan untuk pengukuran reaktivitas batang kendali ialah reaktor siap beroperasi pada daya rendah, dingin dan bersih, serta pada awal siklus setelah pemuatan teras. Adapun peralatan yang digunakan adalah Reaktivimeter, Servorgor 320 untuk pencatat reaktivitas, Detektor FC *start up* (JKT01), dan Detektor daya CIC (JKT04).

Harga reaktivitas batang kendali yang diperoleh dari hasil pengukuran dengan metode kompensasi, kemudian dibuat grafik/kurva reaktivitas. Reaktivitas padam, reaktivitas total, reaktivitas lebih dan

reaktivitas padam kondisi *stuck rod* dapat diketahui. Untuk mengetahui reaktivitas batang kendali yang lebih rinci pada setiap ketinggian posisi batang kendali, dilakukan dengan menggunakan program interpolasi linier [11]. Apabila terjadi perubahan reaktivitas akibat adanya gangguan teras, dengan melihat posisi batang kendali akan dapat diketahui reaktivitasnya. Selain itu data tersebut dapat pula digunakan untuk mengatur pengoperasian reaktor kembali setelah terjadinya scram (mati tiba-tiba) karena adanya pembangkitan xenon. Pengukuran reaktivitas batang kendali yang dilakukan setiap awal siklus teras baru (BOC=*Beginning of Cycle*), dimaksudkan untuk mengetahui harga reaktivitas masing-masing dari delapan batang kendali dan karakteristik reaktivitas terasnya. Data reaktivitas yang dihasilkan dari servorgor 320 sebagai posisi batang kendali disusun dalam sebuah tabel dan perhitungannya dilakukan dengan menjumlahkan setiap langkah perubahan reaktivitas mulai posisi 0 cm sampai dengan posisi 60 cm. Selanjutnya dibuat kurva reaktivitas sebagai fungsi posisi pemasukan atau penarikan batang kendali yang dikenal dengan kurva S.

## III. HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

Harga reaktivitas hasil pengukuran teras RSG-GAS ditunjukkan pada Tabel 2 untuk teras kerja. Dari hasil pengukuran kalibrasi batang kendali awal siklus (BOC) teras kerja dapat diketahui neraca reaktivitas teras sedangkan susunan bahan bakar dalam teras yang optimum untuk mencapai kritikalitas awalnya dihitung berdasarkan paket program IAFUEL. Pola pergantian bahan bakar di dalam teras yang digunakan adalah 6/1 artinya 6 buah elemen bakar dan satu buah elemen kendali yang fraksi bakarnya mencapai harga maksimum dikeluarkan, diganti dengan 6 elemen bakar dan satu elemen kendali yang baru. Setelah 6 siklus maka pada siklus yang

ke tujuh diganti 4 buah bahan bakar dan 2 elemen kendali. Pola pergantian bahan bakar seperti ini tidak mencapai teras setimbang yang artinya fraksi bakar elemen bakar yang dikeluarkan setiap akhir siklus tidak sama khususnya pada siklus yang ke tujuh.

Sejak teras 38 (tahun 1998) digunakan pola 5/1 dan reaktor beroperasi 15 MW, yang artinya setiap akhir siklus dikeluarkan 5 elemen bakar dan satu elemen kendali. Setelah siklus ke delapan, semua elemen

bakar telah diganti dengan yang baru dan fraksi bakar maksimum yang dikeluarkan relatif sama yaitu maksimum 56%. Sejak teras 38, program yang digunakan menghitung manajemen bahan bakar berubah yakni Batan-FUEL [12]. Program ini telah diverifikasi dan divalidasi untuk reaktor yang sejenis sebelum digunakan untuk teras RSG-GAS. Tabel 1 merupakan data utama masukan untuk program Batan-FUEL.

**Tabel 1. Data Desain Teras kerja RSG-GAS [13]**

Parameter	Material dan Ukuran
Tipe reactor	Tipe kolam
Tipe elemen bakar	Oksida pengayaan rendah
Sistem pendinginan	Konveksi paksa
Moderator/pendingin	H <sub>2</sub> O
Reflektor	Be dan H <sub>2</sub> O
Daya nominal (MW)	30
Jumlah elemen bakar	40
Jumlah elemen kendali	8
Jumlah penyerap tipe garpu (pasang)	8
Panjang siklus pada daya nominal (hari)	25
Fraksi bakar rerata awal siklus (% hilangnya <sup>235</sup> U)	23,3
Fraksi bakar rerata akhir siklus (% hilangnya <sup>235</sup> U)	31,3
Fraksi bakar maksimum pada akhir siklus (% hilangnya <sup>235</sup> U)	53,7
Dimensi elemen bakar/kendali (mm)	77.1x81x600
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	AlMg2
Ketebalan kelongsong bahan bakar (mm)	0,38
Dimensi <i>Fuel Meat</i> (mm)	0,54x62,75x600
Material <i>Fuel Meat</i>	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> Al
Pengkayaan U-235 (%)	19,75
Densitas Uranium (g/cm <sup>3</sup> )	2,96
Muatan U-235 per elemen bakar (g)	250
Muatan U-235 per elemen kendali (g)	178,6
Material penyerap	AgInCd
Ketebalan bahan penyerap (mm)	3,38
Material kelongsong penyerap (mm)	SS-321
Ketebalan kelongsong penyerap (mm)	0,85

Tabel 2. Reaktivitas Hasil Pengukuran dan Data Desain

Teras Kerja	$\rho$ lebih (%)	$\rho$ total (%)	$\rho$ bk terbesar (%)	$\rho$ padam (%)	$\rho$ padam stuck rod (%)	Energi (MWD)	Bum (%)	Bur (%)
T- 6	9,61	-14,27	- 2,49	- 4,67	-2,18	725,91	51,84	34,34
T-7	9,75	-15,32	-3,20	-5,57	-2,37	753,61	54,06	32,11
T-8	9,87	-14,77	-2,40	-4,91	-2,51	684,40	54,63	31,40
T-9	9,36	-13,48	-2,34	-4,12	-1,78	785,41	55,46	32,73
T-10	10,2	-14,50	-2,40	-4,29	-1,89	790,80	56,69	32,44
T-11	9,29	-13,68	-2,23	-4,39	-2,16	649,61	56,67	32,67
T-12	8,97	-13,91	-2,17	-4,94	-2,77	723,22	57,09	32,71
T-13	8,86	-13,54	-2,01	-4,68	-2,67	744,51	53,42	32,72
T-14	9,01	-13,40	-2,03	-4,39	-2,36	747,90	54,40	32,99
T-15	8,79	-13,80	-2,04	-5,01	-2,97	660,81	49,83	32,33
T-16	8,33	-12,94	-1,95	-4,61	-2,66	698,21	50,32	31,60
T-17	8,50	-12,92	-1,87	-4,42	-2,55	683,40	50,39	30,85
T-18	11,19	-17,68	-2,49	-6,49	-4,00	722,71	49,57	31,02
T-19	9,64	-16,78	-2,49	-7,14	-4,67	670,82	53,00	31,68
T-20	9,26	-15,83	-2,27	-6,57	-4,30	578,80	51,73	30,58
T-21	7,66	-12,33	-1,72	-4,67	-2,95	643,71	53,75	29,73
T-22	7,86	-12,66	-2,08	-4,80	-2,72	649,90	55,48	29,31
T-23	7,53	-11,58	-1,69	-4,05	-2,36	677,91	55,34	29,49
T-24	7,81	-11,24	-1,75	-3,43	-1,68	705,11	50,24	29,09
T-25	8,17	-13,63	-1,92	-5,46	-3,54	678,42	54,00	30,22
T-26	7,20	-11,61	-1,72	-4,41	-2,69	723,01	53,96	30,10
T-27	6,56	-11,42	-1,69	-4,86	-3,17	606,21	49,85	29,57
T-28	6,85	-11,47	-1,68	-4,62	-2,94	523,76	49,48	29,11
T-29	7,14	-11,96	-1,76	-4,88	-3,12	574,32	53,37	29,34
T-30	7,43	-12,71	-1,76	-5,28	-3,52	560,84	52,28	29,12
T-31*	7,43	-11,40	-1,66	-4,07	-2,41	556,91	51,09	29,05
T-32	6,67	-11,10	-1,73	-4,38	-2,65	529,30	50,47	28,78
T-33	6,07	-9,38	-1,67	-3,31	-1,64	526,44	50,81	28,41
T-34	6,92	-10,58	-1,61	-3,66	-2,05	534,24	50,05	29,75
T-35	7,46	-10,55	-1,54	-3,09	-1,55	500,14	49,10	27,85
T-36**	7,17	-9,80	-1,41	-2,63	-1,22	540,71	48,56	29,14
T-37	9,65	-13,57	-1,91	-3,81	-1,90	612,69	48,79	28,48
T-38	8,15	-12,93	-1,98	-4,78	-2,80	611,92	53,20	29,10
T-39	7,54	-12,51	-1,92	-4,96	-3,04	601,43	58,08	29,36
T-40	6,71	-11,64	1,68	-4,92	-3,24	500,38	61,04	28,79
T-41	6,73	-10,92	-1,63	-4,21	-2,58	512,63	64,95	28,25
T-42	8,29	-13,34	-1,95	-5,05	-3,10	512,01	67,39	28,35
T-43	8,71	-13,47	-1,91	-4,76	-2,85	623,29	50,92	28,67
T-44	8,47	-13,15	-1,77	-4,68	-2,91	582,68	51,53	28,92
T-45***	8,13	-12,78	-1,87	-4,64	-2,77	636,32	50,87	29,65
T-46	7,97	-13,25	-1,89	-5,28	-3,39	570,10	54,89	29,41
T-47	8,14	-13,44	-1,85	-5,30	-3,45	618,82	50,59	29,41



Teras Kerja	$\rho$ lebih (%)	$\rho$ total (%)	$\rho$ bk terbesar (%)	$\rho$ padam (%)	$\rho$ padam stuck rod (%)	Energi (MWD)	Bum (%)	Bur (%)
T-48	7,43	-12,63	-1,85	-5,19	-3,34	620,35	51,67	30,63
T-49	7,63	-12,72	-1,82	-5,09	-3,27	632,34	52,77	31,19
T-50	6,79	-11,58	- 1,69	-4,75	-3,04	637,58	53,92	31,73
T-51	7,15	-12,47	- 1,87	-5,31	-3,44	629,67	54,16	31,87
T-52	7,28	-12,70	- 1,86	-5,42	-3,56	608,16	54,25	31,69
T-53	7,55	-12,71	-1,84	-5,16	-3,32	644,84	55,87	31,91
T-54	7,67	-12,70	-1,87	-5,03	-3,16	712,51	58,21	32,66
T-55	7,72	-12,91	-1,92	-5,19	-3,27	660,30	58,58	32,24
T-56	7,52	-12,77	-1,85	-5,25	-3,40	641,14	59,59	32,06
T-57	7,66	12,68	-1,86	-5,01	-3,15	667,07	58,98	32,04
T-58	7,78	12,85	-1,93	-5,07	-3,14	691,14	58,31	32,10
T-59	7,45	-12,61	-1,86	-5,16	-3,30	599,66	56,65	31,30
T-60	7,76	-12,83	-1,81	-5,16	-3,35	621,26	55,51	30,88
T-61	7,78	-13,03	-1,91	-5,25	-3,34	682,00	55,90	31,15
T-62	7,83	-13,29	-1,94	-5,46	-3,25	658,22	55,48	31,17
T-63	6,77	-11,85	-1,69	-5,08	-3,39	657,92	55,45	31,20
T-64	6,78	-11,98	-1,71	-5,19	-3,48	638,25	55,43	31,07
T-65	7,55	-13,23	-2,01	-5,68	-3,67	664,46	55,30	31,17
T-66	7,56	-13,20	-2,01	-5,67	-3,66	664,46	54,87	31,17
T-67	7,71	-13,73	-2,02	-6,01	-3,99	659,28	55,57	31,16
T-68	7,81	-13,74	-2,04	-5,85	-3,81	650,34	58,98	31,37
T-69	7,57	-13,58	-2,05	-6,00	-3,95	656,22	57,91	31,76
T-70	7,47	-13,44	-1,90	-5,97	-4,07	651,76	57,78	31,69
T-71	7,32	-13,42	-2,03	-6,09	-4,06	666,19	57,86	31,84
T-72	7,16	-13,22	-1,90	-6,07	-4,17	629,53	57,80	31,62
T-73	7,12	-13,25	-1,90	-6,13	-4,23	655,79	57,74	31,68
T-74	7,17	-13,41	-1,90	-6,24	-4,34	653,83	57,79	31,72
T-75	7,83	-14,65	-2,10	-6,82	-4,72	655,00	57,97	31,76
T-76	7,46	-13,52	-2,00	-6,06	-4,06	606,79	57,65	31,30
T-77	7,35	-13,38	-1,88	-6,03	-4,15	654,01	57,43	31,38
T-78	7,60	-13,59	-2,00	-5,99	-3,99	663,58	57,59	31,55
T-79	7,41	-13,44	-1,91	-6,03	-4,12	636,04	57,33	31,42
T-80	7,47	-13,46	-1,94	-5,98	-4,04	654,35	57,54	31,52
T-81	7,94	-13,36	-1,88	-5,42	-3,54	652,14	57,56	31,55
T-82	7,47	-13,46	-1,94	-5,98	-4,04	654,35	57,33	31,42
T-83	7,40	-13,39	-1,88	-5,99	-4,11	652,35	57,58	31,60
T-84	7,47	-13,39	-1,93	-5,92	-3,99	640,28	57,41	31,46
T-85	7,64	-13,43	-1,92	-5,79	-3,87	642,82	57,71	31,37
T-86	7,32	-13,44	-1,95	-6,13	-4,18	620,39	57,31	31,09
T-87	7,29	-13,42	-1,89	- 6,12	-4,23	626,49	57,17	30,87
T-88	7,30	-13,43	-1,85	- 6,12	-4,27	630,65	56,90	30,82
T-89	7,46	-13,56	-1,93	-6,09	-4,26	640,59	56,82	30,84
T-90	7,30	-13,29	-1,87	-5,99	-4,12	640,02	56,72	30,87

Teras Kerja	$\rho$ lebih (%)	$\rho$ total (%)	$\rho$ bk terbesar (%)	$\rho$ padam (%)	$\rho$ padam stuck rod (%)	Energi (MWD)	Bum (%)	Bur (%)
T-91	7,29	-13,21	-1,86	-5,91	-4,05	640,18	56,73	30,91
Desain [8]	9,20	-14,50	-3,10	-5,30	-2,20	750	56,00	31,30
Oksida								
Silisida	9,20	-14,50	-3,10	-5,30	-2,20	750	59,59	31,30

Keterangan:

$\rho$  = reaktivitas

T-6.. = Teras ke 6 dst.

Bk = batang kendali

Bur = fraksi bakar rerata akhir siklus

Bum = fraksi bakar maksimum akhir siklus

\*) = Dimulainya pola pemuatan bahan bakar 5/1

\*\*) = Dimulainya pemuatan 2 buah elemen bakar silisida

\*\*\*)) = Semua bahan bakar teras RSG-GAS uranium silisida

**Tabel 3. Penggantian Batang Kendali RSG-GAS**

No	Batang kendali	Posisi di Teras	Waktu di Teras	Keterangan
1	JDA 06+09	C-8	22-05-2007	teras 61
2	JDA 06+10	C-8	28-12-2007	teras 63
3	JDA 06+11	C-8	14-07-2008	teras 65
4	JDA 06+12	C-8	06-03-2009	teras 67
5	JDA 06+13	E-9	10-09-2009	teras 69
6	JDA 06+14	E-9	31-03-2010	teras 71
7	JDA 06+15	E-9	03-11-2010	teras 73
8	JDA 06+16	E-9	16-05-2011	teras 75

**Tabel 4 Neraca Reaktivitas pada Teras Kerja RSG-GAS**

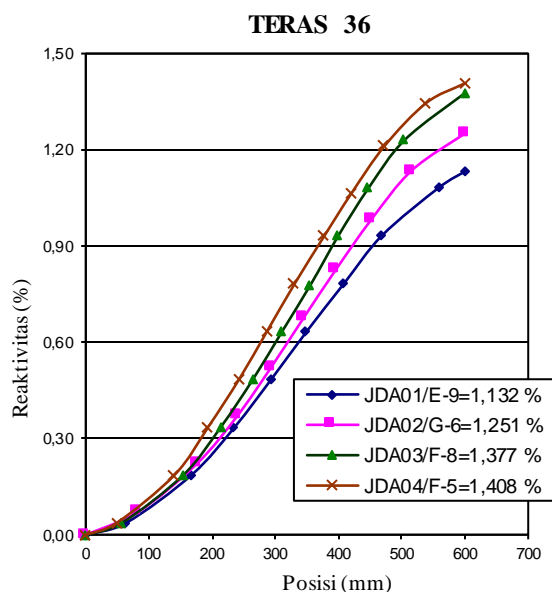
Parameter	Desain [6]	Pengukuran T-7
Reaktivitas Panas $\rightarrow$ dingin	$\Delta\rho = 0,3 \%$	$\Delta\rho = 0,29 \%$
Reaktivitas Xenon setimbang $\rightarrow$ bebas xenon	$\Delta\rho = 3,5 \%$	$\Delta\rho = 3,4 \%$
Pembakaran per siklus (25)hari dengan daya nominal 30 MW	$\Delta\rho = 3,0 \%$	$\Delta\rho = 3,0 \%$
Keperluan eksperimen	$\Delta\rho = 2,0 \%$	$\Delta\rho = 2,0 \%$
Persediaan kontrol (xenon, beamtube)	$\Delta\rho = 0,4 \%$	$\Delta\rho = 0,4 \%$
Reaktivitas yang tersedia pada BOC Dingin tanpa xenon	$\Delta\rho = 9,2 \%$	$\Delta\rho = 9,75 \%$

### Reaktivitas Batang Kendali Total

Reaktivitas batang kendali total hasil pengukuran untuk setiap teras dapat dilihat pada Tabel 2 dan ternyata ada perbedaan harga reaktivitas batang kendali total, reaktivitas lebih dan reaktivitas stuck rod dengan data desain.

Reaktivitas total batang kendali bervariasi dari 9,38 % pada T-36 hingga 17,68 % pada T-18. Harga terbesar berada pada teras 18 dan terkecil pada teras 36 demikian juga untuk reaktivitas stuck rodnya. Namun batas ini masih diijinkan karena harga reaktivitas batang kendali masih

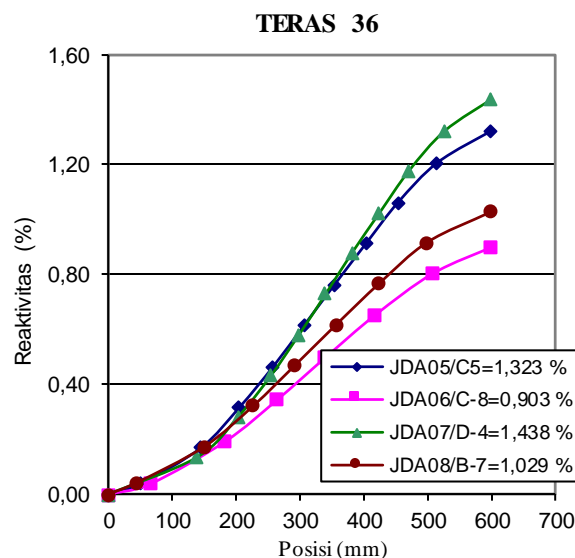
mampu untuk mengontrol reaktivitas lebihnya dan pada kondisi *stuck rod* juga masih ada reaktivitasnya padamnya -0,5 % sesuai dengan nilai desainnya.



Gambar 2. Reaktivitas Hasil Kalibrasi Batang Kendali JDA01 s/d 04

Harga reaktivitas batang kendali berbeda untuk setiap teras. Salah satu contoh harga reaktivitas batang kendali sebagai fungsi posisi dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3. Gambar 2 adalah harga reaktivitas batang kendali JDA01 s/d 04 dan Gambar 3 adalah harga reaktivitas batang kendali JDA05 s/d 08. Perbedaan harga reaktivitas batang kendali ini dikarenakan kondisi teras yang digunakan berbeda dalam pengukuran dan posisinya di dalam teras terhadap detektor juga berbeda artinya perbedaan ini disebabkan manajemen bahan bakar di dalam teras dan kondisi panas gamma dan elemen penyerap di dalam teras. Manajemen bahan bakar di teras RSG-GAS ada ratusan kemungkinan sehingga perlu dihitung dengan teliti penempatan bahan bakarnya. Semakin lama bahan bakar di dalam teras maka fraksi bakarnya semakin bertambah besar karena jumlah uraniumnya berkurang karena deflesi. Setelah 6 siklus di dalam teras maka siklus ke 7 digantikan menjadi bahan bakar baru. Elemen penyerap

semakin lama di dalam teras juga berkurang daya serapnya terhadap neutron maka kemampuannya semakin berkurang juga. Menurut LAK (Laporan Analisis Keselamatan) elemen kendali diganti setelah akhir siklus ke 42 (T-42) jika reaktor dioperasikan setiap siklusnya 750 MWD.



Gambar 3. Reaktivitas Hasil Kalibrasi Batang Kendali JDA05 s/d 08

Elemen kendali diganti setelah reaktor beroperasi selama 31.500 MWD. Mulai dari teras pertama hingga teras ke 42 reaktor telah beroperasi selama 25.804,17 MWD. Penggantian elemen kendali telah dilakukan setelah reaktor beroperasi 31.500 MWD. Pergantian batang kendali dimulai pada teras 61, secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 3.

### Reaktivitas Padam Reaktor

Reaktivitas padam yang ditunjukkan pada Tabel 2 juga bervariasi dari -2,63 % pada T-36 hingga -7,14 % pada T-19. Besar kecilnya reaktivitas padam ini sangat tergantung kepada kemampuan menyerap elemen absorber di dalam batang kendali di teras. Diharapkan merata dan hampir sama ke 8 batang kendali yang ada di teras. Data pengukuran ditentukan berdasarkan penentuan reaktivitas pada posisi kritis

reaktor bebas pengaruh sumber neutron pada awal siklus operasi. Untuk kondisi operasi daya tinggi, reaktivitas padam reaktor akan bertambah dikarenakan adanya penambahan reaktivitas xenon setimbang, dan reaktivitas padam ini akan bertambah seiring dengan bertambah lamanya operasi reaktor. Bila reaktor terpancung (*scram*) pada saat operasi daya tinggi, maka akan timbul pembangkitan xenon. Bila hal ini terjadi pada awal siklus, maka dalam waktu kurang dari dua jam, reaktor masih dapat dikritiskan kembali menuju daya semula, tetapi bila reaktor terpancung pada pertengahan atau akhir siklus, maka kemungkinan kecil untuk dapat mengkritiskan reaktor dalam waktu singkat, karena konsentrasi xenon dalam teras semakin bertambah. Pada kondisi ini reaktivitas padam mencapai harga maksimum, yaitu sama dengan reaktivitas total batang kendali. Diperlukan waktu untuk peluruhan konsentrasi xenon, agar reaktor dapat dikritiskan kembali yang disebut waktu padam reaktor.

Reaktivitas padam kondisi *stuck rod* dapat ditentukan dengan mengurangi harga reaktivitas padam dan reaktivitas batang kendali terbesar. Pada Tabel 2 ditunjukkan bahwa harga reaktivitas padam untuk teras kerja RSG-GAS. Batas keselamatan menyatakan bahwa jika terjadi kondisi *stuck rod* dibutuhkan reaktivitas *shut down margin* - 0,5 %. Hal ini berarti untuk semua teras kerja terpenuhi, sehingga reaktor dapat dioperasikan karena reaktor masih dapat dipadamkan meskipun satu batang kendali gagal masuk.

### Reaktivitas Lebih

Berdasarkan data pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa reaktivitas lebih teras bervariasi dari 6,07 % pada T-33 hingga 11,19 % pada T-18. Nilai reaktivitas lebih teras terbesar adalah pada teras 18 sedangkan yang terkecil adalah

pada teras 33. Pada umumnya reaktivitas lebih teras cenderung menurun selama 42 siklus operasi. Hal ini disebabkan karena material pembentuk teras seperti elemen Berilium mengandung unsur litium disamping panas gamma yang tinggi. Namun dengan adanya harga reaktivitas lebih teras tersebut masih mampu untuk mengkritiskan reaktor selama satu siklus operasinya. Reaktivitas lebih teras yang didapat dari persamaan (2) diperlukan agar reaktor dapat dioperasikan sesuai dengan waktu yang diperlukan. Reaktivitas lebih merupakan pengurangan dari reaktivitas total batang kendali dan reaktivitas padam reaktor. Reaktivitas lebih tersebut akan berkurang seiring dengan bertambah lamanya operasi reaktor dalam satu siklus. Bilamana reaktivitas lebih tidak memungkinkan untuk mencukupi kebutuhan operasi, maka reaktor dipadamkan untuk pembentukan teras baru berikutnya. Untuk teras reaktor RSG-GAS, reaktivitas yang diperlukan untuk keperluan operasi adalah 9,2 % agar dapat dioperasikan selama 25 hari operasi daya penuh (30 MW), yang setara dengan 750 MWD. Namun dalam perjalanannya reaktor ada saatnya tidak dioperasikan dengan 750 MWD bahkan ada yang 500 MWD seperti teras kerja T-35 sehingga reaktivitas lebih yang dibutuhkan tidak harus 9,2 %. Enam persen reaktivitas lebih teras sudah cukup untuk dioperasikan selama 500 MWD sehingga manajemen bahan bakar teras kerja reaktor RSG-GAS efektif dan dilakukan berdasarkan kebutuhan iradiasi sampel di dalam maupun di luar teras.

### Manajemen Reaktivitas

Perbedaan reaktivitas dari kondisi panas ke dingin adalah merupakan selisih dari reaktivitas teras pada kondisi dingin (tidak ada pengaruh suhu) dan kondisi operasi, bebas xenon yang diasumsikan bahwa teras kerja dioperasikan 750 MWD. Jika teras kerja dioperasikan lebih kecil dari 750 MWD maka parameter pada Tabel 4 dapat dihitung secara

linier. Perubahan reaktivitas panas ke dingin hasil pengukuran ditentukan dari reaktivitas operasi daya tinggi dikurangi reaktivitas daya rendah bebas sumber. Reaktivitas daya tinggi telah dikurangi dengan reaktivitas xenon yang didapat dari hasil pengukuran dengan menggunakan metode kompensasi. Data harga reaktivitas xenon yang ditunjukkan pada Tabel 4 adalah pada kondisi reaktivitas xenon setimbang.

Pengoperasian teras RSG-GAS tidak ada yang melampaui fraksi bakar maksimum yang diijinkan yaitu 59,59 %, kecuali pada teras 39. Hal ini disebabkan karena pada teras 38 terjadi kesalahan pengeluaran bahan bakar. Seharusnya dikeluarkan bahan bakar RI-227 yang fraksi bakarnya 48,79 % ternyata yang dikeluarkan RI-224 yang fraksi bakarnya 13,97 %. Hal ini terjadi hingga teras 42 sehingga fraksi bakar bahan bakar RI-227 bertambah terus hingga terakhir di dalam teras 42 fraksi bakarnya menjadi 67,39 %. Namun diamati secara visual dengan menggunakan teropong bahan bakar RI-227 tidak mengamati kerusakan. Hal ini menjadi pelajaran buat operator untuk masa depannya agar lebih teliti lagi sehingga tidak ada kesalahan dalam penempatan bahan bakar.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan manajemen bahan bakar teras kerja RSG-GAS dan hasil pengukuran reaktivitas batang kendali dengan metode kompensasi berpasangan diperoleh nilai kesetimbangan reaktivitas teras. Parameter neutronik dan parameter teras lainnya tidak ada yang melanggar batas keselamatan. Selama reaktor RSG-GAS beroperasi 30 tahun sejak awal dioperasikan tahun 1987, pengelolaan reaktivitas telah dilakukan dengan baik. Hal ini sangat mendukung keselamatan operasi reaktor sehingga reaktor dapat digunakan untuk keperluan riset dan iradiasi target.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kepada Kepala PRSG dan PTKRN Batan yang telah memberikan kesempatan kepada kami untuk melakukan penelitian ini. Demikian juga kepada Kepala BFTR dan teman-teman peneliti lainnya atas masukan dan saran sehingga membuat penelitian ini jauh lebih baik dan dapat digunakan untuk mengevaluasi keselamatan operasi reaktor RSG-GAS.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Setiyanto dan Surbakti T. Analysis of Gamma Heating at Triga Mark Reactor Core Bandung using Plate Type Fuel. *Jurnal Tri Dasa Mega*. 2016; **18**(3): 127-134. Terdapat pada: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/3004>.
- [2] Rahgoshaya M dan Noori-Kalkhoran O. Calculation of Control Rod Worth and Temperature Reactivity Coefficient of Fuel and Coolant with Burn-up Changes for VVRS-2 MWth Nuclear Reactor. *Journal of Nuclear Engineering and Design*. 2013; **256**: 322-331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.08.033>.
- [3] Varvayanni M, Catsaros N, dan Antonopoulos-Domis M. Control Rod Worth Calculations using Deterministic and Stochastic Methods. *Annals of Nuclear Energy*. 2009; **36**(11-12): 1718-1725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.09.003>.
- [4] Teruel FE dan Rizwan-uddin. An Innovative Research Reactor Design. *Journal of Nuclear Engineering and Design*. 2009; **239**(2): 395-407. Terdapat pada: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.025>.
- [5] Muhammad F dan Majid A, Kinetic Parameters of a Material Test Research Reactor Fueled with High Density U3Si2

- Dispersion Fuels. *Journal of Progress in Nuclear Energy*. 2009; **51**(1): 141-145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.02.004>.
- [6] Suparlina L. Manajemen Konversi Teras RSG-GAS Berbahan Bakar Silisida Tingkat Muat Tinggi. *Jurnal Tri Dasa Mega*. 2013; **15**(3): 137-149. Terdapat pada: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1860>.
- [7] Rokhmadi dan Surbakti T. Efek Densitas Bahan Bakar Terhadap Parameter Koefisien Reaktivitas Teras RRI. *Jurnal Tri Dasa Mega*. 2013; **15**(2): 77-89. Terdapat pada: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1865>.
- [8] Batan. *Laporan Analisis Keselamatan RSG-GAS rev 10.1*. Batan; 2011.
- [9] Surbakti T, Pinem S, dan Sembiring TM. Analisis Pengaruh Densitas Bahan Bakar Silisida Terhadap Parameter Kinetik Teras Reaktor RSG-GAS. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya*. 2013; **3**(1): 19-30. Terdapat pada: <https://journal.unesa.ac.id/index.php/jpfa/article/view/193/105>.
- [10] Kuntoro I dan Sembiring TM. Desain Teras Alternatif untuk Reaktor Riset Inovatif (RRI) dari Aspek Neutronik. *Jurnal Tri Dasa Mega*. 2014; **16**(1): 1-10. Terdapat pada: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1854>.
- [11] Suparlina L dan Surbakti T. Analisis Pola Manajemen Bahan Bakar Desain Teras Reaktor Riset Tipe MTR. *Jurnal Tri Dasa Mega*. 2014; **14**(3): 89-99. Terdapat pada: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1851>.
- [12] Surbakti T, Pinem S, Sembiring TM, Suparlina L, dan Susilo J. Desain Konseptual Teras Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Uranium-molibdenum dari Aspek Neutronik. *Jurnal Tri Dasa Mega*. 2012; **3**(14): 178-191. Terdapat pada: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1878>.
- [13] Pinem S, Sembiring TM, dan Leim PH. Neutronic and thermal-hydraulic safety analysis for the optimization the Uranium target in the RSG-GAS reactor. *Atom Indonesia*. 2016; **42**(3): 123-128. DOI: <https://doi.org/10.17146/aij.2016.532>.