

DESAIN NEUTRONIKA ELEMEN BAKAR TIPE PELAT PADA TERAS TRIGA 2000 BANDUNG*

Prasetyo Basuki¹, Putranto Ilham Yazid¹, Zaki Suud²

¹Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri BATAN,
Jalan Tamansari No. 71 Bandung 40132

²Program studi Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung,
Jalan Ganesha No. 10 Bandung 40132

Diterima: 30-01-2014

Diterima dalam bentuk revisi: 05-02-2014

Disetujui: 23-05-2014

ABSTRAK

DESAIN NEUTRONIKA KONVERSI ELEMEN BAKAR TIPE PELAT PADA TERAS TRIGA 2000 BANDUNG. Penelitian ini menawarkan konversi elemen bakar reaktor TRIGA-2000 Bandung dari bentuk batang menjadi tipe pelat, sebagai solusi dari masalah pengoperasian reaktor TRIGA-2000 Bandung saat ini. Untuk itu maka dilakukan kajian neutronik secara simulatif terhadap dua macam konfigurasi teras yang baru, yang meliputi perhitungan parameter kritikalitas dan manajemen teras. Kajian simulatif menggunakan MCNPX sebagai alat bantu perhitungan semua parameter neutroniknya. Dari dua konfigurasi teras dengan variasi posisi batang kendali, dipilih konfigurasi kedua yaitu konfigurasi dengan posisi batang kendali pada grid B-2, D-2, B-4, dan D-4 dengan penggunaan reflektor Be. Konfigurasi ini memberikan nilai *core excess* sebesar \$ 13,776, dan *shutdown margin* sebesar \$ -12,155, dengan jumlah elemen bakar pada konfigurasi awal teras sebanyak 18 buah. Pada pengujian *one stuck rod criteria*, konfigurasi awal dengan 18 elemen bakar masih cukup aman apabila terdapat satu buah batang kendali dari posisi grid manapun yang gagal jatuh, dimana batang kendali dengan reaktivitas terbesar yaitu di posisi D2 masih memberikan nilai reaktivitas sebesar \$ -0,765. Pada pengujian manajemen teras, dengan mensimulasikan operasi selama 20 periode, didapatkan kondisi teras setimbang setelah periode operasi ke-2 dengan reaktivitas *core excess* rata-rata sebesar \$ 11,537 pada daya 2 MW, dengan penggantian rata-rata elemen bakar per periode sebanyak 8 buah, dan panjang periode operasi rata-rata 444 hari. Fluks neutron yang mampu dicapai pada daya 2MW adalah sebesar $5,717 \times 10^{13}$ s.d. $6,85 \times 10^{13}$ neutron.cm⁻².s⁻¹.

Kata kunci : elemen bakar tipe pelat, kritikalitas, manajemen teras, teras setimbang, fluks neutron

ABSTRACT

NEUTRONIC DESIGN OF PELATE TYPE FUEL CONVERSION FOR BANDUNG TRIGA-2000 REACTOR. This research offers a fuel conversion from rod type to MTR-pelate type for solving the operation problems engaged in Bandung TRIGA-2000 Reactor. In this work, neutronic behaviour of the new core configurations are simulated, which include the calculation of criticality parameters and core management. Simulative studies are carried out by using MCNPX as a tool for the calculation of all the parameters. There are two core configurations varied in the position of the control rods. The second configuration is chosen as the best core configuration, in which the control rods are positioned on the grid B-2, D-2, B-4, and D-4. Also, Be reflector is installed surrounding the core. This configuration gives the value of core excess reactivity of \$ 13,776, and the shutdown margin reactivity of \$ -12,155, the number of fuel elements in the initial core configuration are 18 fuel assemblies. Considering stuck rod criteria, the initial configuration with 18 fuel elements is still quiet safe when one control rod from any grid position fails to function – in this configuration, control rod in position

* Dipresentasikan pada Seminar Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, BATAN – UNPAD 4 Juli 2013.

grid D2 has the biggest reactivity, still gives reactivity at $\beta = -0.765$. At the core management testing, reactor was simulated to operate during 20 periods at power 2 MW, and the core equilibrium condition is reached after 2nd periods with average core excess reactivity at $\beta = 11,537$, with an average replacement fuel elements of 8 assemblies per period, and the length of the period of operation of an average 444 days. Neutron flux that can be achieved in 2MW power varies from $5,717 \times 10^{13}$ to $6,85 \times 10^{13}$ neutron.cm⁻².s⁻¹.

Keywords: pelate type fuel element, criticality, core management, core equilibrium, neutron flux

1. PENDAHULUAN

Reaktor TRIGA lahir pada tahun 31 Maret 1964 oleh *General Atomic* dari sebuah paten yang bernama "*Reactor with Prompt Negative Temperature Coefficient and Fuel Element Therefor*" yang terbit pada tahun 9 Mei 1958(1). TRIGA sampai dengan saat ini masih dimanfaatkan oleh beberapa negara berkembang sebagai tulang punggung penelitian IPTEK nuklirnya.

Dengan adanya wacana tidak di-produksinya lagi elemen bakar TRIGA oleh produsen, maka perlu diusahakan suatu solusi agar reaktor tetap dapat beroperasi. Salah satu solusi yang dapat ditawarkan terkait permasalahan diatas adalah dengan melakukan penggantian tipe bahan bakar. Dengan ketidaktersediaan bahan bakar standar TRIGA, maka pada studi ini akan dikaji penggunaan elemen bakar tipe lain untuk dipasangkan pada teras reaktor TRIGA 2000 Bandung. Tipe elemen bakar yang dikaji pada penelitian ini adalah elemen bakar standar tipe pelat seperti yang telah digunakan oleh fasilitas RSG GAS. Solusi ini diambil dengan tujuan untuk mengurangi ketergantungan membeli elemen bakar import, karena BATAN dalam hal ini PT. BATAN Teknologi sudah mampu membuat dan merakit elemen bakar tipe pelat.

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan parameter desain neutronik, yang meliputi parameter

kritikalitas antara lain *core excess, shutdown margin, one stuck rod criteria*. Melalui simulasi perhitungan *burnup* ingin diketahui pula pola pergantian dan *reshuffling* elemen bakar pada kondisi teras setimbang tercapai.

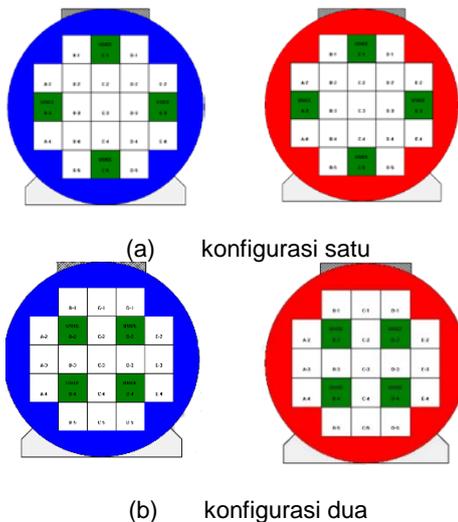
Batasan masalah pada penelitian ini adalah penggunaan MCNPX untuk simulasi perhitungan kritikalitas dan *burnup*. Untuk parameter-parameter operasi yang digunakan pada simulasi dengan menggunakan kode komputasi ini dibuat sama dengan kondisi operasi TRIGA 2000, antara lain daya maksimum 2 MWth. Penggunaan MCNP dalam pemodelan kritikalitas pada TRIGA dapat memberikan gambaran detail akan karakteristik neutroniknya, karena dapat dibuat geometrinya sedetil mungkin(2).

Kajian dilakukan dengan membandingkan kinerja dari dua desain teras yang diusulkan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Desain yang diusulkan berupa variasi konfigurasi posisi batang kendali (ditunjukkan oleh warna hijau) pada teras yang diujicobakan untuk ditentukan parameter kritikalitasnya. Dari desain ini juga di-simulasikan penggunaan reflektor Be pada teras.

2. TEORI

Untuk mendesain suatu reaktor nuklir dengan baik, sangatlah penting dalam memprediksikan bagaimana neutron terdistribusi di dalam sistem. Neutron di dalam suatu

reaktor bergerak dalam arah yang acak sebagai akibat dari tumbukan nuklir yang berulang-ulang. Ada beberapa pendekatan yang dapat digunakan dalam menjelaskan transport neutron dalam sistem reaktor antara lain pendekatan deterministik, dan pendekatan statistik.



Gambar 1. Dua konfigurasi teras, dengan reflektor Be (merah) dan tanpa reflektor (biru)

Pada pendekatan deterministik, teori yang paling populer digunakan adalah teori difusi dimana perilaku neutron dianggap mirip dengan partikel-partikel zat terlarut pada larutan kimia. Apabila konsentrasi suatu larutan lebih besar pada salah satu daerah daripada daerah lainnya, maka zat terlarut akan berdifusi dari daerah dengan konsentrasi tinggi menuju daerah dengan konsentrasi rendah(3). Dengan pendekatan yang sama, apabila terdapat rapat neutron yang sama, apabila terdapat rapat neutron yang lebih tinggi di suatu bagian dari reaktor daripada bagian lainnya, maka akan terjadi aliran neutron menuju daerah dengan rapat neutron yang rendah. Melalui konsep hukum Fick maka aliran neutron dapat dirumuskan menjadi :

$$J_x = -D \frac{d\phi}{dx} \quad (1)$$

dengan,

J_x : jumlah neutron yang lewat berpindah per satuan waktu melalui suatu luasan yang tegak lurus dengan arah x. [neutron.cm⁻².s⁻¹]

D : koefisien difusi [cm]

$\frac{d\phi}{dx}$: laju fluks. [neutron.cm⁻³.s⁻¹]

Dalam suatu sistem reaktor, dinamika populasi neutron didefinisikan dalam suatu persamaan kontinuitas neutron yang dirumuskan seperti dibawah ini:

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju perubahan} \\ \text{jumlah neutron dalam V} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju produksi} \\ \text{neutron dalam V} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju penyerapan} \\ \text{neutron dalam V} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju kebocoran} \\ \text{neutron dari V} \end{array} \right]$$

$$\int_V \frac{\partial n}{\partial t} dV = \int_V v \Sigma_f \phi dV - \int_V \Sigma_a \phi dV - \int_V \text{div } J dA \quad (2)$$

dengan,

$\frac{\partial n}{\partial t}$ = laju perubahan jumlah partikel n pada suatu volume V

v = jumlah neutron per fisi

Σ_f = tampang lintang makroskopis fisi

ϕ = fluks neutron

Σ_a = tampang lintang makroskopis serapan suatu bahan terhadap neutron

J = jumlah neutron yang berpindah per satuan waktu(3).

Pada penelitian ini perhitungan kritikalitas sistem reaktor disimulasikan dengan menggunakan pendekatan statistik

dengan metode *Monte Carlo*. Transport partikel neutron dengan teknik *Monte Carlo* merupakan suatu bentuk eksperimen numerik, dimana setiap partikel akan ditelusuri perjalanannya mulai dari sumber sampai dengan kematiannya dengan beberapa kategori kejadian (absorpsi, lolos, dan lain-lain). Distribusi probabilitas di-sampel secara acak dengan menggunakan data transport untuk menentukan hasil/akibat dari setiap langkah hidupnya(4).

Salah satu faktor penting dalam desain sebuah reaktor adalah perhitungan ukuran dan komposisi sistem yang dibutuhkan untuk menjaga keseimbangan kekritisan. Ukuran keseimbangan kekritisan di-pengaruhi oleh suatu besaran yang disebut reaktivitas. Dimana reaktivitas didefinisikan sebagai:

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (3)$$

dengan,

ρ : reaktivitas

k_{eff} : faktor multiplikasi

Core excess adalah reaktivitas yang tersedia dalam reaktor ketika batang kendali naik (berada pada posisi maksimum), sedangkan *shutdown margin* adalah reaktivitas yang dimiliki reaktor ketika semua batang kendali berada pada posisi didalam teras. Salah satu persyaratan keselamatan secara neutronik dalam reaktor adalah rentang reaktivitas yang harus cukup baik dari posisi *shutdown* sampai posisi daya maksimum, dimana dapat didefinisikan sebagai selisih antara *core excess* dan *shutdown margin* dan biasa disebut sebagai

control rod worth, yang dapat dirumuskan sebagai berikut (5,6):

$$\rho_{Cr} = \rho_{ce} - \rho_{sm} \quad (4)$$

dengan,

$$\rho_{Cr} = \text{control rod worth}$$

$$\rho_{ce} = \text{core excess}$$

$$\rho_{sm} = \text{shutdown margin}$$

Adapun persyaratan keselamatan lainnya adalah pemenuhan kondisi aman secara reaktivitas yang ditunjukkan dengan apabila salah satu batang kendali gagal jatuh (*one stuck rod criteria*) reaktor masih dalam kondisi subkritis (7).

Ketika suatu reaktor dioperasikan maka komposisi ^{235}U yang dimiliki oleh elemen bakarnya akan berkurang. Ekonomi daya nuklir sangat dipengaruhi oleh efisiensi pemanfaatan bahan bakar dalam menghasilkan daya. Energi total yang dilepaskan oleh sejumlah bahan bakar dalam reaksi fisi disebut dengan *fuel burn up* dan diukur dalam satuan *Megawatt day* (MWd). Perubahan komposisi bahan bakar dalam suatu elemen bakar akibat dari operasi dihitung melalui persamaan produksi-destruksi yang secara umum dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{dn_j}{dt} = \gamma_j \Sigma_j \phi + \sum_i (\lambda^{i \rightarrow j} + \sigma^{i \rightarrow j} \phi) n_i - (\lambda^j + \sigma_a^j \phi) n_j \quad (5)$$

Dimana γ_j adalah kejadian fraksi fisi yang menghasilkan sebuah jenis produk fisi j, $\lambda^{i \rightarrow j}$ adalah laju peluruhan isotop i untuk menghasilkan isotop j (akibat peluruhan beta, alfa, neutron, dan lain-lain) dan $\sigma^{i \rightarrow j}$ tampang lintang transmudasi

untuk produksi isotop j oleh tangkapan neutron pada isotop j.

Dengan melakukan simulasi perhitungan operasi reaktor dengan menghitung komposisi bahan bakar setiap periode operasi, maka dapat dibuat suatu skenario proses *reshuffling* dan refuelling. Dengan begitu dari desain teras yang dimiliki akan diperoleh suatu trend kondisi teras setimbang dengan indikator besarnya *core excess* pada setiap periode rata-rata selalu pada kisaran nilai yang mirip saling mendekati. Dari simulasi ini pula dapat diperoleh informasi penggantian elemen bakar rata-rata setiap periode operasi, rapat daya rata-rata, sampai dengan fluks rata-rata pada kondisi BOL (*Beginning Of Life*) dan EOL (*End Of Life*) pada setiap periode operasi. Perhitungan fluks neutron oleh MCNP akan menghasilkan nilai ternormalisasi yang dihasilkan oleh penggunaan kartu F4. Untuk mendapatkan nilai fluks yang sebenarnya sesuai daya reaktor, digunakan hubungan(8,9) :

$$w_{f,S} = \frac{P[W] \cdot \bar{v} \left[\frac{\text{neutron}}{\text{fisi}} \right]}{\left(1.6022 \times 10^{-13} \frac{J}{MeV} \right) w_f \left[\frac{MeV}{fisi} \right]} \quad (6)$$

dengan,

P : daya reaktor yang dioperasikan

\bar{v} : jumlah neutron yang dihasilkan per fisi $\approx 2,43$

w_f : energi yang dilepaskan per fisi ≈ 200 MeV

Sehingga,

$$\Phi \left[\frac{\text{neutron}}{cm^2 \cdot det} \right] = S \frac{1}{k_{eff}} \Phi_{F4} \left[\frac{1}{cm^2} \right] \quad (7)$$

Rapat daya reaktor, adalah besarnya daya per satuan volume teras efektif. Untuk menghitung besarnya rapat daya, dapat digunakan hubungan antara jumlah fraksi daya setiap posisi grid elemen bakar dibagi dengan volume teras terisi oleh elemen bakar.

$$\text{rapat daya} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{F_{grid}}}{V_{teras}} \quad (8)$$

dengan,

$\overline{F_{grid}}$: fraksi daya setiap grid elemen bakar rata-rata dari semua periode operasi simulasi

V_{teras} : volume teras yang terisi elemen bakar (U235)

Adapun *power peaking factor* total dapat dihitung dengan formulasi sebagai berikut:

$$f_{tot} = \frac{P_{max}}{P_{rerata}} \quad (9)$$

dengan,

f_{tot} : *power peaking factor* total

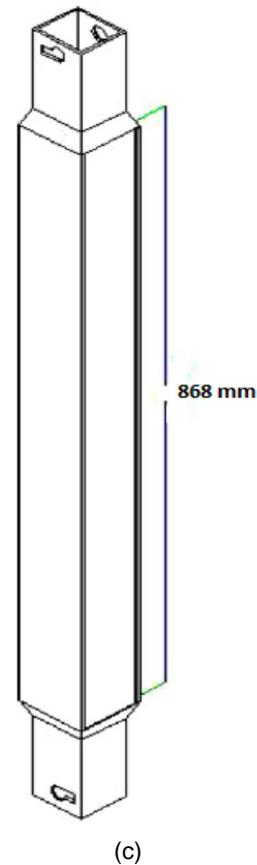
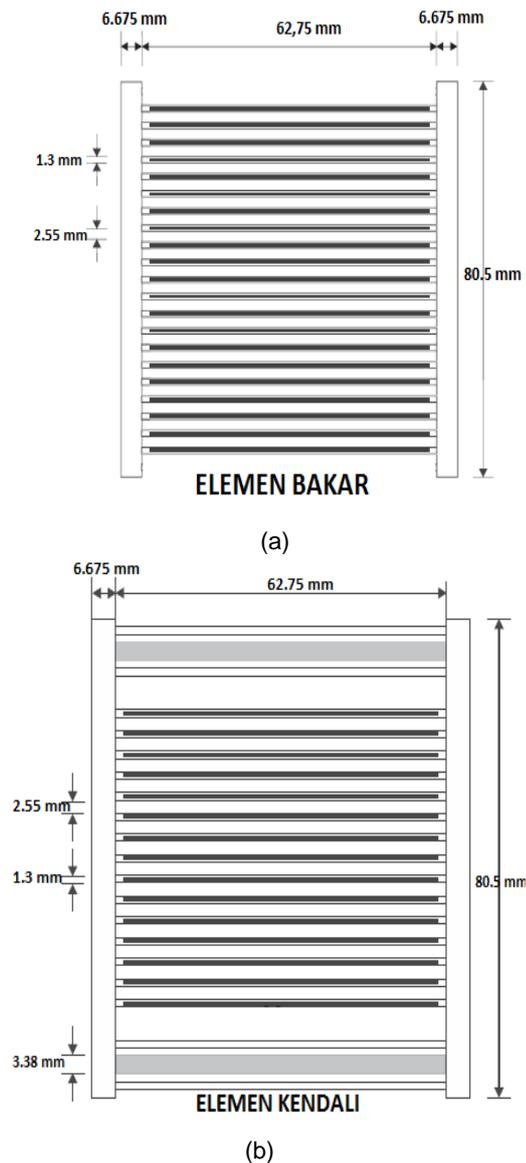
P_{max} : rapat daya maksimum (diperoleh dari posisi elemen bakar terpanas)

P_{rerata} : rapat daya rata-rata untuk1 semua elemen bakar(10).

3. TATA KERJA

Pada penelitian ini perhitungan kritikalitas melalui teori transport neutron didekati dengan metode *Monte Carlo* dengan menggunakan paket kode komputasi MCNPX. Penentuan desain

neutronika yang akan dihitung terdiri atas dua bagian utama yaitu parameter kritikalitas, dan kondisi teras setimbang. Geometri TRIGA dibuat serinci mungkin dengan menggambarkan keseluruhan fisik reaktor mulai dari tangki teras kemudian komponen-komponen fasilitas iradiasi yang melekat disekitarnya yang ditunjukkan oleh Gambar 3. Berikut geometri teras yang digambarkan oleh VISED (aplikasi *visual editor* bagian dari paket MCNPX, yang dapat digunakan untuk membuat dan mengedit geometri objek yang akan disimulasikan).

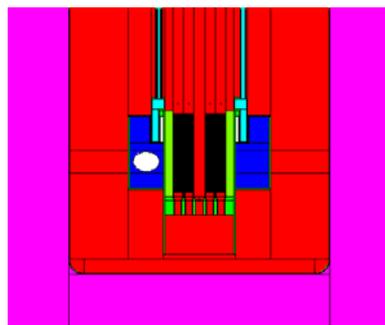


Gambar 2. Skema elemen bakar: (a) dan (b) tampak melintang (11,12); (c) bentuk fisik *assembly*

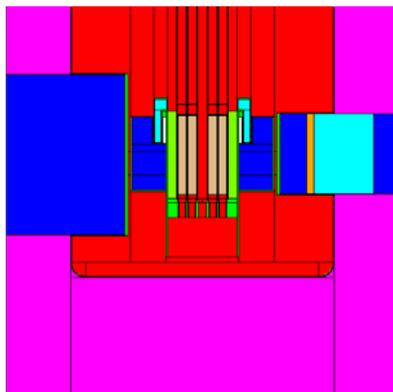
Data geometris dan spesifikasi material elemen bakar yang disimulasikan pada penelitian ini sebagai berikut :

Tabel 1. Data geometris dan spesifikasi elemen bakar

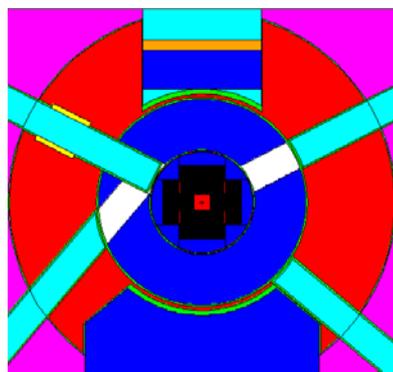
| I. Dimensi elemen bakar dan elemen kendali | |
|--|--|
| 1. | <i>Casing</i> : |
| a. | Panjang : 80,50 mm |
| b. | Lebar : 76,10 mm |
| c. | Tinggi : 868,5 mm |
| 2. | Pelat : |
| a. | Panjang : 62,75 mm |
| b. | Lebar : 1,30 mm |
| c. | Tinggi : 600 mm |
| 3. | Lebar celah antar pelat : 2,55 mm |
| 4. | Tebal penyerap : 3,38 mm |
| II. Spesifikasi material | |
| 1. | <i>Casing</i> dan pelat : AlMg ₂ |
| 2. | Bahan bakar : U ₃ Si ₂ -Al ; pengayaan 19,7% |
| 3. | Bahan penyerap : Ag-In-Cd |
| 4. | Bahan kelongsong penyerap : <i>stainless steel</i> |



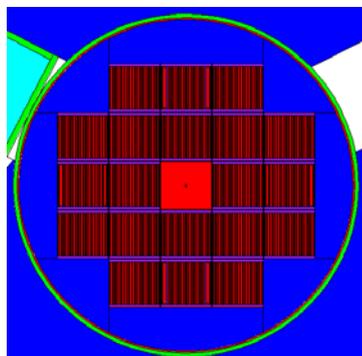
(a) XZ



(b) YZ



(c) XY



(d) XY (zoom) – konfigurasi penuh

Gambar 3.: Geometri TRIGA yang disimulasikan oleh MCNPX dari berbagai posisi pandang

Parameter kritikalitas, yang akan dihitung antara lain: *core excess*, *shutdown margin*, reaktivitas untuk kondisi *one stuck rod*. Konfigurasi yang diajukan harus memenuhi kriteria yang dipersyaratkan, yaitu(7) :

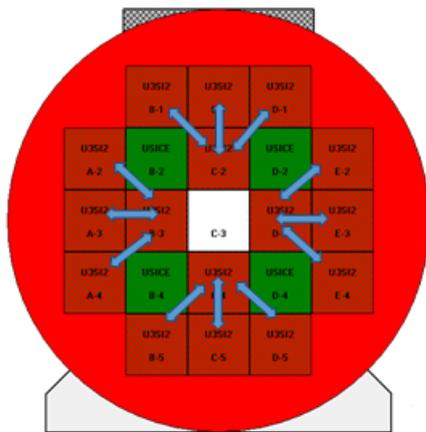
- a. Memiliki nilai *core excess* yang baik, tidak terlampau rendah, ataupun terlampau tinggi, ($\beta_{\text{efektif}} = 0,0072$), $< \$ 15$ (berdasarkan Laporan Analisis Keselamatan TRIGA 2000, reaktivitas operasi TRIGA tidak melebihi \$ 15).
- b. Memiliki nilai *shutdown margin* (*one stuck rod criterion*) $\leq \$ -0.5$.

Sedangkan untuk parameter teras setimbang, desain hasil pemilihan dari hasil simulasi kritikalitas yang memiliki kinerja neutronik paling baik akan diuji operasi mulai dari kondisi teras awal sampai beberapa kali periode operasi sampai didapatkan trend *core excess* yang cenderung tetap untuk setiap kali *reshuffling* dan *refueling*. Adapun aturan-aturan *reshuffling* dan *refueling* yang dilakukan sehingga tercipta konsistensi pola dan perlakuan :

- a. Konfigurasi teras awal dioperasikan sampai dengan kondisi reaktivitas mendekati reaktor dengan nilai $k_{\text{eff}} \approx 1$, artinya reaktor tidak cukup mampu untuk mencapai kondisi superkritis.
- b. Setelah konfigurasi teras awal dioperasikan, dilakukan proses *reshuffling* dengan aturan elemen bakar pada grid dalam digeser keluar dan digantikan dengan elemen bakar dari grid luar. Apabila ada elemen bakar dengan derajat bakar ^{235}U mencapai $\geq 50\%$,

maka harus digantikan dengan yang baru.

- c. Satu kali proses *reshuffling* secara umum terdiri atas kegiatan pergeseran sepasang elemen bakar pada setiap posisi mata angin (misal. A3↔B3; C5↔C4; E3↔D3; C1↔C2, dst.). Berikut bagan aturan pola *reshuffling*, ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Pola reshuffling

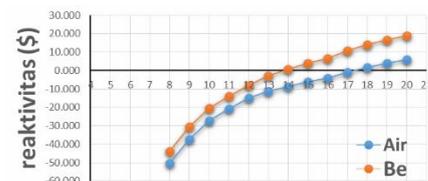
- d. Satu kali *refuelling*, adalah penggantian sejumlah elemen bakar ($U_{235} \leq 50\%$) pada setiap akhir periode operasi. Dilakukan setelah proses *reshuffling*.
- e. Setiap periode operasi terdiri atas : 1 kali *reshuffling*, satu kali *refuelling*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

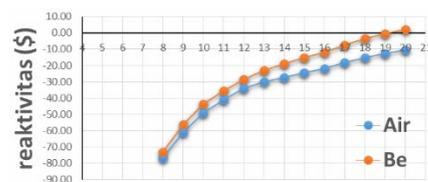
Pada perhitungan kritikalitas dari dua desain teras yang diajukan didapatkan grafik reaktivitas sebagaimana terlihat pada Gambar 5 dan 6.

Dari Gambar 5 dan 6, grafik perhitungan reaktivitas pada kedua desain teras, nampak bahwa pada desain dengan penggunaan reflektor Be diperoleh nilai reaktivitas yang lebih tinggi. Namun pada konfigurasi satu, pada pembebanan elemen

bakar 20 buah, dengan penggunaan reflektor Be, reaktivitas terlampau tinggi bahkan pada kondisi dimana semua batang kendali berada dalam teras (*shutdown margin*), reaktor masih dalam kondisi super-kritis. Sedangkan pada konfigurasi dua penggunaan Be, masih memberikan *shutdown margin* yang kecil dibawah nilai reaktivitas kritis.

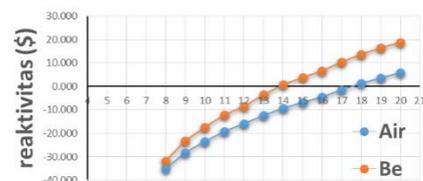


(a) Core excess

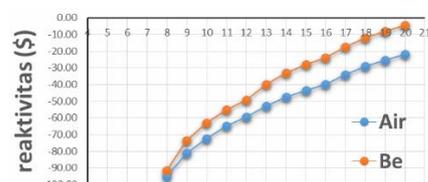


(b) Shutdown margin

Gambar 5. Reaktivitas konfigurasi satu



(a) Core excess



(b) Shutdown margin

Gambar 6. Reaktivitas konfigurasi dua

Analisis selanjutnya adalah mencari daerah optimum jumlah elemen bakar yang

dapat digunakan dalam teras pada konfigurasi awal. Pada kegiatan ini dilakukan simulasi kondisi *one stuck rod criteria* dimana teras disimulasikan berada pada kondisi dimana salah satu batang kendalinya gagal jatuh. Hasil pengujian ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Pengujian *one stuck rod criteria*

| 17 elemen bakar | Konfigurasi satu dengan teras Be | | | |
|-----------------------|----------------------------------|-------|---------------------------------|---------------------|
| | stuck rod | keff | $\Delta\text{keff}/\text{keff}$ | reaktivitas (\$) |
| | A3 | 0,989 | -0,011 | -1,494 |
| | C1 | 1,007 | 0,007 | 0,908 |
| | C5 | 0,983 | -0,017 | -2,344 |
| | E3 | 0,983 | -0,017 | -2,359 |
| 18 elemen bakar | Konfigurasi dua dengan teras Be | | | |
| | stuck rod | keff | $\Delta\text{keff}/\text{keff}$ | reaktivitas (\$) |
| | B2 | 0,986 | -0,014 | -1,904 |
| | D2 | 0,994 | -0,006 | -0,765 |
| | B4 | 0,961 | -0,041 | -5,595 |
| | D4 | 0,970 | -0,031 | -4,288 |

Dimulai pada teras dengan jumlah elemen bakar paling banyak yaitu 20 buah. Dari hasil ini diperoleh bahwa untuk konfigurasi satu dan dua, teras tanpa reflektor air mampu mempertahankan kondisi subkritis pada jumlah elemen bakar 20 buah. Sedangkan pada penggunaan reflektor Be, elemen bakar sebanyak 17 buah, batang kendali pada posisi C1 masih memberikan reaktivitas positif sebesar \$ 0,908. Sehingga kondisi teras awal yang paling aman untuk konfigurasi satu harus lebih kecil dari 17 buah elemen bakar.

Kemudian untuk konfigurasi dua, pada teras dengan reflektor, jumlah optimum elemen bakar yang masih aman untuk digunakan pada teras awal sebanyak 18 buah, dimana reaktivitas terbesar batang kendali yang tersangkut di D2 masih

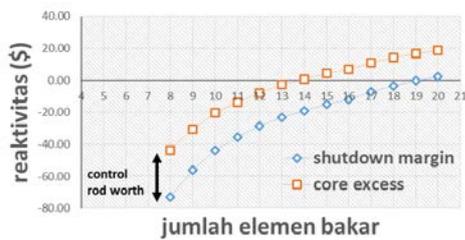
memberikan kondisi subkritis (lihat Tabel 2). Dari hasil ini konfigurasi dua dipilih untuk tahap pengujian selanjutnya, disamping konfigurasi dua juga memiliki rentang *control rod worth* yang lebih lebar daripada konfigurasi satu, hal ini terlihat dari hubungan kurva *core excess* dan *shutdown margin* masing-masing desain pada Gambar 7.

Selanjutnya pada simulasi operasi, dari konfigurasi yang dipilih, konfigurasi teras awal sebanyak 18 buah elemen bakar dengan nilai reaktivitas *core excess* \$ 13,776 dan *shutdown margin* \$ -12,155. Sistem reaktor dioperasikan dengan daya 2 MWth sampai kondisi dimana reaktor mencapai kondisi subkritis, yakni reaktivitas ≈ 1 . Pada periode ke-2 operasi, posisi elemen bakar digeser, dan ditambahkan dua buah elemen bakar baru untuk meningkatkan reaktivitas reaktor dan juga untuk memberikan kesimetrisan geometri teras untuk memudahkan proses *reshuffling* selanjutnya.

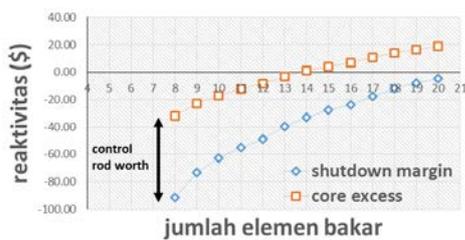
Kegiatan simulasi operasi ini dilakukan sampai beberapa kali periode simulasi, dengan terus melakukan aktivitas *reshuffling* dan *refueling* (ditunjukkan pada Gambar 8). Dan didapatkan hasil-hasil sebagai berikut :

- Konfigurasi teras awal terdiri atas 18 elemen bakar,
- Setelah periode awal, konfigurasi diisi sampai dengan 20 elemen bakar,
- Setelah periode kedua, rata-rata penggantian elemen bakar per periode operasi 8 buah elemen bakar, dengan usia pakai rata-rata 3 kali periode operasi,

- d. Reaktivitas *core excess* rata-rata setiap periode operasi, \$ 11,537.
- e. Panjang periode operasi rata-rata, 444 hari.
- f. Rapat daya rata-rata untuk semua periode operasi, $249,61 \text{ W/cm}^3$
- g. *Power peaking factor* total diperoleh sebesar, 1,238.



(a)



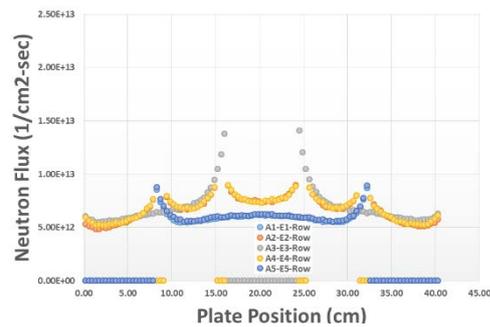
(b)

Gambar 7: (a) konfigurasi satu;
 (b) konfigurasi dua

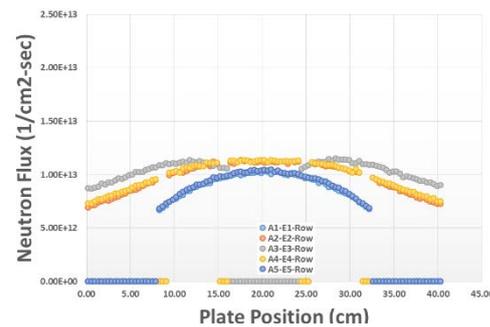


Gambar 8 Kurva kesetimbangan teras untuk 20 kali periode operasi

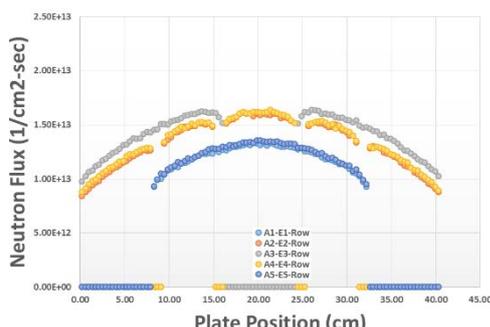
Fluks rata-rata yang mampu dicapai dari desain teras ini adalah $5,717 \times 10^{13}$ neutron.cm².s⁻¹ s.d. $6,85 \times 10^{13}$ neutron.cm².s⁻¹. Adapun distribusi fluks neutron pada arah radial ditunjukkan kurva pada Gambar 9.



(a)



(b)



(c)

Gambar 9. Distribusi fluks neutron pada arah radial: (a) fluks termal; (b) fluks intermediate; (c) fluks cepat

5. KESIMPULAN

Dari dua desain posisi batang kendali yang diujicobakan, dipilih konfigurasi dua, karena memiliki parameter kritikalitas yang lebih baik apabila dibandingkan dengan konfigurasi satu, antara lain *shutdown margin* yang lebih rendah untuk komposisi jumlah elemen bakar yang sama, sehingga memiliki nilai *control rod worth* yang lebih besar. Kemudian pada pengujian *one stuck*

rod criteria, konfigurasi dua pada komposisi 18 buah elemen bakar dengan reflektor Be masih dapat diaplikasikan untuk konfigurasi teras awal dengan reaktivitas *core excess* \$ 13.776 dan *shutdown margin* \$ -12.155, dimana reaktivitas terbesar saat batang kendali pada posisi D2 tersangkut masih memberikan nilai reaktivitas negatif sebesar \$ -0,765.

Pada pengujian manajemen teras sebanyak 20 kali periode operasi dengan daya 2 MWth didapatkan reaktivitas *core excess* rata-rata \$ 11,537, dengan jumlah penggantian rata-rata elemen bakar baru sebanyak 7 s.d. 8 buah per periode operasi.

Fluks neutron rata-rata yang mampu dicapai selama 16 kali periode $5,717 \times 10^{13} \text{neutron.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ s.d. $6,85 \times 10^{13} \text{neutron.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ Dan rapat daya reaktor sebesar 249.91 W/cm^3 .

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Taylor TB, et all. Reactor with prompt negative temperature coefficient and fuel element therefor 1958; US3127325
2. Huda MQ, et al. Benchmark analysis of the TRIGA MARK II research reactor using Monte Carlo techniques. *Annals of Nuclear Energy* 2004; 31: 1299-1313
3. Lamarsh JR, Baratta AJ. Introduction to Nuclear Engineering 3rd ed. United States of America: Prentice-Hall; 2001
4. X-5 MONTE CARLO TEAM. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory. United States of America. Los Alamos National Laboratory. 2003
5. Lyric, Zoairia Idris, Mahmood Mohammad Sayed. A study on TRIGA core reconfiguration with new irradiation channels. *Annals of Nuclear Energy* 2012; 43: 183-186
6. Sarker MM, Bhuiyan SI, Akramuzzaman MM. Neutronics analysis of the 3 MW TRIGA Mark-II research reactor by using SRAC code system. *Annals of Nuclear Energy* 2008; 35: 1140-1146
7. Tim LAK PTNBR-BATAN Bandung. Laporan Analisis Keselamatan Akhir Reaktor TRIGA 2000 Bandung Revisi 3. Bandung. 2006
8. Shultis JK. Determining axial-rod power-density profiles from in-core neutron flux measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 2005; 547: 663-678
9. Snoj L, Ravnik M. Calculation of power density with MCNP in TRIGA reactor. International Conference Nuclear Energy for New Europe. Slovenia: "Jozef Stefan" Institute; 2006
10. Snoj L, Ravnik M. Power peakings in mixed TRIGA cores. *Nuclear Engineering and Design* 2008; 238: 2473-2479
11. Surbakti T. Analisis pengaruh lebar kanal pendingin terhadap muatan bahan bakar teras RSG-GAS. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia* 2005; A(6): 0205
12. Gharib M, Arkani M, Hossnirokh A. Design and application of MTR fuel assemblies in new proposed inverted mode. *Nuclear Engineering and Design* 2010; 240: 2981-2987

