

## ESTIMASI KONFIGURASI DESAIN BATANG KENDALI DALAM PERHITUNGAN REAKTIVITAS TERAS RGTT200K

Hery Adrial

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN  
Kawasan Puspiptek, Gedung No. 80, Serpong, Tangerang 15310  
Tel. (021)756-0912, Fax. (021)756-0913, E-mail: [heryadrial@yahoo.co.id](mailto:heryadrial@yahoo.co.id)

### ABSTRAK

**ESTIMASI KONFIGURASI DESAIN BATANG KENDALI DALAM PERHITUNGAN REAKTIVITAS TERAS RGTT200K.** Batang kendali merupakan salah satu komponen yang penting dalam suatu reaktor nuklir. Batang kendali mempunyai fungsi dalam operasi reaktor nuklir untuk memadamkan reaktor. Dalam makalah ini akan dianalisis konfigurasi batang kendali RGTT200K yaitu jumlah dan ketebalan bahan penyerap neutron  $B_4C$  pada batang kendali. Tujuan penelitian ini untuk mendapatkan konfigurasi batang kendali RGTT200K yang optimum. Perhitungan teras dilakukan dengan program MCNPX setelah memodelkan seluruh bagian teras dengan detail (3-D). Perhitungan dilakukan untuk 4, 6, 8 dan 10 jumlah batang kendali dengan ketebalan bahan penyerap neutron  $B_4C$  divariasikan dari 2,25 cm, 2,75 cm hingga 3,25 cm. Melalui ekstrapolasi data perhitungan dan pertimbangan perubahan reaktivitas yang terjadi di teras RGTT200K maka diperoleh jumlah batang kendali optimum adalah 15 batang

Kata Kunci: RGTT200K, perubahan reaktivitas, batang kendali, ekstrapolasi

### ABSTRACT

**ESTIMATION ON CONFIGURATION OF CONTROL RODS DESIGN IN CORE REACTIVITY CALCULATION FOR RGTT200K.** Control rod is one important component in a nuclear reactor. The control rods has a function in nuclear reactor operations shut down the reactor. In this paper, the configuration of RGTT200K's control rod will be analyzed, i.e, the number and thickness of the neutron absorber material of  $B_4C$  in the control rods. The purpose of this study is to obtain the optimum control rod configuration in RGTT200K. Core calculations performed by using MCNPX code after modeling the entire parts of core in detail (3-D). The Calculations carried out for the number of control rods 4, 6, 8 and 10 with  $B_4C$  neutron absorber material thickness varied from 2.25 cm, 2.75 cm to 3.25 cm. Through extrapolation of calculation existing data and consideration of reactivity changes in RGTT 200K then the optimum number of control rods obtained is 15 rods

Keywords: RGTT200K, changes in reactivity, control rod, extrapolation

### PENDAHULUAN

RGTT200K merupakan konsep reaktor gas temperatur tinggi yang sedang diteliti di Indonesia. RGTT200K merupakan reaktor generasi IV yang telah menerapkan *inherent safety* (keselamatan melekat). Adanya keselamatan melekat pada RGTT200K disebabkan sebagian besar komponen RGTT200K terbuat dari bahan karbon atau graphite yang mempunyai sifat menyerap neutron[1]. Dengan teraplikasinya keselamatan melekat pada RGTT200K maka reaktor akan mempunyai reaktivitas negatif sehingga aman dalam kondisi kecelakaan apapun.

Teraplikasinya keselamatan melekat pada RGTT200K tidak akan menghilangkan keberadaan batang kendali di teras RGTT200K. Peran dan fungsi batang kendali dalam reaktor nuklir sangat diperlukan untuk pemadaman reaktor secara manual. Oleh karena itu pada RGTT200K keberadaan batang kendali tetap harus ada. Batang kendali harus didesain sedemikian rupa agar secara otomatis dapat keluar masuk teras reaktor. Jumlah dan posisi konfigurasi batang kendali harus diestimasi agar batang kendali dapat difungsikan dengan baik.

Jika pula jumlah neutron di dalam teras reaktor melebihi jumlah yang diizinkan dalam kondisi kritis, maka batang kendali akan dimasukkan ke dalam teras reaktor untuk menyerap sebagian neutron sehingga tercapai kondisi kritis. Bila insersi batang kendali menyebabkan jumlah neutron pada teras di

bawah kondisi kritis (subkritis) sehingga teras reaktor kekurangan jumlah neutron maka batang kendali akan dikeluarkan dari teras reaktor untuk mengembalikan keadaan menuju kondisi kritis agar reaktor dapat beroperasi. Dengan asumsi RGTT200K kritis pada  $k_{\text{eff}}$  1,05 dan shutdown pada  $k_{\text{eff}}$  0,98[2] maka insersi batang kendali untuk dapat memadamkan operasi reaktor (shutdown) akan membutuhkan perubahan reaktivitas negatif batang kendali sebesar  $-6.80272 \% \Delta k/k$ .

Penelitian mengenai RGTT200K tentang pengaruh fraksi *pebble* terhadap reaktivitas doppler telah dilakukan, yang menghasilkan reaktivitas doppler maksimal terjadi pada fraksi *pebble* 62,5% dengan nilai reaktivitas doppler sebesar  $-3,13E-05$ [3] , demikian pula penelitian tentang perhitungan koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar akibat berbagai pengkayaan juga telah dilakukan, hasil penelitian memberikan pengkayaan terbaik untuk mendapatkan koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (negatif) yang paling besar berada pada pengkayaan 10% [4]. Untuk melanjutkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan maka perlu dilakukan penelitian untuk mendapatkan reaktivitas batang kendali dan estimasi jumlah batang kendali agar RGTT200K berada pada keadaan subkritis bila dilakukan insersi batang kendali secara terbenam penuh (*fully down insertion*). Agar didapat perubahan reaktivitas batang kendali yang cukup besar maka ketebalan bahan  $B_4C$  divariasikan dari ketebalan 2,25 cm sampai 3,25 cm

Oleh karena itu tujuan dari makalah ini adalah untuk mengestimasi jumlah batang kendali yang dapat diterapkan secara optimum pada teras RGTT200K dengan menganalisa perubahan reaktivitas batang kendali RGTT200K terhadap variasi ketebalan  $B_4C$  pada batang kendali saat insersi batang kendali secara terbenam penuh. Analisa dibuat terhadap hasil perhitungan menggunakan MCNPX code dengan pustaka tampang lintang enetrgi koninu ENDF/B-VII pada temperatur 300 K, sedangkan variasi ketebalan dibuat dengan memperkecil radius dalam kosentris batang kendali

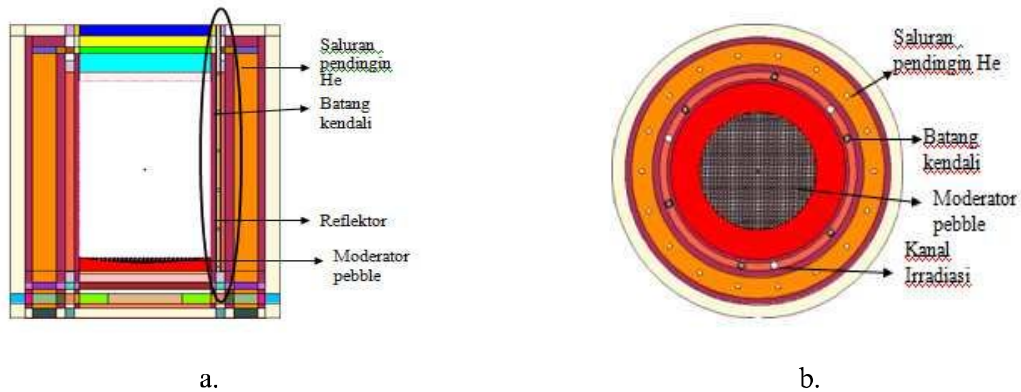
## DESKRIPSI TERAS DAN BATANG KENDALI RGTT200K

RGTT200K merupakan salah satu jenis reaktor gas temperatur tinggi yang mempunyai bahan bakar dan moderator berbentuk *pebble* dengan fluida pendingin terbuat dari gas helium. RGTT200K mempunyai konstruksi berbentuk silinder dengan dasar silinder berbentuk corong. Pada corong silinder diisi dengan moderator *pebble* yang mempunyai radius 3 cm. Teras aktif RGTT200K mempunyai tinggi 943 cm dengan diameter teras sebesar 300 cm. Radius teras RGTT secara keseluruhan termasuk reflektor, sistem saluran pendingin serta batang kendali adalah 500 cm. Saluran pendingin pada RGTT200K berjumlah 18 saluran. Banyaknya batang kendali akan dianalisis kebutuhannya dalam penelitian, sedangkan konfigurasi batang kendali berbentuk simetris pada teras RGTT200K dan posisi batang kendali ditetapkan berada diantara daerah reflektor dan saluran pendingin.

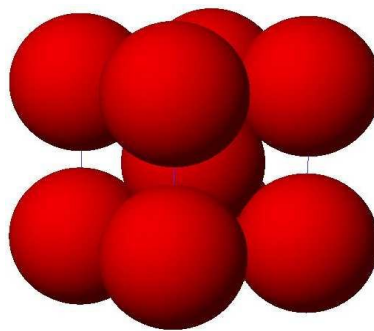
RGTT200K merupakan salah satu desain reaktor yang menerapkan azas *inherent safety* (keselamatan melekat). Dengan menerapkan azas keselamatan melekat maka RGTT200K didesain mempunyai reaktivitas negatif. Agar reaktivitas negatif terpenuhi maka material RGTT200K sebagian besar terbuat dari bahan graphite,. Demikian pula material reflektor juga terbuat dari graphite. Konstruksi RGTT200K dapat dilihat pada Gambar 1.

Dalam penelitian ini, teras RGTT200K seluruhnya diisi dengan *pebble* bahan bakar yang mempunyai radius 3 cm. *Pebble* bahan bakar di dalam teras dimodelkan tersusun dalam bentuk kisi BCC. Seperti yang disajikan pada Gambar 2

Setiap *pebble* mempunyai 11000 sampai dengan 15000 partikel TRISO[5,6], yang berfungsi untuk menjaga integritas struktur *pebble* dan mencegah terjadinya pelepasan produk fisi yang dimodelkan berbentuk kisi *Simple Cubic* (SC)



Gambar 1. Konstruksi RGTT200K dibuat berdasarkan VISED  
a. Konstruksi tampak samping b, Konstruksi tampak atas



Gambar 2. Model bahan bakar dalam struktur BCC

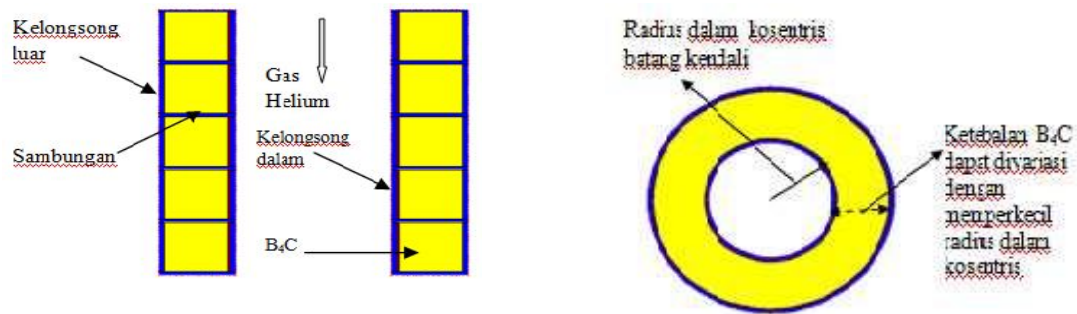
Partikel TRISO terdiri dari kernel bahan bakar yang dilapisi 4 lapisan yaitu: lapisan *Carbon buffer* (lapisan penyangga), lapisan IPyC (lapisan pirokarbon dalam), lapisan SiC (lapisan silikon karbonat) dan lapisan OPyC (lapisan pirokarbon luar). Kernel bahan bakar terdiri dari  $UO_2$  yang diperkaya 5-15 % U-235. Spesifikasi teknis bahan bakar *pebble* dapat dilihat pada Tabel 1. Sedangkan model lapisan TRISO pada bahan bakar berdasarkan hasil program VISED dapat dilihat pada Gambar 3

Tabel 1. Spesifikasi bahan bakar *pebble* RGTT200K[7]

TIPE KERNEL	UO <sub>2</sub>	
Pengkayaan U-235 %	5 - 15	
Diameter kernel cm	0,050	
Densitas kernel, g/cm <sup>3</sup>	10,40	
LAPISAN TRISO <sup>[8]</sup>	Diameter dari dalam kernel keluar (cm) / tebal (cm)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )
Lapisan penyangga karbon berpori ( <i>buffer</i> )	0,0340/0,0090	1,05
Lapisan dalam piro karbon (IPyC)	0,0380/0,0040	1,90
Lapisan Silikon Karbida(SiC)	0,0415/0,0035	3,18
Lapisan luar piro karbon(OPyC)	0,0455/0,0040	1,90

Gambar 3. Model partikel TRISO pada bahan bakar *pebble* tersusun dalam kisi SC berdasarkan program VISED

Untuk batang kendali, desain RGTT200K telah menetapkan posisi batang kendali berada di daerah antara reflektor dan saluran pendingin helium yaitu pada jarak radial 156 cm sampai dengan 169 cm. Dengan demikian desain RGTT200K menyediakan diameter kanal batang kendali adalah 13 cm. Material penyerap neutron pada batang kendali yang digunakan terbuat dari bahan  $B_4C$  yang dilapisi oleh kelongsong terbuat dari *Stainless Steel* (SS). Batang kendali didesain dalam bentuk silinder kosentris dengan radius dalam diisi oleh gas pendingin helium. Radius luar kelongsong sebesar 3,25 cm, panjang batang kendali 1070,7 cm dan terbagi dalam 5 segmen piringan. Tinggi setiap segmen adalah 194,8 cm. Masing-masing segmen dihubungkan dengan material penghubung (*joint material*) yang terbuat logam SS dari seperti pada Gambar 4.



a. Tampak samping

b. Tampak atas

Gambar 4. Konstruksi batang kendali RGTT200K hasil program VISED

Sedangkan material yang menyusun batang kendali dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komponen, komposisi, densitas, geometri dan deskripsi batang kendali RGTT200K[9]

No	Komponen	Komposisi	% Berat	Densitas
1	Bahan penyerap neutron	$B_4C$	-	2,54 gram/cc
2	Kelongsong stainless Steel	Cr Fe Ni Si Mn C Ti	18 % 68.1 % 10 % 1% 2 % 0.1 % 0.8 %	7,9 gram/cc
3	Sambungan ,penutup atas dan bawah	Fe	-	0,04 atom/barn-cm
	Deskripsi	Nilai	Satuan	
4	Radius kanal batang kendali	6,5	cm	
5	Posisi kanal radial dari pusat	162.5	cm	
6	Tinggi batang kendali	1070,7	cm	
7	Ketebalan kelongsong luar dan dalam SS	0,2	cm	
8	Ketebalan gap antara kelongsong dan $B_4C$	0,05	cm	
9	Ketebalan annulus $B_4C$	2,25 -5,225	cm	

## METODOLOGI

Agar didapat jumlah batang kendali optimum pada RGTT200K maka diperlukan langkah-langkah :

- Membuat model RGTT dengan beberapa kanal batang kendali yaitu 4, 6, 8 dan 10 kanal dengan radius kanal batang kendali sebesar 6,5 cm sebagai syarat batas.
- Memasukkan batang kendali ke dalam model RGTT tersebut, batang berbentuk silinder kosentris. Diantara radius luar dan dalam akan diisi oleh B<sub>4</sub>C. Jarak antara ke radius dalam dan luar (ketebalan B<sub>4</sub>C) divariasikan 2,25 cm, 2,75 cm dan 3,25 cm
- Melakukan perhitungan  $k_{\text{eff}}$  untuk variasi ketebalan B<sub>4</sub>C untuk insersi batang kendali terbenam penuh dan terangkat penuh dengan menggunakan MCNPX untuk ketebalan B<sub>4</sub>C masing –masing 2,25 cm, 2,75 cm dan 3,25 cm dan banyak batang kendali 4, 6, 8 dan 10
- Menghitung perubahan reaktivitas batang kendali untuk masing-masing ketebalan B<sub>4</sub>C dan masing-masing jumlah batang kendali
- Membuat persamaan regresi linier perubahan reaktivitas batang kendali terhadap jumlah batang kendali untuk masing-masing ketebalan B<sub>4</sub>C .
- Melakukan esktrapolasi linier untuk mendapatkan jumlah batang kendali pada masing-masing ketebalan B<sub>4</sub>C, dimana nilai perubahan reaktivitas batang kendali sebesar  $-6.80272 (\% \Delta k/k)$  sebagai acuan harus tercapai.
- Menghitung jumlah batang kendali yang diperlukan melalui ekstrapolasi ketebalan B<sub>4</sub>C dimana syarat batas ketebalan sama dengan radius kanal bahan bakar (belum termasuk ketebalan kelongsong dan ketebalan gap).

Dalam penelitian ini terlebih dahulu membuat model RGTT200K yang dilengkapi dengan kanal-kanal pendingin He sebanyak 18 buah , reflektor, kanal-kanal batang kendali dan moderator pebble pada corong bawah RGTT200K dengan titik pusat (original point ) berada di koordinat (0,0,0). Jumlah kanal-kanal batang kendali yang dibuat adalah 4, 6, 8, dan 10 dengan asumsi batang kendali pertama berada pada posisi 20° dari pusat teras. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan code program MCNPX tanpa menggunakan fasilitas imp:n, agar program dapat *di running* dan diilustrasikan dengan menggunakan paket program VISED. Hasil running dan ilustrasi Vised seperti yang telah diperlihatkan pada Gambar 1 a dan 1 b. Apabila hasil keluaran VISED telah sesuai, maka dibuat program tambahan untuk mengisi teras RGTT200K dengan bahan bakar *pebble* pada code program MCNPX. *Pebble-pebble* bahan bakar di dalam teras dimodelkan dalam bentuk kisi SC sedang partikel TRISO di dalam pebble dimodelkan dalam bentuk kisi SC

Untuk perhitungan  $k_{\text{eff}}$  digunakan code program MCNPX dengan menggunakan fasilitas imp:n pada kartu cell. Fasilitas KCODE yang digunakan adalah 5000 1.0 10 110 yang berarti jumlah neutron dipakai pada setiap siklus adalah 5000 neutron, sedangkan  $k_{\text{eff}}$  awal adalah 1.0. Jumlah siklus yang dilompati sebelum akumulasi  $k_{\text{eff}} = 1.0$  adalah 10 dan jumlah putaran pengurangan adalah 110 putaran. Adapun fasilitas KSRC diisi dengan 0 0 0 yang berarti, sumber neutron yang digunakan ditempatkan pada posisi koordinat (0,0,0). Dalam penggunaan MCNPX, teras RGTT200K dalam keadaan temperatur 300 K dan pustaka tampang lintang energi kontinu yang digunakan berasal dari ENDF/B-VII

Perhitungan  $k_{\text{eff}}$  dengan menggunakan MCNPX dilakukan dengan variasi ketebalan B<sub>4</sub>C, yang masing-masing setebal 2,25 cm, 2,75 cm dan 3,25 cm. Untuk masing-masing ketebalan B<sub>4</sub>C, batang kendali diinsersi dalam keadaan terangkat penuh (*Fully-up*) pada posisi 0 cm dan terbenam penuh (*Fully down*) pada posisi 1070,7 cm. Untuk mengantisipasi *feedback* (umpan balik) reaktivitas, maka  $k_{\text{eff}}$  RGTT200K ditetapkan sebesar 1,05. Pada setiap posisi insersi batang kendali, nilai  $k_{\text{eff}}$  dihitung untuk jumlah batang kendali pada teras RGTT200K sebanyak 4, 6, 8, dan 10 batang kendali. Hasil nilai  $k_{\text{eff}}$  pada 4, 6,8 dan 10 batang kendali untuk masing-masing ketebalan digunakan untuk

mengestimasi jumlah batang kendali yang diperlukan agar RGTT200K berada pada keadaan subkritis yaitu dengan  $k_{\text{eff}}=0,98^{[10,2]}$ , bila seluruh batang kendali terbenam penuh (*Fully down*).

Perhitungan reaktivitas dilakukan dengan mempergunakan persamaan :

$$\rho = \frac{(k_{up} - k_{down})}{(k_{up} k_{down})} \times 100 \% \quad (1)$$

dengan :

$\rho$  = Reaktivitas batang kendali

$k_{up}$  = Nilai  $k_{\text{eff}}$  pada saat batang kendali terangkat penuh

$k_{down}$  = Nilai  $k_{\text{eff}}$  pada saat batang kendali terbenam penuh

Estimasi jumlah batang kendali dilakukan dengan ekstrapolasi dari perubahan reaktivitas teras pada saat kritis maupun subkritis (*shutdown*). Persamaan ekstrapolasi linier digunakan karena pada persamaan linier selalu memotong sumbu-sumbu koordinat X dan Y, sedangkan bentuk persamaan lain belum tentu memotong sumbu-sumbu koordinat X dan Y

## HASIL DAN PEMBAHASAN

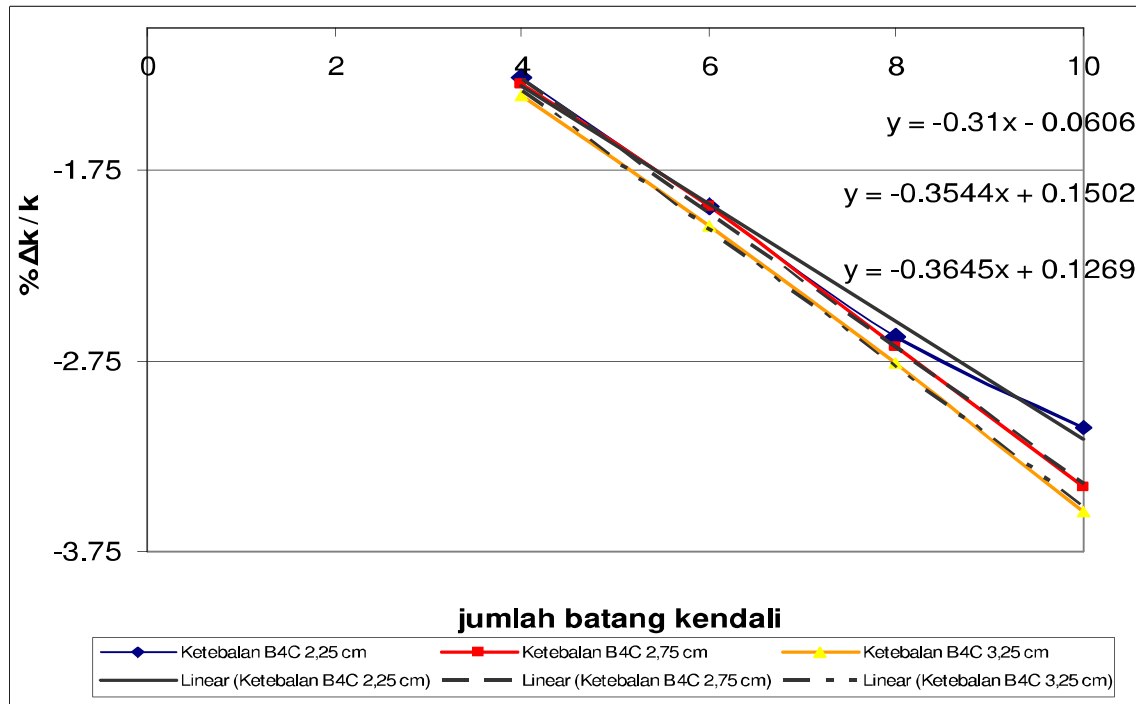
Dengan mempergunakan persamaan (1) nilai perubahan reaktivitas batang kendali dapat dihitung. Untuk nilai  $k_{\text{eff}}$  terangkat penuh (*fully-up*) maupun terbenam penuh (*fully-down*) hasil perubahan reaktivitas batang kendali dapat dilihat pada Tabel 3,

Tabel 3. Reaktivitas batang kendali RGTT200K untuk variasi jumlah dan ketebalan batang kendali

No	Ketebalan B <sub>4</sub> C batang kendali (cm)	Perubahan Reaktivitas batang kendali (% $\Delta k/k$ )			
		4 batang kendali posisi 90°	6 batang kendali posisi 60°	8 batang kendali posisi 45°	10 batang kendali posisi 36°
1	2.25	-1.26	-1.93	-2.63	-3.10
2	2.75	-1.30	-1.94	-2.67	-3.42
3	3.25	-1.3	-2.04	-2.76	-3.54

Dari Tabel 3, dapat diketahui bahwa untuk seluruh data dihasilkan perubahan reaktivitas batang kendali yang bernilai negatif dan semakin banyak jumlah batang kendali yang dipasang pada teras RGTT200K maka perubahan reaktivitas negatif batang kendali akan semakin membesar. Dengan semakin banyaknya jumlah batang kendali yang masuk ke teras RGTT200K maka semakin besar pula jumlah volume B<sub>4</sub>C yang masuk ke teras RGTT200K. Demikian pula bila ketebalan B<sub>4</sub>C batang kendali diperbesar, perubahan reaktivitas batang kendali akan semakin membesar dan jumlah B<sub>4</sub>C yang masuk ke teras RGTT200K akan semakin besar. B<sub>4</sub>C merupakan material penyerap neutron, dengan semakin banyaknya jumlah B<sub>4</sub>C yang masuk ke teras maka semakin besar pula neutron yang diserap. Dari Tabel.3 terlihat bahwa nilai perubahan reaktivitas yang maksimal yang dihasilkan terjadi pada ketebalan B<sub>4</sub>C sebesar 3,25 cm dan jumlah batang kendali yang diinsersi secara fully down ke teras RGTT200K adalah 10 batang kendali. Dengan demikian bila dilakukan ekstrapolasi linier dengan menambah ketebalan B<sub>4</sub>C dan memperbanyak jumlah batang kendali pada teras RGTT200K maka akan didapat perubahan reaktivitas negatif batang kendali yang semakin membesar.

Ilustrasi membesarnya reaktivitas batang kendali dan bentuk persamaan linearnya diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva ekstrapolasi reaktivitas terhadap jumlah batang kendali.

Dari Gambar 4 terlihat bahwa semakin besar jumlah batang kendali maka semakin besar pula gradient (kemiringan) dari persamaan garisnya. Hal ini mengindikasikan semakin besar jumlah batang kendali maka semakin besar pula perubahan reaktivitas negatif batang kendalinya.

Melalui persamaan (1) akan didapat perubahan reaktivitas yang dibutuhkan untuk menurunkan kondisi kritis dengan  $k_{\text{eff}}$  sebesar 1.05 menjadi kondisi subkritis dengan  $k_{\text{eff}}$  sebesar 0,98. Perubahan reaktivitas yang dibutuhkan adalah -6.80272. Dengan memasukkan perubahan reaktivitas yang dibutuhkan ke persamaan-persamaan garis yang dihasilkan dari kurva ekstrapolasi reaktivitas terhadap jumlah batang kendali maka akan didapat jumlah batang kendali yang diperlukan pada teras RGTT200K berdasarkan ketebalan  $B_4C$ , seperti yang ditunjukkan Tabel 4

Tabel 4. Estimasi jumlah batang kendali terhadap ketebalan  $B_4C$

No	Ketebalan $B_4C$	Estimasi jumlah batang kendali
1	2.25	21.75071
2	2.75	19.64046
3	3.25	19.03495

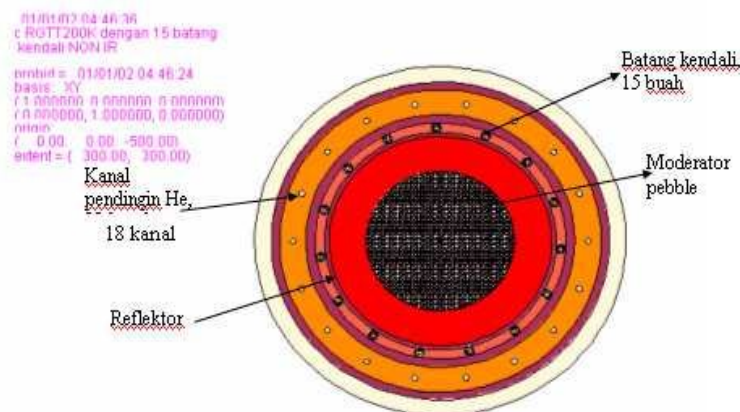
Dari Tabel 4 dibuat hubungan antara ketebalan  $B_4C$  dengan jumlah batang kendali, sehingga akan didapat persamaan garis  $Y = -2,715 X + 27,61$ . Parameter Y menunjukkan ketebalan  $B_4C$  sedang parameter X menunjukkan jumlah batang kendali. Sehingga dengan menggunakan persamaan garis lurus  $Y = -2,715 X + 27,61$ , ekstrapolasi persamaan garis tersebut akan menghasilkan estimasi jumlah batang kendali yang dibutuhkan RGTT200K. Estimasi akhir menunjukkan untuk variasi ketebalan  $B_4C$  dari 2,25 cm sampai dengan 5,25 cm maka RGTT200K memerlukan jumlah batang kendali 14 batang kendali untuk  $B_4C$  5,25 cm sampai 22 batang kendali untuk ketebalan  $B_4C$  2,25 cm, seperti pada Tabel 5

Tabel 5. Estimasi jumlah batang kendali terhadap ketebalan B<sub>4</sub>C

No	Ketebalan B <sub>4</sub> C	Estimasi jumlah batang kendali
1	3.75	17.42875
2	4.25	16.07125
3	4.75	14.71375
4	5.25	13.35625

Ketebalan sebesar 5,25 cm merupakan ketebalan maksimum B<sub>4</sub>C yang dapat mengisi penuh batang kendali RGTT200K tanpa adanya pendingin helium pada batang kendali. Hal ini disebabkan RGTT200K hanya mempunyai radius saluran batang kendali sebesar 6,5 cm serta ketebalan kelongsong batang kendali 0,2 cm dan ketebalan gap 0,02 cm.

Berdasarkan data penurunan perubahan reaktivitas batang kendali maupun dengan memperhitungkan adanya *excess* reaktivitas (reaktivitas lebih) yang terjadi pada teras RGTT200K maka jumlah batang kendali yang optimum pada RGTT adalah 15 batang kendali dan ketebalan B<sub>4</sub>C maksimum adalah 5,25 cm yang berarti batang kendali akan berbentuk silinder pejal dengan posisi konfigurasi batang kendali simetris pada teras RGTT200K . Dengan menetap 15 batang kendali pada RGTT maka posisi estimasi konfigurasi batang kendali pada teras RGTT200K dapat dilihat pada Gambar 5 .



Gambar 5. Estimasi posisi konfigurasi 15 batang kendali pada teras RGTT200K

## KESIMPULAN

Inseri batang kendali pada RGTT200K menghasilkan perubahan reaktivitas negatif, semakin banyak inseri batang kendali ke dalam teras reaktor maka semakin besar perubahan reaktivitas negatif batang kendali yang terjadi.

Semakin tebal B<sub>4</sub>C pada batang kendali maka semakin besar perubahan reaktivitas negatif. Dari hasil perhitungan dengan menggunakan MCNPX perubahan reaktivitas batang kendali pada RGTT200K untuk 4, 6, 8 dan 10 batang kendali terbenam penuh dan terangkat penuh terjadi pada ketebalan B<sub>4</sub>C 3,25 cm yaitu -1.3 %Δk/k, -2.04%Δk/k, -2.76 %Δk/k, -3.54339 %Δk/k

Dari hasil ekstrapolasi dapat diestimasi jumlah batang kendali yang optimum dibutuhkan RGTT200K adalah 15 batang kendali dengan konstruksi batang kendali berbentuk silinder pejal yang terisi penuh B<sub>4</sub>C dengan letak posisi konfigurasi batang kendali simetri pada teras RGTT200K



## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Ir. Zuhair, M.Eng, Ir. Suwoto dan Ir. Tagor M. Sembiring yang memberikan inspirasi dan ide dalam penulisan makalah ini. Dorongan semangat, diskusi dan saran sangat kami harapkan .

## DAFTAR PUSTAKA

1. M. DHANDHANG PURWADI, "Desain Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT, Prosiding Seminar Nasional ke-16 tentang Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir, Surabaya, p.16-17,8 Juli 2010.
2. Wu Yuanqiang, Diao Xingzhong \*, Zhou Huizhong, Huang Zhiyong, "Design And Tests For The HTR-10 Control Rod System" Nuclear Engineering and Design 218 ,p.147–154. 2002
3. HERY ADRIAL, "Efek Fraksi Pebble Dalam Perhitungan Koefisien Reaktivitas Doppler RGTT200K", Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir 2013, PTNBR – BATAN, Bandung, 4 Juli 2013
4. HERY ADRIAL, " Analisis Karakteristika-Koefisien Reaktivitas Temperatur RGTT200K Dengan Berbagai Pengayaan Bahan Bakar". Prosiding Seminar Nasional ke-18 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, p.93-95,Bandung, 29 September 2012
5. ANDREW C, KADAK, DAVID A, PETTI, et all, "Modular Pebble Bed Reactor", Annual Report, INEEL/EXT-2000-01034, MIT-ANP-PR-075,p.29-30, July 2000.
6. EDWIN S, LYMAN, "The Pebble-Bed Modular Reactor (PBMR): Safety Issues", Physics and Society, Vol, 30, No 4,p.1, October 2001.
7. SUWOTO, ZUHAI DAN MAMAN MULYAMAN, "Analisis Sensitivitas Parametrik Dalam Perhitungan Kritikalitas Sel Kisi Kernel Bahan Bakar RGTT Menggunakan Program Monte Carlo MCNP.5", Prosiding Seminar Nasional ke-16 tentang Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir, Surabaya, p.191, 28 Juli 2010.
8. ANDREW C. KADAK, MARTIN Z. BAZANT, " Pebble Flow Experiments For Pebble Bed Reactors", 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, p.3, September 22-24, 2004
9. William K. Terry, et all, " Evaluation of The Initial Critical Configuration of The HTR-10 Pebble-bed reactor", Gas Cooled (Thermal) Reactor – GCR HTR10-GCR-RESR-001 CRIT-REAC,p.15, NEA/NSC/DOC, March 31, 200
10. F. AZIZ DAN AS NATIO LASMAN , "Analisis Pasca-Kritikalitas Pertama Reaktor Temperatur Tinggi HTR-10 China", Prosiding Lokakarya Komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir XII, ISSN: 08539812, Serpong,, 4-5 Juli, 2001.
11. FERHAT AZIZ, "Perhitungan *Benchmark* Nilai Reaktivitas Elemen Kendali Reaktor Temperatur Tinggi Htr-10", Prosiding Lokakarya. Komputasi Dalam Sains Dan Teknologi Nuklir XV. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, Jakarta, 14 Juli 2004
12. Yukio Tachibana\*, Hiroaki Sawahata, Tatsuo Iyoku, Toshio Nakazawa, "Reactivity Control System Of The High Temperature Engineering Test Reactor", Nuclear Engineering and Design 233, p. 89–10, 2004.
13. Kiyonobu YAMASHITA , Isao MURATA , Ryuichi SHINDO , Kazumi TOKUHARA, Heinz WERNER , "Analysis of Control Rod Reactivity Worths for AVR Power Plant at Cold and Hot Conditions", Journal of Nuclear Science and Technology, 31:5, 470-478, DOI: 15 Mar 2012.

---

**DISKUSI / TANYA JAWAB :**

PERTANYAAN : (Sihana, Universitas Gajah Mada)

- Apakah hasil regresi jumlah batang kendali yang saudara dapat sebanyak 15 batang kendali sudah dicoba cek dengan memakai MCNPX ? bagaimana hasilnya.

JAWABAN : (Hery Adrial, PTRKN-BATAN)

- Pada makalah ini Perhitungan  $k_{eff}$  yang didapat sudah memakai MCNPX dan dari hasil regresinya dibutuhkan 15 batang kendali pada teras RGTT200K, sedangkan perhitungan ulang untuk memastikan hasil yang didapat dengan memakai inputan 15 batang kendali menggunakan MCNPX belum dilakukan. Diperkirakan akan ada pergeseran jumlah batang kendali dari hasil perhitungan ulang tersebut.

PERTANYAAN : (Sumijanto, PTRKN-BATAN)

- Bagaimana kalau material pengisi batang kendali dari  $B_4C$  diganti dengan B (boron), Apa pendapat anda. Catatan B merupakan unsur penyerap neutron.

JAWABAN : (Hery Adrial, PTRKN-BATAN)

- Boron merupakan salah satu unsur yang baik untuk menyerap neutron. Di alam boron tidak pernah ditemukan dalam bentuk murni (bebas). Di alam boron muncul sebagai campuran isotop B-10 sebanyak 19,78 % dan isotop B-11 sebanyak 80,22 % Boron merupakan salah satu unsur golongan IIIA dengan nomor atom lima yang memiliki sifat diantara logam dan nonlogam (semimetalik). Sebagai unsur golong IIIA boron merupakan unsur yang kekurangan elektron, dan mempunyai p-orbital yang kosong sehingga boron bersifat elektrofilik yang mempunyai kecenderungan untuk mendapatkan elektron. Dengan demikian boron selalu mempunyai kecenderungan bersenyawa dengan unsur lain yang bersifat donor elektron..